

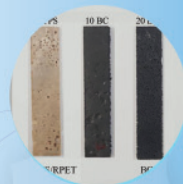


วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2563



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

RMUTI JOURNAL Science and Technology

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน เน้นบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิชาดังต่อไปนี้

1. สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาวิชาเกษตรศาสตร์
3. สาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เป็นสาขาที่ศึกษาแนวความคิด ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ตั้งแต่ระดับอนุภาค ระดับโมเลกุลไปจนถึงทั้งจักรวาล ปฏิกริยาทางเคมี ระหว่างอะตอมและโมเลกุล อันเชื่อมโยงถึงองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต และวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต รวมถึงแนวความคิดพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีความสำคัญและมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน ตลอดจนศึกษาถึงประเด็นของการกลไกที่สำคัญๆ เกี่ยวกับพรมแดนแห่งความรู้ ระหว่างวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับสังคม และสิ่งแวดล้อม

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0-4423-3063 โทรสาร 0-4423-3064

E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป

ยกเลิกการตีพิมพ์รูปเล่มตั้งแต่ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2562 เป็นต้นไป

เผยแพร่ออนไลน์เท่านั้น

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ วารสาร มทร.อีสาน และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมิใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี RMUTI JOURNAL Science and Technology

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวัตร หาสูข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณอรรถ	เปรมปรีดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมนะเศวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยัมมณี	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประมพท์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมมากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกัญญา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณธนฤทธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนก	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดาทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธารีนุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤดาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา
รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์
รองศาสตราจารย์ กาญจน
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติสุดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา
ดร.จารุพงษ์
ดร.ชาคริต
ดร.เยาวพา
ดร.สุกัญญา
ดร.เดือนเพ็ญ

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
กอเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
สิงห์บุญชัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดุยจินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ไชยะ	94/7 หมู่บ้านนาแลนด์ ซอย 5 ถนนสุวินทวงศ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000
แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อัสวสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ตันสุวรรณรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อุ้นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์

วงศ์ไตรรัตน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาวอรุณรักษ์

ศิราชมัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

บทความวิจัย

Hydrogen Production from Aluminium-Water Reactions: Thermodynamic Properties Analysis 1

Benya Kasantikul and Wijitra Poomsawat

Properties of Chiang Khrua Lateritic Soil and Their Applications in Civil Engineering 14

Nutthachai Prongmanee and Amorndech Noulmanee

Preparation of Biocomposite from Recycled PET Bottles and Starch Reinforced with Biochar from Durian Peels 31

Voravadee Suchaiya and Katsirin Sangmanee

Characterization of Biochar Derived from Durian Shells by Pyrolysis Process 44

Sutatip Thonglem and Pratthana Intawin

การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวา 57

ธันวาคมส กาศสนุก และคงเดช ทะลีนาม

ระบบจัดการครุภัณฑ์บนพื้นฐานของ NFC 69

จันทนา ปัญญาวรรณ, ธนาพล เดชาพิบูลย์, มยุลี เอี่ยมเพ็ชร และสุรเชษฐ์ รักษ์

การศึกษาคุณสมบัติผลิตภัณฑ์โจักข้าวหอมมะลินทรีย์กิ่งสำเร็จรูป 88

สุมาลี มลิกา, ชมกฤษ ม้องลา, จิรายุส วรรัตนโกศา, พิมพ์ สร้อยสูงเนิน, วรพงษ์ บัวเงิน

อาทิตย์ อัครสุชี, เพลงพิน เพียรภูมิพงศ์ และคุณธิ์ เทียมเทศ บุญมาสูงทรง

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลบุคลากรสายวิชาการเพื่อบริหารการเรียนการสอน 106

ด้วยการปรับวิธีแบ่งกลุ่มแบบเคมินร่วมกับกฎความสัมพันธ์

พฤตพงศ์ เพ็งศิริ

การเปรียบเทียบอัลกอริทึมการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลบนเว็บแอปพลิเคชัน 120

เศกสิทธิ์ พจมาร และจารี ทองคำ

เทคนิคการคัดเลือกกลุ่มโพลีไตรอะอากาสำหรับรองรับแผนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า 134

พลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อเพิ่มค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า

ธงชัย คล้ายคลึง, วุฒิชัย สว่างาม, กิตติวงศ์ สุธรรมโน และพันธ์พงศ์ อภิชาติกุล

บทความวิชาการ

A Drought Senescence NAC Gene, *OMTN4*, Confers Seed Development Defects in Rice 150

Sittipun Sinumporn

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ 162

ปิยะวดี ศรีวิชัย และชุมพพร รณสีดา

Table of Contents

Research Articles

Hydrogen Production from Aluminium-Water Reactions: Thermodynamic Properties Analysis	1
--	----------

Benya Kasantikul and Wijitra Poomsawat

Properties of Chiang Khruea Lateritic Soil and Their Applications in Civil Engineering	14
---	-----------

Nutthachai Prongmanee and Amorndech Noulmanee

Preparation of Biocomposite from Recycled PET Bottles and Starch Reinforced with Biochar from Durian Peels	31
---	-----------

Voravadee Suchaiya and Katsirin Sangmanee

Characterization of Biochar Derived from Durian Shells by Pyrolysis Process	44
--	-----------

Sutatip Thonglem and Pratthana Intawin

Design and Construction of Water Hyacinth Chopper	57
--	-----------

Thanwamas Kassanuk and Khongdet Phasinam

NFC-Based Asset Management System	69
--	-----------

Jantana Panyavaraporn, Thanaphon Dechapiboon, Mayulee Eiampech and Surachet Ruksee

Study of Instant Organic Jasmine Rice Porridge Properties	88
--	-----------

Sumalee Musika, Chompoonuch Khongla, Jirayus Woraratphoka, Phimpha Soisungnoen,

Worapong Buangern, Artit Ausavasukhi, Plengpin Pienpoompong, and

Dusadee Teimtes Boonmasungsong

Analysis of Relationship of Academic Personnel Data for Management Teaching with Method Adjustment of K-Means Combined with Association Rules	106
--	------------

Prudtipong Pengsiri

A Comparison of Lossless Data Compression Algorithms on Web Applications	120
---	------------

Seksit Podchaman and Jaree Thongkam

Load Clustering Technique Application to PV Solar Rooftop Installation Planning for Improving Energy Efficiency Index	134
--	------------

Thongchai Klayklueng, Wutthichai Sa-nga-ngam, Kittiwong Suthamno, and Phangphong Aphicatkul

Academic Articles

A Drought Senescence NAC Gene, <i>OMTN4</i>, Confers Seed Development Defects in Rice	150
--	------------

Sittipun Sinumporn

Factors Affecting Anaerobic Digestion Efficiency to Produce Biogas	162
---	------------

Piyavadee Srivichai and Chumaporn Rodsrida

Hydrogen Production from Aluminium-Water Reactions: Thermodynamic Properties Analysis

Benya Kasantikul¹ and Wijitra Poomsawat^{1*}

Received: November 4, 2019; Revised: April 14, 2020; Accepted: April 29, 2020

Abstract

Hydrogen production from low price materials at moderated temperature should be developed for sustainable commercial production. The aluminium and water reaction at low temperature is very attractive because it can generate hydrogen without a reactor operating at high temperature and pressure required. The hydrogen production process by hydrolysis reactions of aluminium with NaOH in different types of water was studied. It was aimed at better understanding on how the Cl ions in different types of water affect the hydrolysis at the different reactions for the hydrogen production. It was observed that the ionic strength of the solutions strongly increased with the Cl ions and aluminium mass added. However, simultaneous effect resulted in the coefficient of lower hydroxide ions (OH⁻) activities. The activities of the hydroxide ions at the employed conditions of the reactions were calculated using Aspen PlusTM. NaOH additives dissolved in water, produced hydroxyl ions and consequently promoted the hydrolysis reactions between aluminium and water. The maximum hydrogen generated was 583 ml as obtained from the reaction of 1 g aluminium in 30 ml distilled water for 30 min.

Keywords: Hydrogen; Chloride Ions; Aluminum

¹ Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakornpathom

* Corresponding Author E - mail Address: fengwth@ku.ac.th

Introduction

With the reduction of global crude stockpiles and the results from global warming, current research has developed new alternative fuels to replace crude oil. Hydrogen is a source of pollution-free energy. It is an alternative of sustainable energy that can be applied to the traditional energy use. Most of the hydrogen productions are, nowadays, done via hydrocarbon steam reforming where methane from natural gas is heated with steam to produce a mixture of carbon monoxide and hydrogen. As a result, the methane reforming process results in carbon dioxide emissions. Therefore, the development of hydrogen processes from non-raw materials at moderated temperature should be developed for the sustainable commercial production. The hydrolysis of aluminium and water at low temperature reaction is very attractive because it can generate hydrogen without a reactor operating at high temperature and pressure required [1]. Typically, studies of the aluminium water reaction in experimental systems have been conducted under atmospheric pressure and at the temperature below the boiling point of water [1]. Aluminium and its alloys are considered as suitable metals for the hydrogen production in the future and are likely to be used as alternative energy sources, especially in form of materials. Aluminium is also a superior material for the future hydrogen production [2] since it is abundant in earth with low density, low price and high capacity and excellent reactivity to water. Accordingly, metal utilization has been identified as an effective, easy, and safe way for the hydrogen production and energy storage.

Several studies on the hydrolysis reaction in neutral water as medium for the hydrogen production from aluminium showed that water quality affected the hydrogen production through the hydrolysis reactions of aluminium powder in water at ambient temperature [3] - [4]. Elitzur, S., Rosenband, V., and Gany, A. [5] studied on the production and storage of hydrogen from aluminium and water reactions to investigate the effects of aluminium on water and hydrogen. The variables used in the experiment were mass ratio of water to aluminium, water temperature and particle size of aluminium. The aluminium used was that with lithium (2.5 wt%) to catalyze the reaction. The results of the experiment were that the lower of water-to-aluminium ratio, the faster the reaction; that from the water temperature was the higher of water temperature; the shorter of the reaction and that from the particle size was the bigger of the particle size; the shorter of the reaction. Rosenband, V. and Gany, A. [6] developed an application of activated aluminium powder for the generation of hydrogen from water to compare the metal alloys that react to water to give a high hydrogen production rate. The experiment was performed under constant and varied temperature conditions. They also experimented with aluminium alloys with other metals such as sodium hydroxide, cobalt oxide and molybdenum oxide, etc., and

the results showed that the aluminium mixed with lithium gave a greater amount of hydrogen than that with other metals. Macanás, J., Soler, L., Candela, A. M., Muñoz, M., and Casado, J. [7] examined the hydrogen production from aluminium corrosion using diverse alkaline solutions. The results confirmed that hydrogen production in water was enhanced by aluminium corrosion. Aluminium corrosion greatly depended on the nature of the dissolved species and pH of the solution.

Thus, better understanding on how the Cl ions affect the hydrolysis reaction at the different types of water reactions for the hydrogen production is required. The objective of this study is to investigate the characteristics of the interaction between water and aluminium powder in different types of water containing different chloride ions. In order to achieve this objective, as follows are to be observed: First, the hydrogen production from aluminium without NaOH in hydrolysis reaction medium for different types of water including pure water, tap water and sea water and the three different ions conditions containing no Cl ion, Cl ions in the tap water and the sea water (containing Cl ions and Na ions) which are considered as similar mass ratios of water to aluminium powder. Next, in order to verify if the observed trends are specifically for the Cl ion effects or not, the experiments are conducted with varied amounts of aluminium powder and NaOH at similar Cl ion condition and aluminium/water mass ratio that are 30, 50, and 100 mL. For all these reactions, the experiments have to be determined at room temperature and atmospheric pressure with the reaction time of 30 min.

Materials and Methods

1. Materials

Tap water with pH = 6.3 - 7.5 and distilled water with pH = 6.5 - 7 were used in this study. Moreover, the sea water collected from Hua Hin beach in Prachuap Khiri Khan province (Thailand) in March 2016, Metallic aluminium powders (Gammaco (Thailand) Co., Ltd) with 99.7% purity and each particle of 45 μm , and NaOH pellets (Gammaco (Thailand) Co., Ltd) with 98.0% purity were also used for all the experiments.

2. Methods

The hydrolysis reactions of aluminium powder with different chloride ion concentrations in the tap water, the distilled water and the sea water were carried out. Batch-type experiments were performed in a glass reactor, see also Figure 1. Each mass of all the individual aluminium in gram was 0.19, 0.38, 0.57, 0.76, and 0.95 in all experiments, respectively. Moreover, 0.1 g of NaOH was added as the promoter. An overview of all the experiments is presented in Table 1. First, different masses of aluminium powder with

0.1 g of NaOH were placed in the reactor, followed by adding amounts of the tap water, the distilled water and sea water of 30, 50, and 100 mL for each experiment respectively and mixed. Then the hydrolysis reaction was started. The hydrogen was produced by the aluminium and water hydrolysis reactions and discharged water from a second glass cylinder into a beaker was placed on an electronic balance as presented in Figure 1. Due to the fact that hydrogen has low solubility in water, the volume of hydrogen evolved in the aluminium and water reactions could be measured by the displaced masses of water. For all these reactions, the experiments were determined at room temperature and atmospheric pressure with the reaction time of 30 min as described in previous section.

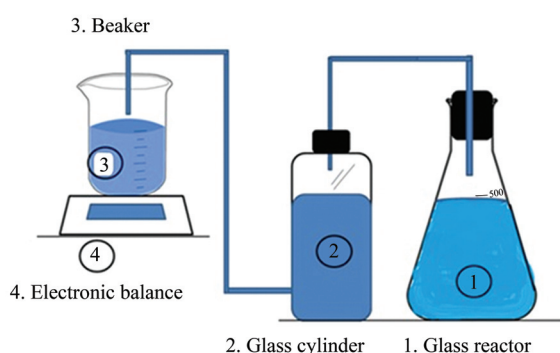


Figure 1 Schematic of the experimental set-up for the hydrogen production from the hydrolysis reactions of Aluminium based compositions (adopted from [6])

Results and Discussion

1. The electrical conductivity and ionic strength

The major ions for the sea water and the tap water are defined as those ions that have a significant contribution in tap water that is Cl and Na with Cl in sea water, respectively. The concentrations of these major ions for these two hydrolysis solutions were measured by ICP-OES which are presented in Table 1. The results show that the total amounts of major ions were significantly higher in the sea water. Next, electrical conductivity (EC) was measured. These values can be used as indicators for the conduction of current of total dissolved solids in the hydrolysis solutions which are primarily dependent on the concentrations of ionic species. An electrical conductivity meter (EC meter) was used to measure the electrical conductivity in these three solutions. The results showed that Na and Cl ions in the sea water significantly contributed to the electrical conductivity (Table 1).

Due to the fact that total electrolyte concentration in solution affects the dissociation constant of different ions as observed in previous studies [8]. The ionic strengths (I)

of the three hydrolysis conditions were therefore calculated following the equation (1):

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i z_i^2, \quad (1)$$

where n is the number of ions, m is the molality (mol/kg) of the ion i and z is the charge (-) of ion i

The calculated values are presented in Table 1. It is observed that the ionic strengths of the sea water that are significantly higher than those of the tap water and distilled water.

Table 1 Ionic strength (I) and electrical conductivity in deionized water, tap water and sea water

Water Types	I (mol/kg)	Electrical Conductivity (mS/cm)	Ions (g/kg)	
			Cl ⁻	Na ⁺
Distilled water	-	0.3	-	-
Tap water	0.005	2.4	0.35	-
Sea water	0.571	42.9	19.6	12.71

2. Chloride ion on hydrogen production

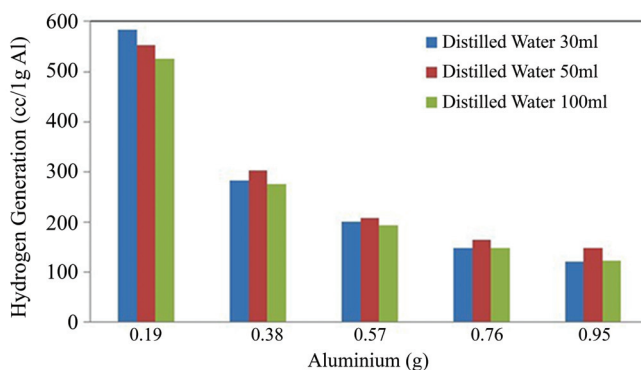
Based on the data obtained in Figure 2 and Table 2, the reaction using the distilled water with additional of NaOH to aluminium powder at room temperature shows the maximum hydrogen production and therefore results in the maximum hydrogen production yield (hydrogen production per 1 g aluminium).

Again, the maximum amount of hydrogen generated in the distilled water is the highest among others. Using the tap water as a hydrolysis reaction medium produces slightly lower amount as compared to that using the distilled water. These observed trend results are in line with those previously reported [9] - [10]. They are probably due to the fact that there is no chloride ion content in the distilled water whereas chloride ions are present in the tap water and the sea water. Fontana and Staehle reported that the chlorination process to treat the tap water for the control of microbes, its taste and odor will cause significant loss in aluminium and the formation of aluminium chloride [11] which indirectly slows down the hydrolysis reaction [9]. Therefore, the hydrogen production using the tap water and the sea water as reaction media is found to be the minimum.

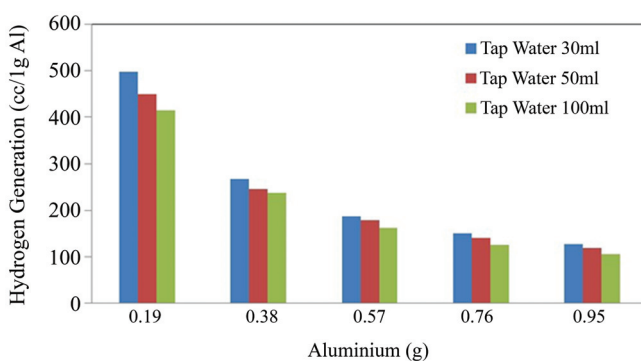
Chloride ions show significant decreased in the hydrogen production by the hydrolyses of aluminium- based compositions. Two possible explanations are that the reduced activity of water at higher ions concentrations of the sea water decreased the available free water needed for the aluminium hydrolyses and that, as a result, the higher Cl ions concentrations would inhibit the hydrogen liberation.

Table 2 Hydrogen production from aluminium based composition at different types of water conditions

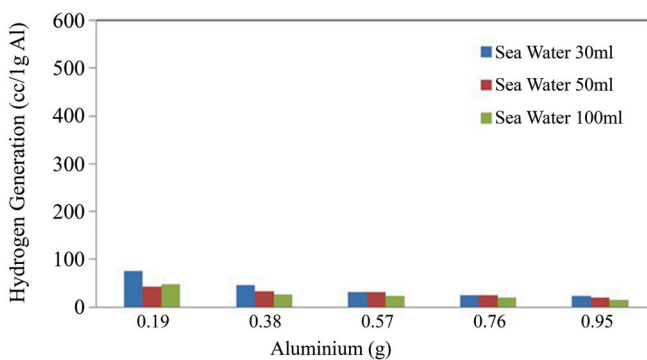
Al (g)	NaOH (g)	Water (mL)	I (mol/L)		Hydrogen Production (mL)			
			Distilled Water	Tap Water	Seawater	Distilled Water	Tap Water	Seawater
0.19	0	30	1.06	1.07	1.67	0	0	0
0.38	0	30	2.14	2.15	2.79	0	0	0
0.57	0	30	3.23	3.24	3.92	0	0	0
0.76	0	30	4.34	4.34	5.07	0	0	0
0.95	0	30	5.45	5.46	6.23	0	0	0
0.19	0.1	30	1.17	1.18	1.72	107.50±1.5	94.50±1.5	14.25±0.8
0.38	0.1	30	2.30	2.31	2.84	110.83±0.8	101.50±0.5	17.50±0.3
0.57	0.1	30	3.36	3.40	3.98	112.83±1.5	106.83±3.5	18.00±1.1
0.76	0.1	30	4.56	4.57	5.12	114.17±1.7	114.50±1.5	19.00±0.0
0.95	0.1	30	5.69	5.70	6.29	115.50±1.2	120.50±1.7	22.50±0.2
0.19	0.1	50	0.68	0.69	1.26	105.00±0.6	85.50±1.2	8.25±0.1
0.38	0.1	50	1.35	1.35	1.92	114.83±1.3	93.00±0.7	12.75±0.2
0.57	0.1	50	2.02	2.02	2.60	118.67±2.0	101.67±0.3	17.50±0.2
0.76	0.1	50	2.69	2.70	3.27	124.83±1.2	106.83±1.2	19.00±1.0
0.95	0.1	50	3.37	3.38	3.95	141.50±2.1	112.83±1.4	19.50±0.5
0.19	0.1	100	0.34	0.35	0.91	99.83±1.2	78.67±1.5	9.00±0.0
0.38	0.1	100	0.67	0.68	1.24	104.67±1.2	90.17±1.2	10.25±0.7
0.57	0.1	100	1.00	1.01	1.58	110.83±2.1	92.50±1.2	13.25±0.8
0.76	0.1	100	1.33	1.34	1.91	112.50±1.1	95.83±0.8	14.75±1.2
0.95	0.1	100	1.67	1.67	2.24	116.33±2.5	101.17±1.1	14.50±0.5



(a) Distilled Water



(b) Tap Water



(c) Sea Water

Figure 2 Effects of mass ratios of water to aluminium with 0.1 g NaOH on hydrogen generation from aluminium-based composition at different conditions

It is clear that aluminium exhibits the highest reactivity in the distilled water. However, the mass ratios of water to aluminium showed minor effects on the hydrogen production. The results show that the hydrogen generated in the distilled water, the tap water and the sea water at the difference amounts exhibited similar results. The maximum hydrogen generated is 583 ml as obtained from the reaction of 1-g aluminium in the 30-ml distilled water after reaction for 30 min. It is confirmed that the water quality significantly affects the hydrogen production from aluminium hydrolysis reaction.

In addition, the experimental results show that at the higher amount of aluminium to water, the hydrogen production increased. This is because of the very low ratio of water to aluminium where most of the water molecules are adsorbed and thus no molecules remain to assist the water dissociation and too much water led to surface saturation without any space for hydrogen to form the cluster [12].

3. Thermodynamic properties: Hydroxide ions activity

The coefficients of the hydroxide ions activity at the employed reaction conditions have been calculated using the electrolyte Non-Random Two-Liquid (eNRTL) model in the Aspen PlusTM software which was used to analyze the activity coefficients of electrolyte a mixed solvent [13] - [14]. Chen, C.-C., Britt, H. I., Boston, J. I., and Evans, L. B. was originally proposed the Electrolyte NRTL model for aqueous electrolyte systems [15]. It was later extended to mixed solvent electrolyte systems. The expression for the activity coefficient can be derived for the local interactions as including the Pitzer-Debye-Hückel and the Born equation for the excess Gibbs energy. The Pitzer-Debye-Hückel formula is used to represent the long-range interaction contribution. The Born equation is used to account for the Gibbs energy of transfer of ionic species from the infinite dilution state in a mixed-solvent to the infinite dilution state in aqueous phase [16].

The results show that Cl ions in tap water and Na with Cl ions in the sea water significantly contributed to the ionic strength and decrease the coefficients of the hydroxide ions activity as presented in Figure 3. As results shown in the Figure 3, it shows the decreasing of ionic strength when increasing of the coefficients of the hydroxide ions activity as an exponential relationship. This means that, by introducing ions in the reaction mixtures, the hydroxide activity coefficients of the mixed solvent are significantly decreased and are also presents in Figure 3. Thus, the hydroxide ions activity is mainly influenced by the presence of the individual ions.

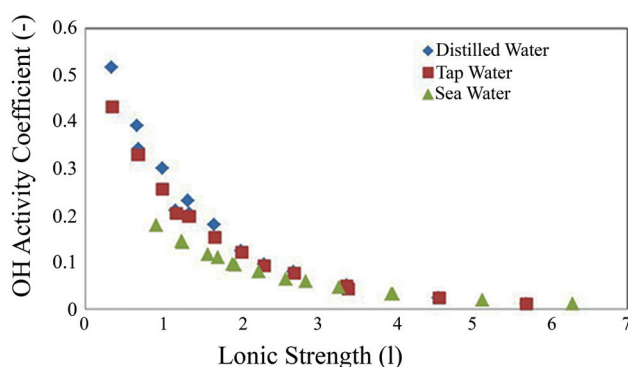
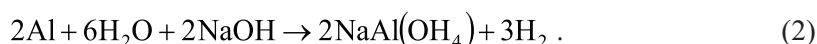


Figure 3 Effects of ions on the coefficients of the hydroxide ions activity

4. Hydrogen conversion efficiency

The coefficients of the hydroxide ions activity at the employed reaction conditions have been calculated using the electrolyte Non-Random Two-Liquid (eNRTL) model in the Aspen Plus™ software which is used to analyze the activity coefficients of electrolyte a mixed solvent [13] - [14]. Basically, the aluminium hydrolysis reaction related to the hydrogen yields can be expressed as follows equation (2):



The hydrogen conversion efficiency of aluminium based composition was calculated as follows equation (3):

$$E = \frac{Y}{(w/mw) \times 1.5 \times 24.45} \times 100, \quad (3)$$

where E is the conversion efficiency of hydrolysis reaction (%); Y is the actual hydrogen yields (unit-L); w is the mass fraction of aluminium in composites (%wt); mw is the molecular weight of aluminium (26.982 g/mol) and 24.45 (unit-L) is the standard volume of 1 mol hydrogen gas at 25 °C and 1 atm.

The results of the coefficients of the hydroxide ions activity on hydrogen conversion efficiency are presented in Figure 4. It is observed that the ionic strength of the solutions strongly increases along with the Cl ions and aluminium mass added, as expected. However, the results also show that the increase in the ionic strength simultaneously effects results in the coefficients of the lower hydroxide ions (OH^-) activity (Figure 3). This is probably because the increase ionic strength results in the decrease coefficients of the ion activity (only the hydroxyl ions activity coefficient is shown). As a result, the activity of the hydroxyl

ions is lower and, therefore, decreases the catalytic effect of the NaOH. These corresponding results are according to the literature [6], [17] - [18] as evidenced that it is able to produce hydrogen gas from aluminium corrosion reaction with regeneration of hydroxyl ions.

In general, the hydrogen production efficiency is higher when the higher concentration of NaOH is employed. The hydroxyl ions seem acting as the catalyst for the hydrolysis of aluminium and promoting the hydrogen generation [19] as presented in Figure 4. This is probably because at higher NaOH concentration, there are more hydroxide ions in the solutions to dissolve the alumina film [20] - [21]. Therefore, the hydroxide ions reduce the protective oxide layer on the aluminium surface in an alkaline solutions. As the results, aluminium are readily dissolved in the alkaline solutions even at room temperature [22]. Thus, more NaOH additives in aluminium mixture will lead to the formation of higher amount of hydroxyl ions, consequently promote more hydrogen production (Table 2). These results are in line with the literature [23]

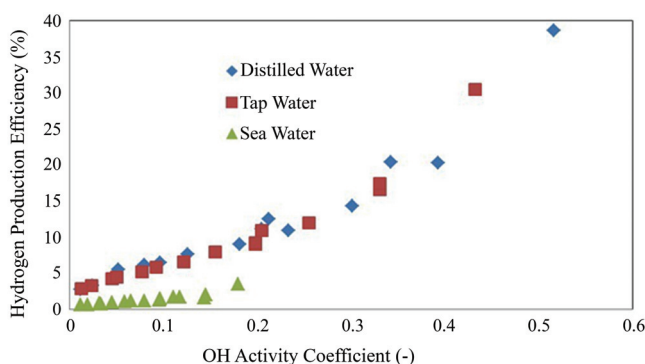


Figure 4 Effects of the coefficients of the hydroxide ions activity on hydrogen conversion efficiency

Conclusion

The hydrogen production process by hydrolysis reactions of aluminium with NaOH in different reaction was studied. Effects of the different Cl ions on the hydrogen production in different types of water were analyzed. It was expected to obtain the more understanding regarding how the Cl ions in different types of water affect the hydrolysis reaction at the different reactions for hydrogen production. The hydroxide ions activity at the employed reaction condition was calculated using the electrolyte Non-Random Two- Liquid (eNRTL) model in the Aspen PlusTM. It was observed that the ionic strength of the solutions strongly increase with the Cl ions and aluminium mass added. However, the simultaneous effect

results in the coefficients of the lower hydroxide ions (OH⁻) activity. This study demonstrates that the Cl ions in different types of water reduce the hydroxide ions (OH⁻) activity. However, the hydroxide ions enhance the production of hydrogen from the aluminium powder in water at room temperature. NaOH additives dissolves in water and produces hydroxyl ions and consequently promotes the hydrolysis reaction of aluminium and water. The efficiency of the hydrogen production is higher when the higher hydroxide ion is employed.

References

- [1] Yavor, Y., Goroshin, S., Berghthorson, J. M., Frost, D. L., Stowe, R., and Ringuette, S. (2003). Enhanced Hydrogen Generation from Aluminum-Water Reactions. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 38, Issue 35, pp. 14992-15002. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.070
- [2] Belitskus, D. (1970). Reaction of Aluminum with Sodium Hydroxide Solution as a Source of Hydrogen. **Journal of the Electrochemical Society**. Vol. 117, Number 8, pp. 1097-1099
- [3] Wang, H.-W., Chung, H.-W., Teng, H.-T., and Cao, G. (2011). Generation of Hydrogen from Aluminum and Water-Effect of Metal Oxide Nanocrystals and Water Purity. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 36, Issue 23, pp. 15136-15144. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.08.077
- [4] Hiraki, T., Takeuchi, M., Hisa, M., and Akiyama, T. (2005). Hydrogen Production from Waste Aluminum at Different Temperatures, with LCA. **Materials Transactions**. Vol. 46, Issue 5, pp. 1052-1057. DOI: 10.2320/matertrans.46.1052
- [5] Elitzur, S., Rosenband, V., and Gany, A. (2014). Study of Hydrogen Production and Storage Based on Aluminum-Water Reaction. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 39, Issue 12, pp. 6328-6334. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.02.037
- [6] Rosenband, V. and Gany, A. (2010). Application of Activated Aluminum Powder for Generation of Hydrogen from Water. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 35, Issue 20, pp. 10898-10904. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.07.019
- [7] Macanás, J., Soler, L., Candela, A. M., Muñoz, M., and Casado, J. (2011). Hydrogen Generation by Aluminum Corrosion in Aqueous Alkaline Solutions of Inorganic Promoters: the Alhidrox Process. **Energy**. Vol. 36, Issue 5, pp. 2493-2501. DOI: 10.1016/j.energy.2011.01.041
- [8] Hongsiri, W., Danon, B., and Jong, W. D. (2014). Kinetic Study on the Dilute Acidic Dehydration of Pentoses Toward Furfural in Seawater. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. Vol. 53, Issue 13, pp. 5455-5463. DOI: 10.1021/ie404374y
- [9] Phung, K. K., Sethupathi, S., and Piao, C. S. (2018). Production of H₂ from Aluminium/Water Reaction and its Potential for CO₂ Methanation. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Vol. 140, p. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/140/1/012020

- [10] Parker, J. J. and Baldi, A. L. (2009). **Composition and Process for the Displacement of Hydrogen from Water Under Standard Temperature and Pressure Conditions**. United States, Patent Application Publication. Sheet 26 of 32.
- [11] Scatterday, J. W. (1974). Reefs and Associated Assemblages Off Bonaire, Netherlands Antilles, and Their Bearing on Pleistocene and Recent Reef Models. In **Proceedings of the Second International Coral Reef Symposium**. The Great Barrier Reef Committee, Brisbane, Australia. Vol. 2, pp. 85-106
- [12] Russo, M. F., Li, R., Mench, M., and Van Duin, A. C. T. (2011). Molecular Dynamic Simulation of Aluminum-Water Reactions Using the Reaxff Reactive Force Field. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 36, Issue 10, pp. 5828-5835. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.02.035
- [13] Chen, C.-C. and Song, Y. (2004). Generalized Electrolyte-NRTL Model for Mixed-Solvent Electrolyte Systems. **AIChE Journal**. Vol. 50, Issue 8, pp. 1928-1941. DOI: 10.1002/aic.10151
- [14] Que, H., Song, Y., and Chen, C.-C. (2011). Thermodynamic Modeling of the Sulfuric Acid-Water-Sulfur Trioxide System with the Symmetric Electrolyte NRTL Model. **Journal of Chemical & Engineering Data**. Vol. 56, Issue 4, pp. 963-977. DOI: 10.1021/je100930y
- [15] Chen, C.-C., Britt, H. I., Boston, J. I., and Evans, L. B. (1979). Extension and Application of the Pitzer Equation for Vapor-Liquid Equilibrium of Aqueous Electrolyte Systems with Molecular Solutes. **AIChE Journal**. Vol. 25, Issue 5, pp. 820-831. DOI: 10.1002/aic.690250510
- [16] Kamal, I. M. and Al-Malah, (2016). **Physical Property Methods and Models**. Aspen Tech, Version 10. John Wiley & Sons
- [17] Amendola, S. C., Sharp-Goldman, S. L., Janjua, M. S., Spencer, N. C., Kelly, M. T., Petillo, P. J., and Binder, M. (2000). A Safe, Portable, Hydrogen Gas Generator Using Aqueous Borohydride Solution and Ru Catalyst. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 25, pp. 969-975. DOI: 10.1016/S0360-3199(00)00021-5
- [18] Wang, H., Chang, Y., Dong, S., Lei, Z., Zhu, Q., Luo, P., and Xie, Z. (2013). Investigation on Hydrogen Production Using Multicomponent Aluminum Alloys at Mild Conditions and Its Mechanism. **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 38, Issue 3, pp. 1236-1243. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.11.034
- [19] Wang, H., Lu, J., Dong, S. J., Chang, Y., Fu, Y. G., and Luo, P. (2014). Preparation and Hydrolysis of Aluminum Based Composites for Hydrogen Production in Pure Water. **Materials Transactions**. Vol. 55, Issue 6, pp. 892-898. DOI: 10.2320/matertrans.M2013425
- [20] Wang, H., Wang, Z., Shi, Z., Gong, X., Cao, J., and Wang, M. (2017). Facile Hydrogen Production from Al-Water Reaction Promoted by Choline Hydroxide. **Energy**. Vol. 131, pp. 98-105. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.031
- [21] Huang, X., Gao, T., Pan, X., Wei, D., Lv, C., Qin, L., and Huang, Y. (2013). A Review: Feasibility of Hydrogen Generation from the Reaction Between Aluminum and Water for Fuel Cell Applications. **Journal of Power Sources**. Vol. 229, pp. 133-140. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.016

- [22] Wang, H., Leung, D., Leung, M., and Ni, M. (2009). A Review on Hydrogen Production Using Aluminum and Aluminum Alloys. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 13, Issue 4, pp. 845-853. DOI: 10.1016/j.rser.2008.02.009
- [23] Zou, H., Chen, S., Zhao, Z., and Lin, W. (2013). Hydrogen Production by Hydrolysis of Aluminum. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 578, pp. 380-384, 2013. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.06.016

Properties of Chiang Khrua Lateritic Soil and Their Applications in Civil Engineering

Nutthachai Prongmanee¹ and Amorndech Noulmanee^{1*}

Received: February 27, 2020; Revised: April 11, 2020; Accepted: April 11, 2020

Abstract

Sakon Nakhon is a city-municipality in Thailand whose infrastructure such as highways and buildings have been rapidly developing. Consequently, large amounts of construction materials such as crushed rock, sand, and laterite are being used in many construction projects. Chiang Khrua sub-district contains the main laterite quarries supplying construction sites in Sakon Nakhon province; the extracted laterite from this area is in demand for highway sub-base construction due to its good shear strength after compaction and its low price. However, the properties of Chiang Khrua lateritic soil are not yet maximally used in other civil engineering applications such as landfill liner, backfill material for retaining walls, and as a base layer for paved roads because engineers do not extensively understand its physical and engineering properties. Therefore, this study investigated and reported on the properties of Chiang Khrua lateritic soil to identify possibilities for its applications in civil engineering. The physical (i.e., specific gravity of soil, Atterberg limits, Los Angeles (L.A.) abrasion) and engineering properties (i.e., compacted soil density, California Bearing Ratio, shear strength parameters, permeability (k) and modulus of subgrade reaction) of Chiang Khrua lateritic soil were investigated through a series of laboratory and in-situ tests. The results reported could be useful for engineers as a reference for sustainable design and construction.

Keywords: Chiang Khrua Lateritic Soil (CKLS); Permeability; Compacted Soil; Shear Strength; California Bearing Ratio; Modulus of Subgrade Reaction

¹ Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Campus

* Corresponding Author E - mail Address: amorndech.n@ku.th

Introduction

Sakon Nakhon province is located in northeastern Thailand, and forms part of the Sakon Nakhon Basin and the Phu Phan Range. Generally, infrastructure in this area has been developing around Nong Han Lake, the biggest natural lake in northeastern Thailand with an area of approximately 125.2 km². The lacustrine deposit surrounding Nong Han Lake consists of very fine soil particles. On the flood plain around Nong Han Lake, the soil has formed an alluvial deposit from 21 natural creeks before they discharge into this large lake. The soil in the undulating terrain is formed from residual Chiang Khruea lateritic soil (CKLS) through the decomposition of cretaceous sedimentary rocks such as shale or mudstone. Generally, the soil in this area is usually used for pottery, with the province's pottery village located at Ban Chiang Khrua. Along the Phu-Phan Range, most of the rocks are from the Cretaceous to the Jurassic eras, named Phu-Phan sandstone.

In August 2012, Sakon Nakhon became a city-municipality of Thailand, resulting in the rapid development of many types of infrastructure, with large amounts of construction material being utilized in many projects. Chiang Khruea is a sub-district of Sakon Nakhon province which has a large laterite quarry that supplies many construction projects in this area. Residual CKLS has decomposed from mudstone via leaching, with one possible leaching mechanism being the advection of the freshwater (rain and groundwater). This soil is loamy-skeletal with a reddish-brown color and is rich in iron oxide. Generally, the soil profiles in this area are composed of topsoil with a thickness of about 0.2 to 0.5 m. Beyond this soil layer is the laterite with large boulder particles and thick sheets of laterite. The soil conditions in this area are not good for agriculture, but the lateritic soils are good for road construction materials. For example, in 1964, the old Chiang Khruea airport was constructed into the US army military base during the Vietnam War because of its firm lateritic soil foundation. Then, 30 years later in 1994, this area was developed into a government university named the Kasetsart University Chalermphrakiat Sakonnakhon Province campus (KU-CSC). At present, the CKLS extracted from this area is generally used for road embankments, and as subgrade and subbase due to its good shear strength compaction and low price. However, it has been only limited to being used in road construction materials because its mechanical behavior has not been well-understood.

Thus, this study aimed to investigate and report on the physical and engineering properties of CKLS through a series of laboratory and in-situ tests. This study could provide essential information on the properties of CKLS for use in designing and construction of civil engineering projects.

Materials

The soils used in the analyses were collected from different locations on KU-CSC as shown in Figure 1. Test pit 1 (TP-1) was located at 17.287237 N, 104.106361 E, at a mean sea level (MSL) of +168.00 m, and test pit 2 (TP-2) was located at 17.290853 N, 104.115049 E, at an MSL of +166.70 m. Additionally, plate bearing tests were performed to evaluate the bearing capacity of the soil foundation. The location of the in-situ test site is shown in Figure 1.

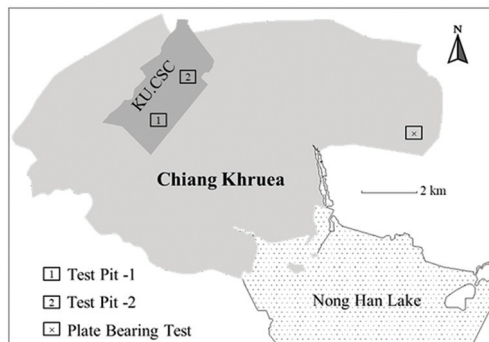


Figure 1 Location map of soil sampling and plate bearing testing

Generally, the lateritic soils in the study area are residual soil decomposed from mudstone; a typical soil profile is shown in Figure 2. The topsoil is -0.20 m in depth and has a loose state with a high amount of organic matter. From a depth of -0.20 to -1.20 m, the soil is lateritic with various sizes of soil particles up to 60 mm mixed with lateritic boulders. Just below -1.20 m, the white soil layer is plinthite with a thickness of about 0.8 m, being an iron-rich soil normally soft when wet but hardened when exposed to the air. Beyond -2.00 m is mudstone and building foundation material is usually sourced from this firm rock layer reaching to about -3.00 m below the ground level.

The lateritic soil was sampled using an earth auger from 0.3 to 0.5 m below the ground level. The soil samples were air-dried at room temperature for 2 to 3 days and then stored in plastic containers. The initial water content of the air-dried soil was about 2 - 5%.

Physical Properties Test

The physical properties of soil samples were analyzed using laboratory tests based on ASTM standards. The specific gravity (G_s) test was conducted following ASTM D854 [1]. Grain size distribution analysis was performed following ASTM D422 [2]. Atterberg limits test was applied following ASTM D423 [3], with ASTM D424 [4] used for both liquid

limit (w_l) and plastic limit (w_p) testing. Loss Angeles (L.A.) abrasion test was conducted following ASTM C131 [5]. Each physical property test was repeated 3 times to calculate the average data.

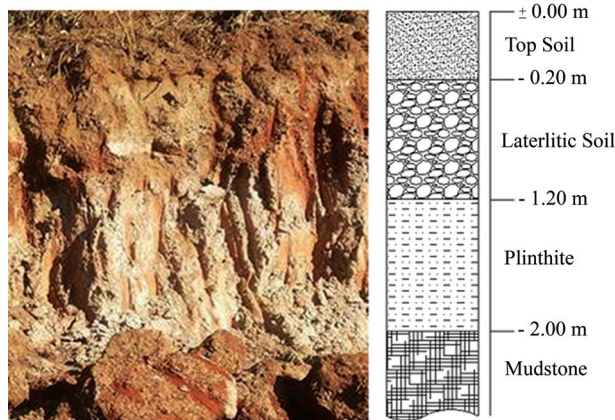


Figure 2 Typical soil profile in Chiang Khruea sub-district

Engineering Properties and In-Situ Test

The engineering properties of the lateritic soils from the two test pits (TP-1 and TP-2) were evaluated through a series of laboratory tests as follows; standard and modified compaction tests were conducted following ASTM D698 [6] and ASTM D1557 [7], respectively, and California Bearing Ratio (CBR) test was performed following ASTM D1883 [8]. In accordance with the DH-S 208/2532 standard, CBR tests were only conducted under soaked conditions. The specimens for CBR test were prepared at optimum water content obtained from the test result of modified compaction test. According to the DH-S 109/2517 standard, the CBR tests were only conducted under a soaked condition. It is well known that a soaked condition provides lower CBR values compared to that in unsoaked condition and that soil with low CBR values is more reliable for usage in construction materials.

For shear strength parameters, CKLS was analyzed using a series of direct shear tests following ASTM D3080 [9] (consolidated drained test, CD). The tested soil was passed through a No. 4 sieve due to the limitation of the test apparatus. Each CKLS sample was compacted into a shear box with dry density (γ_d) and optimum water content (OWC) obtained from the test results of standard compaction tests. Notably, only CKLS from TP-1 was investigated for soil shear strength.

The value of coefficient permeability (k) was calculated from the test results of multiple stage loading (MSL) oedometer testing using the method of Taylor, D. [10]. The oedometer tests were conducted following ASTM D2435 [11]. Studies in the literature have reported

that for a low permeability material (less than 10^{-6} m/s), the value of k deduced from an oedometer test result is comparable with direct measurement of k [12] - [13]. The air-dried CKLS was passed through a No. 40 sieve, then mixed with deionized water using a mechanical mixer. The amount of water was about 1.2 times its liquid limit (w_l). Then, the mixed slurry was wrapped and cured for 24 h. After that, the slurry was pre-consolidated in the consolidation ring under a vertical stress of 17 kPa for 24 h. The pre-consolidation pressure of 17 kPa was obtained from trial and error, where a sample could be successfully formed. Subsequently, the pre-consolidated sample was trimmed to 20 mm in height. Then, the specimen was installed in the consolidation test apparatus. After applying the vertical pressure (σ'_v), the settlement with elapsed time was recorded until the specimen achieved a steady state for each σ'_v value (for 24 h). The test was carried out with σ'_v from 10 to 320 kPa, by doubling the stress for each subsequent step. It should be noted that soil permeability was investigated only in the CKLS from TP-1.

The in-situ plate-bearing test was conducted following ASTM D1194 [14] under a dry condition to determine the soil bearing capacity for footing construction of a pedestrian bridge on highway route No. 22 Sakon Nakhon-Nakhon Phanom, Thailand. The set-up equipment installation for the plate bearing test is shown in Figure 3. First, the soil was excavated to the design depth. Then, a thin layer of fine sand was spread over the tested surface to ensure a proper seating between the plate and the ground surface was achieved. After that, the hydraulic excavator was used as counterweight. A circular steel plate (300 mm) was installed on top of the soil surface under the bottom frame of a hydraulic excavator 150 tonne hydraulic piston/pump machine (700 bars) and three dial gauges were installed. Then, the hydraulic piston was used to apply load and the test commenced. The load displacement was recorded during the elapsed time. It should be noted that the size of steel plate was quite different from the size of the foundation, which means that the stress distribution from two conditions may be different. Even though the plate bearing test has some limitations, it is still widely used to determine the bearing capacity and settlement of the soil foundation.



Figure 3 Equipment for plate bearing test

Results of Physical Properties

Some test results of physical properties are listed in Table 1 for specific gravity (G_s), Atterberg limits, and L.A. abrasion of CKLS from two sources. The test results showed that the G_s value of the soils varied from 2.7 to 2.8. The value of G_s of the lateritic soil from TP-1 was about 2.8 which was higher than from TP-2 (which was about 2.7). This may have been because of different soil chemical compositions for the CKLS samples from the different locations. It is well known that high values of G_s for lateritic soil are due to the high content of iron oxides (such as aluminum oxide, iron (III) oxide). The Atterberg limits test results showed that the lateritic sample from TP-1 had higher values for w_l of 36%, plastic limit (w_p) of 18% and plasticity index (I_p) of 18% compared to the lateritic soil from TP-2 with values of w_l of 51%, w_p of 28% and I_p of 23%.

Table 1 Summary test results of CKLS

Soil Property	Unit	Source	
		TP-1	TP-2
Specific Gravity	-	2.80	2.70
Liquid Limit, w_l	%	36.00	51.00
Plastic Limit, w_p	%	18.00	28.00
Plasticity Index, I_p	%	18.00	23.00
L.A. Abrasion	%	42.30	42.80

The results of the grain size distribution (GSD) are shown in Figure 4. It can be clearly seen that most soil particles for both CKLS samples were sand. The results indicated that the CKLS from TP-2 contained fine particles (passing through sieve No. 200) of more than 12.5%, while the CKLS from TP-1 had just 6%. The results of GSD from Figure 4 indicated that the CKLS from TP-2 was outside the specifications reported in the Department of Highway (DOH) standard for selected materials class A, while the CKLS from TP-1 satisfied these specifications. These %passing sieve No. 200 values were in good agreement with the results of the Atterberg limits (Table 1), where there was an indication that higher amounts of fine particles pointed to higher Atterberg limits. Considering the gravel content (%retained No. 4 sieve), the CKLS from TP-1 had average gravel content of about 64.0%, while CKLS from TP-2 had average gravel content of 34.5%. For total gravel and sand content (100% minus %passing No. 200 sieve), the CKLS from TP-1 gave an average content of 94.2%, while the CKLS from TP-2 gave an average content of 86.2%. By comparing the gravel content and half of total gravel and sand content, it was found that the CKLS from

TP-1 was classified as gravel (G) and the CKLS from TP-2 was classified as sand (S). The GSD results demonstrated that the values of the coefficient of uniformity (C_u) and coefficient of curvature (C_c) of the CKLS from TP-1 varied from 44.44 to 55.00 and from 2.78 to 4.65, respectively, while no corresponding measurements were made for TP-2 as the percentage of particles passing the No. 200 sieve was higher than 12.5 %. Based on the Unified Soil Classification Standard (USCS) and the results of GSD and Atterberg limits, the CKLS from TP-1 could be classified as GW-GC or GP-GC, while the soil from TP-2 was classified as SC.

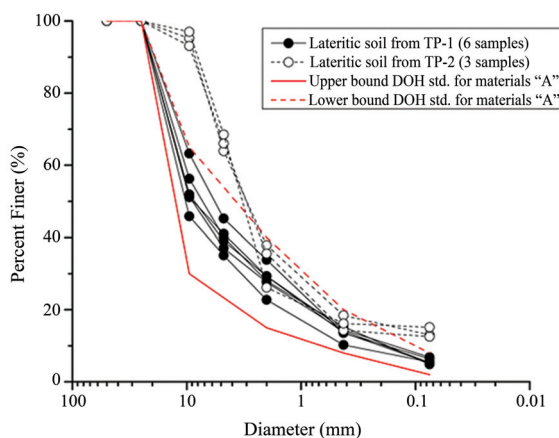


Figure 4 Particle size distribution of lateritic soils

The differences in the physical properties of the CKLS samples from the two locations could have been due to different geographical features between the two test pits (for example, TP-1 had a higher elevation than TP-2). Furthermore, the ground water could have flowed under gravitational forces from TP-1 to TP-2, resulting in a higher ground water level flow around the TP-2 zone (higher advection in fresh water). Therefore, the CKLS sample from TP-2 may have had a higher degree of weathering compared to TP-1.

The L.A. test results are listed in Table 1 and were similar for the two test sites. While these results seemed high, this could be explained by the CKLSs originating from decomposed rock from weathering processes which may have caused the low particle strength.

Compaction Test Results

The relationships of dry density ($\gamma_d, \max$) and water content (w) of the standard and modified compaction of the CKLS from the two test pits are plotted in Figure 5. The compaction characteristics of CKLS followed a general tendency of an increase in

compaction energy with an increase in $\gamma_{d,max}$ and a decrease in optimum water content (OWC). The results clearly showed that the CKLS from TP-1 had higher $\gamma_{d,max}$ values and lower OWC values from both compaction methods compared with those from TP-2.

Specifically, the values of $\gamma_{d,max}$ of the CKLS from TP-1 varied from 2.16 to 2.20 t/m³ with OWC values in the range of 8.59 - 8.99 %, while the $\gamma_{d,max}$ values of the CKLS from TP-2 varied from 2.09 t/m³ to 2.12 t/m³ with OWC in the range of 9.64 - 9.72 %. The standard compaction, $\gamma_{d,max}$ values varied from 1.87 t/m³ to 1.92 t/m³ and from 1.76 to 1.81 t/m³ for TP-1 and TP-2, respectively, while the OWC values were in the ranges of 11.45 - 13.00%, and 14.23 - 14.25% for TP-1 and TP-2, respectively.

