Print ISSN 1906-0874 Online ISSN 2651-2130

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

UTK RESEARCH JOURNAL

ปีที่ 18 เล่มที่ 2 กรกฎาคม- ธันวาคม 2567

Vol. 18 No. 2 July- December 2024

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

โทรศัพท์ 02 287 9600 ต่อ 3115

https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม- ธันวาคม 2567 Vol 18 No.2 July – December 2024

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทร์มณี	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศาสตราจารย์ญาณวิทย์ ดร.อลงกลด แทนออมทอง	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี	กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
ศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ	กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
ดร.สิริเบญจา กอวัฒนา	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิระ ขอจิตต์เมตต์	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ บุตรดี	ที่ปรึกษาอาวุโส
รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุดเจือจีน	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศิวาวุธ	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ สงวนพวก	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ดร.ประภาพร ร้อยพรมมา	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก บุญธรรม	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ ง้าวสุวรรณ	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงส์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ประสาท เนืองเฉลิม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล เย็นฤดี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟ้าใส วิวัฒน์วงศ์วนา	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพงษ์ สว่างศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คณะวาปี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ พลอัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบศักดิ์ กาญจนาพงศ์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลมาศ บำรุงเศรษฐพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิชญ์ จันทร์ฉาย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์	มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวธัญญ์นรี อุเทน	นางวิไรรัตน์ ราษฎร์สภา
นางนาฏนภา จรเข้	นางจันทนา สังข์อู๋
นายณรงค์ศักดิ์ วิสุทธิแพทย์	นางสาวอัจฉรา จินดาจำนง
นางสาววันทนา ประณิธานธรรม	นายวันนิวัติ วันทนา
นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา	นางสาวพัชรินทร์ พัฒนโภครัตนา
นางสาวนุชนารถ สิมมาลา	

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนกองบรรณาธิการ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 8 -12 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณากลั่นกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน 3 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ จัดทำวารสารเป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่ออ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่
    - 1.1. Environment Chemistry
    - 1.2. General Engineering
    - 1.3. Applied Mathematics
    - 1.4. Renewable Energy, Sustainabillity and the Environment
    - 1.5. Biomaterials
2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าไปสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอดและเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัย งานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนองต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณากลั่นกรองคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียนแต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์มิให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ ไปเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร

ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความซึ่งได้ระบุไว้ในเล่มวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ หรือ https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk และสามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0 2286 9600 ต่อ 3115
E-mail: utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th
https://www.rdi.rmutk.ac.th

กำหนดการเผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)
ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม

การเผยแพร่ เผยแพร่ผ่านระบบออนไลน์
https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

สารบัญ

		หน้า
1	**การพัฒนาโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์สำหรับการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ** Development of Artificial Intelligence (AI) for urothelial carcinoma detection สุชาดา เกตุดี ทิวาพร เทศสวัสดิ์วงศ์	1
2	**การศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินปั้นที่ใช้ในงานประดิษฐ์** **Study of the chemical and physical properties of clay used in crafts** นภารัตน์ พวงมาลัย ดลพร นิลบรรจง โสภิดา วิศาลศักดิ์กุล	14
3	**การหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา** **Optimization for Reduction condition of Free Fatty Acid in Coconut Oil via Esterification Using Amberlyst 15 as a Catalyst** ศิรดา คชสวัสดิ์ จิรภา ใจดี ศศิวิมล วุฒิกนกกาญจน์ กนกพร บุญทรง อิ่มหรอน ทิ้งผอม ปิยนุช นาคพงศ์	28
4	**Assessment of Occupational Heat Exposure among Power Plant Workers in the Context of Climate Change** Somboon Chaiprakarn, Chanakarn Sakulthaew, Mongkol Ratcha and Panudet Saengseedam	41

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

สารบัญ

		หน้า
5	**ผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x + (p + 3n)^y = z^2$ เมื่อ $p, p + 3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ และ n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ** **On the solutions of the Diophantine equation $p^x + (p + 3n)^y = z^2$ where $p, p + 3n$ are Primes and n is a non-negative integer** ศิริจันทร์ เวสารัชศาต กตัญญู บุญชุ่มใจ	56
6	**ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก** **Relationship between the deflection and the dead weight of steel pallets** กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข นนท์ แสนคำแพ ประสงค์ อิงสุวรรณ อำนาจ ตงติ๊บ ชวลิต คณากรสุขสันต์	64
7	**ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง** **Effect of O2 Flow Rate on Structure of Zirconium Oxynitride Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering Method** จินดาวรรณ จันทมาส สิรีพัชร แสงสว่าง	73
8	**การทดลองหาประสิทธิภาพและการพัฒนาเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มผลผลิตและประหยัดพลังงาน** Efficiency Testing of Semi-Automatic Brown Rice Water and Making Machine Development to Increase Production and Save Energy รัชดาศักดิ์ สุเพ็งคำ สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์	82
	คำแนะนำสำหรับผู้เขียน	96

วารสารวิจัย UTK ราชมงคลกรุงเทพ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

การพัฒนาโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์สำหรับการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ

Development of Artificial Intelligence (AI) for urothelial carcinoma detection

สุชาดา เกตุดี[1*], ทิวาพร เทศสวัสดิ์วงศ์[2]

Suchada Katedee[1*], Thiwaporn Thesawadwong[2]

[1*] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[2] สถาบันมะเร็งแห่งชาติ กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข

[1*] Major of Computer Engineering, Faculty of Industrial Education,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

[2] National Cancer Institute, Department of Medical Services, Ministry of Public Health

[*] Corresponding Author: Email: suchada.k@rmutp.ac.th Tel.: 0841318664

Received: 24-10-2024 ***Revised:*** 2-12-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์ หรือโปรแกรมเอไอสำหรับตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ ชนิด urothelial carcinoma โดยการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการอ่านผลเซลล์วิทยาของปัสสาวะ เพื่อช่วยให้สามารถวิเคราะห์และจำแนกเซลล์กระเพาะปัสสาวะ (urothelial cells) ตามเกณฑ์ของ The Paris System for Reporting Urinary Cytology, version 2.0 โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network, CNN) โดยเลือกใช้อัลกอริทึมเดนซ์เน็ต (DenseNet121) เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับเป็นแบบจำลอง (model) ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมเอไอ โดยใช้ข้อมูลเซลล์กระเพาะปัสสาวะจากสถาบันมะเร็งแห่งชาติในการสร้างชุดฝึกสอนชุดตรวจสอบและชุดทดสอบแบบจำลอง ผู้วิจัยประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยการหาค่าความไว (sensitivity) ค่าความจำเพาะ (specificity) ค่าความถูกต้อง (accuracy) และค่าความเที่ยงตรง (precision) และหาค่าความเชื่อถือได้ในการให้คำวินิจฉัยเซลล์กระเพาะปัสสาวะระหว่างโปรแกรมเอไอกับพยาธิแพทย์ จำนวน 50 คน (benchmark) โดยหาค่าความสอดคล้องในการให้ผลวินิจฉัยจากการหาค่าสัมประสิทธิ์ Cohen’s kappa และการหาค่าทดสอบมัธยฐาน ส่วนการหาความแม่นตรงตามเกณฑ์ (criterion volatility) ผู้วิจัยใช้คำวินิจฉัยของทีมพยาธิแพทย์และนักเซลล์วิทยาเป็นเกณฑ์มาตรฐาน (gold standard) ผลจากการวิจัยพบว่าค่าความไว ค่าความจำเพาะ ค่าความถูกต้อง และค่าความเที่ยงตรง ร้อยละ 97.50, 100, 98.33 และ 100 ตามลำดับ มีค่า kappa 0.716 - 0.970 ซึ่งมีความสอดคล้องในระดับดี - ดีมาก และมีค่าการทดสอบมัธยฐานของค่าความสอดคล้องในการให้คำวินิจฉัยไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์สำหรับการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะเป็นเครื่องมือที่มีความน่าเชื่อถือ สามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจทางการแพทย์ในการวินิจฉัยมะเร็งกระเพาะปัสสาวะได้ดี

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ, ตรวจวิเคราะห์, การวินิจฉัย

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Abstract

This research aimed to develop an artificial intelligence program or AI program for urothelial carcinoma diagnosis software. By using artificial intelligence technology for classifying images of urothelial cells in urine liquid-based cytology specimens according to the criteria of The Paris System for Reporting Urinary Cytology version 2.0. Using Convolutional Neural Network (CNN) techniques by choosing to use the DenseNet121 algorithm. Because it is an efficient algorithm suitable for use as a model used in developing AI programs. It uses urothelial cell data from the National Cancer Institute to create a training set, validation set, and test set of the model. The researcher evaluated the model's performance by determining the sensitivity, specificity, accuracy, and precision and determining the reliability of urothelial cell diagnosis between the AI program and 50 pathologists (benchmark). The consistency of the diagnostic results was determined by finding Cohen's kappa coefficient and finding the median test value. As for finding accuracy according to criteria (Criterion volatility), the researcher used the diagnosis of a team of pathologists and cytologists as a standard criterion (gold standard). The results of the research found that the sensitivity, specificity, accuracy, and precision were 97.50%, 100%, 98.33%, and 100% respectively. It has a Kappa value of 0.716 - 0.970, which is consistent at a good - very good level and there was no difference in the median test value of the consistency in giving the decision. Therefore, it can be concluded that the artificial intelligence program for urothelial carcinoma detection is a reliable tool. It can be used as a medical decision-support tool in the diagnosis of urothelial carcinoma.

Keyword: Artificial Intelligence, urothelial carcinoma, detection, diagnosis...

1. บทนำ

มะเร็งกระเพาะปัสสาวะชนิด urothelial carcinoma คือ โรคที่เกิดจากความผิดปกติของเซลล์ในกระเพาะปัสสาวะที่มีการเจริญเติบโต มีการแบ่งตัวเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ผิดปกติอย่างรวดเร็ว จนกลายเป็นก้อนมะเร็งขึ้นมา และก้อนเนื้อมะเร็งนี้สามารถเจริญเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ จนอาจเต็มกระเพาะปัสสาวะ ลุกลามไปยังอวัยวะและต่อมน้ำเหลืองข้างเคียง และแพร่กระจายเข้าสู่กระแสเลือดได้ หากตรวจพบโรคได้เร็วก็จะมีโอกาสหายได้ อย่างไรก็ตามแม้จะตรวจพบได้ในระยะแรกและรักษาหายแล้ว แต่มะเร็งชนิดนี้ก็มีโอกาสกลับมาเป็นซ้ำได้สูง (recurrence) มะเร็งกระเพาะปัสสาวะเป็นมะเร็งที่พบบ่อยที่สุดในมะเร็งของระบบทางเดินปัสสาวะ พบมากในเพศชาย ในช่วงอายุ 50-70 ปี มักมีอาการปัสสาวะเป็นเลือด ซึ่งจะต้องวินิจฉัยแยกโรคจากโรคอื่น เช่น กระเพาะปัสสาวะอักเสบ จึงควรพบแพทย์ระบบทางเดินปัสสาวะเพื่อวินิจฉัยให้แน่นอน หลังจากแพทย์ซักประวัติและตรวจร่างกายแล้ว จะให้เก็บปัสสาวะตรวจทางห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจว่ามีเม็ดเลือดขาวหรือเซลล์มะเร็งปะปนอยู่หรือไม่ ตัวอย่างปัสสาวะจะถูกวิเคราะห์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์เพื่อค้นหาเซลล์มะเร็ง (urine cytology) ซึ่งมีความแม่นยำถึง 80% แต่มีความไวค่อนข้างต่ำเพียง 16% [1-2]

ในการตรวจเซลล์วิทยานั้นประสบปัญหาหลายประเด็นคือ ความต้องการในการตรวจมีมากแต่ขาดทรัพยากร เช่น พยาธิแพทย์ด้านเซลล์วิทยา (pathologist) หรือนักเซลล์วิทยา (cytologist) ที่มีความชำนาญ รวมถึงมีจำนวนบุคลากรไม่เพียงพอ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

และในการตรวจส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อตรวจหาเซลล์ที่ผิดปกติใช้เวลานานและขึ้นอยู่กับทักษะและความชำนาญของนักเซลล์วิทยา ส่งผลให้ความไวและความจำเพาะของการตรวจวิเคราะห์ลดลง การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์ตรวจเซลล์วิทยาคาดว่าจะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ภาพดิจิทัลของเซลล์ในน้ำปัสสาวะว่าเป็นเซลล์มะเร็งหรือไม่

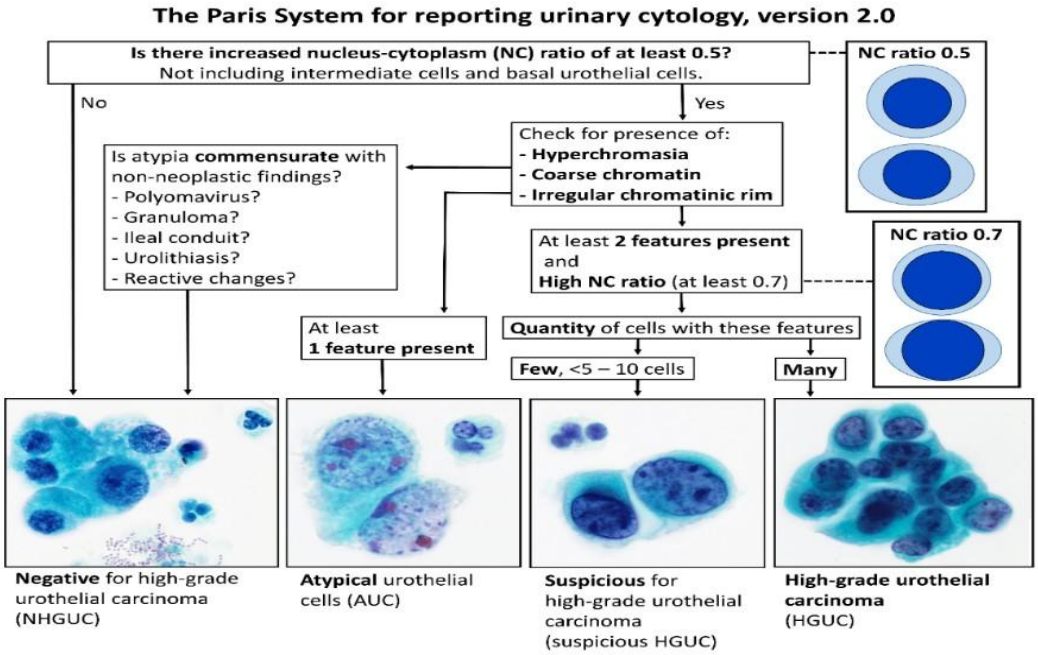
ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) กำลังมีบทบาทอย่างมากในงานทางการแพทย์ เพราะมีสมองกลที่ชาญฉลาด สามารถจดจำ จำแนกและประมวลผลข้อมูล (ภาพ เสียง ข้อความ) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสมองกลเป็นการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning, ML) ที่มีการเรียนรู้จากข้อมูล แล้วนำความรู้นั้นมาใช้ในการวิเคราะห์คาดการณ์ หรือขับเคลื่อนสิ่งต่าง ๆ ให้กับปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้ของเครื่องสามารถนำไปใช้งานได้หลายรูปแบบโดยอาศัยโปรแกรมที่เรียกว่าอัลกอริทึม (algorithm) และอัลกอริทึมที่กำลังได้รับความนิยมคือ การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning, DL) ซึ่งมีวิธีการเรียนรู้ด้วยเทคนิคการทำงานที่เป็นลักษณะเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network, ANN) ที่มีความลึกหลายชั้น (Deep Neural Network, DNN) คล้ายโครงข่ายประสาทในสมองของมนุษย์ และในปี ค.ศ. 1998 LeCun et al. [3] ได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมที่มีลักษณะการทำงานแบบคอนโวลูชัน (convolutional networks) โดยการเพิ่มจำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) เพื่อช่วยให้การคำนวณหาลักษณะเด่นของรูปภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเรียกเทคนิคนี้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolution Neural Network, CNN) หลักการทำงานเป็นกระบวนการสกัดลักษณะเด่น (feature extraction) โดยการแยกเอาคุณลักษณะเด่นของวัตถุที่อยู่ในภาพออกมาก่อน เช่น เส้นขอบ เส้นโค้ง และเส้นเอียง จากนั้นเป็นการนำเข้า (input) ข้อมูลเหล่านั้นไปประมวลผลในเครือข่ายเส้นประสาท (Neural Network) เพื่อหาความน่าจะเป็นแล้วจำแนก (classification) ว่าผลลัพธ์หรือข้อมูลที่ส่งออก (output) นั้นคืออะไร [4] ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันมาใช้ประโยชน์ในการจำแนกภาพเซลล์ภาพเอกซ์เรย์ หรือแม้แต่การวินิจฉัยโรค

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวินิจฉัยมะเร็งกระเพาะปัสสาวะตามเกณฑ์มาตรฐานของ The Paris System for reporting urinary cytology, version 2.0 (TPS)

ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการรายงานผลตรวจ urine cytology โดย TPS version 2.0 ซึ่งมีเกณฑ์การวินิจฉัยเป็นมาตรฐานเดียวกันที่ใช้กันทั่วโลก [5] ซึ่งทำให้ได้คำวินิจฉัยที่มีความถูกต้องตรงกัน ดังภาพที่ 1 [6] เนื่องจากเกณฑ์มาตรฐาน TPS version 2.0 ได้ให้เกณฑ์ (criteria) ในการวินิจฉัยแยกเซลล์ระหว่างเซลล์ที่สงสัยว่าเป็นเซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ (Suspicious for high-grade urothelial carcinoma, Suspicious HGUC) กับเซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ (High-grade urothelial carcinoma, HGUC) ด้วยการแยกตามปริมาณเซลล์ที่พบ กล่าวคือ ถ้าพบเซลล์น้อยกว่า 5-10 เซลล์จะจัดอยู่ในชนิด Suspicious HGUC โดยที่รูปร่างของเซลล์จะเหมือนกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เฉพาะลักษณะของเซลล์จึงจัด 2 กลุ่มนี้ให้เป็นชนิดเดียวกัน และใช้การวินิจฉัยตามเกณฑ์มาตรฐานของ TPS version 2.0 เป็นเกณฑ์แยกชนิดเซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ ดังตารางที่ 1

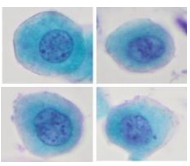
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)



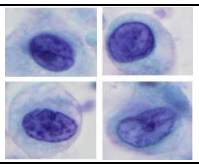
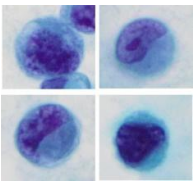
ภาพที่ 1 เกณฑ์มาตรฐานของ The Paris System for reporting urinary cytology, version 2.0 (TPS) [6]

ระบบการรายงานผลเซลล์วิทยาจากส่วนต่าง ๆ ของร่างกายส่วนมากที่ให้ “negative category” หมายถึง มีการพบแต่เซลล์ปกติ โดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ แต่กรณีที่พบการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจะถูกรายงานใน “atypical category” ซึ่งถ้าคณะทำงานของ TPS version 2.0 ทำตามระบบอื่น ๆ นั้นจะพบว่า “atypical category” จะใหญ่มากและไม่มีประโยชน์ทางคลินิก [6] ดังนั้น TPS version 2.0 จึงรวมเซลล์ลักษณะต่าง ๆ ที่ไม่มีความเสี่ยงในการเกิด HGUC ในภายหลังให้เป็น “negative for HGUC” โดยที่เซลล์เหล่านี้ต้องไม่มี atypia เพราะว่าถ้ามีจะจัดอยู่ใน atypical cell (AUC) นอกจากนี้เป้าหมายของ TPS version 2.0 คือต้องการแยกเคสผู้ป่วยนั้น ๆ ว่ามีความเสี่ยงของ HGUC หรือไม่ ดังนั้นการให้ “Negative for High Grade Urothelial Carcinoma (NHGUC) category”จึงมีประโยชน์มา

ตารางที่ 1 ลักษณะของเซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะตามเกณฑ์ของ The Paris System for reporting urinary cytology version 2.0 (TPS)

ลักษณะสำคัญของเซลล์	เกณฑ์การพิจารณาตามเกณฑ์ TPS	ภาพเซลล์
1. เซลล์กระเพาะปัสสาวะปกติ (NHGUC) - นิวเคลียสขนาดเล็ก - N/C น้อยกว่า 0.5 - Chromatin ละเอียดติดสีจาง	Negative for high-grade urothelial carcinoma (NHGUC)	

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

2. เซลล์กระเพาะปัสสาวะผิดปกติ (AUC) นิวเคลียสขนาดกลาง - N/C 0.5-0.7 - Chromatin สีเข้ม	Atypical urothelial cells (AUC)	
3. เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ (HGUC) - นิวเคลียสขนาดใหญ่ - N/C มากกว่า 0.7 - Chromatin หยาบติดสีเข้ม - Irregular chromatinic rim	High-grade urothelial carcinoma (HGUC)	

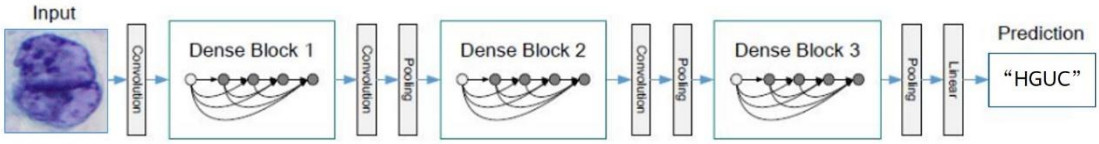
2.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน

ในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันมาใช้ทางด้านการการแพทย์หรือการวิเคราะห์ภาพ มีดังนี้ มหาวิทยาลัย Stanford [7] ประสบความสำเร็จในการฝึกแบบจำลองจำแนกภาพรอยโรคผิวหนังที่เสี่ยงเป็นมะเร็ง โดยใช้เครือข่าย Deep Learning ให้สามารถจำแนกภาพรอยโรคผิวหนังที่มีความเสี่ยงจะเป็นมะเร็ง นักวิจัยได้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยรูปถ่ายรอยโรคบนผิวหนังที่ได้รับความเสียหายจากโรคกว่า 2,000 โรค ทั้งหมดกว่า 129,000 รูป ก่อนจะนำอัลกอริทึมไปทดสอบวิเคราะห์การจำแนกภาพผิวหนังที่ปกติกับภาพรอยโรคผิวหนังที่เป็นมะเร็ง โดยเปรียบเทียบกับผลการวินิจฉัยของแพทย์ผิวหนัง ปรากฏว่าอัลกอริทึมสามารถจำแนกภาพรอยโรคผิวหนังได้ถูกต้องเทียบเท่าหรือเหนือกว่าผลการวินิจฉัยของแพทย์ผิวหนัง Hashmi et al. [8] ได้ทำการศึกษาการติดเชื้อในปอดโดยการถ่ายทอดการเรียนรู้บนโครงสร้าง Resnet18, DenseNet121, MobileNetV2, InceptionV3 และ Xception โดยจากการศึกษาพบว่า DenseNet121 และ Resnet18 ได้ความแม่นยำที่สูงกว่าอีก 3 แบบ Pattanasuwan et al. [9] ได้ทำการศึกษาการคัดกรองวัณโรคบนโครงสร้างของ VGG16, Resnet50, DenseNet121 และ EfficienNetB0 โดยจากการศึกษาพบว่า DenseNet121 ได้ความแม่นยำสูงกว่าอีก 3 แบบ Apipawinwongsa et al. [10] ได้ทำการศึกษาเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการรู้จำภาพวัสดุกระเป๋าถือแบรนด์เนมปลอม บนโครงสร้างของ VGG16 และ DenseNet121 จากการศึกษาพบว่า DenseNet121 ได้ความแม่นยำสูงกว่า VGG16 Bibi et al.[11] ได้ทำการศึกษาการตรวจจับและการจำแนกโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาวอัตโนมัติโดยใช้ IoMT โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกบนโครงสร้างของ Resnet34 และ DenseNet121 จากการศึกษาพบว่า DenseNet121 ได้ความแม่นยำสูงกว่า Resnet34 Tsuneki et al. [12] ได้ทำการศึกษาการคัดกรองมะเร็งท่อปัสสาวะโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกในรูปแบบ WSI จากตัวอย่างปัสสาวะทางเซลล์วิทยา โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก บนโครงสร้างของ Resnet34 และ DenseNet121 จากการศึกษาพบว่า DenseNet121 ได้ความแม่นยำสูงกว่า Resnet34 Krishnadas et al. [13] ได้ศึกษาการการตรวจหาโรคมาลาเรียแบบอัตโนมัติดำเนินการโดยการเรียนรู้เชิงลึกด้วยไลบรารี Pytorch บนโครงสร้างของ Resnet50 และ DenseNet121 จากการศึกษาพบว่า DenseNet121 ได้ความแม่นยำสูงกว่า Resnet50

ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเลือกเทคนิคของ CNN บนโครงสร้าง DenseNet121 [2], [8-12], [14] มาเป็นแบบจำลองในการพัฒนาโปรแกรมเอไอสำหรับการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพให้ค่าความแม่นยำและค่าความไวในการตรวจวิเคราะห์สูง

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

DenseNet121 เป็นโครงสร้างหรืออัลกอริทึมแบบหนึ่งในโครงข่ายประสาทเทียมแบบ CNN เป็นอัลกอริทึมที่ถูกเสนอโดย Huang et al. [2] มีการออกแบบที่เน้นการเชื่อมต่อระหว่างเลเยอร์ในเครือข่ายอย่างหนาแน่นเพื่อแก้ปัญหาการหายไปของข้อมูลและการสูญเสียของการเรียนรู้ที่อาจเกิดขึ้นในเครือข่ายแบบเดิม ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างโครงข่ายประสาทแบบ Dense Block in DenseNet

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

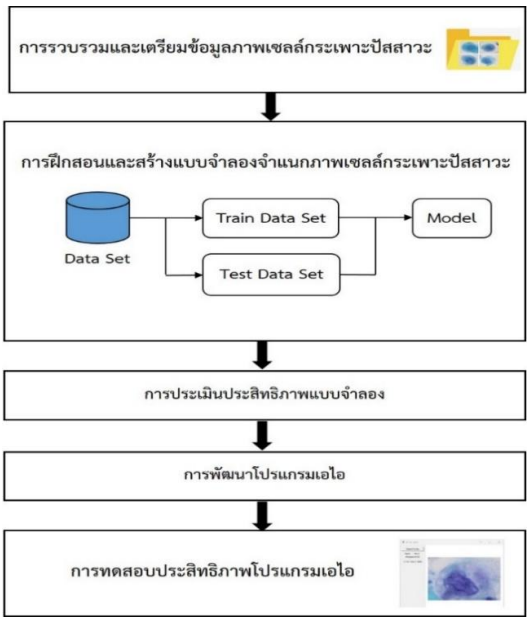
เพื่อพัฒนาโปรแกรมตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ โดยการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาเข้ามาประยุกต์ใช้ในการอ่านผลเซลล์วิทยาให้สามารถวิเคราะห์และจำแนกเซลล์ตามเกณฑ์ของ The Paris System for Reporting Urinary Cytology, version 2..0

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (Development Research) มีกรอบแนวคิดในการวิจัย ดังภาพที่ 3 ได้แก่ 1) การรวบรวมและเตรียมข้อมูลภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะ 2) การฝึกสอนและสร้างแบบจำลองจำแนกภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะ 3) การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง 4) การพัฒนาโปรแกรม 5) การทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรม

4.1 การรวบรวมและเตรียมข้อมูลภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะ

การวิจัยนี้ใช้ภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะจากสถาบันมะเร็งแห่งชาติ กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข มีเกณฑ์ในการคัดเลือกภาพเซลล์ โดยคัดเลือกเฉพาะภาพที่มีขอบเขตเซลล์ชัดเจน คุณภาพxของภาพดี คุณสมบัติตรงตามเกณฑ์ที่กำหนดใน Paris System สำหรับแต่ละประเภท



ภาพที่ 3 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การเตรียมชุดข้อมูลภาพมีขั้นตอนดังนี้ 1) ค้นหาสไลด์ (slides) ที่ได้รับการวินิจฉัยว่าเป็นเซลล์กระเพาะปัสสาวะปกติ (NHGUC) เซลล์กระเพาะปัสสาวะผิดปกติ (AUC) และเซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ (HGUC) 2) ถ่ายภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะปกติ (NHGUC) เซลล์กระเพาะปัสสาวะผิดปกติ (AUC) และเซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

(HGUC) ชนิดละ 240 เซลล์ รวมเป็นจำนวน 720 ภาพเซลล์

โดยมีนักเซลล์วิทยา จำนวน 1 คน และมีพยาธิแพทย์ จำนวน 2 คน อ่านยืนยันผลจากข้อ 1) เพื่อนำมาเป็นมาตรฐานการวินิจฉัย (gold standard) สำหรับ label ให้โปรแกรมเอไอที่พัฒนาได้เรียนรู้ในส่วนของข้อมูลฝึกสอน (training set) ข้อมูลตรวจสอบ (validation set) 3) บันทึกเก็บข้อมูลไฟล์ภาพเซลล์

4.2 การฝึกสอนและสร้างแบบจำลองจำแนกภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะและการแบ่งชุดข้อมูลภาพ

การวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึม DenseNet121 ในการสร้างแบบจำลอง โดยทำการปรับขนาดภาพเป็น 224x224 พิกเซล แล้วปรับสเกลข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ด้วยวิธี normalization โดยทำการหารข้อมูลด้วย 255 และทำการแบ่งข้อมูลไฟล์ภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ภาพเซลล์ NHGUC ภาพเซลล์ AUC และภาพเซลล์ HGUC โดยมีการจัดเตรียมข้อมูลไฟล์ภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะสำหรับใช้ในแบบจำลองแบ่งเป็น 3 ชุด ได้แก่ ข้อมูลฝึกสอน (training set) ข้อมูลตรวจสอบ (validation set) และข้อมูลทดสอบ (test set) ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 โดยทำการทดสอบการทำงานของแบบจำลองจำนวน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 2 การแบ่งจำนวนไฟล์ภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะสำหรับใช้ในแบบจำลอง

ภาพเซลล์กระเพาะปัสสาวะ	ข้อมูลฝึกสอน	ข้อมูลตรวจสอบ	ข้อมูลทดสอบ	รวม
NHGUC	200	20	20	240
AUC	200	20	20	240
HGUC	200	20	20	240
รวม	600	60	60	720

4.3 การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

การวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองด้วย confusion matrix ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ประเมินผลลัพธ์การทำนายหรือผลลัพธ์จากการจำแนกของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบกับค่าจริง (actual) หรือมาตรฐานการวินิจฉัย โดยตารางเป็นแบบแบ่งกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม (binary classification) มีผลทำนาย 2 ประเภท ได้แก่ เป็นเซลล์ผิดปกติ (abnormal cells) และเป็นเซลล์ปกติ (normal cells) [15] โดยเริ่มต้นจะมีค่าที่ต้องสนใจทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่

1) True Positive (TP) คือ เซลล์ผิดปกติและผลทำนายเป็นเซลล์ผิดปกติ

2) True Negative (TN) คือ เซลล์ปกติและผลทำนายเป็นเซลล์ปกติ

3) False Positive (FP): เซลล์ปกติและผลทำนายเป็นเซลล์ผิดปกติ

4) False Negative (FN): เซลล์ผิดปกติและผลทำนายเป็นเซลล์ปกติ

การวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อนำผลการทำนายของโปรแกรมเอไอมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการวินิจฉัย โดยใช้ตาราง confusion matrix เป็นเครื่องมือในการประเมินผลลัพธ์ของการทำนายของแบบจำลอง งานวิจัยนี้ใช้เซลล์กระเพาะปัสสาวะที่ได้มีการกำหนดเซลล์เป็น 2 กลุ่ม เพื่อใส่ข้อมูลในตาราง confusion matrix ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 เซลล์ปกติ (Normal cell) คือ เซลล์กระเพาะปัสสาวะที่เซลล์เป็นชนิด Negative for High Grade Urothelial Carcinoma (NHGUC)
- กลุ่มที่ 2 เซลล์ผิดปกติ (Abnormal cell) คือ เซลล์กระเพาะปัสสาวะที่เซลล์เป็นชนิด Atypical Urothelial Cells (AUC) และเซลล์กระเพาะปัสสาวะที่เซลล์เป็นชนิด High Grade Urothelial Carcinoma (HGUC) (กำหนดให้ AUC และ HGUC รวมอยู่ในกลุ่มเซลล์ผิดปกติ)

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

โดยจากค่าทั้ง 4 ค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าได้ทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่

1) ค่าความไว (Sensitivity) คือการวัดความแม่นยำ ที่สนใจด้านการทำนายที่ถูกต้องเป็นหลัก เป็นการพิจารณาการทำนายที่ถูกต้องสำหรับผลที่เป็นบวกเทียบกับการทำนายที่ถูกต้องทั้งหมดของผลที่เป็นทั้งบวกและลบ ถ้าการทำนายมีค่านี้สูง แสดงว่ามีความสามารถในการตรวจจับหรือทำนายค่าที่สนใจได้ดี ดังสมการ (1)

$$sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} * 100 \qquad (1)$$

3) ค่าความจำเพาะ (Specificity) คือการพิจารณาการทำนายที่ถูกต้องสำหรับผลที่เป็นลบเทียบกับการทำนายที่ถูกต้องทั้งหมดของผลที่เป็นทั้งบวกและลบ ดังสมการ (2)

$$specificity = \frac{TN}{TN + FP} * 100 \qquad (2)$$

4) ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง ดังสมการ (3)

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} * 100 \qquad (3)$$

5) ค่าความเที่ยงตรง (Precision) เป็นการสนใจว่าในการทำนายผลนั้น การทำนายที่ถูกต้องสำหรับผลที่เป็นบวกมีความคงเส้นคงวาแค่ไหน ดังสมการ (4)

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} * 100 \qquad (4)$$

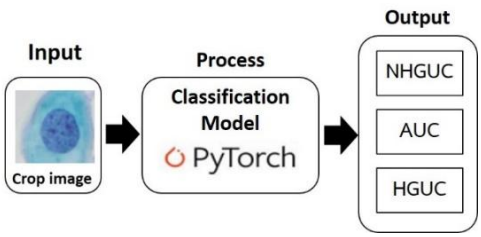
ตารางที่ 3 ตาราง Confusion Matrix ของระบบการจำแนกแบบ 2 Classes [2]

<table>
<tr><td colspan="4" rowspan="4"></td><td colspan="3">โปรแกรมเอไอ ทำนาย
(predicted)</td><td rowspan="4">รวม
(total)</td></tr>
<tr><td colspan="2">บวก (positive)</td><td>ลบ (negative)</td></tr>
<tr><td colspan="2">เซลล์ผิดปกติ
(abnormal)</td><td>เซลล์ปกติ
(normal)</td></tr>
<tr><td>AUC</td><td>HGUC</td><td>NHGUC</td></tr>
<tr><td rowspan="3">มาตรฐานการวินิจฉัย
(gold standard or actual)</td><td rowspan="2">บวก (positive)</td><td rowspan="2">เซลล์ผิดปกติ
(abnormal)</td><td>HGUC</td><td colspan="2" rowspan="2">TP
(True Positive)</td><td rowspan="2">FN
(False Negative)</td><td rowspan="2">TP+FN</td></tr>
<tr><td>AUC</td></tr>
<tr><td>ลบ (negative)</td><td>เซลล์ปกติ
(normal)</td><td>NHGUC</td><td colspan="2">FP
(False Positive)</td><td>TN
(True Negative)</td><td>FP+TN</td></tr>
<tr><td colspan="4">รวม (total)</td><td colspan="2">TP+FP</td><td>FN+TN</td><td>TP+FN+FP+TN</td></tr>
</table>

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

4.4 การพัฒนาโปรแกรมเอไอ

งานวิจัยนี้ใช้ไลบลารี PyTorch เวอร์ชัน 2.0.1 [13], [16-17] และสร้างแบบจำลองการฝึกสอนด้วยอัลกอริทึม DenseNet121 [2] ที่มีประสิทธิภาพในการฝึกสอนเพื่อจำแนกรูปภาพ ซึ่งถูกใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [2], [8-12], [14] โดยในงานวิจัยนี้ใช้ภาษา Python เวอร์ชัน 3.10.13 รายละเอียดการติดตั้ง PyTorch บนคอมพิวเตอร์ที่ใช้หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit; CPU) เป็น Intel® Core™ i7 6700HQ 2.60 GHz หน่วยความจำหลัก (Random Access Memory; RAM) ขนาด 8 GB ระบบปฏิบัติการ (Operating System; OS) เป็น Window11 และหน่วยประมวลผลกราฟฟิก (Graphic Processing Unit; GPU) เป็น NVIDIA® GeForce® GTX 960M



ภาพที่ 4 กระบวนการของการพัฒนาโปรแกรมเอไอ

4.5 การทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรมเอไอ

งานวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรมเอไอโดยทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะระหว่างโปรแกรมเอไอกับผลการให้คำวินิจฉัยโดยพยาธิแพทย์ (benchmark) จำนวน 50 คน โดยใช้หลักสถิติการประเมินความสอดคล้องของ Cohen's kappa coefficient (K) ดังสมการ (5) [18] การทดสอบมัธยฐาน (median test) ดังสมการ (6) [19]

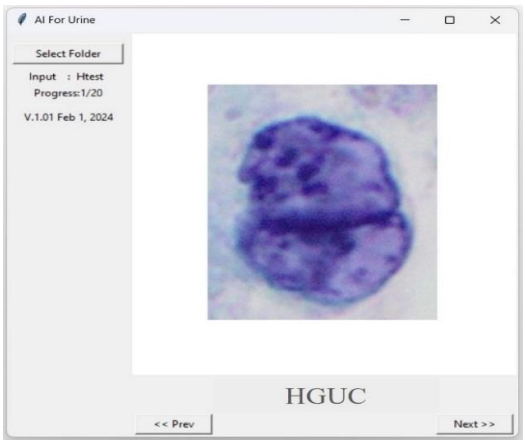
$$K = \frac{p^a - p^e}{(1 - p^e)} = 1 - \frac{(1 - p^a)}{(1 - p^e)} \qquad (5)$$

$$X^2 = \frac{N(|AD - BC| - \frac{N}{2})^2}{(A+B)(C+D)(A+C)(B+D)} \qquad (6)$$

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการพัฒนาโปรแกรมเอไอ

โปรแกรมเอไอสำหรับการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะที่พัฒนาด้วยไลบลารี PyTorch และใช้อัลกอริทึม DenseNet121 สำหรับสร้างแบบจำลอง นำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมเอไอในรูปแบบ Stand Alone ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การใช้งานโปรแกรมเอไอสำหรับการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ

5.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมเอไอสำหรับการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ ใช้ทำนายกับชุดข้อมูลทดสอบได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 4

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ตารางที่ 4 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

				โปรแกรมเอไอทำนาย (predicted)			รวม (total)
				บวก (positive)		ลบ (negative)	
				เซลล์ผิดปกติ (abnormal)		เซลล์ปกติ (normal)	
				AUC	HGUC	NHGUC	
มาตรฐานการวินิจฉัย (gold standard or actual)	บวก (Positive)	เซลล์ผิดปกติ (Abnormal)	AUC	39		1	40
			HGUC				
	ลบ (Negative)	เซลล์ปกติ (Normal)	NHGUC	0		20	20
รวม (Total)				39		21	60

ผลจากการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง พบว่า ค่าความไว (Sensitivity) ค่าความจำเพาะ (Specificity) ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความแม่นยำ (Precision) 97.50% 100% 98.33% 100% ตามลำดับ

5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรมเอไอ

การวิจัยนี้ได้ทำทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรมเอไอ โดยการเปรียบเทียบผลการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะระหว่างโปรแกรมเอไอกับผลการให้คำวินิจฉัยของพยาธิแพทย์ จำนวน 50 คน โดยใช้วิธีประเมินความสอดคล้องของการวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะของโปรแกรมเอไอกับมาตรฐานการวินิจฉัย และการวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะของพยาธิแพทย์กับมาตรฐานการวินิจฉัย (แยกเป็นการประเมินความสอดคล้องเป็นรายคู่) โดยผลการหาค่าความสอดคล้องในการให้ผลวินิจฉัยจากการหาค่าสัมประสิทธิ์ Cohen’s kappa และการหาค่าทดสอบมัธยฐาน พบว่า มีค่า ความสอดคล้อง Kappa อยู่ระหว่าง 0.716 - 0.970 ซึ่งมีความสอดคล้องในระดับดี - ดีมาก และมีค่าการทดสอบมัธยฐานของค่าความสอดคล้องในการให้ผลการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะหรือการให้คำวินิจฉัยไม่แตกต่างกัน

6. สรุปและอภิปรายผล

ในการวิจัยนี้พัฒนาโปรแกรมโดยนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาประยุกต์ใช้ในการอ่านผลเซลล์วิทยาให้สามารถวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ และสามารถรายงานผลการตรวจในแต่ละระยะตั้งแต่เซลล์ปกติจนถึงเซลล์ผิดปกติที่เป็นเซลล์มะเร็ง ซึ่งการศึกษานี้ได้นำข้อมูลเซลล์กระเพาะปัสสาวะจากสไลด์ที่ได้มาจากการถ่ายภาพโดยทีมพยาธิแพทย์และนักเซลล์วิทยา

จากผลการศึกษาที่นำอัลกอริทึม DenseNet121 มาใช้ในการตรวจจับวัตถุเซลล์ที่ผิดปกติได้เร็วและแม่นยำสูง และ PyTroch ซึ่งเป็น Library ด้าน Deep Learning ที่นำมาใช้ในการจำแนกชนิดความผิดปกติของเซลล์กระเพาะปัสสาวะจากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยรวมพบว่าโปรแกรมเอไอมีความแม่นยำ (Accuracy) ในการจำแนกเซลล์เท่ากับร้อยละ 98.33 มีความไว (Sensitivity) ในการแยกเซลล์ผิดปกติได้อย่างถูกต้องร้อยละ 97.50 ในขณะที่ความจำเพาะ (Specificity) ในการแยกเซลล์ปกติได้อย่างถูกต้องเท่ากับร้อยละ 100 ผลที่ได้

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

จากการพัฒนาโปรแกรมเอไอนี้สามารถรายงานผลการตรวจเซลล์ได้ดีมีความแม่นยำสูง สามารถช่วยพยาธิแพทย์ในการวินิจฉัยได้เป็นอย่างดี

การวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการให้คำวินิจฉัยของโปรแกรมเอไอกับผลการให้คำวินิจฉัยของพยาธิแพทย์ (benchmark) ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมเอไอนี้สามารถนำมาใช้งานได้จริง มีความสามารถในการตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะใกล้เคียงสอดคล้องกับการให้การวินิจฉัยโดยพยาธิแพทย์

ในการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมเอไอ ได้ใช้เซลล์ที่มีผลเป็นเซลล์ปกติและเซลล์ผิดปกติมาทดสอบ จำนวน 60 ภาพเซลล์ ถึงแม้จะเป็นจำนวนน้อยสำหรับโปรแกรมเอไอ แต่นับว่าเป็นจำนวนภาพเซลล์ที่มากสำหรับเป็นแบบทดสอบให้พยาธิแพทย์ จำนวน 50 ท่าน มาให้การวินิจฉัย เพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับโปรแกรมเอไอ พบว่าโปรแกรมเอไอ มีการแปลผลได้ใกล้เคียงกับพยาธิแพทย์ จึงเป็นไปได้ว่าจะสามารถยอมรับผลการวิเคราะห์เซลล์กระเพาะปัสสาวะจากโปรแกรมเอไอนี้ได้

จากผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมเอไอ พบมี false negative จำนวน 1 เคส คือ มีการวินิจฉัยเซลล์ผิดปกติ (AUC) ว่าเป็นเซลล์ปกติ (NHGUC) ซึ่งสามารถยอมรับได้ เพราะเมื่อคำนวน sensitivity พบว่าสูงถึง 97.50% นอกจากนี้ยังพบว่าผลการให้การวินิจฉัยโดยโปรแกรมเอไอไม่มี false positive เลย จึงให้ค่า specificity ถึง 100% ซึ่งถ้านำเอาโปรแกรมเอไอชุดนี้ไปใช้จริงก็จะเป็นผลดีมาก

โปรแกรมเอไอสำหรับตรวจวิเคราะห์เซลล์มะเร็งกระเพาะปัสสาวะของงานวิจัยนี้มีประโยชน์ที่สามารถวิเคราะห์ภาพและให้คำวินิจฉัยแต่ละเซลล์ ช่วยให้นักเซลล์วิทยาที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกลสามารถถ่ายภาพเซลล์ที่สงสัยส่งมาเข้าโปรแกรมเพื่อช่วยวินิจฉัยได้ โดยที่ไม่ต้องใช้เครื่องสแกนสไลด์ (WSI) ที่มีราคาแพงหลายล้านบาท เพื่อวิเคราะห์ทั้งสไลด์เหมือนกับงานวิจัยของต่างประเทศ [12] เพราะประเทศไทยมีเครื่องสแกนสไลด์เฉพาะในโรงเรียนแพทย์หรือในศูนย์ สถาบันการแพทย์ใหญ่ ๆ เท่านั้น งานวิจัยนี้จึงสามารถทำให้เกิดประโยชน์และมีความคล่องตัวได้มากกว่า

แม้ว่าโปรแกรมเอไอ จะสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูง แต่ยังไม่สามารถทดแทนการวินิจฉัยโดยพยาธิแพทย์ได้อย่างสมบูรณ์ โปรแกรมเอไอ ควรถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุน (Supportive) เพื่อช่วยตรวจสอบและยืนยันผลการวิเคราะห์ของนักเซลล์วิทยาและพยาธิแพทย์ รวมถึงช่วยลดภาระในกระบวนการวิเคราะห์ภาพเซลล์ที่ใช้เวลานาน นอกจากนี้โปรแกรมเอไอ ยังสามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องมือแบบร่วมมือ (Collaborative) โดยทำงานร่วมกับนักเซลล์วิทยาและพยาธิแพทย์ในกระบวนการวินิจฉัยหรือการตัดสินใจ เช่น การให้คำแนะนำที่แม่นยำ หรือการช่วยวิเคราะห์ข้อมูลอย่างละเอียดลึกซึ้ง เพื่อช่วยคัดกรองและลดภาระงานเบื้องต้นก่อนเข้าสู่การวินิจฉัยยืนยันโดยพยาธิแพทย์

7. ข้อเสนอแนะ

1.พัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติมให้สามารถใช้งานได้บนระบบคลาวน์ เพื่อให้นักเซลล์วิทยาประจำโรงพยาบาลในพื้นที่ห่างไกลได้ใช้โปรแกรมเอไอช่วยในตรวจวิเคราะห์เซลล์กระเพาะปัสสาวะสำหรับการให้การวินิจฉัย

2.นำโปรแกรมเอไอไปใช้ฝึกทักษะในการตรวจวิเคราะห์เซลล์กระเพาะปัสสาวะให้กับนักศึกษาสาขาเซลล์วิทยา นักศึกษาแพทย์ หรือแพทย์ประจำบ้าน

การเก็บสิ่งส่งตรวจ (specimen collection) หากมีการ fixation ที่ล่าช้าจะทำให้เซลล์เสื่อมสภาพ (degeneration) ส่งผลให้ภาพไฟล์ของ cell ไม่คมชัด เมื่อนำมาประมวลผลด้วยอัลกอริทึม จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควรและมีความคลาดเคลื่อนกับผลการให้คำวินิจฉัยของพยาธิแพทย์ ดังนั้นแนวทางแก้ไขคือ ให้ทำการจัดเก็บสิ่งส่งตรวจ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

(Specimen Collection) ที่มีการ fixation ให้รวดเร็วทันเวลา

8. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

9. เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันมะเร็งแห่งชาติ. แนวทางการตรวจคัดกรอง วินิจฉัยและรักษาโรคมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ. กรุงเทพ ฯ: กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข; 2563.

[2] Huang G, Liu Z, Van Der Maaten L, Weinberger KQ. Densely connected convolutional networks. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. p. 4700-8.

[3] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. nature. 2015 May 28;521(7553): 436-44.

[4] กอบเกียรติ สระอุบล. เรียนรู้ AI Deep Learning ด้วย Python. กรุงเทพ ฯ: อินเตอร์มีเดีย; 2565.

[5] Barkan GA, Wojcik EM, Nayar R, Savic-Prince S, Quek ML, Kurtycz DF, Rosenthal DL. The Paris system for reporting urinary cytology: the quest to develop a standardized terminology. Acta Cytologica. 2016 Aug 26;60(3):185-97.

[6] Wojcik EM, Kurtycz DF, Rosenthal DL, editors. The Paris system for reporting urinary cytology. New York, NY, USA: Springer; 2022 Jan 1.

[7] Esteva A, Kuprel B, Novoa RA, Ko J, Swetter SM, Blau HM, Thrun S. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. Nature. 2017 Feb;542(7639):115-8.

[8] Hashmi MF, Katiyar S, Keskar AG, Bokde ND, Geem ZW. Efficient pneumonia detection in chest x-ray images using deep transfer learning. Diagnostics. 2020 Jun 19;10(6):417.

[9] Pattanasuwan C, Chongstitvatana P. Screening TB using deep transfer learning. In: 2021 25th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC). IEEE; 2021 Nov 18. p. 330-3.

[10] Apipawinwongsa P, Limpiyakorn Y. Counterfeit luxury handbag materials image classification using deep learning and local binary pattern. Int J Emerg Technol Adv Eng. 2022;12(9):41-8.

[11] Bibi N, Sikandar M, Ud Din I, Almogren A, Ali S. IoMT-based automated detection and classification of leukemia using deep learning. J Healthc Eng. 2020;2020(1):6648574.

[12] Tsuneki M, Abe M, Kanavati F. Deep learning-based screening of urothelial carcinoma in whole slide images of liquid-based cytology urine specimens. Cancers. 2022 Dec 30;15(1):226.

[13] Krishnadas P, Sampathila N. Automated detection of malaria implemented by deep learning in PyTorch. In: 2021 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Technologies (CONECCT). IEEE; 2021 Jul 9. p. 01-05.

[14] Abadi M, Agarwal A, Barham P, Brevdo E, Chen Z, Citro C, et al. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems. arXiv preprint arXiv: 1603. 04467. 2016 Mar 14.

[15] จาตุรงค์ ตันติบัณฑิต. การเรียนรู้เชิงลึก ทฤษฎีและนวัตกรรมทางวิศวกรรมการแพทย์ (Deep Learning Theory and Innovation in Medical Engineering). กรุงเทพฯ: เพชรเกษมพริ้นติ้ง กรุ๊ป จำกัด; 2561.

[16] Stevens E, Antiga L, Viehmann T. Deep learning with PyTorch. Manning Publications; 2020 Aug 4.

[17] Subramanian V. Deep Learning with PyTorch: A practical approach to building neural network models using PyTorch. Packt Publishing Ltd; 2018 Feb 23.

[18] ประสพชัย พสุนนท์. การประเมินความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมินโดยใช้สถิติแคปปา. วารสารวิชาการศิลปศาสตร์ประยุกต์. 2558: 2-20.

[19] อุมาพร จันทศร. สถิติที่ไม่ใช้พารามิเตอร์. กรุงเทพ ฯ: บริษัทพิสิกส์เซ็นเตอร์; 2542liquid- based cytology urine specimens. Cancers. 2022 Dec 30;15(1):226.

วารสารวิจัย UTK ราชมงคลกรุงเทพ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

การศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินปั้นที่ใช้ในงานประดิษฐ์
Study of the chemical and physical properties of clay used in crafts

นภารัตน์ พวงมาลัย, ดลพร นิลบรรจง, โสภิดา วิศาลศักดิ์กุล*
Naparat Puangmalai, Donlaporn Ninbanjong, Sopida Wisansakkul*

สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Department of Home Economics, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Corresponding Author: Email:: sopida_w@rmutt.ac.th

Received: 23-09-2024 ***Revised:*** 20-11-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินปั้นสำหรับงานประดิษฐ์ และศึกษาการใช้สีชนิดต่างๆ สำหรับดินปั้นในงานประดิษฐ์ ซึ่งดำเนินการศึกษาจากลักษณะของดินปั้น 3 ชนิด ประกอบด้วย ดินญี่ปุ่น ดินไทย และดินเยื่อกระดาษ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ชนิดของสีที่นำมาใช้ในการศึกษา แปรเป็น 3 ชนิด ประกอบด้วย สีผสมอาหาร สีอะคริลิค สีน้ำมัน และศึกษาปริมาณของสี แปรเป็น 2 ระดับ ประกอบด้วย ร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักดินปั้น ทำการวางแผนการทดลองแบบ Factorial in CRD จะได้ทั้งหมด 6 สิ่งทดลอง ต่อดินปั้น 1 ชนิด ผลการศึกษาวิจัยพบว่าดินปั้นแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการนำมาผสมสีที่แตกต่างกัน โดยดินญี่ปุ่นเหมาะสำหรับผสมด้วยสีอะคริลิคในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินปั้น โดยมีค่าร้อยละความชื้นร้อยละ 39.32 และมีค่าความต้านทานแรงกด 10.43 นิวตัน สำหรับดินไทยเหมาะสำหรับผสมด้วยสีผสมอาหารในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินปั้นโดยมีค่าร้อยละความชื้นร้อยละ 18.91 และมีค่าความต้านทานแรงกด 10.43 นิวตัน สุดท้ายดินเยื่อกระดาษเหมาะสำหรับผสมด้วยสีน้ำมันในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินปั้นโดยมีค่าร้อยละความชื้น 25.16 และมีค่าความต้านทานแรงกด 12.43 นิวตัน ซึ่งดินปั้นที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์มีความเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบตามลักษณะเนื้อสัมผัสของดินปั้นแต่ละชนิด

คำสำคัญ : ดินไทย ดินญี่ปุ่น ดินเยื่อกระดาษ งานประดิษฐ์ สมบัติทางเคมีและกายภาพ

ABSTRACT

This research aimed to study the chemical and physical properties of clay for handicrafts and the application of various types of color schemes for clay modeling. The study was conducted based on the characteristics of 3 types of clay, consisting of Japanese clay, Thai clay, and paper clay slip. The factor studied was the type of paint, divided into 3 types, e.g., food color, acrylic paint, and oil paint. Two levels of color, representing 5 and 10 percent of the weight of the clay, were also investigated. The experiment was designed using Factorial in CRD with a total of 6 experimental units per type of clay. The results found that each type of clay

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

was suitable for mixing different colors. Japanese clay was suitable for mixing with acrylic paint in the amount of 10 percent of the weight of the clay for sculpting with a moisture percentage of 39.32 and a compression strength of 10.43 newtons. Thai clay was suitable for mixing with food color in the amount of 10 percent of the weight of the molding clay with a moisture percentage of 18.91 and a compression strength of 10.43 newtons. Finally, paper clay slip was suitable for mixing with oil paint in the amount of 5 percent of the weight of the clay with a moisture percentage of 25.16 and a compression strength of 12.43 newtons. The clay used in the craft was suitable for molding products in a variety of forms according to the texture of each type of clay.

Keyword: Thai clay, Japanese clay, Paper clay slip, Crafts, Chemical and physical properties

1. บทนำ

ปัจจุบันงานศิลปะประดิษฐ์มีหลากหลายรูปแบบ และได้มีการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์ใหม่ๆ โดยการนำสิ่งที่มีอยู่แล้วนำมาประดิษฐ์เป็นนวัตกรรมชิ้นใหม่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งงานประดิษฐ์เป็นงานที่ช่วยในการส่งเสริมให้เกิดพัฒนาการของการใช้มือและสมองไปพร้อมๆ กัน มุ่งเน้นและสนับสนุนให้เกิดการทดลองค้นคว้า เพื่อหาประสบการณ์ใหม่ๆ ด้วยวิธีการที่หลากหลายตามความถนัดของแต่ละบุคคล และในกลุ่มงานประดิษฐ์นั้นรวมไปถึงงานประดิษฐ์ ประเภทงานปั้นด้วยเช่นกัน และวัสดุที่พบเห็นในการนำมาใช้ขึ้นรูปงานประดิษฐ์แบบไทย โดยส่วนใหญ่พบว่ามีการนำดินปั้น 3 ชนิด ประกอบไปด้วย ดินญี่ปุ่น ดินไทย และดินเยื่อกระดาษ มาใช้งานเป็นจำนวนมาก แต่หลายท่านอาจจะยังไม่เข้าใจถึงคุณลักษณะและการใช้ประโยชน์จากดินปั้นทั้ง 3 ชนิดที่ถูกต้อง ในการนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการนำดินปั้นที่ใช้ในงานศิลปะประดิษฐ์ทั้ง 3 ชนิด มาศึกษาคุณลักษณะและสร้างองค์ความรู้ในการนำดินปั้นมาสร้างสรรค์ผลงานศิลปะประดิษฐ์ให้ถูกต้อง ซึ่งการเลือกใช้ดินปั้นที่เหมาะสมนั้น ควรเลือกใช้เนื้อดินที่มีความเหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงาน โดยในการสร้างสรรค์ผลงานศิลปะการปั้นนั้น ผู้ประดิษฐ์ต้องมีความรู้ ความเข้าใจในคุณลักษณะของวัสดุที่จะนำมาใช้แต่ละชนิดก่อน โดยชนิดของดินปั้นที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย ดินญี่ปุ่น ซึ่งเป็นดินที่ต้องนำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น โดยคุณสมบัติของดินจะไม่แตก ไม่กรอบ มีความเหนียวคงทนแต่จะมีราคาแพงมากกว่าดินไทย ซึ่งดินญี่ปุ่นก็เริ่มเข้ามาในประเทศไทยประมาณปีพ.ศ. 2530 เกิดการนำดินญี่ปุ่นมาปั้นเป็นดอกไม้ เป็นตุ๊กตา โดยผู้สอนก็เป็นอาจารย์ชาวญี่ปุ่น ในตอนนั้นมีคนไทยสนใจเป็นจำนวนมาก แต่ก็ยังไม่แพร่หลายทำกันเฉพาะกลุ่ม โดยส่วนจะเป็นการทำเพื่อเป็นงานอดิเรกมากกว่า ไม่ได้ทำเพื่อจำหน่าย หลังจากนั้นไม่นานนักคนไทยที่เป็นคนรักเรื่องงานฝีมือก็ได้คิดพัฒนาดินไทยขึ้นมาบ้าง ซึ่งเริ่มจากการนำแป้งมาใช้เป็นส่วนผสมเหมือนในทุกๆ ประเทศที่เริ่มคิดสูตร [1] ในปัจจุบันมีผู้ผลิตดินไทยขายมากมาย ซึ่งมีทั้งดินไทยที่ใช้ส่วนผสมของดินขาวเป็นหลัก และดินไทยที่ใช้ส่วนผสมของแป้งเป็นหลัก โดยดินไทยที่มีส่วนผสมจากดินจะมีลักษณะแตกต่างจากดินไทยที่มีส่วนผสมเป็นแป้ง สังเกตได้จากดินไทยธรรมชาติจะมีความใสมากกว่าแป้ง ดมแล้วไม่มีกลิ่นสาบของแป้ง [2] ซึ่งดินไทยที่มีส่วนผสมด้วยแป้งต่างๆ เป็นการนำเอาแป้งที่มีสีขาว ได้แก่ แป้งสาลี แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง ฯลฯ เป็นวัตถุหลักในการผสมกับกาวลาเท็กซ์ และผสมสารกันบูด หรือสารกันเชื้อรา คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วนำมาห่อใส่ถุงอย่างมิดชิดเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ จึงทำให้ดินไทยเป็นที่แพร่หลายและนิยมไม่แพ้ดินจากต่างประเทศ [3] และดินเยื่อกระดาษ เป็นดินที่ผลิตจากการนำเยื่อกระดาษที่

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

บดละเอียด มาผสมแป้งหรือดินสอพอง และวัสดุที่ทำให้เกิดความเหนียวผ่านขบวนการนวดจนเป็นเนื้อเดียวกัน เหมาะสำหรับการนำมาปั้นตุ๊กตาจิ๋ว หรือดอกไม้เลียนแบบธรรมชาติได้ดี เพราะมีเนื้อละเอียดเนียน เมื่อแกะออกใช้แล้วต้องเก็บในภาชนะที่ปิดสนิทไม่ให้อากาศเข้าจะเก็บไว้ได้นานเป็นเดือน [3] ซึ่งในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์งานปั้นด้วยดินชนิดต่างๆ ผู้ประดิษฐ์จึงควรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับส่วนผสมและคุณลักษณะของดินแต่ละชนิด เนื่องจากเมื่อปั้นเป็นรูปแบบต่างๆ เมื่อดินปั้นแห้งแล้วจะมีความแข็งไม่สามารถดัดแปลงรูปทรงหรือปรับแก้ไขขนาดได้ [4] และในกระบวนการปั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ดี มีความสวยงาม แข็งแรงและทนทานอยู่ได้นาน ผู้ประดิษฐ์ควรเรียนรู้ถึงการนวดดินอย่างถูกวิธี เพื่อให้มีความเหมาะสมกับขนาดและลักษณะของเนื้อดินแต่ละชนิด [5]

ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการศึกษาการเลือกใช้ดินปั้นที่เหมาะสมกับงานประดิษฐ์ในรูปแบบต่างๆ โดยศึกษาคุณลักษณะของดินปั้นจำนวนทั้งสิ้น 3 ชนิด ประกอบด้วย ดินญี่ปุ่น ดินไทย และดินเยื่อกระดาษ ซึ่งในการศึกษาคุณลักษณะของดินปั้นแต่ละชนิดนั้นเป็นการนำเสนอถึงสมบัติทางเคมีและกายภาพของเนื้อดินปั้นแต่ละชนิด โดยเฉพาะค่าความชื้น และค่าความต้านทานแรงกด ซึ่งจะช่วยกำหนดแนวทางในการนำดินปั้นไปใช้ประโยชน์ต่อไป นอกจากนี้การศึกษาการผสมสีในดินปั้นแต่ละชนิดเป็นการช่วยกำหนดชนิดและปริมาณของสีที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยได้ทำการทดสอบสมบัติทางเคมี และกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนนำมาปั้นขึ้นรูปและดินปั้นที่แห้งหลังจากปั้นขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การศึกษาคุณภาพของเนื้อดินสำหรับที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์

2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

2.1.1.1 ดินญี่ปุ่น

ทำการเตรียมดินญี่ปุ่นที่มีลักษณะเนื้อละเอียด สีขาว ปั้นง่ายมาก ผิวเนียนลื่นขณะใช้งาน เนื้อดินมีความยืดหยุ่นสูงและรักษาความชื้นได้ดีมาก ยึดเกาะกับพื้นผิววัสดุต่างๆ ได้ เมื่อสัมผัสอากาศมีอัตราการหดตัวที่น้อยมาก สามารถแกะ ขัด แต่ง เจาะ หรือเคลือบได้ และปั้นแต่งผิวดินให้เรียบได้โดยการใช้น้ำลูบ โดยเตรียมเป็นก้อนวงกลมขนาดก้อนละ 30 กรัม สำหรับนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังแสดงในภาพที่ 1

2.1.1.2 ดินไทย

ทำการเตรียมดินไทยที่มีลักษณะเนื้อดินนุ่ม ปั้นง่ายเก็บได้ทุกรายละเอียด ครบ 360 องศา บิดได้ไม่งอเมื่อชิ้นงานแห้งสามารถแห้งและแข็งได้ เมื่อสัมผัสกับอากาศ เพียงทิ้งไว้ในอุณภูมิห้อง ใช้เวลา 24 - 48 ชั่วโมง โดยเตรียมเป็นก้อนวงกลมขนาดก้อนละ 30 กรัม สำหรับนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังแสดงในภาพที่ 1

2.1.1.3 ดินเยื่อกระดาษ

ทำการเตรียมดินเยื่อกระดาษที่มีลักษณะเนื้อดินเหนียว ใช้งานง่ายดินแข็งตัวเร็ว ไม่ยุบตัวง่าย โดยเตรียมเป็นก้อนวงกลมขนาดก้อนละ 30 กรัม สำหรับนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังแสดงในภาพที่ 1

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 1 ลักษณะของดินปั้น (ก) ดินญี่ปุ่น (ข) ดิo ไทย และ (ค) ดินเยื่อกระดาษ

2.1.2 ศึกษาคุณภาพของเนื้อดินสำหรับที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์

ทำการศึกษาคุณภาพของเนื้อดินสำหรับที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์ จำนวน 3 ชนิด ดินญี่ปุ่น ดิน

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ไทย ดินเยื่อกระดาษ โดยการทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพ ประกอบด้วย

2.1.2.1 การวัดค่าความชื้น

เป็นการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง บันทึกน้ำหนักก่อนการอบ และบันทึกน้ำหนักที่น้อยที่สุดของถ้วยอลูมิเนียมและน้ำหนักตัวอย่างหลังจากอบแห้ง แล้วทำการคำนวณหาร้อยละความชื้นจากสิ่งทดลอง ดังสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักที่หายไป (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (1)$$

2.1.2.2 การวัดค่าแรงกด

ทำการเตรียมตัวอย่างของดินปั้นทั้ง 3 ชนิดๆ ละ 30 กรัม ปั้นให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 5 x 5 เซนติเมตร เพื่อนำมาทดสอบค่าแรงกด ด้วยเครื่องวัดค่าแรงกด แรงดึง ยี่ห้อ DASK รุ่น DS-500 โดยการกดวัดความแข็งของชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 5 จุด ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้หัวกดแบบแหลม โดยวัดความลึกของหัวกดที่จมลงไปในเนื้อวัสดุลงไปโดยประมาณ 1 เซนติเมตร ภายในระยะเวลา 10 วินาที แล้วทำการบันทึกค่าความต้านทานแรงกดที่ได้

ทำการศึกษาคุณภาพของเนื้อดินสำหรับที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์แต่ละชนิดโดยพิจารณาจากค่าความชื้นและค่าความต้านทานแรงกด โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่าความแตกต่าง เพื่อทดสอบหาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) แล้วนำสิ่งทดลองไปดำเนินการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

2.2 การศึกษาการใช้สีสำหรับดินปั้นในงานประดิษฐ์

ทำการศึกษาการใช้สีสำหรับดินปั้นในงานประดิษฐ์จำนวน 3 ชนิด ประกอบด้วย ดินญี่ปุ่น ดินไทย ดินเยื่อกระดาษ โดยปัจจัยที่จะทำการศึกษา คือ ชนิดของสีที่นำมาใช้ในการศึกษา แปรเป็น 3 ชนิด ประกอบด้วย สีผสมอาหาร ตรา Winner สีอะคริลิค ตรา Renaissance สีน้ำมัน ตรา Winsor และศึกษาปริมาณของสี แปรเป็น 2 ระดับ ประกอบด้วย ร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักดินปั้น โดยเลือกใช้สีที่เป็นเฉดสีแดงจากสีทั้ง 3 ชนิด ทำการวางแผนการทดลองแบบ Factorials in CRD จะได้ทั้งหมด 6 สิ่งทดลอง ต่อดินปั้น 1 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ทำการศึกษาการใช้สีสำหรับดินปั้นในงานประดิษฐ์ ประเภทดินญี่ปุ่น ดินไทย และดินเยื่อกระดาษ

สิ่งทดลอง	ชนิดของสี	ปริมาณสี (ร้อยละ)
1	สีผสมอาหาร	5
2	สีอะคริลิค	5
3	สีน้ำมัน	5
4	สีผสมอาหาร	10
5	สีอะคริลิค	10
6	สีน้ำมัน	10

นำดินปั้นที่ได้ทั้ง 6 สิ่งทดลองต่อดินปั้น 1 ชนิด มาทำการศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพ และลักษณะที่ปรากฏ โดยทำการศึกษาความแตกต่างของเนื้อดินปั้นที่ผสมสีแล้วยังไม่แห้งและเนื้อดินปั้นที่แห้งแล้ว ประกอบด้วย

2.2.2 การศึกษาลักษณะที่ปรากฏ

เป็นการศึกษาลักษณะที่ปรากฏของดินปั้นที่ผ่านการผสมสีแต่ละชนิด ด้วยวิธีการสังเกต แล้วทำการบันทึกภาพพร้อมจดบันทึก

2.2.3 การวัดค่าสี

เป็นการศึกษาลักษณะการติดสีแต่ละชนิดด้วยการทดสอบผสมสีเป็นเฉดสีแดง แล้วศึกษาค่าสีโดยการใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab Lovibond รุ่น SP 60 ใช้ระบบสี CIE LAB วัดค่า L* a* b* และ ΔE เป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะ Color space โดยกำหนดให้ L* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100

a* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

a* ที่เป็น – สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

b* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

b* ที่เป็น – สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

2.2.3 การวัดค่าความต้านทานแรงกด

เป็นการเตรียมตัวอย่างของดินปั้นที่ผ่านการผสมสีแล้วทั้ง 3 ชนิดๆละ 30 กรัม เพื่อนำมาทดสอบค่าแรงกด ด้วยเครื่องวัดค่าแรงกดแรงดึง ยี่ห้อ DASK รุ่น DS-500 โดยการกดวัดความแข็งของชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 5 จุด ซึ่งการทดสอบนี้ จะวัดความลึกของหัวกดที่จมลงไปในเนื้อวัสดุ ภายในระยะเวลา 10 วินาที แล้วทำการบันทึกค่าความต้านทานแรงกดที่ได้

2.2.4 การวัดค่าความชื้น (ตามมาตรฐาน AOAC, 2012)

เป็นวิธีการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง บันทึกน้ำหนักก่อนการอบ และบันทึกน้ำหนักที่น้อยที่สุดของถ้วยอลูมิเนียม และน้ำหนักตัวอย่างหลังจากอบแห้ง แล้วทำการคำนวณหาร้อยละความชื้นตามสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักที่หายไป (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (1)$$

ทำการศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพ และลักษณะที่ปรากฏของดินปั้นแต่ละชนิดที่ผ่านการผสมสีชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากลักษณะที่ปรากฏ ค่าสี ค่าความต้านทานแรงกด และค่าความชื้น โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่าความแตกต่าง เพื่อทดสอบหาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) เพื่อศึกษาการใช้สีที่เหมาะสมสำหรับดินปั้นแต่ละชนิดสำหรับนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ต่อไป

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิจัย

3.1.1 ผลการศึกษาคุณภาพของเนื้อดินสำหรับที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์

จากการศึกษาคุณภาพของเนื้อดินสำหรับที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์ จำนวน 3 ชนิด ประกอบด้วย ดินญี่ปุ่น ดินไทย และดินเยื่อกระดาษ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าความชื้น และการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อดินสำหรับที่นำมาใช้ในงานประดิษฐ์

ชนิดของดินปั้น	การวิเคราะห์คุณภาพ	
	ค่าความชื้น	ค่าความต้านทานแรงกด (นิวตัน)
ดินญี่ปุ่น	$5.68^{c} \pm 0.76$	$13.87^{b} \pm 0.40$
ดินไทย	$39.75^{a} \pm 0.36$	$7.53^{c} \pm 0.15$
ดินเยื่อกระดาษ	$22.19^{b} \pm 0.38$	$53.27^{a} \pm 1.57$

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 2 พบว่า ดินไทยมีค่าความชื้นสูงที่สุด โดยมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 39.75 ± 0.36 แต่มีค่าความต้านทานแรงกดอยู่ในระดับน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 7.53 ± 0.15 นิวตัน เนื่องจากดินไทยนั้นมีลักษณะอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นได้ง่าย สำหรับดินญี่ปุ่นนั้นเป็นดินที่มีค่าความชื้นน้อยที่สุด โดยมีค่าความชื้นเพียงร้อยละ 5.68 ± 0.76 แต่มีค่าความต้านทานแรงกดอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.87 ± 0.40 นิวตัน และในส่วนของดินเยื่อกระดาษนั้นมีค่าความชื้นร้อยละ 22.19 ± 0.38 และมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 53.27 ± 1.57 นิวตัน ซึ่งอยู่ในระดับสูงที่สุด

3.1.2 ผลการศึกษาการใช้สีสำหรับดินปั้นในงานประดิษฐ์

จากการศึกษาการใช้สีสำหรับดินปั้นในงานประดิษฐ์ ด้วยสีทางเคมี 3 ชนิด ประกอบด้วย สีผสมอาหาร สีอะคริลิค และสีน้ำมัน โดยใช้เป็นสีแดงเพื่อทดสอบความแตกต่างของสีที่ปรากฏในสิ่งทดลอง

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ขณะที่ยังไม่แห้งและเมื่อแห้งดีแล้วของดินปั้นทั้ง 3 ชนิด ดังนี้

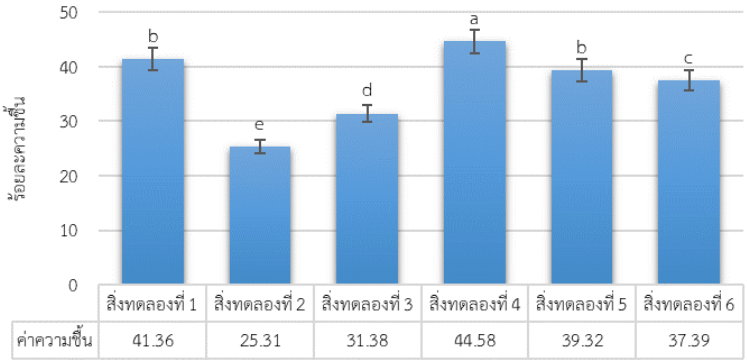
3.1.2.1 ดินญี่ปุ่น

จากการศึกษาการผสมสีทั้ง 3 ชนิด ในปริมาณที่แตกต่างกันสำหรับดินญี่ปุ่นเพื่อใช้ในงานประดิษฐ์ โดยทำการศึกษาลักษณะที่ปรากฏของเนื้อดินที่ผ่านการผสมสีเรียบร้อยแล้ว ทั้งในลักษณะของดินที่ทำการผสมสีก่อนผิวดินจะแห้งและดินที่แห้งแล้วหลังผ่านการผสมสี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะที่ปรากฏของดินญี่ปุ่นเมื่อผ่านการผสมสีก่อนแห้งและหลังจากแห้งแล้ว

ชนิดของสี	ปริมาณสี (ร้อยละ)	ลักษณะที่ปรากฏ	
		ก่อนแห้ง	หลังแห้ง
สีผสมอาหาร	5		
สีอะคริลิค	5		
สีน้ำมัน	5		
สีผสมอาหาร	10		
สีอะคริลิค	10		
สีน้ำมัน	10		

จากตารางที่ 3 พบว่า ดินญี่ปุ่นที่ผสมด้วยสีอะคริลิคในปริมาณร้อยละ 10 มีลักษณะความกลมกลืนของสีและความเข้ากันในเนื้อดินญี่ปุ่นได้ดีที่สุด และเมื่อนำดินญี่ปุ่นที่ผ่านการผสมสีแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน มาทำการทดสอบค่าความชื้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 2



หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ภาพที่ 2 ผลการศึกษาค่าความชื้นของดินญี่ปุ่น

จากภาพที่ 2 พบว่า การใช้สีผสมอาหารในการผสมสีกับเนื้อดินญี่ปุ่นจะส่งผลให้ดินมีค่าความชื้นสูงมากกว่าการผสมสีด้วยสีอะคริลิคและสีน้ำมัน ซึ่งจากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความชื้นของสีแต่ละชนิดเมื่อเพิ่มปริมาณสีมากขึ้นค่าความชื้นก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และจากผลการทดลองพบว่า การผสมสีอะคริลิคกับดินญี่ปุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 5 ส่งผลให้ดินญี่ปุ่นมีค่าความชื้นน้อยที่สุด โดยมีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 25.31 เมื่อนำสิ่งทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ค่าสี จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาค่าสีของดินญี่ปุ่นเมื่อผ่านการผสมสีชนิดต่างๆ

สิ่งทดลอง	ค่าสี					
	ก่อนแห้ง			หลังแห้ง		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	69.19^{e} ± 0.04	21.14^{b} ± 0.09	-1.36^{c} ± 0.01	72.25^{c} ± 0.03	16.69^{d} ± 0.01	-1.39^{c} ± 0.01
2	73.35^{c} ± 0.04	24.89^{a} ± 0.07	1.50^{a} ± 0.01	70.75^{d} ± 0.09	17.23^{c} ± 0.19	-1.14^{b} ± 0.02
3	71.01^{d} ± 0.01	19.52^{c} ± 0.11	-3.84^{f} ± 0.02	70.78^{d} ± 0.03	17.78^{b} ± 0.05	-3.36^{d} ± 0.05
4	71.09^{d} ± 0.03	14.55^{e} ± 0.01	-3.72^{e} ± 0.01	69.34^{e} ± 0.10	16.71^{d} ± 0.14	-3.70^{e} ± 0.05
5	75.63^{b} ± 0.08	21.36^{b} ± 0.44	0.93^{b} ± 0.06	74.56^{b} ± 0.01	23.58^{a} ± 0.04	1.50^{a} ± 0.00
6	75.93^{a} ± 0.11	19.12^{d} ± 0.12	-2.40^{d} ± 0.04	76.46^{a} ± 0.26	15.39^{e} ± 0.04	-4.44^{f} ± 0.02

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 4 พบว่า การผสมสีในดินญี่ปุ่นด้วยสีชนิดต่างๆ ในปริมาณที่ต่างกัน โดยการทดสอบการผสมสีในกลุ่มสีแดง พบว่าการผสมสีในเนื้อดินญี่ปุ่นเมื่อปล่อยให้ดินแห้งค่าความสว่าง (L*) จะลดน้อยลง เนื่องจากสีของดินญี่ปุ่นมีความเข้มขึ้น โดยจากผลการทดลองเห็นได้ว่าการใช้สีอะคริลิคในดินญี่ปุ่นจะให้ลักษณะความเป็นสีแดงได้เด่นชัดกว่าการใช้สีชนิดอื่น โดยการใช้สีอะคริลิคจะให้ค่า (a*) เป็นไปในทิศทางสีแดง และให้ค่า (b*) เป็นไปในทิศทางสีเหลือง ส่วนการผสมสีดินญี่ปุ่นด้วยสีผสมอาหารและสีน้ำมันจะให้ค่า (a*) เป็นไปในทิศทางสีแดงเช่นเดียวกัน แต่จะให้ค่า (b*) เป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน เมื่อนำสิ่งทดลองทั้ง 6 สิ่งทดลองมาทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงกด เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินญี่ปุ่นเมื่อนำมาใช้ในการปั้นขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแรงกดของดินญี่ปุ่นเมื่อผ่านการผสมสีชนิดต่างๆ