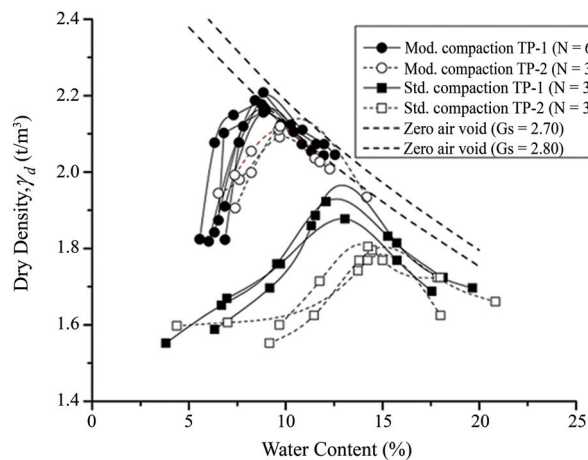


Figure 5 Results of modified and standard compaction tests

California Bearing Ratio (CBR)

The test results of CBR and swelling are shown in Figure 6 and Figure 7, respectively. The CBR results clearly showed that as the density (γ_d) increased, the CBR increased, while the swelling ratio (%) decreased with an increase in γ_d values. Considering maximum dry density ($\gamma_{d,max}$) value (section 5.1), it was clear that the CKLS from TP-1 had higher CBR values and lower swelling values compared to TP-2. Based on the test results, the CBR values were approximately 55% and 28% with swelling of 0.7% and 1.1% for compacted CKLS from TP-1 and TP-2, respectively.

According to the properties reported in the sections 5.1 to 5.2, it is indicated that the soil from TP-1 is more suitable for construction materials comparison with the soil from TP-2. Therefore, the soil from TP-1 was selected to further investigate its shear strength parameters and permeability in the next sections.

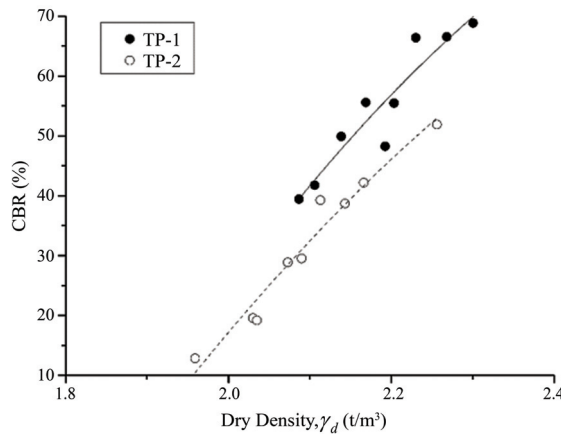


Figure 6 Relationships between CBR and γ_d of compacted CKLS from TP-1 and TP-2

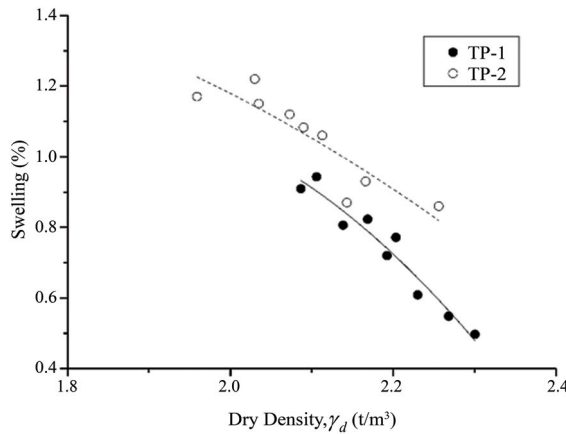


Figure 7 Results of swelling testing for TP-1 and TP-2

Direct Shear Test

The relationships between the shear stress (τ) and horizontal displacement (δ_x) of the compacted CKLS samples are plotted in Figure 8. The results indicated that the shear behavior of compacted CKLS was found in the strain softening, where the shear stress increased with an increase in displacement until a peak shear stress was reached, and then the shear stress value decreased with an increase in displacement to a residual state. Based on the results of τ with σ_n , the Mohr-Coulomb failure envelope can be created as shown in Figure 9. The direct shear test results showed that the ϕ'_{peak} and $\phi'_{residual}$ values were 31.7° and 27.2° , while the c'_{peak} and $c'_{residual}$ values were 68 and 38.2 kPa, respectively. It should be noted that the residual state can be reached when the structures have large displacement, and for the conservative design, the $\phi'_{residual}$ and $c'_{residual}$ values are recommended.

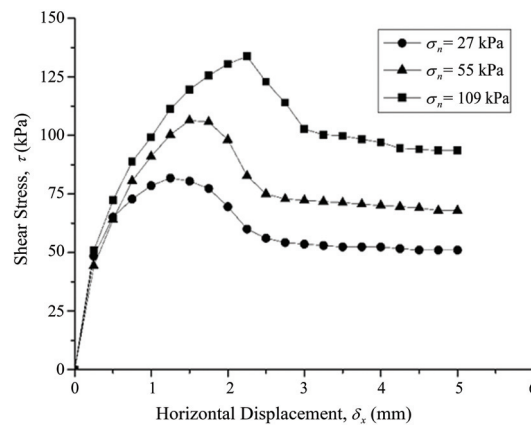


Figure 8 Test results of stress-displacement of compacted CKLS from TP-1

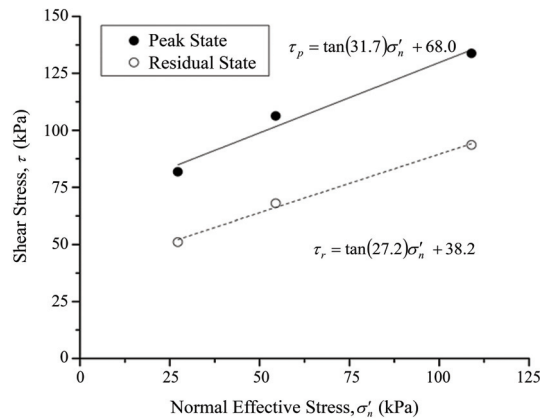


Figure 9 Mohr-Coulomb failure envelope of compacted CKLS from TP-1

Permeability (Consolidation Test)

The relationship between permeability (k) and the void ratio (e) of the CKLS is shown in Figure 10, indicating that the value of k on a log scale was directly proportional to the e values, where the e values decreased when the k values decreased. The k values of the CKLS samples varied from 1.5×10^{-8} to 6.8×10^{-10} m/s with e values varying from 0.86 to 0.38, respectively. The test result clearly showed that the k values in this study are comparable to the test results from another study, which used a direct measurement method to determine k values [15].

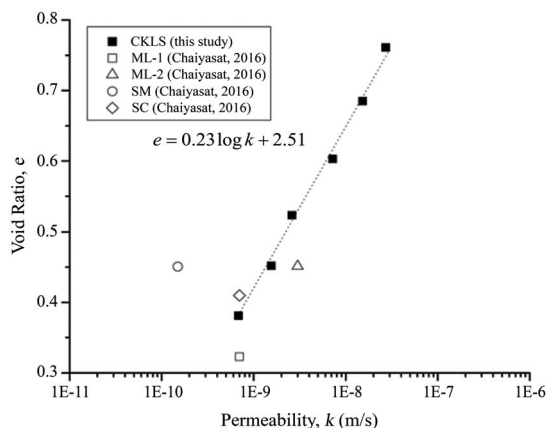


Figure 10 Relationship between void ratio (e) and k (log) of CKLS

Plate bearing

The plate bearing test results are reported in Figure 11 and show that the maximum bearing capacity or more than 180 t/m² can be achieved with displacement of about 9 mm. However, it should be noted that the plate bearing pressure may reduce when testing in wet conditions. The test results showed that the plate bearing pressure increased with an increase in settlement. After the plate bearing pressure reached 160 t/m², the plate bearing pressure increased with little settlement because the soil foundation was the very strong mudstone layer. During the test, the capacity of the reaction frame was not enough to support the applied pressure. For safety purposes, the test was terminated before the settlement reached the maximum intended value of 25 mm. Considering if modulus of subgrade reaction (K), the plate bearing pressure corresponding to the settlement of 1.25 was 42 t/m², then the value of K can be calculated following equation (1). The obtained K in this study was 33,600 t/m³.

$$K = P / 0.00125, \quad (1)$$

where P is plate bearing pressure (t/m²) at the settlement of 1.25 mm.

Pavement Application

According to DH-S 208/2532 and DH-S 209/2532, the CKLS samples could be generally classified as selected material A or B for soil foundations in pavement construction. Considering the size of particles as shown in Figure 4, the CKLS sample from TP-1 followed the specifications, whereas the CKLS sample from the TP-2 was outside the specifications.

Only the CKLS sample from TP-1 had w_l and I_p values that satisfied the minimum requirements for Atterberg limits of a class A material ($w_l < 40\%$ and I_p value $< 20\%$), while TP-2 had values higher than those of the requirements. To reduce the w_l and I_p values, one effective method which is easy and cheap is to mix in dust stone. Mahent, R. and Joshi, R. [16] reported that the Atterberg limit of lateritic soil decreased with an increase in the amount of dust stone, resulting in increased maximum dry density ($\gamma_d, \max$).

Both CKLS samples met the minimum CBR specification requirement (CBR value $> 25\%$) following DH-S 208-2532. Additionally, the swelling values of both CBR samples had lower values than the required minimum (swelling $< 3\%$). These test results confirmed that the CKLS sample from TP-1 was suitable as class A or class B material for the subbase layer. However, neither sample satisfied the requirements for use as base material, according to DH-S 201/2544, and their properties would need to be improved. In particular, the minimum L.A. requirement is less than 40%, but both CKLS samples had values exceeding this requirement. However, their properties could be improved by treating with cementitious materials (such as cement or geopolymer), so that high-quality materials such as crushed rock would not need to be transported from other supply zones which would help to minimize the construction budget. It has been reported that lateritic material mixed with cement can replace crushed rock for road construction [17]. Based on test results, it can be recommended that CKLS is good for road subgrade and subbase material. However, the properties of CKLS would need to be improved (e.g., mixing with cement or lime) before being used in base material.

Foundation

This section discusses the bearing capacity of the CKLS samples and their application in soil foundations. A shallow foundation or spread footing, commonly used in residential building construction, is a major component of a building that transmits the building loads to the soil foundation. The ultimate bearing capacity (q_u) of the shallow foundation is based on the simplified idea developed by Terzaghi, K. [18], where q_u can be determined using equation (2) for circular footing.

$$q_u = 1.3c'N_c + q'N_q + 0.3\gamma'BN_\gamma, \quad (2)$$

where c' is the cohesion of soil, q' is the overburden pressure on the footing (unit weight of soil multiplied by the depth of footing), γ' is the unit weight of the soil, and N_c, N_q, N_γ are Terzaghi's bearing capacity factors that depend on the soil friction angle (ϕ').

Based on the test results in section 5 ($c' = 3.8 \text{ t/m}^2$, $q' = 3.2 \text{ t/m}^2$ considering a depth of footing of 2.0 m, $\gamma' = 1.6 \text{ t/m}^3$, $B = 0.3 \text{ m}$ (plate bearing), where N_c , N_q and $N_\gamma = 29.24$, 15.9 and 11.6, respectively), q_u can be estimated as approximately 199 t/m^2 . It is very important to note that the values of the shear strength parameters were obtained from the compacted CKLS sample under standard compaction energy, while the actual shear strength parameters in the field may be lower or higher than the values reported in this study. According to the U.S. Army Corps of Engineers [19], the recommended factor of safety (FS) for shallow foundation is 3. By using an FS value of 3, the allowable bearing capacity (q_a) from Terzaghi's bearing capacity is 66 t/m^2 . According to the results of plate bearing testing (Figure 11), considering a plate bearing pressure at 66 t/m^2 , the vertical settlement would be only about 2 mm, which is much lower than the maximum allowed value of 25 mm. Based on this analysis, the CKLS would be good for use in soil foundation. Even though CKLS is suitable for shallow foundations, this soil could still collapse due to the leaching process. Fresh water could leach the iron oxide component out of the lateritic soil, resulting in disaggregation between the lateritic soil particles and resulting in the soil strength being diminished. In fact, there are several buildings on KU-CSC which are currently facing this problem as shown in Figure 12 and the differential settlement over a long period can require a large expenditure on building repairs. Therefore, further investigation on the effects of leaching and exchanging cations as well as ways to improve engineering properties in CKLS is required.

Other Applications in Civil Engineering

The use of CKLS for other applications such as in landfill lining and as back fill material were briefly discussed. It is well known that the major parameters controlling the flowability through the compacted clay for waste landfill or impervious core for earth dam are the permeability (k) and the k value that is a function of the void ratio (e).

The e values of the compacted soil can be estimated by considering the k values from the test results in section 5. For example, considering the results of the standard compaction test on the sample from TP-1 (Figure 5), the $\gamma_{d,\max}$ value of compacted soil varied from 1.87 t/m^3 to 1.92 t/m^3 with a G_s value of 2.8. Based on the given data, the estimated e values would be 0.31 to 0.33. By using the proposed equation in Figure 10, the k values can be deduced, producing estimated k values of approximately 2.72×10^{-10} to $3.32 \times 10^{-10} \text{ m/s}$, which are lower than the typical value of k for landfill liner application ($<1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$) [20]. This analysis indicates that CKLS could be used as a construction

material for landfill liner applications. However, the calculated k value from the current study was limited only by the permeability of the soil-water interaction, whereas in the field, many chemical compounds could be dissolved resulting in an increased k value, especially with the dissolved cations in a solution [21]. Moreover, it is very important to note that in field construction, the k value can be higher or lower than the reported k values because the grain size distribution of a material is difficult to control, resulting in the k value increasing when there are more coarse-grained particles or reducing when there are more fine-grained particles compared to the test results reported in the this study. Therefore, quality checking during construction is very important.

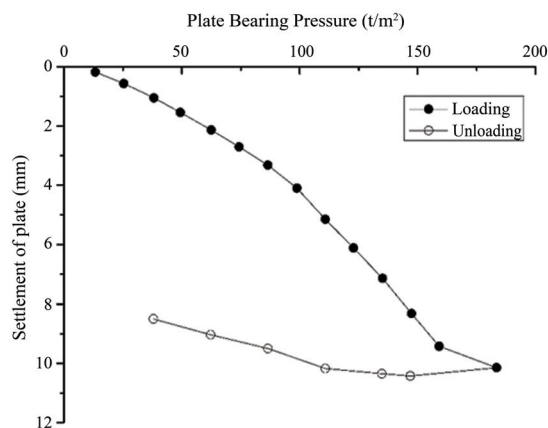


Figure 11 Test results of plate bearing

It is important to note that the calculated k values in this study only considered k in the vertical direction, whereas for the core material in earth dam applications both the horizontal and vertical directions of k should be considered. Thus, the values of k reported in this study are not sufficient to assess the k value for earth dam applications; more experiments are required to investigate this issue.

CKLS is a high plasticity soil with a low k value, and using this soil as backfill could be problematic due to high excess water pressure against the wall due to poor drainage. However, nowadays, geosynthetic materials that can improve soil drainage and increase the shear strength of the soil are widely used [22]. The use of geosynthetics can save on construction costs since marginal soil can be substituted for high-quality backfill material. However, further investigation is needed in the use of geosynthetics to improve the properties of CKLS for backfill material.

Conclusions

This study investigated the properties of Chiang Khrua lateritic soil (CKLS) through a series of laboratory and in-situ tests. Based on the test results, the following conclusions were drawn:

1. The physical, compaction, and CBR test results for the CKLS samples from the two different sites (TP-1 and TP-2) were different. One possible reason for these differences is that the CKLS samples from different locations may have been subjected to different degrees of weathering due to the leaching process.

2. The physical parameters controlling the compaction and CBR values were the grain size distribution and the Atterberg limits (w_l , w_p , and I_p), where a higher fine content (< 0.075 mm), higher Atterberg limits values, and lower maximum dry density resulted in lower CBR values.

3. Shear strength and permeability (k) of CKLS was only investigated at TP-1. The test results showed that the CKLS sample from there had high shear strength parameters and low k values.

4. Based on these test results, CKLS would be good as construction material for the subbase, landfill liner, and soil foundation, but its properties need to be improved before being used for some applications such as backfill and base layer.



Figure 12 Structural cracks on KU CSC buildings due to settlement

Acknowledgement

We would like to acknowledge the undergraduate students from the Department of Civil and Environmental Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon, Thailand who prepared and conducted the field and the laboratory tests. We would also like to thank Mr. Wittaya Srisomboon for providing some of the photos indicating the defects in the building in KU-CSC.

References

- [1] ASTM, D854. (2006). **Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer**. ASTM International
- [2] ASTM, D422. (2007). **Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils**. ASTM International
- [3] ASTM, D423. (1972). **Standard Method of Test for Liquid Limit of Soils**. ASTM International
- [4] ASTM, D424. (1979). **Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils**. ASTM International
- [5] ASTM, C131. (2006). **Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**. ASTM International
- [6] ASTM, D698. (2007). **Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))¹**. ASTM International
- [7] ASTM, D1557. (2000). **Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))**. ASTM International
- [8] ASTM, D1883. (2016). **Standard Test Method for California Bearing Ratio CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils**. ASTM International
- [9] ASTM, D3080. (2011). **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. ASTM International
- [10] Taylor, D. (1955). **Fundamentals of Soil Mechanics**. Chapman and Hall Limited, New York
- [11] ASTM, D2435. (2011). **Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading**. ASTM International
- [12] Quang, N. D. and Chai, J. C. (2015). Permeability of Lime- and Cement-Treated Clayey Soils. **Canadian Geotechnical Journal**. Vol. 52, Number 9, pp. 1221-1227. DOI: 10.1139/cgj-2014-0134
- [13] Prongmanee, N., Chai, J. C., and Shen, S. (2018). Hydraulic Properties of Polymerized Bentonites. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 30, Issue 10, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002442
- [14] ASTM, D1194. (2003). **Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings**. ASTM International

- [15] Chaiyasat, S. (2016). Influence of Clay Content on Permeability of Compacted Lateritic Soil. **Engineering and Applied Science Research (EASR)**. Vol. 43, pp. 1-3. DOI: 10.14456/kkuenj.2016.55
- [16] Mahent, R. and Joshi, R. (2015). Improvement Soil Index Properties by Adding Stone Dust Mix. **International Journal of Science Technology and Engineering (IJSTE)**. Vol. 2, Issue 2, pp. 61-68
- [17] Jaritngam, S., Somchainuek, O., and Taneerananon, P. (2014). Feasibility of Laterite-Cement Mixture as Pavement Base Coarse Aggregate. **Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering**. Vol. 38, Issue 1, pp. 275-284. DOI: 10.22099/IJSTC.2014.1869
- [18] Terzaghi, K. (1943). **Theoretical Soil Mechanics**. John Wiley & Sons. New York
- [19] Department of the Army U.S. Army. (1992). **Engineering and Design BEARING CAPACITY OF SOILS**. Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000
- [20] Benson, C. H., Zhai, H., and Wang, X. (1994). Estimating Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners. **Journal of Geotechnical Engineering**. Vol. 120, No. 2, pp. 366-387
- [21] Prongmanee, N., Chai, J. C., and Shrestha, S. (2018). Effect of Cations on Consolidation and Permeability of Polymerized Bentonite. **Lowland Technology International**. Vol. 20, No. 3, pp. 297-304
- [22] Christopher, B. R. and Stulgis, R. P. (2005). Low Permeable Backfill Soils in Geosynthetic Reinforced Soil Walls: State-of-the-Practice in North America. In **Proceedings of North American Geo-synthetics Conference (NAGS 2005)**. 14 December 2005, Nevada, USA. pp. 14-16

Preparation of Biocomposite from Recycled PET Bottles and Starch Reinforced with Biochar from Durian Peels

Voravadee Suchaiya^{1*} and Katsirin Sangmanee¹

Received: March 12, 2020; Revised: April 26, 2020; Accepted: April 28, 2020

Abstract

This research focuses on the preparation of biodegradable films from recycled polyethylene terephthalate (RPET) and thermoplastic starch (TPS) reinforced with biochar from durian peels. In this study, hexamethylene diisocyanate (HMDI) was used as a compatibilizer and the influences of biochar contents on physical properties, morphology, mechanical properties, thermal properties and water absorption ability of biocomposite films were studied. For biocomposite preparation, all ingredients, i.e. TPS, RPET biochar and HMDI were mixed by internal mixer and fabricated into thin sheets by compression molding. The mixing ratio of TPS/RPET was fixed at 30/70 wt%, while HMDI was added at 5 wt% based on starch content. Biochar contents were varied from 10 to 40 wt%. The results showed that the presence of 5 wt% HMDI led to improvement of mechanical and thermal properties of TPS/RPET compound which resulted in the improvement of interfacial adhesion between RPET and TPS. Moreover, the addition of 20 wt% biochar resulted in the highest flexural strength and flexural modulus of 30 TPS/RPET when compared to other biochar contents because of its better dispersion in RPET matrix. In addition, biochar could improve thermal stability of 30 TPS/RPET biocomposite. Besides, the water absorption ability of TPS/RPET/biochar composite increased with an increase in TPS and biochar. On the other hand, the presence of HMDI led to the diminishing of water absorption ability of TPS/RPET/biochar biocomposite.

Keywords: Polyethylene Terephthalate Bottle; Thermoplastic Starch; Durian Peels; Biochar; Plastic Recycling; Biocomposite

¹ Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: voravadee.s@pnru.ac.th, voravadee.su@gmail.com

Introduction

Thailand is one of the well-known cultivated lands. Nowadays, Thailand's farming industry is highly competitive and there is gain of agricultural productivity [1]. Due to an increase in agricultural cultivation, a lot of agricultural plastic wastes such as seed trays, crop coverings, mulch films, pots and fertilizer bags are abandoned in landfills [2]. Most of agricultural plastic wastes are made from petroleum-based polymers because such polymers have good mechanical properties and are inexpensive [3]. However, petroleum-based polymers cause environmental pollution since they take a long time to decompose [3]. Recently, the environmental issue of reducing plastic use has become a serious topic in Thailand. The Thai government has also been driving a policy to avoid using single and non-biodegradable plastics [4]. Thus, the use of biodegradable plastic or recycled plastic for agriculture is a sustainable way to reduce plastic waste from agricultural activities since the reuse and recycling of already acquired non-biodegradable plastics help maintain an environment without waste and reduce demand for new plastic [5] - [7].

Polyethylene terephthalate (PET) bottles is one of the plastic wastes mostly found in landfills and oceans. Many researchers have studied on the utilization of recycled PET bottle by mixing it with biodegradable polymers such as polylactic acid [8], poly (butylene succinate) [9] cellulose [10], and starch [11] to reduce PET bottle waste. From literatures, the addition of biodegradable polymers can improve mechanical properties and the biodegradability of recycled PET for the production of various products, e.g. food packaging, clothes, including plastic products for cultivation. However, there are a few research works focusing on the preparation of biocomposite from recycled PET for agricultural application such as trays and films. Thus, this research is aimed at preparing recycled PET biocomposite and its properties to be a guideline for prototype development such as trays and films. Cassava starch and biochar are attractive raw materials because cassava starch is abundant in nature in Thailand. It is cheap and has good biodegradability [12] - [13]. While, Biochar has benefit for crop and soil. It can enhance root yield since it can hold moisture and enrich soil nutrients [14] - [15]. Nevertheless, the main problem of starch and polyester blend is low compatibility because starch is hydrophilic material, while polyester is hydrophobic material. The addition of coupling agent or compatibilizer can improve the compatibility and interfacial adhesion between hydrophilic and hydrophobic materials. Isocyanate compounds, such as methylene diphenyl diisocyanate (MDI) [16], 1,4-phenylene diisocyanate (PDI) [17] and hexamethylene diisocyanate (HMDI) [17] are well-known coupling agents for polyester and starch because they are effective and give rapid reactions. HMDI is one of diisocyanate groups which is widely used in bioplastic and food-contact applications [18].

Therefore, the objectives of this work are to prepare biocomposite from recycled PET (RPET) and thermoplastic starch (TPS) reinforced with biochar. HMDI was used as a compatibilizer. The effects of TPS and HMDI addition and biochar content on morphology, mechanical properties, thermal properties, and water absorption ability of TPS/RPET biocomposites were studied.

Materials and Method

1. Materials

Commercial cassava starch was used as a raw material for TPS preparation. Recycled PET bottle (RPET) was a raw material used in preparing biocomposites. Analytical grade of HMDI was purchased from Sigma Aldrich. Analytical grade of glycerol was obtained from CT chemical co, Ltd. Durian peel waste was used as raw material for biochar preparation.

2. Biochar (BC) preparation

Durian peel was dried in an oven at 60 °C overnight to remove absorbed moisture. Later, it was pyrolyzed at 500 - 600 °C in closed-traditional furnace without oxygen for 24 hrs. After pyrolysis, biochar from durian peel was obtained and then it was ground into fine particles to pass through a 230 sieve mesh.

3. Thermoplastic starch (TPS) preparation

Cassava starch was dried in an oven at 60 °C overnight for removing absorbed moisture. Next, cassava starch was mixed with glycerol and water. The ratio of starch, glycerol, and water was 70:20:10. All ingredients were stirred and kneaded to prepare homogenous TPS.

4. Preparation of biocomposite from RPET and starch reinforced with biochar

RPET was washed in water and dried in sunlight. After that, it was cut into small sizes (1 - 2 cm). Before mixing, all ingredients, i.e. RPET and biochar were dried at 60 °C overnight. Afterwards, RPET, TPS, and HMDI were firstly mixed by internal mixer (Enmach Co., Ltd.) at 260 °C and 60 rpm to prepare TPS/RPET compound. The ratio of TPS and RPET was fixed at 30:70 wt%, while the addition of HMDI was fixed at 5 wt% which depended on TPS content. The mixture was blended until it became homogeneous. After that, biochar was added into the compound and was mixed for 5 minutes to disperse biochar in matrix. Biochar content was 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%, and 40 wt% based on the total weight of the compound. After that, TPS/RPET/biochar compound was fabricated into sheet by compression molding machine (CT, Chareon tut Co., Ltd).

5. Characterization

Morphologies of TPS, biochar and biocomposite were studied by scanning electron microscope (SEM) (JEOL, JSM-IT300). Thermal stability of biocomposite films was investigated by Thermogravimetric analysis (TGA) (Tarsus, TGA-209 F3) which was conducted under nitrogen gas with 10 °C/min of scanning rate. Differential calorimetry (DSC) (Phoenix 204 F1) was used to study thermal behavior of RPET and biocomposite under inert gas with 10 °C/min of scanning rate. The degree of crystallinity (χ_c) of biocomposite film was calculated with the following equation (1).

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m_0}} \times 100, \quad (1)$$

where ΔH_m is the melting enthalpy of the crystalline PET and ΔH_{m_0} is the melting enthalpy of the completely crystalline PET. The values of ΔH_{m_0} of PET was 140 J g⁻¹.

Universal Testing Machine (UTM DSS-10T) was used for flexural tests according to ASTM standard D790. Water absorption test (water absorption ability) was studied according to ASTM 570. All samples were dried at 60 °C overnight. After that, all samples were weighed and then soaked in excess water for 24 hrs. After 24 hrs, excess water was removed from the samples with tissue paper, and then weighed. Three replicates were tested. The water absorption was calculated on a dry basis with the following equation (2).

$$\text{Water Absorption Ability (\%)} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100 \quad (2)$$

where w_2 and w_1 are the wet weight and dried weight of a sample, respectively.

Results and Discussion

1. Physical appearance and morphology of biochar from durian peels

Biochar from durian peels was used as a reinforcement for TPS/RPET biocomposite. Figure 1 shows physical appearances and morphology of durian peels and biochar. Physical appearances of durian peels are shown in Figure 1(a). Durian peels are oblong shape with green and yellow color. The Figure 1(b) shows that obtained biochar exhibited black color with glossy skin after pyrolysis. Then, the biochar was reduced into micron size by a grinder and was sieved by 230 mesh sieve. After grinding, biochar powder was a mixed shape of flake and short fiber with rough surface as seen in Figure 1(c) and (d). Moreover, tiny holes could be found on biochar surface. The average particle size of biochar powder was approximately 33 μm.



(a) Durian peels



(b) Biochar

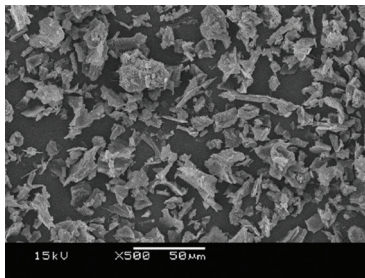
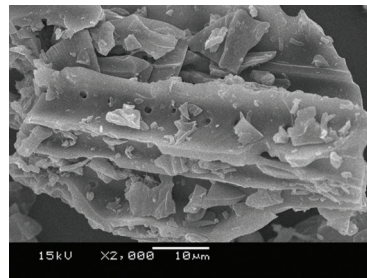
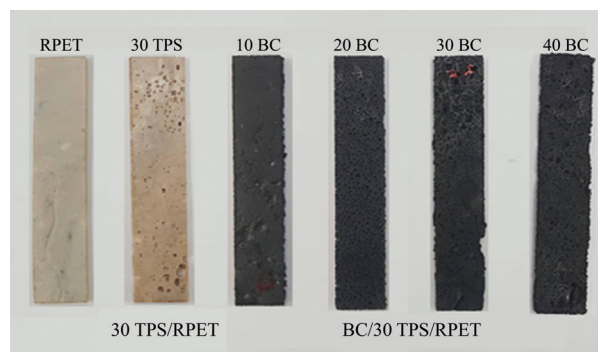

 (c) SEM of Biochar at
x 500 magnification

 (d) SEM of Biochar at
x 2,000 magnification

Figure 1 Physical appearances of durian peels and biochar

2. Physical appearance of RPET and RPET biocomposite

Physical appearances of RPET and biocomposites are illustrated in Figure 2. As observed, neat PET sample was of gray color with smooth surface. The presence of 30 wt% TPS resulted in a brownish color in RPET biocomposite. While, the addition of biochar contributed to a black color and rough surface. Moreover, the agglomerations of biochar particles were noticed in samples when biochar content increased from 20 to 40 wt%.

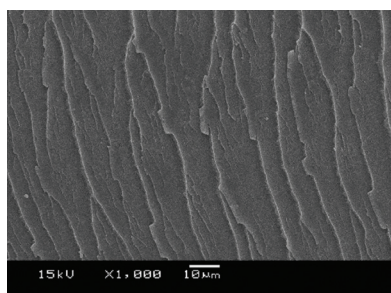

Figure 2 Physical appearances of RPET, 30 TPS/RPET with HMDI, and BC/30 TPS/RPET biocomposites with HMDI

3. Morphology

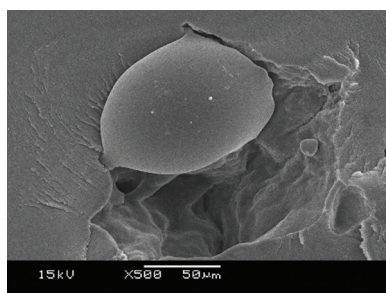
Figure 3(a) - (g) illustrates fracture surface of RPET and all RPET biocomposites. As seen in Figure 3(a) - (c), the gray area with rough surface is RPET matrix, while big particles which embedded in matrix are TPS particles and the large holes in sample surface were imprints of TPS particles. Average particle size of TPS is in range of 30 - 50 μm . Figure 3(b) and (c) exhibit fracture surface of 30 TPS/RPET without and with 5 wt% of HMDI, respectively. As shown in Figure 3(a) and (b), holes in composite surface and large gap between TPS and RPET phases could be found in 30 TPS/RET without HMDI. It indicated that there was poor compatibility between hydrophobic RPET and hydrophilic TPS. After mixing with HMDI, the gaps between RPET and TPS were smaller than those of TPS/RPET without HMDI (Figure 3(c)). Besides, the addition of HMDI contributed to well embedding of TPS in RPET matrix. This phenomenon indicated that the presence of HMDI could increase compatibility between RPET and TPS. Fracture surface images of all BC/30 TPS/RPET biocomposites are shown in Figure 3(d) - (g). These figures illustrate that small white flakes and short fibers are biochar (BC) powder. Small holes in matrix were evidence of biochar imprints. As observed, the degree of agglomeration of biochar increased with an increment of biochar loading since biochar had large surface area which easily tended to agglomerate. Likewise, the addition of 20 wt% biochar had better dispersion in matrix than other biochar contents. These results supported flexural properties of 30 TPS/RPET biocomposite. The optimal 20 wt% biochar content led to the highest flexural strength and flexural modulus.

4. Thermal properties and degree of crystallinity of RPET and all RPET biocomposites

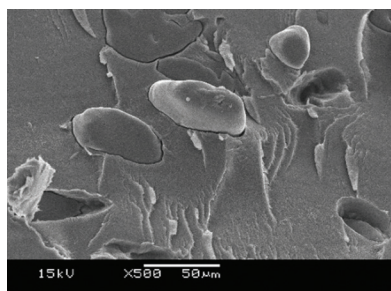
Thermogravimetric curve of RPET and RPET biocomposite is displayed in Figure 4. Data from TGA thermogram are presented in Table 1. The figure shows that neat RPET initially decomposed at around 390.19 $^{\circ}\text{C}$ which was degradation of PET main chain. While, all RPET biocomposites initially decomposed at nearly 100 $^{\circ}\text{C}$ which was evaporation of absorbed moisture. After evaporation, all RPET biocomposites showed three step decompositions. First decomposition started at around 250 - 270 $^{\circ}\text{C}$ which related to decomposition of small molecule i.e., glycerol. Second decomposition was at around 299 - 308 $^{\circ}\text{C}$ which related to TPS degradation. The decomposition around 390 - 400 $^{\circ}\text{C}$ was the degradation of RPET component. Obviously, the presence of TPS reduced the thermal stability of RPET because TPS has less thermal stability than RPET. However, the addition of HMDI can improve thermal stability of 30 TPS/RPET biocomposite due to the improvement of compatibility of TPS and RPET. Moreover, thermal stability of 30 TPS/RPET increased with increment of biochar content.



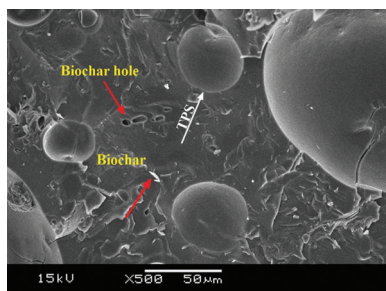
(a) neat RPET



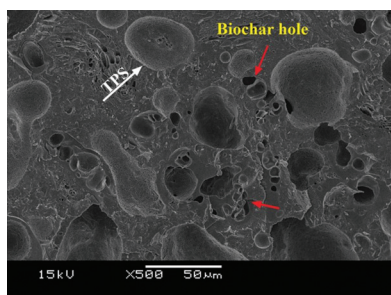
(b) 30 TPS/RPET



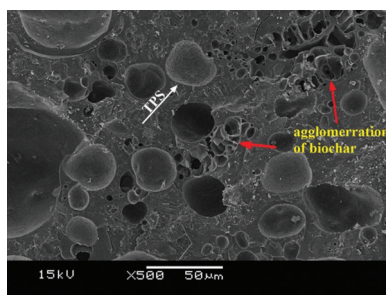
(c) 30 TPS/RPET/ 5 HMDI



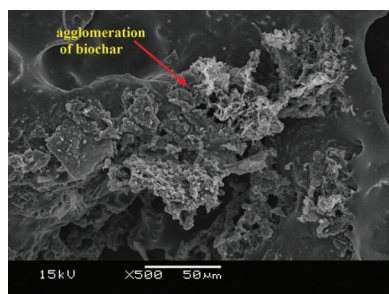
(d) 10 BC



(e) 20 BC



(f) 30 BC



(g) 40 BC

Figure 3 SEM images of neat RPET and RPET biocomposites

Table 1 TGA data RPET and RPET biocomposites

Sample	Td _{1onset} [°C]	Td _{2onset} [°C]	Td _{3onset} [°C]	Char yield at 500 °C [%]
RPET	396.10	-	-	16.43
30 TPS/RPET	254.70	303.71	380.00	15.31
30 TPS/RPET + 5 HMDI	268.00	308.00	390.58	14.63
30 TPS/RPET/ 30 BC + 5 HMDI	267.64	273.00	386.39	29.77
30 TPS/RPET/ 40 BC + 5 HMDI	260.78	270.00	406.00	38.90

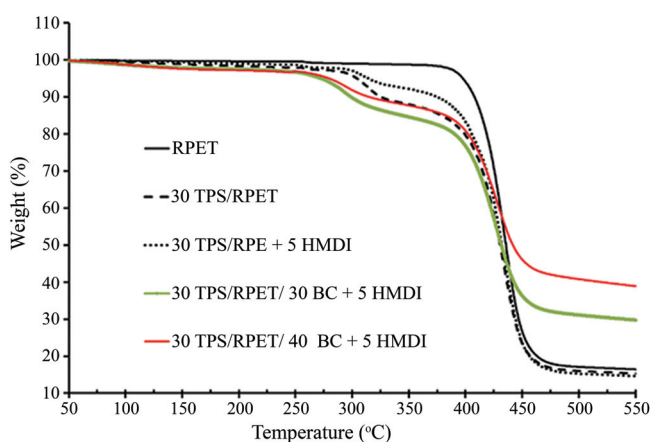
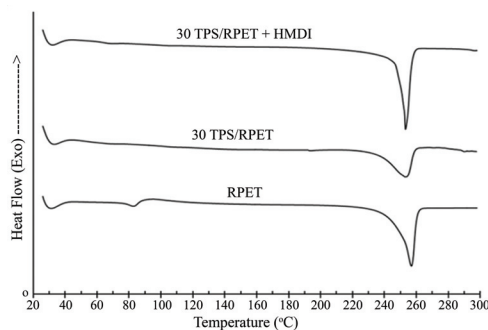


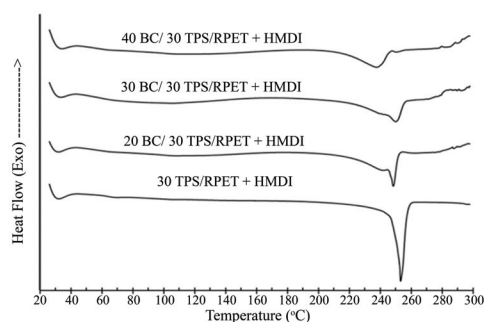
Figure 4 TGA Thermograms of RPET and RPET biocomposites

DSC Thermograms of RPET and all RPET biocomosites are shown Figure 5, while DSC data of all RPET biocomposites are displayed in Table 2. As seen in Figure 5, glass transition temperature (T_g) and melting temperature (T_m) of RPET are exhibited at around 82.60 °C and 256.93 °C, respectively. The DSC thermograms and Table 2 exhibit that the glass transition temperature of RPET dramatically shifted toward a lower temperature (53.40 °C) with the addition of 30 wt% TPS. Besides, the presence of 30 wt% TPS decreased the degree of crystallinity of RPET owing to the low miscibility between RPET and TPS. However, the glass transition temperature of 30 TPS/RPET slightly shifted to a higher temperature (59.60 °C) when HMDI was added. This phenomenon indicated that the addition of HMDI can improve interfacial adhesion between TPS and RPET. On the other hand, there was no significant change in T_m when 30 TPS and HMDI were added. The results are similar to Ferri and co-workers [18], they studied poly(lactic acid) blends with thermoplastic starch by physical blending without compatibilizer. They found that the slight decrement in T_g is representative for poor miscibility between PLA and TPS.

The effects of biochar loading, glass transition temperature, melting temperature and degree of crystallinity of 30 TPS/RPET decreased when biochar loading increased because biochar cannot act as a nucleating agent due to its poor dispersion in RPET matrix. In addition, agglomeration of biochar can be noticed in matrix as seen in Figure 5. The degree of crystallinity results are related to flexural properties of RPET biocomposite film.



(a) 30 TPS/RPET with and without HMDI



(b) BC/ 30 TPS/RPET biocomposites

Figure 5 DSC thermograms of RPET and RPET biocomposites

5. Flexural test

Flexural properties, i.e. flexural strength, flexural modulus, and extension of RPET and biocomposite are shown in Table 3. The table shows that the addition of TPS and biochar contributed to a decrease in flexural properties of RPET. This may be due to the low interfacial adhesion between RPET, TPS, and biochar. Effects of HMDI, 30 TPS/PET biocomposite with HMDI were higher flexural strength, flexural modulus, and extension value than biocomposite without HMDI because HMDI can improve interfacial adhesion between RPET and TPS. In addition, flexural strength, flexural modulus, and extension of 30 TPS/RPET biocomposite decreased when biochar content increased since biochar could not be well dispersed in the RPET matrix. However, it was found that the addition of 20 wt% biochar gave the highest flexural modulus and flexural strength with reasonable extension

value when compared to other concentrations of biochar. The morphological results of fracture surface of 30 TPS/RPET/BC biocomposite were used as supporting evidence.

Table 2 DSC data of RPET and BC/ 30 TPS/RPET biocomposites

Samples	T_g onset [°C]	T_m [°C]	ΔH_m	% Crystallinity
RPET	82.60	256.90	55.42	39.58
30 TPS/RPET	53.40	252.60	48.56	34.28
30 TPS/RPET + 5 HMDI	59.60	250.00	60.14	42.96
30 TPS/RPET/ 20 BC + 5 HMDI	57.60	250.10	45.15	32.22
30 TPS/RPET/ 30 BC + 5 HMDI	57.00	248.80	43.81	30.84
30 TPS/RPET/ 40 BC + 5 HMDI	55.80	237.80	27.6	19.71

Table 3 Flexural properties of RPET and RPET biocomposite

Sample	Flexural Strength [MPa]	Flexural Modulus [MPa]	Extension [mm]
RPET	17.30±3.60	4063±338	2.53±0.55
30 TPS/RPET	8.87±1.48	3482±919	1.30±0.48
30 TPS/RPET + 5 HMDI	9.78±0.90	3822±960	1.73±0.28
30 TPS/RPET/ 10 BC + 5 HMDI	2.74±1.05	702±419	1.00±0.35
30 TPS/RPET/ 20 BC + 5 HMDI	3.27±0.69	1822±504	0.85±0.08
30 TPS/RPET/ 30 BC + 5 HMDI	2.25±1.06	677±373	0.80±0.03
30 TPS/RPET/ 40 BC + 5 HMDI	1.73±0.47	702±444	0.61±0.18

6. Water absorption test

Water absorption ability of neat RPET and all RPET biocomposites is shown in Figure 6. As seen in this figure, neat RPET showed the lowest water absorption value which was less than 1% owing to its hydrophobic characteristic. While, water absorption of 30 TPS/RPET without HMDI was around 6%, higher than that of neat RPET due to the hydrophilic characteristic of TPS. Moreover, the presence of large gaps between RPET and TPS led to the increment of water absorption because water can easily diffuse into samples via the defects such as gaps and voids. On the other hand, the addition of 5 wt% HMDI decreased the water absorption of 30 TPS/RPET since the presence of HMDI resulted in the improvement of compatibility between RPET and TPS, contributing to the reduced gap between RPET and TPS. Considering effect of biochar content, water absorption of 30 TPS/RPET with 5 wt% HMDI increased when biochar content increased. This is because the biochar is a porous material which has a high capacity for absorbing water.

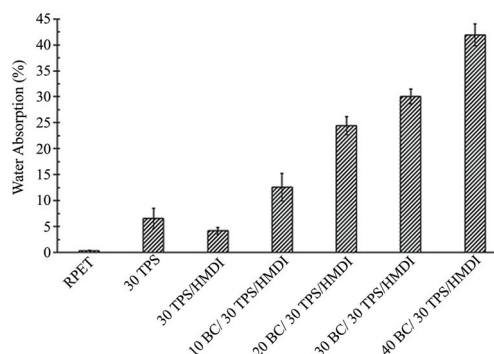


Figure 6 Water absorption of neat RPET and RPET biocomposites

Conclusions

Biocomposites from RPET and TPS reinforced with biochar from durian peels were prepared by internal mixer and compression moulding. HMDI was used as a compatibilizer for TPS and RPET. The addition of starch and HMDI to RPET was fixed at 30 wt% and 5 wt% (based on starch content), respectively. While, biochar content in TPS/RPET was varied from 10 to 40 wt%. The effects of TPS, HMDI, and biochar content on morphology, thermal properties, flexural properties, and water absorption ability of RPET biocomposites were studied. Considering the effects of TPS addition, the presence of 30 wt%TPS decreased mechanical properties and thermal properties of RPET due to low compatibility between TPS and RPET. However, flexural properties and thermal stability of 30 TPS/RPET with 5 wt% HMDI were higher than those of 30 TPS/RPET without HMDI. It may be because there was an improvement of compatibility between TPS and RPET. Moreover, the addition of 30 wt% TPS led to the decrease of glass transition temperature and degree of crystallinity of RPET. While, the addition of 30 wt% TPS did not have a significant effect on melting temperature of RPET. However, it was noticed that the presence of HMDI increased the degree of crystallinity of RPET owing to the improvement of interfacial adhesion between RPET and TPS. SEM image confirmed that the HMDI can improve the interfacial adhesion between RPET and TPS because of the reduction of gap between TPS and RPET. Considering biochar content, the addition of biochar decreased the flexural properties of 30 TPS/RPET. However, the optimal content of biochar was 20 wt% because this content gave the highest flexural strength and flexural modulus with reasonable extension value when compared to other biochar contents. Besides, the degree of crystallinity of 30 TPS/RPET decreased with an increment of biochar content. This because biochar did not act like a nucleating agent due to its poor dispersion in matrix. Likewise, the addition of TPS and biochar led to the increment of water absorption ability of RPET due to hydrophilic

properties of TPS and porosity of biochar. However, the presence of HMDI contributed to the decrease of water absorption ability of 30 TPS/RPET due to the improvement interfacial adhesion between TPS and RPET.

Acknowledgement

The authors would like to thank Phranakhon Rajabhat University for financially supporting this research and the Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University for providing a venue for this study. The authors would also like to thank Enmach Co., Ltd., for providing the mixing machine to conduct this research.

References

- [1] Bhandhubanyong, P. and Sirirangsi, P. (2019). New Trends and Challenges for Agriculture in the Mekong Region: From Food Security to Development of Agri-Businesses. **The Development of Agricultural Tools in Thailand: Case Studies of Rice and Maize**. (Sakata, S.). BRC Research Report, Bangkok Research Center, JETRO Bangkok/IDE-JETRO
- [2] Kan, R., Kungkajit, C., and kaosol, T. (2017). Recycle of Plastic Bag Wastes with Organic Wastes to Energy for RDF Productions. **American Journal of Applied Sciences**. Vol. 14, No. 2, pp. 1103-1110. DOI: 10.3844/ajassp.2017.1103.1110
- [3] Chiu, H. and Hsiao, Y. (2006). Compatibilization of Poly (ethylene terephthalate)/Polypropylene Blends with Maleic Anhydride Grafted Polyethylene-Octene Elastomer. **Journal of Polymer Research**. Vol. 13, Issue 2, pp. 153-160. DOI: 10.1007/s10965-005-9020-z
- [4] Chotthong, B. (2018). **Public-Private-People Partnerships on Plastic Waste Management in Thailand**. EAS Congress. 27-30 November 2018. Lloilo Convention Center, Philipines.
- [5] Wichai-utcha, N. and Chavalparit, O. (2019). 3Rs Policy and Plastic Waste Management in Thailand. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. Vol. 21, Issue 1, pp. 10-22. DOI: 10.1007/s10163-018-0781-y
- [6] Park, S. H. and Kim, S. H. (2014). Poly (ethylene terephthalate) Recycling for High Value Added Textiles. **Fashion and Textiles**. Vol. 1, Issue 1, pp. 1-17. DOI: 10.1186/s40691-014-0001-x
- [7] Soroudi, A. and Jakubowicz, I. (2013). Recycling of Bioplastics, Their Blends and Biocomposites: A Review. **European Polymer Journal**. Vol. 49, Issue 10, pp. 2839-2858. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2013.07.025
- [8] You, X., Snowdon, M. R., Misra, M., and Mohanty, A. K. (2018). Biobased Poly(ethylene terephthalate)/Poly(lactic acid) Blends Tailored with Epoxide Compatibilizers. **American Chemical Society**. Vol. 3, pp. 11759-11769. DOI: 10.1021/acsomega.8b01353

- [9] Threepopnatkul, P., Wongnarat, C., Intolo, W., Suato, S., and Kulsetthanchalee, C. (2014). Effect of TiO₂ and ZnO on Thin Film Properties of PET/PBS Blend for Food Packaging Applications. **Energy Procedia**. Vol. 56, pp. 102-111. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.137
- [10] Kiziltas, A., Gardner, D. J., Han, Y., and Yang, H. (2010). Determining the Mechanical Properties of Microcrystalline Cellulose (Mcc)-filled PET-PTT Blend Composites. **Wood and Fiber Science**. Vol. 42, Issue 2, pp. 165-176.
- [11] Wiącek, A. E., Jurak, M. I., Gozdecka, A., and Worzakowska, M. (2017). Interfacial Properties of PET and PET/Starch Polymers Developed by Air Plasma Processing. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Vol. 532, pp. 323-331. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.04.074
- [12] Nguyen, D. M., Do, T. V. V., Grillet, A., Thuc, H., and Thuc, C. N. H. (2016). Biodegradability of Polymer Film Based on Low Density Polyethylene and Cassava Starch. **International Biodeterioration & Biodegradation**. Vol. 115, pp. 257-265. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.09.004
- [13] Gattin, R., Copinet, A., Bertr, C., and Couturier, Y. (2001). Comparative Biodegradation Study of Starch- and Polylactic Acid-Based Materials. **Journal of Polymers and the Environment**. Vol. 9, pp. 11-17. DOI: 10.1023/A:1016036302871
- [14] Muller, J., González-Martínez, C., and Chiralt, A. (2017). Combination of Poly(lactic) Acid and Starch for Biodegradable Food Packaging. **Materials**. Vol. 10, Issue 8, p. 952. DOI: 10.3390/ma10080952
- [15] Gonzalez-Ausejo, J., Sanchez-Safont, E., Lagaron, J. M., Balart, R., Cabedo, L., and Gamez-Perez, J. (2016). Compatibilization of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)-Poly(lactic acid) Blends with Diisocyanates. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 134, Issue 20, DOI: 10.1002/app.44806
- [16] Idrees, M., Jeelani, S., and Rangari, V. (2018). Three-Dimensional-Printed Sustainable Biochar-Recycled PET Composites. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**. Vol. 6, pp. 13940-13948. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b02283
- [17] Rehraha, D., Reddye, M. R., Novakd, J., Bansode, R., Schimmel, K., Yu, J., Watts, D.W. and Ahmedna, M. (2018). Production and Characterization of Biochars from Agricultural by-Products for use in Soil Quality Enhancement. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. Vol. 108, pp. 301-309. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.03.008
- [18] Ferri, J. M., Garcia, D., Carbonell-Verdu, A., Gimeno, O. F., and Balart, R.. (2017). Poly(lactic acid) Formulations with Improved Toughness by Physical Blending with Thermoplastic Starch. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 135, Issue 4, p. 45751. DOI: 10.1002/app.45751

Characterization of Biochar Derived from Durian Shells by Pyrolysis Process

Sutatip Thonglem^{1*} and Pratthana Intawin²

Received: March 20, 2020; Revised: April 26, 2020; Accepted: April 28, 2020

Abstract

The objective of this research was to study the properties of durian shells biochars prepared by the pyrolysis process. The durian shells were contained in a closed chamber and heated in an electric furnace at different temperatures which varied from 500 °C to 900 °C for 10 hours. After heating, durian shells turned into black color. Density and porosity, surface morphology, elemental compositions, and crystalline phases of biochars were investigated by Archimedes immersion technique, scanning electron microscope (SEM), Energy dispersive x-ray spectrometry (EDX) and X-ray diffractometer (XRD), respectively. An increase in pyrolysis temperature led to yield reduction and an increase in the bulk density of biochars. SEM analysis showed the distribution of pore on all biochars fractures with similar apparent porosity values of more than 70%. The main elements in all biochars contained carbon (C) and oxygen (O), which were studied by EDX analysis. XRD results showed phase formation of carbon in biochar, which could form both amorphous and semi-crystalline phases. While oxygen could be composed in other elements in biomass through many forms of mineralogical compositions as CaCO_3 (Calcite), KHCO_3 (kalicinite), and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Moreover, the alkali lignin phase appears in biochar at 500 °C and 600 °C conditions because of a highly cross-linked structure of the lignin. The CaCO_3 and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ phases could decompose at low pyrolysis temperature, but KHCO_3 phase formed at high temperatures hence the thermal stability of the KHCO_3 phase was higher than CaCO_3 and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ phases.

Keywords: Durian Shells; Biochar; Carbon; Pyrolysis Process

¹ Faculty of Science and Technology, Phranakorn Rajabhat University, Bangkok

² Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani

* Corresponding Author E - mail Address: sutatip.t@pnru.ac.th

Introduction

Currently, severe problems throughout the world are energy crisis, environmental pollution, and global warming. The utilization of clean energy sources and the development of renewable energy sources can be considered as good choices for alleviating these problems. The synthesis of energy storage materials used in supercapacitors and Li-ion batteries is essential and challenging [1]. Carbon-based materials fabricated to electrodes show to achieve high electrical conductivity, chemical stability, and power density in superconductors. The advanced carbon materials such as carbon nanotube and graphene show high effectiveness for both electrochemical and hybrid supercapacitors. These carbon materials however, have limitations of high cost and involve highly toxic oxidants for synthesis methods [2]. The objective of this research is to produce carbon-based materials which show a porous structure with a high surface, high conductivity, suitable pore size distribution, and long-term cyclability from low-cost raw materials by simple synthesis methods for use as electrodes.

Biomass is a low-cost raw carbon material with great potential for synthesizing various carbon materials, and it can be converted into biofuels for use as alternative energy sources. A wide range of biomass are derived from all types of biological resources such as plants, animals, and microbes [3]. There are many biomasses from agricultural waste such as coconut shells, rice husks, cane bagasse, bamboo, palm shell, and durian shell in Thailand. These wastes are raw carbon materials that can be converted into biochar, which is carbon materials.

Biochar is a carbon-rich material produced from biomass by thermochemical conversion as dry carbonization, pyrolysis (gasification), and hydrothermal carbonization process. Pyrolysis is the most common method for producing biochar, this method can generate biochar by heating biomass under a limited supply of oxygen. There are two types of pyrolysis processes: slow pyrolysis and fast pyrolysis, depending on the heating rate and soaking time. The difference between the two types of processes is the yield of char and tar. Slow pyrolysis produce biochar by heating biomass at a low heating rate and long soaking time, this process gives high yield biochar at about 20 - 50%. Fast pyrolysis produce biochar at a high heating rate (above 200 °C/min) and short soaking time (less than 10 seconds), this process gives a high yield of tar but low yield biochar at about 10 - 20% [1], [3] - [4]. There are three main components of biomass as cellulose, hemicellulose, and lignin at about 40 - 60%, 20 - 40%, and 10 - 25%, respectively. In the cell walls of plants, cellulose is organized into microfibril, interrupted by hemicellulose, and surrounded by lignin matrix. Cellulose, a natural linear polymer, is the major constituent, has strong fibers. Hemicelluloses

have a random amorphous structure with little strength, while lignin is a highly cross-linked and three-dimensional structure with high strength. The pyrolysis of biomass can be divided into four individual stages with the decomposition of moisture, hemicellulose, cellulose, and lignin, respectively [5] - [7].

The applications of biochar have been studied and reviewed extensively, and are applied to agricultural (soil amendment) and environmental (inorganic pollutant removal) benefits. For example, the potentials of porous and nutrients-rich of biochar to nutritionally enrich soil and in the removal of the cationic compounds from water [8] - [11]. Moreover, most of the biochars from agricultural waste are carbon materials with a porous structure; these properties are important properties of high-performance electrode materials [12] - [18]. Among the porous biochar from agricultural waste in the study of Daosukho, S., Kongkeaw, A., and Oengeaw, U. [10] found that carbon yield percentage of durian shell biochar is about 57%, it is less than the carbon yield percentages of bamboo and palm shell biochars which are about 65%. But the durian shell biochar showed higher porosity on the surface than the other biochars. Therefore the durian shell biochar is an interesting materials to be used in high-performance electrode materials.

The objective of this research was to study the effects of pyrolysis temperature on the properties of durian shell biochar, a porous carbon material to be used in high-performance electrode materials in the next study.

Experiment

1. Manufacturing

Durian shell biomass from Uttaradit province, Thailand was chosen for this research. Durian shell biochars were produced from durian shell biomass by the pyrolysis process, according to the following steps. The biomasses were cleaned in water and dried at 100 °C for 24 hours in the oven to eliminate moisture. Then, the dried-biomasses were stored into a closed - alumina chamber which did not allow air to enter from outside, and then heated in the absence of oxygen at 500 - 900 °C with a low heating rate (10 °C/min) for 10 hours in the electric furnace.

2. Characteristics

Various instruments and techniques were chosen to study the characteristics of durian shell biochar as follows:

The percent yield (*%Yield*) is the percent ratio of a product yield and raw materials yield. It was calculated from the weight of the product as biochar divided by the weight of raw material as biomass multiplied by 100%. An electronic balance (Sartorius:

Practum224-1s) was used to weigh all the samples equation (1).

$$\%Yield = \frac{Weight\ of\ Product}{Weight\ of\ Raw\ Material} \times 100 \quad (1)$$

The bulk density (ρ) and apparent porosity (%AP) of all biochars were determined by the Archimedes immersion technique with ASTM C20 standard test methods. This technique involves placing a container of the liquid under test on the electronic balance and determining the specific gravity of samples using the plummet (Sartorius: Practum224-1s with YDK03 density kit). Both values are calculated from the dry weights (D), saturated weight (W), and suspended weight (S) of biochars. Acetone which has a density of 0.7857 g/cm^3 (ρ_0) was the chosen medium liquid for this work. The biochars were placed in acetone, sonicated in an ultrasonic bath for 3 hours, and immersed for 12 hours before weighing. The saturated and suspended weights are the weights of the biochars that were weighed in air and acetone, respectively. The formulas for these calculations are as follows equation (2) - (3):

$$\rho = \frac{D}{W - S} \times \rho_0 \quad (2)$$

$$\%AP = \frac{W - D}{W - S} \times 100 \quad (3)$$

The morphologies and pore structure were observed by scanning electron microscopy (SEM: JEOL, JSM-IT300). The cross-section areas of all biochars were coated with gold, Au, metal before examination using the signal of secondary electrons images. The elemental compositions were analyzed by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), which was used together with scanning electron microscopy. Moreover, X-ray diffractometer (XRD: Rigaku, Miniflex II) was used for the identification of crystalline phases.

Results and Discussion

1. Appearances of durian shell biomass and biochars

The appearance of durian shell biomass and biochars are shown in Figure 1. The biomasses were changed to black biochars completely and the weight loss happening occurred due to fiber decomposition of biomass through pyrolysis process.

The chemical analysis from the research of Lubis, R., Saragih, S. W., Wirjosentono, B., and Eddyanto, E. [19] showed that the fiber of durian shell biomass contains

57 - 64% cellulose, 30.7% hemicellulose, and 13.6% lignin. The decomposition of hemicellulose and cellulose occurred quickly, with the weight loss of hemicellulose happening at 220 - 315 °C and that of cellulose happening at 315 - 400 °C. Lignin was more difficult to decompose and the decomposition happened at a wide temperature range between 160 - 900 °C. The main gas products from this process were CO₂, CO, and CH₄ [5]. Therefore, the tendency of biochars to yield decreased with an increase in pyrolysis temperature (Table 1) due to the increase of the decomposition of lignin.

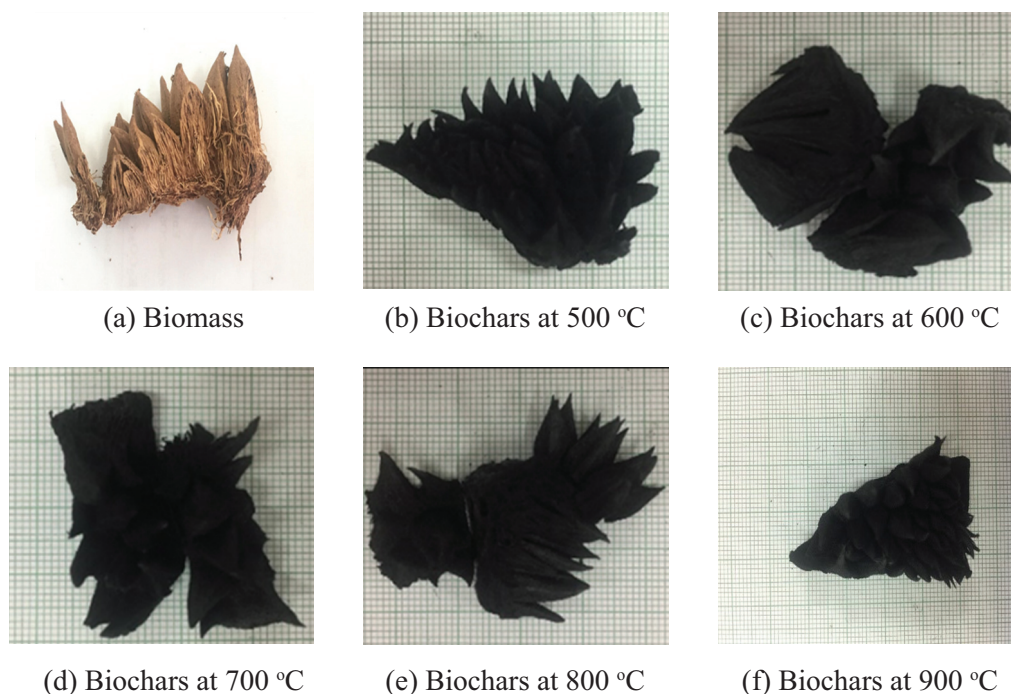


Figure 1 Appearances of durian shell biomass and biochars

Table 1 Percent yield of the biochars at different pyrolysis temperatures

Pyrolysis temperature (°C)	Yield (%)
500	46.96
600	41.43
700	37.72
800	34.44
900	28.31

2. Density and porosity

The bulk density and apparent porosity of all biochars are shown in Figure 2. The durian shell biochars have a low density of about 0.2 - 0.4 g/cm³, and the density value increased with an increase in pyrolysis temperature. It can be seen that all biochars show similar apparent porosity values of more than 70%. The durian shell biochars showed high porosity, which is one of the important properties of materials that can be developed into high-performance electrode materials.

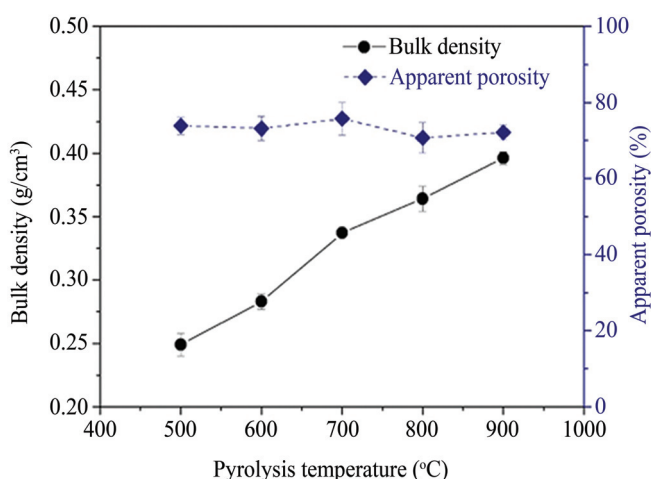


Figure 2 Bulk density and apparent porosity of the biochars at different pyrolysis temperatures

3. Morphology

The cross-section SEM images of all biochars at 1000x magnification are shown in Figure 3. Besides, the average pore size of the biochars was analyzed from these SEM images using ImageJ software. It was found that the biochars had a highly porous structure with numerous hollow cells, which were inherited from the original biomass. The average pore size increased with an increase in pyrolysis temperature (Table 2). An increase in pyrolysis temperature can also lead to the widening of pore size due to breaking down of the walls between adjacent pores [3].

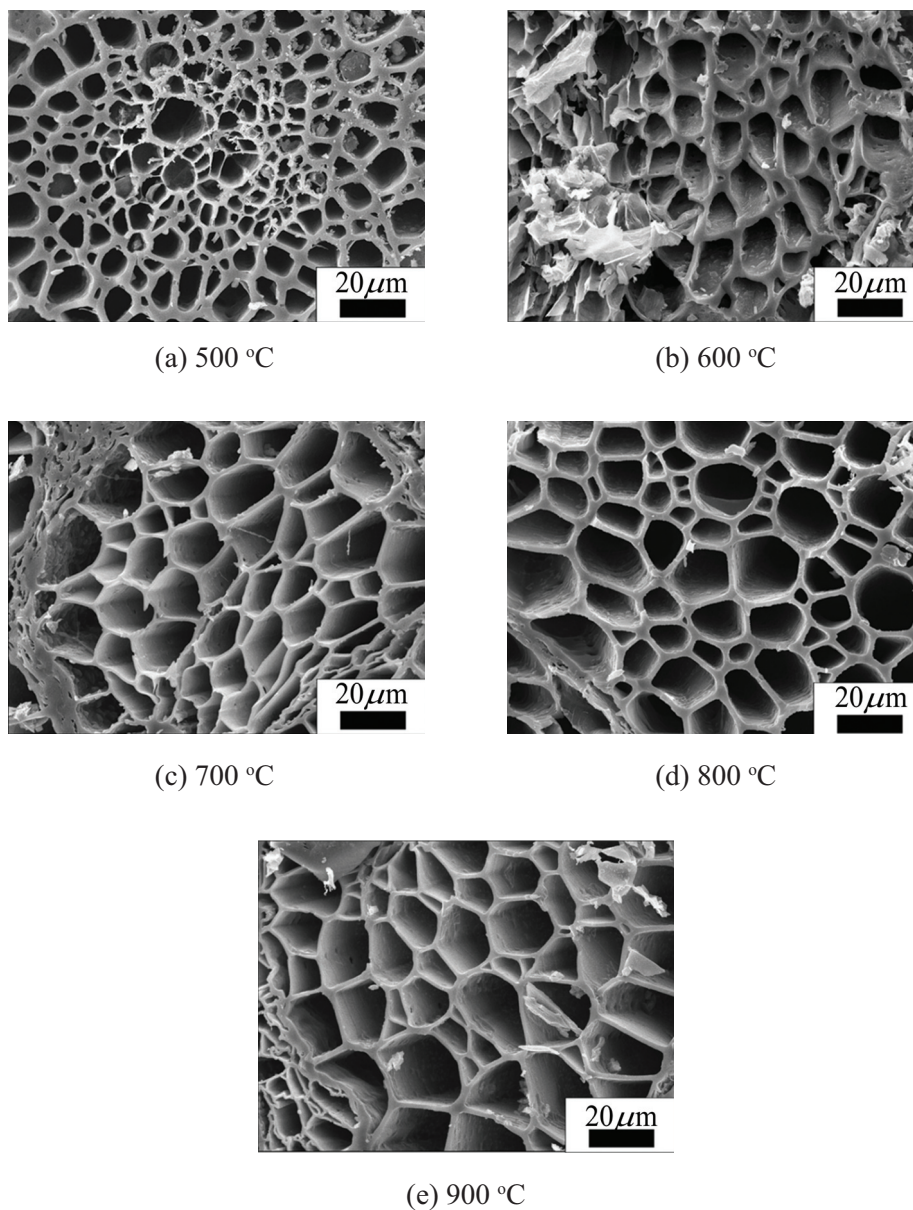
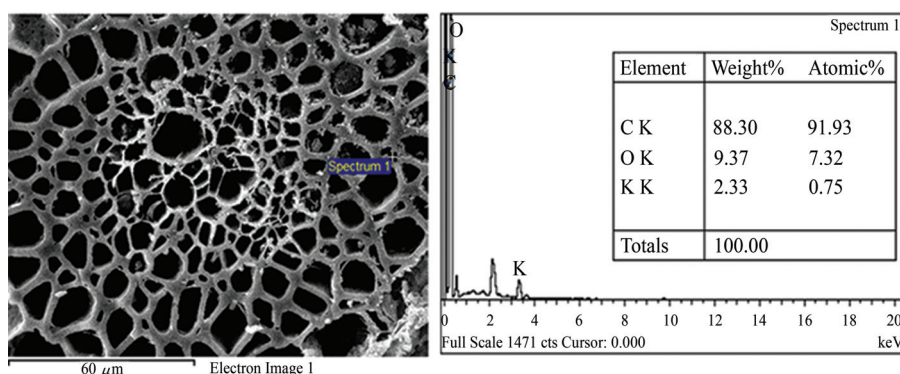


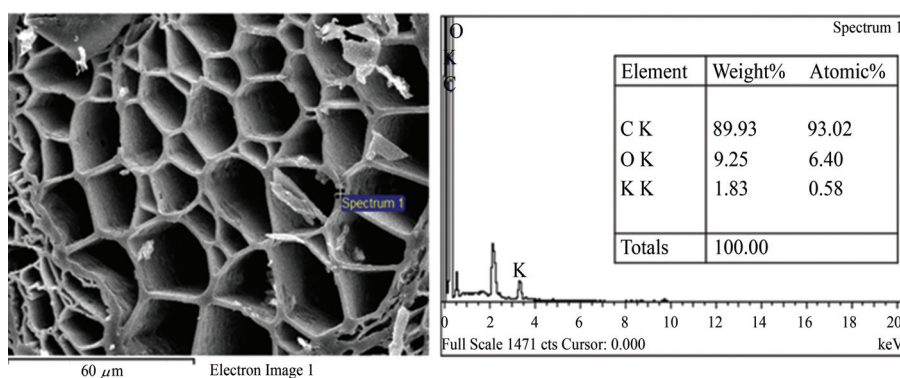
Figure 3 The cross-section SEM images of durian shell biochars at different pyrolysis temperatures at 1000x magnification

Table 2 Average pore size of the biochars at different pyrolysis temperatures

Pyrolysis temperature (°C)	Average pore size (μm)
500	7.28 ± 2.36
600	8.31 ± 3.05
700	13.02 ± 4.45
800	13.69 ± 5.00
900	15.07 ± 5.08



(a) 500 °C



(b) 900 °C

Figure 4 The morphologies at 1000x magnification, EDX spectrums and elemental compositions of the biochars which were prepared at 500 °C and 900 °C

4. Elemental compositions

Figure 4 shows the morphologies at 1000x magnification, EDX spectrums, and elemental compositions of the biochars which were prepared at 500 °C and 900 °C. It was found that the EDX spectrums of both biochars showed similar results. The main element

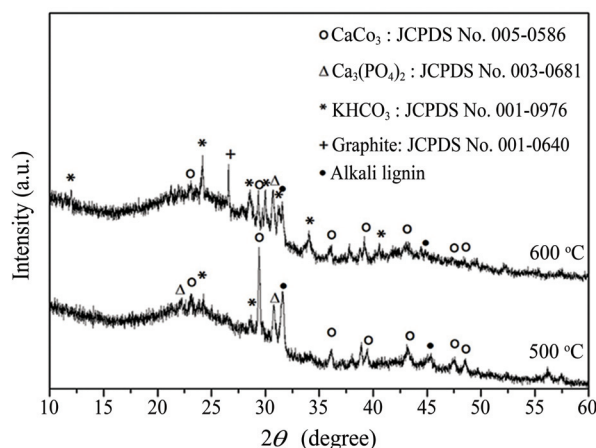
in these biochars was carbon (C) at about 88 - 90 wt%. Also, the spectrums of these biochars contained some elements, including oxygen (O) and potassium (K). These results were consistent with the other biochar conditions. A previous study found other elements in durian biochar such as phosphorus (P), magnesium (Mg), calcium (Ca), aluminum (Al), sulfur (S), Iron (Fe), Manganese (Mn) and Arsenic (As) [9]. These elements could be composed with oxygen or chlorine in the forms to oxides, carbonates, phosphates or chloride structures such as KH_2PO_4 (Archerite), CaCO_3 (Calcite), KCaCl_3 (Chlorocalcite), KHCO_3 (kalicinite), $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Struvite) and KCl (Sylvite) [9] - [10]. X-ray diffraction techniques confirmed these crystalline phases of biochars in this work.

5. Crystalline phases

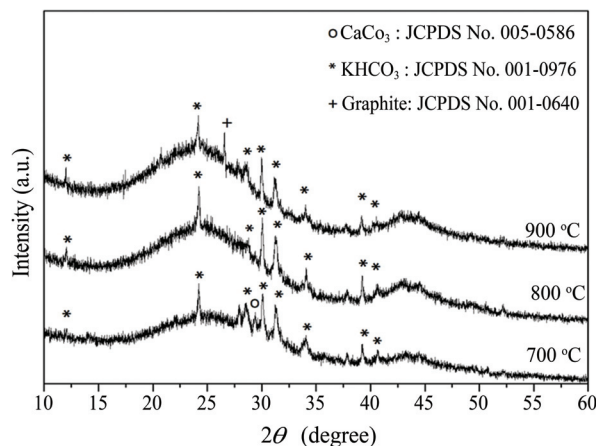
The XRD patterns of all biochars are shown in Figure 5. Broad peaks atypical at 2θ about $20 - 30^\circ$ and $40 - 50^\circ$ are observed in the XRD pattern of 500°C , 700°C and 800°C biochars conditions, which indicated the amorphous state of carbon in biochars. While, the XRD patterns of 600°C and 900°C biochars conditions indexed sharp peak of graphite crystal at $2\theta = 26.5^\circ$ (002) and broad peaks atypical at 2θ about $40 - 50^\circ$ of amorphous state so, these conditions indicated semi-crystalline state of carbon. Therefore the formation of carbon phases in biochar can occur in both amorphous and semi-crystalline phases. A review of Lin, W-J., Jiang, H., and Yu, H-Q. [3] said that this semi-crystalline structure occurred from the natural structure of biobased polymer derived from the biomass, which has mainly amorphous structure, and some local crystalline structure of highly conjugated aromatic sheet cross-linked randomly. Moreover, the biochar crystallite can increase in size and the entire structure becomes more ordered with increasing pyrolysis temperatures.

Also, the XRD patterns of 500°C and 600°C conditions (Figure 5(a)) indexed sharp peaks of many mineralogical compositions as CaCO_3 (Calcite), KHCO_3 (kalicinite) and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Moreover, the sharp peak at $2\theta = 31.6^\circ$ and $2\theta = 45.4^\circ$ are indexed on XRD patterns of only these biochar conditions. These peaks correspond with alkali lignin sharp peak in the research of Ye, X-X., Luo, W., Lin, L., Zhang, Y-Q., and Liu, M-H. [20], which studied the preparation of lignin-based dye dispersant from alkali lignin of Masson pine sulfite pulping liquor. Lignin is hard to decompose due to the highly cross-linked and three-dimensional structure. The thermogravimetric analysis (TGA) curve in the research of Yao, B., Kolla, P., Koodali, R., Balaranjan, S., Shrestha, S., and Smirnova, A. [7] found that the decomposition of the original lignin starts at 350°C and at 480°C almost 80% of lignin is decomposed. The TGA curve in the research of Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., and Zheng, C. [5] found that the decomposition of lignin happened at a wide temperature

range between 160 - 900 °C. The durian shell fiber consists of approximately 13.6% lignin [19]. So, the possibility of lignin decomposition is not complete at 500 °C and 600 °C.



(a) 500 °C and 600 °C



(b) 700 °C, 800 °C and 900 °C

Figure 5 The XRD patterns of the biochars at different pyrolysis temperatures

The XRD patterns of 700 - 900 °C conditions (Figure 5(b)) indexed the sharp peaks of KHCO_3 , which was the major phase. Considering the XRD patterns of all biochars, it was found that the pyrolysis temperature affects the type of phases in biochars. The CaCO_3 phase was the major phase at 500 °C, the sharp peak intensity of this phase decreased with increasing temperatures and disappeared with the heating temperature of 800 °C. The results indicated the decomposition of the CaCO_3 phase at a high temperature of biochar. The decomposition of the CaCO_3 phase can be confirmed by the TGA curve of CaCO_3 particles in the research of Babou-Kammoe, R., Hamoudi, S., Larachi, F., and

Belkacemi, K. [21]. The weight loss of CaCO_3 began to occur at the decomposition temperature of 552 °C and finished at about 740 °C, the products of this decomposition are CaO and CO_2 . The $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ phase appeared only in XRD patterns of 500 °C and 600 °C conditions. The TGA curves of calcium phosphate phase in the research of Granados-Correa, F., Bonifacio-Martínez, J., and Serrano-Gómez, J. [22] showed the calcium phosphate was stable at temperatures below 600 °C and the phosphate ion decomposition observed at 642 and 697 °C. While the KHCO_3 phase formed at high temperature and a thermal stability higher than CaCO_3 and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ phases.

Conclusion

The fibers of durian shell biomass contain cellulose, hemicellulose, and lignin. All of these fibers can be decomposed to biochars, which are carbon-rich materials with high porosity, by pyrolysis process. The decomposition of hemicellulose and cellulose fibers occurred quickly at low temperatures, but lignin is hard to decompose due to its highly cross-linked structure, which could use heating temperature of more than 600 °C. The natural structure of biobased polymer derived from the biomass can be formed to both amorphous and semi-crystalline phases of carbon. While, oxygen could be composed in other elements in biomass through many forms of mineralogical compositions as CaCO_3 , KHCO_3 , and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. The CaCO_3 and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ phases can be decomposed at pyrolysis temperature lower than 700 °C, but the KHCO_3 phase is formed at high temperature and has a thermal stability higher than CaCO_3 and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ phases.

Acknowledgment

The authors would like to thank Phranakhon Rajabhat University for funding this research. The authors would also like to thank the Electroceramics laboratory, department of physics and materials science, Chiang Mai University, for providing the advanced instruments for fabrication in this research. Finally, the authors would like to acknowledge Asst. Prof. Dr. Sukum Eitssayeam and Ms. Katsirin Sangmanee for offering recommendations.

References

- [1] Xiu, S., Shahbazi, A., and Li, R. (2017). Characterization, Modification, and Application of Biochar for Energy Storage and Catalysis: A Review. **Trends in Renewable Energy**. Vol. 3, No. 1, pp. 86-101. DOI: 10.17737/tre.2017.3.1.0033

- [2] Jin, H., Wang, X., Gu, Z., and Polin, J. (2013). Carbon Materials from High Ash Biochar for Supercapacitor and Improvement of Capacitance with HNO₃ Surface Oxidation. **Journal of Power Sources**. Vol. 236, pp. 285-292. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.02.088
- [3] Lin, W-J., Jiang, H., and Yu, H-Q. (2015). Development of Biochar-Based Functional Materials: Toward a Sustainable Platform Carbon Material. **Chemical Reviews**. Vol. 115, pp. 12251-12285. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00195
- [4] Lehmann, J., Amonette, J. E., and Roberts, K. (2010). Role of Biochar in Mitigation of Climate Change. **Handbook of Climate Change and Agroecosystems**. pp. 343-363. DOI: 10.1142/9781848166561_0018
- [5] Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., and Zheng, C. (2007). Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. **Fuel**. Vol. 86, pp. 1781-1788. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013
- [6] Penjumras, P., Abdul Rahman, R. B., Talib, R. A., and Abdand, K. (2014). Extraction and Characterization of Cellulose from Durian Rind. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**. Vol. 2, pp. 237-243. DOI: 10.1016/j.aaspro.2014.11.034
- [7] Yao, B., Kolla, P., Koodali, R., Balaranjan, S., Shrestha, S., and Smirnova, A. (2017). Laccase-Natural Mediator Systems for “Green” Synthesis of Phenolic Monomers from Alkali Lignin. **Sustainable Energy Fuels**. Vol. 1, Issue 7, pp. 1573-1579. DOI: 10.1039/C7SE00209B
- [8] Prakongkep, N., Gilkes, R. J., and Wiriyaakitnateekul, W. (2015). Forms and Solubility of Plant Nutrient Elements in Tropical Plant Waste Biochars. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. Vol. 178, Issue 5, pp. 732-740. DOI: 10.1002/jpln.201500001
- [9] Prakongkep, N., Gilkes, R. J., and Wiriyaakitnateekul, W. (2014). Agronomic Benefits of Durian Shell Biochar. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. Vol. 24, No. 1, pp. 7-11. DOI: 10.14456/jmmm.2014.2
- [10] Daosukho, S., Kongkeaw, A., and Oengeaw, U. (2012). The Development of Durian Shell Biochar as a Nutrition Enrichment Medium for Agricultural Purpose: Part 1 Chemical and Physical Characterization. **Bulletin of Applied Sciences**. Vol. 1, No. 1, pp. 133-141
- [11] Tsai, W-T., Hsu, C-H., and Lin, Y-Q. (2019). Highly Porous and Nutrients-Rich Biochar Derived from Dairy Cattle Manure and Its Potential for Removal of Cationic Compound from Water. **Agriculture**. Vol. 9, pp. 114-123
- [12] Qie, L., Chen, W., Xu, H., Xiong, X., Jiang, Y., Zou, F., Hu, X., Xin, Y., Zhang, Z., and Huang, Y. (2013). Synthesis of Functionalized 3D Hierarchical Porous Carbon for High-Performance Supercapacitors. **Energy and Environmental Science**. Vol. 6, Issue 8, pp. 2497-2504. DOI: 10.1039/C3EE41638K
- [13] Zhang, K., Shang, Z., Wu, S., Wang, J., Sheng, W., Shen, X., and Zhu, M. (2017). Commercialized Benzoxazine Resin-Derived Porous Carbon as high Performance Electrode Materials for Supercapacitor. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**. Vol. 27, Issue 5, pp. 1423-1429. DOI: 10.1007/s10904-017-0596-7

- [14] Niu, J., Shao, R., Liang, J., Dou, M., Li, Z., Huang, Y., and Wang, F. (2017). Biomass-Derived Mesopore-Dominant Porous Carbons with Large Specific Surface Area and High Defect Density as High Performance Electrode Materials for Li-ion Batteries and Supercapacitors. **Nano Energy**. Vol. 36, pp. 322-330. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.04.042
- [15] Li, J., Gao, Y., Han, K., Qi, J., Li, M., and Teng, Z. (2019). High Performance Hierarchical Porous Carbon Derived from Distinctive Plant Tissue for Supercapacitor. **Scientific Reports**. Vol. 9, p. 17270. DOI: 10.1038/s41598-019-53869-w
- [16] Zhu, Y., Fang, T., Hua, J., Qiu, S., Chu, H., Zou, Y., Xiang, C., Huang, P., Zhang, K., Lin, X., Yan, E., Zhang, H., Xu, F., Sun, L., and Zeng, J-L. (2019). Biomass-Derived Porous Carbon Prepared from Egg White for High-performance Supercapacitor Electrode Materials. **Chemistry Select**. Vol. 4, Issue 24, pp. 7358-7365. DOI: 10.1002/slct.201901632
- [17] Phiri, J., Dou, J., Vuorinen, T., Gane, P. A. C., and Maloney, T. C. (2019). Highly Porous Willow Wood-Derived Activated Carbon for High-Performance Supercapacitor Electrodes. **ACS Omega**. Vol. 4, pp. 18108-18117. DOI: 10.1021/acsomega.9b01977
- [18] Wei, M.-M., Li, W.-P., Weng, J., Liu, Y.-Q., Li, S.-R., Ye, Y.-Y., Wang, M., and Wang, D. (2019). Mesopore-Dominant Porous Carbon Derived from Bio-Tars as an Electrode Material for High-Performance Supercapacitors. **Journal of Saudi Chemical Society**. Vol. 23, Issue 7, pp. 958-966. DOI: 10.1016/j.jscs.2019.04.002
- [19] Lubis, R., Saragih, S W., Wirjosentono, B., and Eddyanto, E. (2018). Characterization of Durian Rinds Fiber (*Durio zubinthinus, murr*) from North Sumatera. **AIP Conference Proceedings**. Vol. 2049, Issue 1, pp. 020069. DOI: 10.1063/1.5082474
- [20] Ye, X-X., Luo, W., Lin, L., Zhang, Y-Q., and Liu, M-H. (2017). Quaternized Lignin-Based Dye Dispersant: Characterization and Performance Research. **Journal of Dispersion Science and Technology**. Vol. 38, Issue 6, pp. 852-859. DOI: 10.1080/01932691.2016.1207545
- [21] Babou-Kammoe, R., Hamoudi, S., Larachi, F., and Belkacemi, K. (2012). Synthesis of CaCO₃ Nanoparticles by Controlled Precipitation of Saturated Carbonate and Calcium Nitrate Aqueous Solutions. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. Vol. 90, Issue 1, pp. 26-33. DOI: 10.1002/cjce.20673
- [22] Granados-Correa, F., Bonifacio-Martínez, J., and Serrano-Gómez, J. (2010). Synthesis and Characterization of Calcium Phosphate and Its Relation to Cr (VI) Adsorption Properties. **Revista internacional de Contaminación Ambiental**. Vol. 26, No. 2, pp. 129-134

การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวา

Design and Construction of Water Hyacinth Chopper

ธันวาคมส กาศสนุก¹ และคงเดช พะสีนาม^{1*}

Thanwamas Kassanuk¹ and Khongdet Phasinam^{1*}

Received: September 26, 2019; Revised: April 7, 2020; Accepted: April 12, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวา โดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวา และ 2) การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องสับย่อยผักตบชวา โดยเครื่องที่ถูกออกแบบจะสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก เนื่องจากเป็นเครื่องขนาดเล็ก และมีล้อสำหรับเคลื่อนย้าย ซึ่งเครื่องที่ออกแบบนี้ใช้เครื่องยนต์เบนซิน ขนาด 6.5 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนตามขนาดที่กำหนดไว้ ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องสับย่อยผักตบชวา พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับเครื่องสับย่อยผักตบชวาเท่ากับ 2,000 รอบต่อนาที ระยะเวลาเฉลี่ยในการสับย่อยเท่ากับ 28.65 วินาที ขนาดของชิ้นผักตบชวาที่ถูกสับย่อยเฉลี่ยเท่ากับ 13.45 มิลลิเมตร เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียเฉลี่ยเท่ากับ 3.30 เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะสูงสุดเท่ากับ 628.27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดเท่ากับ 96.46 เปอร์เซ็นต์ โดยขนาดชิ้นส่วนของผักตบชวาที่ผ่านการสับย่อยมีขนาดน้อยกว่า 4 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำไปทำปุ๋ยหมักได้และมีต้นทุนในการสับย่อย 0.36 บาทต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ : ผักตบชวา; วัชพืชน้ำ; เครื่องสับย่อย

¹ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก

¹ Faculty of Food and Agricultural Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok

* Corresponding Author E - mail Address: phasinam@psru.ac.th

Abstract

The objective of this research is to design and construct of water hyacinth chopper. The study was divided into two parts viz. 1) to design and construct of water hyacinth chopper and 2) to test the competency of the chopper. The chopper was designed to be portable, so it is both compact and wheels for moving. The engine is a 6.5 horse power gasoline engine to control the chopped small water hyacinth into the specified blade sets. The results from the capacity test of water hyacinth mash were found that the optimal speed for the water hyacinth was 2,000 rpm. The average time for sub chipping was 28.65 seconds. The size of the water hyacinth was 13.45 mm. The average loss was 3.30 percent. The maximum efficiency was 628.27 kilograms per hour and the maximum efficacy was 96.46 percent. The size of water hyacinth after chopped, smaller than 4 cm. It can be used to make compost. The economic analysis showed that the machine was 0.36 baht per kilogram.

Keywords: Water Hyacinth; Aquatic Weed; Chopper

บทนำ

ผักตบชวา (Water Hyacinth) เป็นวัชพืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม เป็นพืชที่มีพืชนอย สามารถอยู่ได้ทั้งในน้ำนิ่งและน้ำไหล มีการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วทั้งทางเมล็ดและการแตกหน่อ หากเจริญเติบโตอยู่ในน้ำนิ่งจะสามารถแตกหน่อขยายจนเป็นแพปกคลุมพื้นที่เป็นวงกว้าง ส่งผลให้น้ำในแหล่งน้ำนั้นขาดออกซิเจน แสงแดดไม่สามารถส่องลงสู่ได้ เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และทำให้เกิดการเน่าเสียของน้ำ [1] ซึ่งทำให้ประชาชนไม่สามารถนำน้ำไปใช้สำหรับการอุปโภคบริโภคได้ หากผักตบชวาเจริญเติบโตในทางน้ำไหล คลอง แม่น้ำ หรือคลองส่งน้ำในระบบชลประทานต่าง ๆ ผักตบชวาจะกีดขวางการระบายน้ำ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำช้าลง โดยเฉพาะบริเวณประตูระบายน้ำต่าง ๆ ในฤดูน้ำหลาก หากไม่มีการกำจัดผักตบชวา จะทำให้เกิดน้ำท่วมขัง เนื่องจากผักตบชวากีดขวางการระบายน้ำ ส่งผลทำให้ประชาชนเดือดร้อน มีความเสียหายทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม [2] นอกจากนั้นผักตบชวายังสร้างปัญหาต่อการสัญจรทางน้ำและยังเป็นท่อน้ำของพาหะนำโรคและสัตว์มีพิษต่าง ๆ อีกด้วย [3]

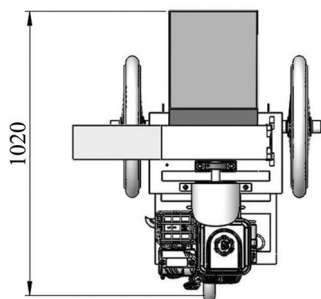
การจัดการผักตบชวามีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้สารเคมีหรือสารปราบวัชพืชฉีดพ่น ซึ่งสามารถกำจัดผักตบชวาได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อผักตบชวตายลงจะส่งผลให้เกิดการเน่าเสียของน้ำและแหล่งน้ำมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสารเคมีหรือสารปราบวัชพืช [3] อีกวิธีการที่นิยมคือ การขุดลอกผักตบชวาคด้วยเครื่องจักรและแรงงานคน ซึ่งมีประสิทธิภาพดี แต่เมื่อเวลาผ่านไปผักตบชวาจะกลับมาเจริญเติบโตได้เหมือนเดิม จึงส่งผลให้เสียงบประมาณหรือค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการจัดการกับผักตบชวา [4] และหากมีการจัดการที่ไม่ดีพอ เมื่อนำผักตบชวาไปกองทิ้งไว้บริเวณริมแหล่งน้ำจะทำให้เกิดการเน่าเสียและเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์และแมลงที่อาจจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ จึงมีแนวทางในการนำเอาผักตบชวามาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น การทำอัฐมุลเบจากผักตบชวา การนำผักตบชวามาใช้เป็นพลังงานทดแทน

และการผลิตเอทานอลจากวัชพืชน้ำ เป็นต้น [5] นอกจากนั้นการจัดการผักตบชวาอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การนำเอาผักตบชวามาหมักทำปุ๋ยชีวภาพ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและการลงทุนไม่สูง โดย Suttiwattana, P. and Wongkaew, D. [6] รายงานว่าผักตบชวาที่เหมาะสมสำหรับการทำปุ๋ยหมักชีวภาพควรมีขนาดไม่เกิน 4 เซนติเมตร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวา โดยผักตบชวาที่ถูกสับย่อยสามารถนำไปทำปุ๋ยหมักใช้ในการเกษตรได้ [7] ซึ่งจะเป็นการสร้างอาชีพเสริมให้กับเกษตรกร และยังช่วยลดจำนวนผักตบชวาในแหล่งน้ำที่เป็นปัญหาได้อีกทางหนึ่งด้วย

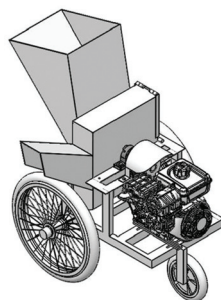
อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวาถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

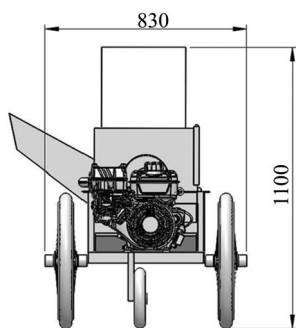
ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวา โดยการออกแบบเครื่องสับย่อยผักตบชวาจะใช้โปรแกรมทางวิศวกรรมช่วยในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อให้เห็นมิติที่เหมือนจริงทั้งรูปร่างและส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง ซึ่งจะช่วยทำให้การสร้างเครื่องและการติดตั้งส่วนประกอบมีความถูกต้องและสอดคล้องกับการทำงาน โดยเครื่องสับย่อยผักตบชวาและใบมีดที่ออกแบบด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรมแสดงในรูปที่ 1 - 3 ตามลำดับ ส่วนการสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวาประกอบด้วย โครงสร้างของเครื่องถูกสร้างจากเหล็ก SS400 (Mild Steel) หนา 2 มิลลิเมตร มีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงเท่ากับ 83 102 และ 110 เซนติเมตร ตามลำดับ และติดตั้งใบมีดที่ทำจากเหล็กขนาดความกว้าง 73 มิลลิเมตร ยาว 180 มิลลิเมตร และหนา 6 มิลลิเมตร จำนวน 2 ใบ วางตัวตามแนวรัศมีที่ 0 และ 180 องศา เพื่อให้เกิดความสมดุลและมีแรงบิดสูงที่สุด โดยมีมุมคมใบมีด (Knife Bevel Angle) เท่ากับ 30 องศา เนื่องจากเป็นมุมที่เหมาะสมสำหรับการตัดชีวมวล [8] และวางทำมุม 5 องศา กับหัวสับชนิดจานกลม (Flywheel Type) ซึ่งเป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสับย่อย [9] โดยหัวสับ (Cutter Head) มีลักษณะเป็นเหล็กตัดกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 400 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3) ซึ่งเป็นลักษณะของเครื่องสับย่อยที่ใช้แรงกระแทกและแรงเฉือนประกอบกัน หรือเรียกว่าเครื่องชิพ (Chipper) ซึ่งนิยมใช้กับชีวมวลที่มีขนาดเล็ก [8] โดยตัวเครื่องมีฝาครอบทางด้านบนถูกออกแบบให้สามารถเปิดปิดได้ง่ายเพื่อให้สามารถถอดเปลี่ยนใบมีดและทำความสะอาดได้สะดวก ซึ่งฝาครอบหัวสับจะเชื่อมต่อกับช่องป้อนวัตถุดิบ โดยด้านบนของช่องป้อนจะติดตั้งพลาสติกสีดำขนาดความกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการกระเด็นของวัตถุดิบขณะสับย่อย เครื่องยนต์เบนซินขนาด 6.5 แรงม้าถูกใช้เป็นต้นกำลัง เนื่องจากต้องการความเร็วรอบสูงในการสับย่อย เพื่อให้ชิ้นส่วนหลังการสับย่อยมีขนาดเล็ก และเครื่องยนต์เบนซินมีน้ำหนักเบาและเกิดการสั่นน้อย โดยถ่ายทอดกำลังผ่านสายพาน เพื่อขับเพลาและหัวสับที่ติดตั้งใบมีด ส่วนฐานของเครื่องสับย่อยผักตบชวาถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ด้วยการติดตั้งล้อเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 443 มิลลิเมตร จำนวน 2 ล้อ ทางด้านหลังตัวเครื่อง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 170 มิลลิเมตร จำนวน 1 ล้อ ทางด้านหน้าของตัวเครื่อง ดังรูปที่ 4



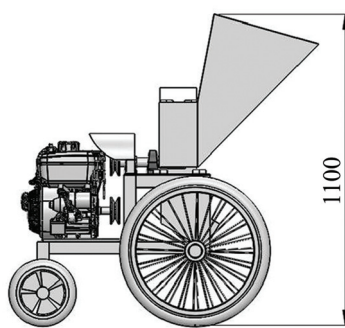
(ก) มุมมองด้านบนของเครื่องสับย่อย



(ข) มุมมองแบบไอโซเมตริกของเครื่องสับย่อย

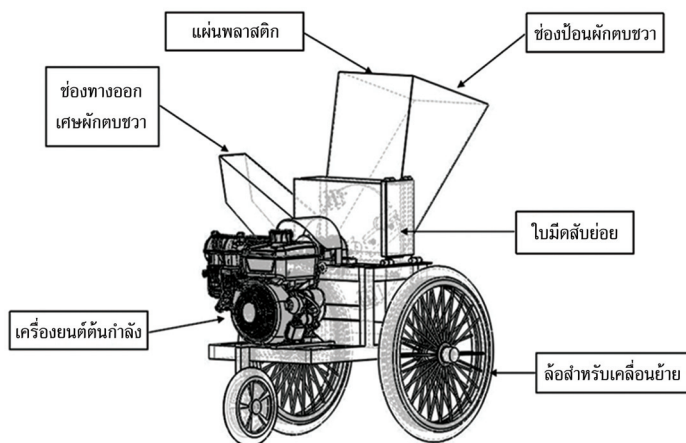


(ค) มุมมองด้านหน้าของเครื่องสับย่อย

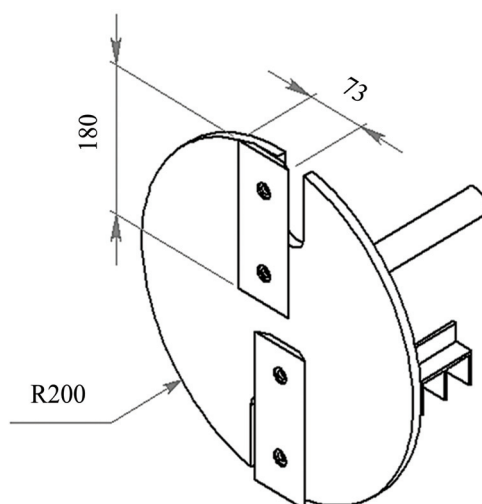


(ง) มุมมองด้านข้างของเครื่องสับย่อย

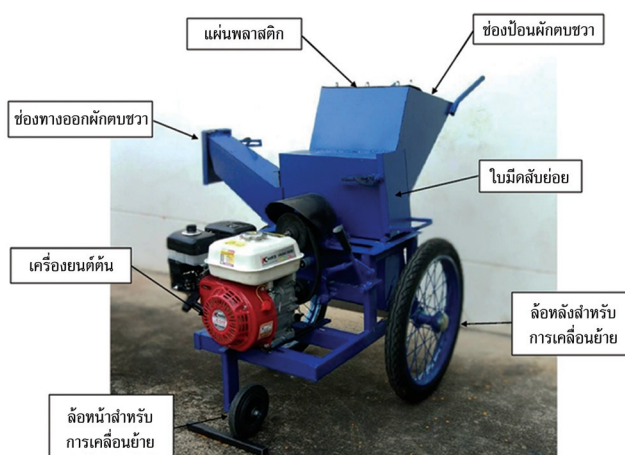
รูปที่ 1 แบบจำลองเครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ออกแบบด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของเครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ออกแบบด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม



รูปที่ 3 ใบมีดและหัวสับชนิดจานกลมของเครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ออกแบบด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม



รูปที่ 4 เครื่องสับย่อยผักตบชวา

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสับย่อยผักตบชวา เพื่อประเมินผลและดูความสัมพันธ์ของการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาต้นทุนการสับย่อย โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) เตรียมผักตบชวาสดและทำการชั่งน้ำหนัก โดยใช้จำนวน 5 กิโลกรัมต่อการทดสอบ (รูปที่ 5)

2) ปรับตั้งความเร็วรอบของเพลาด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง (Digital Tachometer) รุ่น DT-6234B และทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 6 ระดับ คือ 1,200 1,400 1,600 1,800 2,000 และ 2,200 รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 6 โดยแต่ละความเร็วรอบใช้ผักตบชวาจำนวน 5 กิโลกรัม

3) ป้อนผักตบชวาสดจำนวน 5 กิโลกรัมเข้าทางช่องป้อน และจับเวลาขณะทดสอบ

- 4) ทำการชั่งน้ำหนักของผักตบชวาที่ถูกสับย่อย และบันทึกผล
- 5) เก็บตัวอย่างชิ้นผักตบชวาที่ถูกสับย่อย จำนวน 10 ชิ้นต่อหนึ่งระดับ ดังรูปที่ 7 และบันทึกผล
- 6) ทำการแยกชิ้นส่วนผักตบชวาที่ถูกสับย่อย โดยแยกชิ้นส่วนที่มีขนาดไม่เกิน 4 เซนติเมตร จากนั้นชั่งน้ำหนักและบันทึกผล



รูปที่ 5 ลักษณะของผักตบชวาก่อนการทดสอบ



รูปที่ 6 ความเร็วรอบใบมีดเครื่องสับย่อยที่วัดด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบแสง



รูปที่ 7 ลักษณะของผักตบชวาลังการสับย่อย

- 7) นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาหาค่าสมรรถนะการสับย่อยตามสมการที่ (1) น้ำหนักสูญเสียตามสมการที่ (2) ประสิทธิภาพการสับย่อยของเครื่องสับย่อยตามสมการที่ (3) และ ประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาต้นทุนการสับย่อยตามสมการที่ (4)