สิ่งทดลอง	ค่าความต้านทานแรงกด (นิวตัน)	
	ก่อนแห้ง	หลังแห้ง
1	9.37^{d} ± 0.45	21.10^{a} ± 0.46
2	11.63^{ab} ± 1.15	19.13^{b} ± 0.50
3	12.70^{a} ± 0.50	10.20^{e} ± 0.96
4	10.87^{bc} ± 0.25	13.20^{d} ± 0.36
5	10.43^{cd} ± 0.32	14.47^{c} ± 0.15
6	10.60^{bc} ± 0.53	13.63^{cd} ± 0.45

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 5 พบว่า สิ่งทดลองมีค่าความต้านทางแรงกดสูงขึ้นเมื่อแห้งหลังจากผ่านการผสมสีเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งการผสมสีในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินญี่ปุ่น สิ่งทดลองให้ค่าความต้านทางแรงกดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน เมื่อนำดินญี่ปุ่นที่ผ่านการผสมสีแล้วปล่อยไว้ให้แห้งจะมีค่าความต้านทางแรงกดเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 3 – 4 นิวตัน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า ดินญี่ปุ่นที่ทำการผสมด้วยสีอะคริลิคในปริมาณร้อยละ 10 มีค่าความต้านทานแรงกดหลังแห้งเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 4 นิวตัน ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์งานศิลปประดิษฐ์มากที่สุด เนื่องจากดินญี่ปุ่นมีความยืดหยุ่นสูงและรักษาความชื้นได้ดีมาก ดังนั้นเมื่อใช้สีอะคริลิกผสมในดินญี่ปุ่นจึงทำให้มีค่าความต้านทานแรงกดสูงขึ้นมาก สำหรับสิ่งทดลองที่ 1-2 ที่มีค่าความต้านทานแรงกดหลังจากแห้งแล้วในระดับที่สูงมากเกิดจากการผสมสีต่างๆ ในดินญี่ปุ่นแล้วเมื่อดินแห้งเกิดปัญหาเนื้อดินแตกเนื่องจากปริมาณน้ำในผิวดินในขณะที่ผสมสีมีปริมาณไม่เหมาะสมส่งผลให้ผิวดินแตก ไม่สามารถนำมาใช้ในงานปั้นได้

3.1.2.2 ดินไทย

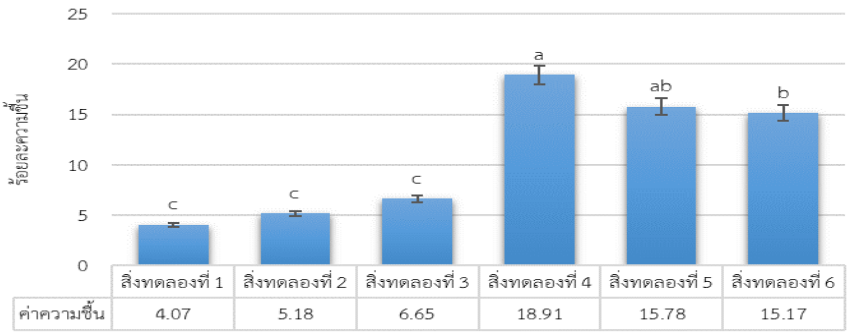
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

จากการศึกษาการผสมสีทั้ง 3 ชนิด ในปริมาณที่แตกต่างกันสำหรับดินไทยเพื่อใช้ในงานประดิษฐ์ โดยทำการศึกษาลักษณะที่ปรากฏของเนื้อดินที่ผ่านการผสมสีเรียบร้อยแล้ว ทั้งในลักษณะของดินที่ทำการผสมสีก่อนผิวดินจะแห้งและดินที่แห้งแล้วหลังผ่านการผสมสี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะที่ปรากฏของดินไทยเมื่อผ่านการผสมสีก่อนแห้งและหลังจากแห้งแล้ว

ชนิดของสี	ปริมาณสี (ร้อยละ)	ลักษณะที่ปรากฏ	
		ก่อนแห้ง	หลังแห้ง
สีผสมอาหาร	5		
สีอะคริลิค	5		
สีน้ำมัน	5		
สีผสมอาหาร	10		
สีอะคริลิค	10		
สีน้ำมัน	10		

จากตารางที่ 6 พบว่า ลักษณะของดินไทยที่ผ่านการผสมสีแล้วมีการเปลี่ยนแปลงของสีก่อนและหลังดินปั้นแห้งน้อยมาก และเมื่อนำดินไทยที่ผ่านการผสมสีแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน มาทำการทดสอบค่าความชื้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3



หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ภาพที่ 3 ผลการศึกษาค่าความชื้นของดินไท

จากภาพที่ 3 พบว่า ค่าความชื้นของสิ่งทดลองที่ผสมสีในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินไทยมีค่าความชื้นน้อยกว่าสิ่งทดลองที่ผสมสีในปริมาณร้อยละ 10 ซึ่งสิ่งทดลองที่ผสมด้วยสีผสมอาหารร้อยละ 10 มีค่าร้อยละความชื้นอยู่ในระดับสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 18.91 ส่วนดินปั้นที่ผสมด้วยสีอะคริลิคร้อยละ 10 มีค่าร้อยละความชื้นอยู่ที่ 15.78 และการผสมด้วยสีน้ำมันร้อยละ 10 มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 15.17 ตามลำดับ ส่วนสิ่งทดลองที่ผสมด้วยสีชนิดต่างๆ ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินไทย ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และมีนำสิ่งทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ค่าสี ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 7

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ตารางที่ 7 ผลการศึกษาค่าสีของดินไทยเมื่อผ่านการผสมสีชนิดต่างๆ

สิ่งทดลอง	ค่าสี					
	ก่อนแห้ง			หลังแห้ง		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	$70.54^{e} \pm 0.01$	$13.89^{f} \pm 0.02$	$-3.74^{e} \pm 0.01$	$65.60^{e} \pm 0.04$	$16.61^{d} \pm 0.56$	$-1.22^{c} \pm 0.03$
2	$73.33^{a} \pm 0.03$	$19.01^{d} \pm 0.02$	$-0.43^{b} \pm 0.12$	$69.26^{a} \pm 0.02$	$24.44^{a} \pm 0.05$	$2.89^{a} \pm 0.03$
3	$72.11^{c} \pm 0.04$	$16.81^{e} \pm 0.03$	$-3.26^{d} \pm 0.01$	$65.76^{d} \pm 0.10$	$16.51^{d} \pm 0.12$	$-3.23^{e} \pm 0.04$
4	$69.41^{f} \pm 0.06$	$19.91^{c} \pm 0.03$	$-4.40^{f} \pm 0.02$	$64.26^{f} \pm 0.04$	$14.61^{e} \pm 0.02$	$-4.05^{f} \pm 0.01$
5	$72.54^{b} \pm 0.02$	$25.63^{a} \pm 0.03$	$1.84^{a} \pm 0.02$	$69.04^{b} \pm 0.03$	$23.29^{b} \pm 0.09$	$1.44^{b} \pm 0.06$
6	$71.71^{d} \pm 0.07$	$22.17^{b} \pm 0.15$	$-2.59^{c} \pm 0.07$	$67.51^{c} \pm 0.03$	$17.15^{e} \pm 0.32$	$-2.09^{d} \pm 0.08$

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 7 พบว่า ดินไทยหลังจากผสมสีแต่ละชนิดเสร็จเรียบร้อยแล้วจะมีค่าความสว่าง (L*) สูงกว่าดินไทยที่ถูกทิ้งไว้ให้แห้งหลังจากขึ้นรูปผลิตภัณฑ์งานปั้นทุกสิ่งทดลอง โดยสิ่งทดลองที่ 4 ดินไทยที่ผสมด้วยสีผสมอาหารในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของปริมาณดินไทย มีค่าความสว่างน้อยที่สุด โดยมีค่าความสว่างเท่ากับ 64.26 ± 0.04 และทุกสิ่งทดลองมีค่า (a*) เป็นไปในทิศทางสีแดง สำหรับมีค่า (b*) เป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน ยกเว้นสิ่งทดลองที่ผสมสีอะคริลิกมีค่า (b*) เป็นไปในทิศทางสีเหลือง เมื่อนำสิ่งทดลองทั้ง 6 สิ่งทดลองได้วิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแรงกดของดินไทยเมื่อผ่านการผสมสีชนิดต่างๆ

สิ่งทดลอง	ค่าความต้านทานแรงกด (นิวตัน)	
	ก่อนแห้ง	หลังแห้ง
1	$3.03^{e} \pm 0.06$	$13.43^{a} \pm 0.49$
2	$4.87^{d} \pm 0.15$	$12.43^{b} \pm 0.31$
3	$5.00^{d} \pm 0.00$	$12.53^{b} \pm 0.38$
4	$10.00^{a} \pm 0.44$	$10.80^{c} \pm 0.75$
5	$5.60^{c} \pm 0.26$	$10.60^{cd} \pm 0.40$
6	$6.67^{b} \pm 0.31$	$9.93^{d} \pm 0.21$

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 8 พบว่า ดินไทยที่ผ่านการผสมสีแล้วทั้งหมด 6 สิ่งทดลอง มีค่าความต้านทานแรงกดสูงขึ้น เมื่อดินมีลักษณะแห้งหลังจากการปั้นขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ สำหรับสิ่งทดลองที่ 4 ดินไทยที่ผสมสีผสมอาหาร ในปริมาณร้อยละ 10 มีค่าความต้านทานแรงใกล้เคียงดินไทยก่อนแห้ง จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์งานประดิษฐ์มากที่สุด และผิวสัมผัสของดินไทยมีความเรียบเนียนไม่มีรอยแตกของเนื้อดิน ซึ่งสีผสมอาหารมีความเข้ากันได้กับเนื้อดินไทยเป็นอย่างดี และในการนำดินไทยมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆนั้น โดยส่วนใหญ่นิยมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์งานปั้นจิ๋ว จึงมีความต้องการในการเลือกใช้ดินไทยที่มีลักษณะเนื้อดินคงตัวและยืดหยุ่นได้ดี

3.1.2.3 ดินเยื่อกระดาษ

จากการศึกษาการผสมสีทั้ง 3 ชนิด ในปริมาณที่แตกต่างกันสำหรับดินเยื่อกระดาษเพื่อใช้ในงานประดิษฐ์ โดยทำการศึกษาลักษณะที่ปรากฏของเนื้อดินที่ผ่านการผสมสีเรียบร้อยแล้ว ทั้งในลักษณะของดินที่ทำการผสมสีก่อนผิวดินจะแห้งและดินที่แห้งแล้วหลังผ่านการผสมสี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 9

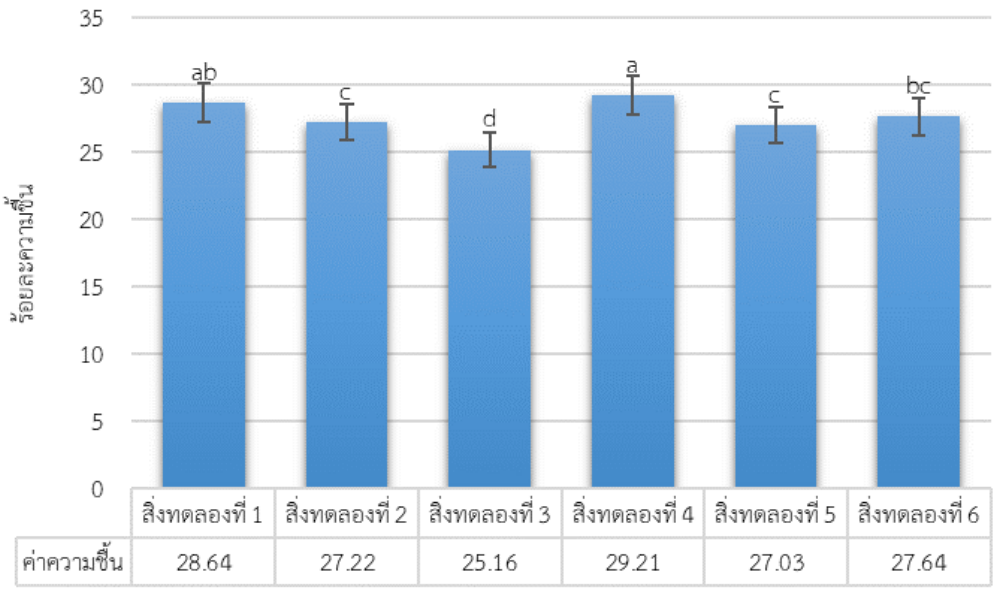
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ตารางที่ 9 ลักษณะที่ปรากฏของดินเยื่อกระดาษเมื่อผ่านการผสมสีก่อนแห้งและหลังจากแห้งแล้ว

ชนิดของสี	ปริมาณสี (ร้อยละ)	ลักษณะที่ปรากฏ	
		ก่อนแห้ง	หลังแห้ง
สีผสมอาหาร	5		
สีอะคริลิค	5		
สีน้ำมัน	5		
สีผสมอาหาร	10		
สีอะคริลิค	10		
สีน้ำมัน	10		

จากตารางที่ 9 พบว่า ดินเยื่อกระดาษที่ผสมสีด้วยสีผสมอาหารเมื่อดินแห้งแล้วเนื้อดินจะมีลักษณะแตกราว ส่วนเมื่อนำมาผสมด้วยสีอะคริลิค เห็นได้ว่าการกระจายตัวของเม็ดสียังไม่ดีเท่าที่ควร สำหรับการผสมด้วยสีน้ำมันจะมีการกระจายของสีและลักษณะของผิวดินเยื่อกระดาษดีที่สุด และเมื่อนำดินเยื่อกระดาษที่ผ่านการผสมสีแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน มาทำการทดสอบค่าความชื้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4

จากภาพที่ 4 พบว่า ค่าความชื้นของดินเยื่อกระดาษที่ทำการผสมสีด้วยสีผสมอาหาร และสีอะคริลิคในปริมาณร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$ ส่วนดินเยื่อกระดาษที่ผสมด้วยสีน้ำมันในปริมาณร้อยละ 5 และร้อยละ 10 มีความแตกต่างกัน



หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ภาพที่ 4 ผลการศึกษาค่าความชื้นของดินเยื่อกระดาษ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยดินเยื่อกระดาษที่ผสมด้วยสีน้ำในในปริมาณร้อยละ 5 มีค่าความชื้นอยู่ในระดับน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 25.16 และมีนำสิ่งทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ค่าสี ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการศึกษาค่าสีของดินเยื่อกระดาษเมื่อผ่านการผสมสีชนิดต่างๆ

สิ่งทดลอง	ค่าสี					
	ก่อนแห้ง			หลังแห้ง		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	$68.52^{f} \pm 0.01$	$13.71^{e} \pm 0.01$	$-3.66^{c} \pm 0.01$	$67.54^{d} \pm 0.55$	$11.72^{d} \pm 1.11$	$-2.88^{d} \pm 0.25$
2	$73.73^{c} \pm 0.03$	$18.42^{a} \pm 0.12$	$-0.26^{a} \pm 0.03$	$75.63^{a} \pm 0.11$	$16.21^{b} \pm 0.09$	$-1.54^{b} \pm 0.01$
3	$73.32^{d} \pm 0.67$	$14.81^{d} \pm 0.03$	$-3.80^{e} \pm 0.02$	$75.51^{a} \pm 0.43$	$15.42^{b} \pm 0.29$	$-4.26^{e} \pm 0.04$
4	$70.38^{e} \pm 0.04$	$13.43^{f} \pm 0.03$	$-3.71^{d} \pm 0.00$	$68.69^{c} \pm 0.14$	$13.57^{c} \pm 0.18$	$-2.57^{c} \pm 0.04$
5	$75.02^{a} \pm 0.01$	$17.19^{b} \pm 0.02$	$-0.91^{b} \pm 0.00$	$74.80^{b} \pm 0.01$	$18.87^{a} \pm 0.03$	$-0.34^{a} \pm 0.01$
6	$74.59^{b} \pm 0.02$	$15.56^{c} \pm 0.02$	$-4.64^{f} \pm 0.01$	$75.34^{a} \pm 0.11$	$19.71^{a} \pm 0.04$	$-2.51^{c} \pm 0.01$

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 10 พบว่า ดินเยื่อกระดาษที่ผสมด้วยสีผสมอาหารมีค่าความสว่าง (L*) อยู่ในระดับน้อยที่สุด แต่มีค่า (a*) ที่แสดงค่าความเป็นสีแดงอยู่น้อยกว่าการผสมด้วยสีอะคริลิคและสีน้ำมัน และเมื่อพิจารณาที่ค่า (b*) ทุกสิ่งทดลองมีค่าเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน โดยสิ่งทดลองที่ผสมด้วยสีน้ำมันจะแสดงค่า (b*) ที่เป็นไปในทิศทางสีน้ำเงินอยู่ในระดับที่สูงกว่าสิ่งทดลองที่ผสมด้วยสีชนิดอื่น และเมื่อนำสิ่งทดลองทั้ง 6 สิ่งทดลอง มาทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแรงกดของดินไทยเมื่อผ่านการผสมสีชนิดต่างๆ

สิ่งทดลอง	ค่าความต้านทานแรงกด (นิวตัน)	
	ก่อนแห้ง	หลังแห้ง
1	$12.43^{d} \pm 0.57$	$14.20^{b} \pm 0.56$
2	$18.63^{a} \pm 1.02$	$13.53^{bc} \pm 0.80$
3	$12.43^{d} \pm 0.40$	$12.73^{cd} \pm 0.23$
4	$15.17^{c} \pm 0.59$	$12.37^{d} \pm 0.67$
5	$18.53^{a} \pm 0.75$	$19.57^{a} \pm 0.42$
6	$16.57^{b} \pm 0.81$	$13.80^{bc} \pm 0.62$

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกัดความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ± หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐา

จากตารางที่ 11 พบว่า ดินเยื่อกระดาษโดยส่วนใหญ่เมื่อนำมาผสมสีแล้วนำไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมื่อดินแห้งแล้วค่าความต้านทานแรงกดลดน้อยลง ซึ่งมีเพียงสิ่งทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นการนำดินเยื่อกระดาษผสมด้วยสีน้ำมันในปริมาณร้อยละ 5 ที่มีค่าความต้านทานแรงกดขณะก่อนแห้งและหลังแห้งไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าความต้านทานแรงกดก่อนเนื้อดินแห้งเท่ากับ 12.43 ± 0.40 นิวตัน และเมื่อนำดินเยื่อกระดาษไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เมื่อดินแห้งแล้วมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 12.73 ± 0.23 นิวตัน จึงมีความเหมาะสมในการนำดินเยื่อกระดาษไปผสมด้วยสีน้ำมันในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินไปใช้ในการกำหนดชนิดและปริมาณของสีสำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์งานประดิษฐ์ต่อไป

3.2 อภิปรายผล

จากการศึกษาข้อมูลพบว่า ดินญี่ปุ่นเป็นดินที่มีราคาแพง เนื่องจากเป็นดินปั้นที่ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ เมื่อนำมาทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพ พบว่า ดินญี่ปุ่นมีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับร้อยละ 5.68 ± 0.76 และมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 13.87 ± 0.40 นิวตัน ซึ่งลักษณะของเนื้อดินมีความละเอียด สามารถเก็บไว้ใช้ได้นาน ไม่อ่อนหรือแข็งจนเกินไป โดยดินญี่ปุ่นสามารถผสมสีได้

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

อย่างหลากหลายชนิด ไม่แห้งง่าย ปั้นได้นานตามความต้องการ เมื่อทิ้งไว้ให้แห้งชิ้นงานก็จะมีความสวยงามเหมือนธรรมชาติ [3] โดยจากการศึกษาพบว่าดินญี่ปุ่นเมื่อนำมาผสมสีชนิดต่างๆ จะมีค่าร้อยละความชื้นสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการผสมสีและมีการนวดเนื้อดิน ตัวดินจะมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและมีน้ำของสีที่น้ำมาผสมเป็นตัวเพิ่มปฏิกิริยาความชื้นให้กับผิวดิน และเมื่อผสมสีเสร็จแล้วเนื้อดินปั้นจะมีค่าความต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งไว้ให้แห้ง ซึ่งเกิดจากการหดตัวของเนื้อดินส่งผลให้เนื้อดินมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น [6] และดินญี่ปุ่นนั้นมีความเหมาะสมในการนำมาผสมด้วยสีอะคริลิก เนื่องจากการใช้สีอะคริลิกในดินญี่ปุ่นทำให้เนื้อสีอะคริลิกนั้นสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อดินญี่ปุ่นได้อย่างดี [7] และในการที่ผิวสัมผัสของดินปั้นมีค่าความต้านทานแรงกดสูงขึ้นเมื่อเนื้อดินแห้งสนิทจะส่งผลให้ลักษณะของงานปั้นมีความคงตัวได้ดีหลังการนำไปใช้งาน สำหรับดินไทยเป็นดินปั้นคนไทยคิดค้นวัสดุให้มีความใกล้เคียงหรือทดแทนจากดินที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยคิดค้นส่วนผสมต่างๆ เช่น จากธัญพืช ดินขาว ใยแก้ว สบู่ เยื่อกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุหลักและผสมด้วยสารที่มีความเหนียวหรือหนืด จึงทำให้ดินไทยเป็นที่แพร่หลายและนิยมไม่แพ้ดินปั้นจากต่างประเทศ [3] ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพ พบว่า ดินไทยมีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับร้อยละ 39.75 $\pm$ 0.36 และมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 7.53 $\pm$ 0.15 นิวตัน ซึ่งดินไทยมีส่วนผสมด้วยแป้งต่างๆ เป็นการนำเอาแป้งต่างๆที่มีสีขาว ได้แก่ แป้งสาลี แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง ดินขาวหรือดินสอพอง เป็นวัตถุหลักในการผสมกับกาวลาเท็กซ์ และผสมสารกันบูด หรือสารกันเชื้อราคลุกเคล้าให้เข้ากัน [6] จึงส่งผลให้ดินไทยนั้นมีค่าความชื้นสูง ซึ่งความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของแป้ง เนื่องจากมีสภาวะเหมาะสมกบการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมเสีย [8] แต่ทั้งนี้หากดินไทยเป็นดินที่ใช้ส่วนผสมที่มาจากธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ไม่ใช่ส่วนผสมจากแป้งจะส่งผลให้เนื้อดินมีความใสมากกว่าดินที่ใช้ส่วนผสมจากแป้ง [2] ซึ่งดินประเภทนี้สามารถผสมสีน้ำ สีโปสเตอร์ สีผสมอาหาร หรือสีฝุ่นได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้นำไปใช้ [3] จากการศึกษาทดลองพบว่าดินไทยเมื่อนำไปผสมกับสีชนิดต่างๆ แล้วมีค่าความชื้นลดลงเนื่องจากการนวดผสมสีกับดินไทยซึ่งมีแป้งเป็นส่วนผสมหลัก จึงมีการดูดซึมน้ำเป็นอย่างดี ทำให้ผิวดินแห้งเมื่อสัมผัสอากาศ ส่งผลให้มีค่าความชื้นลดลงจากเดิม แต่เมื่อทิ้งดินไทยที่ผ่านการผสมสีแล้วไว้ให้แห้งสีของดินก็ยังคงเป็นสีเช่นเดิม ลักษณะของสีไม่มีความอ่อนลงหรือเข้มขึ้น และสีที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการผสมดินไทยมากที่สุดเป็นสีผสมอาหาร เนื่องจากสีผสมอาหารเป็นสีสังเคราะห์ที่ละลายน้ำได้ดี [11] ประกอบกับดินไทยเป็นดินที่มีค่าความชื้นสูงจึงทำให้การละลายตัวของสีผสมอาหารมีความกลมกลืนกัน และสุดท้ายดินเยื่อกระดาษ เป็นวัสดุปั้นชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมหลักมาจากเยื่อกระดาษ สามารถแห้งและแข็งเองได้โดยไม่ต้องอบ ซึ่งมีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 22.19 $\pm$ 0.38 และมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 53.27 $\pm$ 1.57 นิวตัน ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกดที่สูงกว่าดินปั้นชนิดอื่น เนื่องจากดินเยื่อกระดาษเป็นดินที่มีส่วนผสมของเซลลูโลสจากพืชเป็นส่วนประกอบ นั่นคือมีกระดาษเป็นส่วนผสม [9] โดยลักษณะเด่นของดินปั้นชนิดนี้คือ ความแข็งแรงทนทาน ยึดเกาะได้ทุกพื้นผิว สามารถใช้อุปกรณ์ตัดแต่งหรือใช้กระดาษทรายขัดได้ เนื้อดินขณะใช้มีความนุ่มและยืดหยุ่นพอสมควร [10] ซึ่งดินเยื่อกระดาษเมื่อนำไปผสมสีแล้วยังคงมีค่าความชื้นใกล้เคียงกับดินเยื่อกระดาษก่อนนำไปผสมสี แต่จะมีค่าความต้านทานแรงกดลดลง และมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งก่อนและหลังจากสีแห้ง โดยสีน้ำมันมีความเหมาะสมในการผสมในเนื้อดินเยื่อกระดาษมากที่สุด และสีน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นสารเคลือบผิวที่ผลิตขึ้นมาจากแอลคิดเรซิน (Alkyd resin) [12] โดยเมื่อนำมาผสมกับดินเยื่อกระดาษเนื้อสีจะมีความกลมกลืนกับดินเยื่อได้เป็นอย่างดี

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

4. สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินปั้นที่ใช้ในงานประดิษฐ์ พบว่า ดินญี่ปุ่น, ดินไทย และดินเยื่อกระดาษ มีค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ 5.68 $\pm$ 0.76, 39.75 $\pm$ 0.36 และ 22.19 $\pm$ 0.38 ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 13.87 $\pm$ 0.40, 7.53 $\pm$ 0.15 และ 53.27 $\pm$ 1.57 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อนำดินปั้นแต่ละชนิดมาศึกษาแนวทางในการผสมสี โดยการศึกษาชนิดของสีและปริมาณของสีที่เหมาะสม โดยทดลองการผสมสีด้วยสีแดง พบว่า ดินญี่ปุ่นมีความเหมาะสมในการผสมสีด้วยสีอะคริลิก ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินญี่ปุ่น สำหรับดินไทยมีความเหมาะสมในการผสมสีด้วยสีผสมอาหาร ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินไทย และดินเยื่อกระดาษมีความเหมาะสมในการผสมสีด้วยสี ในปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินเยื่อกระดาษ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นองค์ความรู้ในการจัดเตรียมและวางแผนการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ดินปั้นชนิดต่างๆ สำหรับนำมาใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์งานปั้นต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการทดสอบผลิตภัณฑ์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] วรอัญญู ณรงค์เดชา. (2552). งานศิลป์ดินไทยสู่การจัดการเรียนการสอนในรายวิชาศิลปะ. [รายงานการวิจัย]. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[2] กนกวรรณ กันทะกัน. การพัฒนาดินปั้นเถ้าแกลบสำหรับผลิตภัณฑ์งานประดิษฐ์. [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2557.

[3] กรีฑากร แสงสกุล. หัตถกรรมดินไทย: กรณีศึกษางานหัตถกรรมดินไทย OTOP ในเขตจังหวัดสมุทรสงคราม นนทบุรี และกรุงเทพมหานคร. [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินวิโรฒ; 2555.

[4] กษมา ถิ่นกาญจน์. การพัฒนาดินปั้นกากมะพร้าวสำหรับผลิตภัณฑ์งานประดิษฐ์. [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2562.

[5] อภิรัติ โสพศ, นิอา ดาวเจริญพร และรุ่งฤทัย รำพึงจิต. การพัฒนาแป้งปั้นจากเปลือกทุเรียนสำหรับผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก. [รายงานการวิจัย]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2555.

[6] กฤษณา ชูโชนาค. การพัฒนาดินปั้นจากโอเอซิสเหลือใช้สำหรับงานใบตอง. [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2560.

[7] ชญานิศ ต้นเทียน. การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในการสร้างสรรค์งานประติมากรรม. Veridian E-Journal, Silpakorn University. 2560; 10(1): 332-343.

[8] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. Moisture content [อินเตอร์เน็ต]. ม.ป.ป. [เข้าถึงเมื่อ 12 กุมภาพันธ์ 2567]. เข้าถึงได้จาก: http://www.foodnetwork solution .com/wiki/word/0 8 3 0/ Mois ture-content-ความชื้น

[9] Suriyan Sangsana. ดินเยื่อกระดาษ และวิธีการใช้งาน (paper clay slip) [อินเตอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 29 เมษายน 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://goterrestrial .com/ 2023/ 08/10/ดินเยื่อกระดาษ-และวิธีก/

[10] nara global co. ltd. ดินเยื่อกระดาษ คืออะไร? [อินเตอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 29

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

เมษายน 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://naraglobal.word press.com/2018/05/11/ดินเยื่อกระดาษ-คืออะไร/

[11] ภชมน พิชญาจิตติพงษ์. การผลิตและสมบัติทางชีวภาพของสีผสมอาหารจากเปลือกแก้วมังกรพันธุ์เนื้อผลสีแดง (*Hylocercus polyrhizus*). [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2556.

[12] ธนารักษ์ จันทรประสิทธิ์. การทดสอบคุณสมบัติสีน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนรักในงานลงรักปิดทอง. วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สจล. 2555; 15: 13-24.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

การหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Optimization for Reduction condition of Free Fatty Acid in Coconut Oil via Esterification Using Amberlyst 15 as a Catalyst

ศิรดา คชสวัสดิ์[1], จิรภา ใจดี[1], ศศิวิมล วุฒิกนกกาญจน์[1], กนกพร บุญทรง[1], อิ่มหรอน ทิ้งผอม[2] และ ปิยนุช นาคพงศ์[1]*

Sirada Kotsawart[1], Jirapa Jaidee[1], Sasiwimol Wootthikanokkhan[1], Kanokporn Boonsong[1], Imron Tingpom[2] and Piyanuch Nakpong[1*]

[1]สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

[2]ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงและชีวภาพ, บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

[2]Research and Green Product Development, Bangchak Corporation Public Company Limited, Bangkok, Thailand

Corresponding Author: Email: Piyanuch.n@mail.rmutk.ac.th

Received: 11-09-2024 ***Revised:*** 11-10-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวให้เหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยน้ำมันมะพร้าวซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรชนิดต่างๆ ที่สำคัญที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน 4 ชนิด ได้แก่ ปริมาณเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และเวลาในเกิดปฏิกิริยา ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าภายใต้ภาวะที่เหมาะสม (ปริมาณเมทานอล 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง) ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวลดลงเหลือ 0.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยตัวแปรทั้ง 4 ชนิด มีผลในเชิงบวกต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าว ยกเว้นเมื่อใช้ปริมาณเมทานอลที่ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก ตัวเร่งสีเขียว

ABSTRACT

This research was aimed to study the optimum conditions for reduction of free fatty acids content in coconut oil to less than 1% w/w by using esterification reaction with methanol in the presence of Amberlyst 15 as a catalyst. Coconut oil, which is used as a substrate, has an initial free fatty acid content of 3.93 % w/w. In this research, the effects of 4

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

different types of important variables towards esterification reactions were investigated. These variables included methanol content, catalyst content, reaction temperature, and reaction time. The results of the study show that under the optimum conditions (methanol content of 10 % v/v, catalyst content of 7.5 % w/v of oil, reaction temperature of 60 °C, and reaction time of 1.5 hrs.), the free fatty acid content in coconut oil was reduced to 0.90% w/w. All four variables had a positive effect on the esterification reaction of free fatty acids in coconut oil, except when methanol content was 20 and 30 % v/v

Keyword: Biodiesel, Cation exchange resin, Green catalyst

1. บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ทั้งพลังงานความร้อนในการประกอบอาหาร พลังงานกลที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนยานพาหนะ พลังงานลม พลังงานน้ำและพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ดีแหล่งพลังงานสำคัญของโลกที่ใช้มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันคือพลังงานที่มาจากปิโตรเลียม ซึ่งปิโตรเลียมจะหมายถึงแก๊สธรรมชาติ (Natural gas) น้ำมันดิบ (Crude oil) และคอนเดนเสท (Condensate) สำหรับประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันดิบไม่มากนัก และจำเป็นต้องมีการนำเข้าน้ำมันดิบเพื่อนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ สำหรับการใช้ภายในประเทศ ส่งผลทำให้เกิดการขาดดุลทางการค้า โดยผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญต่อการใช้งานทั้งในภาคขนส่งและภาคอุตสาหกรรม คือ น้ำมันดีเซล [1]

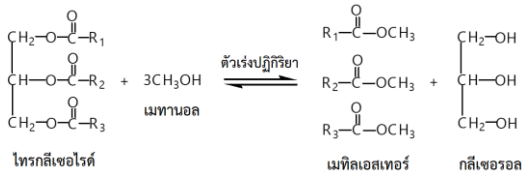
จากความวิตกกังวลที่แหล่งปิโตรเลียมกำลังจะหมดไปในอนาคต รวมถึงการที่โลกต้องเผชิญกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศอย่างรุนแรง ซึ่งสาเหตุหนึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมทำให้เกิดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกทั่วโลกในปริมาณมาก [2] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีความพยายามในการหาพลังงานทดแทนชนิด ต่างๆ เพื่อนำมาใช้แทนพลังงานจากปิโตรเลียม โดยพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่น่าสนใจและมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน คือ ไบโอดีเซล (Biodiesel) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้ กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรงโดยไม่ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ โดยการใช้ไบโอดีเซลจะมีส่วนช่วยทำให้ลดปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลที่แปรรูปมาจากปิโตรเลียม เพิ่มความสามารถในการพึ่งพาตนเองทางด้านพลังงาน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยังเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านเศรษฐกิจให้กับประเทศ โดยภายในปี พ.ศ. 2580 ประเทศไทยมีเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายที่ร้อยละ 30 (AEDP2018) [3]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีโรงงานผลิตทั้งหมด 15 แห่งที่มีกำลังการผลิตรวมมากกว่า 11 ล้านลิตรต่อวัน สำหรับวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตคือ น้ำมันปาล์ม อย่างไรก็ตามภายในประเทศยังมีน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ ที่เป็นทางเลือก ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสงและน้ำมันละหุ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันมะพร้าวเป็นวัตถุดิบทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมะพร้าวเป็นพืชที่มีการปลูกเป็นจำนวนมากในภาคตะวันออกและภาคใต้ของประเทศไทย ดังนั้นจึงสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ซึ่งราคาของวัตถุดิบจะส่งผลทำให้ราคาของไบโอดีเซลต่ำลงด้วย [4] นอกจากนี้จากการที่น้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณสูงมากกว่าร้อยละ 90 [5] จึงส่งผลดีต่อสมบัติในด้าน

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

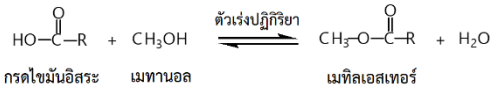
ของความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันมะพร้าว

ไบโอดีเซล คือ มอนอแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโซ่ยาว (Monoalkyl ester of long chain fatty acid) ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) หรือแอลกอฮอลิซิส (Alcoholysis) โดยใช้เบสหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลพลอยได้ที่มีคุณค่าในเชิงพาณิชย์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร เครื่องสำอางและอุตสาหกรรมต่างๆ โดยในกระบวนการสารตั้งต้นคือ ไทรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ สำหรับประเทศไทยมีการผลิตไบโอดีเซลชนิดเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งแอลกอฮอล์ที่ใช้จะเป็นเมทานอล โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไทรกลีเซอไรด์กับเมทานอลแสดงเป็นสมการเคมีได้ดังนี้ [6]



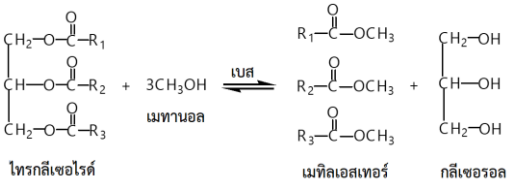
ในทางอุตสาหกรรมจะนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะมีข้อจำกัดในเรื่องของคุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ ซึ่งจะต้องมีคุณภาพดี โดยต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [7-9] อย่างไรก็ตามน้ำมันที่มีคุณภาพดีเหล่านี้จะมีราคาสูง ส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีราคาสูงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงมีนักวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง แต่มีราคาถูก เช่น น้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้ว น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงและน้ำมันกรดจากกระบวนการผลิตน้ำมันพืช เป็นต้น สำหรับการผลิต ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะไม่สามารถใช้กระบวนการทรานส์เอส- เทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยตรง เนื่องจากกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเบสได้สบู่เป็นผลิตภัณฑ์ โดยสบู่ที่เกิดขึ้นจะทำให้สารผสมของปฏิกิริยามีความหนืดเพิ่มขึ้นหรือทำให้เกิดเจล ซึ่งรบกวนการเกิดปฏิกิริยา โดยจะส่งผลทำให้ผลได้ (Yield) ของไบโอดีเซลลดลงหรือไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ นอกจากนี้สบู่ยังรบกวนการแยกชั้นของกลีเซอรอลกับไบโอดีเซล ทำให้ต้องใช้เวลาในการแยกนาน [6] ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจึงต้องใช้กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้เหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงเป็นสมการเคมีได้ดังนี้ [6]



ในขั้นตอนนี้กรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จะทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลได้เมทิลเอสเทอร์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 2 นำน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเบสที่นิยมใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงเป็นสมการเคมีได้ดังนี้ [6]



ในขั้นตอนนี้ไทรกลีเซอไรด์ที่มีในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จะทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

เมทานอลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล

ในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน จะมีการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในปัจจุบันกรดที่นิยมใช้คือ กรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (Homogeneous catalyst) อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่ากรดซัลฟิวริกจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีข้อเสียหลายประการได้แก่ ต้องมีการกำจัดกรดซัลฟิวริกออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมันภายหลังจากที่ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ซึ่งต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากในการล้าง ต้องมีขั้นตอนในการบำบัดน้ำล้างซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด อีกทั้งกรดซัลฟิวริกยังกัดกร่อนต่ออุปกรณ์ที่เป็นโลหะต่างๆ [10] ซึ่งข้อเสียเหล่านี้ทำให้เสียเวลา พลังงานและเพิ่มต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล [6] จากข้อเสียของกรดซัลฟิวริกดังกล่าวจึงทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ซึ่งเป็นของแข็ง สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์หรือสารผสมของปฏิกิริยาได้ง่าย ไม่ต้องมีการใช้น้ำในการล้างผลิตภัณฑ์และไม่ต้องมีขั้นตอนในการบำบัดน้ำล้าง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิดสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายกลุ่มทั้งที่สังเคราะห์ขึ้นและมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่แปรรูปมาจากวัสดุเหลือทิ้ง [11] เซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ [12] Montmorillonite-based clays catalysts (KSF, KSF/0, KP10, และ K10) [13] เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีชื่อทางการค้าเป็นแอมเบอร์ลิสต์ 15 แอมเบอร์ลิสต์ 16 แอมเบอร์ลิสต์ 36 และแอมเบอร์ลิสต์ 70 รวมทั้งโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่เป็นกรด เช่น SO_4^{2-}/ZrO_2, SO_4^{2-}/Ta_2O_5, SO_4^{2-}/Nb_2O_5 และ SO_4^{2-}/TiO_2 ซึ่งในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง กลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความคงทนต่อความร้อน สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง อีกทั้งยังสามารถจัดหาได้ในปริมาณมาก [1, 10, 14] โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพและมีความจำเพาะกับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแม้ในภาวะที่ไม่รุนแรง โดยให้ผลผลิตเอสเทอร์ในปริมาณสูงและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ [14]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้เปรียบเทียบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ประเภทเรซิน 4 ชนิด ได้แก่ แอมเบอร์ลิสต์ 15 (A-15) แอมเบอร์ลิสต์ 35 (A-35) แอมเบอร์ลิสต์ 16 (A-16) และโดแวกซ์ HCR-W2 (Dowex HCR-W2) ต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิ-เคชันของกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้วภายใต้อุณหภูมิในช่วง 50-60 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า FFA Conversion จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและลำดับความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นดังนี้ A-15 > A-35 > A-16 > โดแวกซ์ HCR-W2 [15]

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการนำน้ำมันมะพร้าวที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งมีราคาถูก แต่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมาลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้เหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะทำการหาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาพร้อมทั้งศึกษาผลของตัวแปรชนิดต่างๆ ที่สำคัญต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันมะพร้าว

2.วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

น้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระ 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ยี่ห้อ Lorika; ประเทศไทย) น้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระ 30.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมทานอล (Kemaus; Australia) แอมเบอร์-ลิสต์ 15 (Supelco; เยอรมนี) เอทานอล (องค์การสุรา; ประเทศไทย) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Ajax finechem, Australia) ฟีนอล์ฟทาลีน (Kemaus; Australia) และโพแทสเซียมไฮโดรเจน- พทาเลต (Ajax

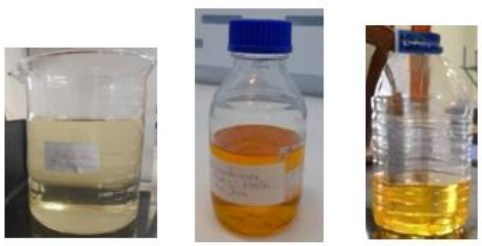
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

finechem; Australia) โดยสารเคมีทุกชนิดยกเว้น แอมเบอร์ลิสต์ 15 และฟีนอล์ฟทาลีนเป็นเกรดวิเคราะห์ ส่วนแอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นชนิดที่ใช้สำหรับงานวิจัยและพัฒนาและฟีนอล์ทาลีนเป็นเกรดห้องปฏิบัติการ โดยแอมเบอร์ลิสต์ 15 แสดงอยู่ในภาพที่ 1

ภาพที่ 1 แอมเบอร์ลิสต์ 15

2.2 การเตรียมน้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระ 3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันมะพร้าวที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นสารตั้งต้น ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำน้ำมันมะพร้าวที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 30.50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น และน้ำ ทำการกรองกำจัดสิ่งเจือปนของแข็งผ่านกระดาษกรอง Whathman No.1) ผสมกับน้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระ 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับน้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระ 0.03, 30.50 และ 3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงอยู่ในภาพที่ 2



(ก) FFA 0.03 % (ข) FFA 30.50 % (ค) FFA 3.93 %

ภาพที่ 2 น้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระ 0.03, 30.50 และ 3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2.3 การหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวให้เหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

(1) ใส่น้ำมันมะพร้าวตามปริมาณที่กำหนดลงในขวดสามคอก้นแบนขนาด 500 มิลลิลิตรที่วางอยู่บนเครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน

(2) ต่อรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์เข้ากับคอขวดส่วนกลาง เพื่อใช้ในการควบแน่นไอระเหยของสารให้ตกกลับลงสู่สารผสมของปฏิกิริยา คอขวดด้านข้างด้านหนึ่งต่อกับเทอร์โมมิเตอร์เพื่อใช้วัดอุณหภูมิของสารผสมและคอขวดด้านสุดท้ายซึ่งใช้สำหรับการเติมเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาปิดด้วยจุกปิดแก้ว

(3) ให้ความร้อนกับน้ำมันมะพร้าวพร้อมทั้งกวนตลอดเวลาด้วยอัตราเร็วคงที่จนถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่อยๆ เติมเมทานอลลงไปในปริมาณที่กำหนด โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส

(4) เติมแอมเบอร์ลิสต์ 15 ตามปริมาณที่กำหนดลงไปในสารผสมของปฏิกิริยา จากนั้นจึงเริ่มจับเวลา

(5) เมื่อครบเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้เทสารผสมของปฏิกิริยาลงในกรวยแยกผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 และกรวยแก้วก้านสั้น เพื่อแยกแอมเบอร์ลิสต์ 15 ออกไป แล้วตั้งสารผสมของปฏิกิริยาที่อยู่ในกรวยแยกทิ้งไว้ค้างคืน เพื่อให้สารผสมแยกชั้น

(6) ไขชั้นน้ำมันซึ่งอยู่ชั้นล่างออกใส่บีกเกอร์แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยแยกเมทานอลที่เหลือและน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา โดยเมื่อเมทานอลและน้ำระเหยไปหมดแล้วจะไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น

(7) ตั้งผลิตภัณฑ์น้ำมันทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ด้วยวิธีการมาตรฐาน AOAC (2000), 940.28

สำหรับการจัดตั้งอุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยาสารผสมของปฏิกิริยาภายหลังการเติมแอมเบอร์ลิสต์

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

15 และการตั้งสารผสมของปฏิกิริยาทิ้งไว้ค้างคืนในกรวยแยกแสดงอยู่ในภาพที่ 3

2.4 การศึกษาผลของตัวแปรชนิดต่างๆ ต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรชนิดต่างๆ ที่สำคัญ 4 ชนิดที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าว ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ ได้แก่ ปริมาณเมทานอล (5, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (0, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน) อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา (40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (0.5, 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง) โดยในขณะที่ทำการศึกษาผลของตัวแปรแต่ละชนิดจะกำหนดให้ตัวแปรชนิดอื่นๆ มีค่าคงที่และแต่ละภาวะที่ทำการศึกษาจะทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง

ภาพที่ 3 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน สารผสมของปฏิกิริยาภายหลังการเติมแอมเบอร์ลิสต์ 15 และการตั้งสารผสมของปฏิกิริยาในกรวยแยก

2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระแล้ว จะทำการสังเคราะห์น้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพบางประการด้วยวิธีการมาตรฐาน ได้แก่ ความหนืด (ASTM D 445-19a) ความหนาแน่น (ASTM D 4052-18a) และปริมาณน้ำ (ASTM E 1064) ณ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงและชีวภาพ บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าความหนืด (Auto Viscometer; Herzog model HVM 472) ความหนาแน่น (Density Meter; Anton Paar model DMA 4500 M) และปริมาณน้ำ (Mettler Toledo Coulometric KF Titrator C20) แสดงอยู่ในภาพที่ 4

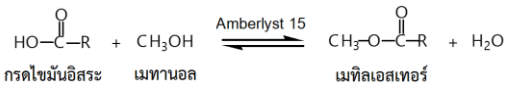
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

(ก) เครื่องวัดความหนืด (ข) เครื่องวัดความหนาแน่น (ค) เครื่องวัดปริมาณน้ำ

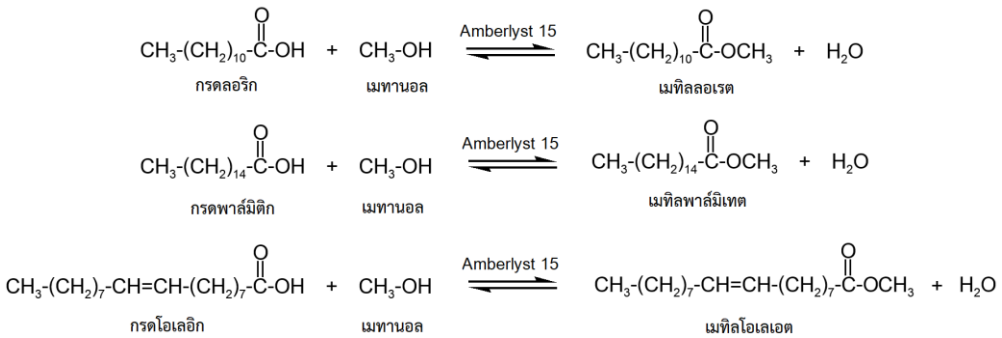
ภาพที่ 4 เครื่องมือสำหรับใช้ในการหาค่าความหนืด ความหนาแน่นและปริมาณน้ำ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

น้ำมันมะพร้าวที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีลักษณะ เป็นของเหลวหนืด ใส สีเหลือง ซึ่งเมื่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้เมทิลเอสเทอร์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ดังสมการ



สำหรับกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบใน ไทรกลีเซอไรด์ของน้ำมันมะพร้าวมีทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้แก่ กรดคาพริลิก (Caprylic acid; C8:0) และคาพริก (Capric acid; C10:0) กรด ลอริก (Lauric acid; C12:0) กรดไมริสติก (Myristic acid; C14:0) กรดพาล์มิติก (Plamitic acid; C16:0) กรดสเตียริก (Stearic acid; C18:0) กรดโอเลอิก (Oleic acid; C18:1) และกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid; C18:2) โดยกรดลอริกเป็นกรดไขมันที่มีเป็นจำนวนมากที่สุด [16] ดังนั้นเมื่อกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันมะพร้าวเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันจึงเปลี่ยน เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเหล่านี้ เช่น เมทิล-ลอเรต (Methyl laurate) เมทิลพาล์มิเทต (Methyl palmitate) และเมทิลโอเลเอต (Methyl oleate) ดังแสดงในแผนภาพที่ 1



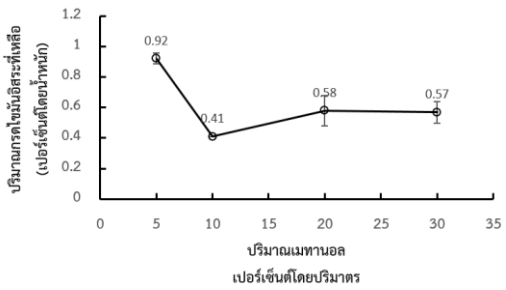
ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับเมทานอล

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

3.1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระและการศึกษาผลของตัวแปรชนิดต่างๆ

3.1.1 ผลของปริมาณเมทานอล

จากการที่ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าเกิดขึ้นได้ดี ได้ผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก จึงต้องใช้ปริมาณเมทานอลที่มากเกินพอ ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเมทานอล 4 ค่า ได้แก่ 5, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยในขณะที่ทำการศึกษาจะกำหนดให้ตัวแปรชนิดอื่นๆ คงที่ดังนี้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียสและ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงอยู่ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลของปริมาณเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

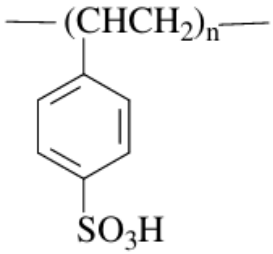
ช่วงที่ทำการศึกษา (5-30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดี ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันเหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ดีการใช้ปริมาณเมทานอลน้อย (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) จะทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดีน้อยกว่าการใช้ปริมาณเมทานอลค่าอื่นๆ และเมื่อใช้ปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปฏิกิริยาจะ เกิดได้ดีมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือในผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง โดยจะลดลงเหลือเพียง 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อใช้ปริมาณเมทานอล 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะพบว่าในผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมา จากที่ปริมาณเมทานอลดังกล่าวปฏิกิริยาเอสเทอริฟิ-เคชันเกิดขึ้นได้ดีเป็นอย่างมาก จึงทำให้มีน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งของปฏิกิริยาเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางซ้ายได้กรดไขมันอิสระและเมทานอลกลับมา อีกสาเหตุหนึ่งที่อาจเกิดขึ้นคือน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) กับไทรกลีเซอไรด์ของน้ำมันมะพร้าวได้กรดไขมันอิสระ [10]

สำหรับปริมาณเมทานอลที่เหมาะสมนั้น ผู้วิจัยเลือก 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเนื่องจากเป็นปริมาณเมทานอลที่ทำให้เหลือปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าปริมาณเมทานอลดังกล่าวจะไม่ใช่ปริมาณเมทานอลที่น้อยที่สุดที่ทำให้เหลือปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะสามารถลดความแรงของการใช้ตัวแปรที่เหลืออีก 3 ชนิดลงได้โดยที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันยังคงต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.1.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

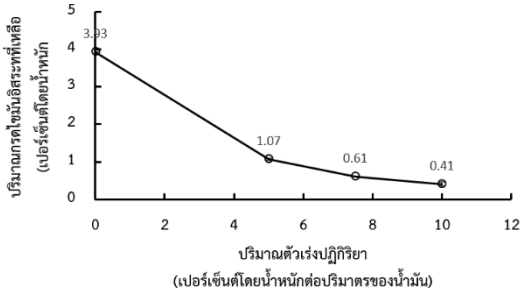
ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นตัวแปรอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Resin) ที่มีความเป็นกรดสูง ซึ่งในโครงสร้างจะมีหมู่กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid group ; $-SO_3H$) ต่ออยู่กับวงแหวนเบนซีน โดยโครงสร้างของแอมเบอร์ลิสต์ 15 แสดงอยู่ในภาพที่ 6

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)



ภาพที่ 6 โครงสร้างของแอมเบอร์ลิสต์ 15 [17]

ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ค่า ได้แก่ 0, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน โดยในขณะที่ทำการศึกษาจะกำหนดให้ตัวแปรชนิดอื่นๆ มีค่าคงที่ดังนี้ ปริมาณเมทานอล 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อุณหภูมิ ในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียสและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยผลที่ได้แสดงอยู่ในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่ใช้แอมเบอร์-ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวจะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นได้น้อยมากภายในเวลา 2 ชั่วโมง แต่เมื่อเติมแอมเบอร์ลิสต์ 15 ลงไปในสารผสมของปฏิกิริยาเพียง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน จะพบ ว่าปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี โดยเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ในน้ำมัน 1.07 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณแอมเบอร์ลิสต์ 15 ขึ้นไปอีก อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันมะพร้าวลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเหลือเพียง 0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อใช้ปริมาณแอมเบอร์ลิสต์ 15 ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน

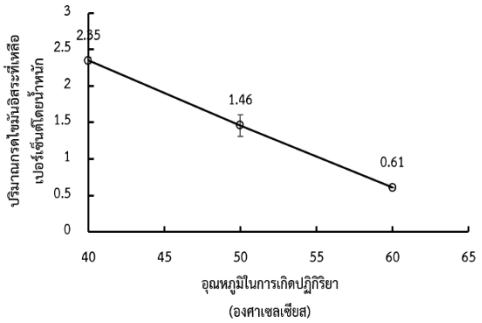
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกปริมาณแอมเบอร์ลิสต์ 15 ที่ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน

เป็นปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นปริมาณตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่น้อยที่สุดที่ทำให้เหลือปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.1.3 ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 3 ค่า ได้แก่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยในขณะที่ทำการศึกษาจะกำหนดให้ตัวแปรชนิดอื่นๆ มีค่าคงที่ดังนี้ ปริมาณเมทานอล 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมันและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้แสดงอยู่ในภาพที่ 8



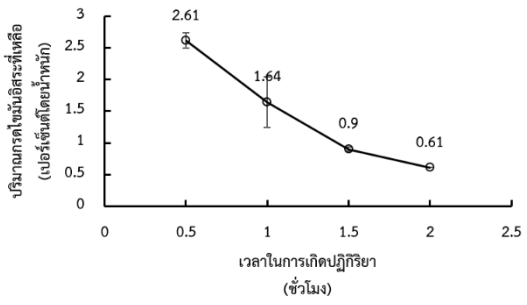
ภาพที่ 8 ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ฉะนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากเมื่อใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 40 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ แต่เกิดขึ้นได้ไม่ดี จึงทำให้ยังคงมีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ในน้ำมันมะพร้าวสูง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันลดลงเรื่อยๆ โดยจะมีค่าต่ำสุด (0.61 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากทำให้ได้ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.1.4 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 4 ค่า ได้แก่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง โดยในขณะที่กำลังศึกษาจะกำหนดให้ตัวแปรชนิดอื่นมีค่าคงที่ดังนี้ ปริมาณเมทานอล 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมันและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้แสดงอยู่ในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อย (0.5 ชั่วโมง) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่สูงถึง 2.61 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากขึ้นเรื่อยๆ ดังจะเห็นได้จากการลดลงของปริมาณกรดไขมันอิสระอย่างต่อเนื่อง โดยจะลดลงได้มากที่สุดที่เวลา 2 ชั่วโมง ในงานวิจัยนี้จะเลือกเวลาที่ 1.5 ชั่วโมงเป็นเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวเป็นดังนี้คือ ปริมาณเมทานอล 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียสและ 1.5 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.2 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระแล้ว จะทำการสังเคราะห์น้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันอิสระ 0.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในปริมาณมาก เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพบางประการด้วยวิธีการมาตรฐาน ณ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงและชีวภาพ บริษัท บางจากคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) โดยผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 1

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีความหนืดสูงกว่าความหนืดของไบโอดีเซลตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2562 ประมาณ 5-7 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในน้ำมันยังคงมีไทรกลีเซอไรด์อยู่อีกเป็นจำนวนมาก ส่วนขั้นตอนการกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมันมีประสิทธิภาพดี เนื่องจากมีน้ำเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมันในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

สมบัติ	ผลการทดสอบ	วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ
ความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตก)	24.74	ASTM D 445-19a
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.9237	ASTM D 4052-18a
ปริมาณน้ำ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.018	ASTM E 1064

ดังนั้นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะไม่มีผลในเชิงลบอันเนื่องมาจากกรดไขมันอิสระและน้ำที่มีอยู่ในน้ำมัน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวกับเมทานอล โดยสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้เหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักภายใต้ภาวะที่ไม่รุนแรง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริก [16] หรือกรดไทรฟลูออโรแอซิติก [18] เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาดังกล่าว แอมเบอร์ลิสต์ 15 จะมีข้อดีที่เหนือกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิด คือ แอม-เบอร์ลิสต์ 15 ไม่กัดกร่อน แยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย รวมทั้งสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้และวิธีการในการนำกลับมาใช้ซ้ำไม่ยุ่งยาก สำหรับกรดซัลฟิวริกถึงแม้ว่าจะมีราคาไม่แพง แต่มีฤทธิ์กัดกร่อน ต้องมีการใช้น้ำจำนวนมากในการล้างกรดออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมัน ต้องมีขั้นตอนการบำบัดน้ำล้างและการนำกรดซัลฟิวริกกลับมาใช้ซ้ำค่อนข้างทำได้ยาก ส่วนการใช้กรดไทรฟลูออโรแอซิติกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถึงแม้ว่าการแยกกรดออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมันจะทำได้ง่ายด้วยวิธี Evaporative distillation [19] แต่กรดไทรฟลู-ออโรแอซิติกมีฤทธิ์กัดกร่อน ดังนั้นแอมเบอร์ลิสต์ 15 จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเลือกอีกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสูงสำหรับใช้ในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวให้เหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวให้เหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งน้ำมันมะพร้าวที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระคือ ปริมาณเมทานอล 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง ซึ่งภายใต้ภาวะที่เหมาะสมนี้ ปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันมะพร้าวลดลงเหลือเพียง 0.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยตัวแปรทั้ง 4 ชนิดคือ ปริมาณเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลในเชิงบวกต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าว ยกเว้นเมื่อใช้ปริมาณเมทานอล 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้ในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมะพร้าวที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นในช่วง 1-3.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักได้ โดยผลิตภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวที่ได้สามารถนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นกระบวนในเชิงพาณิชย์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปร 4 ชนิดต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ ได้แก่ ปริมาณเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิและ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็ดียัง

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

มีตัวแปรชนิดอื่นที่มีผลต่อปฏิกิริยาดังกล่าว ได้แก่ ตัวทำละลายและ อัตราเร็วในการกวนสารผสม ซึ่งการศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้เป็นสิ่งที่น่าสนใจที่ผู้วิจัยจะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือต่างๆ ในการทำงานวิจัยและขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพสำหรับทุนในการทำวิจัย

6. อ้างอิง

[1] Hykkerud A, Marchetti JM. Esterification of oleic acid with ethanol in the presence of Amberlyst 15. Biomass Bioenergy. 2016; 95:340-3.

[2] สาเหตุและผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ | สหประชาชาติใน ประเทศไทย [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 13 เมษายน 2567]. Available from: https://thailand.un. org/th /174652.

[3] ระบบสารสนเทศองค์ความรู้ด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 13 เมษายน 2567]. Available from: https://kc.dede.go.th/knowledge-view.aspx?p=505.

[4] Qiu T, Guo X, Yang J, et al. The synthesis of biodiesel from *coconut* oil using novel Brønsted acidic ionic liquid as green catalyst. Chem Eng J. 2016;296:71-8.

[5] Kappally S, Shirwaikar A, Shirwaikar A. Coconut oil–a review of potential applications. Hygeia JD Med. 2015;7(2):34-41.

[6] สารเคมีจากปิโตรเลียม / ปิยนุช นาคพงศ์ [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 14 เมษายน 2567]. Available from: https://www.car.chula.ac.th/ display7.php?bib=1915904.

[7] Ghadge SV, Raheman H. Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica)* oil having high free fatty acids. Biomass Bioenergy. 2005;28(6):601-5.

[8] Tiwari AK, Kumar A, Raheman H. Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process. Biomass Bioenergy. 2007;31(8):569-75.

[9] Berchmans HJ, Hirata S. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. Bioresour Technol. 2008; 99(6):1716-21.

[10] Boz N, Degirmenbasi N, Kalyon DM. Esterification and transesterification of waste cooking oil over Amberlyst 15 and modified Amberlyst 15 catalysts. Appl Catal B Environ. 2015; 165:723-30.

[11] Alvear-Daza JJ, Pasquale GA, Rengifo-Herrera JA, et al.Mesoporous activated carbon from sunflower shells modified with sulfonic acid groups as solid acid catalyst for itaconic acid esterification. Catal Today. 2021; 372:51-8.

[12] Felfelian Z, Mahdavi M. A new ZrC nano powder solid acid catalyst for the esterification synthesis of ethyl acetate. Catal Commun. 2023; 182:106752.

[13] Sripada S, Kastner JR. Continuous catalytic esterification using a solid acid activated carbon monolith: Comparison of granular

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

and monolith forms with a commercial catalyst. Chem Eng J. 2023;476:146586.

[14] El-Nassan HB. Amberlyst 15®: An Efficient Green Catalyst for the Synthesis of Heterocyclic Compounds. Russ J OrgChem .2021;57(7):1109-34.

[15] Ozbay N, Oktar N, Tapan NA. Esterifi cation of free fatty acids in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resins. Fuel. 2008;87(10-11), 1789-98.

[16] Nakpong P, Wootthikanokkhan S. High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand. Renewable Energy. 2010;35(8): 1682-7.

[17] Pal R, Sarkar T, Khasnobis S. Amberlyst-15 in organic synthesis. Arkivoc. 2012; 570-609.

[18] โสภิดา ศิริบาล, วันเพ็ญ บุญเรือง, กนกพร บุญทรง และคณะ. กรดไทรฟลูออโรแอซิติก: ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในขั้นตอนเอสเทอริฟิเคชันสำหรับการผลิตไบโอดีเซล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร. กรุงเทพ. 2567;1(2):1-8

[19] Miao X, Li R and Yao H. Effective acid-Catalyzed transesterification for biodiesel Production. Energy onversion and Management. 2009;50(10):2680-4.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Assessment of Occupational Heat Exposure among Power Plant Workers in the Context of Climate Change

Somboon Chaiprakarn[1], Chanakarn Sakulthaew[2], Mongkol Ratcha[3] and Panudet Saengseedam[4*]

[1]Engineering and Technology Management Program,
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep
[2]Department of Occupational Health and Safety,
Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University
[3]Faculty of Public Health, Ramkhamhaeng University, Bangkok
[4*]Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok
Corresponding Author: Email: panudech.s@mail.rmutk.ac.th

Received: 23-09-2024 *Revised*: 04-12-2024 *Accepted:* 27-12-2024

ABSTRACT

Heat stress in power plant operations is considered a serious threat to the health and safety of workers. This study aimed to perform a heat stress assessment using the WBGT index among power plant workers in the context of climate change. The study was conducted at 23 operating locations and involved workers engaged in the electricity production process at a power plant in Rayong Province, Thailand. The study's instruments included a Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) monitor and a heat stress assessment tool. The heat index was calculated to evaluate the impact of heat exposure in the study area. The results of this study showed that the WBGT values during work ranged from 22.7°C to 32.5°C. The relative humidity ranges from 67% to 70%. The metabolic rate of 198.5 kilocalories per hour is categorized as a light workload. This is compared to the standard values established by the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Threshold Limit Values (TLVs) for heat stress. Most of the values are within the specified range. Assessing the potential hazards of heat exposure using heat index measures requires extreme caution, as sunstroke, heat cramps, and heat exhaustion can occur after prolonged exposure to the sun during physical activities. Climate change significantly impacts human health by increasing the prevalence of heat-related illnesses, respiratory conditions, and the spread of infectious diseases, ultimately straining healthcare systems and threatening public well-being.

Keyword: Assessment, Climate Change, Heat Exposure, Occupational Health, Power Plant

1. INTRODUCTION

Heat is a significant and common health risk for individuals working in a wide variety of environments, both indoors and outdoors. The combination of heat exposure from the work environment and heat generated by metabolic processes can lead to an increase in body temperature. [1][2][4][53]. Heat stress is a significant factor for individuals who work in high-temperature environments for extended periods. Heat stress, particularly in outdoor workplaces in hot, dry regions, can affect physical and mental function, impairing human performance. The assessment of occupational heat stress must be conducted

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

using internationally recognized indices. [3][5][6]. The Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) index, approved by the International Organization for Standardization (ISO), is one of the most well-known and frequently used indices for estimating heat stress among workers in hot environments. This index takes into account the effects of basic parameters in any human thermal environment. [9][10][11]. Currently, climate change is having serious impacts on the safety and health of workers worldwide. Workers are among those most exposed to climate change hazards, yet they often have no choice but to continue working, even when conditions are dangerous. According to the latest estimates, over 2.4 billion workers are exposed to excessive heat at work each year, and around 1.6 billion workers are exposed to solar UV radiation. Air pollution is also a concern for billions of workers, particularly those working outdoors. Hundreds of thousands of workers are dying from hazardous exposures aggravated by climate change. Extreme weather events are increasing, exposing workers to wildfires, flooding, and major industrial accidents. [8][13][16][22]. This aims to reduce workers' health hazards and monitor body heat to ensure it does not exceed safe levels, according to the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). [7][42]. It has been found that body heat from work should not cause the body temperature to rise above 38°C for those who are sensitive to heat, or above 38.5°C for those who are accustomed to heat. Otherwise, severe symptoms may appear, such as fatigue, vomiting, dizziness, lightheadedness, fainting, and a rapid heartbeat. [12][15][17].

In Thailand, the Department of Labor Protection and Welfare issued an announcement regarding the temperature in workplaces. The Ministry of Labor requires the measurement of Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) during the hottest month of the year, as well as during the two hottest hours of the day. [38][39][44]. The organizations required to conduct measurements are as follows, organizations that use heat sources or perform work that may expose employees to heat. Employers are required to prepare and provide personal protective equipment as necessary and conduct health checks for employees accordingly. [11][25]. Climate change in Thailand impacts outdoor workers by increasing the risk of heat stress, dehydration, and heat-related illnesses due to rising temperatures and more frequent heatwaves. Workers in industries such as agriculture, construction, and transportation are particularly vulnerable to these conditions. The intensified heat and prolonged exposure to high temperatures can also lead to reduced productivity and increased health risks, including fatigue, sunstroke, and long-term conditions like skin cancer. These challenges necessitate effective heat stress management strategies, such as adjusting work hours and providing personal protective equipment [44].

A combined cycle power plant in Rayong Province, Thailand. There are two systems involved a type of power plant that combines a gas turbine and a steam turbine to generate electricity. The gas turbine is used to generate electricity directly, and the exhaust gases from the gas turbine are used to generate steam in a heat recovery steam generator (HRSG). The produced steam is then used to drive a steam turbine, which also generates electricity [40]. Furthermore, electricity is produced continuously throughout the 24 working hours. Through the observation of individuals involved in the electricity generating process, it was found that employees' work must be inspected during the production process in each location [47]. Some places have high temperatures

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

leading to the heat in the workplace could risk workers. This power plant has established safety procedures, but it's insufficiently thorough or efficient.

Therefore, this study aimed to assess heat stress using the WBGT index among power plant workers in the context of climate change in Rayong Province, Thailand. The information gathered will be used to provide comprehensive guidelines to improve the efficiency of prevention and control measures for potential risks and hazards affecting workers in power plants.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Plant and Process Description

This is a cross-sectional study conducted in a power plant located in Rayong province, Thailand. The data collection was conducted throughout the months of April to May in the year 2024. The investigation was conducted in an environment with continuously high ambient temperatures ranging from 37-38 degree Celsius for around 3-4 months each year. The standard daily working hours for employees are 8 hours. However, during periods of high production, some workers may be required to work an additional 1-2 hours of overtime on random days.

2.2 Methodology

A total of twenty-three stations throughout the power plant were chosen as locations where workers could potentially be exposed to heat stress. The heat measurements were taken using guidelines specified by the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) [55].

2.3 Tools and Equipment

The research is using the Heat Stress Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) Meter model EXTECH HT200 as its primary tool. The measurement process complies to the ISO7243 requirements. Effectively completed the calibration process for the measurement instruments. Perform the calibration procedure to ensure the precision of the device on January 18, 2024. This is an immediate evaluation of the WBGT index. It is enough to take one measurement at a height of 1.1 meters above the ground, where the heat stress is highest. The equipment will be positioned in close proximity to the eat source [55], as shown in Figure 1.

Figure 1. Heat Stress Monitor WBGT [19]

2.4 Heat Stress Exposure Measurement

The WBGT-TWA values are measured and calculated using the 3M/ QuesTemp32 heat stress monitor, with the serial number TPQ030024.The accuracy of the instrument is calibrated according to the DIN EN 27243 standard on January18, 2024. The WBGT test should be conducted for a two-hour period that aligns with the highest level of heat stress, known as the peak heat stress. Specifically, this occurs during the daytime or when the heat-generating equipment is being used [38][39].

Additionally, the measurement period is scheduled to occur at regular intervals of five minutes, resulting in a total of 23 samples within one hour in certain locations. The measuring point should be situated at the precise location where personnel carry out their tasks, totalling twenty-three points in total.

The standard methods allow WBGT calculation inside and outside buildings, even without solar radiation data, using

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

these variables in equations 1 and 2 [38][39][55].

For indoor and outdoor conditions with no solar load,

$$WBGT_{in} = 0.7T_{nw} + 0.3\ T_g \qquad (1)$$

The formula is modified for measurement of the environments of the environment outside buildings with solar radiation:

For outdoors with a solar load,

$$WBGT_{out} = 0.7T_{nw} + 0.2\ T_g + 0.1T_{db} \qquad (2)$$

T_{nw} is the natural wet bulb temperature (measured with a wet wick thermometer exposed to the local air movement and radiation).

T_g is the temperature in the centre of a 150 mm diameter black globe.

T_{db} is dry bulb temperature refers basically to the ambient air temperature measured by a thermal sensor, such as ordinary mercury in glass thermometer, that is shielded from direct radiant energy sources.

Although wind speed is not directly measured and included in the above equation, T_{nw} and T_g combine the effects of radiation, humidity, air temperature and wind.

To determine the average Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) according to the ISO 7243 standard, Ministerial Regulations: The standard of management and operation on Safety, occupation, and workplace environment regarding to heat, light and noise, B.E.2559 (A.D.2016) [58]. and Notification of Department of Labor Protection and Welfare prescribing Measurement, Analysis Method and Regulated Business Type related to Heat, Lighting and Noise in Workplace, B.E.2561 (A.D.2018) [38]. The time weighted average WBGT is given by the following formula as shown in equation 3.

$$WBGT_{TWA} = (WBGT1\times T1) + (WBGT2\times T2) +\ldots. + (WBGTn \times Tn))/ (T1+T2+....+Tn) \qquad (3)$$

where:
WBGT1 is WBGT (ºC) in T1 (min.)
WBGT2 is WBGT (ºC) in T2 (min.)
WBGTn is WBGT (ºC) in Tn (min.)
T1+T2+……+Tn = 120 mins at WBGT Max.

2.5 Heat Stress Assessment

2.5.1 Workload Assessment

Under conditions of high temperature and heavy workload should determine the work-load category of each job as shown in equation 4 and the assessment of work as shown in Table 1. [7][57].

Cool rest area: When heat conditions in the rest area differ from those in the work area, the metabolic rate (M) should be calculated using a time-weighted average.

$$Average_M = \frac{(M1)(t1)+(M2)(t2)+\ldots..+(Mn)(tn)}{(t1)+(t2)+\ldots..+(tn)} \qquad (4)$$

where:
M = metabolic rate
t = time in minutes

Table 1. Assessment of Work

Body position and movement	kcal/min*	
Sitting	0.3	
Standing	0.6	
Walking	2.0-3.0	
Walking uphill	Add 0.8 for every meter (yard) rise	
Type of work	Average kcal/min	Range kcal/min
Hard work		
Light	0.4	0.2 – 1.2
Heavy	0.9	
Work: One arm		
Light	1.0	0.7 – 2.5
Heavy	1.7	

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Work: Both arms		
Light	1.5	1.0 – 3.5
Heavy	2.5	
Work: Whole Body		
Light	3.5	2.5 – 15.0
Moderate	5.0	
Heavy	7.0	
Very Heavy	9.0	

*For a standard worker of 70 kg body weight and 1.8 m2 body surface. ACGIH

2.5.2 Metabolic Rate

The metabolic rate is impacted by the employees' job responsibilities and the period they are exposed to heat during work. Refer to Table 2 for instructions on how to choose the appropriate work rate category

.

Table 2. Metabolic Rate Categories and Example Activities

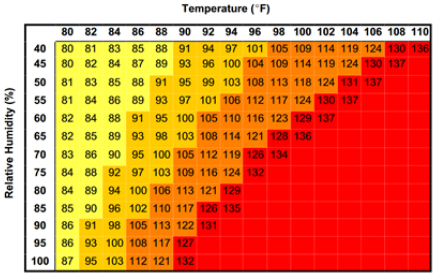
Workload	Metabolic Rate [W][a]	Thai Regulation (kCal/hr)[b]	Examples
Rest	115	-	Sitting
Light	180	<200	Sitting with light manual work with hands or hands and arms and driving. Standing with some light arm work and occasional walking.
Moderate	300	201-350	Sustained moderate hand and arm work, moderate arm and leg work, moderate arm and trunk work, or light pushing and pulling. Normal walking. Moderate lifting.
Heavy	415	>350	Intense arm and trunk work, carrying, shovelings, manual sawing, pushing, and pulling heavy loads, and walking at a fast pace. Heavy materials handling.
Very Heavy	520	-	Very intense activity at fast to maximum pace.

[a] Metabolic rate from TLVs and BEIs by ACGIH 2015 [56]. The effect of body weight on the estimated metabolic rate can be accounted for by multiplying the estimated metabolic rate by the ratio of actual body weight divided by 70 kg (154 lb).

[b] Ministry of Labor of Thailand. Ministerial Regulation on the Prescribing of Standard for Administration and Management of Occupational Safety, Health, and Environment in Relation to Heat, Light, and Noise B.E.2559 (A.D.2016) [36].

2.6 Heat Index

The heat index is a measure that considers the combined impact of heat and humidity to determine the perceived temperature. Direct sunlight raises the heat index by 15°F, which can be utilized to estimate when outdoor activities should be avoided and the resulting health effects, as shown in Figure 2 and Table 3 [41][43].



ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Table 3. Effect of the heat index

Classification	Heat Index (°C)	Heat Index (°F)	Possible heat disorders
Extreme Danger	Over 54	Over 130	Heat stroke/sunstroke highly likely with continued exposure
Danger	41-54	105-130	Sunstroke, heat cramps, or heat exhaustion likely, and heatstroke possible with prolonged exposure and/or physical activity.
Extreme Caution	33-40	90-105	Sunstroke, heat cramps, and heat exhaustion possible with prolonged exposure and/or physical activity.
Caution	27-32	80-90	Fatigue possible with prolonged exposure and/or physical activity.
Safe	<26	<80	No adverse effects expected due to heat

2.7 Factors of Clothing

Clothing provides an insulation that reduces or prevents the transfer of heat between the skin and the surrounding environment, providing thermal resistance. It is important to conduct a heat stress assessment, as it determines the rate at which sweat can evaporate from the skin and cool the body. gaps, flaps, and openings in clothing, as well as air permeability, can alleviate heat stress by directly transferring hot, moist air from the skin to the environment [57]. The ACGIH has classified the modification of clothing using the requirements [7] shown in Table 4.

Table 4. Clothing Adjustment Factors for some clothing ensembles

Clothing Type	Addition to WBGT (°C)
Work clothes (long sleeve shirt and pants)	0
Cloth (woven material) coveralls	0
Double-layer woven clothing	3
SMS polypropylene coveralls	0.5
Polyolefin coveralls	1
Limited-use vapor-barrier coveralls	11

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Characteristics of the subjects

A total of 23 work areas were discovered in the power plant through field observations and onsite discussions with power plant workers. These activities were carried out continuously in sunny weather, every day of the week. The workday normally started between 07:00 a.m. and 07:00 p.m., depending on the arrival time at the site. However, it was found that the activities of power

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

plant workers, both inside or outside, were limited to a maximum of 3-4 hours per day. Normally, all employees comply to a uniform dress code which consists of long-sleeved shirts, long trousers, safety footwear, protective helmets, and safety gloves when on responsibility. The results of this study were consistent with several prior studies that climate change and occupational heat stress in outdoor workers are likely to cause dehydration, fatigue, dizziness, disorientation, decreased brain function, loss of attention, and pain [18][20][21][37].

3.2 Heat Stress Measurement and Assessment

The heat levels associated with the electricity production process area were measured at 23 work areas. The average maximum wet bulb globe temperature (WBGT) measurement value was determined to be 32.5 degrees Celsius, while the average minimum WBGT measurement value was 22.7 degrees Celsius, respectively. The comparison is conducted using safety guidelines as specified in the ministerial regulations that set the standards for managing and operating safety in heat-related work. According to the findings of Light and Sound 2016, the temperature in the work area was not going over the specified limit of 34 degrees Celsius. However, when compared to ACGIH's standard criteria, it was discovered that the temperature exceeded the standard at all 7 sites, as shown in Table 5.

The results of this study were consistent with several prior studies that WBGT index is rising. The explanation for this increase could be global warming or a lack of suitable work conditions in these areas. It would be a warning for workers who are working in outdoor environments or hot operating conditions [27-30]. Therefore, regarding the adverse effects of the heat on workers' health and impose additional expenses on workers, it is important to evaluate the working conditions of them [49][50].