8) ประเมินผลและสรุปผล

$$C = \frac{W}{T} \times 3,600 \quad (1)$$

โดยที่

C	คือ	สมรรถนะการสับย่อย (kg/hr)
W	คือ	น้ำหนักผักตบชวาก่อนการสับย่อย (kg)
T	คือ	เวลาในการสับย่อย (s)

$$W_{loss} = \frac{W_t}{W} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่

W_{loss}	คือ	น้ำหนักสูญเสีย (%)
W_t	คือ	น้ำหนักผักตบชวาหลังการสับย่อย (kg)

$$Eff = \frac{W_a}{W_t} \times 100\% \quad (3)$$

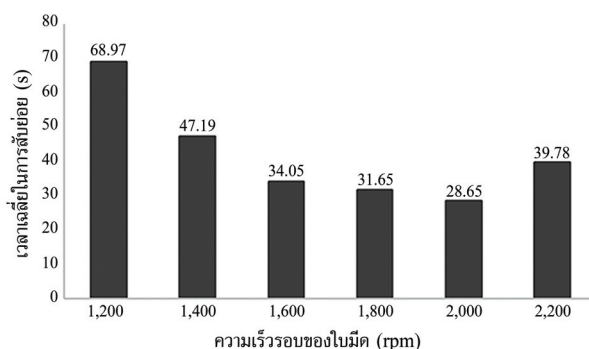
โดยที่

Eff	คือ	ประสิทธิภาพการสับย่อย (%)
W_a	คือ	น้ำหนักชิ้นส่วนผักตบชวาขนาดไม่เกิน 4 เซนติเมตร (kg)

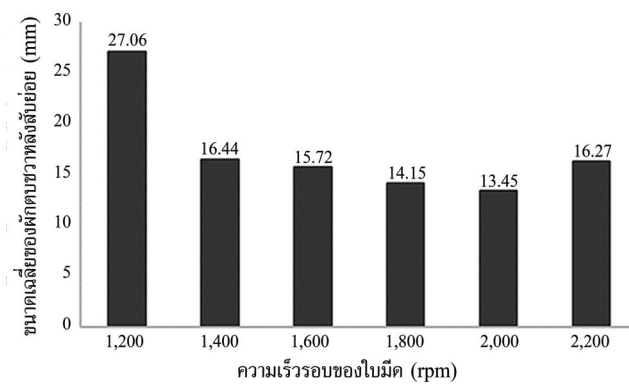
$$AC = FC + VC \quad (4)$$

โดยที่

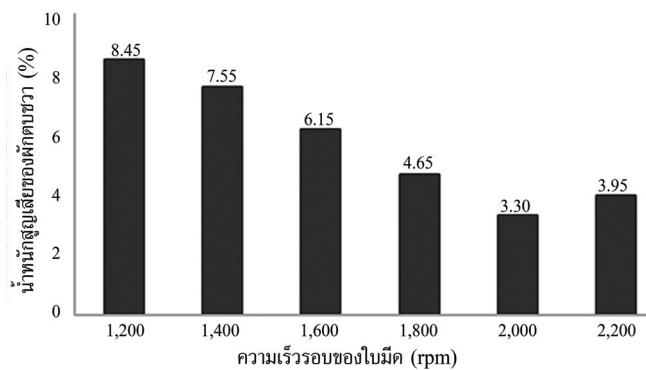
AC	คือ	ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสับย่อยผักตบชวา (บาทต่อกิโลกรัม)
FC	คือ	ค่าใช้จ่ายคงที่ (บาทต่อกิโลกรัม)
VC	คือ	ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาทต่อกิโลกรัม)



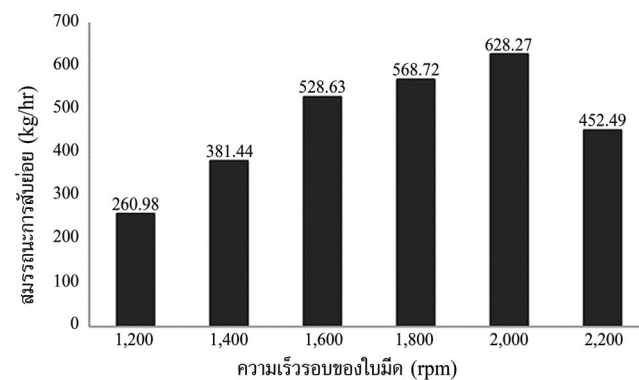
รูปที่ 8 เวลาเฉลี่ยในการสับย่อยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ



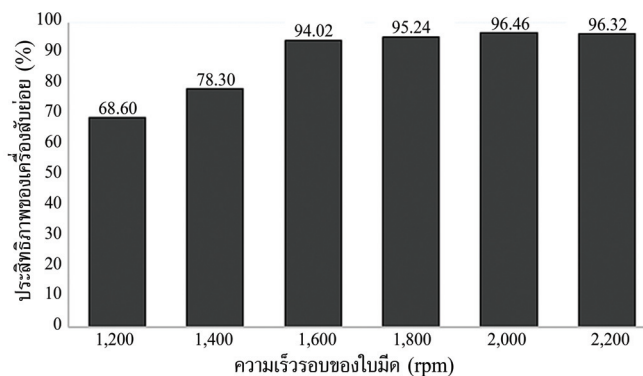
รูปที่ 9 ขนาดเฉลี่ยของผักตบชวาหลังการสับย่อยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ



รูปที่ 10 เปอร์เซ็นค่าน้ำหนักสูญเสียของผักตบชวาที่ความเร็วรอบต่าง ๆ



รูปที่ 11 สมรรถนะของเครื่องสับย่อยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ



รูปที่ 12 ประสิทธิภาพของเครื่องสับย่อยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. สมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องสับย่อยผักตบชวา

จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ใช้เครื่องยนต์เบนซินขนาด 6.5 แรงม้า เป็นต้นกำลัง และมีมุมใบมีดสับย่อยเท่ากับ 5 องศา เนื่องจากเป็นมุมที่เหมาะสมสำหรับการสับย่อยพืช เพราะวามุมองศาของใบมีดที่น้อยเกินไปจะทำให้ใบมีดไม่สามารถตัดผักตบชวาให้ขาดออกจากกันได้ และหากมุมองศาใบมีดมากเกินไปจะส่งผลให้คมของใบมีดไม่สัมผัสกับผักตบชวาทำให้การสับย่อยผักตบชวาไม่ละเอียด [9] โดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1,200 1,400 1,600 1,800 2,000 และ 2,200 รอบต่อนาที ตามลำดับ พบว่า เวลาที่ใช้ในการสับย่อยเฉลี่ยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 68.97 47.19 34.05 31.65 28.65 และ 39.78 วินาที ตามลำดับ (รูปที่ 8) และขนาดเฉลี่ยของชิ้นส่วนผักตบชวาที่ถูกสับย่อยมีค่า 27.06 16.44 15.72 14.15 13.45 และ 16.27 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 9 ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 8.45 7.55 6.15 4.65 3.30 และ 3.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 10 โดยน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นส่วนผักตบชวาลดลงเนื่องจากความเร็วใบมีดที่เพิ่มขึ้น [10] ซึ่งพบว่าความเร็วรอบของใบมีดสับย่อยมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการสับย่อย ขนาดชิ้นส่วนของผักตบชวาที่ถูกสับย่อย และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียหลังการสับย่อย โดยจากข้อมูลข้างต้น เมื่อนำไปหาสมรรถนะ และประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสับย่อย พบว่าสมรรถนะในการสับย่อยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 260.98 381.44 528.72 568.72 628.27 และ 452.49 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ (รูปที่ 11) และประสิทธิภาพในการสับย่อยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ เท่ากับ 68.60 78.30 94.02 95.24 96.46 และ 96.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 12 ซึ่งจากการทดสอบการสับย่อยผักตบชวากับเครื่องสับย่อย พบว่าทุกความเร็วรอบของเครื่องสับย่อยจะสามารถนำชิ้นส่วนผักตบชวามาทำปุ๋ยหมักได้ เพราะว่าขนาดชิ้นส่วนของผักตบชวาที่ผ่านการสับย่อยมีขนาดน้อยกว่า 4 เซนติเมตร [6] แต่ที่ความเร็วรอบ 1,200 และ 1,400 รอบต่อนาที จะให้สมรรถนะและประสิทธิภาพการสับย่อยที่ต่ำ สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียและเวลาในการสับย่อยที่เพิ่มขึ้น ความเร็วรอบดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมสำหรับการสับย่อย ส่วนที่ความเร็วรอบ 1,600 1,800 2,000 และ 2,200 รอบต่อนาที แม้จะให้ประสิทธิภาพการสับย่อยที่สูงและใกล้เคียงกัน แต่ที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบต่อนาที จะให้สมรรถนะการสับย่อย

ที่ต่ำและใช้เวลาในการสับย่อยที่สูงกว่าการสับย่อยที่ความเร็วรอบ 1,600 1,800 และ 2,000 รอบต่อนาที สำหรับที่ความเร็วรอบการสับย่อย 1,600 และ 1,800 รอบต่อนาที จะใช้เวลาในการสับย่อยและเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสูญเสียที่สูงกว่า อีกทั้งยังให้สมรรถนะการสับย่อยที่ต่ำกว่าความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 2,000 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการสับย่อยเฉลี่ยเท่ากับ 28.65 วินาที มีขนาดของชิ้นผักตบชวาที่ถูกสับย่อยเฉลี่ย 13.45 มิลลิเมตร น้ำหนักสูญเสียเฉลี่ยของ ผักตบชวาลังการสับย่อยเท่ากับ 3.30 เปอร์เซ็นต์ มีสมรรถนะสูงสุดเท่ากับ 628.27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องสูงสุดเท่ากับ 96.46 เปอร์เซ็นต์

2. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องสับย่อยผักตบชวา

การวิเคราะห์และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์เพื่อคำนวณหาต้นทุนในการสับย่อย ซึ่งพิจารณาจากค่าใช้จ่ายโดยรวมประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ต้นทุนคงที่ดังสมการที่ (5) มีค่าเท่ากับ 2,097.56 บาทต่อปี หรือ 0.0045 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเครื่องสับย่อยผักตบชวาทำงาน 3 ชั่วโมงต่อวัน และ 250 วันต่อปี ซึ่งต้นทุนคงที่ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคา (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรง) ดังสมการที่ (6) มีค่าเท่ากับ 1,485 บาทต่อปี ค่าดอกเบี้ยเงินลงทุน (Interest on the Investment) หรือค่าเสียโอกาสในการลงทุนดังสมการที่ (7) มีค่าเท่ากับ 612.56 บาทต่อปี ส่วนค่าโรงเรือน ค่าภาษีและค่าประกัน ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากส่วนใหญ่ไม่มีการสร้างโรงเรือนเพื่อเก็บรักษาเครื่องจักรกลเกษตรเป็นการเฉพาะตลอดจนไม่พบว่ามีภาระจ่ายภาษีและทำประกันภัยให้กับเครื่องจักรกลเกษตร โดยเครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมีมูลค่า 16,500 บาท (ตารางที่ 1) และมีมูลค่าซากของเครื่องสับย่อยเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน 10 ปี เหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ของราคาเครื่องเท่ากับ 1,650 บาท โดยมีอัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 6.75 เปอร์เซ็นต์ต่อปี

ตารางที่ 1 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องสับย่อยผักตบชวา

รายการ	ราคา (บาท)
1. เครื่องยนต์เบนซินขนาด 6.5 แรงม้า	4,500
2. เหล็กโครงสร้าง ชุดใบมีดสับย่อย และล้อ	7,000
3. สายพาน พู่เลย์ แบริ่ง และเพลา	2,000
4. ค่าแรงสร้างและประกอบเครื่องสับย่อยผักตบชวา	3,000
รวม	16,500

$$FC = D + I \quad (5)$$

$$D = \frac{P - S}{L} \quad (6)$$

$$I = \left[\frac{P + S}{2} \right] \times i \quad (7)$$

โดยที่

D	คือ	ค่าเสื่อมราคา (บาทต่อปี)
I	คือ	ค่าดอกเบี้ยเงินลงทุนหรือค่าเสียโอกาสในการลงทุน (บาทต่อปี)
P	คือ	ราคาเครื่องจักรกลเกษตร (บาท)
S	คือ	มูลค่าซากเครื่องจักรกลเกษตร (บาท)
L	คือ	อายุการใช้งานเครื่องจักรกลเกษตร (ปี)
i	คือ	อัตราดอกเบี้ยต่อปี (ร้อยละ)

2) ต้นทุนผันแปรประกอบด้วย ค่าจ้างแรงงาน ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา และค่าน้ำมันหล่อลื่นและสารหล่อลื่น ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 โดยเครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที มีสมรรถนะการทำงานสูงสุด 628.27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 722 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 2 ต้นทุนผันแปรในการใช้เครื่องสับย่อยผักตบชวาสำหรับนำไปทำปุ๋ยหมัก

รายการ	บาทต่อกิโลกรัม
1. ค่าจ้างแรงงาน 300 บาทต่อวัน จำนวน 2 คน ทำงาน 3 ชั่วโมงต่อวัน และ 250 วันต่อปี	0.3183
2. ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 25 บาทต่อลิตร	0.0096
3. ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา 12 % ของราคาเครื่องจักรทุก ๆ 100 ชั่วโมง	0.0315
4. ค่าน้ำมันหล่อลื่นและสารหล่อลื่น 0.15 % ของราคาเครื่องจักรทุก ๆ 100 ชั่วโมง	0.0004
ต้นทุนผันแปรรวม	0.3598

ดังนั้นค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสับย่อยผักตบชวาเพื่อนำไปทำปุ๋ยหมักตามสมการที่ (4) มีค่าเท่ากับ $0.0045 + 0.3598 = 0.3643$ บาทต่อกิโลกรัม

สรุปผล

เครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ออกแบบมีขนาดความกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $83 \times 102 \times 110$ เซนติเมตร ตามลำดับ ใบมีดจำนวน 2 ใบ ติดตั้งตรงข้ามกันซึ่งทำจากเหล็กขนาดความกว้าง 73 มิลลิเมตร ความยาว 180 มิลลิเมตร ทำมุม 5 องศากับหัวสับชนิดจานกลม และใช้เครื่องยนต์เบนซินขนาด 6.5 แรงม้า เป็นต้นกำลังของเครื่องสับย่อยผักตบชวา โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับเครื่องสับย่อยผักตบชวามีค่าเท่ากับ 2,000 รอบต่อนาที ซึ่งใช้เวลาเฉลี่ยในการสับย่อยเท่ากับ 28.65 วินาที มีขนาดของชิ้นผักตบชวาที่ถูกสับย่อยเฉลี่ยเท่ากับ 13.45 มิลลิเมตร น้ำหนักสูญเสียของผักตบชวาเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 3.30 เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะสูงสุดของเครื่องมีค่าเท่ากับ 628.27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดเท่ากับ 96.46 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าขนาดชิ้นส่วนของผักตบชวาที่ผ่านการสับย่อยด้วยเครื่องสับย่อยผักตบชวาที่ออกแบบมีขนาดน้อยกว่า 4 เซนติเมตร สามารถนำไปทำปุ๋ยหมักได้ และมีต้นทุนในการสับย่อย 0.36 บาทต่อกิโลกรัม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

References

- [1] Au-aroon, B. (2014). A Study to Reduce the Amount of Water Hyacinth to Create Small and Medium Enterprise in Luang Prot -Tan Liam Lat Krabang, Bangkok. **Journal of Humanities and Social Sciences Thonburi University**. Vol. 8, No. 17, pp. 38-44
- [2] Tippayarat, C. (2014). **Design and Development of Water Hyacinth Collecting Machine at Floodgate**. Thesis Master Degree of Engineering, Department of Agricultural Engineering, Kasetsart University
- [3] Kumhomkul, T. (2016). Feasibility Study of Using Water Hyacinth, Water Lettuce and Cattail for Straw Mushroom Cultivation Material. **EAU Heritage Journal Science and Technology**. Vol. 10, No. 2, pp. 61-73
- [4] Regional Irrigation Office 9, Royal Irrigation Department. (2016). **The Solution for Weed Management**. Access (1 May 2018). Available (<http://kmcenter.rid.go.th/kmc09/2016/kplant.pdf>)
- [5] Rodmuan, S., Sohsalam, P., and Pawongrat, R. (2013). Ethanol Production from Aquatic Weed Plants Using *Candida shehatae* TISTR 5843 by Batch and Fed-Batch Fermentation. **Veridian E-Journal**. Silpakorn University. Vol. 6, No. 3, pp. 935-948
- [6] Suttiwattana, P. and Wongkaew, D. (2009). Development of Water Hyacinth Cutting Machine from Prototype with Community Participation. **Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal**. Vol. 2, No. 1, pp. 1-8
- [7] Land Development Department. (2017). **Hand Book of The Composting from Water Hyacinth**. Access (10 May 2018). Available (<http://www.idd.go.th/www/files/78377.pdf>)
- [8] Prapakarn, N. (2008). **Study of Preliminary Parameters for Designing a Biomass Cutting Machine for Biomass Gasification Power Plant**. Thesis Master Degree of Engineering, Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
- [9] Luengpipatsorn, N., Kalsirisilp, R., and Langkapin, J. (2017). Development of Animal Feed Shedding and Compressing Machine. In **The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference**. Bangkok. pp. 144-149
- [10] Mathur, S. M. and Singh, P. (2004). Development and Performance Evaluation of A Water Hyacinth Chopper Cum Crusher. **Biosystems Engineering**. Vol. 88, No. 4, pp. 411-418

ระบบจัดการครุภัณฑ์บนพื้นฐานของ NFC

NFC-Based Asset Management System

จันทนา ปัญญาวรรณ^{1*} ธนาพล เดชาพิบูลย์¹ มยุลี เอี่ยมเพ็ชร¹ และสุรเชษฐ์ รักษ์¹
Jantana Panyavaraporn^{1*} Thanaphon Dechapiboon¹ Mayulee Eiampech¹ and
Surachet Ruksee¹

Received: December 17, 2019; Revised: April 6, 2020; Accepted: April 22, 2020

บทคัดย่อ

การตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีในหน่วยงานราชการนิยมใช้เจ้าหน้าที่ในการตรวจและนับจำนวนครุภัณฑ์ อาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดจากการนับและใช้ระยะเวลาตรวจสอบครุภัณฑ์ค่อนข้างนาน จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบจัดการครุภัณฑ์โดยใช้การสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นความถี่ระยะใกล้ในช่วงความถี่ 13.56 MHz และไม่ต้องอาศัยการสัมผัส ระบบฯ ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ แท็ก NFC แบบสติกเกอร์ชนิด I-CODE SLIX เพื่อเก็บข้อมูลหมายเลขแท็ก เว็บไซต์สำหรับวิเคราะห์และแสดงข้อมูลครุภัณฑ์ และโทรศัพท์มือถือที่รองรับเทคโนโลยี NFC โดยพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ จากการทดสอบใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการที่มีครุภัณฑ์จำนวน 114 ชิ้น พบว่า ระยะเวลาเฉลี่ยในการตรวจสอบครุภัณฑ์อยู่ที่ 13.76 นาที ความแม่นยำอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ หากผิวสัมผัสที่ติดแท็กไม่ใช่โลหะ และระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างโทรศัพท์มือถือกับแท็กอยู่ที่ 0 – 7.5 เซนติเมตร

คำสำคัญ : การสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นความถี่ระยะใกล้; ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์; เว็บไซต์; ครุภัณฑ์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี

¹ Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi

* Corresponding Author E - mail Address: jantanap@eng.buu.ac.th

Abstract

An annual durable assets inspection in government agencies is normally performed by their own officers. During the inspection, there might be a mistake in counting and checking the total number of the asset, or it may take long time since the process is manually done by human beings. From the reasons above, we developed an asset management system by using Near Field Communication (NFC) which is a contactless system that working by a short wave at 13.56 MHz. This system consists of 3 components which are 1) an I-CODE SLIX sticker that contains tag number, 2) website for analyzing and displaying asset data, and 3) a smart phone that can support NFC application on android operating system. The laboratory testing result showed that the average inspection time to count 114 assets was 13.76 minutes. Accuracy was 100 % under a condition that sticker must be on a non-metal surface and the distance between smart phone and tag was not over 0 - 7.5 centimeters.

Keywords: Near Field Communication (NFC); Android Operating System; Website; Asset

บทนำ

ห้องปฏิบัติการหรือห้องทั่วไปในหน่วยงานมักจะมีครุภัณฑ์เป็นจำนวนมากและหลายประเภท ยกตัวอย่าง ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า มีครุภัณฑ์หลายประเภท เช่น โต๊ะปฏิบัติการ ออสซิลโลสโคป แหล่งจ่ายไฟฟ้า เครื่องกำเนิดความถี่ไฟฟ้า โปรเจคเตอร์ และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น หน่วยงานราชการหรือบริษัทมีการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี ซึ่งใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบครุภัณฑ์ค่อนข้างนาน เนื่องจากใช้เจ้าหน้าที่ในการนับจำนวนครุภัณฑ์ และอาจจะเกิดความผิดพลาดจากการตรวจนับ เช่น ชื่อรุ่นผิดพลาดหรือจำนวนครุภัณฑ์ผิดพลาด เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ทางผู้วิจัยจึงคิดที่จะพัฒนาระบบจัดการครุภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ เพื่อลดความผิดพลาดจากการตรวจนับครุภัณฑ์

บลูทูธและ NFC (Near Field Communication) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ที่สามารถทำงานบนโทรศัพท์มือถือ การทำงานของ NFC จะเปิดสัญญาณเชื่อมต่อได้เร็วกว่าบลูทูธ เพราะการเชื่อมต่อผ่านบลูทูธจำเป็นต้องระบุชื่อของตัวอุปกรณ์ที่ต้องการจับคู่ในการเชื่อมต่อก่อน ในขณะที่อัตราการส่งและรับข้อมูลของ NFC อยู่ที่ 424 Kbps ซึ่งถือว่ามียัตราการส่งข้อมูลที่ช้ากว่าบลูทูธ เพราะบลูทูธมียัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงถึง 2.1 Mbps แต่ข้อดีของ NFC คือ ไม่มีการแทรกแซงข้อมูล หากในบริเวณนั้นมีการใช้งาน NFC อยู่จำนวนมาก NFC สามารถเชื่อมต่อเข้ากับโครงสร้างพื้นฐานของ RFID (13.56 MHz ISO/IEC 18000-3) และใช้พลังงานต่ำกว่าบลูทูธ จึงมีนักวิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี NFC กับงานทางด้านต่าง ๆ [1] - [8] ดังนี้

งานวิจัยที่ [2] ได้นำเทคโนโลยี NFC มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริการให้กับองค์กรธุรกิจและลูกค้า อีกทั้งเทคโนโลยี NFC สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบและมีราคาต่ำ ทำให้องค์กรธุรกิจสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย งานวิจัยที่ [3] นำเทคโนโลยี NFC มาพัฒนาระบบจัดการครุภัณฑ์ของ

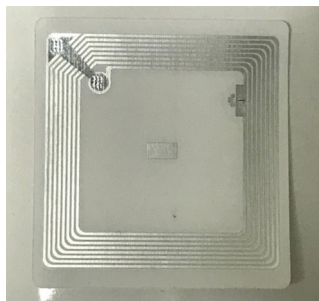
โรงพยาบาลให้มีรูปแบบการใช้งานที่สะดวก รวดเร็วและมีการเก็บข้อมูลของครุภัณฑ์แม่นยำมากขึ้น ทดแทนการเขียนเบิกจ่ายครุภัณฑ์ที่มีความล่าช้า และป้องกันเอกสารสูญหาย งานวิจัยที่ [4] นำเทคโนโลยี NFC และคิวอาร์โค้ด (QR Code) มาใช้กับสมาร์ตโพลสเตอร์แนะนำห้องสมุด โดยพัฒนาแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่รองรับเทคโนโลยี NFC ข้อมูลของห้องสมุดทั้งหมดที่ต้องการแสดงให้ผู้ใช้ทราบ จะถูกบรรจุลงในแท็กก่อนที่จะฝังลงบนแผ่นโพลสเตอร์ เมื่อผู้ใช้บริการต้องการทราบข้อมูลที่ต้องการก็สามารถ นำโทรศัพท์มือถือที่ติดตั้งไปอ่านข้อมูล โดยนำไปวางใกล้ ๆ กับบริเวณที่ได้ฝังแท็ก รายละเอียดทั้งหมด ก็จะปรากฏบนหน้าจอของโทรศัพท์มือถือ อีกทั้งมีการพิมพ์คิวอาร์โค้ดลงบนแผ่นโพลสเตอร์ควบคู่กับแท็ก ส่วนงานวิจัยที่ [5] นำเทคโนโลยี NFC มาพัฒนาระบบค้นหาเส้นทางภายในอาคารที่ทำงานบนโทรศัพท์มือถือ ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ งานวิจัยที่ [6] - [7] นำเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายระยะใกล้มาประยุกต์ใช้สำหรับการชำระเงินผ่านโทรศัพท์มือถือ โดยงานวิจัยที่ [6] ทำการศึกษาและเปรียบเทียบเทคโนโลยีระยะใกล้ กับการชำระเงินผ่านโทรศัพท์มือถือรูปแบบอื่น ๆ อีกทั้งเปรียบเทียบข้อแตกต่างของการชำระเงินผ่าน โทรศัพท์มือถือแต่ละรูปแบบ ตลอดจนประเภทของสินค้าและบริการที่เหมาะสมกับรูปแบบการชำระเงินผ่าน โทรศัพท์มือถือ ส่วนงานวิจัยที่ [7] เป็นการวิเคราะห์คุณภาพของระบบบริการอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศ อินโดนีเซีย เมื่อนำเทคโนโลยี NFC มาใช้สำหรับชำระเงินผ่านโทรศัพท์มือถือ อีกทั้งมีการนำ NFC มาประยุกต์ใช้กับบ้านอัจฉริยะ [8] เพื่อควบคุมการเปิดปิดประตูและควบคุมเบรกเกอร์แบบอัตโนมัติ เมื่อมีคนเข้ามาจะเปิดการใช้งานระบบไฟฟ้าและจะตัดระบบไฟฟ้าเมื่อไม่มีคนอยู่ในห้อง ส่งผลให้ ลดค่าไฟฟ้าและระบบยังเก็บข้อมูลคนที่เข้าและออกจากห้อง ซึ่งสามารถเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวผ่านเว็บเบราว์เซอร์ จากการทดสอบระบบฯ พบว่า ความแม่นยำอยู่ที่ 100 เปอร์เซนต์

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบจัดการครุภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยี NFC ที่ใช้ สำหรับระบุตัวคนหรือจัดเก็บข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุที่ช่วงความถี่ 13.56 MHz และไม่ต้องอาศัยการสัมผัส เทคโนโลยี NFC มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก คือ แท็ก (Tag) ที่สามารถอ่านค่าผ่านทาง คลื่นวิทยุ เพื่อตรวจ ติดตาม และบันทึกข้อมูล โดยจะนำแท็กไปติดไว้กับสิ่งของ ส่วนที่สอง คือ โทรศัพท์มือถือ ที่รองรับเทคโนโลยี NFC ใช้สำหรับสื่อสารกับแท็ก ทำหน้าที่อ่านและเขียนข้อมูล ระบบที่พัฒนาขึ้น จะเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลเพื่อเก็บวันเดือนปีที่ซื้อ ราคา อายุการใช้งาน ชื่อรุ่น หน่วยงานที่รับผิดชอบ รหัสครุภัณฑ์ และหมายเลขแท็ก (TagID) รวมถึงระบบยืม-คืนครุภัณฑ์และแสดงรายงานผลการตรวจนับ ครุภัณฑ์ประจำปี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์ที่ใช้

งานวิจัยนี้เลือกใช้แท็ก NFC แบบสติกเกอร์ชนิด I-CODE SLIX ตามมาตรฐาน ISO 15693 ขนาด 50 x 50 มม. (รูปที่ 1) จำนวน 114 ตัว เนื่องจากต้องนำแท็ก NFC ไปติดบนครุภัณฑ์ จึงเลือกใช้ แท็กที่มีขนาดเล็ก อายุการใช้งานของแท็กไม่ขึ้นอยู่กับแบตเตอรี่ และราคาไม่แพง



รูปที่ 1 แท็กแบบสติกเกอร์ชนิด I-CODE SLIX

2. การกำหนดเลขแท็กครุภัณฑ์ (TagID)

การกำหนดเลขครุภัณฑ์มี 2 รูปแบบ คือ FSN (Federal Stock Number) และสามมิติ ดังรูปที่ 2 ซึ่งทั้งสองรูปแบบมีการกำหนดชุดตัวเลขที่แตกต่างกัน เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน ผู้วิจัย จึงกำหนดเลขแท็ก (TagID) ขึ้นมาใหม่ที่ประกอบด้วย ตัวเลข 12 ตำแหน่ง แบ่งเป็น 5 ชุด (รูปที่ 3) มีรายละเอียดดังนี้

- ชุดที่ 1 มีตัวเลข 2 ตำแหน่ง หมายถึง ปี พ.ศ. ที่จัดซื้อครุภัณฑ์
- ชุดที่ 2 มีตัวเลข 2 ตำแหน่ง หมายถึง ภาควิชาหรือหน่วยงานที่รับผิดชอบ
- ชุดที่ 3 มีตัวเลข 2 ตำแหน่ง หมายถึง ประเภทของครุภัณฑ์ เช่น 01 เป็นครุภัณฑ์สำนักงาน 02 เป็นครุภัณฑ์การศึกษา 06 เป็นครุภัณฑ์ไฟฟ้าและวิทยุ เป็นต้น
- ชุดที่ 4 มีตัวเลข 3 ตำแหน่ง หมายถึง ชนิดของครุภัณฑ์ เช่น ครุภัณฑ์ประเภท 01 มีชนิดครุภัณฑ์ 001 คือ โต๊ะ 002 คือ เก้าอี้ และ 014 คือ เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น
- ชุดที่ 5 มีตัวเลข 3 ตำแหน่ง หมายถึง ลำดับของครุภัณฑ์ เริ่มจาก 001 ถึง 999

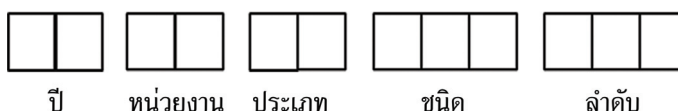


(ก) แบบ FSN



(ข) แบบสามมิติ

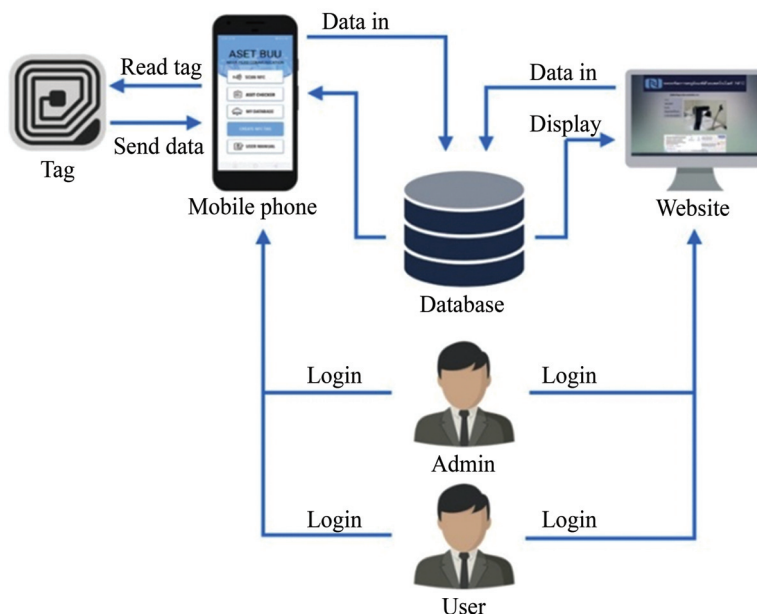
รูปที่ 2 ตัวอย่างเลขครุภัณฑ์



รูปที่ 3 การกำหนดเลขครุภัณฑ์

3. ขั้นตอนการออกแบบ

ระบบจัดการครุภัณฑ์โดยใช้เทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่ระยะใกล้ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ฐานข้อมูล แอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และเว็บไซต์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบจัดการครุภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยี NFC

ส่วนของแอปพลิเคชันประกอบด้วย 4 ส่วนย่อย คือ การสร้างเลขแท็ก การอ่านข้อมูลแท็ก การตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี และการแสดงข้อมูลครุภัณฑ์ ส่วนของเว็บไซต์ประกอบด้วย 4 ส่วนย่อย คือ การเพิ่มครุภัณฑ์ ระบบยืมคืน ข้อมูลครุภัณฑ์ และการตรวจสอบครุภัณฑ์ ซึ่งการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีให้สิทธิเฉพาะผู้ดูแลระบบเท่านั้น นอกจากนี้ผู้ดูแลระบบยังสามารถจำกัดสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูลของสมาชิก เช่น การอนุมัติสมาชิก และการเพิ่มครุภัณฑ์ เป็นต้น

3.1 การออกแบบแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

แอปพลิเคชันประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก คือ หน้าเมนูหลัก การอ่านข้อมูลแท็ก การตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี การแสดงข้อมูลครุภัณฑ์ และการสร้างเลขแท็ก

3.1.1 หน้าเมนูหลัก

เมนูหลัก (รูปที่ 5(ก)) เป็นหน้าต่างแรกเมื่อเปิดแอปพลิเคชันประกอบด้วย ส่วนหัว (Header) เป็นชื่อแอปพลิเคชัน แบ่งเมนูย่อยออกเป็น 4 เมนู ได้แก่ 1) SCAN NFC คือ การอ่านข้อมูลแท็ก NFC จำพวกข้อความ เลขฐานสิบสอง เลขเว็บไซต์ รวมถึงข้อมูลพื้นฐานจากแท็ก 2) ASET CHECKER แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการเข้าระบบ ส่วนที่สองจะเป็นการสแกนเลขครุภัณฑ์จากแท็ก NFC เพื่อส่งต่อไปยังฐานข้อมูล แล้วนำไปใช้งานต่อร่วมกับเว็บไซต์ 3) MY DATABASE เป็นการแสดงข้อมูลครุภัณฑ์ เมื่อตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี 4) CREATE NFC TAG ใช้สำหรับสร้างเลขแท็กตามหัวข้อที่ 2 เพื่อให้ง่ายและสะดวกสำหรับการจัดการครุภัณฑ์

3.1.2 การอ่านข้อมูลแท็ก

การอ่านข้อมูลแท็กเริ่มต้นจากการตรวจสอบสถานะ NFC หากยังไม่เปิดใช้งาน แอปพลิเคชันจะทำการเปิดหน้าต่างตั้งค่า NFC เพื่อให้ผู้ใช้งานเปิด NFC ก่อนอ่านข้อมูลแท็ก หลังจากนั้นตรวจสอบว่ามีแท็กอยู่ในระยะตรวจสอบหรือไม่ หากไม่พบแท็กจะเริ่มทำการตรวจสอบแท็กใหม่อีกครั้ง หากพบว่ามีแท็กอยู่ในระยะตรวจสอบแอปพลิเคชันจะอ่านข้อมูลภายในแท็ก แล้วตรวจสอบว่าข้อมูลที่อ่านเป็นตัวอักษร ข้อมูลเลขฐาน หรือข้อมูลที่เป็นลิงก์ เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว แอปพลิเคชันจะแสดงข้อมูลดังรูปที่ 5(ข)

3.1.3 การตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี

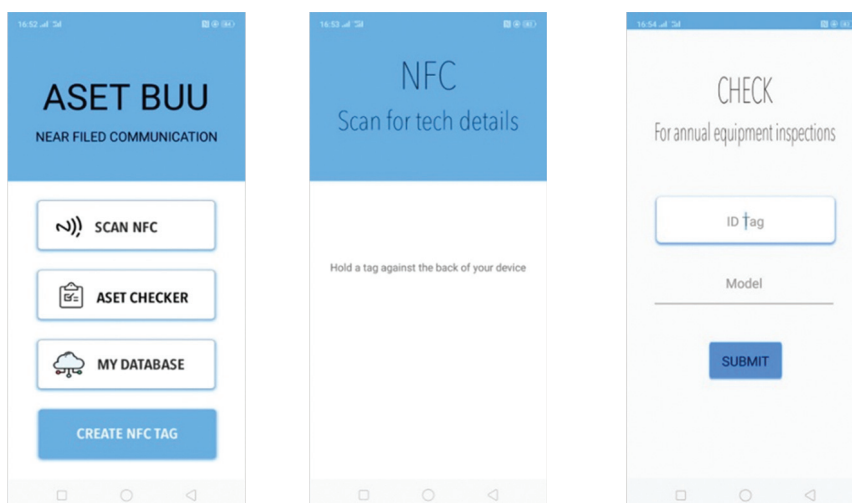
การตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีให้สิทธิ์การใช้งานเฉพาะสมาชิกเท่านั้น ผู้ใช้งานต้องล็อกอินเข้าสู่ระบบฯ และตรวจสอบความถูกต้องของ Username และ Password หลังจากนั้นแอปพลิเคชันจะตรวจสอบการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและเปิดใช้งาน NFC ภายในโทรศัพท์มือถือ เมื่อพร้อมใช้งานระบบจะเปิดหน้าต่างการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี ผู้ใช้งานนำโทรศัพท์มือถืออ่านแท็กของครุภัณฑ์แต่ละตัว พร้อมแสดงเลขแท็กและชื่อของครุภัณฑ์ หากกดปุ่มส่ง (Submit) ในรูปที่ 5(ค) ข้อมูลจะถูกส่งไปเก็บในฐานข้อมูลชื่อ content (ตารางที่ 1)

3.1.4 การแสดงข้อมูลครุภัณฑ์จากการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี

การแสดงผลข้อมูลครุภัณฑ์เริ่มต้นจากการตรวจสอบสถานะอินเทอร์เน็ตเพื่อเชื่อมต่อและดึงข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ โดยระบบทำงานร่วมกับภาษา PHP ที่เก็บ Host, Username และ Password ของฐานข้อมูล รวมถึงชื่อตารางที่ต้องการดึงค่าออกมาเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล content (ตารางที่ 1) และดึงข้อมูลจากตารางที่ 1 ระบบฯ จะเลือกเฉพาะข้อมูลเลขแท็กและชื่อครุภัณฑ์ออกมาแสดงผลเท่านั้น (รูปที่ 5(ง))

3.1.5 การสร้างเลขแท็ก

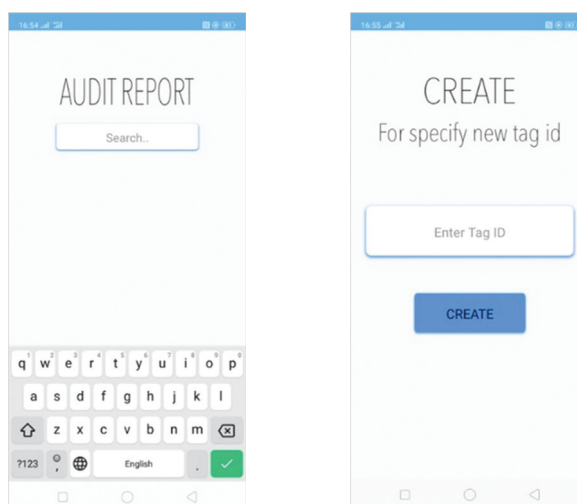
เริ่มต้นใช้งานระบบจากการตรวจสอบสถานะ NFC หากยังไม่เปิดใช้งาน ระบบฯ จะกลับไปเปิดหน้าต่างตั้งค่า NFC หากต้องการสร้างเลขแท็กใหม่ให้นำโทรศัพท์มือถือแนบกับแท็ก ระบบฯ จะอ่านข้อมูลแล้วแสดงข้อมูลเดิมของแท็กออกมา กรอกรหัสแท็กที่กำหนดขึ้น 12 หลัก (หัวข้อที่ 2) เมื่อข้อมูลถูกต้องให้ทำการบันทึกจะได้เลขใหม่แทนที่ข้อมูลเดิม (รูปที่ 5(จ))



(ก) หน้าหลัก

(ข) การอ่านข้อมูลแท็ก

(ค) การตรวจสอบ



(ง) รายงานผล

(จ) การสร้างเลขแท็ก

รูปที่ 5 หน้าต่างแอปพลิเคชัน

3.2 การออกแบบเว็บไซต์

เว็บไซต์ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ การลงทะเบียนผู้ใช้งาน การลงทะเบียนครุภัณฑ์ การยืมคืนครุภัณฑ์ และการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี

3.2.1 การลงทะเบียนผู้ใช้งาน

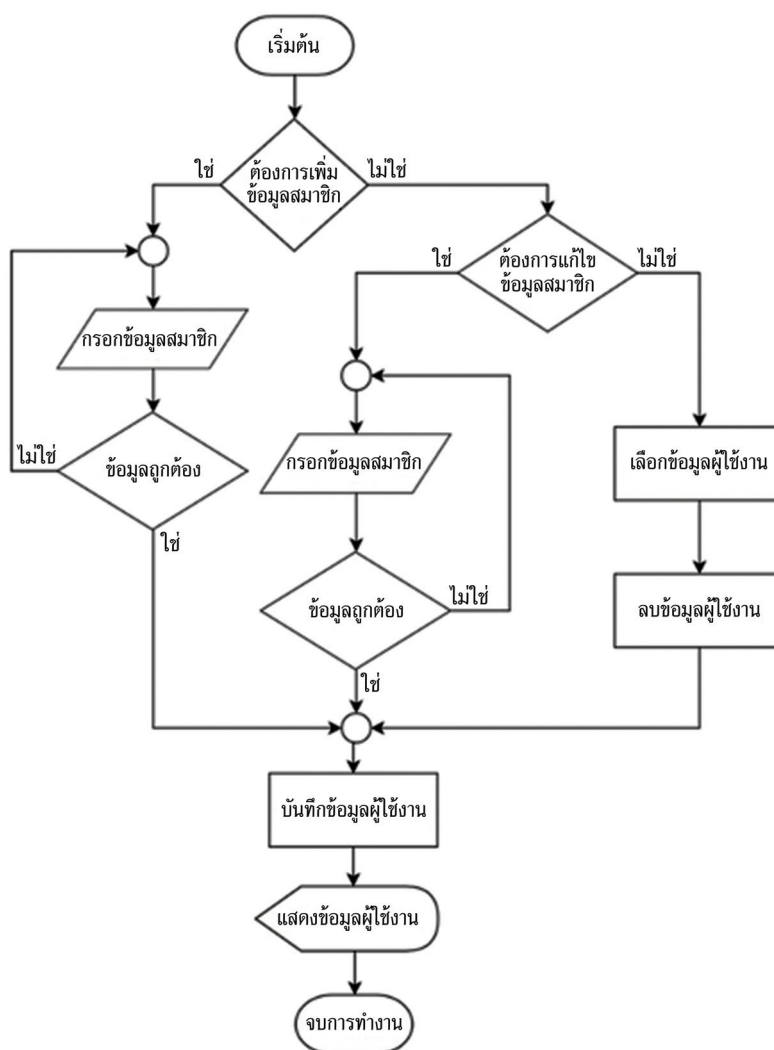
ผู้ดูแลระบบ (Admin) สามารถเพิ่ม ลบ หรือแก้ไขข้อมูล (รูปที่ 6(ก))

- การเพิ่มข้อมูลสมาชิก ผู้ดูแลระบบจะกรอกข้อมูลสมาชิกทั้งหมด พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้อง เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะกดปุ่มเพื่อบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูลพร้อมแสดงผล

- การแก้ไขข้อมูลสมาชิก ผู้ดูแลระบบสามารถเข้าไปจัดการแก้ไขข้อมูลสมาชิก โดยเลือกข้อมูลที่ต้องการแก้ไข หลังจากนั้นกรอกข้อมูลสมาชิกที่ต้องการแก้ไขพร้อมกับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วบันทึกข้อมูลล่าสุดลงฐานข้อมูลพร้อมแสดงผล

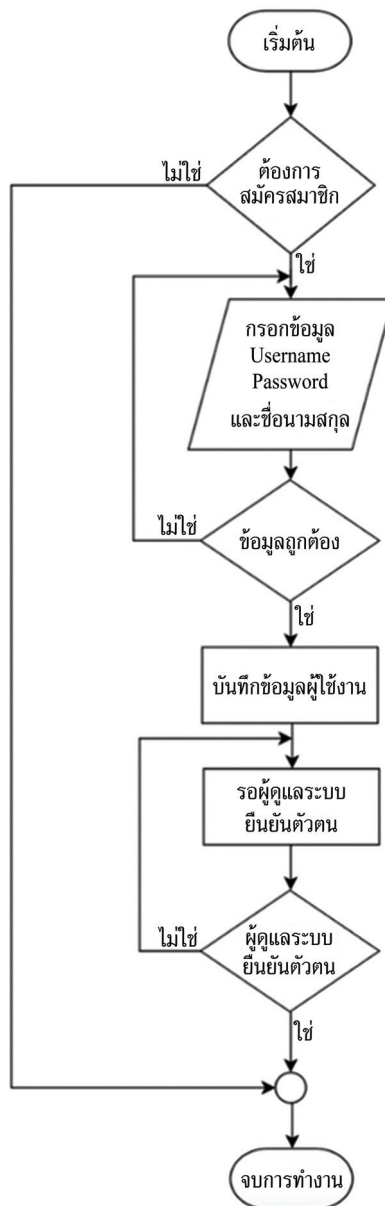
- การลบข้อมูลสมาชิก ผู้ดูแลระบบสามารถลบข้อมูลโดยเลือกข้อมูลสมาชิกที่ต้องการลบข้อมูล เมื่อลบข้อมูลเรียบร้อยแล้ว บันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูลพร้อมแสดงผล

สมาชิก (User) สิทธิ์ในการเข้าถึงจะถูกกำหนดโดยผู้ดูแลระบบ สามารถเพิ่มสมาชิกได้ 2 วิธี คือ ผู้ดูแลระบบเพิ่มข้อมูลทั้งหมด หรือผู้สมัครสมาชิกลงทะเบียน ซึ่งผู้สมัครสมาชิกยังไม่สามารถใช้งานได้ทันที เนื่องจากต้องรอผู้ดูแลระบบให้สิทธิ์การเข้าใช้งานก่อน ดังรูปที่ 6(ข)



(ก) ผู้ดูแลระบบ

รูปที่ 6 การลงทะเบียน



(ข) สมาชิก

รูปที่ 6 การลงทะเบียน (ต่อ)

3.2.2 การลงทะเบียนครุภัณฑ์

เมื่อมีครุภัณฑ์ใหม่ที่ต้องการลงทะเบียนเข้าสู่ระบบให้กรอกข้อมูล วัน เดือน ปีที่ซื้อ ราคา บริษัทที่ซื้อ รุ่น TagID รหัสครุภัณฑ์ งบประมาณจากหน่วยงานใด สถานที่ หน่วยงานที่รับผิดชอบ และอายุการใช้งาน เนื่องจากการกำหนดเลขแท็ก 12 หลัก จะระบุ ปี หน่วยงาน ประเภท ชนิด และลำดับ (รูปที่ 3) ผู้วิจัยจึงออกแบบระบบฯ ให้สามารถกรอกข้อมูลแบบอัตโนมัติ จากรูปที่ 7(ก) เมื่อกรอก TagID เข้าไปในระบบฯ รุ่น งบประมาณจากหน่วยงานใด สถานที่ หน่วยงานที่รับผิดชอบ จะขึ้นแบบอัตโนมัติ

ดังตัวอย่างในรูปที่ 7(ข) หลังจากนั้นกรอกข้อมูลที่เหลือ เมื่อตรวจสอบข้อมูลที่กรอกเรียบร้อยแล้ว กดตกลงข้อมูลจะถูกนำไปเก็บลงฐานข้อมูล item (ตารางที่ 2) และสามารถดูข้อมูลครุภัณฑ์นี้ได้จากเมนู “ข้อมูลครุภัณฑ์ทั้งหมด” (รูปที่ 8) โดยที่หน้าต่างดังกล่าวสามารถทำการลบหรือแก้ไขข้อมูลครุภัณฑ์ดังรูปที่ 9

(ก) ลงทะเบียนครุภัณฑ์

(ข) กรอกข้อมูลแบบอัตโนมัติ

รูปที่ 7 การออกแบบหน้าต่างการลงทะเบียนครุภัณฑ์

กดปุ่มไปข้างหน้า

คลิกเพื่อดู Print หน้า

มีจำนวนครุภัณฑ์ทั้งหมด 114 ชิ้น

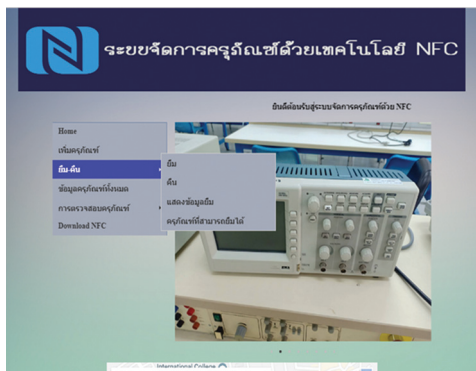
ลำดับ	วัน เดือน ปี ที่ซื้อ	ราคา	อายุการใช้งาน	บริษัทที่ซื้อ	รุ่น (model)	TagID	รหัสครุภัณฑ์	งบประมาณจากหน่วยงานใด	สถานที่	หน่วยงานรับผิดชอบ		
1	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014001	4210-001-0001-199-51	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ
2	0000-00-00	3200	10 ปี	METEC	โต๊ะปฏิบัติงานทางไฟฟ้า	610406100001	610406100001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ
3	0000-00-00	18500	7 ปี	Measuretronix	ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อTektronix TDS 1001B	610408104001	5406007010011	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ
4	2019-01-02	1200	10 ปี	Siaminternationaltrader	โต๊ะ	610401001001	610401001001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ
8	2019-02-12	12900	7 ปี	Projectorpro	โปรเจคเตอร์ ยี่ห้อNEC	610407008001	610407008001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ
9	2019-02-06	2490	7 ปี	Projectorpro	จอรับภาพ ยี่ห้อVERTEX	610407006001	610407006001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ
10	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014002	4210-001-0001-200-51	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ
11	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014003	4210-001-0001-201-51	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	แก้ไข	ลบ

รูปที่ 8 หน้าเว็บแสดงข้อมูลครุภัณฑ์ทั้งหมดที่มีอยู่ในระบบ

รูปที่ 9 การแก้ไขข้อมูลครุภัณฑ์

3.2.3 การยืนยันครุภัณฑ์

ผู้ใช้งานเข้าสู่เมนู “ยืนยัน-คืน” ที่ประกอบด้วยเมนูย่อย ดังนี้ การยืนยัน การคืน แสดงข้อมูลการยืนยัน และครุภัณฑ์ที่สามารถยืนยันได้ (รูปที่ 10(ก)) การยืนยันครุภัณฑ์เริ่มต้นจากผู้ใช้งานกรอกตามรูปที่ 10(ข) เมื่อกดปุ่ม “ตกลง” ระบบฯ จะเก็บข้อมูลการยืนยันครุภัณฑ์ลงฐานข้อมูลชื่อ recoup (ตารางที่ 5) และแสดงข้อมูลการยืนยันครุภัณฑ์ (รูปที่ 10(ค)) ส่วนของการคืนครุภัณฑ์จะต้องกรอกข้อมูลเช่นเดียวกับการยืนยันครุภัณฑ์ เมื่อกดปุ่ม “ตกลง” ระบบฯ จะเปรียบเทียบกับข้อมูลในฐานข้อมูลการยืนยัน ถ้าหากข้อมูลที่ถูกคืนตรงกับข้อมูลที่ถูกระบุ ระบบจะลบข้อมูลการยืนยันครุภัณฑ์ชิ้นนั้นออก



(ก) เมนูการยืนยัน-คืน



(ข) หน้าต่างยืนยันครุภัณฑ์

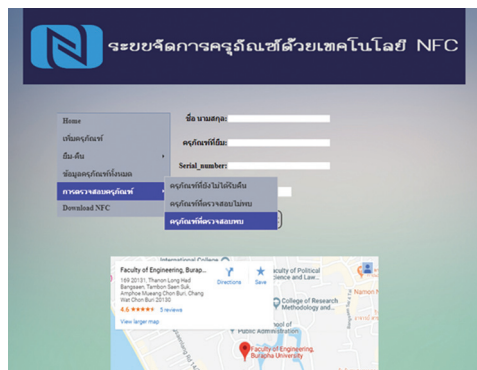
ชื่อ-นามสกุล	ครุภัณฑ์ที่คืน	Serial number	วันที่คืน
นาย ศุภชัย ใจดี	กล้องวิดีโอแบบพกพา Telexon TDS 1001B	610408104015	2019-03-11
นาย ศุภชัย ใจดี	กล้องวิดีโอแบบพกพา Telexon TDS 1001B แบบฉายไฟ	610406101005	2019-03-13
น.ส. วรวิทย์ ใจดี	แท่งจ่ายไฟ Telexon LAB Model APS-1	610406101014	2019-03-12
นาย ธนาพล ใจดี	ไมโครโฟน Telexon Dynamic Model V350s	610406101001	2019-03-27

(ค) ข้อมูลการยืนยันครุภัณฑ์

รูปที่ 10 การยืนยัน-คืนครุภัณฑ์

3.2.4 การตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี

การตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีจำเป็นต้องใช้โทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่รองรับเทคโนโลยี NFC เริ่มต้นจากดาวน์โหลดแอปพลิเคชันที่ออกแบบตามหัวข้อที่ 3.1 (รูปที่ 5(ค)) ข้อมูลจะถูกส่งไปเก็บลงฐานข้อมูล ซึ่งรายงานผลทางเมนู “ครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบพบ” ดังรูปที่ 11(ก) หลังจากตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีผ่านโทรศัพท์มือถือเสร็จ ข้อมูลจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลครุภัณฑ์ทั้งหมดในฐานข้อมูล item (ตารางที่ 2) หาก TagID ของครุภัณฑ์ที่สแกนตรงกับข้อมูลครุภัณฑ์ทั้งหมดในระบบ ข้อมูลจะถูกนำไปแสดงในข้อมูลครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบพบดังรูปที่ 11(ข) หากไม่มีการสแกนจากโทรศัพท์มือถือหรือ TagID ไม่ตรงกับข้อมูลการยืนยัน ข้อมูลครุภัณฑ์ที่เหลือจะถูกจัดอยู่ในครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบไม่พบ สามารถเข้าตรวจสอบจากเมนู “ข้อมูลครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบไม่พบ” ดังรูปที่ 11(ค) เมื่อเข้าสู่เมนูข้อมูลครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบไม่พบ จะแสดงข้อมูลดังรูปที่ 11(ง)



(ก) ข้อมูลการตรวจสอบครุภัณฑ์

คลิกเพื่อดูรายละเอียด

คลิกเพื่อดูประวัติ

มีจำนวนครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบได้ทั้งหมด 97 ชิ้น

ลำดับ	วัน เดือน ปี ที่ซื้อ	ราคา	อายุการใช้งาน	บริษัทชื่อ	รุ่น (model)	TagID	รหัสครุภัณฑ์	งบประมาณจากหน่วยงานใด	สถานที่	หน่วยงานที่รับผิดชอบ
1	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014001	4210-001-0001-199-51	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
2	0000-00-00	3200	10 ปี	METEC	โต๊ะปฏิบัติงานทางไฟฟ้า	610406100001	610406100001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
3	0000-00-00	18500	7 ปี	Measutronics	ลอจิสติกส์โดย ยี่ห้อTeltronix TDS 1001B	610408104001	5406007010011	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
4	2019-01-02	1200	10 ปี	Siaminternationaltrader	โต๊ะ	610401001001	610401001001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
8	2019-02-12	12900	7 ปี	Projectorpro	โปรเจคเตอร์ ยี่ห้อNEC	610407008001	610407008001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
9	2019-02-06	2490	7 ปี	Projectorpro	จอรับภาพ ยี่ห้อVERTEX	610407006001	610407006001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
10	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014002	4210-001-0001-200-51	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
11	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014003	4210-001-0001-201-51	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
12	2019-02-06	12900	7 ปี	Projectorpro	เครื่องฉายภาพสามมิติ ยี่ห้อVERTEX Model D-4690ST	610407100001	610407100001	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

(ข) ข้อมูลครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบพบ



(ค) เมนูครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบไม่พบ

รูปที่ 11 การตรวจสอบครุภัณฑ์

คลิกเพื่อดูภาพหลัก
คลิกเพื่อ Print หน้า

มีจำนวนครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบไม่ได้ทั้งหมด 13 อัน

ลำดับ	วัน เดือน ปี ที่ซื้อ	ราคา	อายุการใช้งาน	บริษัทที่ซื้อ	รุ่น (model)	TagID	รหัสครุภัณฑ์	งบประมาณจากหน่วยงานใด	สถานที่	หน่วยงานที่รับผิดชอบ
44	0000-00-00	18500	7 ปี	Measuretronix	ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Teclonix TDS 1001B	610408104008	5406007010009	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
65	0000-00-00	2750	7 ปี	Thaieasyelec	แหล่งจ่ายไฟ ยี่ห้อ ANALAB Model APS-1	610406101015	550604301000027	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
66	2019-01-02	400	10 ปี	Siaminternationaltrader	เก้าอี้ ยี่ห้อ PO-PONY	610401002001	7110-006-0002-291-38	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
88	0000-00-00	18700	7 ปี	Measuretronix	เครื่องกำเนิดความถี่ ยี่ห้อ GW-INSTEK SFG-1013	610406102002	5406042010024	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
90	0000-00-00	18700	7 ปี	Measuretronix	เครื่องกำเนิดความถี่ ยี่ห้อ GW-INSTEK SFG-1013	610406102004	5406042010009	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
96	0000-00-00	2750	7 ปี	Thaieasyelec	แหล่งจ่ายไฟ ยี่ห้อ ANALAB Model APS-1	610406101016	550604301000026	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
98	0000-00-00	2750	7 ปี	Thaieasyelec	แหล่งจ่ายไฟ ยี่ห้อ ANALAB Model APS-1	610406101018	550604301000018	คณะวิศวกรรมศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

(ง) ข้อมูลครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบไม่พบ

รูปที่ 11 การตรวจสอบครุภัณฑ์ (ต่อ)

3.3 การออกแบบฐานข้อมูล

งานวิจัยนี้ออกแบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Database) เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ [9] โดยความสัมพันธ์ของข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในรูปของตารางประกอบด้วย 6 เอนทิตี (Entity) ได้แก่ content สำหรับการเก็บข้อมูลครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบจากแอปพลิเคชัน รายละเอียดพจนานุกรมข้อมูลดังตารางที่ 1

item สำหรับการเก็บข้อมูลครุภัณฑ์ รายละเอียดพจนานุกรมข้อมูลดังตารางที่ 2
 lend สำหรับการเก็บข้อมูลการคืน รายละเอียดพจนานุกรมข้อมูลดังตารางที่ 3
 recoup สำหรับการเก็บข้อมูลการยืม รายละเอียดพจนานุกรมข้อมูลดังตารางที่ 3
 tagID สำหรับการแสดงข้อมูลครุภัณฑ์ รายละเอียดพจนานุกรมข้อมูลดังตารางที่ 4
 admin สำหรับการเก็บข้อมูลบุคคล รายละเอียดพจนานุกรมข้อมูลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 1 พจนานุกรมข้อมูล “content”

ฟิลด์	ชื่อฟิลด์	ชนิดข้อมูล	Key	อธิบาย
1	ID	int(40)	PR	รหัส
2	model	varchar(500)		รุ่น
3	status	int(1)		สถานะ

ตารางที่ 2 พจนานุกรมข้อมูล “item”

ฟิลด์	ชื่อฟิลด์	ชนิดข้อมูล	Key	อธิบาย
1	id	int(50)	PR	รหัส
2	วัน เดือน ปี ที่ซื้อ	date		วัน เดือน ปี ที่ซื้อ
3	ราคา	varchar(30)		ราคา

ตารางที่ 2 พจนานุกรมข้อมูล “item” (ต่อ)

ฟิลด์	ชื่อฟิลด์	ชนิดข้อมูล	Key	อธิบาย
4	บริษัทที่ซื้อ	varchar(50)		บริษัทที่ซื้อ
5	รุ่น	varchar(50)		รุ่น
6	รหัสครุภัณฑ์	varchar(50)		รหัสครุภัณฑ์
7	serialnumber	varchar(50)		serial number
8	งบประมาณจากหน่วยงาน	varchar(50)		งบประมาณจากหน่วยงาน
9	สถานที่	varchar(50)		สถานที่
10	หน่วยงานรับผิดชอบ	varchar(50)		หน่วยงานที่รับผิดชอบ
11	อายุการใช้งาน	varchar(50)		อายุการใช้งาน

ตารางที่ 3 พจนานุกรมข้อมูล “lend” และ “recoup”

ฟิลด์	ชื่อฟิลด์	ชนิดข้อมูล	Key	อธิบาย
1	id	int(40)	PR	รหัส
2	ชื่อนามสกุล	varchar(50)		ชื่อและนามสกุล
3	ครุภัณฑ์ที่ยืม	varchar(50)		ครุภัณฑ์ที่ยืม
4	serialnumber	varchar(50)		serial number
5	วันที่ยืม	varchar(30)		วันที่ยืม

ตารางที่ 4 พจนานุกรมข้อมูล “tagID”

ฟิลด์	ชื่อฟิลด์	ชนิดข้อมูล	Key	อธิบาย
1	ID	int(100)	PR	รหัส
2	TagID	varchar(100)		หมายเลขแท็ก
3	Type	varchar(100)		ชนิด
4	Place	varchar(100)		สถานที่

ตารางที่ 5 พจนานุกรมข้อมูล “admin”

ฟิลด์	ชื่อฟิลด์	ชนิดข้อมูล	Key	อธิบาย
1	id	int(15)	PR	รหัส
2	user_name	varchar(15)		username
3	user_pass	varchar(15)		รหัสผ่าน
4	name	varchar(40)		ชื่อ-นามสกุล

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การทดสอบระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือกับแท็ก เริ่มต้นจากเปิดแอปพลิเคชันเลือกเมนู “SCAN NFC” หลังจากนั้นเลื่อนแท็กที่ระยะต่าง ๆ พร้อมทั้งสังเกตข้อมูลที่หน้าจอโทรศัพท์มือถือ ผลการทดสอบจำนวน 3 ครั้งพบว่า ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือกับแท็กที่เหมาะสมอยู่ที่ 0 – 7.5 เซนติเมตร

ตารางที่ 6 จำนวนกระดาษมันที่ใช้ทดสอบการดูดซับแม่เหล็กไฟฟ้า

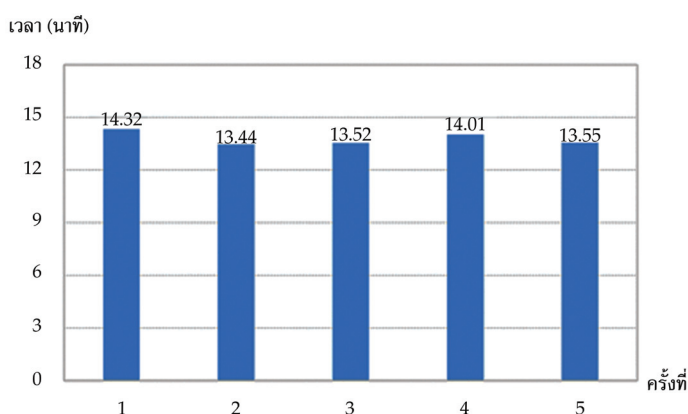
ครุภัณฑ์	ชนิดพื้นผิว	การอ่านแท็ก
โต๊ะปฏิบัติการไฟฟ้า	ไม้อัด	✓
โต๊ะ	ไม้อัด	✓
แหล่งจ่ายไฟฟ้า	โลหะ	×
เครื่องกำเนิดความถี่	พลาสติก	✓
ออสซิลโลสโคป	พลาสติก	✓
โปรเจคเตอร์	พลาสติก	✓
เครื่องปรับอากาศ	โลหะ	×
จอรับภาพ	แมทไวท์ (Matte White)	✓
เครื่องฉายภาพสามมิติ	พลาสติก	✓
เก้าอี้	พลาสติก	✓
เครื่องขยายเสียง	โลหะ	×

การทดสอบหน้าสัมผัสของครุภัณฑ์ (ตารางที่ 6) เช่น โต๊ะปฏิบัติการหน้าสัมผัสทำมาจากไม้อัด เครื่องกำเนิดความถี่ไฟฟ้าหน้าสัมผัสทำมาจากพลาสติก แหล่งจ่ายไฟฟ้าและเครื่องขยายเสียงหน้าสัมผัสทำมาจากโลหะ ผลการทดสอบพบว่า โทรศัพท์มือถือสามารถอ่านแท็กบนครุภัณฑ์ที่หน้าสัมผัสทำจากไม้อัด และพลาสติกได้ และไม่สามารถอ่านแท็กที่ติดบนหน้าสัมผัสโลหะ เนื่องจากโลหะสะท้อนคลื่นความถี่ออกมาบดบังคลื่นความถี่ที่ส่งออกมาจากแท็ก แก้ไขปัญหาหน้าสัมผัสโลหะโดยนำกระดาษมันขนาด 5 x 5.3 เซนติเมตร คั่นกลางระหว่างพื้นผิวโลหะกับแท็กก่อนนำไปติดบนครุภัณฑ์ ผลการทดสอบดังตารางที่ 7 เมื่อใช้กระดาษมันเพียง 1 – 2 แผ่นวางชั้นกลางก็ยังคงอ่านแท็กไม่ได้ เมื่อเพิ่มจำนวนกระดาษมันเป็น 3 แผ่นพบว่า โทรศัพท์มือถือสามารถอ่านแท็กบนครุภัณฑ์พื้นผิวโลหะได้ดีขึ้น จึงทดสอบที่กระดาษมันจำนวน 4 และ 5 แผ่น ตามลำดับ พบว่า โทรศัพท์มือถือสามารถอ่านแท็กบนครุภัณฑ์พื้นผิวโลหะได้เช่นกัน จากการทดสอบและการแก้ปัญหาทำให้ระบบฯ มีความแม่นยำถึง 97.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งครุภัณฑ์ที่ยังอ่านแท็กไม่ได้ คือ เครื่องปรับอากาศ เนื่องจากอยู่สูงเกินระยะที่โทรศัพท์สามารถอ่านแท็กได้ จึงแก้ปัญหาโดยเพิ่มการกรอกเลขแท็ก (TagID) ที่แอปพลิเคชันเมนู “ASSET CHECKER” จากการแก้ปัญหาส่งผลให้ระบบฯ มีความแม่นยำ 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 7 จำนวนกระดาษมันที่ใช้ทดสอบการดูดซับแม่เหล็กไฟฟ้า

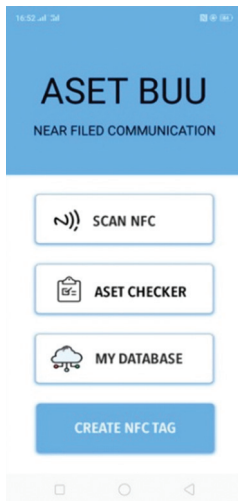
จำนวนกระดาษ (แผ่น)	การอ่านแท็ก
1	×
2	×
3	✓
4	✓
5	✓

การทดสอบระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบครุภัณฑ์ทั้งหมด 114 ชิ้นภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าเวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 13.768 นาทีจากการทดสอบ 5 ครั้ง (รูปที่ 12) ซึ่งภายในห้องปฏิบัติการมีแท็กที่ติดบนครุภัณฑ์ที่ทำจากโลหะ เช่น แห้งจ่ายไฟฟ้าและเครื่องขยายเสียงจำนวน 20 ชิ้น และมีครุภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้โทรศัพท์มือถือสแกนแท็ก คือ เครื่องปรับอากาศ จำนวน 3 เครื่อง เนื่องจากเครื่องปรับอากาศติดตั้งอยู่สูงเกินระยะสแกนแท็ก จึงใช้การกรอกเลข TagID เข้าสู่ระบบแทน จากการแก้ปัญหาข้างต้น ทำให้ระบบสามารถตรวจสอบครุภัณฑ์ได้ครบและสามารถนำระบบฯ ไปใช้งานได้จริง



รูปที่ 12 ระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบครุภัณฑ์จำนวน 114 ชิ้น

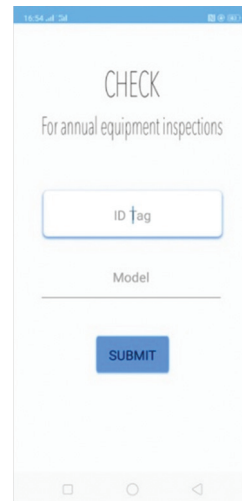
การทดสอบตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี เริ่มต้นจากเปิดแอปพลิเคชัน (รูปที่ 13(ก)) เลือกเมนู “ASSET CHECKER” เข้าสู่หน้าล็อกอินเข้าสู่ระบบ (รูปที่ 13(ข)) กรอก Username และ Password กดปุ่ม “LOGIN” แอปพลิเคชันจะแสดงดังรูปที่ 13(ค) เพื่อให้สแกนแท็กหรือป้อน TagID จากนั้นกดปุ่ม “SUBMIT” เพื่อส่งข้อมูลครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบได้ไปเก็บลงฐานข้อมูล (รูปที่ 13(ง)) ระบบฯ สามารถแสดงข้อมูลการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีทางแอปพลิเคชันและเว็บไซต์ ส่วนของแอปพลิเคชัน (รูปที่ 13(ก)) เลือกเมนู “MY DATABASE” จะแสดงข้อมูลครุภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบจากการสแกนแท็กหรือกรอกข้อมูลดังรูปที่ 13(จ) ส่วนของเว็บไซต์จะดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล content (ตารางที่ 2) มาวิเคราะห์และแสดงผลพร้อมระบุจำนวนครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบได้ทั้งหมดดังตัวอย่างในรูปที่ 14



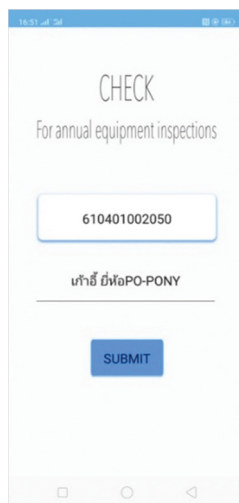
(ก) หน้าหลัก



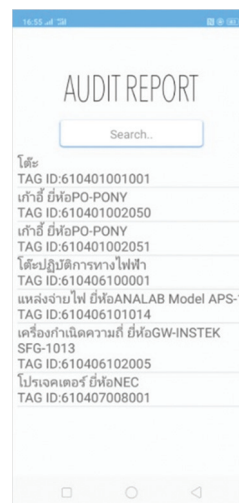
(ข) หน้าล็อกอิน



(ค) ตรวจสอบครุภัณฑ์



(ง) ตรวจสอบครุภัณฑ์



(จ) รายงานผล

รูปที่ 13 ตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี

มีจำนวนครุภัณฑ์ที่ตรวจสอบได้ทั้งหมด 114 ชิ้น										
ลำดับ	วัน เดือน ปี ที่ซื้อ	ราคา	อายุการใช้งาน	บริษัทผู้ซื้อ	รุ่น (model)	TagID	รหัสครุภัณฑ์	งบประมาณจากหน่วยงานใด	สถานที่	หมายเหตุรับเกิด
1	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014001	4210-001-0001-199-51	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
2	0000-00-00	3200	10 ปี	METEC	โต๊ะปฏิบัติงานทางไฟฟ้า	610406100001	610406100001	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
3	0000-00-00	18500	7 ปี	Measuretronix	อลูมิเนียมโครง ยี่ห้อTeltronix TDS 1001B	610408104001	5406007010011	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
4	2019-01-02	1200	10 ปี	Siaminternationaltrader	โต๊ะ	610401001001	610401001001	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
8	2019-02-12	12900	7 ปี	Projectorpro	โปรเจคเตอร์ ยี่ห้อNEC	610407008001	610407008001	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
9	2019-02-06	2490	7 ปี	Projectorpro	จอรับภาพ ยี่ห้อVERTEX	610407006001	610407006001	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
10	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014002	4210-001-0001-200-51	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
11	2018-12-13	18500	7 ปี	DAIKIN	เครื่องปรับอากาศ ยี่ห้อEMINANT	610401014003	4210-001-0001-201-51	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
12	2019-02-06	12900	7 ปี	Projectorpro	เครื่องฉายภาพสามมิติ ยี่ห้อVERTEX Model D-4690ST	610407100001	610407100001	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
13	2019-02-06	750	7 ปี	Projectorpro	เครื่องขยายเสียง ยี่ห้อ Royal Model PCE-2040S-40w	610406003001	5835-013-0001-14-50	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
17	0000-00-00	18700	7 ปี	Measuretronix	เครื่องกำเนิดความถี่ ยี่ห้อGW-INSTEK SFG-1013	610406102001	5406042010029	คณะกรรมการ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

รูปที่ 14 รายงานผลการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีทางเว็บไซต์

สรุปผล

ระบบจัดการครุภัณฑ์ที่ใช้เทคโนโลยี NFC พัฒนาขึ้นเพื่อลดความผิดพลาด ลดระยะเวลา และเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบครุภัณฑ์ จากเดิมที่ต้องใช้เจ้าหน้าที่ในการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปี เปลี่ยนเป็นการติดแท็ก NFC บนครุภัณฑ์ที่ทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และเว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้น เริ่มต้นจากนำโทรศัพท์มือถืออ่านแท็กที่ติดบนครุภัณฑ์เพื่อเก็บข้อมูลของครุภัณฑ์และส่งข้อมูลที่อ่านได้ไปเก็บในฐานข้อมูลโดยรายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ จะแสดงบนเว็บไซต์ ผลการทดสอบมีดังนี้ ระยะทางระหว่างโทรศัพท์มือถือกับแท็กแบบสติกเกอร์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0 - 7.5 เซนติเมตร โทรศัพท์มือถือสามารถอ่านแท็กบนครุภัณฑ์ได้เกือบทุกชิ้น ยกเว้นครุภัณฑ์ที่มีพื้นผิวเป็นโลหะ จึงใช้กระดาษมันวางรองระหว่างแท็กกับครุภัณฑ์ การแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้ช่วยให้การอ่านแท็กมีประสิทธิภาพขึ้น และครุภัณฑ์ที่อยู่สูงเกินระยะที่โทรศัพท์มือถือจะสามารถอ่านแท็กได้ เช่น เครื่องปรับอากาศ จะใช้การกรอกข้อมูลแทน จากการทดสอบใช้งานจริงภายในห้องปฏิบัติการพบว่าระยะเวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 13.768 นาทีสำหรับการตรวจสอบครุภัณฑ์จำนวน 114 ชิ้น หรืออ่านแท็กที่เวลา 7.25 วินาทีต่อ 1 แท็ก

References

- [1] Shobha, N. S. S., Aruna, K. S. P., Bhagyashree, M. D. P., and Sarita, K. S. J. (2016). NFC and NFC payments: A review. In **Proceedings of International Conference on ICT in Business Industry & Government**. pp. 1-7
- [2] Lamphun, P. Na. (2017). The Efficiency Increment Services Via NFC: A Case Study of Bakery and Coffee Shop. **Panyapiwat Journal**. Vol. 9, No. 1, pp. 221-230
- [3] Boonyingyong, R. and Apornpisarn, K. (2018). Fixed Assets Management System: A Case Study of Banphao General Hospital. In **Proceedings of UTCC Academic Day**. pp. 1810-1823

- [4] Sewetwong, K., Nampa, K., Kanarkard, W., and Saenwannakoon, W. (2014). Near Field Communication (NFC) or QR Code Technology for Libraries using Smart Poster. **PULINET Journal**. Vol. 1, No. 1, pp. 27-31
- [5] Chuakphakdi, S. and Saithong, P. (2018). The Development of Indoor Way Finding System Using Near Field Communication Technology for Android Smartphone Device. **Journal of Information Technology Management and Innovation**. Vol. 5, No. 1, pp. 40-49
- [6] Boonchukusong, P. and Woraratpanya, K. (2012). Mobile Payment with Near Field Communication and other technology. **KMITL Journal of Information Technology**. Vol. 1, No. 1, pp. 1-7
- [7] Christian, L., Juwitasary, H., Chandra, Y. U., Putra, E. P., and Ffilia. (2019). Evaluation of the E-Service Quality for the Intention of Community to Use NFC Technology for Mobile Payment with TAM. In **Proceedings of International Conference on Information Management and Technology**. pp. 24-29
- [8] Jorda, R. L., Coballes, J. R. A., Enriquez, L. A. C., Millan, M. L. S., Mora, A. J., Teodoro, M. N. G., Arago, N. M., Thio-ac, A. C., and Tolentino, L. K. S. (2018). Comparative Evaluation of NFC Tags for the NFC-Controlled Door Lock with Automated Circuit Breaker. In **Proceedings of International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management**. pp. 1-6
- [9] Chuentawat, R., Rattanasuporn, J., and Neankratok, S. (2019). Development of an E-Commerce System from a Requirement of the OTOP Entrepreneurs in Nakhon Ratchasima. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 12, No. 1, pp. 142-157

การศึกษาคุณสมบัติผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูป Study of Instant Organic Jasmine Rice Porridge Properties

สุมาลี มุสิก^{1*} ชมพูนุช ข้องลา¹ จิรายุส วรรัตน์โกศา¹ พิมพา สร้อยสูงเนิน¹ วรพงษ์ บัวเงิน¹
อาทิตย์ อัสวสุชี¹ เพลงพิน เพียรภูมิพงศ์² และดุษฎิ เทียมเทศ บุญมาสูงทรง³
Sumalee Musika^{1*} Chompoonuch Khongla¹ Jirayus Woraratphoka¹
Phimpha Soisungnoen¹ Worapong Buangern¹ Artit Ausavasukhi¹
Plengpin Pienpoompong² and Dusadee Teimtes Boonmasungsong³

Received: March 28, 2020; Revised: July 15, 2020; Accepted: July 17, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปจากข้าวหัก โดยเติมเอนไซม์พุลลาเนส และทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเปรียบเทียบกับโจ๊กข้าวหอมมะลิสำเร็จรูปทางการค้า พบว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำและปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูงกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลิสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผู้ทดสอบชิมมีความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบเล็กน้อย (6.07 ± 1.83 และ 6.73 ± 1.34) เมื่อนำโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปมาเป็นส่วนผสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสได้ พบว่าผลิตภัณฑ์มีความขึ้นสูงกว่าขณะที่ค่าดัชนีการดูดซับน้ำต่ำกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลิสำเร็จรูปปรุงรสได้ทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสได้อยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.46 ± 1.20) นอกจากนี้โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสได้มีร้อยละปริมาณโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 12.15 3.12 75.34 และ 378.05 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณเหล็ก แคลเซียม โซเดียม วิตามินบี1 และวิตามินเอ เท่ากับ 1.01 19.16 1,765 0.03 และ 63.42 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

¹ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

³ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

¹ Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

³ Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author E - mail Address: musika_noi@hotmail.com

งานวิจัยนี้บ่งชี้ว่า ผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์ที่ผลิตขึ้นมีปริมาณแป้งต้านทานการย่อยและดัชนีการดูดซึมน้ำที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม ควรพัฒนารสชาติและเนื้อสัมผัสให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไป

คำสำคัญ : ข้าวหอมมะลินทรีย์; โจ๊ก; การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

Abstract

The objective of this research was to study the physical, chemical and sensory properties of instant organic jasmine rice porridge from broken rice by adding pullulanase enzyme and dried using drum dryer, comparing the quality with commercial instant jasmine rice porridge. The results showed that the water absorption index (WAI) and the resistant starch content of instant organic jasmine rice porridge were higher than commercial instant jasmine rice porridge ($p < 0.05$). Sensory evaluation revealed that the overall acceptability score of instant organic jasmine rice porridge and commercial instant jasmine rice porridge were slightly like (6.07 ± 1.83 and 6.73 ± 1.34). Instant organic jasmine rice porridge with chicken product was developed by using instant organic jasmine rice porridge as an ingredient. As a result, the moisture content was higher, while the WAI was significantly lower than commercial instant rice porridge with chicken ($p < 0.05$). Sensory evaluation showed the overall acceptability score of instant organic jasmine rice porridge with chicken was moderately like (7.46 ± 1.20). In addition, the nutritional value of instant organic jasmine rice porridge with chicken had protein, fat, carbohydrate and energy of 12.15, 3.12, 75.34 % and 378.05 kcal/100 g, respectively. The amount of iron, calcium, sodium, vitamin B1 and vitamin A were 1.01, 19.16, 1,765, 0.03, and 63.42 mg/100 g, respectively. The current research indicates that this organic jasmine rice porridge contains high resistant starch and WAI, suggesting health benefits of this porridge. However, there is still room for improvement in the taste and texture of the organic jasmine rice porridge to gain the better consumer acceptability and to develop this porridge as a health food product.

Keywords: Organic Jasmine Rice; Porridge Rice; Drum Dryer

บทนำ

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนข้าวหอมมะลินครคง ตำบลหนองมะนาว อำเภอคง จังหวัดนครราชสีมา เป็นกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกข้าวอินทรีย์ โดยมีผลิตภัณฑ์ข้าวสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวจำหน่ายให้กับผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ นอกจากนั้นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนข้าวหอมมะลินครคงยังมีโรงสีข้าวชุมชนและ

เป็นผู้รับซื้อข้าวเปลือกอินทรีย์จากสมาชิกและเครือข่าย ข้าวหักที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสีข้าว มีราคาจำหน่ายที่ต่ำกว่าข้าวเต็มเมล็ด แต่อย่างไรก็ตามข้าวหักยังมีสารอาหารอยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้น ข้าวหักจึงเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวหัก แนวทางหนึ่งในการผลิตโจ๊กข้าวสำหรับเป็นอาหารทางเลือกเพื่อสุขภาพแก่ผู้บริโภคควรคำนึงถึงปริมาณแป้งต้านทานการย่อย (Resistant Starch) การเกิดแป้งต้านทานการย่อยชนิดที่ 3 ส่วนใหญ่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ของโมเลกุลอะมิโลส โดยเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งเพื่อทำให้แป้งสุกแล้วทิ้งให้แป้งเกิดการเย็นตัวลง โมเลกุลของแป้งส่วนอะมิโลสที่ละลายออกมาจะเกิดการจับเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบ Double Helix Complex ซึ่งเป็นผลึกที่แข็งแรงและสามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์ได้ [1] นอกจากนี้ยังมีการใช้เอนไซม์ในการตัดกิ่ง (Debranching Enzyme) เช่น เอนไซม์พุลูลานเนส (Pullulanase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะ α -1,6 ของพุลูลแลนและอะมิโลเพคติน โดยสามารถย่อยได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2-3 หน่วย ซึ่งสามารถเพิ่มศักยภาพในการเกิดแป้งต้านทานการย่อยจากแป้งชนิดที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ในปัจจุบันการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคเริ่มเปลี่ยนไป ต้องการความสะดวก รวดเร็วมากขึ้นในการปรุงหรือรับประทานอาหาร และโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปยังเหมาะกับผู้บริโภคทุกเพศทุกวัย เหมาะสำหรับผู้วย สามารถรับประทานได้ตลอดเวลา ทำให้ตลาดโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ในกระบวนการผลิตโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปต้องผ่านกระบวนการทำแห้งโดยการทำให้แบบลูกกลิ้งเป็นการทำแห้งอย่างหนึ่งที่ใช้ในการผลิตอาหารกึ่งสำเร็จรูปโดยจะเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากอาหารเหลวชั้นหนึ่งไปเป็นผง ระบบของการทำแห้งจะอาศัยหลักการนำความร้อนของลูกกลิ้งถ่ายเทความร้อนไปยังอาหาร ทำให้อาหารแห้ง น้ำสามารถระเหยออกได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น จึงทำให้คุณค่าทางสารอาหารคงอยู่แม้จะผ่านความร้อน เนื่องจากอาหารสัมผัสกับผิวลูกกลิ้งโดยตรงทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นแผ่นแห้ง ซึ่งจะแตกเป็นผงได้ง่ายในภายหลัง ทำให้ง่ายต่อการบริโภคและเก็บรักษาได้นานขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำข้าวหักที่เป็นข้าวหอมมะลินิเวียมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินิเวียกึ่งสำเร็จรูปโดยการทำให้แบบลูกกลิ้งและนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งต้านทานการย่อย ดัชนีน้ำตาล ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางผลึก ตรวจสอบรูปร่างด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส จากนั้นนำโจ๊กข้าวหอมมะลินิเวียกึ่งสำเร็จรูปมาเค็ม ส่วนผสมแห้งต่าง ๆ สำหรับเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและปรุงรส เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินิเวียกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี ทดสอบประสาทสัมผัส โดยเปรียบเทียบกับโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า และทดสอบคุณค่าทางโภชนาการ เพื่อกลุ่มวิสาหกิจชุมชนข้าวหอมมะลินิเวียจะได้นำไปพัฒนาเป็นสินค้าที่เป็นอัตลักษณ์ของกลุ่ม และจำหน่ายให้กับผู้บริโภค ซึ่งจะเป็นการเพิ่มรายได้ให้กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกข้าวอินทรีย์อีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของโจ๊กข้าวหอมมะลินิเวียกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส
2. เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของโจ๊กข้าวหอมมะลินิเวียกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่
3. เพื่อวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของโจ๊กข้าวหอมมะลินิเวียกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ และอุปกรณ์

ข้าวหักหอมมะลินิทรีย จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนข้าวหอมมะลินครคง อำเภอกอง จังหวัดนครราชสีมา เอนไซม์ Pepsin, Pancreatin และ Myloglucosidase ซื้อจากบริษัท Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, ประเทศสหรัฐอเมริกา Glucose Oxidase-Peroxidase Reagent (GOPOD Assay Kit) ซื้อจากบริษัท (Megazyme, Ireland) Bray Business Park, Bray, Co., Wicklow, ประเทศไอร์แลนด์ และเอนไซม์ Pullulanase (EC 3.2.1.41) ซื้อจากบริษัท iKnowZyme, Reach Bio Technology, Co., BKK, ประเทศไทย

2. การเตรียมใจักข้าวอินทรีย์กึ่งสำเร็จรูป

ซึ่งข้าวหักหอมมะลินิทรีย 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 6 ลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 90 - 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 - 30 นาที จนข้าวสุก ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และย่อยด้วยเอนไซม์ Pullulanase ที่ระดับร้อยละ 0.1 เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาทำแห้งโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Twin Drum Dryer, TKKTD3040, Thailand) ที่สภาวะอุณหภูมิ 130 - 140 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที เนื่องจากสภาวะดังกล่าวให้ผลผลิต (Yield) สูงจากการทดลองเบื้องต้น จากนั้นนำแผ่นใจักที่ได้ไปอบต่อในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลง นำแผ่นใจักที่ได้มาบดด้วยเครื่องปั่น และใช้เป็นตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์และทดสอบต่อไป สำหรับผลิตภัณฑ์ใจักข้าวหอมมะลินิทรียไม่ปรุงรสทางการค้าผ่านการทำแห้งโดยใช้เครื่องเอกซ์ทราดเดอร์ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองและดูดน้ำได้ดี

3. การเตรียมส่วนผสมแห้ง

การทำแห้งส่วนผสมสำหรับทำผลิตภัณฑ์ใจักข้าวหอมมะลินิทรียกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไว้ โดยวิธีการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Mettert, UF110, Germany) ส่วนผสมที่ใช้ในการปรุงแต่ง ผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและรสชาติ ได้แก่ เนื้อไก่ แครอท พริกทอง ต้นหอม ชিং และกระเทียม เตรียมส่วนผสมแห้งตามวิธีของ Niyomwet, P., Sappasit, P., Waree, A., and Khongsit, P. [2] เตรียมเนื้อไก่โดยชั่งอกไก่ 1 กิโลกรัม เติมน้ำสะอาดปริมาตร 1.5 ลิตร เติมน้ำมัน 10 กรัม น้ำตาล 10 กรัม จากนั้นเคี่ยวด้วยอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส 15 นาที เติมน้ำซอขาว 50 มิลลิลิตร เคี่ยวต่อ 15 นาทีจนสุก เสร็จแล้วนำไปฉีกเป็นเส้นยาว 2.5 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร ทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 - 24 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนผสมแห้งมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 [2] สำหรับแครอทและพริกทองหั่นเป็นลูกเต๋ารูปร่าง 0.5 x 0.5 x 0.5 เซนติเมตร และนำไปนึ่งผ่านไอน้ำนาน 10 นาที ส่วนต้นหอมและกระเทียมหั่นขนาด 0.3 x 0.3 x 0.5 เซนติเมตร ชিংหั่นขนาด 0.2 x 1 x 0.2 เซนติเมตร จากนั้นทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Mettert, UF110, Germany) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 - 24 ชั่วโมง นำชিংและกระเทียมอบแห้งมาปั่นให้ละเอียดเป็นผง

4. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีใจักข้าวหอมมะลินิทรียกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสและส่วนผสมแห้ง

4.1 การวิเคราะห์ความชื้น วิเคราะห์ค่าความชื้นของตัวอย่างใจักข้าวหอมมะลินิทรียกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสและส่วนผสมแห้งตามวิธีของ AOAC [3]

4.2 การวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water Activity, a_w) วัดค่า a_w ของตัวอย่างโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสและส่วนผสมแห้ง ทำการทดสอบด้วยเครื่องวอเตอร์แอคทิวิตี (AQUALAB 4TE, dew point water activity meter, USA) วัดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.3 ดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI) วัดดัชนีการดูดซับน้ำของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส ตามวิธีของ Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., and Griffin, E. L. [4] ซึ่งโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส ปริมาณ 2.5 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 460 xg เป็นเวลา 15 นาที แยกน้ำส่วนใสด้านบนออก และนำหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมส่วนที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าดัชนีการดูดซับน้ำดังสมการที่ (1)

$$\text{ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)} = \frac{\text{น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมตะกอน} - \text{น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad (1)$$

ส่วนการหาดัชนีการดูดซับน้ำของส่วนผสมแห้งทำตามวิธีของ Prakash, S., Jha, S. K., and Datta, N. [5] ซึ่งส่วนผสมแห้ง 5 กรัม ใส่ลงในน้ำเดือด 150 มิลลิลิตร ต้มนาน 5 นาที แยกตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักสุดท้าย ดัชนีการดูดซับน้ำ = น้ำหนักสุดท้าย / น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น

5. การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total Starch)

วิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด โดยใช้ Total Starch Kit (Megazyme) ตามวิธีของ AOAC 996.11 และ AACC 76-13.01 โดยซึ่งตัวอย่างโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสและโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า 100 มิลลิกรัม เติมน้ำ 80 % เอทานอลปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำละลาย 1.7 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 2 มิลลิลิตร กวนตัวอย่างด้วย Magnetic Stirrer ในอ่างน้ำแข็งจนกระทั่งตัวอย่างจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 600 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเติมเอนไซม์ Thermostable α -Amylase ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ตามด้วยเอนไซม์ Amyloglucosidase ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร แล้วนำไปย่อยอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส 30 นาที แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล D-glucose ด้วย GOPOD reagent โดยปิเปตตัวอย่างไป 0.1 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลาย GOPOD reagent ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร บ่มที่สภาวะ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร เทียบกับสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นคำนวณปริมาณแป้งทั้งหมด (Total Starch) ดังสมการที่ (2)

$$\text{Total Starch (กรัม/ 100 กรัมแป้ง)} = \Delta A \times F \times \frac{100}{0.1} \times \frac{1}{1000} \times \frac{100}{W} \times \frac{162}{180} \quad (2)$$

โดยที่

ΔA = ค่าการดูดกลืนแสงเมื่ออ่านเทียบกับ blank
 F = Factor ที่ใช้เปลี่ยนหน่วยจากค่าการดูดกลืนแสงเป็นไมโครกรัมของน้ำตาลกลูโคส ($F = 96.6884$)

$$100/0.1 = \text{Volume Correction (0.1 mL taken from 100 mL)}$$

- $1/1000$ = ค่าการเปลี่ยนหน่วยจากไมโครกรัมเป็นมิลลิกรัม
 W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างในหน่วยมิลลิกรัม
 $= \text{Weight} \times [(100 - \text{Moisture Content}) / 100]$
 $100/W$ = ค่าการเปลี่ยนหน่วยเป็น %
 $162/180$ = Factor สำหรับเปลี่ยน Free D-glucose เป็น Anhydro-Glucose

6. การวิเคราะห์หาค่าดัชนีน้ำตาล (Estimated Glycemic Index; eGI)

วิเคราะห์หาค่าดัชนีน้ำตาล ตามวิธีของ Na-Nakorn, K., Kulrattanarak, T., Hamaker, B. R., and Tongta, S. [6] และ Sopade, P. A. and Gidley, M. J. [7] โดยชั่งตัวอย่างต้มสุกแล้ว 0.5 กรัม เติมสารละลายเอนไซม์ α -Amylase (Porcine Pancreatic α -Amylase, 250 ยูนิต/มิลลิกรัม, 20 มิลลิโมลาร์โซเดียมบัฟเฟอร์, pH 6.9 ผสม 6.7 มิลลิโมลาร์โซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ Pepsin (1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร, 0.02 โมลาร์ HCl, pH 2) ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร นำไปบ่มย่อยใน Shaking Water Bath ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 170 rpm 30 นาที และหยุดการทำงานของเอนไซม์ด้วยสารละลาย 0.02 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ผสมระหว่าง Pancreatin (2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร, 0.2 โมลาร์ NaOAc, pH 6) และ Amyloglucosidase (28 ยูนิต/มิลลิลิตร, 0.2 โมลาร์ NaOAc, pH 6) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร จากนั้นสุมตัวอย่าง ปริมาตร 100 ไมโครลิตร มาตรวจหาปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง Glucose Meter ตามระยะเวลา 0 10 20 30 45 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที โดยเวลาที่ 0 นาที คือการสุมตัวอย่าง มาก่อนเติมสารละลาย Mixture Enzyme และนำค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในแต่ละระยะเวลาที่ ได้มาคำนวณหา Digested Starch (%) ในแต่ละเวลา โดยเทียบกับปริมาณแป้งทั้งหมดที่ได้ คำนวณพื้นที่ใต้กราฟ (Areas Under Curves, AUC) ของความเข้มข้นกลูโคสที่ถูกย่อยออกมาจากตัวอย่าง ใ้กับเวลาที่ คำนวณค่า HI คือสัดส่วนระหว่างค่า AUC ของตัวอย่างเทียบกับ AUC ของขนมปังขาวรายงานค่าเป็นร้อยละ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า Glycemic Index (GI) ดังสมการ $GI = 39.51 + (0.570 \times HI)$ [8]

7. การวิเคราะห์ปริมาณแป้งต้านทานการย่อย (Resistant Starch)

วิเคราะห์ปริมาณแป้งต้านทานการย่อย ดัดแปลงตามวิธีของ AOAC [9] โดยใช้ชุดทดสอบ Resistant Starch Kit (Megazyme, Bray, Ireland) โดยชั่งตัวอย่างแห้งประมาณ 100 มิลลิกรัม เติมสารละลาย 50 มิลลิโมลาร์ Sodium Maleate Buffer, pH 6.0 ปริมาตร 3.5 มิลลิลิตร แล้วนำไปย่อยด้วย Pancreatic α -Amylase/Amyloglucosidase ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในอ่างบ่มเขย่าควบคุมอุณหภูมิ โดยวางหลอดย่อยในแนวนอนขนานกับการเคลื่อนที่ความเร็วในการเขย่า 200 stroke/min เมื่อครบ 4 ชั่วโมง เติมเอทานอล 95% ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยาแล้ว นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3250 xg เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ล้างตะกอนด้วย Aqueous Ethanol (50% v/v) 8 มิลลิลิตร 2 รอบ จากนั้นละลายส่วนตะกอนด้วยสารละลาย 1.7 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เมื่อตะกอนละลายจนหมด เติมสารละลาย 1.2 โมลาร์ Sodium Acetate Buffer, pH 3.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร แล้วเติมเอนไซม์ Amyloglucosidase 3300 ยูนิต/มิลลิลิตร ปริมาตร 0.1 หรือ 0.3 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และวิเคราะห์ปริมาณ น้ำตาล D-Glucose ด้วย GOPOD Reagent

8. การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางผลึก

ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางผลึกโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction โดยกดตัวอย่างด้วยเครื่องบดขนาดแบบละเอียด (Planetary Micro Mill Impact Force, FRITSCH - Model PULVERISETTE 7, Germany) จากนั้นตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (LabX-XRD-6100, Shimadzu, USA) โดยวัด Diffraction Pattern ที่มุม 2θ ในช่วง $10^\circ - 80^\circ$ โดยใช้สภาวะที่กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ ค่ายไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ ความกว้าง slit 1° ความเร็วในการตรวจวัด $0.48^\circ/\text{นาที}$

9. การตรวจสอบรูปร่างด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (FEI, QUANTA 250, USA) โดยตรึงตัวอย่างบนแถบคาร์บอน และใช้กำลังไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 150 เท่า

10. การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส 10 กรัม มาเติมน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 - 100 องศาเซลเซียส ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:10 w/v) เป็นเวลา 2 - 3 นาที จากนั้นทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีให้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ทดสอบแบบ 9-Point Hedonic Scaling 1 ถึง 9 คะแนน (1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ทดสอบที่เป็นผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 26 คน ตามวิธีดัดแปลงของ Mayachiew, P. [10]

11. การผลิตผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

เตรียมผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ โดยใช้ส่วนผสมต่าง ๆ คิดเทียบปริมาณ 100 กรัม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

ส่วนผสม	ปริมาณ (กรัม)
โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูป	84.5
เนื้อไก่อบแห้ง	2.0
ผงปรุงรสไก่	4.0
โปรตีนถั่วเหลือง	2.0
กระเทียมผง	1.0
ขิงผง	1.0
ต้นหอม	0.5
แครอท	1.0
ฟักทอง	1.0
เกลือ	3.0

12. การวิเคราะห์สมบัติกายภาพและทางเคมีของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ วิเคราะห์ความชื้น วัดค่า a_w และดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) ของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ตามวิธีการในข้อ 4.1 4.2 และ 4.3

13. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ
นำผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่มาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ตามวิธี AOAC [3] ปริมาณพลังงาน วิตามินอี เอ ตามวิธี AOCS [11] วิตามินบี1 บี2 [12] ปริมาณแคลเซียม เหล็ก สังกะสี [3] ปริมาณฟอสฟอรัส [13]

14. การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส
นำผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ 10 กรัม มาเติมน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 - 100 องศาเซลเซียส ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:10 w/v) เป็นเวลา 2 - 3 นาที จากนั้นทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีให้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ทดสอบแบบ 9-Point Hedonic Scaling 1 ถึง 9 คะแนน (1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ทดสอบที่เป็นผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 26 คน

15. การวิเคราะห์สถิติ
ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ T-Test Independent Sample สำหรับตัวแปรอิสระที่มี 2 กลุ่ม ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม PASW Statistics 18 Release 18.0.0 software

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. คุณภาพของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส
โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสที่ผ่านการทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 87.70 มีความชื้นร้อยละ 8.88 ± 0.13 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานเล็กน้อย โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 [14] ขณะที่โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์ไม่ปรุงรสทางการค้ามีความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 8.66 ± 0.03 (ตารางที่ 2) ส่วนค่าน้ำอิสระ (a_w) ของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสมีค่าน้อยกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.415 - 0.4526 เมื่อเปรียบเทียบดัชนีการดูดซับน้ำพบว่า โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสมีดัชนีการดูดซับน้ำที่สูงกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 7.60 ± 0.04 และ 6.83 ± 0.03 ตามลำดับ Mayachiew, P. [10] ศึกษาดัชนีการดูดซับน้ำของโจ๊กข้าวสังข์หยดและข้าวหอมมะลินทรีย์มีค่าเท่ากับ 7.76 และ 11.51 ตามลำดับ ดัชนีการดูดซับน้ำของข้าวไรซ์เบอร์รี่ด้วยวิธีทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 6.29 - 9.90 [2]

ตารางที่ 2 ร้อยละผลผลิต ความชื้น ค่าน้ำอิสระ (a_w) และดัชนีการดูดซับน้ำของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

ผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลิ	ผลผลิต (%)	ความชื้น (%wb)*	น้ำอิสระ (a_w)*	ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)*
อินทรีย์กึ่งสำเร็จรูป ไม่ปรุงรส	87.70	8.88±0.13	0.4151±0.0031	7.60±0.04
กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า	-	8.66±0.03	0.4526±0.0040	6.83±0.03

หมายเหตุ * ข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$) วิเคราะห์โดยใช้ T-Test Independent Sample

1.2 ปริมาณแป้งและดัชนีน้ำตาลของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