Table 5. The result of heat stress measurement

No.	Work Location	Duration Measured (mins)	Weather Condition	Measurement Data					Standard Exposure limit TLV & AL (ºC)		Evaluation Compliance	
				T_{NWB}	T_{GT}	T_{DB}	$WBGT_{in/out}$ (ºC)	$WBGT_{TWA}$ (ºC)	(1)	(2)	(1)	(2)
1	Location No.1	120	Sunny	28.2	37.8	33.7	31.1 (in)	31.1	34.0	31.0	Pass	Not Pass
2	Location No.2	120	Sunny	28.9	37.2	33.9	31.0 (out)	31.0	34.0	31.0	Pass	Pass
3	Location No.3	120	Sunny	28.1	35.3	34.9	30.3 (in)	30.3	34.0	31.0	Pass	Pass
4	Location No.4	120	Sunny	27.9	35.2	33.3	30.0 (in)	30.0	34.0	31.0	Pass	Pass
5	Location No.5	120	Sunny	28.2	37.7	32.1	30.4 (out)	30.4	34.0	31.0	Pass	Pass
6	Location No.6	120	Sunny	28.9	41.6	33.4	31.9 (out)	31.9	34.0	31.0	Pass	Not Pass
7	Location No.7	120	Sunny	27.8	38.8	33.4	30.6 (out)	30.6	34.0	31.0	Pass	Pass
8	Location No.8	120	Sunny	28.6	35.6	34.2	30.5 (out)	30.5	34.0	31.0	Pass	Pass
9	Location No.9	120	Sunny	29.0	36.8	35.0	31.2 (out)	31.2	34.0	31.0	Pass	Not Pass
10	Location No.10	120	Sunny	28.3	32.4	32.2	29.5 (in)	29.5	34.0	31.0	Pass	Pass
11	Location No.11	120	Sunny	20.7	27.4	27.1	22.7 (in)	22.7	34.0	31.0	Pass	Pass
12	Location No.12	120	Sunny	22.0	27.2	26.8	23.6 (in)	23.6	34.0	31.0	Pass	Pass
13	Location No.13	120	Sunny	28.3	37.6	33.8	30.7 (out)	30.7	34.0	31.0	Pass	Pass
14	Location No.14	120	Sunny	30.1	38.3	37.9	32.5 (in)	32.5	34.0	31.0	Pass	Not Pass
15	Location No.15	120	Sunny	28.3	37.2	33.8	30.9 (in)	30.9	34.0	31.0	Pass	Pass
16	Location No.16	120	Sunny	28.7	38.6	34.9	31.3 (out)	31.3	34.0	31.0	Pass	Not Pass
17	Location No.17	120	Sunny	28.1	35.5	35.0	30.3 (in)	30.3	34.0	31.0	Pass	Pass
18	Location No.18	120	Sunny	28.0	40.2	32.7	30.9 (out)	30.9	34.0	31.0	Pass	Pass

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

19	Location No.19	120	Sunny	27.9	37.6	34.7	30.5 (out)	30.5	34.0	31.0	Pass	Pass
20	Location No.20	120	Sunny	28.1	40.5	32.8	31.0 (out)	31.0	34.0	31.0	Pass	Not Pass
21	Location No.21	120	Sunny	27.9	35.1	32.7	29.8 (out)	29.8	34.0	31.0	Pass	Pass
22	Location No.22	120	Sunny	30.0	38.0	37.5	32.4 (in)	32.4	34.0	31.0	Pass	Not Pass
23	Location No.23	120	Sunny	28.3	34.9	33.8	30.2 (out)	30.2	34.0	31.0	Pass	Pass

[1] Regulation of The Ministry of Labour B.E.2559 (A.D.2016)

[2] American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 2017

3.3 Heat Exposure

Through the observation and documentation of employees' work postures during the electricity production process, specific work characteristics were identified. These include driving from the office to the work area, growing stairs, inspecting machines, recording information, and preparing computer documents. This activity has a metabolic rate of 198.5 kilocalories per hour, which is classified as a light workload. Heat exposure is a major cause of health issues in outdoor workers. Therefore, there is a need for implementing control measures and continuous actions such as environmental and physiological monitoring, light clothing, and flexible work shifts [45][46][48].

The measurement of the Heat Index (HI) for the 23 work areas in this study. The result found that a total of 21 places were identified to have a Heat Index (HI) falling into an "Extreme caution" category, indicating that extended exposure and physical exertion could potentially result in sunstroke, heat cramps, and heat exhaustion. UV radiation causes short-term injuries such as sunburn, skin blistering, and eye damage, but the long-term impacts can be severe. The International Agency for Research on Cancer (IARC) has classified solar radiation and its various components, specifically UVA, UVB, and UVC, as carcinogenic to humans [22,31-35]. Nevertheless, the likelihood of power plant personnel being impacted by this intense heat is likely to be low because most workers do their duties indoors and have limited exposure to outdoor tasks, as seen in Table 6.

In addition to the environmental heat that is imposed on the workers, these individuals are at a high risk of heat stress due to the high metabolic heat load that occurs during their shifts. This work involves intense arm and trunk work, as well as the carrying, pushing, and pulling of heavy loads [23][24][26]. As a result, the organization includes heat-related hazards as a key priority in Occupational Safety and Health policies and strategies, recognizing the importance of protecting workers and workplaces in general from this growing risk, and defining assesses and initiatives to be implemented [51][52][54].

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Table 6. The result of heat index assessment

No	Work Location	Time Measurement	Relative Humidity (%)	Heat Index		Clothing Adjustment Factor	Work Load	Metabolism Rate (kcal/hr) [a]	Risk Decision
				(°C)	(°F)				
1	Location No.1	09:30-11:30	70	37.9	100.2	None	Light	198.5	Extreme Caution
2	Location No.2	09:30-11:30	70	37.6	99.7	None	Light	198.5	Extreme Caution
3	Location No.3	09:30-11:30	70	35.8	96.4	None	Light	198.5	Extreme Caution
4	Location No.4	09:30-11:30	70	35.1	95.1	None	Light	198.5	Extreme Caution
5	Location No.5	13:00-15:00	67	36.1	96.9	None	Light	198.5	Extreme Caution
6	Location No.6	13:00-15:00	67	39.1	102.3	None	Light	198.5	Extreme Caution
7	Location No.7	13:00-15:00	67	35.8	96.3	None	Light	198.5	Extreme Caution
8	Location No.8	09:30-11:30	70	36.3	97.3	None	Light	198.5	Extreme Caution
9	Location No.9	09:30-11:30	70	38.2	100.7	None	Light	198.5	Extreme Caution
10	Location No.10	09:30-11:30	70	33.9	92.9	None	Light	198.5	Extreme Caution
11	Location No.11	09:30-11:30	70	22.9	73.1	None	Light	198.5	Safe
12	Location No.12	09:30-11:30	70	23.9	74.9	None	Light	198.5	Safe
13	Location No.13	12:30-14:30	67	36.0	96.8	None	Light	198.5	Extreme Caution
14	Location No.14	12:30-14:30	67	40.8	105.3	None	Light	198.5	Extreme Caution
15	Location No.15	09:30-11:30	70	37.4	99.2	None	Light	198.5	Extreme Caution
16	Location No.16	09:30-11:30	70	38.4	101.1	None	Light	198.5	Extreme Caution
17	Location No.17	09:30-11:30	70	35.8	96.4	None	Light	198.5	Extreme Caution
18	Location No.18	13:00-15:00	67	36.5	97.6	None	Light	198.5	Extreme Caution
19	Location No.19	13:00-15:00	67	35.5	95.9	None	Light	198.5	Extreme Caution
20	Location No.20	13:00-15:00	67	36.7	98.1	None	Light	198.5	Extreme Caution
21	Location No.21	13:00-15:00	67	33.9	93.0	None	Light	198.5	Extreme Caution
22	Location No.22	12:30-14:30	67	40.5	104.8	None	Light	198.5	Extreme Caution
23	Location No.23	12:30-14:30	67	34.8	94.6	None	Light	198.5	Extreme Caution

[a] Ministry of Labor of Thailand. Ministerial Regulation on the Prescribing of Standard for Administration and Management of Occupational Safety, Health, and Environment in Relation to Heat, Light, and Noise B.E.2559 (A.D.2016).

4. CONCLUSIONS

Based on the findings of this study, it can be inferred that power plant workers working in the electricity production process of a power plant in Rayong Province, Thailand. Exposure to heat is a potential hazard. The following risk factors have been identified. The metabolic rate of workers is 198.5 kilocalories per hour. It is defined as a light workload. The working environment has a temperature range of 22.7–32.5 ºC which is within the normal range of temperatures, not exceeding 34 ºC. The Heat Index is calculated at the given level of extreme caution temperature. This might raise the chance of more damage from heat exposure through related problems such as, sunstroke, heat cramps, and heat exhaustion possible with prolonged exposure and physical activity respectively.

The effects of climate change and excessive heat on human health, effects of occupational heat exposure. The consequences include extreme fatigue, copious perspiration, and an immediate inability to resume work. There were illnesses among power plant workers who work in outdoor areas, which can lead to health effects such as sweating, thirst, itchy rashes, fatigue, exhaustion, dizziness, headaches, muscle cramps, vomiting, and weakness.

The value of research in the occupational heat exposure assessment is recommended. Firstly, Engineering

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

controls aim to decrease workers' activity by implementing mechanical aids, enclosing or insulating hot surfaces, ensuring sufficient ventilation, and reducing humidity when necessary. Additionally, administrative controls involve overseeing workers, implementing work-rest schedules, and establishing emergency procedures. Lastly, there are certain types of personal protective equipment available, such a cool vest, luminous suit, and heat transfer suit.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express our gratitude to participants for their cooperation. We also would like to thank my professor at Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep and staff of the Power Plant in Rayong Province, Thailand for supporting on this study.

6. REFERENCES

[1] Health. Division of Standards Development, & Technology Transfer. (1986). *Occupational Exposure to Hot Environments: Revised Criteria 1986* (No. 86-113). US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, Division of Standards Development and Technology Transfer.

[2] Aduna-Sánchez À, Correcher A, Alfonso-Solar D, Vargas-Salgado C. Measuring Heat Stress for Human Health in Cities: A Low-Cost Prototype Tested in a District of Valencia, Spain. *Sensors*. 2023; 23(22):9285. https://doi.org/10.3390/s23229285

[3] Andrews, O., Le Quéré, C., Kjellstrom, T., Lemke, B., & Haines, A. (2018). Implications for workability and survivability in populations exposed to extreme heat under climate change: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, *2*(12), e540-e547. https://doi .org/10.1016/S2542-5196(18)30240-7

[4] Aghamohammadi, N., Fong, C. S., Idrus, M. H. M., Ramakreshnan, L., & Sulaiman, N. M. (2021). Environ mental heat-related health symptoms among communities in a tropical city. *Science of the total environment*, *782*, 146611.https://doi. org /10.1016/j.scitotenv.2021.146611

[5] Ansah, E. W., Ankomah-Appiah, E., Amoadu, M., & Sarfo, J. O. (2021). Climate change, health and safety of workers in developing economies: A scoping review. *The journal of climate change and health*, *3*, 100034. https://doi.org/10.1016/j.joclim.2021. 100034

[6] Amnuaylojaroen T, Limsakul A, Kirtsaeng S, Parasin N, Surapipith V. Effect of the Near-Future Climate Change under RCP8.5 on the Heat Stress and Associated Work Performance in Thailand. *Atmosphere*. 2022; 13(2):325. https://doi.org/10. 3390/atmos13020325

[7] American Conferences of Govern mental Industrial Hygienists (ACGIH). (2009). *Heat Stress and Strain: TLV® Physical Agents*. Cincinnati, OH: ACGIH.

[8] Acharya, P., Boggess, B., & Zhang, K. (2018). Assessing Heat Stress and Health among Construction Workers in a Changing Climate: A Review. *International journal of environmental research and public health*, *15*(2), 247. https://doi.org/ 10.3390/ijerph15020247

[9] Al-Bouwarthan, M., Quinn, M. M., Kriebel, D., & Wegman, D. H. (2020). A Field Evaluation of Construction

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Workers' Activity, Hydration Status, and Heat Strain in the Extreme Summer Heat of Saudi Arabia. *Annals of work exposures and health*, *64*(5), 522–535.https://doi.org/10.1093 /annweh/wxaa029

[10] Al-Bouwarthan, M., Quinn, M. M., Kriebel, D., & Wegman, D. H. (2019). Assessment of Heat Stress Exposure among Construction Workers in the Hot Desert Climate of Saudi Arabia. *Annals of work exposures and health*, *63*(5),505–520. https://doi.org/ 10. 1093/annweh/wxz033

[11] Boonruksa P, Maturachon T, Kongtip P, Woskie S. Heat Stress, Physiolo gical Response, and Heat-Related Symptoms among Thai Sugarcane Workers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(17):6363. https:// doi.org/10.3390/ijerph17176363

[12] El-Shafei, D.A., Bolbol, S.A., Awad Allah, M.B. *et al*. Exertional heat illness: knowledge and behavior among construction workers. *Environ Sci Pollut Res* 25, 32269–32276 (2018). https://doi.org/10.1007/ s113 56 -018-3211-8

[13] El Khayat, M., Halwani, D. A., Hneiny, L., Alameddine, I., Haidar, M. A., & Habib, R. R. (2022). Impacts of Climate Change and Heat Stress on Farmworkers' Health: A Scoping Review. *Frontiers in public health*, *10*, 782811. https://doi.org/10. 3389/fpubh.2022.782811

[14] Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., ... & Jay, O. (2021). Hot weather and heat extremes: health risks. *The lancet*, 398(10301), 698-708. https:// doi.org/10.1016/S0140-6736(21) 01208-3

[15] Flunker, J. C., Zuidema, C., Jung, J., Kasner, E., Cohen, M., Seto, E., Austin, E., & Spector, J. T. (2022). Potential Impacts of Different Occupational Outdoor Heat Exposure Thresholds among Washington State Crop and Construction Workers and Implications for Other Jurisdic tions. *International journal of environmental research and public health*, *19*(18), 11583. https:// doi.org/10.3390/ijerph191811583

[16] Gao, C., Kuklane, K., Östergren, PO. *et al*. Occupational heat stress assessment and protective strategies in the context of climate change. *Int J Biometeorol* 62, 359–371 (2018). https://doi.org/10.1007/s00484-017-1352-y

[17] Han, SR., Wei, M., Wu, Z. *et al*. Perceptions of workplace heat exposure and adaption behaviors among Chinese construction workers in the context of climate change. *BMC Public Health* **21**, 2160 (2021). https://doi.org/10.1186/s12889-021-12231-4

[18] Habibi, P., Moradi, G., Dehghan, H., Moradi, A., & Heydari, A. (2021). The impacts of climate change on occupational heat strain in outdoor workers: A systematic review. *Urban Climate*, *36*, 100770. https://doi.org /10.1016/j.uclim.2021.100770

[19] Innovative Instrument (2024). *Heat Stress Monitor WBGT*. Accessed 20 May 2024, https://www.innovative-instrument.com/product/qt-34/

[20] Kjellstrom, T., Lemke, B., & Otto, M. (2017). Climate conditions, workplace heat and occupational health in South-East Asia in the context of climate change. *WHO South-East Asia journal of public health*, *6*(2), 15–21. https://doi.org/10.4103/2224-3151. 213786

[21] Iglesias-Rios, L., O'Neill, M. S., & Handal, A. J. (2023). Climate Change, Heat, and Farmworker Health. *Workplace health & safety*

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

, *71*(1), 43. https://doi.org/10.1177/21650799221135581

[22] International Labour Organization (ILO). (2023). Global Report: Ensuring safety and health at work in a changing climate. https://on24static.akamaized.net/event/44/76/53/8/rt/1/documents/resourceList1713801613280/ensuringsafetyandhealthatworkinachangingclimate1713801613280.pdf

[23] Ioannou LG, Mantzios K, Tsoutsoubi L, Nintou E, Vliora M, Gkiata P, Dallas CN, Gkikas G, Agaliotis G, Sfakianakis K, et al. Occupational Heat Stress: Multi-Country Observations and Intervention *International Journal of Environmental Research and Public Health*.2021; 18(12):6303. https://doi.org/10.3390/ijerph18126303

[24] Krishnamurthy, M., Ramalingam, P., Perumal, K., Kamalakannan, L. P., Chinnadurai, J., Shanmugam, R., ... & Venugopal, V. (2017). Occupational heat stress impacts on health and productivity in a steel industry in Southern India. *Safety and health at work*, *8*(1), 99-104. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.08.005

[25] Kiatkitroj, K., Arphorn, S., Tangtong, C., Maruo, S. J., & Ishimaru, T. (2021). Risk factors associated with heat-related illness among sugarcane farmers in Thailand. *Industrial health*, *60*(5), 447-458. https://doi.org/10.2486/indhealth.2021-0161

[26] Kakamu, T., Endo, S., Hidaka, T., Masuishi, Y., Kasuga, H., & Fukushima, T. (2021). Heat-related illness risk and associated personal and environmental factors of construction workers during work in summer. *Scientific reports*, *11*(1), 1119. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79876-w

[27] Kakaei, H., Omidi, F., Ghasemi, R., Sabet, M. R., & Golbabaei, F. (2019). Changes of WBGT as a heat stress index over the time: A systematic review and meta-analysis. *Urban Climate*, *27*, 284-292. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.009

[28] Lee, J., Lee, Y., Choi, W., Ham, S., Kang, S., Yoon, J., Yoon, M., Kang, M. & Lee, W. (2022). Heat exposure and workers' health: a systematic review. *Reviews on Environmental Health*, *37*(1), 45-59. https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0158

[29] Levy, B. S., & Roelofs, C. (2019). Impacts of climate change on workers' health and safety. In *Oxford Research Encyclopedia of Global Public Health*.https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190632366.013.39

[30] Leyk, D., Hoitz, J., Becker, C., Glitz, K. J., Nestler, K., & Piekarski, C. (2019). Health Risks and Interventions in Exertional Heat Stress. *Deutsches Arzteblatt international*, *116*(31-32), 537–544.https://doi.org/10.3238/arztebl .2019.0537

[31] Luangwilai, T., Robson, M. G., & Siriwong, W. (2021). Effect of heat exposure on dehydration and kidney function among sea salt workers in Thailand. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, *72*(4). https://doi.org/10.32394/rpzh.2021.0186

[32] Ma, R., Zhong, S., Morabito, M., Hajat, S., Xu, Z., He, Y., ... & Huang, C. (2019). Estimation of work-related injury and economic burden attributable to heat stress in Guangzhou, China. *Science of the total environment*, *666*, 147-154. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.201

[33] Matsumoto, K. I., Tachiiri, K., & Su, X. (2021). Heat stress, labor productivity, and economic impacts: analysis of climate change impacts using two-way coupled modeling.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Environmental Research Communications, *3*(12), 125001. https://doi.org/10.1088/2525-7620/ac3e14

[34] Notley, S. R., Flouris, A. D., & Kenny, G. P. (2019). Occupational heat stress management: Does one size fit all?. *American journal of industrial medicine*, *62*(12), 1017–1023. https://doi.org/10.1002 /ajim.22961

[35] Nda, M., Adnan, M. S., Ahmad, K. A., Usman, N., Mohammad Razi, M. A., & Daud, Z. (2018). A Review on the Causes, Effects and Mitigation of Climate Changes on the Environmental Aspects. *International Journal of Integrated Engineering*, *10*(4). https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/2269

[36] Ministry of Labour. The Ministerial Regulations on the Prescribe of Standards for the Administration and Management of Occupational Safety, Health and Working Environment in relation to Heat, Light, and Noise B.E. 2559. (A.D.2016). The Royal of Thai Government Gazette of The Kingdom of Thailand 2016:133 (Pt 91 k): 48-54. http://www.rattchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2559/A/091/48.PDF

[37] Mohammadian, F., Sahl Abadi, A. S., Giahi, O., Khoubi, J., Zarei, A. A., Boghsani, G. T., & Abbaspour, S. (2019). Evaluation of occupational exposure to heat stress and physiological responses of workers in the rolling industry. *The Open Public Health Journal*, *12*(1). https://DOI: 10.2174/1874944501912010114

[38] Announcement of the Department of Labour Protection and Welfare on Subject: Criteria and measurement methods and analysis of working conditions regarding heat levels light or sound, including the duration and type of business that must be carried out B.E.2561 (A.D.2018). The Royal of Thai Government Gazette of The Kingdom of Thailand 2018:135 (Pt 57 Ng): 11-16. https://ratchakitcha.soc.go. th/documents/2135198.pdf

[39] Announcement of the Department of Labour Protection and Welfare on Subject: Criteria and measurement methods and analysis of working conditions regarding heat levels light or sound, including the duration and type of business that must be carried out (Part2) B.E.2565 (A.D.2022). The Royal of Thai Government Gazette of The Kingdom of Thailand 2022:139 (Pt 7 Ng): 6-8. https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/17193575.pdf Numpa, S., Ketmanee, P., Chokthararat, S., & Yenklom, P. (2022). Health Impacts and Factors Related to Abnormal Symptoms from Heat Exposure among Power Plant Boiler Workers in Nonthaburi Province, Thailand. *Thai Journal of Public Health*, 52(3), 277-293. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/jph/article/view/257387 National Weather Service, 2022a: *Heat Index chart*. Accessed 20 May 2024, https://www.weather.gov/safety/heat-index

[40] Nunfam, V. F., Van Etten, E. J., Oosthuizen, J., Adusei-Asante, K., & Frimpong, K. (2019). Climate change and occupational heat stress risks and adaptation strategies of mining workers: perspectives of supervisors and other stakeholders in Ghana. *Environmental research*, *169*, 147-155. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.004

[41] National Weather Service, 2022a: *Heat Index chart*. Accessed 20 May 2024, https://www.weather.gov /safety /heat-index

[42] Nunfam, V. F., Van Etten, E. J., Oosthuizen, J., Adusei-Asante, K., &

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Frimpong, K. (2019). Climate change and occupational heat stress risks and adaptation strategies of mining workers: perspectives of supervisors and other stakeholders Ghana. in *Environmental research*, *169*, 147-155. https://doi.org/10.1016/ j.envres .2018.11.004

[43] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Using the Heat Index: A Guide for Employers. 2011. Available online: https://www .osha.gov/SLTC/heatillness/heat_index/pdfs/all_in_one.pdf (accessed on 27 May 2024).

[44] Phanprasit, W., Rittaprom, K., Dokkem,S., Meeyai, A. C., Boonyayothin, V., Jaakkola, J. J., & Näyhä, S. (2021). Climate warming and occupational heat and hot environment standards in Thailand. *Safety and Health at Work*, *12*(1), 119-126. https://doi.org/ 10.1016/j.shaw.2020.09.008

[45] Petropoulos, Z. E., Keogh, S. A., Jarquín, E., López-Pilarte, D., Amador Velázquez, J. J., García-Trabanino, R., Amador Sánchez, M. R., Guevara, R., Gruener, A., Allen, D. R., Leibler, J. H., Delgado, I. S., McClean, M. D., Friedman, D. J., Brooks, D. R., & Scammell, M. K. (2023). Heat stress and heat strain among outdoor workers in El Salvador and Nicaragua. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, *33*(4), 622–630. https://doi.org/ 10.1038/s41370-023-00537-x

[46] Pires Bitencourt, D., Alves Maia, P., & Cauduro Roscani, R. (2020). The heat exposure risk to outdoor workers in Brazil. *Archives of environmental & occupational health*, *75*(5), 281–288. https://doi.org/10.1080/19338244.2019.1633991

[47] Saeed, M. A., El-Kenawy, E. S. M., Ibrahim, A., Abdelhamid, A. A., Eid, M. M., Karim, F. K., .& Abualigah, L. (2023). Electrical power output prediction of combined cycle power plants using a recurrent neural network optimized by waterwheel plant algorithm. *Frontiers in Energy Research*, *11*, 1234624. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1234624

[48] Tustin, A., Sayeed, Y., Berenji, M., Fagan, K., McCarthy, R. B., Green-McKenzie, J., McNicholas, J., Onigbogi, C. B., Perkison, W. B., Butler, J. W., & ACOEM Work Group on Occupational Heat-Related Illness (2021). Prevention of Occupational Heat-Related Illnesses. *Journal of occupational and environmental medicine*, *63*(10), e737–e744. https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002351

[49] Tustin, A. W. (2018). Evaluation of occupational exposure limits for heat stress in outdoor workers—United States,2011–2016. *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, *67*. DOI: http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6726a1.

[50] Ueno, S., Sakakibara, Y., Hisanaga, N., Oka, T., & Yamaguchi-Sekino, S. (2018). Heat Strain and Hydration of Japanese Construction Workers during Work in Summer. *Annals of work exposures and health*, *62*(5), 571–582.https://doi.org/10.1093/annweh/wxy012

[51] Venugopal, V., Shanmugam, R., & Perumal Kamalakkannan, L. (2021). Heat-health vulnerabilities in the climate change context—comparing risk profiles between indoor and outdoor workers in developing country settings. *Environmental Research Letters*, *16*(8), 085008. http://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1469

[52] Wagoner RS, López-Gálvez NI, de Zapien JG, Griffin SC, Canales RA,

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Beamer PI. An Occupational Heat Stress and Hydration Assessment of Agricultural Workers in North Mexico. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020; 17(6):2102. https://doi.org/10.3390/ijerph17062102

[53] World Health Organization (WHO). (1969) *Health factors in workers under conditions of heat stress*. Technical Report Series 412. Geneva, Switzerland: WHO

[54] Yasmeen, S., & Liu, H. (2019, September). Evaluation of thermal comfort and heat stress indices in different countries and regions–A Review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 609, No. 5, p. 052 037). IOP Publishing. https://doi:10.1088/1757-899X/609/5/052037

[55] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Criteria for a Recommended Standard:Occupational Exposure to Heat and Hot Environments. DHHS (NIOSH) Publication No. 2016-106, February 2016.

[56] American Conference of Governmental Industrial Hygienists Worldwide (ACGIH) *TLVs® and BEIs® based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices.* Cincinnati: ACGIH; 2015.

[57] The Department of Occupational Safety and Health (DOSH). Ministry of Human Resources, Malaysia. (2016). *Guidelines on Heat Stress Management at Workplace 2016.*

[58] Ministerial Regulations: The Standard of Management and Operation on Safety, Occupation, And Workplace Environment Regarding to Heat Light And Noise, B.E.2559 (A.D.2016). The Royal of Thai Government Gazette of The Kingdom of Thailand 2016: 133 (Pt 91 K): 48-54. https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/2085718.pdf

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x+(p+3n)^y=z^2$ เมื่อ $p, p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ และ n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ

On the solutions of the Diophantine equation $p^x+(p+3n)^y=z^2$ where $p, p+3n$ are Primes and n is a non-negative integer

ศิริจันทร์ เวสารัชศาต[1]* และ กตัญญู บุญชุ่มใจ[2]

Sirichan Vesarachasart[1]* and Katunyu Boonchumjai[2]

[1]สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[1]Depatment of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

[2]โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[2]Suankularbwittayalai Rangsit School, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

Corresponding Author: Email: sirichan@mathstat.sci.tu.ac.th

Received: 23-09-2024 ***Revised*:** 5-12-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เราศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x+(p+3n)^y=z^2$ เมื่อ x,y,z,n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ, $p, p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ เราพบว่าเมื่อ $p\equiv 1(\mathrm{mod}\,3)$ สมการนี้ไม่มีผลเฉลย ถ้า $p\equiv 0(\mathrm{mod}\,3)$ แล้วสมการนี้มีผลเฉพาะเมื่อ $p=3$ เท่านั้น สำหรับกรณี $p\equiv 2(\mathrm{mod}\,3)$ และ $x+y\leq 3$ สมการนี้มีผลเฉลยเป็น $(x,y,z,p,n)=(0,3,3,2,0),(3,0,3,2,n),(1,1,\sqrt{2p+3n},p,n),(2,1,\sqrt{p^2+p+3n},p,n)$ สำหรับบางจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ n และ เป็นจำนวนเต็มบวก นอกจากนี้เราได้หาผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบของสมการไดโอแฟนไทน์ $3^x+3^y=z^2$ ซึ่งก็คือ $(x,y,z)=(2k,2k+1,2\cdot 3^k)$ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ

คำสำคัญ: สมการไดโอแฟนไทน์, ผลเฉลย, จำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ, จำนวนเฉพาะ

Abstract

This paper, we studied the Diophantine equation $\boldsymbol{p^x+(p+3n)^y=z^2}$ where x,y,z,n are non-negative integers, $p, p+3n$ are prime numbers. We found that this equation has no solutions when $p\equiv 1(\mathrm{mod}\,3)$, if $p\equiv 0(\mathrm{mod}\,3)$, this equation has a solution only if $p=3$. In case $p\equiv 2(\mathrm{mod}\,3)$ and $x+y\leq 3$, the solutions of this equation are $(x,y,z,p,n)=(0,3,3,2,0),(3,0,3,2,n),(1,1,\sqrt{2p+3n},p,n),(2,1,\sqrt{p^2+p+3n},p,n)$ for some non-negative integers n and $\sqrt{2p+3n}$, $\sqrt{p^2+p+3n}$ are positive integers. Additionally, we find the non-negative integer solutions of the Diophantine equation $3^x+3^y=z^2$, that is $(x,y,z)=(2k,2k+1,2\cdot 3^k)$ where k is a non-negative integer.

Keyword: Diophantine equation, Solution, Non-negative integer, Prime number

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

1. บทนำ

หลายทศวรรษที่ผ่านมามีผู้ให้ความสนใจศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์เป็นจำนวนมาก โดยผู้วิจัยสนใจศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์รูปแบบต่าง ๆ ว่ามีผลเฉลยหรือไม่ และมีผลเฉลยเป็นอย่างไร ในปี ค.ศ. 2007 Acu D. [1] ได้หาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ $2^x + 5^y = z^2$ พบว่าสมการนี้มีผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบเพียง 2 ผลเฉลย คือ $(x,y,z) = (3,0,3)$ และ $(2,1,3)$ ต่อมาใน ค.ศ. 2013 Chotchaistit S. [2] ได้ศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์ $2^x + 11^y = z^2$ ผลจากการศึกษาพบว่าผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบเพียงผลเฉลยเดียวของสมการนี้ คือ $(x,y,z) = (3,0,3)$ ปีถัดมา Sroysang B. [3] ได้สนใจศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์ $7^x + 31^y = z^2$ เมื่อ x,y และ z เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ พบว่าสมการนี้ไม่มีผลเฉลย หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2019 Sugandha, A., Tripena A., และ Prabowo A. [4] ได้ศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์ $13^x + 31^y = z^2$ คณะผู้วิจัยพบว่าสมการนี้ไม่มีผลเฉลย x,y และ z ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ ต่อมาในปี ค.ศ. 2021 Paisal K. และ Chayaph P. [5] ได้สนใจสมการไดโอแฟนไทน์ 2 สมการ ได้แก่ $17^x + 83^y = z^2$ และ $29^x + 71^y = z^2$ ผลจากการศึกษาพบว่าทั้งสองสมการนี้มีผลเฉลย x,y และ z ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบเพียงผลเฉลยเดียว คือ $(1,1,10)$ และปี ค.ศ. 2023 Vesarachasart S., Eiemrawd C., Thiengtham S. และคณะ [6] ได้ศึกษาและทำการพิสูจน์ว่า สมการไดโอแฟนไทน์ $p^x + (p+12)^y = z^2$ เมื่อ $p, p+12$ เป็นจำนวนเฉพาะ ไม่มีผลเฉลย x,y และ z ที่เป็นจำนวนเต็มบวก ยกเว้นกรณี $p = 11$ สมการนี้มีผลเฉลย (x,y,z) คือ $(2,1,12)$

จากการสังเกตจะเห็นได้ว่า สมการไดโอแฟนไทน์ข้างต้นอยู่ในรูปแบบ $p^x + q^y = z^2$ โดยที่ p และ q เป็นจำนวนเฉพาะที่ $q = p + 3k$ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ ดังความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

สำหรับสมการ $2^x + 5^y = z^2$ พบว่า $5 = 2 + 3(1)$,
สมการ $2^x + 11^y = z^2$ พบว่า $11 = 2 + 3(3)$,
สมการ $7^x + 31^y = z^2$ พบว่า $31 = 7 + 3(8)$,
สมการ $13^x + 31^y = z^2$ พบว่า $31 = 13 + 3(6)$,
สมการ $17^x + 83^y = z^2$ พบว่า $83 = 17 + 3(22)$,
สมการ $29^x + 71^y = z^2$ พบว่า $71 = 29 + 3(14)$,
ส่วนสมการ $p^x + (p+12)^y = z^2$ สามารถเขียนได้เป็น $p^x + (p+3(4))^y = z^2$ นั่นเอง

ในบทความวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x + (p+3n)^y = z^2$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบและ $p, p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ ผลจากการศึกษาพบว่าผลเฉลยของสมการนี้ยังคงครอบคลุมผลการศึกษาที่ได้เคยมีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ [1-5] สำหรับในการพิจารณาหาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ $\boldsymbol{p^x + (p+3n)^y = z^2}$ นี้ เราอาศัยสมบัติพื้นฐานทางทฤษฎีจำนวน และยังอาศัยข้อคาดการณ์คาตาลันซึ่งกล่าวไว้ในบทตั้ง 1.1 ดังนี้

บทตั้ง 1.1 ข้อคาดการณ์คาตาลัน (Catalan's Conjecture) [7] กล่าวว่า $(x,y,p,q) = (3,2,2,3)$ เป็นเพียงผลเฉลยเดียวเท่านั้นของสมการ $x^p - y^q = 1$ เมื่อ x,y,p,q เป็นจำนวนเต็มที่ $\max\{x,y,p,q\} > 1$

สำหรับข้อคาดการณ์คาตาลันนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วโดย P. Mihailescu [1] ในปี ค.ศ. 2004 และอาศัยผลจากบทตั้ง 1.1 นี้มาช่วยในการพิสูจน์เพื่อหาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์

$$p^x + (p+3n)^y = z^2 \text{ เมื่อ } p \equiv 2 \pmod 3$$

นอกจากบทตั้ง 1.1 แล้วยังอาศัยสมบัติซึ่งได้พิสูจน์ไว้ในบทตั้ง 1.2 เพื่อช่วยในการพิสูจน์การหาผลเฉลย

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ของสมการไดโอแฟนไทน์นี้ในกรณี $p \equiv 0(\mathrm{mod}\ 3)$ อีกด้วย สำหรับบทตั้ง 2.1 ได้พิสูจน์ไว้ดังนี้

บทตั้ง 1.2 ถ้า m เป็นจำนวนเต็ม แล้วได้ว่า

(1) $3^m \equiv 1(\mathrm{mod}\ 4)$ เมื่อ m เป็นจำนวนเต็มคู่

(2) $3^m \equiv 3(\mathrm{mod}\ 4)$ เมื่อ m เป็นจำนวนเต็มคี่

พิสูจน์ สมมติให้ m เป็นจำนวนเต็ม

กรณี (1) ถ้า m เป็นจำนวนเต็มคู่ แล้วมีจำนวนเต็ม k ที่ทำให้ $m = 2k$ เนื่องจาก $9 \equiv 1(\mathrm{mod}\ 4)$ จึงได้ว่า $3^m = 3^{2k} = 9^k \equiv 1(\mathrm{mod}\ 4)$

กรณี (2) ถ้า m เป็นจำนวนเต็มคี่ แล้วมีจำนวนเต็ม k ที่ทำให้ $m = 2k+1$ เนื่องจาก $9 \equiv 1(\mathrm{mod}\ 4)$ จึงได้ว่า $3^m = 3^{2k+1} = (9^k)(3) \equiv 3(\mathrm{mod}\ 4)$

2. ผลการวิจัย

พิจารณาสมการไดโอแฟนไทน์

$$p^x + (p+3n)^y = z^2 \qquad (1)$$

เมื่อ x, y, z, n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ โดยที่ p, $p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ พิจารณาสมการ (1) โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี ได้แก่

กรณี 1 $p \equiv 1(\mathrm{mod}\ 3)$,

กรณี 2 $p \equiv 0(\mathrm{mod}\ 3)$

และ กรณี 3 $p \equiv 2(\mathrm{mod}\ 3)$

โดยเริ่มต้นพิจารณาจากกรณี 1 ถ้า $p \equiv 1(\mathrm{mod}\ 3)$ ก่อน ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า กรณีนี้สมการไดโอแฟนไทน์ (1) ไม่มีผลเฉลย ส่วนกรณี 2 ถ้า $p \equiv 0(\mathrm{mod}\ 3)$ แล้วได้ว่า $p = 3$ และ $n = 0$ พบว่าสมการไดโอแฟนไทน์ (1) จะอยู่ในรูป $3^x + 3^y = z^2$ ผลจากการศึกษาได้ว่า สมการนี้มีหลายผลเฉลยซึ่งได้พิสูจน์ไว้แล้วในทฤษฎีบท 2.1 และทฤษฎีบท 2.2

ทฤษฎีบท 2.1 สมการไดโอแฟนไทน์ (1) ไม่มีผลเฉลย เมื่อ $p \equiv 1(\mathrm{mod}\ 3)$

พิสูจน์ เนื่องจาก $p \equiv 1(\mathrm{mod}\ 3)$ จึงได้ว่า $p + 3n \equiv 1(\mathrm{mod}\ 3)$ ทำให้

$$p^x + (p+3n)^y \equiv 2(\mathrm{mod}\ 3)$$

แต่ $z^2 \equiv 0, 1(\mathrm{mod}\ 3)$ จึงเกิดข้อขัดแย้ง

ทฤษฎีบท 2.2 สมการไดโอแฟนไทน์ $3^x + 3^y = z^2$ มีผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ คือ

$$(x, y, z) = \left(2k, 2k+1, 2 \cdot 3^k\right)$$

เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ

พิสูจน์ พิจารณาสมการไดโอแฟนไทน์

$$3^x + 3^y = z^2 \qquad (2)$$

ถ้า $x = y$ แล้วจากสมการ (2) จะได้ $2 \cdot 3^x = z^2$ ทำให้ z เป็นจำนวนเต็มคู่ จึงได้ว่า มีจำนวนเต็ม m ที่ไม่เป็นลบที่ $z = 2m$ และได้ว่า $2 \cdot 3^x = 4m^2$ นั่นคือ $3^x = 2m^2$ ซึ่งเกิดข้อขัดแย้ง ดังนั้น $x \neq y$ ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณี 1 ถ้า x และ y เป็นจำนวนเต็มคู่ แล้วโดยบทตั้ง 1.2 (1) ได้ว่า

$$3^x \equiv 1(\mathrm{mod}\ 4) \text{ และ } 3^y \equiv 1(\mathrm{mod}\ 4)$$

จึงทำให้ $3^x + 3^y \equiv 2(\mathrm{mod}\ 4)$ แต่เนื่องจาก $z^2 \equiv 0, 1(\mathrm{mod}\ 4)$ จึงเกิดข้อขัดแย้ง กรณีนี้สมการ (2) จึงไม่มีผลเฉลย

กรณี 2 ถ้า x และ y เป็นจำนวนเต็มคี่ แล้วจากบทตั้ง 1.2 (2) ได้ว่า

$$3^x \equiv 3(\mathrm{mod}\ 4) \text{ และ } 3^y \equiv 3(\mathrm{mod}\ 4)$$

ทำให้ $3^x + 3^y \equiv 6 \equiv 2(\mathrm{mod}\ 4)$ จึงเกิดข้อขัดแย้ง ดังนั้นกรณีนี้ทำให้สมการ (2) ไม่มีผลเฉลย

กรณี 3 สมมติ x เป็นจำนวนเต็มคู่ และ y เป็นจำนวนเต็มคี่ ได้ว่า $x = 2a$ และ $y = 2b+1$

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

สำหรับบางจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ a และ b ดังนั้น

$$3^{2b+1} = z^2 - 3^{2a} = (z - 3^a)(z + 3^a)$$

จึงได้ว่า มีจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ r, s ที่ $0 \le r < s$ ซึ่งทำให้ $z - 3^a = 3^r$ และ $z + 3^a = 3^s$ โดยที่ $r + s = 2b + 1$ และเราได้ว่า

$$2 \cdot 3^a = 3^s - 3^r = 3^r(3^{s-r} - 1) \qquad (3)$$

ถ้า $a = 0$ แล้วจาก (3) ได้ $r = 0$ และ $3^{s-r} = 3$ ทำให้ $s = 1$ และ $b = 0$ จึงได้ว่า $x = 0, y = 1$ และ $z = 2$ ดังนั้นสำหรับกรณี $a = 0$ พบว่าผลเฉลยของสมการ (2) คือ $(x, y, z) = (0, 1, 2)$

ถ้า $a > 0$ แล้วจาก (3) ได้ $r = a$ และ $s = a + 1$ เนื่องจาก $r + s = 2b + 1$ จึงได้ $a = b$ จึงทำให้ได้ว่า $x = 2a$, $y = 2a + 1$ และ $z = 2 \cdot 3^a$ ดังนั้นสำหรับกรณีนี้สรุปได้ว่าสมการ (2) มีผลเฉลยเป็น $(x, y, z) = (2a, 2a + 1, 2 \cdot 3^a)$

ส่วนกรณี x เป็นจำนวนเต็มคี่ และ y เป็นจำนวนเต็มคู่นั้น เราสามารถพิสูจน์ได้ในทำนองเดียวกับกรณี 3 ข้างต้น

ต่อไปจะพิจารณาสมการไดโอแฟนไทน์ (1) สำหรับกรณีสุดท้าย คือ $p \equiv 2 \pmod 3$ ในที่นี้จะพิจารณา x, y และ z ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่จำนวนเต็มลบ ซึ่ง $x + y \le 3$ ผลจากการศึกษาพบว่าสมการไดโอแฟนไทน์ (1) มีหลายผลเฉลยเป็นดังพิสูจน์ไว้ในทฤษฎีบท 2.3 ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ทฤษฎีบท 2.3 ผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ (1) เมื่อ $p \equiv 2 \pmod 3$ เป็นจำนวนเฉพาะและ $x + y \le 3$ คือ

$$(x, y, z, p, n) = (0, 3, 3, 2, 0), (3, 0, 3, 2, n),$$
$$\left(1, 1, \sqrt{2p + 3n}, p, n\right), \left(2, 1, \sqrt{p^2 + p + 3n}, p, n\right)$$

สำหรับบางจำนวนเต็ม n ที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบ, $p, p + 3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ และ $\sqrt{2p + 3n}$, $\sqrt{p^2 + p + 3n}$ เป็นจำนวนเต็มบวก

พิสูจน์ แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี ได้แก่

กรณี 1 $x = 0$

กรณี 2 $y = 0$

และ กรณี 3 $x, y > 0$

กรณี 1 สมมติ $x = 0$ จากสมการ (1) จะได้

$$z^2 - (p + 3n)^y = 1$$

ถ้า $y = 0$ แล้วทำให้ $z^2 = 2$ จึงเกิดข้อขัดแย้ง ดังนั้น $y \ge 1$ แบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีย่อย ได้แก่

กรณี 1.1. $y > 1$

และ กรณี 1.2. $y = 1$

กรณี 1.1. ถ้า $y > 1$ แล้วโดยอาศัยบทตั้ง 1.1 ได้ว่า $y = 3 = z$, $p + 3n = 2$ ทำให้ $n = 0$, $p = 2$ จึงได้ว่า $(x, y, z, p, n) = (0, 3, 3, 2, 0)$ เป็นผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ (1)

กรณี 1.2. ถ้า $y = 1$ แล้วจะได้ $p + 3n = z^2 - 1 = (z - 1)(z + 1)$ เนื่องจาก $p + 3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ จึงทำให้ $z - 1 = 1$ และ $z + 1 = p + 3n$ ดังนั้นได้ $z = 2$ และ $p + 3n = 3$ ซึ่งจะได้ $p = 3$ จึงเกิดข้อขัดแย้ง

กรณี 2 สมมติ $y = 0$ จากสมการไดโอแฟนไทน์ (1) จะได้ $z^2 - p^x = 1$ ถ้า $x = 0$ แล้วทำให้ได้ $z^2 = 2$ ซึ่งเกิดข้อขัดแย้ง ดังนั้น $x \ge 1$ จึงแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีย่อยเช่นกัน ได้แก่

กรณี 2.1. $x > 1$

และ กรณี 2.2. $x = 1$

กรณี 2.1. ถ้า $x > 1$ แล้วอาศัยบทตั้ง 1.1 ทำให้ได้ $x = 3 = z$ และ $p = 2$ ดังนั้นสำหรับกรณีนี้สมการไดโอแฟนไทน์ (1) มีผลเฉลย (x, y, z, p, n) เป็น

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

$(3,0,3,2,n)$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ และ $2+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ

กรณี 2.2. ถ้า $x=1$ แล้วได้ว่า

$$p=z^2-1=(z-1)(z+1)$$

เนื่องจาก p เป็นจำนวนเฉพาะ จึงได้ $z=2$ และ $p=3$ ซึ่งทำให้เกิดข้อขัดแย้ง สำหรับกรณีนี้ทำให้สมการไดโอแฟนไทน์ (1) ไม่มีผลเฉลย

กรณี 3 สมมติให้ x และ y เป็นจำนวนเต็มบวก โดยที่ $x+y\le 3$ สามารถแบ่งการพิจารณาได้เพียง 2 กรณี ได้แก่ กรณี $x=1$ หรือ $x=2$ ส่วนกรณีถ้าให้ $x=3$ แล้วทำให้ได้ $y=0$ นั้นได้พิสูจน์ไปแล้วในกรณี 2.1.