ความสามารถในการย่อยของโจ๊กข้าวในระบบจำลองการย่อยในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กของมนุษย์ โดยทำการวัดปริมาณกลูโคสที่ปล่อยออกมาในแต่ละช่วงเวลา (*In Vitro Digestion*) พบว่าปริมาณแป้งทั้งหมดและค่าดัชนีน้ำตาลของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสและโจ๊กข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปทางการค้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าในช่วง 86.22 - 86.25 และ 78.69 - 78.78 ตามลำดับ ซึ่งค่าดัชนีน้ำตาล (estimated Glycemic Index, eGI) จัดอยู่ในกลุ่มอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง (ค่ามากกว่า 70) [15] ส่วนปริมาณกลูโคสที่ปลดปล่อยหลังการย่อย 20 นาที แสดงถึงแป้งที่ถูกย่อยได้เร็ว (RDS) ของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสมีค่ามากกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีค่าร้อยละ 49.74±0.98 และ 42.74±1.03 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณกลูโคสที่ปลดปล่อยในช่วงการย่อย 20 - 120 นาที (SDS) มีค่าที่น้อยกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีค่าร้อยละ 43.98±0.33 และ 51.93±0.65 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสที่ผ่านกระบวนการตัดกึ่งนี้ มีการปลดปล่อยอะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลที่สั้นลงออกมา โมเลกุลบางส่วนไม่เกิดการจับตัวเป็น Amylose-Amylose Double Helix ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยและตัดโครงสร้างแป้งให้กลายเป็นน้ำตาลได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม พบว่าการเตรียมโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสด้วยการย่อยด้วยเอนไซม์ Pullulanase ร้อยละ 0.1 เป็นเวลา 30 นาที และนำไปทำแห้งโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งสามารถเพิ่มระดับแป้งต้านทานการย่อย (Resistant Starch) ได้ โดยมีค่าสูงกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) มีค่าร้อยละ 0.13±0.00

1.3 ลักษณะโครงสร้างทางผลึกของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

เม็ดแป้งโดยทั่วไปมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ลักษณะความเป็นผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพคตินและอะมิโลสของเม็ดแป้ง จากผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวดิบเริ่มต้นมีสภาพผลึกเป็นชนิดเอ (A-Type Crystal) ซึ่งแสดงพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่ง 15.5° 17.5° และ 23.5° Theta ซึ่งลักษณะรูปแบบพีคที่ได้คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Pongjanta, J., Utaipatanacheep, A., Naivikul, O., and Piyachomkwan, K. [16] เมื่อนำข้าวหักมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนและย่อยด้วยเอนไซม์ Pullulanase เพื่อผลิตเป็นโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

(Enzyme-Rice Porridge) พบลักษณะพีคแบบ Broad Band (รูปที่ 1) เช่นเดียวกันกับโจ๊กข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า (Commercial Rice Porridge) โดยลักษณะพีคดังกล่าวแสดงถึงการสูญเสียโครงสร้างผลึก (Crystallinity) อย่างสมบูรณ์จากขั้นตอนการเจลาติไนส์ของแป้งระหว่างการต้ม และไม่พบลักษณะของพีคของสภาพผลึกชนิด V ในโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส ส่วนโจ๊กข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าพบสภาพผลึกคล้ายชนิด V เพียงเล็กน้อยที่ตำแหน่ง 13.5° และ 19.9° Theta ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการเกิดโครงสร้าง Amylose-Lipid Complex เป็นโครงสร้างแป้งทนย่อยแบบที่ 5 (Resistant Starch Type V) [16] การไม่พบโครงสร้างผลึกเมื่อวิเคราะห์ด้วย XRD จึงสอดคล้องกับค่าปริมาณแป้งต้านทานการย่อยที่ต่ำ (ตารางที่ 3) แสดงว่าการเตรียมโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปโดยวิธีการย่อยด้วยเอนไซม์ Pullulanase ที่ระดับร้อยละ 0.1 เป็นเวลา 30 นาที และแช่เย็น 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อการเกิดโครงสร้างผลึกที่ทนย่อยของแบบที่ 3 อาจเนื่องจากระยะเวลาในการตัดกิ่งด้วยเอนไซม์ Pullulanase ไม่เพียงพอในการตัดอะมิโลเพคตินให้เป็นอะมิโลสที่มีขนาดที่เหมาะสมในการจับตัวเป็นโครงสร้าง Amylose Double Helix

ตารางที่ 3 ปริมาณแป้งและดัชนีน้ำตาลของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูป

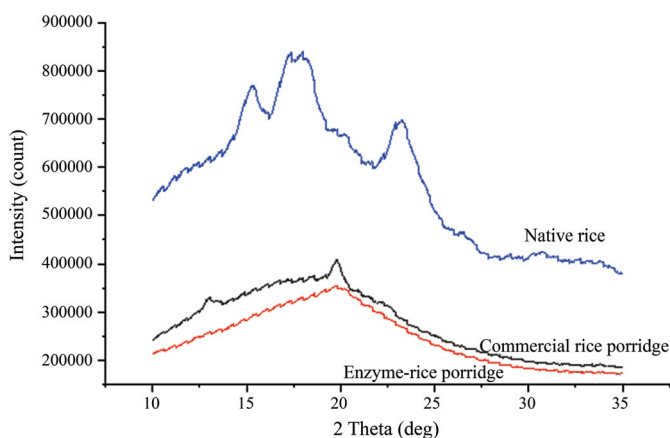
ผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลิ	ปริมาณแป้งชนิดต่าง ๆ (%db)				eGI ^{ns}
	TS ^{ns}	RDS*	SDS*	RS*	
อินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส	86.25±0.10	49.74±0.98	43.98±0.33	0.13±0.00	78.69±0.31
กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า	86.22±0.10	42.74±1.03	51.93±0.65	0.00±0.00	78.78±0.93

หมายเหตุ: * ข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

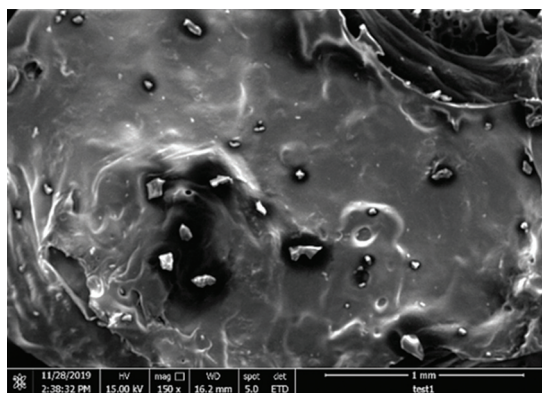
^{ns} ข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) วิเคราะห์โดยใช้ T-Test Independent Sample, TS = Total Starch, RDS = Rapid Digestible Starch, SDS = Slow Digestible Starch, RS = Resistant Starch, eGI = estimated Glycemic Index

1.4 ลักษณะโครงสร้างของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

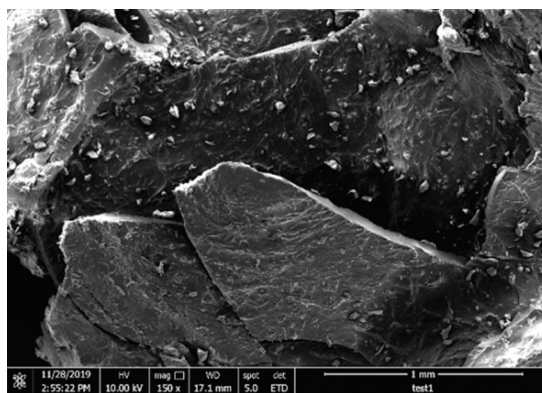
ลักษณะโครงสร้างของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสที่ผ่านการทำแห้งโดยลูกกลิ้ง (รูปที่ 2) พบว่า โครงสร้างของโจ๊กข้าวที่ผ่านการทำแห้งโดยลูกกลิ้งที่นำมาลดขนาดโดยการบดแบบหยาบ จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 4 mm มีลักษณะเป็นเกล็ดบาง ๆ จึงทำให้โจ๊กข้าวสามารถกินตัวได้สมบูรณ์เมื่อนำไปชงในน้ำร้อน ส่วนตัวอย่างโจ๊กข้าวหอมมะลิ กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าจะมีขนาดเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันแต่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและมีผิวเรียบ อาจเนื่องมาจากกระบวนการในการผลิตและการทำแห้งที่แตกต่างกันจึงทำให้มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อค่าดัชนีการดูดซับน้ำที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างทางผลึกของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปตรวจสอบด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)



(ก) โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส



(ข) โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า

รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope); กำลังขยาย 150x

1.5 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสเปรียบเทียบกับไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าโดยวิธี 9-Point Hedonic Scale (ตารางที่ 4) ใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 26 คน พบว่า ผู้ทดสอบชิมมีความชอบคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสมีคะแนนความชอบอยู่ในช่วง 5.88 - 6.61 อยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง สำหรับไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้ามีระดับความชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง โดยมีคะแนนอยู่ในช่วง 6.23 - 7.26 ส่วนคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสผู้ทดสอบชิมชอบไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้ามากกว่าไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีระดับความชอบปานกลาง (7.07 ± 1.67) อาจเนื่องจากการผลิตไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าใช้เครื่องเอกซ์ทราคเตอร์ อาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสไปพัฒนาต่อโดยนำไปเป็นส่วนผสมหลักในผลิตภัณฑ์ไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสได้

ตารางที่ 4 คุณภาพประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส

คุณลักษณะ	ไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรส	ไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า
สี ^{ns}	6.57 $\pm$ 1.74	7.26 $\pm$ 1.48
กลิ่น ^{ns}	6.61 $\pm$ 1.38	7.11 $\pm$ 1.10
รสชาติ ^{ns}	5.88 $\pm$ 1.21	6.23 $\pm$ 1.21
เนื้อสัมผัส*	6.03 $\pm$ 1.45	7.07 $\pm$ 1.67
ความชอบโดยรวม ^{ns}	6.07 $\pm$ 1.83	6.73 $\pm$ 1.34

หมายเหตุ: * ข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns} ข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) วิเคราะห์โดยใช้ T-Test Independent Sample; 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 = เฉย ๆ 6 = ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก 9 = ชอบมากที่สุด

2. คุณภาพของไอ้จิ้งจอกข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสได้

2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของส่วนผสมแห้งสำหรับปรุงรสได้

ร้อยละผลผลิต ความชื้น ค่าน้ำอิสระ (a_w) และดัชนีการดูดซับน้ำของส่วนผสมแห้งสำหรับปรุงรสได้ ดังตารางที่ 5 ส่วนผสมแห้งที่เป็นผักสำหรับเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและเครื่องเทศสำหรับปรุงรสมีค่าความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้แห้ง คือ ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก [17] โดยมีค่าในช่วงร้อยละ 4.47 - 6.93 ค่าน้ำอิสระ (a_w) ของวัตถุดิบมีค่าน้อยกว่า 0.6 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2377 - 0.4223 ดัชนีการดูดซับน้ำของส่วนผสมแห้งแต่ละชนิดพบว่า ต้นหอมและแครอทมีค่าการดูดซับน้ำคือ 6.20 ± 0.01 และ 5.44 ± 0.13 ตามลำดับ ในขณะที่ฟักทองมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำที่ค่อนข้างต่ำ

คือ 2.97 ± 0.27 ส่วนเนื้อไก่อบแห้งมีค่าดัชนีการดูดน้ำที่ต่ำมาก เนื่องจากโครงสร้างของเนื้อไก่ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของโปรตีนที่จับกันแน่นทำให้สามารถดูดซับน้ำกลับคืนได้ต่ำกว่าผักอบแห้ง

ตารางที่ 5 ร้อยละผลผลิตของวัตถุดิบหลังการทำแห้ง ความชื้น ค่าน้ำอิสระ (a_w) และดัชนีการดูดซับน้ำของส่วนผสมแห้งสำหรับปรุงรสไก่

วัตถุดิบ	ผลผลิตของ วัตถุดิบหลังการ ทำแห้ง (%)	ความชื้น (%wb)	น้ำอิสระ (a_w)	ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)
ต้นหอม	7.47	6.93 ± 1.49	0.3636 ± 0.0088	6.20 ± 0.01
แครอท	9.20	6.50 ± 1.00	0.4094 ± 0.0687	5.44 ± 0.13
ฟักทอง	14.30	6.81 ± 1.02	0.4223 ± 0.0089	2.97 ± 0.27
กระเทียมบด	24.85	4.44 ± 0.66	0.3063 ± 0.0242	ND
ขิงบด	12.77	4.47 ± 0.33	0.2377 ± 0.0068	ND
ไก่	26.61	6.91 ± 0.47	0.3874 ± 0.0214	1.94 ± 0.05

หมายเหตุ: ND = ไม่ได้ทำการทดสอบ

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบแห้งแต่ละชนิดแล้วนำมาผสมแล้วคั้นรูปโดยการเติมน้ำร้อน เริ่มจากการใช้ข้าวหักหอมมะลินทรีย์นำมาต้มให้สุก แล้วนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเพื่อทำให้เกิดการคั้นรูปเร็ว เสริมโปรตีนด้วยเนื้อไก่อบแห้งและโปรตีนถั่วเหลือง และวัตถุดิบต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 จากนั้นนำมาหาปริมาณความชื้น น้ำอิสระ (a_w) และดัชนีการดูดซับน้ำของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่เปรียบเทียบกับโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า ดังตารางที่ 6 พบว่าโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้ามีปริมาณความชื้น น้ำอิสระ (a_w) สูงกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ที่ผลิตได้มีความชื้นสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดเล็กน้อย คือมีค่าร้อยละ 8.26 ± 0.09 แต่อย่างไรก็ตามมีค่าความชื้นต่ำกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลิจากงานวิจัยของ Mayachiew, P. ซึ่งมีความชื้นร้อยละ 8.96 ± 0.04 [10] ผลิตภัณฑ์มีค่า a_w น้อยกว่า 0.6 แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์แห้งสามารถเก็บได้นาน เพราะเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่มีค่าดัชนีการดูดซับน้ำต่ำกว่าโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) มีค่าเท่ากับ 6.68 ± 0.18 ในขณะที่โจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้ามีค่าดัชนีการดูดซับน้ำเท่ากับ 8.16 ± 0.05 การที่ผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่มีปริมาณความชื้นที่สูงและดัชนีการดูดน้ำกลับต่ำกว่าโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า เนื่องจากปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งและความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งที่ใช้ [2] ดังนั้นหลังจากที่ได้แผ่นโจ๊กจากกระบวนการทำแห้งแบบลูกกลิ้งควรเพิ่มระยะเวลาการอบเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลง

ตารางที่ 6 ความชื้น ค่าน้ำอิสระ (a_w) และดัชนีการดูดซับน้ำของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่และโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า

ตัวอย่าง	ความชื้น (%wb)*	น้ำอิสระ (a_w)*	ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)*
โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่	8.26±0.09	0.4916±0.0102	6.68±0.18
โจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า	5.52±0.47	0.3000±0.0122	8.16±0.05

หมายเหตุ: * ข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)
วิเคราะห์โดยใช้ T-Test Independent Sample

2.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่เปรียบเทียบกับโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้าโดยวิธี 9-Point Hedonic Scale ใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 26 คน พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่อ่านสี กลิ่น อยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า ($p > 0.05$) ส่วนคุณลักษณะด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมผู้ทดสอบชิมมีความชอบโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้ามากกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 7 ผู้ทดสอบชิมชอบโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่อ่านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง โดยมีคะแนนเท่ากับ 7.03 ± 1.45 7.42 ± 1.30 และ 7.46 ± 1.20 ตามลำดับ ส่วนโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้าอยู่ในระดับชอบมาก โดยมีคะแนนเท่ากับ 8.46 ± 0.81 8.31 ± 0.88 และ 8.31 ± 1.08 ตามลำดับ อาจเนื่องจากโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้ามีการเติมส่วนผสมเพื่อเพิ่มรสชาติความเป็นอูมามีหลายชนิด ซึ่งส่งผลต่อการรับรู้รสชาติของผู้ทดสอบชิม นอกจากนั้นโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า มีดัชนีการดูดซับน้ำดีกว่า ผลิตภัณฑ์จึงมีการพองตัวที่ดี จึงส่งผลทำให้มีเนื้อสัมผัสที่ดีกว่า Mayachiew, P. [10] ทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวผสมถั่วเหลืองและถั่วเขียวที่ระดับร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยวิธี 9-Point Hedonic Scale ของคุณลักษณะในด้านสี กลิ่นรส เนื้อสัมผัสและการยอมรับโดยรวมพบว่า โจ๊กข้าวสังข์หยดผสมถั่วเหลืองร้อยละ 30 มีคุณลักษณะด้านสีสูงสุดเท่ากับ 7.7 โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์ผสมถั่วเหลืองร้อยละ 20 มีคะแนนเฉลี่ยของคุณลักษณะด้านกลิ่นรสสูงที่สุดเท่ากับ 8.2 โจ๊กข้าวสังข์หยดมีคะแนนเฉลี่ยของคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสสูงที่สุดเท่ากับ 8.6 และโจ๊กข้าวสังข์หยดผสมถั่วเหลืองร้อยละ 20 มีคะแนนเฉลี่ยของคุณลักษณะด้านการยอมรับรวมสูงที่สุดเท่ากับ 8.6 ในขณะที่คะแนนเฉลี่ยของคุณลักษณะด้านการยอมรับรวมของโจ๊กข้าวสังข์หยด และโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์เท่ากับ 7.9 และ 7.7 ตามลำดับ ซึ่งโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีคะแนนความชอบโดยรวม (7.46) ใกล้เคียงกับโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์ (7.7)

ตารางที่ 7 คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

คุณลักษณะ	โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์ กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่	โจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ ทางการค้า
สี ^{ns}	7.50±1.39	8.11±0.90
กลิ่น ^{ns}	7.23±1.42	7.69±1.59
รสชาติ*	7.03±1.45	8.46±0.81
เนื้อสัมผัส*	7.42±1.30	8.31±0.88
ความชอบโดยรวม*	7.46±1.20	8.31±1.08

หมายเหตุ: * ข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

^{ns} ข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) วิเคราะห์โดยใช้ T-Test Independent Sample; 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 = เฉย ๆ 6 = ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก 9 = ชอบมากที่สุด

2.4 คุณค่าทางโภชนาการของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

1 ชอง มีน้ำหนัก 35 กรัม โดยปริมาณสารอาหารหลัก พลังงาน ปริมาณแร่ธาตุและวิตามิน ดังตารางที่ 8 จากการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่พบว่าโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 12.15 3.12 และ 75.34 ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณโปรตีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปโดยจะต้องมีโปรตีนไม่น้อยกว่า ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก [14] และพลังงานทั้งหมด พลังงานจากคาร์โบไฮเดรต และพลังงานจากไขมัน ของผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่อมีค่าเท่ากับ 378.05 301.36 และ 28.08 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม ตามลำดับ โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่อมีพลังงาน 378.05 กิโลแคลอรี ปริมาณเหล็ก แคลเซียมและโซเดียมในผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูป ปรุงรสไก่อเท่ากับ 1.01 19.16 และ 1,765 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณวิตามินบี1 และวิตามินเอ เท่ากับ 0.03 และ 63.42 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ไม่พบวิตามินอี และบี2 ในผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ Niyomwet, P., Sappasit, P., Waree, A., and Khongsit, P. [2] ศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวไรซ์เบอร์รี่ กึ่งสำเร็จรูปจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า ไขมัน โปรตีน เกล็ด เส้นใย คาร์โบไฮเดรต และ พลังงานมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.17 13.53 7.54 69.32 และ 394 กิโลแคลอรี ตามลำดับ

ตารางที่ 8 คุณค่าทางโภชนาการผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่

สารอาหาร	ปริมาณต่อ 100 กรัม
โปรตีน (กรัม)	12.15
ไขมัน (กรัม)	3.12
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	75.34
พลังงานทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	378.05
พลังงานจากคาร์โบไฮเดรต (กิโลแคลอรี)	301.36
พลังงานจากไขมัน (กิโลแคลอรี)	28.08
เหล็ก (มิลลิกรัม)	1.01
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	19.16
โซเดียม (มิลลิกรัม)	1,765
วิตามินอี (มิลลิกรัม)	0.00
วิตามินบี1 (มิลลิกรัม)	0.03
วิตามินบี2 (มิลลิกรัม)	0.00
วิตามินเอ (มิลลิกรัม)	63.42

สรุป

โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสมีค่าความชื้นสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อยและดัชนีการดูดซับน้ำสูงกว่าและค่าน้ำอิสระต่ำกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 4 mm ลักษณะเป็นเกล็ดบาง ๆ ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ดูดซับน้ำได้ดี และยังมีปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูงกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า ซึ่งสอดคล้องกับผลตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางผลึกโดยวิธี XRD ที่ไม่พบพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แสดงถึงการเกิดโครงสร้างผลึกของแป้งต้านทานการย่อยแบบที่ 3 จากการทดสอบประสาทสัมผัสพบว่าผู้ทดสอบชิมมีความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ โดยนำส่วนผสมต่าง ๆ มาผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดพบว่า ความชื้น และค่าน้ำอิสระของโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่มีค่าสูงกว่าโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้า ส่วนดัชนีการดูดน้ำกลับมีค่าต่ำกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ผู้ทดสอบชิมชอบโจ๊กข้าวกึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่ทางการค้ามากกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปปรุงรสไก่มีปริมาณร้อยละโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 12.15 3.12 75.34 และ 378.05 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม นอกจากนั้นปริมาณเหล็ก แคลเซียม โซเดียม วิตามินบี1 และวิตามินเอเท่ากับ 1.01 19.16 1,765 0.03 และ 63.42 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า โจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสที่ผลิตมีดัชนีการดูดซับน้ำและปริมาณแป้งต้านทานการย่อยสูงกว่าโจ๊กข้าวหอมมะลินทรีย์

กึ่งสำเร็จรูปไม่ปรุงรสทางการค้า แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยครั้งต่อไป ควรศึกษาสภาวะและวิธีการที่เหมาะสมในการเพิ่มปริมาณแป้งต้านทานการย่อยให้ได้มากขึ้น และพัฒนารสชาติและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากขึ้น เพื่อจะเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวเป็นอาหารเพื่อสุขภาพต่อไป

References

- [1] Patel, H., Royall, P. G., Gaisford, S., Williams, G. R., Edwards, C. H., Warren, F. J., Flanagan, B. M., Ellis, P. R., and Butterworth, P. J. (2017). Structural and Enzyme Kinetic Studies of Retrograded Starch: Inhibition of α -Amylase and Consequences for Intestinal Digestion of Starch. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 164, pp. 154-161. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.01.040
- [2] Niyomwet, P., Sappasit, P., Waree, A., and Khongsit, P. (2018). Product Development of Instant Riceberry Porridge. **Burapha Science Journal**. Vol. 23, No. 3, pp. 1638-1654
- [3] AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis**. 17th ed. Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Chemists
- [4] Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., and Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of Corn Grits by Roll and Extrusion Cooking. **Cereal Science Today**. Vol. 14, No. 1, pp. 4-11
- [5] Prakash, S., Jha, S. K., and Datta, N. (2004). Performance Evaluation of Blanched Carrots Dried by Three Different Driers. **Journal of Food Engineering**. Vol. 62, Issue 3, pp. 305-313. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00244-9
- [6] Na-Nakorn, K., Kulrattanarak, T., Hamaker, B. R., and Tongta, S. (2019). Starch Digestion Kinetics of Extruded Reformed Rice is Changed in Different Ways with Added Protein or Fiber. **Food and Function**. Vol. 10, No. 8, pp. 4577-4583. DOI: 10.1039/C9FO00521H
- [7] Sopade, P. A. and Gidley, M. J. (2009). A Rapid *In-vitro* Digestibility Assay Based on Glucometry for Investigating Kinetics of Starch Digestion. **Starch/Stärke**. Vol. 61, Issue 5, pp. 245-255. DOI: 10.1002/star.200800102
- [8] Goñi, I., Garcia-Alonso, A., and Saura-Calixto, F. (1997). A Starch Hydrolysis Procedure to Estimate Glycemic Index. **Nutrition Research**. Vol. 17, No. 3, pp. 427-437. DOI: 10.1016/S0271-5317(97)00010-9
- [9] AOAC. (2002). **Official Method of Analysis**. 16th ed. Washington DC: Association of Official Analytical
- [10] Mayachiew, P. (2014). **Development of Healthy Instant Legume-Rice Porridges**. Access (20 March 2020). Available (<http://kb.tsu.ac.th/jspui/handle/123456789/3274>)
- [11] AOCS. (1997). **Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society**. 5th ed. Washington, DC: American Oil Chemists' Society Press. (Method Ce 8-89)
- [12] Sancho, F. (1998). Effect of Ultra-High Hydrostatic Pressure on Hydrosoluble Vitamins. **Journal of Food Engineering**. Vol. 39, Issue 3, pp. 247-253. DOI: 10.1016/S0260-8774(98)00143-5

- [13] AOAC. (1990). **Official Methods of Analysis**. 15th ed. Washington DC: Association of Official Analytical Chemist
- [14] Thai Industrial Standards Institute. (2015). **Thai Industrial Standard (315-2548): Instant Rice Porridge (congee)**. Access (20 March 2020). Available (<http://research.rid.go.th/vijais/moa/fulltext/TIS315-2548.pdf>)
- [15] Surojanametakul, V. (2006). Glycemic Index of Food. **Journal of Food**. Vol. 36. No.3. pp. 183-187 (in Thai)
- [16] Pongjanta, J., Utaipatanacheep, A., Naivikul, O., and Piyachomkwan, K. (2008). Enzymes-Resistant Starch (RS III) from Pullulanase-Debranched High Amylose Rice Starch. **Kasetsart Journal (Natural Science)**. Vol. 42, pp. 198-205
- [17] Thai Industrial Standards Institute. (2015). **Thai Community Product Standard (136/2558): Dried Fruits and Vegetables**. Access (20 March 2020). Available (http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0136_58)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลบุคลากรสายวิชาการเพื่อการบริหารการเรียนการสอนด้วยการปรับวิธีแบ่งกลุ่มแบบเคมีนร่วมกับกฎความสัมพันธ์

Analysis of Relationship of Academic Personnel Data for Management Teaching with Method Adjustment of K-Means Combined with Association Rules

พฤตพิงศ์ เพ็งศิริ^{1*}

Prudtipong Pengsiri^{1*}

Received: October 7, 2019; Revised: April 26, 2020; Accepted: April 29, 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการเลือกบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการแบ่งกลุ่มร่วมกับกฎความสัมพันธ์ ซึ่งใช้ชื่อเรียกวิธีนี้ว่า K-MAs โดยข้อมูลจากแบบสอบถามด้านการสอนในแต่ละรายวิชาด้านคอมพิวเตอร์ที่อ้างอิงจากหลักสูตรที่ผ่านการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) เป็นบุคลากรสายวิชาการของคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ซึ่งพบปัญหาในความแตกต่างของความสามารถทางการสอน ทำให้การจัดรายวิชากับผู้สอนเป็นไปด้วยความซับซ้อนและยุ่งยาก ดังนั้นผู้วิจัยได้ค้นพบขั้นตอนวิธีการแก้ไขปัญหานี้ด้วยวิธีการ K-MAs ซึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มข้อมูลของบุคลากรสายวิชาการด้วยวิธี K-Means ร่วมกับหากฎความสัมพันธ์ด้วยวิธีการอพรโอริ เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการผู้สอนที่มีความสามารถที่ตรงกับวิชาชีพที่ตนถนัด และยังเสริมสร้างมนุษยสัมพันธ์กับเพื่อนนักวิชาการเมื่อทราบกลุ่มวิชาชีพ จากผลการวิจัยพบว่าการแบ่งกลุ่มผู้สอนภายใต้สาขาวิชาสามารถจัดกลุ่มที่เหมาะสมได้ 5 กลุ่มวิชาชีพ โดยแต่ละกลุ่มสามารถมีผู้สอนทดแทนกันได้มากที่สุด 3 คน ด้วยกฎความสัมพันธ์ 18 วิธี ซึ่งมีผลการประเมินเว็บแอปพลิเคชันทางการเลือกบุคลากรสายวิชาการพบว่าภาพรวมของการประเมินอยู่ในเกณฑ์ดี โดยเรื่องของขนาดของตัวหนังสือชัดเจนอ่านง่ายได้ค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 3.71 ส่วนเรื่องของความถูกต้องของข้อมูลบุคลากรผู้สอนได้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 4.86 ดังนั้นสรุปได้ว่าการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันนี้สามารถเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์วิธีการจัดการผู้สอนรายวิชาด้านคอมพิวเตอร์ด้วยการแบ่งกลุ่มร่วมกับกฎความสัมพันธ์ของข้อมูลบุคลากรสายวิชาการได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : การแบ่งกลุ่มข้อมูล; กฎความสัมพันธ์; รายวิชาด้านคอมพิวเตอร์

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

* Corresponding Author E - mail Address: prudtipong.p@rmutsb.ac.th

Abstract

This article aimed to propose the guideline for selecting academic personnel in computer with K-Means combined with Association rules (K-MAs). Data were collected from the questionnaire on computer instruction according to curricula approved by the Office of the Higher Education Commission (OHEC). In this study, key informants were academic personnel of the Faculty of Science and Technology in Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi that encountered problems in the differences in instructional ability, causing the difficult and complicated instructional management that will affect potential curriculum improvement. For this reason, the researcher searched for the solutions by using K-MAs, which dividing data set of academic personnel method adjustment of K-Means combined with association rules. However, K-Mas could produce the results that consider the importance of the instructors and know the group members. Besides, the rule of associations indicate that members of the group were able to instruct the same course. Therefore, it could be concluded that K-MAs technique could be used to support instructor management under the balance between instructor competency and proficient profession and to enhance human relations with fellow scholars due to the realization of professional groups. The results of this research showed that under the classification of instructor groups based on suitable professional group, there were five professional groups. Up to 3 instructors could instruct interchangeably using 18 association rules. The evaluative results of the web application for selecting academic personnel indicated that overall evaluation result was at a good level. An aspect with the lowest mean was clear and easy-to-read size of fonts (mean = 3.71). An aspect with the highest mean was accurate instructor data (mean = 4.86). Therefore, it could be concluded that the developed web application could be usefully applied to analyze computer instructor management methods with K-Means combined with Association rules.

Keywords: Data Clustering; Association Rule; Computer Course

บทนำ

จากบริบทของทุกมหาวิทยาลัยในประเทศไทยที่ได้เปิดสอนหลักสูตรที่เกี่ยวข้องกับสายวิชาชีพทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าในปัจจุบันมีอาชีพที่หลากหลายในสายงานอาชีพของบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถทางด้านคอมพิวเตอร์ เช่น การเขียนโปรแกรม การวิเคราะห์และออกแบบอัลกอริทึม การวิเคราะห์ข้อมูล หรือการพัฒนา ระบบปฏิบัติการเครือข่าย เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญในการจัดการเรียนการสอนภายใต้หลักสูตรที่เกี่ยวข้อง เช่นเดียวกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เปิดสอน หลักสูตรทางด้านคอมพิวเตอร์ โดยแบ่งเป็น 3 หลักสูตร คือ หลักสูตรวิทยาการคอมพิวเตอร์ หลักสูตร

เทคโนโลยีสารสนเทศ และหลักสูตรเทคโนโลยีมีัลติมีเดีย และบุคลากรสายวิชาการ (ผู้สอน) ทั้งหมด 35 คน (สำรวจข้อมูลในปี พ.ศ. 2559) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดแต่ละหลักสูตรในสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
สุวรรณภูมิ

หลักสูตร	ฉบับปรับปรุง (พ.ศ.)	จำนวนวิชาชีพ	จำนวนรายวิชา
วท.บ. วิทยาการคอมพิวเตอร์	2554	8	46
วท.บ. หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ	2554	8	47
ทล.บ. เทคโนโลยีมีัลติมีเดีย	2555	5	55
รวมทั้งหมด		21	148

จากตารางที่ 1 ซึ่งพบปัญหาว่าในการจัดการเรียนการสอนนั้นในบางวิชาของแต่ละหลักสูตรมีผู้สอนที่สามารถสอนได้เป็นจำนวนมากและบางวิชาก็มีผู้สอนจำนวนน้อยหรืออาจจะไม่มี เนื่องจากผู้สอนนั้นมีทักษะและความรู้ความสามารถที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นการยากที่จะทำให้ทราบว่าผู้สอนนั้นสามารถทำการสอนวิชาใดได้หรือไม่ได้ และหากในบางวิชาที่ต้องการให้มีการสอนทดแทนกันหรือทำการสอนแบ่งกลุ่มได้หรือไม่

การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ด้วยวิธีการอปริโริ เป็นวิธีการหาค่าความสัมพันธ์อีกรูปแบบที่นิยมนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของบุคคลหรือความสัมพันธ์ของสิ่งอื่น ๆ ซึ่งแตกต่างกันออกไปในแต่ละด้านตามข้อมูลที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ การเก็บข้อมูลโดยการสร้างเป็นเว็บแอปพลิเคชัน และรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถาม เป็นการเก็บข้อมูลที่สามารถรวบรวมข้อมูลได้ง่าย และสามารถนำข้อมูลจากแบบสอบถามของบุคลากรมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์หรือใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ สำหรับในปัจจุบันนั้นเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชัน ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานของผู้ใช้งานได้ง่าย รวดเร็ว สะดวกสบาย และมีประสิทธิภาพ จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย การนำการหาความสัมพันธ์ และเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันมาสร้างเป็น การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการเลือกผู้สอนของบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีความสัมพันธ์ข้อมูล ก็เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของบุคลากรกับบุคลากรด้วยกัน และเป็นตัวช่วยสนับสนุนการทำงาน การจัดสรรหน้าที่ในการทำงานทดแทนหรือปรับเปลี่ยนรูปแบบการสอนของบุคลากร เพราะในบางครั้งบุคลากรบางคนไม่สามารถสอนหลาย ๆ วิชาพร้อมกันได้ หรือมีเหตุการณ์ที่ทำให้ไม่สามารถมาสอนได้ เช่น ป่วย หรือลาออก ทำให้มีวิชาที่ว่างและยังไม่มีคนมาสอนแทน อาจทำให้การเรียนของนักเรียนเป็นไปอย่างล่าช้าหรืออาจเสียโอกาสในการเรียนการสอนในบางครั้งไปโดยเปล่าประโยชน์

จากปัญหาที่ได้อธิบายมาในข้างต้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยแนวทางการเลือกบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการแบ่งกลุ่มร่วมกับกฎความสัมพันธ์ ซึ่งใช้ชื่อเรียกวิธีนี้ว่า K-MAs (K-Means Combined with Association Rules) โดยข้อมูลจากแบบสอบถามด้านการสอนในแต่ละรายวิชาด้านคอมพิวเตอร์ที่อ้างอิงจากหลักสูตรทั้ง 3 หลักสูตรที่ผ่านการรับรองจาก สกอ. เพื่อนำมาใช้ในการบริหารจัดการผู้สอนให้สอดคล้องกับหลักสูตรที่ได้ทำการเปิดการเรียนการสอน

วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์วิธีการแบ่งกลุ่มร่วมกับกฎความสัมพันธ์ (K-MAs) ของข้อมูลบุคลากรสายวิชาการมาประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนการสอน และสนับสนุนการบริหารทรัพยากรบุคคลสายวิชาการ

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การจัดการเรียนการสอน การศึกษาเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาประเทศ [1] ในการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ และเตรียมคนให้มีศักยภาพเพื่อพร้อมรับการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ประชากรถือเป็นทรัพยากรปัจจัยหนึ่งที่ชี้ขาดในยุคการแข่งขัน การพัฒนาคนรุ่นใหม่ให้มีศักยภาพ เพื่อยกระดับประเทศให้อยู่ในระดับสากลจึงเป็นเรื่องจำเป็นเร่งด่วน การเตรียมความพร้อมประชากรในวัยเรียนให้มีทักษะเพื่อการดำรงชีวิตในศตวรรษที่ 21

2. การแบ่งกลุ่มข้อมูล (K-Means Clustering) [2] - [3] เป็นหนึ่งในอัลกอริทึมเทคนิคการเรียนรู้โดยไม่มีผู้สอนที่ง่ายที่สุด (Unsupervised) เพราะเป็นการแก้ปัญหาการจัดกลุ่มที่รู้จักกันทั่วไป โดยอัลกอริทึม K-Means จะตัดแบ่ง (Partition) [4] วัตถุออกเป็น k กลุ่ม โดยแทนแต่ละกลุ่มด้วยค่าเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งใช้เป็นจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของกลุ่มในการวัดระยะทางของข้อมูลในกลุ่มเดียวกัน โดยมีขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มดังนี้

- 1) กำหนดจำนวนกลุ่ม k กลุ่ม และกำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้นจำนวน k จุด
 - 2) นำวัตถุทั้งหมดจัดเข้ากลุ่มที่มีจุดศูนย์กลางที่อยู่ใกล้วัตถุนั้นมากที่สุด โดยคำนวณจากการวัดระยะทางระหว่างจุดที่น้อยที่สุด
 - 3) คำนวณจุดศูนย์กลาง k จุดใหม่ โดยหาจากค่าเฉลี่ยวัตถุที่อยู่ในกลุ่ม
 - 4) ทำซ้ำในข้อ 2) จนกระทั่งจุดศูนย์กลางไม่เปลี่ยนแปลง
- การจัดกลุ่มโดยพยายามให้สิ่งที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันมีความคล้ายคลึงกันมากที่สุด (Minimize Intra-Cluster Distances) และพยายามให้แต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันมากที่สุด (Maximize Inter-Cluster Distances)

3. ขั้นตอนวิธีของความสัมพันธ์แบบอปริโอรีในกฎความสัมพันธ์ (Association Rule) [5] เป็นหนึ่งในเทคนิคของเหมืองข้อมูลที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ในการเปรียบเทียบข้อมูล ซึ่งจะต้องมีการตั้งกฎเพื่อนำไปวิเคราะห์ในการตัดสินใจ หนึ่งในอัลกอริทึมของกฎความสัมพันธ์นั้นคือ อัลกอริทึมอปริโอรี ซึ่งจะทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ของ Itemsets โดยความสัมพันธ์ของ Itemsets นั้นเรียกว่า กฎความสัมพันธ์ ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบดังต่อไปนี้

- $\{Item1, Item2\} \rightarrow \{Item3\}$ คือกฎความสัมพันธ์ที่ถูกสร้างขึ้นมา
- ค่าสนับสนุน คือ $Support = P(x \cap y)$
- ค่าความเชื่อมั่น คือ $Confidence = (P(x \cap y)) / (P(y))$
- เมื่อ x และ y เป็นสมาชิกของ Itemset
- Itemset คือเซตของรายการที่มีความยาวหรือจำนวนรายการ

ในอัลกอริทึมอปริโอรีจะต้องมีการกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำ (Minimum Support หรือ Minsup) และค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำ (Minimum Confidence หรือ Minconf) ซึ่งในการกำหนดค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้กำหนดเอง

4. การวัดค่าความคลาดเคลื่อน สามารถหาค่าการพยากรณ์ได้แล้ว จากนั้นจะใช้วิธีการตรวจสอบหาความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ ว่ารูปแบบใดมีความคลาดเคลื่อนมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความเหมาะสมในการหารูปแบบค่าความเหมาะสมในการระบายน้ำวัดค่าความคลาดเคลื่อน 3 วิธีดังนี้

4.1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation: *MAD*) ดังสมการที่ (1)

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |A_t - \bar{x}| \quad (1)$$

4.2 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percentage Error: *MAPE*)
ดังสมการที่ (2)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (2)$$

4.3 ค่ารากที่สองเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error: *RMSE*)
ดังสมการที่ (3)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|^2}{n}} \quad (3)$$

จากสมการที่ (1) - (3) สามารถอธิบายค่าตัวแปรแต่ละสมการดังนี้
โดยที่

A_T	คือ	ค่าที่เกิดขึ้นจริง
$\bar{x}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด
F_t	คือ	ค่าการพยากรณ์
n	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเลือกบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการแบ่งกลุ่ม
ร่วมกับกฎความสัมพันธ์ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

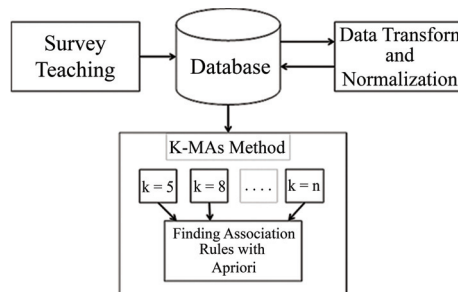
References	ปี (พ.ศ.)	รายละเอียดงานวิจัย			
		กฎความสัมพันธ์ อัลกอริทึมอพริโอรี	ฟuzzyกฎ ความสัมพันธ์	การใช้กฎ ความสัมพันธ์	การทำ เหมืองข้อมูล
[6]	2558	-	✓	✓	✓
[7]	2559	✓	-	✓	-
[8]	2558	✓	-	✓	✓
[9]	2558	-	-	✓	✓
[10]	2557	✓	-	✓	-

จากตารางที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยเน้นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลจึงได้นำเสนอวิธีการในการประยุกต์เพื่อแก้ไขปัญหา ซึ่งเป็นวิธีการที่เรียกว่า K-MAs (K-Means Combined with Association Rules)

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอกรอบความคิดในการวิเคราะห์วิธีการจัดการผู้สอนรายวิชาด้านคอมพิวเตอร์ ด้วยการแบ่งกลุ่มร่วมกับกฎความสัมพันธ์ของข้อมูลบุคลากรสายวิชาการ โดยแบ่งกรอบความคิดงานวิจัย ดังรูปที่ 1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การสำรวจความสามารถในการสอน การจัดเก็บข้อมูล และการปรับรูปแบบฐานข้อมูล และขั้นตอนวิธี K-MAs มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสำรวจความสามารถในการสอน (Survey Teaching) ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้สำรวจข้อมูลจากแบบสอบถามเพื่อให้ผู้สอนได้ประเมินตนเองว่ามีความสามารถในการสอนวิชาใดได้บ้าง โดยอ้างถึงรายวิชาในแต่ละหลักสูตรที่มีอยู่ในเล่ม มคอ.2 ทั้ง 3 หลักสูตร รวบรวมทั้งสิ้น 135 แต่เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าบางวิชาที่เป็นวิชาเดียวแต่มีหลายหลักสูตรจึงนับว่าเป็นรายวิชาเดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดความสับสนในการจัดผู้สอนรายวิชานั้น ดังนั้นผู้สอนจึงต้องให้ข้อมูลโดยตอบแบบสอบถามในแต่ละข้อ (รายวิชา) ซึ่งจะประเมินจากความสามารถของตนเองโดยแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ “สอนได้” และ “สอนไม่ได้” ซึ่งสำรวจอาจารย์ผู้สอนประจำสาขาทั้งหมด 35 คน จากนั้นจัดเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล



รูปที่ 1 กรอบความคิดของงานวิจัย

2. การจัดเก็บข้อมูลและการปรับรูปแบบฐานข้อมูล (Data Transformation and Normalization) จากขั้นตอนในการสำรวจความสามารถในการสอนของผู้สอนแต่ละคน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงข้อมูล (Data Transformation) ด้วยการพิจารณาคำตอบจากฐานข้อมูล จากนั้นจะทำการปรับรูปแบบ (Normalization) แบบ Nominal Data ซึ่งจะแปลงคำตอบคือ ถ้าตอบว่า “สอนได้” แปลงค่าเป็น 1 และ “สอนไม่ได้” แปลงค่าเป็น 0 จากนั้นบันทึกลงในฐานข้อมูล โดยได้นำเสนอตัวอย่างการเก็บข้อมูลจากบุคลากรสายวิชาการดังรูปที่ 2

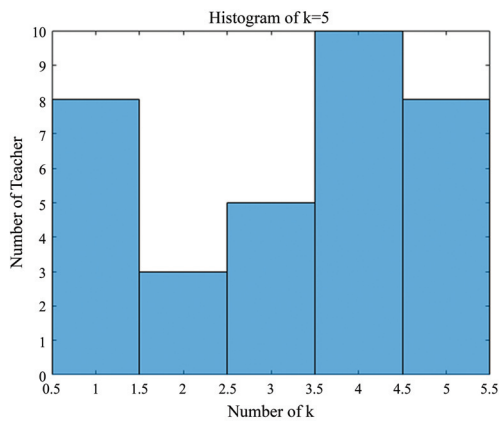
รูปที่ 2 ตัวอย่างการปรับรูปแบบข้อมูลจากแบบสอบถาม

คอมพิวเตอร์ด้วยการแบ่งกลุ่มร่วมกับกฎความสัมพันธ์ของข้อมูลบุคลากรสาขาวิชาการ ซึ่งใช้ชื่อเรียกวิธีนี้ว่า K-MAs (K-Means Combined with Association Rules) ซึ่งมีกระบวนการดังนี้

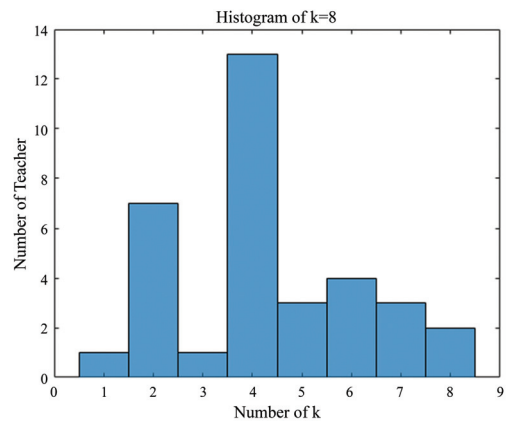
3.2 เปรียบเทียบความถูกต้อง เมื่อได้แบ่งกลุ่มเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทดสอบที่ถูกแบ่งกลุ่ม และข้อมูลจริงที่ผู้สอนให้ข้อมูลด้วยวิธีการหาความคลาดเคลื่อน 3 วิธี คือ *MAD*, *MAPE* และ *RMSE* จากนั้นเลือกจำนวนค่า k ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเข้าสู่กระบวนการหาความสัมพันธ์ต่อไป

3.3 หากดูความสัมพันธ์ของแต่ละกลุ่ม โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์จำนวน 2 ค่า ด้วยการใช้เครื่องมือโปรแกรม WEKA ซึ่งกำหนดดังนี้ Minsup = 0.5 และ Mincon = 0.9 ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นจำนวน Itemset และกฎความสัมพันธ์ของกลุ่มผลสอนที่ถูกแบ่งกลุ่มจากขั้นตอนที่ 3.1

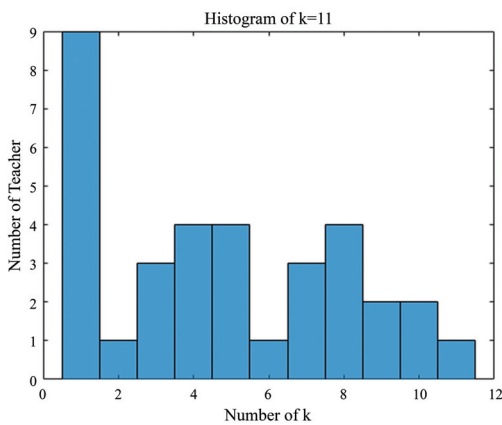
1. ผลการแบ่งกลุ่มข้อมูลของผู้สอน จากการแบ่งกลุ่มวิธี K-Means ตามจำนวน k กลุ่ม
 ธีตรูปที่ 3 พบว่าการแบ่งกลุ่มที่ $k = 5$ นั้นจะได้จำนวนผู้สอนในแต่ละกลุ่มที่เรียงลำดับกัน
 มีความแตกต่างกันไม่มาก และสามารถมีผู้สอนในกลุ่มวิชาชีพได้มากกว่า 1 คน ส่งผลประโยชน์ให้
 การเรียนการสอนได้ แต่ในทางกลับกันในกลุ่มที่ $k = 21$ พบว่าไม่สามารถจัดผู้สอนทดแทนกันได้
 ในใหญ่กลุ่มรายวิชาชีพมีเพียงผู้สอนได้ 1 คนเท่านั้น



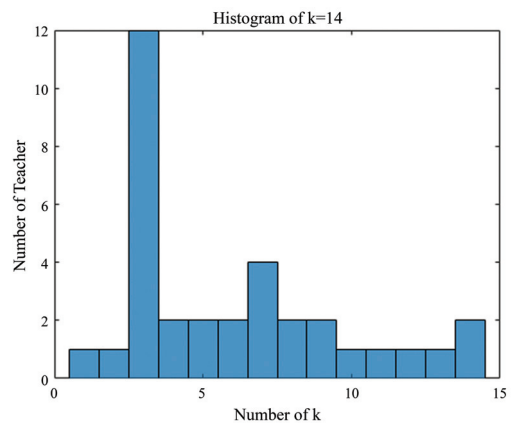
(ก) ค่า k = 5



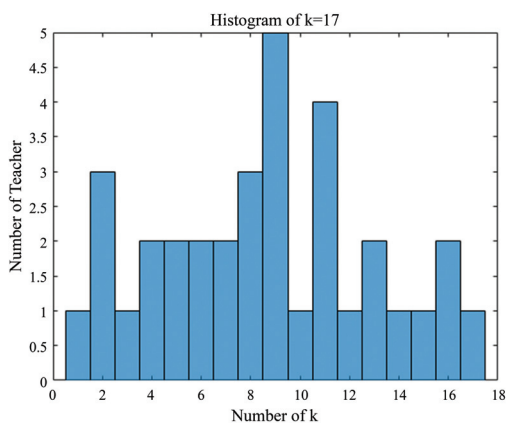
(ข) ค่า k = 8



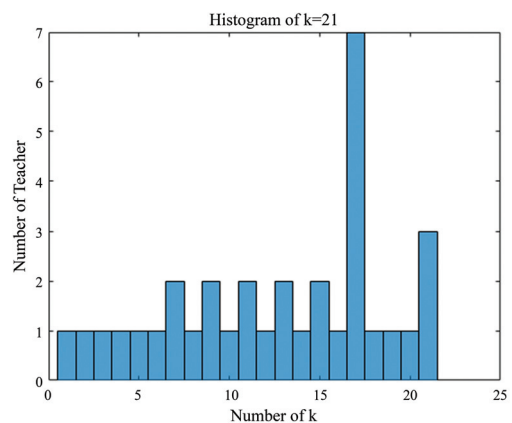
(ค) ค่า k = 11



(ง) ค่า k = 14



(จ) ค่า k = 17



(ฉ) ค่า k = 21

รูปที่ 3 ผลการแบ่งกลุ่มข้อมูลของผู้สอน จากการแบ่งกลุ่มวิธี K-Means ตามจำนวนการแบ่งกลุ่ม