กรณี 3.1. สมมติให้ $x=1$ สามารถแบ่งพิจารณาเป็นกรณีย่อยได้อีก 2 กรณีย่อย ได้แก่ กรณี 3.1.1. $y=1$ และกรณี 3.1.2. $y=2$

กรณี 3.1.1. ถ้า $y=1$ แล้วจากสมการไดโอแฟนไทน์ (1) จะได้ $2p+3n=z^2$ จึงทำให้ $z=\sqrt{2p+3n}$ ดังนั้นสมการไดโอแฟนไทน์(1) มีผลเฉลยเป็น $(x,y,z,p,n)=\left(1,1,\sqrt{2p+3n},p,n\right)$ สำหรับบางจำนวนเต็ม n ที่ไม่เป็นลบ, $p,p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ และ $\sqrt{2p+3n}$ เป็นจำนวนเต็มบวก

กรณี 3.1.2. ถ้า $y=2$ แล้วจากสมการไดโอแฟนไทน์ (1) ได้ว่า

$$z^2=9n^2+(6p)n+(p^2+p)$$

เนื่องจาก $\sqrt{9n^2+(6p)n+(p^2+p)}$ ไม่เป็นจำนวนเต็ม จึงทำให้เกิดข้อขัดแย้ง ดังนั้นสำหรับกรณีนี้สมการไดโอแฟนไทน์ (1) จึงไม่มีผลเฉลย

กรณี 3.2. สมมติให้ $x=2$ จึงเหลือกรณีที่เป็นไปได้คือ $y=1$ จากสมการ (1) จึงได้ $p^2+p+3n=z^2$ ทำให้ได้ $z=\sqrt{p^2+p+3n}$ ดังนั้นผลเฉลย (x,y,z,p,n) ของสมการไดโอแฟนไทน์ (1) คือ $\left(2,1,\sqrt{p^2+p+3n},p,n\right)$ สำหรับบางจำนวนเต็ม n ที่ไม่เป็นลบ, $p,p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะและ $\sqrt{p^2+p+3n}$ เป็นจำนวนเต็มบวก

จากกรณี 1-3 ข้างต้น พบว่าสมการไดโอแฟนไทน์ (1) มีผลเฉลย ดังนี้

ถ้า $x=0$ แล้วสมการไดโอแฟนไทน์ (1) มีเฉลยเดียว คือ $(x,y,z,p,n)=(0,3,3,2,0)$

ถ้า $y=0$ แล้วสมการไดโอแฟนไทน์ (1) มีผลเฉลยเป็น $(x,y,z,p,n)=(3,0,3,2,n)$ สำหรับบางจำนวนเต็ม n ที่ไม่เป็นลบและ $2+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ

ส่วนกรณี $y=1$ สมการไดโอแฟนไทน์ (1) มีผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ (x,y,z,p,n) คือ $\left(1,1,\sqrt{2p+3n},p,n\right),\left(2,1,\sqrt{p^2+p+3n},p,n\right)$ สำหรับบางจำนวนเต็ม n ที่ไม่เป็นลบ, $p,p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะและ $\sqrt{2p+3n}$, $\sqrt{p^2+p+3n}$ เป็นจำนวนเต็มบวก

บทแทรก 2.4 สมการไดโอแฟนไทน์ $2^x+5^y=z^2$ มีผลเฉลย (x,y,z) ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบเพียง 2 ผลเฉลย คือ $(3,0,3)$ และ $(2,1,3)$

พิสูจน์ อาศัยทฤษฎีบท 2.3 ให้ $n=1$ ได้ผลเฉลยคือ $(x,y,z)=(3,0,3)$ และ $(x,y,z)=(2,1,3)$

เห็นได้ว่าบทแทรก 2.4 เป็นผลที่ได้มาจากทฤษฎีบท 2.3 และเรายังพบว่าผลเฉลยตรงกับที่ Acu D. [1] ได้เคยพิสูจน์ไว้ปี ค.ศ. 2007

บทแทรก 2.5 สมการไดโอแฟนไทน์ $11^x+23^y=z^2$ มีผลเฉลย (x,y,z) ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบเพียงผลเฉลยเดียวเท่านั้น คือ $(2,1,12)$

พิสูจน์ อาศัยทฤษฎีบท 2.3 ให้ $n=4$ ได้ว่า $x=2,y=1$ และ $z=12$

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

จากบทแทรก 2.5 และผลจากการศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x+(p+12)^y=z^2$ ในปี ค.ศ. 2023 [6] จึงได้ข้อสรุปว่าสมการนี้มีผลเฉลย (x,y,z) ที่เป็นจำนวนเต็มบวกเพียงผลเฉลยเดียว คือ $(2,1,12)$

บทแทรก 2.6 สมการไดโอแฟนไทน์ $2^x+11^y=z^2$ มีผลเฉลย (x,y,z) ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบเพียงผลเฉลยเดียว คือ $(3,0,3)$

พิสูจน์ เป็นผลที่ได้จากทฤษฎีบท 2.3 ให้ $n=3$

และยังพบว่าผลเฉลยในบทแทรก 2.6 ตรงกับการศึกษาของ Chotchaisthit S. [2] ในปี ค.ศ. 2013 เช่นกัน

บทแทรก 2.7 สมการไดโอแฟนไทน์ $7^x+31^y=z^2$ ไม่มีผลเฉลย (x,y,z) ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ

พิสูจน์ เป็นผลจากทฤษฎีบท 2.1 และเนื่องจาก $7\equiv 1(\mathrm{mod}\,3)$

บทแทรก 2.8 สมการไดโอแฟนไทน์ $13^x+31^y=z^2$ ไม่มีผลเฉลย (x,y,z) ที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ

พิสูจน์ เป็นผลจากทฤษฎีบท 2.1 และเนื่องจาก $13\equiv 1(\mathrm{mod}\,3)$

จะเห็นได้ว่าบทแทรก 2.7 นี้เป็นไปตามการศึกษาของ Sroysang B. [3] ในปี ค.ศ. 2014 ทำนองเดียวกันบทแทรก 2.8 เป็นจริงตามการพิสูจน์ของ Sugandha A., Tripena A. และ Prabowo A. [4] ซึ่งคณะผู้วิจัยได้เคยศึกษาไว้ในปี ค.ศ. 2019

บทแทรก 2.9 สมการไดโอแฟนไทน์

$17^x+83^y=z^2$ และ $29^x+71^y=z^2$

มีผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบเพียงผลเฉลยเดียว คือ $(x,y,z)=(1,1,10)$

พิสูจน์ เป็นผลจากทฤษฎีบท 2.3 ให้ $n=22$ และ $n=14$ ตามลำดับ

พบว่าบทแทรก 2.9 นี้เป็นไปตามการศึกษาของ Paisal K. และ Chayapham P. [5] ซึ่งทั้งสองท่านได้ศึกษาไว้ในปี ค.ศ. 2021 เช่นกัน

3.บทสรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x+(p+3n)^y=z^2$ เมื่อ x,y,z,n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบและ $p,p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ เราพบว่า สมการนี้มีผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นจำนวนเต็มลบเฉพาะกรณี $p\equiv 0(\mathrm{mod}\,3)$ และกรณี $p\equiv 2(\mathrm{mod}\,3)$ และพบว่าสมการนี้ไม่มีผลเฉลยในกรณี $p\equiv 1(\mathrm{mod}\,3)$

ถ้า $p\equiv 0(\mathrm{mod}\,3)$ แล้วผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ (x,y,z) ของสมการไดโอแฟนไทน์ $3^x+3^y=z^2$ คือ $\left(2k,2k+1,2\cdot 3^k\right)$ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ

ถ้า $p\equiv 2(\mathrm{mod}\,3)$ แล้วสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x+(p+3n)^y=z^2$ มีหลายผลเฉลย เมื่อ x,y,z,n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบโดยที่ $x+y\le 3$ และ $p,p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ ซึ่งผลเฉลยของสมการนี้เป็นดังนี้

$(x,y,z,p,n)=(0,3,3,2,0),(3,0,3,2,n),$

$\left(1,1,\sqrt{2p+3n},p,n\right),\left(2,1,\sqrt{p^2+p+3n},p,n\right)$

สำหรับบางจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ n , p, $p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะและ $\sqrt{2p+3n}$, $\sqrt{p^2+p+3n}$ เป็นจำนวนเต็มบวก

นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่า ผลจากการศึกษานี้ยังคงสอดคล้องกับผลการศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์บางสมการที่ได้เคยมีผู้ศึกษาวิจัยและพิสูจน์มาก่อนหน้าแล้วด้วย

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

สำหรับตัวอย่างผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ $p^x+(p+3n)^y=z^2$ เมื่อ $p, p+3n$ เป็นจำนวนเฉพาะ และ n เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ ในกรณีต่าง ๆ เป็นดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 กรณี $p \equiv 0 \pmod 3$ และ $n=0$

x	y	z	p	n
0	1	2	3	0
2	3	6	3	0
4	5	18	3	0
x	y	z	p	n
6	7	54	3	0
8	9	162	3	0
10	11	486	3	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ตารางที่ 2 กรณี $p \equiv 2 \pmod 3$ และ $x+y \le 3$ เมื่อ $x=0$ และ $y=3$

x	y	z	p	n
0	3	3	2	0

ตารางที่ 3 กรณี $p \equiv 2 \pmod 3$ และ $x+y \le 3$ เมื่อ $x=1$ และ $y=1$

x	y	z	p	n
1	1	2	2	0
1	1	25	2	7
1	1	49	2	15
1	1	64	11	14
1	1	64	23	6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ตารางที่ 4 กรณี $p \equiv 2 \pmod 3$ และ $x+y \le 3$ เมื่อ $x=2$ และ $y=1$

x	y	z	p	n
2	1	3	2	1
2	1	6	5	2
2	1	12	11	4
2	1	24	23	8
2	1	30	29	10
x	y	z	p	n
2	1	42	41	14
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ตารางที่ 5 กรณี $p \equiv 2 \pmod 3$ และ $x+y \le 3$ เมื่อ $x=3$ และ $y=0$

x	y	z	p	n
3	0	3	2	0
3	0	3	2	1
3	0	3	2	3
3	0	3	2	5
3	0	3	2	7
3	0	3	2	9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณโครงการห้องเรียนวิทยาศาสตร์ในโรงเรียน โดยการกำกับดูแลของมหาวิทยาลัย โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนให้เกิดงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถวุฒิ วงศ์ประดิษฐ์ และ อาจารย์ ดร.ชยธร วนาสวัสดิ์ ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัยนี้จนกระทั่งงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

5 เอกสารอ้างอิง

[1] Acu, D. On a Diophantine equation $2^x + 5^y = z^2$. General Mathematics. 2007; 15(4): 145-148.

[2] Chotchaisthit, S. On the Diophantine equation $2^x + 11^y = z^2$. Maejo Interna tional Journal of Science and Technolog. 2013; 7(2): 291-293.

[3] Sroysang, B. On the Diophantine Equation $7^x + 31^y = z^2$. International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2014; 92(1): 109-112.

[4] Sugandha, A., Tripena A. and Prabowo, A. Solution to Non-Linear Exponential Diophantine Equation $13^x + 31^y = z^2$. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 1179:012002. 2019 [cited 2024 Jan 20]. Available from: https://iop science.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1179/1/012002

[5] Paisal, K. and Chayapham, P. On the exponential Diophantine equation $17^x + 83^y = z^2$ and $29^x + 71^y = z^2$. Journal of Physics: Conference Series 2070 012015. 2021. [cited 2024 Jan 20] Available from: https://iopscience. iop.org/article/10.1088/1742-6596 /2070/1/012015/pdf

[6] Vesarachasart, S., Eiemrawd, C., Thiengtham, S. and Moungkun, A. On the Diophantine Equation $p^x + (p+12)^y = z^2$ where p and $p+12$ are prime numbers. Thai Journal of Science and Technology. 2023; 12(1): 514-521.

[7] Mihailescu, P. Primary cyclotomic units and a proof of Catalan"s conjecture. Journal für die reine und angewandte Mathematik. 2004; 27: 167-195

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก

Relationship between the deflection and the dead weight of steel pallets

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข[1], นนท์ แสนคำแพ[1], ประสงค์ อิงสุวรรณ[2], อำนาจ ตงติ๊บ[3], ชวลิต คณากรสุขสันต์[4*]
Kullasup Phongsrisuk[1], Non Seankhamphae[1], Prasong Ingsuwan[2], Amnad Tongtib[3]
, Chawalit Khanakornsuksan[4*]

[1]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300
[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai 50300
[2]บริษัท เค.พี. เอ็กซ์เพอท เอนจิเนียริ่ง จำกัด เชียงใหม่ 50130
KP Expert Engineering Co., Ltd., Chiangmai 50130
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อุตรดิตถ์ 53000
[3]Department of Energy Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000
[4]ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140
[4]Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140
*Corresponding author, E-mail: chawalit.kh@ku.th Tel. 08 6730 6691

Received: 1-05-2024 ***Revised*:** 10-11-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นกับน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก เพื่อทำนายระยะการแอ่นเมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยน โดยจะทำการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะการแอ่นจากการทดสอบจริงไม่เกินร้อยละ 10 จากนั้นนำผลการคำนวณระยะการแอ่น 5 ตำแหน่ง ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เมื่อแบบจำลองพาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม มาสร้างสมการความสัมพันธ์โดยระเบียบวิธีวิเคราะห์แบบถดถอย ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์สามารถทำนายระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กโดยมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 7 เมื่อเทียบกับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง และสมการเชิงเส้นสามารถทำนายระยะการแอ่นกับน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กได้ ทำให้ในทางปฏิบัติสามารถคำนวณระยะการแอ่นเมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยนได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์

คำสำคัญ : พาเลทเหล็ก, การแอ่น, น้ำหนักบรรทุก, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research aimed to discover the relationship between the deflection and the dead weight of the steel pallet to estimate the deflection when the dead weight of the steel pallet varied. The steel pallet model will be created in finite element software with a relative error of

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

deflection from actual test not exceeding 10 percent. The results of the 5-position obtained from the finite element software, which was loaded with 240, 480, 720, 960 and 1200 kg, were used to create the relationship equations using the regression analysis method. The results show that the steel pallet model in finite element software can predict the deflection of steel pallets with a relative error of less than 7% compared with the deflection from actual test, and the linear equation can predict the deflection distance with the load of the steel pallet. Which in practice, the deflection distance when the load of the steel pallet varies can be calculated by using the interpolation.

Keyword: Steel pallet, Deflection, Dead weight, Finite elemen

1. บทนำ

พาเลทเป็นเครื่องมือสำคัญในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ (Logistics) ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมโลจิสติกส์มีบทบาทสำคัญในด้านเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศเป็นอย่างมาก ถูกจัดอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมและบริการแห่งอนาคตตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580)[1] โดยพาเลทจะช่วยให้การจัดเก็บสินค้าในคลังสินค้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความเสี่ยงในการสูญเสียหรือทำลายสินค้าระหว่างการขนส่ง[2] ซึ่งการเลือกใช้พาเลทจะคำนึงถึงน้ำหนักของสินค้าและลักษณะของสินค้า เพื่อให้มีความเหมาะสมในการจัดวางสินค้าบนพาเลท การขนย้าย ตลอดจนการบรรจุเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์[3] วัสดุที่ใช้ในการทำพาเลทมีอยู่หลายชนิด เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก คอมโพสิต อลูมิเนียม สแตนเลส เหล็ก[4] พาเลทเหล็กเป็นหนึ่งในพาเลทที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากเป็นพาเลทที่มีความคงทนแข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิและสารเคมี สามารถรับน้ำหนักได้มาก ทำให้พาเลทเหล็กเป็นพาเลทที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน[5] นอกจากนี้ยังเป็นพาเลทที่มีมูลค่าซากสูงและสามารถรีไซเคิลได้ 100%[6]

ในการออกแบบพาเลทเหล็กสามารถทำได้ 3 วิธีคือ การสร้างพาเลทเหล็กเพื่อทดสอบ การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์และการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (Finite element software) ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เป็นการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ความแข็งแรงของพาเลทเหล็ก โดยการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กในคอมพิวเตอร์ ผลการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะแสดงออกมาเป็นภาพสามมิติ ทำให้เข้าใจการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นกับพาเลทเหล็กได้ง่าย นอกจากนี้หากต้องการปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติเชิงกล ขนาดหรือจำนวนชิ้นส่วนของพาเลทเหล็ก ก็สามารถจำลองเพื่อดูการเสียรูป (Deformation) และความเค้นที่เกิดขึ้น ก่อนที่จะทำการสร้างพาเลทเหล็กจริง จึงทำให้การออกแบบพาเลทเหล็กด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้

การทดสอบแบบสถิตย์ (Static test) เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบพาเลท เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพพาเลทที่มีการออกแบบและการสร้างที่ต่างกัน โดยจะทำการวัดระยะการแอ่นที่เกิดขึ้นเมื่อพาเลทรับน้ำหนักบรรทุก (Dead weight)[7] ในการออกแบบพาเลทไม้[8-9] พาเลทกระดาษ[8-10] พาเลทคอมโพสิต[8-9, 11] พาเลทเหล็ก[12] และพาเลทเหล็กแบบโมดูลาร์ที่ผสมผสานบล็อก (Blocks) และแผ่นกระดาน (Deck boards) เข้าด้วยกัน[13] โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จึงต้องมีการวิเคราะห์ระยะการแอ่น (Deflection) เมื่อพาเลทรับน้ำหนักบรรทุกค่าหนึ่ง ซึ่งในทางปฏิบัติพาเลทจะถูกนำมาใช้รับน้ำหนักบรรทุกหลายค่า การหาระยะการแอ่นใหม่ทุกครั้ง ไม่ว่าจะโดยการทดสอบหรือการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ทำให้ไม่สะดวกในทางปฏิบัติ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงต้องการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะการแอ่นจากการทดสอบจริงไม่เกินร้อยละ 10 จากนั้นทำการแปรผันน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กโดยทดสอบน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัมซึ่งเป็นช่วงน้ำหนักบรรทุกลำไยแต่ละกล่อง โดย 1 ชั้น สามารถวางลำไยได้ทั้งหมด 12 กล่อง ซึ่งเท่ากับ 240 กิโลกรัมโดยในสถานประกอบการใช้พาเลทในการบรรทุกสูงสุด 5 ชั้น จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงนำไปใช้เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก โดยระเบียบวิธีวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis method) ทำให้สามารถทำนายระยะการแอ่นเมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยน อันจะเป็นแนวทางในการนำพาเลทเหล็กไปใช้ในทางปฏิบัติ

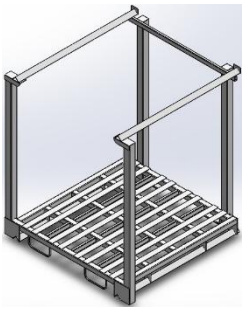
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นกระบวนการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) โดยการแบ่งแบบจำลองพาเลทเหล็กออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ แต่ละเอลิเมนต์จะต่อเชื่อมกันที่จุดต่อ (Node) อันเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่า โดยการสร้างฟังก์ชันการประมาณ (Approximate function) ภายในเอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกับสมการควบคุม (Governing equation) ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์นั้น ๆ เมื่อนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันจะได้สมการรวม (Global Equation) จากนั้นแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ภายใต้สภาวะสมดุลของแรงภายนอกและเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถทำเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ โดยกระบวนการของไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะประกอบด้วยกระบวนการขั้นต้น (Pre-Processing) กระบวนการวิเคราะห์ (Processing) และกระบวนการขั้นท้าย (Post-Processing) โดยในกระบวนการขั้นต้นเป็นการเตรียมข้อมูลก่อนส่งให้กระบวนการวิเคราะห์คำนวณหาผลลัพธ์ ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) การสร้างแบบจำลอง (CAD) เป็นการสร้างรูปร่างจำลองของชิ้นงานในคอมพิวเตอร์เพื่อทดแทนรูปร่างของชิ้นงานจริง ในกรณีของพาเลทเหล็กจะทำการสร้างแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบจำลองพาเลทเหล็ก

2)การกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Mechanical material property) ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์จะต้องกำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson ratio) ให้กับซอฟต์แวร์

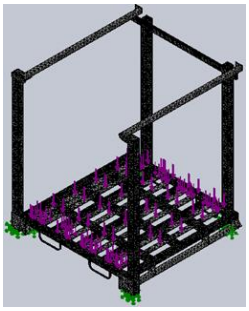
3) การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ (Mesh) ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์สามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ได้ 3 ประเภท ตามมิติ คือ เอลิเมนต์หนึ่งมิติ เอลิเมนต์สองมิติและเอลิเมนต์สามมิติ ในกรณีของพาเลทเหล็กเนื่องจากเป็นปัญหาสามมิติ จะทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 2

4) การกำหนดภาระที่กระทำ (Load) และจุดรองรับ (Constraint) เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากการกำหนดภาระและจุด

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

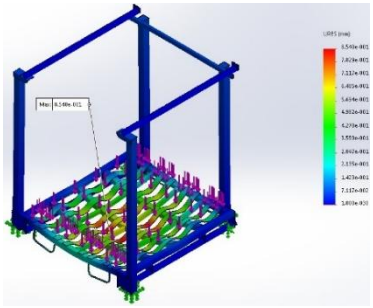
รองรับที่ถูกต้องจะทำให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้น ในกรณีของพาเลทเหล็กภาระที่กระทำจะเป็นภาระกระจายแบบสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับพื้นที่วางสินค้า (ลูกศรสีม่วง) ส่วนจุดรองรับจะเป็นการรองรับแบบยึดแน่นบนพื้นที่ที่สัมผัสกับพื้น (ลูกศรสีเขียว) ดังแสดงในภาพที่ 3

ภาพที่ 2 แบบจำลองพาเลทเหล็ก

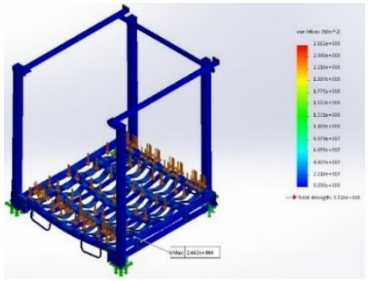


ภาพที่ 3 การกำหนดภาระและจุดรองรับ

ขั้นตอนถัดมาเป็นกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์โดยจะสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับทุกเอลิเมนต์ จากนั้นประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกันทำให้ได้สมการรวมและทำการแก้สมการรวม โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์และจุดต่อ และกระบวนการสุดท้าย คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ ซึ่งในกรณีของพาเลทเหล็กผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นความเค้นวอนมิสเซส (Von Misses stress) และการเสียรูป ดังแสดงในภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 ตามลำดับ โดยสีแดงหมายถึงผลลัพธ์ที่มีค่ามาก ส่วนสีน้ำเงินหมายถึงผลลัพธ์ที่มีค่าน้อย ซึ่งการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของชั้นสีจะช่วยทำให้เข้าใจลักษณะความเค้นและการแอ่นที่เกิดขึ้นกับพาเลทเหล็กได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการเสียรูปของพาเลทเหล็ก



ภาพที่ 5 ตัวอย่างความเค้นฟอนมิสเซสของพาเลทเหล็ก

การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามดีกรี *n*

การวิเคราะห์การถดถอยจะทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ถ้าตัวแปร x และตัวแปร y มีความสัมพันธ์กันมาก เมื่อตัวแปร x มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อตัวแปร y เป็นอย่างมาก ในกรณีของพาเลทเหล็กตัวแปร x จะหมายถึงน้ำหนักบรรทุก (kg) ส่วนตัวแปร y จะหมายถึงระยะการแอ่น (m) ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่น มีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นพหุนามดีกรี n จะกำหนดฟังก์ชันประมาณให้อยู่ในรูป

$$P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1)$$

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

โดย $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ เป็นค่าคงตัว ซึ่งฟังก์ชันประมาณจะทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน S เป็น

$$S = \sum_{i=1}^{n}[y_i - P_n(x_i)]^2 \qquad (2)$$

เพื่อให้ฟังก์ชันประมาณมีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันแม่นตรงและใช้แทนฟังก์ชันแม่นตรงได้ดีนั้น จะใช้ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งมีหลักการว่า พยายามทำให้ผลรวมของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสองแล้วมีค่าน้อยที่สุด[14] จึงทำให้ได้ว่า

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = 0 \qquad (3)$$

ทำให้เขียนระบบสมการเชิงเส้น ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^{n} x_i^n \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^{n} x_i^{n+1} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^n & \sum_{i=1}^{n} x_i^{n+1} & \sum_{i+1}^{n} x_i^{n+2} & \dots & \sum_{i=1}^{n} x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^n y_i \end{bmatrix} \qquad (4)$$

จากนั้นแก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงตัว $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ ซึ่งจะทำให้ได้ฟังก์ชันประมาณพหุนามดีกรี n ที่อยู่ในรูป

$$f(x) \approx P_n(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \qquad (5)$$

โดยฟังก์ชันประมาณพหุนามดีกรี n จะมีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันแม่นตรงเพียงใดนั้น สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \qquad (6)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^{n}(P_n(x_i) - \bar{y})^2 \qquad (7)$$

$$SST = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \qquad (8)$$

โดย SSR คือ ความแปรปรวนของระยะการแอ่นที่อธิบายได้โดยน้ำหนักบรรทุก และ SST คือ ความแปรปรวนของระยะการแอ่นทั้งหมด โดยถ้า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นมีความสัมพันธ์กันมาก หรือน้ำหนักบรรทุกสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของระยะการแอ่นได้มาก โดย R^2 จะไม่มีหน่วย และ $0 \le R^2 \le 1$

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

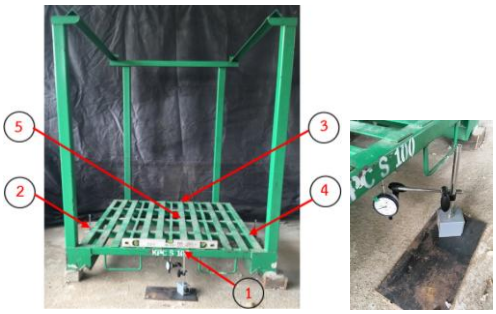
ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1) การหาระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กโดยการทดสอบจริง เป็นการนำพาเลทเหล็กวางบนพื้นที่ใช้ปูนซีเมนต์ก่อที่โคนเสาแต่ละต้นของพาเลทเหล็กและใช้ระดับน้ำในการตั้งระดับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากความลาดเอียงของพื้น ไดอัลเกจยี่ห้อ Mitotuyo ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตรซึ่งผ่านการสอบเทียบจากผู้ผลิตไดอัลเกจ จะถูกนำมาติดตั้ง 5 ตำแหน่ง เพื่อวัดระยะการแอ่น (เก็บข้อมูล 5 ครั้งและนำมาเฉลี่ย) โดยฐานไดอัลเกจจะวางบนแผ่นเหล็กที่ยึดกับพื้น เพื่อไม่ให้ฐานไดอัลเกจขยับขณะการทดสอบ (ภาพที่ 6) นำทรายบรรจุในกล่องขนาด 250x325 มิลลิเมตร จะทำให้ได้กล่องทรายที่มีน้ำหนัก 20 กิโลกรัม (ภาพที่ 7) จากนั้นนำกล่องทราย 12 กล่อง มาวางบนพาเลทเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกกระทำบนพาเลทเหล็ก 240 กิโลกรัม

2) การหาระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟท์แวร์คือการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กที่มีขนาดเท่ากับขนาดชิ้นงานจริงในคอมพิวเตอร์ จากนั้นกำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์ให้กับซอฟต์แวร์ โดยค่ามอดุลัสยืดหยุ่นคือ 200 GPa และอัตราส่วนปัวซองส์คือ 0.26 แล้วทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ Tetrahedral และ Hexahedral ขนาด 5 มิลลิเมตร โดยผ่านการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมจากการพิจารณาลู่เข้าของผลการคำนวนค่าความเค้นและการแอ่นที่ได้จากซอฟต์แวร์ด้วยเอลิเมนต์ขนาด 20, 18, 16, 14, 12, 10, 8, 6, 4 และ 2 มิลลิเมตร

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

เนื่องจากผลการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นฟอนมิสเซสที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีการลู่เข้า ทำให้ได้แบบจำลองที่มีจุดต่อจำนวน 4,794,604 จุดต่อ และเอลิเมนต์จำนวน 2,506,678 เอลิเมนต์ น้ำหนักบรรทุกกระจายแบบสม่ำเสมอกระทำบนพาเลทเหล็กและการรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) ที่โคนเสาแต่ละต้นของพาเลทเหล็กจะถูกกำหนด เพื่อใช้ในการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นฟอนมิสเซส



ภาพที่ 6 ตำแหน่งการวัดระยะการแอ่นด้วยไดอัลเกจ

ภาพที่ 7 การบรรจุทรายลงกล่อง

3) การเปรียบเทียบระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์และการทดสอบจริง จะทำการเปรียบเทียบระยะการแอ่น 5 ตำแหน่ง เมื่อพาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม โดยร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะการแอ่นสามารถหาได้จากสมการ (9)

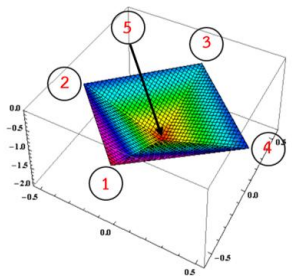
$$E = \left|\frac{y_F - y_E}{y_E}\right| \times 100 \qquad (9)$$

โดย E คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน, y_F คือ ระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟท์แวร์ (m) ,y_E คือ ระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง (m)

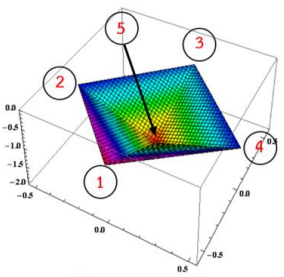
4) การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กจะนำระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกมาสร้างแผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุก โดยพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในการเลือกสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (ภาพที่ 8) โดยพาเลทเหล็กจะมีลักษณะรูปร่างการแอ่นเป็นกระทะ ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 2 และ 4 จะมีค่าใกล้เคียงกัน



(ก) การทดสอบ



(ข) ไฟไนต์เอลิเมนต์

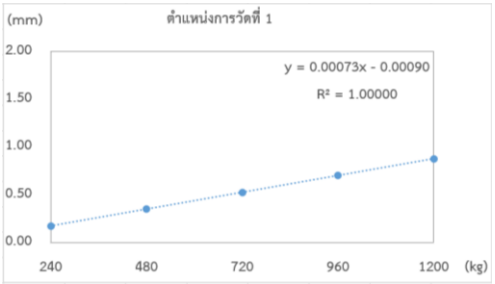
ภาพที่ 8 ระยะการแอนของพาเลทเหล็ก

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

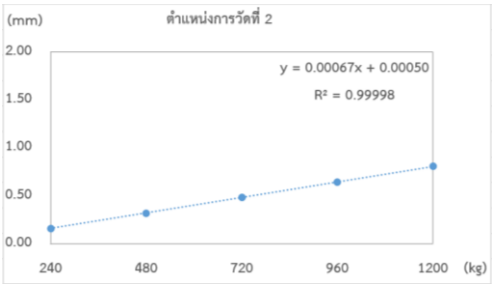
เนื่องจากเป็นคานที่มีความยาวเท่ากันและมีการรองรับแบบเดียวกัน ส่วนตำแหน่งการวัดที่ 1 และ 3 แม้จะเป็นคานที่มีความยาวเท่ากันแต่มีการรองรับที่ต่างกัน โดยตำแหน่งการวัดที่ 3 จะเป็นคานช่วงเดียวปลายยื่น (Overhanging beam) จึงทำให้ตำแหน่งการวัดที่ 3 มีระยะการแอ่นน้อยกว่าตำแหน่งการวัดที่ 1 ส่วนตำแหน่งการวัดที่ 5 จะมีระยะการแอ่นมากสุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของพาเลทเหล็กซึ่งอยู่ห่างจากจุดรองรับมากสุด และจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 7 โดยเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการวัดที่ 5 (ภาพที่ 9) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ สามารถทำนายระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้ โดยความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์อาจเกิดจากขนาดของแบบจำลองพาเลทเหล็กที่สร้างในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ หรือการกำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีความแตกต่างกับพาเลทเหล็กจริง[15]

ภาพที่ 9 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะ

จากผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เมื่อพาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม พบว่าระยะการแอ่นทั้ง 5 ตำแหน่งแปรผันตรงกับน้ำหนักบรรทุก โดยระยะการแอ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 10-14) ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กได้เป็นสมการเชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.99998-1.00000 ซึ่งหมายความว่าระยะการแอ่นมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุก จึงทำให้ในทางปฏิบัติการนำพาเลทเหล็กไปใช้ เมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยนสามารถคำนวณระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์ในตำแหน่งการวัดที่ 5 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีระยะการแอ่นมากสุด

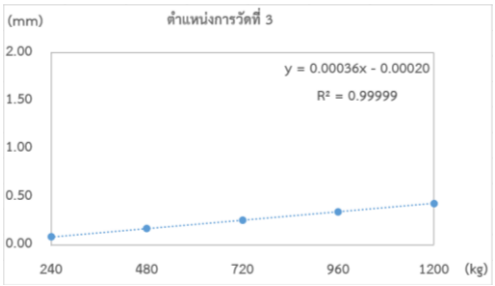


ภาพที่ 10 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 1

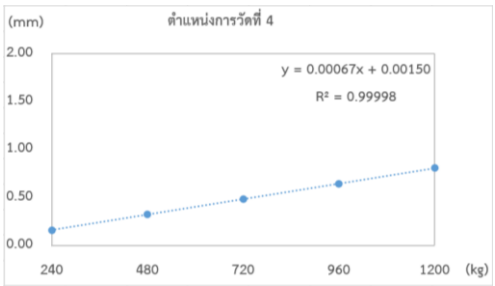


ภาพที่ 11 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 2

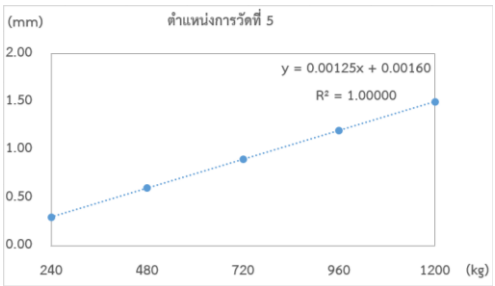
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)



ภาพที่ 12 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 3



ภาพที่ 13 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 4



ภาพที่ 14 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 5

จากงานวิจัยที่มีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์ระยะการแอ่นของพาเลท [8-13] พบว่าไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ เนื่องจากพาเลทจะถูกนำมาใช้รับน้ำหนักบรรทุกหลายค่า การที่งานวิจัยนี้ค้นพบว่าสามารถคำนวณระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์นั้น จะทำให้การนำพาเลทเหล็กไปใช้ในงานจริงมีความสะดวกมากขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เพื่อทำนายระยะการแอ่นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก โดยเปรียบเทียบผลที่ได้ด้วยการทดสอบวัดระยะการแอ่นจริง ซึ่งทดสอบโดยการให้พาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าพาเลทเหล็กจะมีลักษณะรูปร่างการแอ่นเป็นกระทะเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกแบบกระจายสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับพาเลท โดยจะมีระยะการแอ่นมากสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางพาเลทเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากจุดรองรับมากสุดซึ่งแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ สามารถทำนายระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 7 เมื่อเทียบกับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง และเมื่อนำระยะการแอ่นกับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบมาสร้างกราฟพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโดยมีสมการเป็น y=mx+c ภายใต้ขอบเขตของการทดสอบอยู่ในช่วงที่วัสดุไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวรทำให้สามารถคำนวณระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท เค.พี. เอ็กซ์เพอท เอนจิเนียริ่ง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนพาเลทเหล็กเพื่อใช้ในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเลขานุการของคณะกรรมการยุทธศาสตร์ชาติ. สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2561.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561-2580. ราชกิจจานุเบกษา, 135(82ก), 1-61.