2. ผลเปรียบเทียบความถูกต้อง เป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องจากผลลัพธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลจริงของผู้สอน โดยการทดสอบแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี K-Means ตามจำนวน k กลุ่ม ด้วยวิธีการหาค่าความคลาดเคลื่อน 3 วิธี คือ MAD , $MAPE$, และ $RMSE$ ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของการแบ่งกลุ่ม k

k Error	5	8	11	14	17	21
MAD	0.4857	0.8107	0.8286	0.9143	0.7143	0.8857
$MAPE$	0.4857	0.5179	0.4857	0.5476	0.4867	0.6667
$RMSE$	1.1084	1.0056	1.1084	1.1212	0.9710	1.1588

จากตารางที่ 3 พบว่าในกลุ่ม $k = 5$ มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ MAD มีค่าเท่ากับ 0.4857 และ $MAPE$ มีค่าเท่ากับ 0.4857 จึงเลือกข้อมูลที่ถูกแบ่งไว้ที่ $k = 5$ เข้าสู่กระบวนการหากฎความสัมพันธ์ แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้พิจารณาการแบ่งกลุ่มที่ $k = 11$ และ $k = 17$ และเช่นเดียวค่า $k = 17$ พบว่าได้ผลลัพธ์ค่า $RMSE$ ที่มีค่าน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.9710 จึงนำค่า $k = 17$ นี้เข้าร่วมพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบการหากฎความสัมพันธ์ด้วย

3. ผลหากฎความสัมพันธ์ของแต่ละกลุ่ม การหากฎความสัมพันธ์ของแต่ละกลุ่มตามที่ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ $Minsup = 0.5$, $Mincon = 0.9$ และจำนวนกฎสูงสุดที่ 30 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์กฎความสัมพันธ์

รายการ	$k = 5$	$k = 11$	$k = 17$
จำนวน Itemset มากที่สุด	3	2	2
กฎความสัมพันธ์	18	30	30

จากตารางที่ 4 พบว่าการแบ่งกลุ่มที่ค่า $k = 5$ นั้นได้ผลลัพธ์จำนวน Itemset ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 3 หมายถึงในกลุ่มรายวิชาชีพเหล่านั้นสามารถมีผู้สอนที่ทดแทนกันหรือมีผู้สอนร่วมกันได้เป็นจำนวน 3 คน และมีจำนวนกฎความสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 18 กฎ หมายถึงในบางกลุ่มวิชาชีพสามารถเลือกผู้สอนได้เป็นจำนวน 18 วิธีที่จะนำผู้สอนมาทดแทนกัน แต่ส่วนการแบ่งกลุ่มที่ค่า $k = 11$ และ $k = 17$ นั้นได้ผลลัพธ์ Itemset เป็นจำนวน 2 เท่านั้นจึงเป็นเหตุให้เลือกผู้สอนได้น้อยกว่า และยังมีจำนวนกฎความสัมพันธ์ที่มากเกินไป

1. A=0 14 ==> D=0 14	<conf:(1)> lift:(1.29) lev:(0.07) [3] conv:(3.18)
2. A=0 B=0 13 ==> D=0 13	<conf:(1)> lift:(1.29) lev:(0.07) [2] conv:(2.95)
3. A=0 E=0 12 ==> B=0 12	<conf:(1)> lift:(1.33) lev:(0.07) [3] conv:(3)
4. A=0 E=0 12 ==> D=0 12	<conf:(1)> lift:(1.29) lev:(0.06) [2] conv:(2.73)
5. A=0 D=0 E=0 12 ==> B=0 12	<conf:(1)> lift:(1.33) lev:(0.07) [3] conv:(3)
6. A=0 B=0 E=0 12 ==> D=0 12	<conf:(1)> lift:(1.29) lev:(0.06) [2] conv:(2.73)
7. A=0 E=0 12 ==> B=0 D=0 12	<conf:(1)> lift:(1.63) lev:(0.11) [4] conv:(4.64)
8. D=1 10 ==> A=1 10	<conf:(1)> lift:(1.47) lev:(0.07) [3] conv:(3.18)
9. A=0 C=0 9 ==> B=0 9	<conf:(1)> lift:(1.33) lev:(0.05) [2] conv:(2.25)
10. A=0 C=0 9 ==> D=0 9	<conf:(1)> lift:(1.29) lev:(0.05) [2] conv:(2.05)
11. A=0 C=0 D=0 9 ==> B=0 9	<conf:(1)> lift:(1.33) lev:(0.05) [2] conv:(2.25)
12. A=0 B=0 C=0 9 ==> D=0 9	<conf:(1)> lift:(1.29) lev:(0.05) [2] conv:(2.05)
13. A=0 C=0 9 ==> B=0 D=0 9	<conf:(1)> lift:(1.63) lev:(0.08) [3] conv:(3.48)
14. D=0 E=0 23 ==> B=0 22	<conf:(0.96)> lift:(1.28) lev:(0.11) [4] conv:(2.88)
15. C=0 D=0 E=0 16 ==> B=0 15	<conf:(0.94)> lift:(1.25) lev:(0.07) [3] conv:(2)
16. A=0 14 ==> B=0 13	<conf:(0.93)> lift:(1.24) lev:(0.06) [2] conv:(1.75)
17. A=0 D=0 14 ==> B=0 13	<conf:(0.93)> lift:(1.24) lev:(0.06) [2] conv:(1.75)
18. A=0 14 ==> B=0 D=0 13	<conf:(0.93)> lift:(1.51) lev:(0.1) [4] conv:(2.7)

รูปที่ 4 กลุ่มวิชาชีพสามารถเลือกผู้สอนได้เป็นจำนวน 18 กฎในความสัมพันธ์ของบุคลากร 1 คน

จากรูปที่ 4 เมื่อนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม WEKA เพื่อหาความสัมพันธ์การสอนของบุคลากร 1 คน ยกตัวอย่างเช่น อาจารย์ A ที่มีความสัมพันธ์อาจารย์ท่านอื่นเช่น B C D หรือ E เป็นต้น ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ทั้งหมด 18 กฎ

4. ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการเลือกผู้สอนของบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ เป็นการใช่วิธีความสัมพันธ์ข้อมูล ซึ่งเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการเลือกผู้สอนของบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ สำหรับบุคลากร (Member) ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการเลือกผู้สอนของบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีความสัมพันธ์ข้อมูลสำหรับบุคลากร มีผลการทดสอบดังรูปที่ 5 - 8

ASSOCIATION RULES

ผู้ใช้งาน: teacher01 00

หน้าหลัก

ทำแบบสอบถาม >

แก้ไขข้อมูล

หลักสูตรวิทยาการคอมพิวเตอร์

หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ

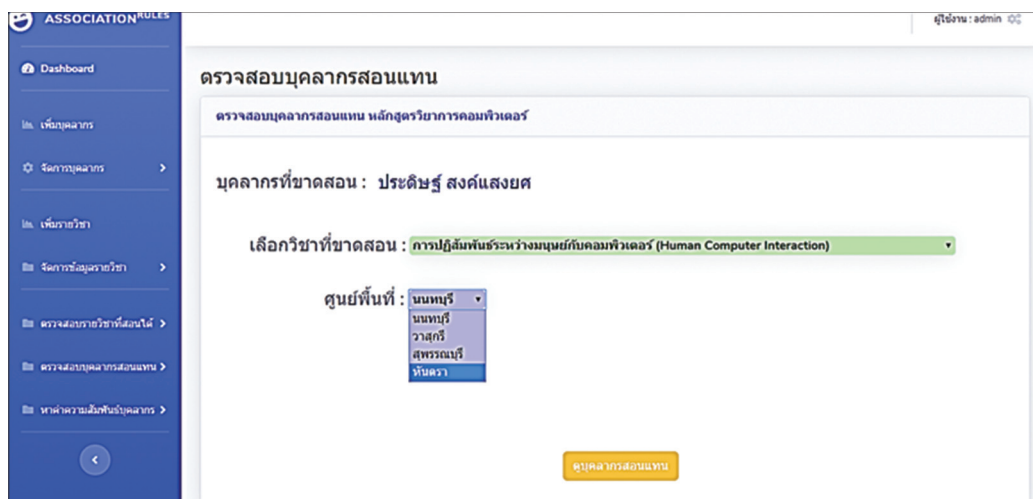
หลักสูตรเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์

แก้ไขข้อมูล หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

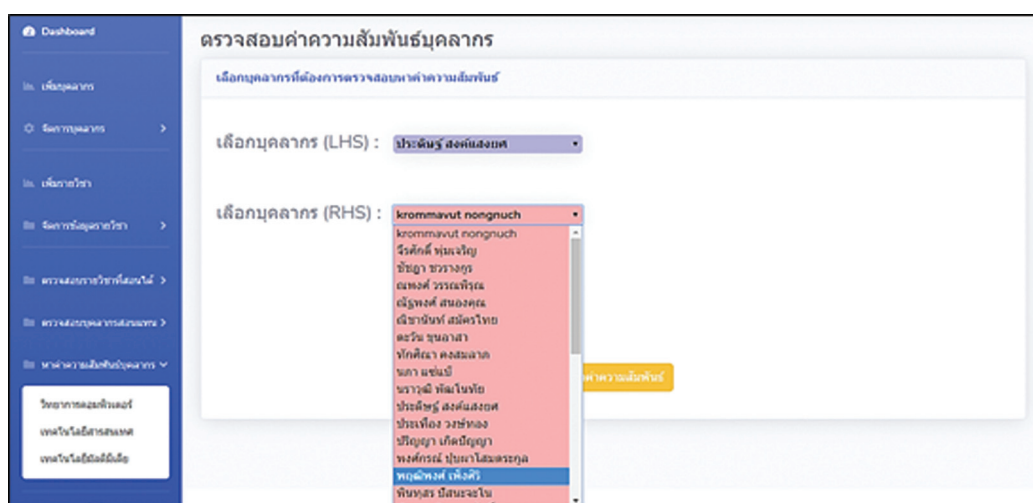
ชื่อ : ฤทธิพงษ์ เจริญศิริ

ลำดับ	วิชา	สอนได้	สอนไม่ได้
1	แคลคูลัสและเรขาคณิตวิเคราะห์ (Calculus and Analytic Geometry)	☐	☒
2	พื้นฐานแนวคิดในการเขียนโปรแกรม (Fundamental Concept in Programming)	☐	☒
3	การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Programming)	☒	☐
4	โครงสร้างข้อมูล (Discrete Structure)	☐	☒
5	ระบบปฏิบัติการ (Operating System)	☒	☐

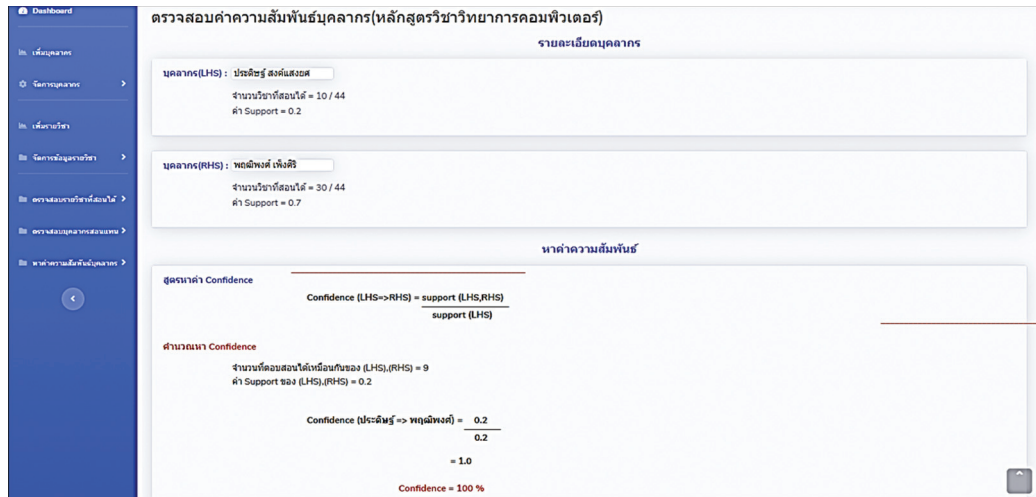
รูปที่ 5 การทำแบบสอบถามของผู้สอนในแต่ละรายวิชา



รูปที่ 6 การเลือกผู้สอนที่สามารถทำการสอนรายวิชานั้นได้



รูปที่ 7 การเลือกผู้สอนที่สามารถสอนทำการสอนทดแทนรายวิชานั้นได้



รูปที่ 8 ผลลัพธ์แสดงค่าความสัมพันธ์ของบุคลากร

จากรูปที่ 5-8 เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างบุคลากรสายวิชาการหรือผู้สอนได้ยกตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอาจารย์ประดิษฐ์ สงค์แสงยศ และอาจารย์พณิพงศ์ เพ็งศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ได้ผลลัพธ์แสดงออกมาเป็นค่าความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 100 ซึ่งแสดงว่าอาจารย์ทั้งสองท่านมีความสัมพันธ์ต่อรายวิชานั้น และยังสามารถจัดรายวิชาสอนให้อาจารย์ทั้งสองนี้สามารถสอนทดแทนกันได้

5. ผลการวิเคราะห์การประเมินประสิทธิภาพด้านการใช้งานเว็บแอปพลิเคชัน สำหรับการเลือกผู้สอนของบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 7 ราย ซึ่งเป็นแบบประเมินที่มีคำถามวัดระดับความคิดเห็น 5 ระดับ จำนวน 10 คำถาม ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ผลการประเมินในระดับมากที่สุดคือ เว็บไซต์ใช้งานง่ายสะดวก ความถูกต้องของข้อมูลรายวิชา หมวดวิชาเฉพาะ หลักสูตรวิทยาการคอมพิวเตอร์ ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2554 ความถูกต้องของข้อมูลรายวิชา หมวดวิชาเฉพาะ หลักสูตรวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2554 ความถูกต้องของข้อมูลรายวิชา หมวดวิชาเฉพาะ หลักสูตรวิชาเทคโนโลยีมีลตมีเดีย ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2555 และความสามารถของเว็บแอปพลิเคชัน สำหรับการเลือกผู้สอนของบุคลากรสายวิชาการด้านคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีความสัมพันธ์ข้อมูลโดยภาพรวมมีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 4.86 และค่าความเชื่อมั่นที่ 0.38 การทำงานอยู่ในเกณฑ์ระดับมากที่สุด ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการตอบแบบประเมินความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ

รายละเอียดการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.
1. สามารถเลือกเมนูหัวข้อต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการ	4.29	0.49
2. ขนาดของตัวหนังสือชัดเจนอ่านง่าย	3.71	0.76
3. เว็บไซต์ใช้งานง่ายสะดวก	4.14	0.38
4. ความเหมาะสมในการเลือกใช้ชนิด และสีตัวอักษร	4.00	0.58

ตารางที่ 5 ผลการตอบแบบประเมินความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ (ต่อ)

รายละเอียดการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.
5. ความเหมาะสมของเว็บแอปพลิเคชันในการโต้ตอบกับผู้ใช้งาน	3.83	0.53
6. ความถูกต้องของข้อมูลบุคลากรผู้สอน	4.86	0.38
7. ความถูกต้องของข้อมูลรายวิชา หลักสูตรวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ พ.ศ 2554*	4.43	0.53
8. ความถูกต้องของข้อมูลรายวิชา หลักสูตรวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ พ.ศ 2554*	4.71	0.49
9. ความถูกต้องของข้อมูลรายวิชา หลักสูตรวิชาเทคโนโลยีมัลติมีเดีย พ.ศ 2555*	4.57	0.53
10. ความเหมาะสมการใช้งานเว็บแอปพลิเคชันโดยภาพรวม	4.29	0.49

* หมวดวิชาชีพเฉพาะ และเป็นหลักสูตรฉบับปรับปรุง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยได้นำเสนอวิธีการจัดการผู้สอนรายวิชาด้านคอมพิวเตอร์ด้วยการแบ่งกลุ่มร่วมกับกฎความสัมพันธ์ของข้อมูลบุคลากรสายวิชาการด้วยวิธี K-MAs เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการผู้สอนที่มีความสามารถที่ตรงกับวิชาชีพที่ตนถนัด และยังเสริมสร้างมนุษยสัมพันธ์กับเพื่อนนักวิชาการเมื่อทราบกลุ่มวิชาชีพจากผลการวิจัยพบว่า การแบ่งกลุ่มผู้สอนภายใต้สาขาวิชาสามารถจัดกลุ่มที่เหมาะสมได้ 5 กลุ่มวิชาชีพ โดยแต่ละกลุ่มสามารถมีผู้สอนทดแทนกันได้อย่างน้อย 3 คน ด้วยกฎความสัมพันธ์ 18 กฎ ซึ่งมีความหมายว่าการเลือกรายวิชาหนึ่งให้กับอาจารย์ผู้สอนจำนวน 1 คน สามารถเลือกผู้สอนแทนในรายวิชานั้นได้จำนวน 2 คน และมีวิธีการเลือกตามกฎความสัมพันธ์ได้เป็นจำนวน 18 วิธี ในงานวิจัยใช้ข้อมูลคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิมาทำการทดลองเท่านั้น ในอนาคตผู้วิจัยได้หัวข้อการทดลองต่อไปคือ ขยายผลการทดลองกับข้อมูลผู้สอนในแต่ละสาขาที่เกี่ยวข้องกันทั้งมหาวิทยาลัย และใช้ในการสนับสนุนการพัฒนาหลักสูตรใหม่เพื่อให้ก้าวทันสมัยและตอบสนองความต้องการของประเทศชาติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่เอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้ และขอบพระคุณทางคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่มอบโอกาสให้ทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

References

- [1] Ariya, K. (2016). A Development of an Instructional Model Based-On Differentiated Instruction Approach to Enhance the Ability of Learning Management Design of 21st Century for Student Teachers, Rajabhat University. **Lampang Rajabhat University Journal**. Vol. 5, No. 2, pp. 1-17

- [2] Na, S., Xumin, L., and Yong, G. (2010). Research on K-Means Clustering Algorithm: An Improved K-Means Clustering Algorithm. In **2010 Third International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics**. 2-4 April 2010, Jinggangshan, China. pp. 63-67. DOI: 10.1109/IITSI.2010.74
- [3] Pengsiri, P. and Sodsee, S. (2015). **A Modification of Multi-Objective Optimization Genetic Algorithm with Initial Population Partition**. In Data Mining and Machine Learning, pp. 337-382
- [4] Pengsiri, P., Sodsee, S., and Meesad, P. (2018). A Comparison of Partition of Initial Population for Multi-Objective Genetic Algorithm Using by Optimal Drainage. In **Proceedings of NCCIT 2018, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)**. Vol. 2018, pp. 30-39
- [5] Cai-quan, X., Shao-bin, C., and Ming, D. (2013). Association Rules Mining for Discussion Information in Group Deliberation Support System. In **2013 8th International Conference on Computer Science Education (ICCSE)**. pp. 67-70. DOI: 10.1109/ICCSE.2013.6553885
- [6] Rakphakawong, P. and Rakphakawong, U. (2015). The Use of Traditional and Fuzzy Association Rule Mining for Student Learning Outcome Forecasting. **KKU Science Journal**. Vol. 43, No. 3, pp. 542-551
- [7] Mahatthanachai, B., Malaivongs, K., Somhom, S., and Tantranont, N. (2015). Association Rule of Subjects Affecting Student Dropout Using Apriori Algorithm. In **3rd Proceedings of Conference Kamphaeng Phet Rajabhat University**. Vol. 2016, pp. 456-469
- [8] Ratchaphibun, N. (2015). **Forecasting and Finding the Relationship of Factors Affecting Daily rubber Prices Using Data Mining Techniques**. Thesis, Prince of Songkla University Surat Thani Campus
- [9] Chumpoonuch, S. (2016). **Using Association Rules to Study Patterns of Medicine use in Thai Adult Depressed Patients Based on Medical Adherence**. Unpublished Master's Thesis, Graduate School, Silpakorn University
- [10] Pengsiri, P., Pinitkan, S., Mongkolchart, N., Wisitpongphan, N., and Meesad, P. (2014). Data Dimension Reduction by Association and Application for Analysis Smart Phone Usage Data. In **10th National Conference on Computing and Information Technology 2014, KMUTNB**. pp. 528-534

การเปรียบเทียบอัลกอริทึมการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลบนเว็บแอปพลิเคชัน

A Comparison of Lossless Data Compression Algorithms on Web Applications

เศกสิทธิ์ พจมาน^{1*} และจारी ทองคำ¹
Seksit Podchaman^{1*} and Jaree Thongkam¹

Received: January 15, 2020; Revised: April 6, 2020; Accepted: April 22, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัลกอริทึมการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลเพื่อลดขนาดไฟล์ข้อมูลให้เล็กลงก่อนทำการส่งไฟล์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และใช้เทคนิคการคลายข้อมูลที่เครื่องผู้ใช้ ซึ่งจะทำการส่งข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น กลุ่มไฟล์ข้อมูล 3 กลุ่มได้ถูกนำมาใช้ในการทดลองคือ กลุ่มไฟล์เอกสาร กลุ่มไฟล์รูปภาพ และกลุ่มไฟล์มัลติมีเดีย จำนวน 150 ไฟล์ โดยใช้อัลกอริทึมการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลจำนวน 5 อัลกอริทึม ได้แก่ Huffman Coding, Deflate, BZip2, LZMA, และ LZ4 ในการวัดประสิทธิภาพการบีบอัดข้อมูล ผู้วิจัยได้ใช้ความเร็วในการบีบอัด ความเร็วในการคลายข้อมูล อัตราส่วนการบีบอัด และเวลารวมทุกกระบวนการ จากการทดลองพบว่า อัลกอริทึม LZ4 มีประสิทธิภาพในการบีบอัดข้อมูล ด้วยความเร็วรวมทุกกระบวนการทำงานดีที่สุดที่อัตราเฉลี่ย 7.6865 วินาที

คำสำคัญ : การบีบอัดข้อมูล; อัลกอริทึมการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูล; อัลกอริทึม LZ4

¹ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Faculty of Informatics, Mahasarakham University

* Corresponding Author E - mail Address: runtotree2000@gmail.com

Abstract

The paper aims to compare different lossless data compression algorithms. These are used to reduce the size of data before transmitting it over the Internet. Because the data is preserved, it can be decompressed and restored to its original state. Facilitates fast and efficient data transfer in web applications. In this research, a total of 150 files of 3 different file types are used including text files, image files and multimedia files. Five lossless data compression algorithms including Huffman Coding, Deflate, BZip2, LZMA, and LZ4 are studied and compared. The compression speed, decompression speed, compression rate and total processing time are employed to evaluate the algorithms. The results show that LZ4 algorithm produces the best overall performance, with the average of 7.6865 second.

Keywords: Data Compression; Lossless Data Compression Algorithms; LZ4 Algorithms

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากที่เทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันได้มีการพัฒนาและเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้การรับ-ส่งข้อมูลมีปริมาณเพิ่มขึ้น [1] ส่งผลให้เครื่องบริการเว็บ (Web Server) มีความเร็วลดลง ไม่สามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือบางครั้งก็ไม่สามารถเข้าใช้งานระบบงานได้ เนื่องจากเครื่องบริการเว็บต้องใช้หน่วยความจำ (Memory) ซีพียู (CPU) พื้นที่เก็บข้อมูล (Disk) และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) มากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพลดลง ปัจจัยหลักอีกประการหนึ่งคือ ปริมาณหรือขนาดของไฟล์ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านเว็บแอปพลิเคชันก็มีผลโดยตรงต่อความเร็วในการส่งข้อมูล เมื่อไฟล์ข้อมูลมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเวลาในการรับ-ส่งก็ใช้เวลามากขึ้นไปด้วย [2] ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการต่าง ๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการรับ-ส่งข้อมูลเพื่อเพิ่มความเร็วในการส่งวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องขนาดไฟล์ คือการบีบอัดไฟล์ให้มีขนาดเล็กลงก่อนส่งไฟล์ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการจัดเก็บไฟล์ข้อมูล และการส่งข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

การบีบอัดข้อมูลเป็นที่นิยมในปัจจุบันซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาอัลกอริทึม เพื่อมาใช้ในการบีบอัดข้อมูล [3] ได้นำวิธีการบีบอัดข้อมูลมาใช้ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks: WSN) เนื่องจากโหนดเซนเซอร์ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีความจุจำกัด การส่งข้อมูลเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานหลักใน WSN จึงมีการนำเทคนิคการประหยัดพลังงานหลาย ๆ รูปแบบมาใช้ และรูปแบบการบีบอัดข้อมูลเป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยลดปริมาณข้อมูลที่ส่งในเครือข่าย ทำให้ประหยัดพลังงานได้มาก จากการทดลองการนำวิธีการบีบอัดข้อมูลมาใช้สามารถประหยัดพลังงานได้มากถึง 87.57% [4] ได้วิจัยเรื่องการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูล โดยใช้การบีบอัดข้อมูลในรูปแบบของไฟล์ JSON สาเหตุมาจากการแลกเปลี่ยนข้อมูลเดิมในระบบอินเทอร์เน็ตในสรรพสิ่ง (Internet of Things) ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลจากฝั่งไคลเอนต์และฝั่งเซิร์ฟเวอร์เดิมเป็นแบบ XML ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่ มาเป็นแบบ JSON พร้อมกับการบีบอัดข้อมูลแบบไม่สูญเสียข้อมูล จำนวน 4 อัลกอริทึมดังนี้ LZMA, GZIP,

BZIP, และ A-LZMA จากผลการวิจัยอัลกอริทึม BZIP มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีอื่น ๆ [5] ได้ศึกษาอัลกอริทึมเพื่อเปรียบเทียบการบีบอัดรูปภาพจำนวน 71 รูปภาพ และแต่ละภาพมีความบิดเบือนจากความจริงสูง และทำการเลือกอัลกอริทึมมาทดสอบจำนวน 6 อัลกอริทึม ดังนี้ LZMA, PPM, BWT, LZW, Deflate, LZ77, และ Deflate64 จากผลการวิจัยอัลกอริทึม PPM, LZW และ Deflate64 ได้ผลการบีบอัดที่ดีกว่าวิธีอื่น ๆ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการแก้ปัญหาเหล่านี้ ด้วยการนำวิธีการบีบอัดข้อมูลมาใช้ในการลดขนาดของข้อมูลให้เล็กลงก่อนที่จะส่ง และในการวิจัยในครั้งนี้ได้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลจำนวน 5 อัลกอริทึม คือ Huffman Coding, LZMA, LZ4, Deflate, และ BZip2 โดยการเปรียบเทียบความเร็วในการบีบอัด ความเร็วในการคลายข้อมูล อัตราส่วนการบีบอัดและความเร็วในการรับ-ส่งไฟล์ข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อนำผลการเปรียบเทียบที่ดีและมีประสิทธิภาพไปพัฒนาปรับปรุงระบบเว็บแอปพลิเคชันในหน่วยงานหรือองค์กรต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลที่เหมาะสมกับหมวดไฟล์เอกสาร หมวดไฟล์รูปภาพ และหมวดไฟล์มัลติมีเดีย โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ได้แบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การเก็บรวบรวมไฟล์ข้อมูลและจัดแยกไฟล์ตามหมวดหมู่ไฟล์ 2) การบีบอัดข้อมูล/คลายข้อมูล และการรับ-ส่งข้อมูล 3) การประเมินประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ได้ดังนี้



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงาน

1. การเก็บรวบรวมไฟล์ข้อมูลและจัดแยกไฟล์ข้อมูลตามหมวดหมู่ไฟล์ ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมไฟล์ข้อมูลจำนวน 150 ไฟล์ข้อมูล และจัดแยกไฟล์ตามหมวดหมู่ไฟล์ เพื่อต้องการทดสอบประสิทธิภาพแต่ละอัลกอริทึมให้มีความเหมาะสมกับหมวดหมู่ไฟล์ เนื่องจากไฟล์ข้อมูลในปัจจุบันมีมากมายหลายประเภท ผู้วิจัยจึงได้ทำการจัดแยกกลุ่มไฟล์ข้อมูลเพื่อรวบรวมไฟล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันให้เป็นหมวดหมู่ และเพื่อนำผลการทดสอบในแต่ละหมวดหมู่ ไปปรับปรุงพัฒนาระบบการบีบอัดข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการแบ่งหมวดหมู่ไฟล์ จำนวน 3 หมวดหมู่ คือ 1) หมวดไฟล์เอกสาร

จำนวน 60 ไฟล์ข้อมูล ประกอบไปด้วยนามสกุลไฟล์ (PDF, BAK, XLS, XLSX, LOG, TXT, DOC, DOCX) 2) หมวดไฟล์รูปภาพจำนวน 48 ไฟล์ข้อมูล ประกอบไปด้วยนามสกุลไฟล์ (JPG, GIF, TIF, TIFF, PNG, BMP, PSD) 3) หมวดไฟล์มัลติมีเดียจำนวน 42 ไฟล์ข้อมูล ประกอบไปด้วยนามสกุลไฟล์ (MP3, WAV, AVI, MP4, 3GP, WMA) และทำการแบ่งช่วงขนาดไฟล์ 15 ช่วงขนาดไฟล์ ซึ่งไฟล์ที่จะใช้ในการทดลองการบีบอัดข้อมูล จะมีขนาดไฟล์ตั้งแต่ 1 กิโลไบต์ - 100 เมกะไบต์ขึ้นไป

2. การบีบอัดข้อมูล/คลายข้อมูล และการรับ-ส่งข้อมูล การบีบอัดข้อมูล (Data Compression) เป็นการบีบอัด (Compress) เพื่อให้ใช้จำนวนบิตในการจัดเก็บข้อมูลน้อยลงกว่าเดิม การบีบอัดข้อมูลมีประโยชน์ในการลดปริมาณการใช้ทรัพยากร เช่น ประหยัดพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์เมื่อจัดเก็บ เป็นต้น ในทางตรงข้ามข้อมูลที่ถูกระเบิด (Compress) มาแล้วก็ต้องนำมาคลาย (Decompress) หรือถอดรหัสเพื่อให้ได้ข้อมูลเดิมกลับมาก่อนที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ วิธีการบีบอัดข้อมูล แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

- การบีบอัดแบบไม่สูญเสีย (Lossless Data Compression) เป็นการบีบอัดข้อมูลแบบไม่สูญเสีย อาศัยหลักการที่ว่าปกติข้อมูลที่ใช้อยู่จะมีข้อมูลที่ซ้ำกันอาจใช้วิธีเก็บตำแหน่งที่ปรากฏเท่านั้น ๆ แทน ก็จะสามารถลดความยาวข้อมูลที่จะเก็บได้ จะเห็นว่าการบีบอัดข้อมูลแบบนี้ข้อมูลต้นฉบับกับข้อมูลที่บีบอัดแล้วคลายออกมาจะเหมือนกันไม่ผิดเพี้ยน

- การบีบอัดแบบสูญเสียบางส่วน (Lossy Data Compression) จะมีแนวคิดต่างกันไป โดยใช้หลักการว่าความผิดเพี้ยนของข้อมูลเล็กน้อยเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ เช่น ตาของมนุษย์ไม่สามารถแยกความแตกต่างของบางสีได้หมด ก็ไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลทุกสี จะเห็นตัวอย่างจากไฟล์ประเภท JPG ใช้การบีบอัดข้อมูลแบบเสียบางส่วน จะทำให้ได้ขนาดไฟล์ภาพที่เล็กลงมาก แต่ก็สูญเสียรายละเอียดบางอย่างไป

ในขั้นตอนการบีบอัดและคลายข้อมูลในครั้งนี้ จะใช้อัลกอริทึมการบีบอัดไม่สูญเสียข้อมูลจำนวน 5 อัลกอริทึม ดังนี้

1) อัลกอริทึม Huffman Codes [6] คือการเข้ารหัสแบบ Huffman เป็นการเข้ารหัสที่สั้นกว่าแทนสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นบ่อย โดยใช้ต้นไม้สองทางในการสร้างรหัสของสัญลักษณ์แต่ละตัวกระจายไปกับข้อมูลของโหนดใบที่เชื่อมอยู่กับต้นไม้สองทาง (Binary Tree) แต่ละโหนดจะมีน้ำหนักกำหนดอยู่ซึ่งก็คือความถี่หรือความน่าจะเป็นของการปรากฏของสัญลักษณ์นั้น ๆ โดยมีวิธีการสร้างต้นไม้ดังนี้ 1) กำหนดให้ทุก ๆ สัญลักษณ์เป็นโหนดใด ๆ 2) หา 2 โหนดใด ๆ ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด 3) สร้างโหนดแม่สำหรับโหนดสองโหนดนี้โดยมีน้ำหนักเท่ากับผลรวมของน้ำหนักของโหนดลูก 4) กำหนดให้โหนดแม่เป็นโหนดใด ๆ และนำโหนดลูกออกจากโหนดใด ๆ 5) โหนดลูกโหนดหนึ่งจะถูกกำหนดให้มีทางผ่านจากโหนดแม่เมื่อทำการถอดรหัสด้วยบิต 0 และอีกโหนดจะถูกกำหนดด้วยบิต 1 จนกว่าจะเหลือโหนดใด ๆ หนึ่งโหนดซึ่งโหนดนี้จะถูกกำหนดให้เป็นรากของต้นไม้ นั่นหมายถึง การสร้างต้นไม้เสร็จสิ้น

อัลกอริทึม Huffman Codes เป็นอัลกอริทึมที่สามารถบีบอัดข้อมูลไฟล์ที่เป็น ASCII ได้รวดเร็วมาก และประสิทธิภาพในการบีบอัดนั้นได้ผลดีเนื่องจากเราสามารถทราบ Symbol ทั้งหมดที่เป็นไปได้ (A-Z, a-z, 0-9) ทำให้ไม่ต้องมีการค้นหา Symbol เหมือนกับอัลกอริทึมอื่น ๆ แต่อัลกอริทึมนี้ไม่เหมาะกับการบีบอัดไฟล์ขนาดเล็ก เนื่องจากอาจทำให้ไฟล์ที่บีบอัดมีขนาดไฟล์หลังจากการบีบอัดมีขนาดพื้นที่เพิ่มขึ้น

2) อัลกอริทึม BZip2 [7] คืออัลกอริทึมการบีบอัดข้อมูลโดยใช้วิธีการเบอร์โรวส์-วีเลอร์ (Burrows-Wheeler) และการเข้ารหัสแบบ Huffman โดยปกติการบีบอัดข้อมูลแบบนี้จะดีกว่าการบีบอัดข้อมูลแบบ LZ77/LZ78 และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงแบบ PPM ของการบีบอัดข้อมูลโดยใช้สถิติ

แต่เร็วกว่าทางด้านเวลา อัลกอริทึม BZip2 จะประมวลผลข้อมูลโดยแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงบล็อกขนาด 100,000 - 900,000 ไบต์ ขึ้นอยู่กับคำสั่งปกติขนาดของบล็อกจะเท่ากับ 900,000 ไบต์ จากนั้นจะอ่านข้อมูลครั้งละ 5,000 ไบต์จนกว่าจะครบเท่ากับขนาดของบล็อกที่กำหนด และประมวลผลบีบอัดข้อมูลและเขียนข้อมูลที่บีบอัดแล้วลงบนหน่วยเก็บข้อมูล ทำเช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าบล็อกข้อมูลจะถูกบีบอัดข้อมูลแล้วทั้งหมด

อัลกอริทึมบีบอัด BZip2 เป็นอัลกอริทึมบีบอัดข้อมูลโดยใช้หลักสถิติเข้ามาใช้ในการจัดเก็บข้อมูล จึงส่งผลให้การบีบอัดมีอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูลที่ดี แต่มีปัญหาในการใช้เวลาในการทำงานมากขึ้นทั้งในการบีบอัดและการคลายข้อมูล

3) อัลกอริทึม Deflate [8] คืออัลกอริทึมที่ทำการรวมกันของอัลกอริทึม LZ77 และการเข้ารหัส Huffman อัลกอริทึม Deflate จะตัดสตริงออกเป็นบล็อกย่อย ๆ บล็อกละ 32 กิโลไบต์ โดยแต่ละบล็อกนั้นจะใช้พื้นที่ 4 ไบต์ในการเก็บระยะทาง (Distance Code) โดยเป็นระยะทางที่จะถูกแทนที่ และสามารถเก็บ Symbol ที่จะถูกแทนที่ได้ 288 Symbols โดยมีหลักการทำงานคือ จะตัดข้อมูลออกเป็นบล็อกย่อย ๆ บล็อกละ 32 กิโลไบต์ก่อน จากนั้นแต่ละบล็อกจะใช้อัลกอริทึม LZ77 ในการหาบล็อกย่อย ๆ ที่มีบิตซ้ำกันในลักษณะที่เรียกว่า Sliding Window แล้วทำการสร้างตารางขึ้นมาเพื่อเก็บ Symbol และหลังจากนั้นจะสร้างตาราง Distance Code เพื่อเก็บระยะทางที่จะเข้าไปแทนที่ Symbol ที่ระบุไว้ในตัวข้อมูล

อัลกอริทึม Deflate นี้ได้ผลดีมากในการบีบอัดข้อมูลที่เป็นลักษณะไบนารี เช่น ซอฟต์แวร์ต่าง ๆ แต่อัลกอริทึมนี้ไม่เหมาะกับการบีบอัดไฟล์ขนาดเล็กและไฟล์เอกสาร เนื่องจากทำงานได้ช้าและต้องเสียพื้นที่ในการสร้าง Header ต่าง ๆ ใน แต่ละบล็อกมากกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ

4) อัลกอริทึม LZ4 [8] คืออัลกอริทึมที่อยู่ในตระกูล LZ77 ใช้ในการบีบอัดข้อมูลซึ่งมุ่งเน้นที่ความเร็วของการบีบอัดข้อมูลและถอดรหัสข้อมูล ค้นหาที่ซ้ำซ้อนกัน โดยอาศัย Hash Table และไม่ค้นหาความเป็นไปได้ทั้งหมดของค่าที่ซ้ำซ้อนกัน และทำการบีบอัดกับข้อมูลในระดับไบต์

ข้อมูลที่ถูกระเบียบ (Compression Block) ของ LZ4 นั้นประกอบด้วย Sequence หลาย ๆ Sequence เรียงต่อกัน ในแต่ละ Sequence นั้น คือชุดของ Literals ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ถูกบีบอัดหรือข้อมูลที่ซ้ำ ตามด้วยส่วนที่ใช้ในการคัดลอก Match (ส่วนที่ระบุถึงการซ้ำของข้อมูล) ในแต่ละ Sequence จะเริ่มต้นด้วย Token ซึ่งมีขนาด 1 ไบต์ ซึ่งใน 1 ไบต์นี้จะแยกออกมาเป็น 2 พิลด์ ซึ่งแต่ละพิลด์มีขนาด 4 บิต และมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 15 ค่าใน Token นั้นจะใช้สำหรับระบุความยาวและส่วนประกอบต่าง ๆ ใน Sequence นั้น โดย 4 บิตแรก (High-Bits) นั้นจะบอกถึงความยาวของ Literal และ 4 บิตหลัง (Low-Bits) นั้นจะบอกถึงความยาวของ Match ซึ่งความยาวของ Literal และ Match นั้น ถ้าหากว่าเกินกว่า 15 จะมีส่วน Literal Length เพิ่มขึ้นมา เพื่อเก็บค่าความยาวของ Literal โดยแต่ละไบต์จะเก็บค่าได้ 255 เมื่อ Literal Length มีความยาวมากขึ้น ก็สามารถเพิ่มขนาดของ Literal Length ได้ โดยไม่ได้จำกัดขนาดไว้ (No Size Limit) จาก Literals คือ Operation ที่ใช้ในการคัดลอก Match ซึ่งเริ่มจาก Offset ซึ่งมีขนาด 2 ไบต์ แบบ Little Endian (ไบต์แรกคือ Low ไบต์ที่ 2 คือ High) ระบุถึงตำแหน่งของ Match ที่ถูกก๊อปปี้มาจาก Literals ซึ่ง 1 หมายถึงตำแหน่งปัจจุบัน ลบ 1 Byte และค่าสูงสุดของ Offset คือ 65535 ในการคำนวณความยาวของ Match จะใช้พิลด์ที่สองของ Token ซึ่งเป็น 4 บิตหลัง (Low-Bits) โดยความยาวที่น้อยที่สุดของ Match เท่ากับ 4 ไบต์ เรียกว่า Min Match ดังนั้นค่า 0 จึงหมายถึง 4 ไบต์ และ 15 หมายถึง 19+ ไบต์ ซึ่งสามารถขยายให้มากขึ้นได้เช่นเดียวกันกับ Literal Decoder สามารถสร้างข้อมูลต้นฉบับด้วยข้อมูลจาก Offset และความยาวของ Match

อัลกอริทึม LZ4 มีความเร็วในการบีบอัด 500 เมกะไบต์ต่อวินาทีต่อคอร์ และสามารถปรับความเร็วเพิ่มได้ถึงกิกะบิตต่อวินาที ในโหมดการทำงานของซีพียูที่มีหลายคอร์ และมีความเร็วในการแปลงข้อมูลกลับนั้นสามารถเร็วได้ถึงความเร็วของแรมที่มีในเครื่อง

5) อัลกอริทึม LZMA [7] คืออัลกอริทึมการบีบอัดแบบพจนานุกรมอยู่ในตระกูล LZ77 ซึ่งผลลัพธ์จะถูกเข้ารหัสด้วยตัวเข้ารหัสแบบเป็นช่วง โดยใช้แบบจำลองที่ซับซ้อนเพื่อทำนายความน่าจะเป็นของแต่ละบิต ตัวบีบอัดพจนานุกรมพบการจับคู่โดยใช้โครงสร้างข้อมูลพจนานุกรมที่ซับซ้อน และสร้างสัญลักษณ์การอ้างอิงวลีซึ่งถูกเข้ารหัสครั้งละหนึ่งบิต ในการบีบอัด LZMA สตริงที่ถูกบีบอัดเป็นสตริงของบิตเข้ารหัส โดยใช้ Coder Range แบบปรับตัวได้ สตริงจะถูกแบ่งออกเป็นแพ็กเก็ต แต่ละแพ็กเก็ตจะมีขนาดหนึ่งไบต์ แต่ละส่วนของแต่ละแพ็กเก็ตถูกจำลองด้วยบริบทที่ต่างกัน ดังนั้นการทำนายความน่าจะเป็นสำหรับแต่ละบิตนั้นก็มีความสัมพันธ์กับค่าของบิตนั้น ๆ

อัลกอริทึม LZMA มีอัตราการบีบอัดที่ดีกว่าอัลกอริทึม Bzip2 โดยเฉพาะการบีบอัดไฟล์ที่เป็นประเภทข้อความธรรมดา (Plain Text) แต่ข้อเสียของอัลกอริทึมนี้คือต้องการทรัพยากรเครื่องมากทั้งหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยความจำหลัก (RAM)

สำหรับขั้นตอนในการทำงานสามารถอธิบายรายละเอียด ได้ดังนี้

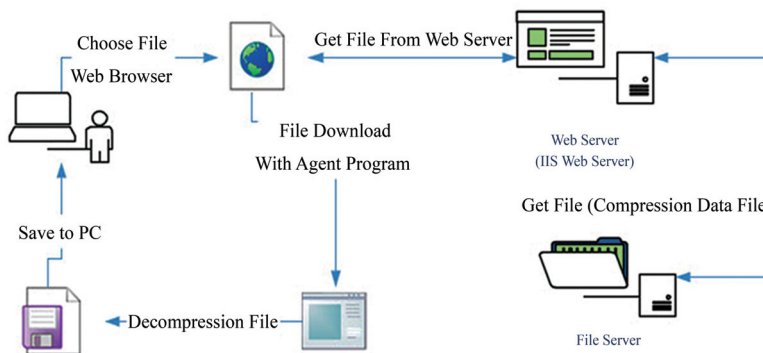
2.1 การบีบอัดข้อมูล เป็นขั้นตอนเริ่มต้นจากผู้ใช้งานทำการเลือกไฟล์ที่ต้องการอัปโหลด เมื่อไฟล์ถูกอัปโหลดเข้ามาจัดเก็บที่เครื่องบริการเว็บเสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะทำการประมวลผลการบีบอัดข้อมูลตามอัลกอริทึมที่ผู้ใช้งานต้องการ เมื่อการประมวลผลการบีบอัดเสร็จสิ้น ไฟล์ข้อมูลจะถูกบันทึกจัดเก็บโดยนามสกุลไฟล์ข้อมูลจะต่อท้ายด้วยอัลกอริทึมที่ทำการบีบอัดเข้ามาด้วยทุกไฟล์ข้อมูล ในขั้นตอนการบีบอัดข้อมูล (Compression) จะประมวลผลการทำงานที่เครื่องบริการเว็บ โดยเครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานในขั้นตอนนี้ มีคุณสมบัติดังนี้

- ฮาร์ดแวร์ เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook ประกอบไปด้วย ซีพียู Intel Core i5-2410M @ 2.30 GHz หน่วยความจำหลัก 8 GB ฮาร์ดดิสก์ขนาด 500 GB
- ซอฟต์แวร์ ระบบปฏิบัติการ Windows 10 Professional 64 Bit, Visual Studio.Net 2019, พัฒนาด้วยภาษา ASP.NET Core MVC, Internet Information Services (IIS) 7.5, Browser Chrome Version 14

2.2 การคลายข้อมูล เป็นขั้นตอนในการคลายข้อมูลที่มีการบีบอัดมาแล้ว โดยเริ่มต้นการทำงานหลังจากโปรแกรมดาวน์โหลดไฟล์ จากเครื่องบริการเว็บลงมาจัดเก็บที่เครื่องผู้ใช้งานก่อน จากนั้นโปรแกรมทำการคลายการบีบอัดข้อมูล โดยการตรวจสอบนามสกุลไฟล์ก่อน เนื่องจากนามสกุลไฟล์เอกสารที่ทำการบีบอัดข้อมูลมาแล้วจะบ่งบอกชนิดของอัลกอริทึมที่ใช้ในการบีบอัด เมื่อบีบอัดด้วยอัลกอริทึมใด ๆ ต้องทำการคลายการบีบอัดด้วยอัลกอริทึมนั้น ๆ เสมอ ในขั้นตอนการคลายข้อมูลจะประมวลผลการทำงานที่เครื่องผู้ใช้งาน (Client) การประมวลผลการทำงานที่เครื่องผู้ใช้งานจะทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าการประมวลผลการทำงานที่เครื่องบริการเว็บ เนื่องจากในกรณีที่มีผู้ใช้งานจำนวนมากต้องการดาวน์โหลดไฟล์เอกสารไปใช้งานพร้อม ๆ กัน ส่งผลให้เครื่องบริการเว็บต้องประมวลผลข้อมูลในหลาย ๆ ขั้นตอน ซึ่งอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกใช้เทคนิคในการคลายข้อมูลที่เครื่องผู้ใช้งาน เพราะจะทำให้การทำงานของเครื่องบริการเว็บ มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานในขั้นตอนนี้มีคุณสมบัติดังนี้

- ฮาร์ดแวร์ เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook ประกอบไปด้วย ซีพียู Intel Core i3-2410M @ 2.30 GHz หน่วยความจำหลัก 4 GB ฮาร์ดดิสก์ขนาด 500 GB
- ซอฟต์แวร์ ระบบปฏิบัติการ Windows 10 Professional 32 Bit โปรแกรมสำหรับโหลดไฟล์และการคลายข้อมูล (API) พัฒนาด้วย Visual Studio.Net 2019 ด้วยภาษา C#, Browser Chrome Version 14

2.3 การรับ-ส่งไฟล์ข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน เป็นขั้นตอนในการถ่ายโอนข้อมูลจากเครื่องบริการเว็บไปยังเครื่องผู้ใช้งาน ในการถ่ายโอนข้อมูลจะออกแบบโปรแกรมเป็น Web Client โดยสามารถแสดงรายละเอียดขั้นตอนการทำงานได้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการรับ-ส่งไฟล์ข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

จากรูปที่ 2 แสดงขั้นตอนในการถ่ายโอนข้อมูลจากเว็บแอปพลิเคชันไปที่เครื่องผู้ใช้งาน โดยเริ่มต้นการทำงานจากผู้ใช้ทำการคลิกเลือกไฟล์ข้อมูลที่ต้องการดาวน์โหลด จากรายการไฟล์ที่แสดงบนเว็บแอปพลิเคชัน จากนั้นโปรแกรมจะทำการส่งค่าพารามิเตอร์ (URL) ให้กับโปรแกรมดาวน์โหลดไฟล์เอกสาร (API) เมื่อโปรแกรมทำการดาวน์โหลดไฟล์จากเครื่องบริการเว็บลงมาจัดเก็บที่เครื่องผู้ใช้งานเสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะทำการคลายการบีบอัดข้อมูล และบันทึกจัดเก็บไฟล์ข้อมูลที่เครื่องผู้ใช้งาน

3. การประเมินประสิทธิภาพการทำงาน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งแยกขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 กระบวนการ คือ 1) กระบวนการอัปโหลดไฟล์และบีบอัดข้อมูล และวัดประสิทธิภาพการบีบอัด 2) กระบวนการดาวน์โหลดไฟล์ การคลายข้อมูล และการรับ-ส่งไฟล์ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน และวัดประสิทธิภาพการทำงาน

ในวิจัยฉบับนี้จะวัดประสิทธิภาพการทำงานจำนวน 4 ตัวชี้วัด ดังนี้

3.1 การวัดความเร็วการบีบอัดข้อมูล (Compression Speed) [9] - [10] คือการวัดความเร็วในการบีบอัดข้อมูลซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณข้อมูลและเวลาที่ใช้ในการบีบอัดข้อมูล มีหน่วยเป็นไบนารีต่อวินาทีดังสมการที่ (1)

$$\text{Compression Speed} = \frac{\text{File Size}}{\text{Compression Time}} \quad (1)$$

- File Size คือ ขนาดข้อมูลก่อนการบีบอัด มีหน่วยเป็นไบต์
- Compression Time คือ เวลาที่ใช้ในการบีบอัดข้อมูล มีหน่วยเป็นวินาที

3.2 การวัดความเร็วการคลายข้อมูล (**Decompression Speed**) [11] - [12] คือการวัดความเร็วในการคลายข้อมูล ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณข้อมูลและเวลาที่ใช้ในการคลายข้อมูลมีหน่วยเป็นไบต์ต่อวินาที ดังสมการที่ (2)

$$\text{Decompression Speed} = \frac{\text{File Size1}}{\text{Compression Time}} \quad (2)$$

- File Size1 คือ ขนาดข้อมูลหลังการบีบอัด มีหน่วยเป็นไบต์
- Decompression Time คือ เวลาที่ใช้ในการคลายข้อมูล มีหน่วยเป็นวินาที