[2] ภคพร ผงทอง. การจัดการโลจิสติกส์เพื่อสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันในธุรกิจพาเลทให้เช่า.วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์. 2561; 4(1): 91-100.

[3] Almasarwah N, Abdelall E, Suerl G, Egilmez G, et al. Pallet Loading Optimization Considering Storage Time and Relative Humidity. Journal of Industrial Engineering and Management. 2023;16(2): 453-471.

[4] Amin SH, Hairong W and Karaphillis G. A perspective on the reverse logistics of plastic pallets in Canada. Journal of Remanufacturing. 2018; 8: 153–174.

[5] John Clarke. Pallets 101: Industry Overview and Wood, Plastic, Paper & Metal Options. Grate Pallet Inc; 2004.

[6] World Steel Pallet. พาเลทเหล็ก (Steel Pallet) คืออะไร และทำไมถึงต้องเลือกใช้พาเลทเหล็ก.2566 - วันที่สืบค้น 27 ตุลาคม 2566. จาก : https://wsp.co.th/

[7] ASTM International. ASTM D1185-98a: Standard Test Methods for Pallets and Related Structures Employed in Materials Handing and Shipping. ASTM International United States, PA 19428-2959; 2017

[8] Masood SH and Haider Rizvi S. Design optimization for pallets in material handling. Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004. 2004; 3.4.1-3.4.12.

[9] Masood SH and Haider Rizvi S. An investigation of pallet design using alternative materials for cold room applications. Int J Adv Manuf Technol, 2006; 29: 1-8.

[10] Kodape CD and Wasankar KS. Weight reduction of standard steel pallet by using corrugated sheet instead of CRCA sheet & evaluating its strength through finite element analysis. International Research Journal of Engineering and Technology. 2018; 5(7):1105-1111.

[11] Sing KT. An experiment and finite element analysis of the static deformation wood sawdust-polyporpylene composite pallet. Universiti Sains Malaysia; 2006.

[12] Manoj P. and Ashok JK. Design optimization and Simulation Study of the Engine Transportation Metal Pallet for Stationary and Movable Condition. International Journal of u- and e-Service, Science and Technology. 2015; 8(5):219-230.

[13] Enrico Z, António T, Almeida J, Miguel Esteves, et al. Design of new modular metal pallets: Experimental validation and life cycle analysis. Materials & Design. 2022;214:1-18.

[14] Dukkipati RV. Numerical Method. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers; 2010.

[15] Jalammanavar K, Pujar N and Raj VR. Finite element study on mesh discretization error estimation for Ansys workbench .International Conference on Computational Techniques, Electronics and Mechanical Systems (CTEMS); 2018. 344-350.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Effect of O_2 Flow Rate on Structure of Zirconium Oxynitride Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering Method

จินดาวรรณ จันทมาส[1] และ สิรีพัชร แสงสว่าง[2]*

[1]สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา แขนงฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

[2]สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ ภาควิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา 13000,

Jindawan Jantamas[1] and Sireepatch Sangsawang[2]*

[1]Department of Science Education, Field of Physics, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Phranakhon Si Ayutthaya, Phranakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand

[2]Department of Applied Mathematics, Faculty of Science and technology, Phra Nakorn Si Ayutthaya Rajabhat University, Ayutthaya 13000 Thailand

Corresponding author. E-mail : siree.light@gmail.com, Jindawanaru@gmail.com, Tel: 085-9195775,

Received: 18-11-2024 ***Revised:*** 20-11-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของออกซิเจนของต่อโครงสร้างฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ การศึกษาโครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM, FE-SEM และ Raman Spectroscopy จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สออกซิเจนฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์เปลี่ยนจากสีเหลืองทองทึบแสงเป็นสีเหลืองและใส ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนในช่วง 0.4 sccm และ 0.8 sccm ได้ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ (Zr_2ON_2) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบบอดี้-เซนเตอร์ คิวบิค (bcc) ที่ระนาบ (211), (222), (400), (332), (440) และ (622) ตามลำดับ โดยมีระนาบ (222) เป็นระนาบหลัก โดยที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm มีความเป็นผลึกสูงที่สุด และอัตราไหลแก๊สออกซิเจนมีผลต่อความหนาของฟิล์มบาง คือเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 0.8 sccm พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีขนาดผลึกลดลงจาก 32.26 nm เป็น 23.18 nm และความหนาลดลงจาก 965 nm เป็น 859 nm

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง เซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ อัตราไหลแก๊สออกซิเจน โครงสร้าง ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ABSTRACT

This research prepared of zirconium oxynitride (Zr_2ON_2) thin films by reactive DC magnetron sputtering of a zirconium target in an argon-oxygen-nitrogen mixture in order to study the effect of oxygen flow rate on structure of Zr_2ON_2 thin films. The structure and morphology of films were study by XRD AFM and FE-SEM, and Raman Spectroscopy. The results show that

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

the color of the Zr_2ON_2 thin film changed from yellow gold to light yellow, and finally transparent with increasing oxygen flow rate. At the oxygen flow rate of 0.4 sccm and 0.8 sccm, the Zr_2ON_2 thin films showed the crystal structure of the body-centered cubic (bcc) with (211), (222), (400), (332), (440) and (622) planes, which the (222) plane was preferred orientation. The film deposited with 0.4 sccm to the oxygen had the highest degree of crystals. When the oxygen gas flow rate increased from 0.4 to 0.8 sccm, the crystal size of the coated thin film decreased from 32.26 nm to 23.18 nm and the thickness decreased from 965 nm to 859 nm.

Keywords: thin films, zirconium oxynitride, O_2 flow rate, structure, DC magnetron sputtering

1. บทนำ

เซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ (Zr_2ON_2) มีความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งการประยุกต์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดอิเล็กตริก การประยุกต์ทางสี ทนต่อรอยขีดข่วน และการกัดกร่อน [1] และการประยุกต์ใช้กับเครื่องประดับตกแต่ง [2] เช่น เฟรมแว่นตา, กรอบภายนอก (Casings) นาฬิกาข้อมือ และสายรัดข้อมือ เป็นต้น เมื่อแก๊สออกซิเจนที่มีเปอร์เซ็นต์น้อยเข้าไปแทรกตัวในไนไตรด์ของโลหะทรานซิชัน (Transition Metal Nitride) ทำให้เกิดการก่อตัวของพันธะไอออนิกของโลหะออกซิเจน (Ionic Metal-Oxygen Bonds) ในเมทริกซ์ของพันธะโควาเลนต์ของโลหะไนโตรเจน (Covalent Metal - Nitrogen Bond) อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าของออกซิเจนเมื่อเทียบกับไนโตรเจน ทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ของฟิล์มเป็นออกซิไนไตรด์ของโลหะทรานซิชัน ซึ่งทำให้สมบัติของฟิล์มต่างไปจากฟิล์มของออกไซด์ และไนไตรด์ของโลหะทรานซิชัน นอกจากนี้ โครงสร้าง สมบัติทางแสง สมบัติเชิงกล สมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ และสีของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ สามารถควบคุมได้ด้วยอัตราส่วนของแก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน

การเตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) อาร์เอฟ สปัตเตอริง (RF sputtering) ดีซีสปัตเตอริง (DC sputtering) [3,4,5,6] พัลส์เลเซอร์ (Pulsed laser deposition) [7] วิธีการเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) [8] เช่นโซลเจล (Sol gel) [9] เป็นต้น อย่างไรก็ดี การเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคสปัตเตอริง มีข้อได้เปรียบที่สามารถควบคุมอัตราเคลือบและสมบัติของฟิล์มได้ง่าย ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพ การยึดเกาะดี และสามารถประยุกต์ไปสู่การเคลือบชิ้นงานขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย

โดยทั่วไปโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มที่เคลือบได้ขึ้นกับเทคนิคกระบวนการเคลือบและเงื่อนไขการเคลือบ สำหรับฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ มีนักวิจัยหลายกลุ่มศึกษาเงื่อนไขการเคลือบที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม เช่น [6] Rawal et al., (2010) ศึกษาการเตรียมฟิล์มเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ด้วยวิธีอาร์เอฟรีแอคตีฟสปัตเตอริง โดยแปรค่าความดันย่อยในแก๊สผสมของ N_2 + Ar และ N_2 + He จากการศึกษาพบว่าเมื่อเคลือบในแก๊สฮีเลียมที่ความดันย่อยแก๊สออกซิเจนมากกว่า 4.0% โครงสร้างของฟิล์มเปลี่ยนจาก Zr_2ON_2 เป็น m-ZrO_2 ที่มีความเป็นผลึกส่วน [10] Huang, Tsai, and Yu (2008) ศึกษาผลของปริมาณแก๊สออกซิเจนต่อสีของฟิล์มบาง ZrN_xO_y จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นสีของฟิล์มบาง ZrN_xO_y เปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองทองเป็นสีฟ้า

จากรายละเอียดต่าง ๆ ข้างต้นผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาเทคนิคกระบวนการเตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำวิจัยต่อไป

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

งานวิจัยนี้จะศึกษาเทคนิคขั้นตอนกระบวนการเตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราเคลือบและสมบัติของฟิล์มได้ง่าย การยึดเกาะดี โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ ในส่วนการวิเคราะห์เพื่อหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มนั้นจะใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาเฟสและโครงสร้างผลึก เทคนิค AFM เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว เทคนิค FE-SEM หาความหนาของฟิล์ม และ Raman Spectroscopy เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

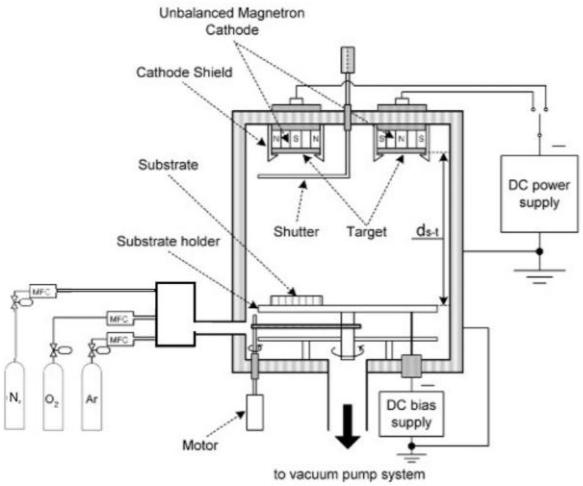
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ (1) การเตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ และ (2) การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การเตรียมฟิล์มเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์

1) เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องเคลือบที่ใช้ในการวิจัยสร้างขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา [3]

2) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เป้าสารเคลือบเป็นเป้าเซอร์โคเนียม มีความบริสุทธิ์ 99.97 % วัสดุรองรับมี 2 ชนิดคือ กระจกสไลด์ใช้เพื่อดูลักษณะสีของฟิล์ม แผ่นซิลิกอนใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึก ขนาดผลึก และลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ และแก๊ส ประกอบด้วยแก๊ส 3 ชนิดคือ แก๊สอาร์กอน (Ar) ความบริสุทธิ์ 99.999% เป็นแก๊สสปัตเตอร์ แก๊สไนโตรเจน (N_2) ความบริสุทธิ์ 99.995% เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา แก๊สออกซิเจน (O_2) ความบริสุทธิ์ 99.995% เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา



ภาพที่ 1 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การหาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

ศึกษาโครงสร้างผลึก งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-Ray Diffractrometer รุ่น Rint 2000 (Rigaku Corporation) ของศูนย์เครื่องเพื่อมาตรฐานวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์สามารถหาได้จากโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบได้จากเครื่อง X-Ray Diffractrometer และคำนวณจากความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด (Full width at half maximum; FWHM) ด้วย Seherrer Equation [11] ลักษณะพื้นผิว ใช้เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) ของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ หาความหนา และภาคตัดขวางของฟิล์ม ใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE- SEM) ของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และศึกษาองค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์ม ใช้เครื่อง Raman spectroscopy ของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การเตรียมฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ ขั้นตอนนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์บนกระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอนโดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนในกระบวนการเคลือบ เพื่อหาอัตราไหลแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์นี้เป็นการนำฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ที่เคลือบได้มาศึกษาโครงสร้างผลึก ความหนาและลักษณะพื้นผิว

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง Zr_2ON_2 โดยการแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน

เงื่อนไข	รายละเอียด
ระยะระหว่างเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ	10 cm
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	20
อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (sccm)	2.0
อัตราไหลแก๊สออกซิเจน (sccm)	0.0, 0.4, 0.8
เวลาเคลือบ	60 min
กระแสไฟฟ้า	500 mA

การเตรียมฟิล์มบาง ZrN ให้มีสีทอง นั้นพบว่าต้องให้อัตราไหลอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2.0 sccm ฟิล์มมีสีทองเข้ม ฟิล์ม มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิค (fcc) ที่ระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (222) ตามลำดับ โดยมีระนาบ (111) เป็นระนาบหลัก และมีความเป็นผลึกสูง ดังแสดงในภาพที่ 3.1 และ 3.2จากนั้นการเตรียมฟิล์มบาง Zr_2ON_2 จากเงื่อนไขที่มีสีทองมาเคลือบโดยปรับอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2.0 sccm และแปรค่าแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.0 sccm, 0.4 ccm และ 0.8 sccm จากภาพที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สออกซิเจน ฟิล์มที่ได้ใสเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแก๊สออกซินเป็นแก๊มีความโปร่งใส เมื่อรวมกับเซอร์โคเนียม จึงทำให้ฟิล์มใสมากขึ้น

(a) (b) (c)

ภาพที่ 2 แสดงฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ
(a) 0.0 sccm, (b) 0.4 sccm และ (c) 0.8 sccm

1. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง Zr_2ON_2

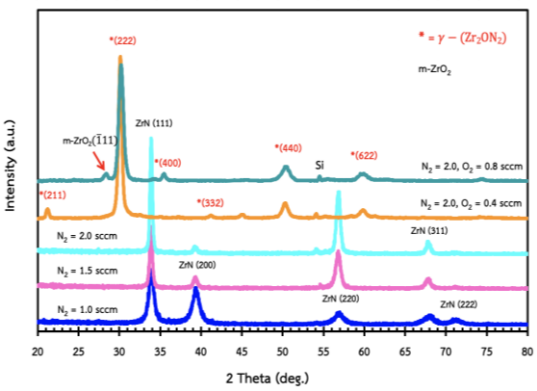
นำฟิล์มบางที่เคลือบไปศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกว่าเป็นฟิล์มบาง ZrN และฟิล์มบาง Zr_2ON_2 หรือไม่ จากการแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm, 1.5 sccm และ 2.0 sccm พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 33.84°, 39.27° 56.74°, 67.73° และ 71.18° ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ตามมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 78-4120 [12,13] มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิค (fcc) ที่ระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (222) ตามลำดับ โดยมีระนาบ (111) เป็นระนาบหลัก เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มที่ระนาบ (111) และ (220) มีความเป็นผลึกสูงขึ้น แต่ระนาบ (200) มีความเป็นผลึกลดลงอย่างชัดเจน ขณะที่ ระนาบ (311) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

และเมื่อปรับอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2.0 sccm และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ พบว่าที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm

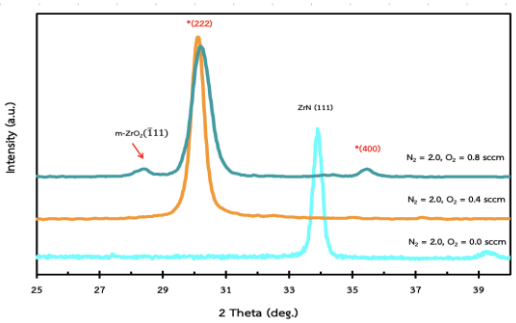
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

และ 0.8 sccm ฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 21.45°, 30.52°, 35.38°, 41.75°, 50.90° และ 60.52° ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบเซอร์โคเนียมออกซีไนไตรด์ (Zr_2ON_2) ตามมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 89-8344 มีโครงสร้างผลึกแบบบอดี้เซนเตอร์คิวบิค (bcc) ที่ระนาบ (211), (222), (400), (332), (440) และ (622) ตามลำดับ โดยมีระนาบ (222) เป็นระนาบหลัก [13,14]

จากการคำนวณจากหาขนาดผลึกด้วย Seherrer Equation [11] ที่ระนาบ (222) ที่มีพีคสูงสุด พบว่าที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm มีขนาดผลึกสูงสุดด้วย และเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ลดลง แสดงให้เห็นว่าที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มบาง Zr_2ON_2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] Rizzo et al., (2012)



ภาพที่ 3.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง ZrN และฟิล์มบาง Zr_2ON_2

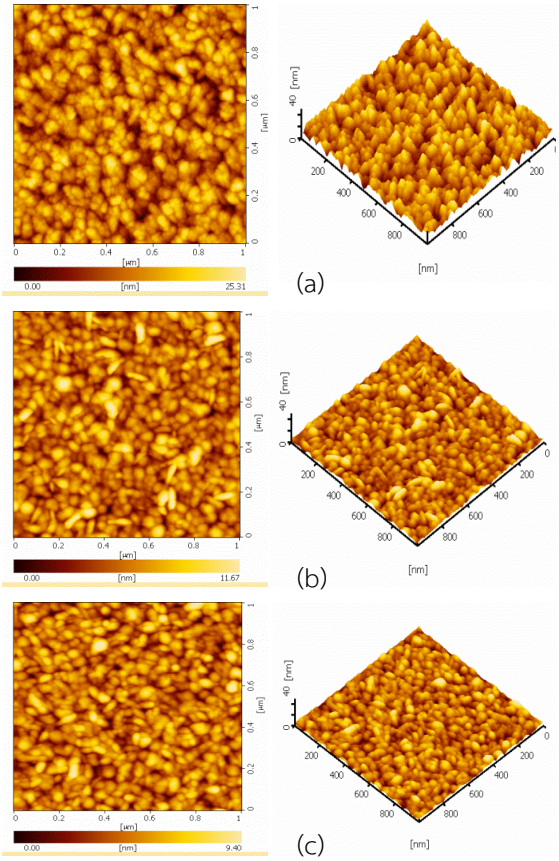


ภาพที่ 3.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง ZrN และฟิล์มบาง Zr_2ON_2

2) ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มบาง Zr_2ON_2

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.0 sccm ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีเกรนมีลักษณะแหลม พื้นผิวไม่เรียบ เนื่องจากไนโตรเจนมีขนาดอะตอมที่ใหญ่ ทำให้ Zr จับกับ N ที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้ฟิล์มมีผิวหยาบ และเมื่อเพิ่มที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีเกรนมีลักษณะกลมมนและมีลักษณะคล้าย ๆ เมล็ดข้าวเปลือกกระจายบนผิวฟิล์มเป็นบางส่วน ส่วนที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.8 sccm ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีเกรนมีลักษณะกลมมนและสม่ำเสมอมากกว่าที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm เนื่องจากอะตอมของออกซิเจนมีขนาดอะตอมเล็กกว่า จึงทำให้ Zr จับกับ O ได้เร็วขึ้นและตกลงไปฝังในวัสดุรองรับได้มากขึ้นจึงทำให้ผิวฟิล์มเรียบขึ้น

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)



ภาพที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM

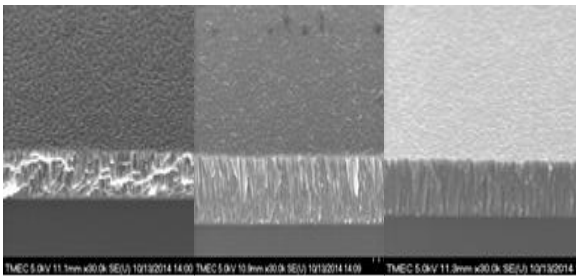
(a) 0.0 sccm, (b) 0.4 sccm และ (c) 0.8 sccm

ตารางที่ 2 ขนาดผลึกและความหนาของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซีไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ

อัตราไหลแก๊สออกซิเจน	ขนาดผลึก (nm)	ความหนา (nm)	ความหยาบผิว Ra (nm)
0.0 sccm	-	774	3.053
0.4 sccm	32.26	965	1.451
0.8 sccm	23.18	859	1.178

ภาพที่ 5 แสดงความหนาและภาคตัดขวางของฟิล์ม Zr_2ON_2 ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สออกซิเจน โครงสร้างของชั้นฟิล์มมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบคอลัมนาร์ [5] ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ0.0 sccm ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีความหนาเท่ากับ 774 nm และเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.4 sccm เป็น 0.8 sccm พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีขนาดผลึกและความหนาลดลงจาก ดังภาพที่ 6 เนื่องจากออกซิเจนมีรัศมีอะตอมน้อยกว่าไนโตรเจน เมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ฟิล์มที่เคลือบได้จึงมีความหนาลดลง และความหยาบผิวลดลงด้วย พันธะโควาเลนต์ของโลหะไนโตรเจนเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนสูงกว่าไนโตรเจน จากภาพที่ 5 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM สอดคล้องกับภาพที่ 4 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM

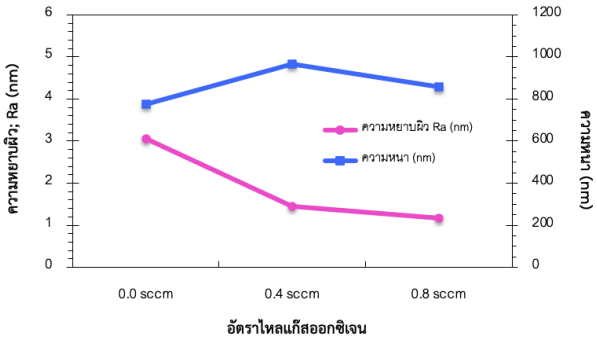
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)



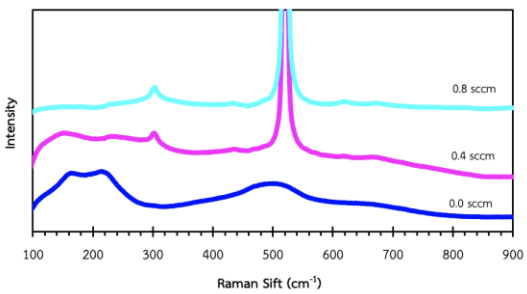
(a) (b) (c)

ภาพที่ 5 ความหนาและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM (a) 0.0 sccm, (b) 0.4 sccm และ (c) 0.8 sccm

Raman Spectroscopy เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางที่เคลือบได้ ดังภาพที่ 7 แสดงรามานสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ซึ่งผลพบว่าที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ นี้ตรงกับ Zr_2ON_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ bcc ซึ่งยืนยันกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์ม Zr_2ON_2 ด้วยเทคนิค XRD ได้เป็นอย่างดี [11] โดยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 และ 0.8 sccm ฟิล์มบางที่เคลือบได้แสดงรามานสเปกตรัมที่ประมาณ 300 cm^{-1} ส่วนที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.0 sccm ฟิล์มบางที่เคลือบได้แสดงรามานสเปกตรัมของแถบความถี่ต่ำมีอยู่สองแถบซึ่งมีศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 165 และ 220 และ 500 cm^{-1} [16]



ภาพที่ 6 ความหยาบผิวและความหนาของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ



ภาพที่ 7 Raman Spectroscopy ของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ

4. สรุปผลการทดลอง

ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกซิไนไตรด์

1. อัตราไหลแก๊สออกซิเจนมีผลต่อสีและความโปร่งใสของฟิล์ม Zr_2ON_2 คือเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มมีความใสเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

2. อัตราไหลแก๊สออกซิเจนมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 คือที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm และ 0.8 sccm ได้ฟิล์มบาง Zr_2ON_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบบอดี้เซนเตอร์คิวบิค (bcc) ที่ระนาบ (211), (222), (400), (332), (440) และ (622) ตามลำดับ โดยมีระนาบ (222) เป็น

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ระนาบหลัก โดยที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.4 sccm มีความเป็นผลึกสูงที่สุด

3. อัตราไหลแก๊สออกซิเจนมีผลต่อความหนาของฟิล์มบาง Zr_2ON_2 คือเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.4 sccm เป็น 0.8 sccm พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีขนาดผลึกลดลงจาก 32.26 nm เป็น 23.18 nm และความหนาลดลงจาก 965 nm เป็น 859 nm

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความสนับสนุน จากเจ้าหน้าที่และบุคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง (VTTF) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย และขอบคุณศูนย์เครื่องเพื่อมาตรฐานวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการทำวิจัยต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ariza E, Rocha LA, Vaz F, et al. Tribocorrosion behaviour of ZrN_xO_y thin films for decorative applications. Thin Solid Films. 2004;469-470:274-281.

[2]. Carvalho P, Vaz F, Rebouta L, et al. Structural, electrical, optical, and mechanical characterizations of decorative ZrO_xN_y thin films. Journal of Applied Physics. 2005;98:023715.

[3] จินดาวรรณ ธรรมปรีชา, กาญจนา สาธุพันธ์, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สุรสิงห์ ไชยคุณ. ผลของกำลังไฟฟ้าต่อโครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไททาเนตที่เคลือบด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนโคสปัตเตอริง. 2561. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีปีที่ 26 ฉบับที่ 2 : หน้า 208-214

[4] Rizzo A, Signore MA, Mirenghi L, et al. Sputtering deposition and characterization of zirconium nitride and oxynitride films. Thin Solid Films. 2012; 515:1132-1137.

[5] Portinha A., Teixeira V., Influence of nitrogen flow rate on the physical properties of ZrO_xN_{1-x} coatings produced by magnetron sputtering. 2008; Vacuum 82:1517-1521.

[6] Rawal S, Chawla A, Chawla V, et al. Structural, optical and hydrophobic properties of sputter deposited zirconium oxynitride films. Materials Science and Engineering B-advanced Functional Solid-state Materials 2010;172:259-266.

[7] Gottmann J, Husmann A, Klotzbucher T, et al. Pulsed laser deposition of ceramic thin films using different laser sources. Surf Coat Technol. 1998;100-101:411-415.

[8] Bernard O, Huntz AM, Andrieux M, et al. Synthesis structure microstructure and mechanical characteristics of MOCVD deposited zirconia films. Appl Surf Sci. 2007;253:4626-4640.

[9] Meher A, Klumper-Westkamp H, Hoffmann F, & Mayr P, Crystallization and residual stress formation of sol-gel-derived zirconia films. Thin Solid Films. 1997;308-309:363-368.

[10] Huang JH, Tsai ZE, Yu GP. Mechanical properties and corrosion resistance of nanocrystalline ZrN_xO_y coatings on AISI 304 stainless steel by ion plating.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Surface and Coatings Technology 2008;202:4992-5000.

[11] Kim, DJ, Hahn SH, Oh SH, et al. Influence of Calcinations Temperature on Structural and Optical Properties of TiO_2 Thin Film Prepared by Sol-Gel Dip Coation. Materials Letters. 2002;57:355-360.

[12] Klug HP, Alexer LE., X-Ray Diffraction Procedures. 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York: 1974:618-708.8.

[13] Jariwala NN, Chauhan KV, Pandya PP, et al. Consequences of N_2 gas flow variation on properties of zirconium oxide-nitride films. Materials Science and Engineering 2016;149.

[14] Nieh RE, Kang CS, Cho HJ, et al. Electrical characterization and material evaluation of zirconium oxynitride gate dielectric in TaN-gated NMOSFETs with high-temperature forming gas annealing. IEEE Transactions on Electron Devices 2003;50:333.

[15] Moura C, Carvalho P, Vaz F, et al. Raman spectra and structural analysis in ZrO_xN_y thin films. Thin Solid Films 2006;515:1132-1137.

[16] Cassinese A, Iavarone M, Vaglio R, et al. Transport properties of ZrN superconducting films. PHYSICAL REVIEW B 62; 13915.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

การทดลองหาประสิทธิภาพและการพัฒนาเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มผลผลิตและประหยัดพลังงาน

Efficiency Testing of Semi-Automatic Brown Rice Water and Making Machine Development to Increase Production and Save Energy

รัชดาศักดิ์ สุเพ็งคำ[1], สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์[2*]

Rachadasak Supengcum[1], Suttipong Jumroonrut[2*]

[1,2*]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[1,2*] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand

[1,2*] Corresponding author. E-mail: rachadasak.s@rmutp.ac.th, suttipong.j@rmutp.ac.th

Received: 18-10-2024 ***Revised:*** 19-11-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อ นำเสนอการพัฒนาเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มผลผลิต และประหยัดพลังงาน แต่ปัจจุบันยังไม่มีเครื่องที่สามารถผลิตน้ำข้าวกล้องงอกได้ในขั้นตอนเดียว ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีระบบสั่งการทำงานด้วยตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ สามารถแก้ไขคำสั่งการทำงานของฮีตเตอร์ (Heater) และทามเมอร์ (Timer)ได้ อีกทั้งภายในถังต้มยังมีใบปั่นที่สามารถปั่นข้าวกล้องให้ละเอียดได้เร็วขึ้นเพื่อลดเวลาในการต้มได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังติดแผ่นกรองเศษภายในถังเมื่อต้มเสร็จสามารถเปิดวาล์วเอาเฉพาะน้ำเข้ากล้องมาใช้ได้เลย

จากการทดลองหาประสิทธิภาพเครื่องพบว่าเครื่องสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้คือสามารถลดขั้นตอนการผลิตน้ำข้าวกล้องงอกได้ สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ โดยการเปรียบเทียบกับเครื่องเดิมคือในการผลิตน้ำข้าวกล้องงอก 1 ชั่วโมงเครื่องเดิมจะมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 3.36 ลิตรต่อชั่วโมง ส่วนเครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถผลิตได้ 22.49 ลิตรต่อชั่วโมง ส่วนอัตราการใช้ไฟฟ้าเครื่องเดิมใช้ไฟฟ้าร้อยละ 60.38 ส่วนเครื่องที่พัฒนาขึ้นใช้ไฟฟ้าร้อยละ 39.62 ซึ่งมีความแตกต่างกันร้อยละ 20.76

คำสำคัญ : เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ ผลผลิต การประหยัดพลังงาน การทดลองสมประสิทธิภาพ

ABSTRACT

The purpose of this research is to present the development of a semi-automatic germinated brown rice water machine to increase production and save energy but currently there is no machine that can produce germinated brown rice water in one step. Therefore the researcher has designed and developed a semi-automatic germinated brown rice water machine to solve this problem. The developed machine has a control system with a semi-automatic germinated brown rice water control cabinet and it can change the operation commands of the

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

heater and timer and inside the boiling tank there is a blender that can grind the brown rice faster to reduce the boiling time. In addition there is a filter inside the tank when boiling is complete, the valve can be opened to take only the water into the brown rice.

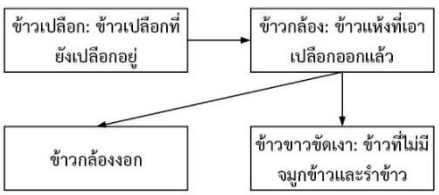
From the experiment to find the efficiency of the machine, it was found that the machine can work according to the set objectives which is to reduce the production steps of germinated brown rice water and increase production capacity that comparing with the original machine in the production of germinated brown rice water from 1 hour, the original machine has a production rate of 3.36 liters per hour while the developed machine can produce 22.49 liters per hour .The electricity usage rate of the original machine is 60.38 percent, while the developed machine is 39.62 percent which is a difference of 20.76 percent.

Keyword: Semi-automatic germinated brown rice water machine, productivity, energy saving, hypothesis testing

1. บทนำ

ข้าวกล้อง (Brown Rice) ผ่านกรรมวิธีการสีเพียงครั้งเดียว เพื่อเอาเปลือก (แกลบ) ออกไป ส่งผลให้ข้าวที่เหลือยังมีจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว (รำ) อยู่ครบถ้วน ซึ่งจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวนี้ล้วนอุดมไปด้วยวิตามิน แร่ธาตุ และเส้นใยอาหาร จึงเป็นประโยชน์ต่อร่างกายมากกว่าข้าวประเภทอื่น ๆ วิตามินและแร่ธาตุในข้าวกล้องจะมีวิตามินและแร่ธาตุสูงกว่า ข้าวขาว ได้แก่ แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส วิตามินบี 1 และไนอาซิน [1-3] แม้ว่าข้าวกล้องจะมีคุณประโยชน์สูงกว่า แต่ข้าวกล้องกลับไม่เป็นที่นิยมเท่าข้าวสีหรือข้าวขาว เนื่องจากข้าวสีมีกลิ่นอ่อน ส่งผลให้หุงไม่สะดวก และย่อยยาก ดังนั้นข้าวกล้องจึงมักงอกเพื่อให้เนื้อสัมผัสนุ่มลง [4] ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice: GBR) ถือเป็นอาหารสมบูรณ์ เนื่องจากมีเพียงเปลือกนอกสุดเท่านั้นที่ถูกลอกออก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อคุณค่าทางโภชนาการน้อยที่สุด [5] ผลผลิตที่ได้จากการนำข้าวกล้องแช่น้ำส่งผลให้ต้นอ่อนงอกมีความยาวประมาณ 0.5 -1.0 มิลลิเมตร [6-8] ที่บริเวณจมูกข้าว จากนั้นนำไปผ่านความร้อน หรือลดความชื้นเพื่อทำให้แห้งจะได้เป็นข้าวกล้องงอก

ความแตกต่างระหว่างข้าวขาวและข้าวกล้องงอก [9] ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงความแตกต่างระหว่างข้าวขาว และข้าวกล้องงอก

ที่มา:เจนจิรา จรรยา. การออกแบบและพัฒนาเครื่องแช่ และเพาะงอกข้าวเปลือก

การนำข้าวแช่น้ำนี้เพื่อกระตุ้นให้เกิดการงอกของเมล็ดข้าว น้ำทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการงอกของข้าวให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในเมล็ดข้าว การเปลี่ยนแปลงเริ่มขึ้นเมื่อน้ำแทรกซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวโดยกระตุ้นเอมไซม์ภายในเมล็ดข้าวให้เกิดการทำงาน จากนั้นจึงทำการเพาะงอกด้วยการแช่น้ำหรือเพาะงอกหลังจากการแช่น้ำตามเทคนิคของ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

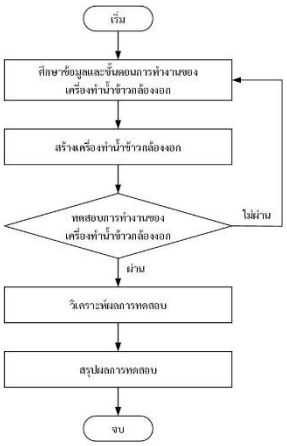
ผู้ประกอบการ เป็นระยะเวลา 24-36 ชั่วโมง [9] ในปี ค.ศ. 2020 [10] มีการศึกษา ออกแบบและพัฒนาเครื่องแช่และเพาะงอกข้าวเปลือกในขั้นตอนเดียว โดยใช้หลักการน้ำไหลผ่านข้าวเปลือกด้วยการสเปรย์น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นแก่เมล็ดข้าว ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำด้วยระบบอัตโนมัติ ผลลัพธ์พบว่าระยะเวลาการสเปรย์น้ำ 20 นาทีร่วมกับการพักสเปรย์ 90 นาที เป็นเงื่อนไขที่พบปริมาณสารกาบ้า (GABA) สูงที่สุด (29.77 mg g-1) โดยมีร้อยละการงอกของข้าวเปลือก 81.54 ซึ่งสูงกว่ากระบวนการดั้งเดิม ในปี ค.ศ. 2023 [11] มีการศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิต (ขั้นตอนการงอกและอบแห้ง) และเปอร์เซ็นการงอกของข้าวกล้องงอกที่ได้จากระบบการผลิตข้าวกล้องงอกแบบฉีดพ่นน้ำ (Sprayed-GBR) และแบบแช่น้ำ (Soaked-GBR) ผลลัพธ์พบว่าระบบการเพาะข้าวกล้องแบบฉีดพ่นน้ำต้องใช้เวลา 2.5 ชั่วโมงในการฉีดพ่นน้ำเพื่อให้ได้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นร้อยละ 30 (w.b.) และใช้เวลา 26 ชั่วโมงในการบ่มเพื่อให้ได้การงอกร้อยละ 90 ส่งผลให้ระยะเวลาในการงอกสั้นลงเมื่อเทียบกับระบบการเพาะข้าวกล้องแบบแช่น้ำ (Soaked-GBR) ซึ่งต้องใช้เวลา 50 ชั่วโมงเพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์การงอกร้อยละ 90 เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกที่มีอยู่ในท้องตลาดดัดแปลงมาจากเครื่องทำน้ำธัญพืช ซึ่งจะสามารถผลิตน้ำข้าวกล้องงอกได้ในปริมาณ 1.4 ลิตรต่อครั้ง กำลังการผลิตที่ได้ในแต่ละครั้งมีปริมาณที่น้อย ตัวเครื่องใช้วิธีการต้มโดยการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ และชุดใบมีดปั่นขับกำลังแรงด้วยมอเตอร์ในตัว แต่ในขั้นตอนการกรองจะต้องใช้ตะแกรงกรองเพื่อแยกกากข้าวกล้องงอกออกต่างหาก ซึ่งไม่ได้มีระบบกรองในตัวเครื่อง ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ทำการการพัฒนาเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติเพื่อเพิ่มผลผลิตและประหยัดพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์ได้แก่

1. เพื่อออกแบบพัฒนาและสร้างเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอก
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอก 3. เพื่อลดขั้นตอนในการผลิตน้ำข้าวกล้องงอก
3. เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตให้มากขึ้นในแต่ละครั้งการผลิต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานสร้างเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานสร้างเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

2.2 การออกแบบเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

ในการออกแบบเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความปลอดภัยสำหรับผู้บริโภค โดยเครื่องที่สร้างขึ้นใช้สแตนเลสเกรดที่ใช้สำหรับอาหารในชุดหม้อต้ม มีความสะดวกในการปฏิบัติงาน มีถังต้มขนาดใหญ่ที่สามารถผลิตได้อย่างน้อย 15 ลิตร/ครั้ง ซึ่งเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น จะทำงานโดยใช้ฮีตเตอร์ขนาด 220 โวลต์ในการให้ความร้อน ในการทำน้ำข้าวกล้องงอก และ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ 650 วัตต์ ในการปั่น

- การคำนวณแรง

$$F = ma \quad (1)$$

โดยที่ F คือ แรง (นิวตัน)

m คือ มวล (กิโลกรัม)

a คือ อัตราเร่ง (9.81 เมตร/วินาที)

m = น้ำ 16 ลิตร + ข้าวกล้องงอก 1.5 กิโลกรัม

= 17.5 กิโลกรัม

F = 17.5 x 9.81

= 171.675 นิวตัน

- คำนวณหากำลังของมอเตอร์

1. หาความเร็วตัด

$$v = \frac{\pi \times d \times n}{60} \quad (2)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วตัด (เมตร/วินาที)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบปั่น (50 มิลลิเมตร หรือ 0.05 เมตร)

n คือ ความเร็วรอบ (1,450 รอบ/นาที)

$$v = \frac{\pi \times 0.05 \times 1,450}{60}$$

= 3.79เมตร/วินาที

2.หากำลังมอเตอร์

$$Pw = Fr \times v \quad (3)$$

โดยที่ P_W คือ กำลังมอเตอร์ (วัตต์)

Fr คือ แรงหมุน (171.675 นิวตัน)

v = 171.675 x 3.79

= 650.648 วัตต์

ดังนั้น กำลังมอเตอร์ที่เราใช้อยู่ที่ 650.648 วัตต์ เพื่อความเหมาะสมจึงควรเลือกใช้มอเตอร์ 700 วัตต์

-การคำนวณหาพลังงานขนาดฮีตเตอร์

การหาพลังงานของฮีตเตอร์ เมื่อมีน้ำ 16 ลิตร และต้องการให้น้ำมีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ภายใน 20 นาที ต้องใช้ฮีตเตอร์ ขนาดดังต่อไปนี้

$$E = \frac{M \times Cp \times AT}{H \times Eff \times t} \quad (4)$$

โดยที่ E คือ พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์)

M คือ จำนวนมวลของน้ำ (16 ลิตร)

Cp คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 กิโลจูล/กิโลเคลวิน)

AT คือ ผลต่างอุณหภูมิของน้ำ (น้ำเย็น 25 องศาเซลเซียส เป็นน้ำร้อน 70 องศาเซลเซียส)

H คือ ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิง (ไฟฟ้า 3,600 กิโลจูล/กิโลวัตต์ชั่วโมง)

Eff คือ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (ในที่นี้ใช้ไฟฟ้าประมาณ 95%)

t คือ เวลาที่ใช้ (นาที)

$$E = \frac{16 \times 4.186 \times (70\text{-}25)}{(3,600 \times 0.95) \times \left(\frac{20}{60}\right)}$$

= 2,646 วัตต์

ดังนั้นพลังงานที่ต้องการ คือ 2,646 วัตต์ เพื่อความเหมาะสมจึงควรเลือกฮีตเตอร์ที่มีพลังงานไฟฟ้า 3,000 วัตต์

- การคำนวณหาปริมาตรถังต้ม

การหาปริมาตรของถังต้ม เมื่อมวลที่ต้องการใช้บรรจุภายในถัง 17.5 ลิตร

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

$$v = \left(\frac{(\pi d^2)}{4}\right) \times h \qquad (5)$$

โดยที่ v คือ ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางถังต้ม (28 เซนติเมตร)

h ความสูงถังต้ม (35 เซนติเมตร)

$$V = \left(\frac{(\pi 28^2)}{4}\right) \times 35$$

= = 21,551 ลูกบาศก์เซนติเมตร

= = 21.5 ลิตร

ดังนั้นถังใบนี้มีปริมาตรความจุเท่ากับ 21.5 ลิตร จึงสามารถนำมาใช้ได้

2.3 การสร้างเครื่องทำน้ำข้าวกล้องกึ่งอัตโนมัติ

- ฐานสแตนเลส

ภาพที่ 3 ฐานทำจากสแตนเลสกล่องขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร นำมาเชื่อมต่อกันเป็นโครง มีขาตั้งจำนวน 4 ขา และมีความสูง 450 มิลลิเมตร กว้าง 340 มิลลิเมตร สแตนเลสเส้นดัดให้โค้งเป็นรูปทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 285 มิลลิเมตร จากนั้นเชื่อมติดกับขาตั้งเพื่อใช้สำหรับยึดถังต้ม และปลายขานั้นออกแบบมาให้ปรับระดับความสูงได้ โดยนำน็อตมาเชื่อมติดที่ส่วนล่างของขาตั้งทั้ง 4 มุม เพื่อปรับระดับความสูง โดยนำน้อตมาเชื่อมติดที่ส่วนล่างของขาทั้ง4 มุมเพื่อปรับระดับความสูง

ภาพที่ 3 แสดงฐานสแตนเลส

- ถังต้มสแตนเลส

ภาพที่ 4 แสดงการสร้างถังต้มทำจากสแตนเลสแผ่น เกรด 304 ซึ่งมีความปลอดภัยสำหรับการทำอาหารนำมาดัดโค้งขึ้นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 280 มิลลิเมตร และมีความสูง 350 มิลลิเมตร และนำสแตนเลสเส้นมาเชื่อมติดกับตัวถังด้านนอกจำนวน 2 ชิ้น เพื่อทำเป็นหูจับยก ส่วนด้านในมีช่องเสียบตะแกรงเพื่อใช้กรองน้ำข้าวกล้องงอก ซึ่งกรองจะอยู่ในลักษณะโค้งขนานกับถังต้ม และทำการเจาะรูที่ก้นถังเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 มิลลิเมตร จากนั้นติดตั้งหัวก๊อกขนาด 16 มิลลิเมตร ตรงรูที่เจาะเพื่อใช้เปิดและปิดน้ำข้าวกล้องงอก

ภาพที่ 4 แสดงถังต้มสแตนเลส

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

- ฝาปิดถังต้ม

ภาพที่ 5 ฝาปิดถังต้ม ทำจากสแตนเลสแผ่นเกรด 304 ที่มีความหนา 2 นำมาตัดเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร และนำเหล็กแผ่นมาเชื่อมติดเพื่อเป็นตัวครอบถัง และสำหรับฝาปิดถังต้มนั้นยังต้องเจาะรูตรงกึ่งกลางขนาด 12 มิลลิเมตร สำหรับเพลามอเตอร์ และเจาะรูขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 6 รู เพื่อจับยึดมอเตอร์จำนวน 4 รู และฮีตเตอร์ จำนวน 2 รู

ภาพที่ 5 แสดงฝาปิดถังต้ม

- ตะแกรงกรองน้ำข้าวกล้องงอก

ภาพที่ 6 ใช้ตะแกรงกรองน้ำข้าวกล้องงอกเป็นตะแกรงสแตนเลสเกรด 304 ตัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 400 x 300 มิลลิเมตร จากนั้นดัดให้มีความโค้งขนานกับถังต้ม

ภาพที่ 6 แสดงตะแกรงกรองน้ำข้าวกล้องงอก

- ฝาครอบมอเตอร์

ภาพที่ 7 ฝาครอบมอเตอร์ทำจากสแตนเลสแผ่นพับเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาด 200 x 200 มิลลิเมตร เจาะรูเพื่อระบายความร้อน จำนวน 3 รู โดยเจาะรูทางด้านบนของฝาครอบมอเตอร์ เป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร และเจาะรูทางด้านซ้ายของฝาครอบมอเตอร์ เป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร เพื่อติดตั้งพัดลมระบายความร้อนของมอเตอร์ และเจาะรูทรงสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ ทางขวาของฝาครอบมอเตอร์ขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร เพื่อเป็นรูระบายความร้อนมอเตอร์ขณะทำงาน

ภาพที่ 7 แสดงฝาครอบมอเตอร์

- เสาค้ำยกฝาถังต้ม ฮีตเตอร์ และมอเตอร์

ภาพที่ 8 เสาค้ำยกฝาถังต้มทำจากสแตนเลสกล่องขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร ตัดให้มีความยาว 1,150 มิลลิเมตร แล้วนำมาเจาะรูที่ปลายด้านหนึ่งสำหรับใช้ล็อกฝาถัง ฮีตเตอร์ และมอเตอร์ ตอนใส่วัตถุดิบและตอนนำถังต้มออกมาล้างทำความสะอาดและนำมาเชื่อมติดกับฐานสแตนเลส

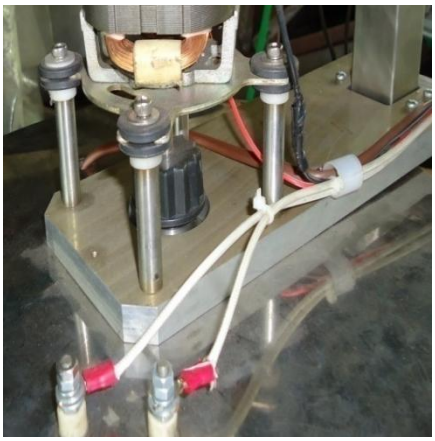
ภาพที่ 8 แสดงเสาค้ำยกฝาถัง ฮีตเตอร์ และมอเตอร์

- ตัวยึดฝาถัง และมอเตอร์กับเสาค้ำ

ภาพที่ 9 ตัวยึดฝาถังทำจากอลูมิเนียมขนาด 200 x 100 x 25 มิลลิเมตร เจาะรูขนาด 24

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

มิลลิเมตร ที่ปลายด้านหนึ่ง และอีกรูขนาด 12 มิลลิเมตร สำหรับเพลามอเตอร์ และอีก 4 รูขนาด 10 มิลลิเมตรเพื่อจับยึดตัวมอเตอร์



ภาพที่ 9 แสดงตัวยึดฝาถัง และมอเตอร์กับเสาค้ำ

- ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 700 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 10

ภาพที่ 10 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟสขนาด 700 วัตต์

- ติดตั้งเพลามอเตอร์

ภาพที่ 11 เพลามอเตอร์เราจะใช้สแตนเลสทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีความยาว 365 มิลลิเมตร จากนั้นเจาะรูที่กึ่งกลางของปลาย (ด้านใดด้านหนึ่ง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร จำนวน 1 รู สำหรับติดตั้งใบปั่น และเจาะ

ภาพที่ 11 แสดงการติดตั้งเพลามอเตอร์

- การติดตั้งใบปั่น

สำหรับภาพที่ 12 เป็นการการติดตั้งใบปั่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรอีก 2 รู เพื่อใช้สำหรับจับยึดใบปั่น ภาพที่ 12 ใบปั่นน้ำข้าวกล้องงอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร แสดงในภาพข้างล่าง

ภาพที่ 12 แสดงการติดตั้งใบปั่น

- การติดตั้งฮีตเตอร์

ภาพที่ 13 เป็นฮีตเตอร์ขนาด 3000 วัตต์ แรงดัน 220 โวลต์ ความร้อนสูงสุดที่ใช้อยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ภาพที่ 13 แสดงฮีตเตอร์ที่จะทำการติดตั้ง

- การติดตั้งตู้ควบคุมการทำงาน และพัดลมระบายความร้อนมอเตอร์

ภาพที่ 14 เป็นการติดตั้งตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องทำนั้นข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ สำหรับภาพที่ 14 ที่พัฒนาขึ้นนั้นได้ติดตั้งอุปกรณ์ไว้กับฐานของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอก หลังจากนั้นได้ทำการเดินสายไฟไปตามอุปกรณ์ต่าง ๆ และภาพที่ 15 เป็นการแสดงการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนมอเตอร์ แรงดัน 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 0.08 แอมแปร์ แสดงขั้นตอนดังภาพข้างล่างต่อไปนี้

ภาพที่ 14 แสดงการติดตั้งตู้ควบคุมการทำงาน และพัดลมระบายความร้อนมอเตอร์

- การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน

ภาพที่ 15 เป็นการติดตั้งตู้ควบคุมการทำงานและพัดลมระบายความร้อนมอเตอร์ของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

ภาพที่ 15 แสดงการติดตั้งตู้ควบคุมการทำงาน และพัดลมระบายความร้อนมอเตอร์

- เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นเมื่อเสร็จสมบูรณ์

ภาพที่ 16 เป็นเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นเมื่อเสร็จสมบูรณ์พร้อมทดลอง การทำงานของเครื่อง

ภาพที่ 16 แสดงเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นเมื่อเสร็จสมบูรณ์

2.4 ขั้นตอนการเตรียมการทดลองเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

ขั้นตอนที่ 1: เตรียมตารางบันทึกผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 2: เตรียมข้าวกล้องงอกหอมมะลิ 105 โดยปริมาณ 1.5 กิโลกรม/ครั้ง โดยการนำข้าวกล้องมาล้างทำความสะอาด แล้วนำมาแช่น้ำ ใช้เวลา 24 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3: เตรียมน้ำสะอาดปริมาณ 16 ลิตร/ครั้ง

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ขั้นตอนที่ 4: ทำการปรับตั้งค่าระบบควบคุมเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

2.5 ขั้นตอนการทดลองเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

ขั้นตอนที่ 1: ใส่วัตถุดิบลงในเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 17

ภาพที่ 17 แสดงการใส่วัตถุดิบลงในเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

ในภาพที่ 17 ขั้นตอนที่ 1: เป็นการนำข้าวกล้องงอกที่เตรียมไว้ปริมาณ 1.5 กิโลกรัม และน้ำสะอาดปริมาณ 16 ลิตร ใส่ลงในถังต้ม

ขั้นตอนที่ 2: ปิดฝาถังและหมุนสวิตช์เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 18

ภาพที่ 18 แสดงการหมุนสวิตช์เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

สำหรับภาพที่ 18 เมื่อหมุนสวิตช์เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ ฮีตเตอร์ขนาด 3,000 วัตต์จะเริ่มให้พลังงานความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ และมอเตอร์ขนาด 700 วัตต์จะหมุนใบปั่นน้ำข้าวกล้องงอกไปพร้อมๆ กัน

ขั้นตอนที่ 3: เมื่อมีสัญญาณไฟสีแดงเกิดขึ้นหมุนสวิตช์เพื่อปิดการทำงานของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 19

ภาพที่ 19 แสดงเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติทำงานอุณหภูมิถึง 70 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 19 เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ จะให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียสตามที่ได้กำหนดไว้ โดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที และทำการต้มในอุณหภูมิคงที่ ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสใช้เวลา 15 นาที จึงจะมีสัญญาณไฟสีแดงเกิดขึ้น จากนั้นทำการปิดเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติโดยหมุนสวิตช์จึงจะเสร็จขั้นตอนการต้ม ขั้นตอนที่4:นำภาชนะรองรับมารองรับน้ำข้าวกล้องงอกที่กรองแล้ว

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ภาพที่ 20 แสดงการเปิดก๊อกน้ำข้าวกล้องงอก

จากภาพที่ 20 เมื่อปิดการทำงานของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ นำภาชนะรองรับมาวางตรงก๊อกน้ำด้านล่าง และเปิดก๊อก จะได้น้ำข้าวกล้องงอกที่กรองแล้ว

ขั้นตอนที่ 5: จดบันทึกผลการทดลองลงในตาราง บันทึกผลการทดลอง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การทดลองเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิม และแบบที่พัฒนาขึ้น

สำหรับผลของการทดลองประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมจำนวน 10 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 1 เป็นการทดลองจำนวน 10 ครั้ง เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิม ใช้เวลาในการผลิตเฉลี่ย 25 นาที/ครั้ง และสามารถผลิตน้ำข้าวกล้องงอกได้ 1.4 ลิตร/ครั้ง ความแตกต่างของเวลาซึ่งอาจขึ้นอยู่กับตัวแปร เช่น สภาพอากาศ อุณหภูมิน้ำก่อนต้ม จึงทำให้ระยะเวลาในการต้มแตกต่างกันเล็กน้อย หลังจากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลโดยใช้การทดสอบสมมุติฐาน t-test โดยการการทดสอบสมมุติฐานเพื่อทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่องที่พัฒนาขึ้นจากระยะเวลารวมที่ใช้ของการต้มและปั่นเพื่อดูประสิทธิภาพของการทำงานจาก [12]

ตารางที่ 1 ผลการทดลองประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมจำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)			ปริมาณ (ลิตร)
	ต้มและปั่น	กรอง	รวม	
1	20	6	26	1.4
2	20	4	24	1.4
3	20	5	25	1.4
4	20	5	25	1.4
5	20	5	25	1.4
6	20	4	24	1.4
7	20	5	25	1.4
8	20	5	25	1.4
9	20	6	26	1.4
10	20	5	25	1.4
รวม	**200**	**50**	**250**	**14**
เฉลี่ย	**20**	**5**	**25**	**1.4**

$$t=\frac{\overline{x}-\mu}{S/\sqrt{N}},\ df=n-1 \tag{6}$$

และการทดสอบสมมุติฐานเพื่อการทดลองระยะเวลารวมที่ใช้ของการต้มและปั่นของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมกับแบบที่พัฒนาขึ้นจากสมการที่ 6-8

$$t=\frac{\overline{x_1}-\overline{x_2}}{\sqrt{sp^2\frac{1}{n1}+\frac{1}{n2}}},\ df=n_1+n_2-2 \tag{7}$$

$$sp^2=\frac{(n_1-1)sp_1{}^2+(n_2-1sp_2)^2}{n_1+n_2-2} \tag{8}$$

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ตารางที่ 2 ผลการทดลองประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบใหม่จำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)			ปริมาณ (ลิตร)
	ต้มและปั่น	กรอง	รวม	
1	35.5	6.5	42	15
2	36	4.5	40.5	15
3	36	4	40	15
4	35	5	40	15
5	35	6	41	15
6	34	4	38	15
7	35	5	40	15
8	34	5	39	15
9	35	6	41	15
10	35	4	39	15
รวม	350	50	400.50	150
เฉลี่ย	**35**	**5**	**40.05**	**15**

ในตารางที่ 2 เป็นการแสดงผลการทดลองประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติจำนวน 10 ครั้งซึ่งจากตารางที่ 2 การทดลองจำนวน 10 ครั้ง เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมีขนาดถังที่ใหญ่คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 280 มิลลิเมตรสูง 350 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการผลิตเฉลี่ย 40 นาที/ครั้ง และสามารถผลิตน้ำข้าวกล้องงอกได้ 15 ลิตร/ครั้ง สำหรับความแตกต่างของเวลาซึ่งอาจขึ้นอยู่กับตัวแปร เช่น สภาพอากาศ อุณหภูมิน้ำก่อนต้ม จึงทำให้ระยะเวลาในการต้มแตกต่างกันเล็กน้อย

- ผลการการทดสอบสมมุติฐานเพื่อทดลองประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

$H_0 : \mu = 40$
$H_0 : \mu \neq 40$ เมื่อ α = 0.05

จากการทดสอบสมมุติฐานจากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 2 และจากสมการที่ 6 ซึ่งได้ค่า t จากการคำนวณ = 0.136 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ t ที่ได้จากเปิดตาราง t เพื่อดูค่าวิกฤตได้เท่ากับ 2.262 เมื่อ $df = 10 - 1$ สรุปยอมรับ H_0 ระยะเวลารวมที่ใช้ของการต้มและปั่นของเครื่องที่พัฒนาขึ้นจากไม่มีความแตกต่างกันโดยตั้งค่าเวลามาตรฐานไว้ที่เวลา 40 นาที

- ผลการการทดสอบสมมุติฐานเพื่อทดลองอัตราการผลิต (ลิตร/นาที)

โดยการทดสอบสมมติฐานของอัตราการผลิต ของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมกับแบบที่พัฒนาขึ้นจากข้อมูลการทดลองใน

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$
$H_0 : \mu_1 \neq \mu_2$ เมื่อ α = 0.05

ตารางที่ 1 และตารางที่ 2 และจากสมการที่ 7 และ สมการที่ 8 ซึ่งได้ค่า t ค่า P(T<=t) two-tail และค่า t Critical two-tail แสดงในตารางที่ 3 ข้างล่าง

ตารางที่ 3 ผลการการทดสอบสมมุติฐานของอัตราการผลิต ของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอก

	Old	New
Mean	0.054	0.3755
Variance	5.350	0.0001
Observations	10.00	10.00
Pooled Variance	0.90	
Hypothesized Mean Difference	0.00	
df	18.00	
t Stat	92.582	
P(T<=t) two-tail	0.00	
t Critical two-tail	2.10	

จากผลการทดสอบสมมติฐานจากตารางที่ 3 สรุปได้ว่ายอมรับ H_1 อัตราการผลิต ของการต้มและปั่นของเครื่องที่พัฒนาขึ้นกับแบบเดิมมีความ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

แตกต่างกัน และเมื่อดูจากค่า t ที่มีค่ามากกว่า t Critical two-tail สถิตและจาก ค่า P(T<=t) two-tail ที่ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.05 เช่นกัน

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองกำลังการผลิต

การคำนวณกำลังการผลิตเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมกับเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นจากการทดลอง 10 ครั้ง

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณผลผลิตต่อ 1 ชั่วโมง

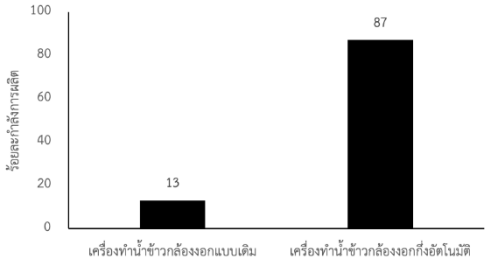
	เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิม	**เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ**
ผลผลิต	1.4 ลิตร	15 ลิตร
เวลาในการผลิต 10 ครั้ง	250 นาที (4.17 ชั่วโมง)	400 นาที (6.67 ชั่วโมง)
1 ชั่วโมง ผลิตได้	14/4.17 = 3.36 ลิตร	150/6.67 = 22.49 ลิตร

3.3 การเปรียบเทียบกำลังการผลิตเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกเป็นเปอร์เซ็นต์ สำหรับกำลังการผลิตของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณกำลังการผลิต

	เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิม	**เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ**
กำลังการผลิต	(3.36/25.85) x 100 = **13 %**	(22.49/25.85) x 100 = **87%**

การเปรียบเทียบร้อยละกำลังการผลิตของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมและเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบร้อยละกำลังการผลิตของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมและเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

จากภาพที่ 21 เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกที่พัฒนาขึ้นมีกำลังการผลิตร้อยละ 87 และเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมมีกำลังการผลิตร้อยละ 13 ซึ่งมีความแตกต่างกันร้อยละ 74

3.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วย ตารางที่ 6 การคำนวณการใช้ไฟฟ้าในการทำน้ำข้าวกล้องงอกปริมาณ 1 ลิตร

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณการใช้ไฟฟ้า

	เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิม	**เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ**
กำลังการผลิต 1 ชั่วโมง	= 3.36 ลิตร 1 ลิตร=1/3.36 = 0.298 ชั่วโมง	= 22.49 ลิตร 1 ลิตร=1/22.49 = 0.044 ชั่วโมง
จำนวนการใช้ไฟฟ้า	= (850 x 0.298)/1000 = 0.253 หน่วย	= (22.49 x 0.044)/1000 = 0.166 หน่วย

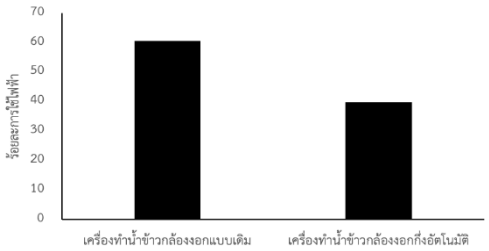
การเปรียบเทียบต้นทุนในการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 6 มาบวกกันคือ 0.253 + 0.166 = 0.419 และแสดงผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 7

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนเป็นเปอร์เซ็นต์ของการใช้ไฟฟ้า

	เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิม	**เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ**
จำนวนการใช้ไฟฟ้า	= (0.253/0.419) x 100 **= 60.38 %**	= (0.166/0.419) x 100 **= 39.62%**

การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์จำนวนการใช้ฟ้าฟ้าต่อหน่วยของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมและเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบร้อยละการใช้ไฟฟ้าฟ้าต่อหน่วยของเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมและเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติ

จากภาพที่ 22 เครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกที่พัฒนาขึ้นมีการใช้ไฟฟ้าร้อยละ 39.62 และเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมมีการใช้ไฟฟ้าร้อยละ 60.38 ซึ่งมีความแตกต่างกันร้อยละ 20.76

4. สรุปผล

บทความวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติเพื่อเพิ่มผลผลิตและประหยัดพลังงานในภาคชุมชน ผลลัพธ์พบว่าเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น สามารถใช้งานและมีคุณภาพตามเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ โดยใช้เวลาในการผลิต **40** นาทีต่อน้ำข้าวกล้องงอก 15 ลิตร ซึ่งมีกำลังการผลิตต่อชั่วโมงมากกว่าเครื่องทำน้ำข้าวกล้องงอกแบบเดิมร้อยละ 74 และลดต้นทุนการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยร้อยละ 20.76

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พิษณุ ทองขาว ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

6.เอกสารอ้างอิง

[1] แสงมณี เกิดพงษ์. การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำข้าวกล้องงอกจากข้าวหอมแม่พญาทองดำผสมน้ำนมถั่วเหลือง. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. จันทบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี; 2565.

[2] Ren C, Hong B, Zheng X, et al. Improvement of germinated brown rice quality with autoclaving treatment. Food Science & Nutrition. 2020; 8(3): 1709–1717.

[3] Kim H, Kim OW, Ahn JH, et al. Metabolomic Analysis of Germinated Brown Rice at Different Germination Stages. Foods. 2020; 9(8): 1-10.

[4] Parnsakhorn S, Langkapin J. Effects of drying temperatures on physicochemical properties of germinated brown rice. Songklanakarin Journal of Science and Technology. 2018; 40 (1): 127-134.

[5] Patil SB, Khan MK. Germinated brown rice as a value added rice product: A review. Journal of Food Science and Technology. 2011; 48(6): 661-667.

[6] Tachasirinukun P. The Development of Germinated Brown Rice Milk Fortified

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

with Soybean. Vocational Education Central Region Journal. 2017; 1(2): 66-71.

[7] Banchuen J. Bio-active Compounds in Germinated Brown Rice and Its Application. [dissertation]. Songkhla: Songkla University; 2010.

[8] Bolarinwa IF, Lim PT, Muhammad K. Quality of gluten-free cookies from germinated brown rice flour. Food Research. 2019; 3(3): 199-207.

[9] เจนจิรา จรรยา. การออกแบบและพัฒนาเครื่องแช่และเพาะงอกข้าวเปลือก. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาสารคาม. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2562.

[10] เจนจิรา จรรยา, เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา, จักรมาส เลาหวณิช, และคณะ. การออกแบบและพัฒนาเครื่องแช่และเพาะงอกข้าวเปลือกในขั้นตอนเดียว. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2020; 26(1): 44-51.

[11] Chungcharoen T, Sansiribhanb S, Munsin R, et al. Influence of Germinated Brown Rice Production by Water Spraying Method on Its Qualities. Current Applied Science and Technology. 2023; 23(3): 1-11.

[12] Douglas C.Montgomery,Design and analysis of experiments.Hoboken, N.J.:John Wiley & Sons, 2005.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ใดมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้

1.3 บทความวิชาการต้องมีความยาวประมาณ 12-20 หน้า ในรูปแบบ 1 คอลัมน์
บทความวิจัย ต้องมีความยาวประมาณ 10-15 หน้า ในรูปแบบ 1 คอลัมน์

1.4 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณากลั่นกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่าน รูปแบบ Online
โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk เริ่มจากการกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งบทความเข้ามายัง https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk เพื่อดำเนินการในส่วนอื่นต่อไป

2. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารมี 2 ประเภท คือ

2.1 บทความวิจัย (Research Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะและรูปแบบการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น ตั้งสมมติฐาน โดยระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ได้ค้นคว้าทดลองอย่างมีระบบ และสรุปผลการวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 บทความวิชาการ (Academic Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะเชิงวิเคราะห์หรือวิจารณ์ จากการทบทวนเอกสาร จากประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้เขียน และเสนอแนวคิดใหม่บนพื้นฐานวิชาการ อันก่อเกิดองค์ความรู้หรือสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

3.1 ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 1.0 นิ้ว หรือ 2.5 ซม.
ขอบล่าง (Bottom Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.
ขอบขวา (Right Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.
ขอบซ้าย (Left Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

3.2 กระดาษ

ขนาด A4 ขนาด 8.3 x 11.7 นิ้ว หรือ 21 X 29.7 ซม.

3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK
บทความภาษาอังกฤษ ใช้ TH SarabunPSK

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 20 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กะทัดรัด ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 20 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.6 สถานที่ทำงาน เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 18 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 18 ตัวหนา

3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

3.9 เนื้อความทั้งหมด (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.3 นิ้ว หรือ 0.7 ซม.)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวปกติ

3.10 ชื่อหัวเรื่องใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารอ้างอิง/Reference (ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

4.1 บทความวิจัย

A. ส่วนปก

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกะทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียนประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้
3. **ตัวเลขยก** ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน
4. **บทคัดย่อ (ABSTRACT)** ควรจัดทำเป็นร้อยแก้วย่อหน้าเดียว สั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัยและการอภิปรายผล เป็นต้น ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ
5. **คำสำคัญ (keywords)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นคำสำคัญที่สามารถใช้ในการสืบค้น ในระบบฐานข้อมูล

หมายเหตุ : เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

B. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (INTRODUCTION)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)/วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน บทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ควรอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการที่ใช้ในการวิจัย
3. **ผลการวิจัยและอภิปรายผล/ ผลการทดลองและอภิปรายผล (RESULT AND DISCUSSION)** เสนอผลการทดลอง อย่างชัดเจน และตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ/หรือตารางประกอบ การอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ
   เป็นการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรอ้างอิงทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต
   <u>รูปภาพ/กราฟ</u> ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจน เหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับ และในกรณีที่เป็นรูปลายเส้นให้วาดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลขรูปภาพ/กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ
   <u>ตาราง</u> ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านบนของตาราง
4. **บทสรุป (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่มีก็ได้)
6. **เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่อ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหาก่อนเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วย และคณะหรือ et al.
7. **การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)** การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver 2011.pdf

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

หนังสือหรือตำรา

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อหนังสือ(Title of the book)./ครั้งที่พิมพ์(Edition)./เมืองที่พิมพ์(Place of Publication):สำนักพิมพ์(Publisher);ปี(Year).

- Janeway CA, Travers P, Walport M, Shlomchik M. Immunobiology. 5th ed. New York: Garland Publishing; 2001.
- รังสรรค์ ปัญญาธัญญะ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อบทความ(Title of the article)./ชื่อวารสาร(Title pf the Journal)./ปีที่พิมพ์(Year);เล่มที่ของวารสาร(Volume):หน้า(Pages).

- ชนิตรา ดำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิบุญ ตั้งวโรดมนุกูล และคณะ.การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทาง เคมีของรอยเชื่อมเหล็กรางรถไฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2561;12(1):119-31.
- White AR, Treenate D, Kiatgungwalgrai A, et al. The effects of accent familiarity on English as a foreign language students' word recognition and comprehension of the English language. UTK Res J. 2559;10(2):21-30.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อบทความ (Title of the article) [ประเภทของสื่อ/วัสดุ]./สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีพิมพ์ (Year) [เข้าถึงเมื่อ/cited ปี เดือน วันที่]./จาก (Available from): http://.....

- Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet]. Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9]. Available from: https: / / www. nap. edu/ catalog/ 10149/ improving- palliative - care- for- cancer.
- “กำเนิด” ระบบหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า มิติใหม่แห่งการบริการด้านสาธารณสุขเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของคนไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สปสช.; 2552. [เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2554]. จาก: www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf

การอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้เขียน./ชื่อเรื่อง./ใน(In):/ชื่อบรรณาธิการ,/บรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ./ชื่อการประชุม;/วัน เดือน ปีที่ประชุม;/สถานที่จัดประชุม./สถานที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์;/ปีที่พิมพ์./น./เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายของบทที่อ้าง.

- ธีระ ฤชุตระกูล. Coagulopathy in liver diseases. ใน: ปิยะวัฒน์ โกมลมิศร์, ทวีศักดิ์ แทนวันดี, อนุชิต จูฑะพุทธิ, บรรณาธิการ. Vascular diseases of the liver. การประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 4 Vascular diseases of the liver; วันที่ 12-14 มีนาคม 2552; เพชรบุรี.กรุงเทพฯ: สมาคมโรคตับ (ประเทศไทย); 2552. น.1-13.

4.2 บทความวิชาการ

A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

B. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (INTRODUCTION)** เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. **วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (METHOD)** (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (RESULT AND DISCUSSION)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. **สรุป (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. **เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** ใช้ตามที่วารสารกำหนด

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)

ประจำปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม- ธันวาคม 2567

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ศรีชาติ	รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย แพงาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระวัฒน์ จันทรังษี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ จำรูญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาพรรณ เกษราพงศ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดิฐภัทร ตันประดิฐ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤช สินธนะกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริพร อั้งโสภา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ แพทย์หญิง วันวิสาข์ หิมะคุณ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุดกรอง พันธุ์อุโมงค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภา ทัพเชียงใหม่	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภา ตั้งเตรียมจิตมั่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยา หนูสาย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ ทองขาว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภัทร เตชาภิรมณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เผ่าชู	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทช์ ฉลองรัตนสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช แสงสีดำ	ดร.ธรรมวิชช์ ประเสริฐ
ดร.กิติยา สุเหม	ดร.ชัยวัฒน์ พรหมเพชร
ดร.กฤษฎา เหล็กดี	ดร.สิริพร แช่มสนิท

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ❒ บทความวิจัย ❒ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย).....

.....

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1. .....
2. .....
3. .....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1. .....
2. .....
3. .....

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก.....หมู่ที่.....ซอย.....

ถนน..... ตำบล/แขวง.....อำเภอ/เขต..... จังหวัด.....

รหัสไปรษณีย์..... E-mail.....โทรศัพท์.....

โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ❒ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

❒ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาลงตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็นการซ้ำซ้อน การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจในนโยบายการรับบทความของวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง .....
.....

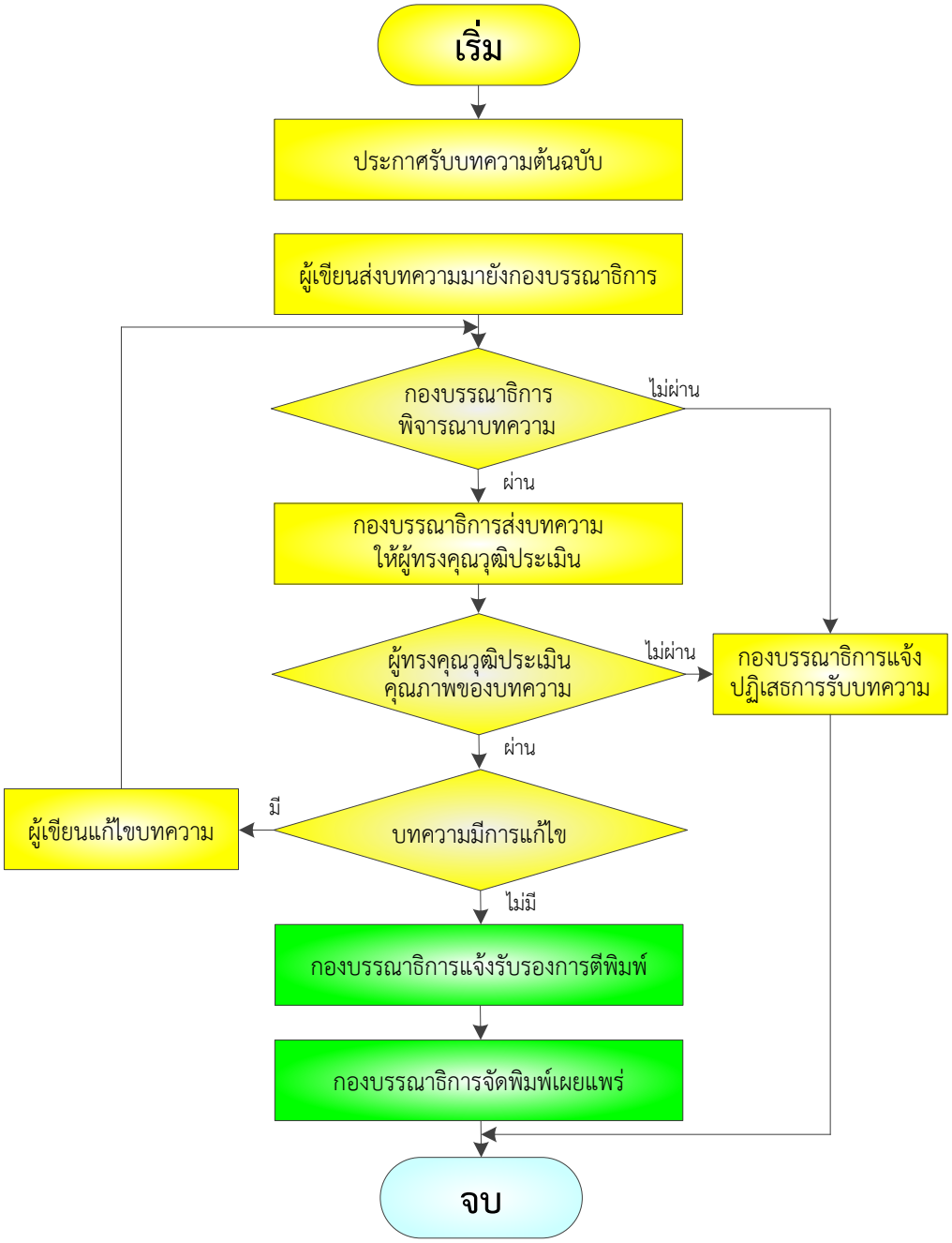
โดย .....
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน จาก 3 มหาวิทยาลัย
และตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
ปีที่..... ฉบับที่ ..... (..... - ..... พ.ศ. .....)

(.....)
บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ



วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

UTK RESEARCH JOURNAL

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0 2286 9600 ต่อ 3115