3.3 การวัดอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูล (**Compression Ratio**) [13] ซึ่งแสดงถึงจำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากการบีบอัด ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะอยู่ในรูปของร้อยละขนาดของข้อมูลดั้งเดิม (File Size2) และขนาดของข้อมูลที่ถูกบีบอัดแล้ว (Compression Size) ดังสมการที่ (3)

$$\text{Compression Ratio} = \frac{\text{Compression Size}}{\text{File Size2}} * 100 \quad (3)$$

3.4 เวลารวมทุกกระบวนการ (**Overall Time**) [6], [14] คือเวลารวมของระบบที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากเครื่องต้นทางไปยังเครื่องปลายทาง ดังสมการที่ (4)

$$\text{Overall Times} = (\text{Compression Time} + \text{Processing Time}) + (\text{Decompression Time} + \text{Transmission Time}) \quad (4)$$

- Processing Time คือ เวลาที่เครื่องบริการเว็บใช้ในการประมวลผล
- Transmission Time คือ เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากเครื่องต้นทางไปยังปลายทาง

ผลการวิจัย

จากการออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันและทดสอบวัดประสิทธิภาพการบีบอัดข้อมูล โดยใช้ไฟล์ข้อมูลในการทดสอบทั้งหมด 150 ไฟล์ข้อมูล และจัดแยกไฟล์ตามหมวดหมู่ไฟล์ ดังนี้ 1) หมวดไฟล์เอกสาร จำนวน 60 ไฟล์ข้อมูล 2) หมวดไฟล์รูปภาพจำนวน 48 ไฟล์ข้อมูล 3) หมวดไฟล์มัลติมีเดียจำนวน 42 ไฟล์ข้อมูล จากนั้นทำการทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพการทำงาน ด้วยการวัดความเร็วในการบีบอัด ความเร็วในการคลายข้อมูล อัตราส่วนการบีบอัด และเวลารวมการทำงานทุกกระบวนการ โดยสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1. ผลการเปรียบเทียบความเร็วการบีบอัด (**Compression Speed**)

เป็นการวัดหาความเร็วที่ใช้ในการบีบอัดข้อมูล จากเริ่มต้นจนถึงการบีบอัดข้อมูล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีหน่วยเป็นไบต์ต่อวินาที โดยสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเร็วการบีบอัดข้อมูล

อัลกอริทึม	ความเร็วการบีบอัดข้อมูล (Byte / S)			
	Multimedia	Images	Data	ค่าเฉลี่ยรวม
LZ4	133,034,743.74	65,835,663.25	42,744,585.52	80,538,330.84
Deflate	23,073,507.59	32,384,160.89	20,504,606.93	25,320,758.47
Huffman Coding	2,371,039.79	2,303,321.63	2,120,797.02	2,265,052.81
BZip2	1,023,002.04	1,608,261.90	1,408,694.51	1,346,652.82
LZMA	830,718.02	840,928.95	783,964.60	818,537.19

จากตารางที่ 1 แสดงผลลัพธ์การวัดความเร็วในการบีบอัดไฟล์ข้อมูล จากผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึม LZ4 สามารถทำความเร็วในการบีบอัดข้อมูลดีที่สุดที่ความเร็วเฉลี่ย 80,538,330.84 ไบต์ต่อวินาที และยังพบว่าอัลกอริทึม LZ4 สามารถทำความเร็วได้ดีทั้ง 3 หมวดหมู่ไฟล์ โดยหมวดหมู่ไฟล์มัลติมีเดีย มีความเร็วเฉลี่ย 133,034,743.74 ไบต์ต่อวินาที หมวดไฟล์เอกสารความเร็วเฉลี่ย 65,835,663.25 ไบต์ต่อวินาที หมวดไฟล์รูปภาพความเร็วเฉลี่ย 42,744,585.52 ไบต์ต่อวินาที จะเห็นได้ว่า อัลกอริทึม LZ4 มีความเร็วในการบีบอัดที่สูงกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ เป็นอย่างมาก โดยมีค่าเฉลี่ยมากกว่าอัลกอริทึม Deflate ที่มีลำดับถัดมา ที่ความเร็วเฉลี่ย 25,320,758.47 ไบต์ต่อวินาที

2. ผลการเปรียบเทียบความเร็วการคลายข้อมูล (Decompression Speed)

เป็นการวัดหาความเร็วที่ใช้ในการคลายข้อมูล จากเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการคลายข้อมูล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีหน่วยเป็นไบต์ต่อวินาที โดยสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเร็วการคลายข้อมูล

อัลกอริทึม	ความเร็วการคลายข้อมูล (Byte / S)			
	Multimedia	Images	Data	ค่าเฉลี่ยรวม
LZ4	763,951,843.31	104,543,522.90	297,746,985.22	388,747,450.48
Deflate	162,223,009.27	51,296,907.76	87,952,600.45	100,490,839.16
BZip2	3,541,681.15	1,291,306.45	2,569,048.82	2,467,345.47
LZMA	3,022,228.02	1,607,089.16	2,382,631.09	2,337,316.09
Huffman Coding	161,432.40	83,929.44	90,452.61	111,938.15

จากตารางที่ 2 แสดงผลลัพธ์การวัดความเร็วในการคลายข้อมูล จากผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึม LZ4 สามารถทำความเร็วในการคลายข้อมูลดีที่สุดที่ความเร็วเฉลี่ย 388,747,450.48 ไบต์ต่อวินาที และยังพบว่าอัลกอริทึม LZ4 สามารถทำความเร็วได้ดีทั้ง 3 หมวดหมู่ไฟล์ โดยหมวดหมู่ไฟล์มัลติมีเดีย มีความเร็วเฉลี่ย 763,951,843.31 ไบต์ต่อวินาที หมวดไฟล์เอกสารความเร็วเฉลี่ย 297,746,985.22 ไบต์ต่อวินาที หมวดไฟล์รูปภาพความเร็วเฉลี่ย 104,543,522.90 ไบต์ต่อวินาที และจากผลการทดลองในตารางที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่า อัลกอริทึม LZ4 จะมีความเร็วในการบีบอัดและคลายข้อมูลดีที่สุด จากผลการทดลอง

ความเร็วในการคลายข้อมูล อัลกอริทึม LZ4 มีค่าเฉลี่ยมากกว่าอัลกอริทึม Deflate ที่มีลำดับถัดมาที่ความเร็วเฉลี่ย 100,490,839.16 ไบต์ต่อวินาที เนื่องจากอัลกอริทึม LZ4 มีความเร็วในการบีบอัดและคลายข้อมูลที่สูง ยิ่งไฟล์ที่มีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 10 เมกะไบต์ขึ้นไป การทำงานของอัลกอริทึมก็จะมี ความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเครื่องที่ใช้ในการทดลองมีซีพียูที่เป็นแบบมัลติคอร์ อัลกอริทึม LZ4 สามารถทำความเร็วได้อีกเท่าตัว จึงส่งผลทำให้ผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึม LZ4 มีความเร็วเฉลี่ยที่ดีที่สุดทั้งในด้านการบีบอัดและการคลายข้อมูล จากผลลัพธ์ในการวัดความเร็วในการบีบอัดและการคลายข้อมูล มีความสอดคล้องกับผลการวิจัยเรื่อง A Critical Evaluation of Lossless Algorithm and Its Applications [15] ซึ่งได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูล โดยการใช้งานการบีบอัดข้อมูลในระบบงานซึ่งมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันผ่านโทรศัพท์มือถือ ซึ่งได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับบทความวิจัยฉบับนี้

3. ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูล (Compression Ratio)

เป็นการวัดหาอัตราส่วนพื้นที่ขนาดไฟล์คงเหลือหลังจากผ่านขั้นตอนการบีบอัดไฟล์ข้อมูลมาแล้ว ซึ่งผลลัพธ์การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบีบอัดไฟล์ข้อมูลที่ได้จะมีหน่วยเป็นร้อยละของขนาดไฟล์ข้อมูลดั้งเดิม โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนการบีบอัดข้อมูล

อัลกอริทึม	อัตราส่วนการบีบอัดข้อมูล (%)			
	Data	Images	Multimedia	ค่าเฉลี่ยรวม
LZMA	73.05	71.03	94.72	79.60
BZip2	76.47	76.51	94.82	82.60
Deflate	76.21	77.20	96.81	83.41
LZ4	80.01	85.99	98.77	88.26
Huffman Coding	111.43	109.10	98.65	106.39

จากตารางที่ 3 แสดงข้อมูลอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูล ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูลระหว่างอัลกอริทึม LZMA, BZip2, Deflate, LZ4, และ Huffman Coding พบว่า อัลกอริทึม LZMA มีอัตราส่วนการบีบอัดที่น้อยที่สุดใน 3 หมวดไฟล์ โดยเฉลี่ย 79.60% อัลกอริทึม BZip2 โดยเฉลี่ย 82.60% อัลกอริทึม Deflate โดยเฉลี่ย 83.41% อัลกอริทึม LZ4 โดยเฉลี่ย 88.26% และอัลกอริทึม Huffman Coding โดยเฉลี่ย 106.39% และพบว่าหมวดไฟล์ที่มีอัตราส่วนการบีบอัดที่น้อยที่สุดคือ หมวดไฟล์รูปภาพโดยมีค่าเฉลี่ย 71.03% ซึ่งหมายความว่าเมื่อนำไฟล์เอกสารใด ๆ มาผ่านกระบวนการบีบอัดข้อมูลจะทำให้มีขนาดที่เล็กลง ยิ่งมีอัตราส่วนการบีบอัดที่น้อยก็จะทำให้ขนาดไฟล์เล็กลงไปเรื่อย ๆ ดังนั้นหากพิจารณาในด้านการลดขนาดของไฟล์ อัลกอริทึม LZMA จึงมีประสิทธิภาพดีที่สุด จากผลการทดลองยังพบว่าอัลกอริทึม Huffman Coding มีอัตราส่วนการบีบอัดที่มีค่ามากที่สุดโดยค่าเฉลี่ย 106.39 % ทั้งในหมวดไฟล์ข้อมูล หมวดไฟล์รูปภาพ และหมวดไฟล์มัลติมีเดีย และเมื่อไฟล์มีขนาดใหญ่ ถ้าทำการบีบอัดไฟล์จะพบว่าขนาดไฟล์หลังจากบีบอัดจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นกว่าไฟล์ต้นฉบับ หรือขนาดไฟล์ลดลง

แต่ไม่มากนัก เพราะฉะนั้นอัลกอริทึม Huffman Coding จึงไม่ควรนำมาบีบอัดข้อมูลที่เน้นลดขนาดไฟล์ จากผลลัพธ์ในการวัดอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูลมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยเรื่อง The Application of LZMA Algorithm in ISCS Based on Pretreatment [4] ซึ่งได้นำการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูล โดยใช้การบีบอัดข้อมูลในระบบ IoT (Internet of Things) ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลจากฝั่งไคลเอนต์ และฝั่งเซิร์ฟเวอร์ของการขนส่งทางรถไฟเดิมเป็นแบบ XML มาเป็น JSON ซึ่งได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับบทความวิจัยฉบับนี้

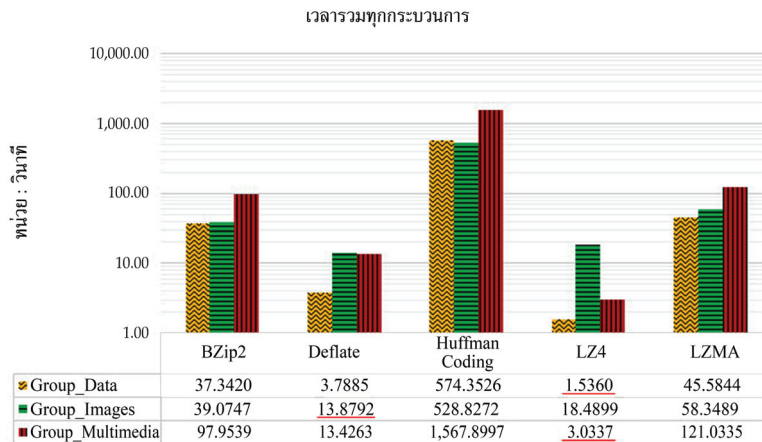
ตารางที่ 4 อัตราส่วนการบีบอัดข้อมูลแยกตามช่วงขนาดไฟล์ข้อมูล

ช่วงขนาดไฟล์	อัตราส่วนการบีบอัดข้อมูล (%)				
	LZMA	BZip2	Deflate	LZ4	Huffman Coding
1 - 5 KB	60.09	102.31	60.86	69.53	379.54
5 - 10 KB	74.03	81.35	74.21	79.42	124.56
10 - 50 KB	48.05	53.49	49.87	53.26	78.21
50 - 200 KB	76.73	79.76	77.75	80.30	97.37
200 - 500 KB	79.74	82.01	81.65	84.17	95.40
500 - 800 KB	95.06	96.37	95.77	96.90	100.23
800 - 1000 KB	76.94	78.37	80.47	84.46	94.43
1 - 5 MB	70.31	71.71	73.92	77.92	89.35
5 - 10 MB	75.86	79.83	82.16	86.79	91.82
10 - 50 MB	85.14	85.56	88.00	92.02	97.26
50 - 60 MB	89.37	88.83	92.65	98.13	98.65
60 - 70 MB	83.28	83.22	90.29	97.85	98.32
70 - 80 MB	89.81	85.39	91.65	98.28	98.25
80 - 100 MB	79.91	80.73	86.57	91.98	93.53
100 MB ขึ้นไป	83.61	83.47	89.55	97.42	98.17
ค่าเฉลี่ยรวม	77.86	82.16	81.02	85.90	115.67

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 แสดงอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูลโดยทำการแบ่งแยกตามขนาดช่วงไฟล์ 15 ช่วงไฟล์ พบว่าไฟล์ขนาด 1 กิโลไบต์ - 50 เมกะไบต์ อัลกอริทึม LZMA มีการบีบอัดข้อมูลได้มากกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ อัลกอริทึม LZMA สามารถบีบอัดไฟล์ข้อมูลที่มีเนื้อหาเป็นข้อความธรรมดา (Plain Text) ได้ดี โดยไฟล์ที่ใช้ในการทดลองมีเนื้อหาใกล้เคียงกัน จึงทำให้การบีบอัดด้วยอัลกอริทึม LZMA จึงมีขนาดเล็กที่สุด เมื่อขนาดของไฟล์มีขนาดมากกว่า 50 เมกะไบต์ กลับพบว่าอัลกอริทึม BZip2 มีการบีบอัดข้อมูลได้มากกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ แต่เมื่อดูค่าเฉลี่ยรวมที่มีอัตราส่วนการบีบอัดดีที่สุด เป็นอัลกอริทึม LZMA ที่มีค่าเฉลี่ยรวมดีที่สุดที่ 77.86%

4. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเวลารวมทุกกระบวนการ (Overall Time)

การวัดเวลารวมทุกกระบวนการทำงาน (Overall Time) โดยจะวัดประสิทธิภาพการทำงาน ตั้งแต่เริ่มต้นการบีบอัดข้อมูล การรับ-ส่งข้อมูลส่งผ่านเว็บแอปพลิเคชัน จนถึงขั้นตอนการคลายข้อมูล



รูปที่ 3 ความเร็วรวมทุกกระบวนการเริ่มบีบอัดข้อมูลจนถึงกระบวนการคลายข้อมูล

จากผลการทดลองในรูปที่ 3 พบว่า อัลกอริทึม LZ4 มีค่าเฉลี่ย Overall Time น้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย 7.6865 วินาที และพบว่าในหมวดไฟล์ข้อมูลโดยเฉลี่ย 1.5360 วินาที และหมวดไฟล์มัลติมีเดียโดยเฉลี่ย 3.0337 วินาที แต่พบว่าในหมวดไฟล์รูปภาพ อัลกอริทึมที่มีค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุดคือ อัลกอริทึม Deflate โดยเฉลี่ย 13.8792 วินาที เมื่อดูค่า Overall Time โดยเฉลี่ยรวมทั้งหมดกลับพบว่า อัลกอริทึม LZ4 มีค่าเฉลี่ย Overall Time น้อยที่สุด ทำให้การส่งข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพและมีความเร็วเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 3 จะพบว่าอัลกอริทึม LZMA จะมีอัตราส่วนการบีบอัดที่ดีที่สุด แต่เมื่อเทียบประสิทธิภาพรวมทุกกระบวนการ อัลกอริทึม LZMA ยังเป็นรองอัลกอริทึม LZ4 อยู่มาก จากรูปที่ 3 จะพบว่าอัตราส่วนเฉลี่ยค่า Overall Time อัลกอริทึม LZ4 จะมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า อัลกอริทึม LZMA โดยเฉลี่ย 63.4977 วินาที จากผลลัพธ์ในการทดสอบยังมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยเรื่อง Data Compression Device Based on Modified LZ4 Algorithm [13] ซึ่งได้นำการบีบอัดข้อมูลมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและอายุการใช้งานใน Solid State Drive (SSD) ทำให้มีอัตราการอ่านเขียนข้อมูลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับบทความวิจัยฉบับนี้

การอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัลกอริทึมการบีบอัดแบบไม่สูญเสียข้อมูลเพื่อลดขนาดไฟล์ข้อมูลให้เล็กลงก่อนทำการส่งไฟล์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยใช้อัลกอริทึมการบีบอัดจำนวน 5 อัลกอริทึม ได้แก่ Huffman Coding, Deflate, BZip2, LZMA, และ LZ4 จะเห็นว่าอัลกอริทึม Huffman Coding มีรูปแบบการบีบอัดเป็นการนำตัวอักษรมาไล่เรียงเป็นแบบต้นไม้ (Binary Tree) เมื่อไฟล์มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ เวลาที่ใช้ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงทำให้มีความเร็วลดลง อัลกอริทึม BZip2 และ

LZMA เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนามาจากอัลกอริทึม LZ77 ซึ่งมีรูปแบบเป็นการระบุสัญลักษณ์ที่ซ้ำกันแทนด้วยชุดตัวอักษรที่เป็นสัญลักษณ์และตัวเลข ทำให้พื้นที่ในการจัดเก็บหลังการบีบอัดมีขนาดเล็กลง จึงทำให้อัลกอริทึม LZMA และ BZip2 มีอัตราส่วนในการบีบอัดที่ดีที่สุดตามลำดับ ยิ่งชุดข้อมูลมีเนื้อหาที่ใกล้เคียงกันอัตราส่วนการบีบอัดก็จะสูงตามไปด้วย อัลกอริทึม Deflate เป็นอัลกอริทึมที่รวมการทำงานของอัลกอริทึม Huffman Coding กับอัลกอริทึม LZ77 โดยมีขนาดบิตในการจัดเก็บข้อมูลเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีความเร็วในการบีบอัดและคลายข้อมูลที่เร็วกว่าอัลกอริทึม Huffman Coding, BZip2, และ LZMA แต่พบว่าอัตราส่วนการบีบอัดยังเป็นรองอัลกอริทึม LZMA และ BZip2 อัลกอริทึม LZ4 เป็นอัลกอริทึมที่มุ่งเน้นความเร็วของการบีบอัดและถอดรหัสข้อมูล โดยการค้นหาคำที่มีเนื้อหาซ้ำซ้อนกันและจะใช้ Hash Table เข้ามาช่วยในการจัดเก็บและค้นหาข้อมูล ทำให้มีความรวดเร็วกว่ารูปแบบต้นไม้ ส่งผลให้อัลกอริทึม LZ4 มีความเร็วในการบีบอัด และความเร็วในการคลายข้อมูลได้ดีที่สุด

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อพิจารณาจาก Compression Ratio, Compression Time, Decompress Time, และ Overall Time พบว่าการใช้การบีบอัดข้อมูลโดยใช้อัลกอริทึมแบบ LZ4 ได้ผลลัพธ์ที่ดีในด้านความเร็วในการบีบอัด ความเร็วในการคลายข้อมูล และความเร็วรวมทุกกระบวนการที่มีความเร็วทั้งในหมวดไฟล์เอกสาร ไฟล์รูปภาพ และไฟล์มัลติมีเดีย จึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการบีบอัดข้อมูลและรับ-ส่งข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน อัลกอริทึม Huffman Coding ไม่ควรนำมาพิจารณาในการบีบอัดข้อมูล จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในด้านความเร็วของการบีบอัดและการคลายข้อมูลใช้เวลานาน และเมื่อไฟล์มีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 10 เมกะไบต์ขึ้นไป เวลาที่ใช้ในการบีบอัดและคลายข้อมูลจะมากกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ อย่างมาก ถ้าหากพิจารณาอัลกอริทึมบีบอัดข้อมูลที่เน้นเรื่องการลดขนาดพื้นที่การจัดเก็บไฟล์ พื้นที่ในการสำรองไฟล์ อัลกอริทึม LZMA จะเหมาะสมกับวิธีการนี้เป็นที่สุด

References

- [1] Silawong, C. and Anusasamornkul, T. (2013). A Comparative Study of Compression Algorithms for Each Data Type. In **2013 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC 2013)**. pp. 435-440
- [2] Pranveerit, S. and Chanchio, K. (2016). The Performance Analysis of Compression Techniques for Thread-Based Live Migration of Virtual Machine. In **ICMSIT 2016: International Conference on Management Science, Innovation, and Technology**. Faculty of Management Science, Suan Sunandha Rajabhat University. pp. 103-114
- [3] Uthayakumar, J., Vengattaraman, T., and Dhavachelvan, P. (2019). A New Lossless Neighborhood Indexing Sequence (NIS) Algorithm for Data Compression in Wireless Sensor Networks. **Ad Hoc Networks**. Vol. 83, pp. 149-157. DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.09.009

- [4] Xudong, X. and Yiran, L. (2018). The Application of LZMA Algorithm in ISCS Based on Pretreatment. In **2018 5th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)**. pp. 521-525. DOI: 10.1109/ICSAI.2018.8599491
- [5] Uthayakumar, J. and Vengattaraman, T. (2018). Performance Evaluation of Lossless Compression Techniques: An Application of Satellite Images. In **2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)**. pp. 750-754. DOI: 10.1109/ICECA.2018.8474759
- [6] Arshad, R., Saleem, A., and Khan, D. (2016). Performance Comparison of Huffman Coding and Double Huffman Coding. In **2016 Sixth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH)**. pp. 361-364. DOI: 10.1109/INTECH.2016.7845058
- [7] Tariq, Z. B., Arshad, N., and Nabeel, M. (2015). Enhanced LZMA and BZIP2 for Improved Energy Data Compression. In **2015 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)**. pp. 1-8. DOI:10.5220/0005454202560263
- [8] Harnik, D., Khaitzin, E., Sotnikov, D., and Taharlev, S. (2014). A Fast Implementation of Deflate. **Data Compression Conference**. pp. 223-232. DOI:10.1109/DCC.2014.66
- [9] Lan, C., Xu, J., Wenjun, Z., and Wu, F. (2015). Compound Image Compression Using Lossless and Lossy LZMA in HEVC. In **2015 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)**. pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICME.2015.7177430
- [10] Zhou, B., Jin, H., and Zheng, R. (2014). A High Speed Lossless Compression Algorithm Based on CPU and GPU Hybrid Platform. In **2014 IEEE 13th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications**. pp. 693-698. DOI: 10.1109/TrustCom.2014.90
- [11] Zhu, W., Xu, J., Ding, W., Shi, Y., and Yin, B. (2013). Adaptive LZMA-Based Coding for Screen Content. In **2013 Picture Coding Symposium (PCS)**. pp. 373-376. DOI: 10.1109/PCS.2013.6737761
- [12] Sundaresan, M. and Devika, E. (2012). Image Compression Using H.264 and Deflate Algorithm. In **International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Medical Engineering (PRIME-2012)**. pp. 242-245. DOI: 10.1109/ICPRIME.2012.6208351
- [13] Liu, W., Mei, F., Wang, C., O'Neill, M., and Swartzlander, E. E. (2018). Data Compression Device Based on Modified LZ4 Algorithm. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. Vol. 64, Issue 1, pp. 110-117. DOI: 10.1109/TCE.2018.2810480
- [14] Li, H., Tuo, X., Shen, T., Henderson, M. J., Courtois, J., and Yan, M. (2017). An Improved Lossless Group Compression Algorithm for Seismic Data in SEG-Y and MiniSEED File Formats. **Computers & Geosciences**. Vol. 100, pp. 41-45. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.11.017
- [15] Preet, S. and Bagga, A. (2018). Lempel-Ziv-Oberhumer: A Critical Evaluation of Lossless Algorithm and Its Applications. In **2018 4th International Conference on Computing Sciences (ICCS)**. pp.175-182. DOI:10.1109/ICCS.2018.00036

เทคนิคการคัดเลือกกลุ่มโหลดยาอาคารสำหรับรองรับแผนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อเพิ่มค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า

Load Clustering Technique Application to PV Solar Rooftop Installation Planning for Improving Energy Efficiency Index

ธงชัย คล้ายคลึง^{1*} วุฒิชัย สง่างาม¹ กิตติวงศ์ สุธรรมโน¹ และพันธ์พงศ์ อภิชิตกุล¹
Thongchai Klayklung^{1*} Wutthichai Sa-nga-ngam¹ Kittiwong Suthamno¹ and
Phangphong Aphichatkul¹

Received: May 18, 2020; Revised: July 22, 2020; Accepted: August 3, 2020

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอวิธีการคัดเลือกกลุ่มโหลดยาอาคารเพื่อรองรับแผนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาภายในศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน โดยพิจารณา กลุ่มโหลดยาอาคารที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงต่อเนื่องช่วงกลางวันที่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายอาคารได้จาก เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัล 34 อาคารเป้าหมาย วิเคราะห์การจัดกลุ่มโหลดยาตามวิธี K-Means Clustering ด้วยโปรแกรม SPSS ผลการวิเคราะห์พบว่า จัดแบ่งกลุ่มโหลดยาอาคารได้จำนวน 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 ใช้ไฟในปริมาณน้อย มีลักษณะกราฟการใช้ไฟเปลี่ยนแปลงสูง มีค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าต่ำ กลุ่มที่ 2 ใช้ไฟปานกลางและต่อเนื่อง กราฟการใช้ไฟเปลี่ยนแปลงน้อย มีค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าสูง และกลุ่มที่ 3 ใช้ไฟในปริมาณมากโดยเฉพาะช่วงเวลากลางวัน มีค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น กลุ่มที่ 3 จำนวน 19 อาคารมีความเหมาะสมและจัดอยู่ในแผนรองรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ซึ่งจะช่วยให้ลดค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และทำให้ดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นได้

คำสำคัญ : การคัดเลือกกลุ่มโหลดยา; วิธี K-Means Clustering; ดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author E - mail Address: thongchai.ky@rmu.ac.th

Abstract

This research paper presents to load clustering technique application to PV Solar rooftop installation planning at the center of Rajamangala University of Technology Isan. By considering the building load profile that has high continuous power consumption during the day which can improve the load factor which is the energy efficiency index to be higher. We collect the daily load profile of the 34 target buildings from the digital power meter and analyze of the load clustering by K-Means Clustering technic using the SPSS program. The results showed that load clustering can be divided into 3 groups. The first group, all buildings have low power consumption but high deviations of the load profile, low load factor level. The second group, Medium power consumption and minimize deviations of the load profile, high load factor. The third group, High power consumption, especially during the daytime, low load factor level. Therefore, Group 3 consist of 19 buildings has appropriate and setup to the plan for installation of PV solar rooftop. This will reduce the peak load demand from the Provincial Electricity Authority's system, can improve the energy efficiency index.

Keywords: Load Clustering; K-Means Clustering Method; Energy Efficiency Index

บทนำ

ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนได้รับความสนใจและเป็นที่นิยมกันทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคยุโรป ตะวันออกกลาง และแอฟริกา (EMEA) ที่มีการลงทุนและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2004 [1] ประเทศสหรัฐอเมริกาให้ความสนใจอย่างแพร่หลายเช่นกัน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2008 [2] เป็นต้นมา ส่วนในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก (APAC) ได้รับความนิยมสูงขึ้นเป็นลำดับมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2007 [1] ซึ่งในปัจจุบันนี้พอสรุปได้ว่าประเทศที่ให้ความสนใจและเป็นผู้นำในด้านการติดตั้งระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นได้แก่ประเทศจีน เยอรมัน ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และอิตาลี ตามลำดับ [2]

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิประเทศที่มีศักยภาพสูงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีค่าความเข้มพลังงานแสงอาทิตย์สูง ซึ่งมีค่ามากกว่าประเทศเยอรมันถึง 70 เปอร์เซ็นต์ แต่มีการนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าน้อยกว่าประเทศเยอรมันอยู่มาก แต่อย่างไรก็ตามประเทศไทยก็ได้ให้ความสนใจและมีการติดตั้งเพิ่มขึ้นเป็นลำดับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 เป็นต้นมา โดยปัจจุบันได้มีการติดตั้งไปแล้วถึง 3,000 เมกะวัตต์ ในขณะที่ประเทศเยอรมันติดตั้งไปแล้วถึง 40,000 เมกะวัตต์ [3]

เหตุผลที่นานาประเทศให้ความสนใจการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้น สืบเนื่องจากวิกฤตการณ์ด้านพลังงานฟอสซิลและภาวะโลกร้อน อีกทั้งยังมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น เป็นพลังงานที่สะอาด ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดการใช้พลังงานฟอสซิล และต้นทุนที่มีแนวโน้มลดลง ถึงแม้จะยังมีข้อด้อยในด้านความไม่สม่ำเสมอของแสงอาทิตย์และข้อจำกัดที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในเฉพาะช่วงเวลากลางวันก็ตาม

บทความนี้ต้องการนำเสนอเทคนิควิธีการคัดเลือกกลุ่มโหนดในแต่ละอาคารที่มีความเหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กรณีที่ติดตั้งบนหลังคาของอาคารในศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา เพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารที่ผ่านการคัดเลือกการจัดกลุ่มแล้วนั้น มีค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีผู้ใช้ไฟในอัตราค่าไฟฟ้าแบบอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate; TOU) ดังนำเสนอในบทความนี้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคา

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคา (Solar PV Rooftop) หมายถึงระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านพักอาศัย โรงงาน หรืออาคารต่าง ๆ โดยแบ่งรูปแบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้ 3 ระบบ ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ (Stand Alone or Off Grid System) เป็นระบบที่ผลิตไฟฟ้าแล้วไม่ได้เชื่อมต่อเข้าระบบของการไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้ทั้งระบบที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับ และจะจัดเก็บลงแบตเตอรี่หรือไม่ก็ได้ ระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายของการไฟฟ้า (Grid Connected or On Grid System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่จะต้องแปลงไฟฟ้าที่ผลิตได้ด้วยอินเวอร์เตอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าเพื่อการจำหน่ายหรือการผลิตเพื่อใช้เอง ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าก็ได้ และสุดท้ายคือระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสม (Hybrid System) เป็นระบบการผลิตไฟฟ้าที่นำเอาระบบแบบอิสระและแบบเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายของการไฟฟ้ามารวมกัน ซึ่งจะทำให้สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าลงแบตเตอรี่แล้วนำมาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอินเวอร์เตอร์ (Hybrid Inverter) เพื่อจ่ายโหลดในอาคารและเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าด้วย [4] - [5] ซึ่งบทความนี้จะนำเสนอเฉพาะรูปแบบการผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายของการไฟฟ้าเท่านั้น โดยจะนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวัน (Daily Load Profile) ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละอาคารมาคัดแยกและเลือกเฉพาะอาคารที่มีรูปแบบข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ในกลุ่มที่สามารถเพิ่มค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

2. การจัดกลุ่มโหนด (Load Clustering)

การจัดกลุ่มโหนดในบทความนี้ได้ทำการนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวันของอาคารทั้งหมดมาทำการจัดแบ่งกลุ่มตามจุดเด่นและลักษณะเฉพาะของข้อมูลที่คล้ายกัน ซึ่งวิธีการจัดกลุ่มนั้นจะมีหลายวิธีการ เช่น K-Means, Fuzzy C-Mean (FCM), Self-Hierarchical, Two-Step Fuzzy Possibility C-Means (FPCM) เป็นต้น [6] - [8] บทความนี้เลือกใช้วิธีการคัดเลือกกลุ่มโหนดด้วยวิธี K-Means Clustering เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสมกับจำนวนข้อมูลที่น่ามาใช้ในบทความนี้ แต่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถปรับจำนวนกลุ่มได้ สามารถใช้กับข้อมูลจำนวนมากได้ ถึงแม้จะมีจุดด้อยในประเด็นที่ผู้วิเคราะห์จะต้องช่วยกำหนดจำนวนกลุ่มที่ต้องการเลือกไว้ล่วงหน้าก่อนและประเด็นที่มีความอ่อนไหวในข้อมูลที่แตกต่างไปจากเพื่อนหรือบางข้อมูลที่เป็นขยะ [9]

2.1 วิธีการของ K-Means Clustering

วิธีการจัดกลุ่มนี้จะเริ่มต้นด้วยการจัดแบ่งข้อมูลออกเป็น K กลุ่ม โดยแทนแต่ละกลุ่มด้วยค่าเฉลี่ยของกลุ่มซึ่งใช้สำหรับเป็นจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูลและจากนั้นจะใช้ในการวัดระยะทางของแต่ละข้อมูลในกลุ่มเดียวกันในขั้นแรกของการจัดกลุ่ม โดยการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลจะต้องกำหนดจำนวนกลุ่ม (K) ตามที่ต้องการก่อน และกำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้นจำนวน K จุด ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างกลุ่มข้อมูลและความสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางที่ใกล้มากที่สุด โดยแต่ละจุดจะถูกกำหนดไปยังจุดศูนย์กลางที่ใกล้เคียงที่สุด โดยกระทำไปจนครบหมดทุกจุด และจากนั้นจึงคำนวณจุดศูนย์กลางใหม่โดยการหาค่าเฉลี่ยทุกข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มนั้น หากจุดศูนย์กลางในแต่ละกลุ่มถูกเปลี่ยนตำแหน่ง จะได้จุดที่มีความสัมพันธ์กับกลุ่มใหม่และใกล้กับจุดศูนย์กลางใหม่นั้น ๆ ซึ่งกระบวนการนี้จะกระทำซ้ำเดิมแบบนี้ไปเรื่อย ๆ โดยผลลัพธ์จากการทำซ้ำนี้จะทำให้จุดศูนย์กลางเปลี่ยนตำแหน่งไปในทุกรอบ จนกระทั่งจุดศูนย์กลางนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงจะถือว่าสิ้นสุดกระบวนการจัดกลุ่มด้วยวิธีการของ K-Means ดังกล่าวนี้

2.2 การจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Data Pre-Processing)

ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอาคาร ได้จากเครื่องวัดที่ติดตั้งในตู้จ่ายไฟฟ้าของอาคารนั้น ๆ (รายละเอียดในหัวข้อ 3.2) ซึ่งจะบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทุก ๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลเหล่านั้นเข้าสู่กระบวนการจัดกลุ่มจะต้องตรวจสอบหรือกำจัดข้อมูลที่เกิดผิดพลาดก่อนเสมอ การจัดการข้อมูลที่ยอมรับกันคือการทำบรรทัดฐานข้อมูล (Data Normalization) เพื่อให้ทุกข้อมูลอยู่ในช่วงเดียวกันหรือมีค่าเป็นหนึ่งเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ (1) ซึ่งจะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ผ่านการบรรทัดฐานแล้ว (X_l) จะได้จากการนำค่ากำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาใด ๆ (X_{li}) ที่พิจารณาหารด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในวันที่พิจารณาของอาคารนั้น (X_{max})

$$X_l = \frac{X_{li}}{X_{max}} \quad (1)$$

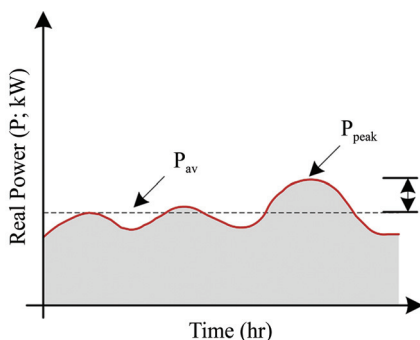
3. ครรชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า

เนื่องด้วยบทความนี้ต้องการคัดเลือกกลุ่มโหนดของอาคารที่เหมาะสมเพื่อรองรับแผนงานการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ดังนั้นครรชนีที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า จึงได้เลือกใช้ค่าครรชนีตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า (Load Factor; LF) ซึ่งเป็นค่าครรชนีที่แสดงถึงความสม่ำเสมอในการใช้ไฟฟ้าในแต่ละอาคารตลอด 24 ชั่วโมง โดยคำนวณได้จากสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P_{av}) ต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในวันที่พิจารณา (P_{peak}) ดังสมการที่ (2)

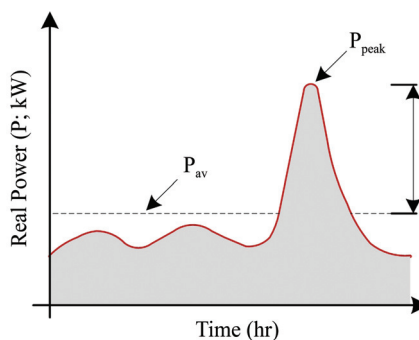
$$LF = \left(\frac{P_{av}}{P_{peak}} \right) \times 100 \quad (2)$$

ความสำคัญของค่าครรชนีตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าที่เลือกมาใช้นั้นจะอธิบายได้ดังนี้ กรณีมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่ใกล้เคียงกันตลอด 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 1(ก) ค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าจะมีค่าสูง ซึ่งจะสะท้อนถึงการใช้พลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงในอาคารนั้น ๆ ในทางตรงกันข้ามหากมีการใช้

พลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันมากในแต่ละช่วงเวลาดังรูปที่ 1(ข) จะทำให้ค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้ามีค่าต่ำ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการใช้ไฟฟ้าที่ขาดประสิทธิภาพ เนื่องจากระบบต้นกำลังการผลิตหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า จะต้องมีการสำรองพลังงานไฟฟ้ามากเพื่อให้ใช้อย่างเพียงพอในกรณีที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมาก



(ก) LF มีค่าสูง



(ข) LF มีค่าต่ำ

รูปที่ 1 เปรียบเทียบดัชนีตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า (LF)

4. กรณีศึกษา

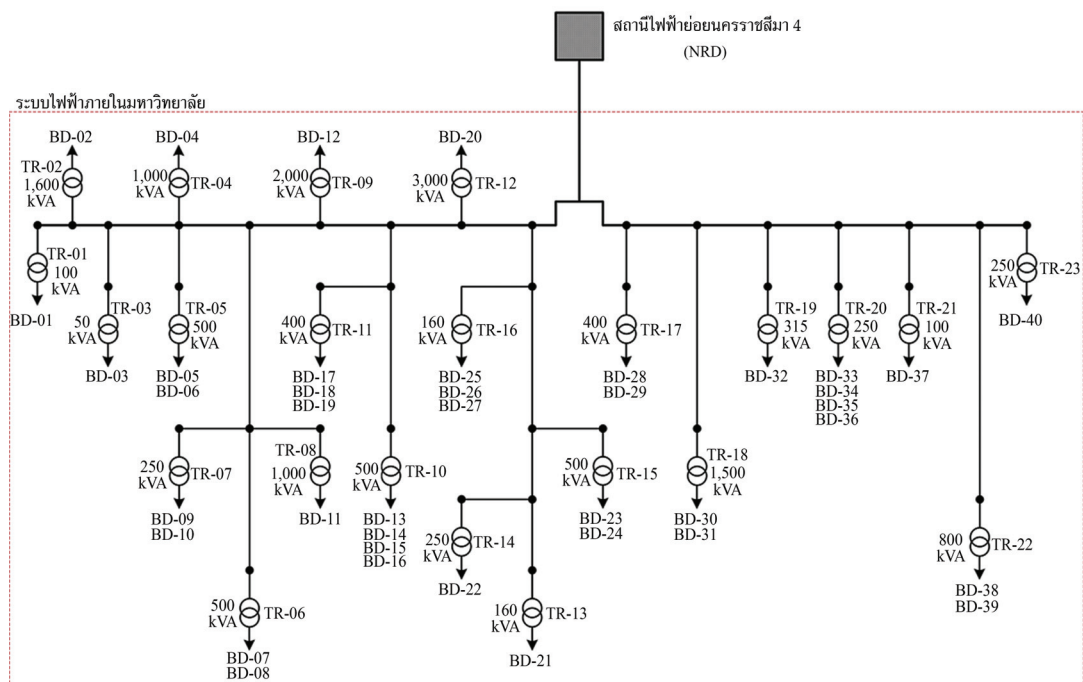
บทความนี้เลือกใช้กรณีศึกษาของอาคารต่าง ๆ ในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา เนื่องด้วยมหาวิทยาลัยได้ติดตั้งระบบเครือข่ายการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าและมีข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวันของอาคารต่าง ๆ อยู่แล้ว และที่สำคัญมหาวิทยาลัยยังได้มีแนวคิดในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง (Peak Load) เนื่องจากมีความจำเป็นต้องจัดการเรียนการสอนในช่วงเวลากลางวัน ประกอบกับมหาวิทยาลัยจัดอยู่ในกลุ่มผู้ใช้ไฟในอัตราตามเวลาของการใช้ (Time of Use Rate; TOU) ประเภทกิจการขนาดใหญ่อัตรา 40 ดังนั้น การหาแนวทางการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันด้วยระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นและเหมาะสม แต่จะต้องมีขั้นตอนและวิธีการในการคัดเลือกอาคารที่มีข้อมูลพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวันอันจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้

4.1 ข้อมูลการใช้พลังงานและระบบไฟฟ้า

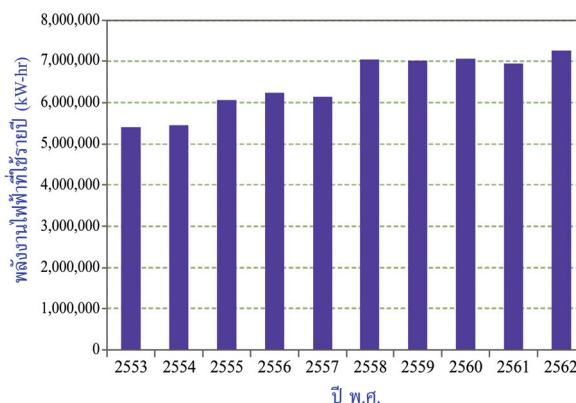
พื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยมีทั้งหมด 330 ไร่ หรือประมาณ 0.54 ตารางกิโลเมตร มีอาคารต่าง ๆ กระจายเต็มพื้นที่ตามวัตถุประสงค์การใช้งานของแต่ละอาคาร โดยรับไฟจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในระดับแรงดันปานกลาง 22 กิโลโวลต์ ผ่านมิเตอร์ชนิดอ่านค่าอัตโนมัติ (Automatic Meter Reading; AMR) เพื่อวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยจำนวน 1 เครื่อง จากนั้นระบบไฟฟ้าจะถูกจ่ายไปยังอาคารต่าง ๆ ในระบบสายเหนือดิน (Overhead Line) โดยมีหม้อแปลงไฟฟ้า 22,000/400 - 230 โวลต์ รวมทั้งหมดจำนวน 23 เครื่อง และมีกำลังไฟฟ้าติดตั้งรวมทั้งหมดเท่ากับ 15,585 กิโลโวลต์-แอมป์ ดังรูปที่ 2

ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา มีสถิติการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปี (หน่วย กิโลวัตต์-ชั่วโมง; kW-hr) ย้อนหลังเป็นเวลา 10 ปี พบว่ามีสถิติการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องดังรูปที่ 3(ก) เมื่อพิจารณาข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของ

แต่ละปีที่พิจารณาทั้งหมด 10 ปีดังกล่าวนี้ พบว่าช่วงเดือนตุลาคม - กุมภาพันธ์ของทุกปีจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุดเนื่องจากเป็นช่วงฤดูหนาว ช่วงของเดือนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงอย่างต่อเนื่องกันมากที่สุด ได้แก่ ช่วงเดือนมิถุนายน - กันยายน ซึ่งตรงกับช่วงฤดูฝนและเป็นช่วงภาคเรียนที่ 1 ของทุก ๆ ปี ที่พิจารณา ส่วนเดือนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้แก่เดือนมีนาคมซึ่งตรงกับการเริ่มต้นของฤดูร้อน และยังมีภาระการเรียนการสอนในภาคเรียนที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมนั้นมีปัจจัยของฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง รายละเอียดดังรูปที่ 3(ข) โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละเครื่องนั้นจ่ายไฟให้กับแต่ละอาคาร รายละเอียดดังรูปที่ 4

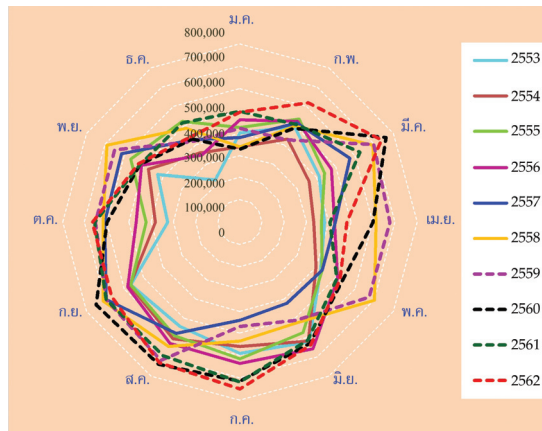


รูปที่ 2 แผนผังสายจำหน่ายไฟฟ้า ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



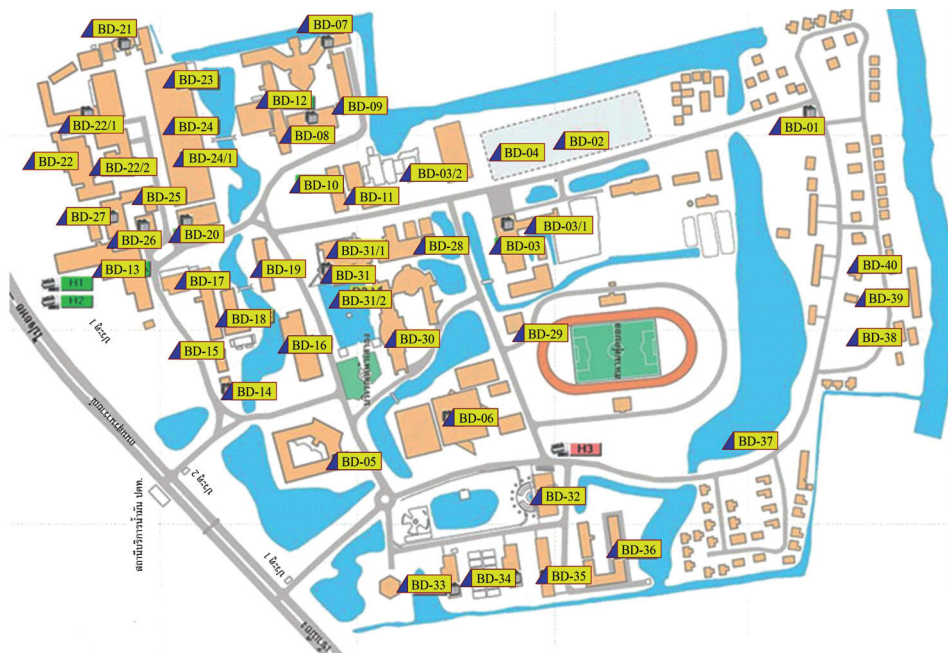
(ก) รายปี

รูปที่ 3 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลัง 10 ปี (หน่วย; กิโลวัตต์-ชั่วโมง)



(ข) รายเดือน

รูปที่ 3 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลัง 10 ปี (หน่วย; กิโลวัตต์-ชั่วโมง) (ต่อ)

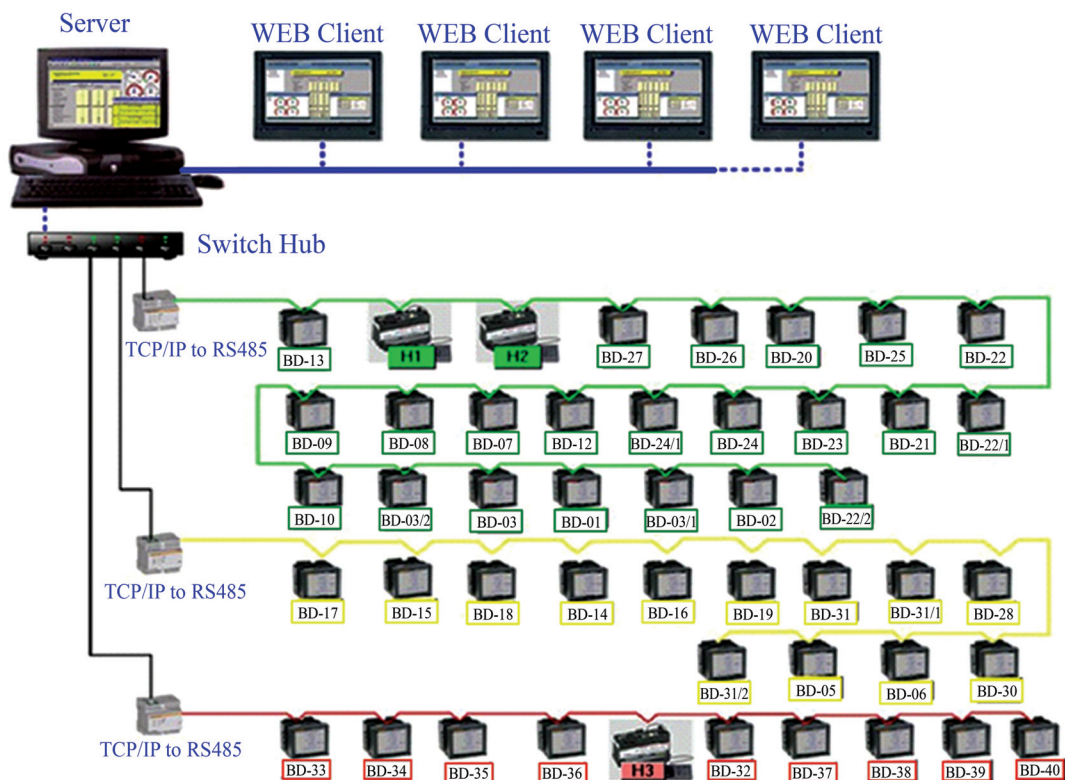


BD-01 กลุ่มบ้านพักอาจารย์ด้านทิศตะวันออก	BD-14 อาคารประชาสัมพันธ์	BD-27 อาคารวิศวกรรมเครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
BD-02 อาคารปฏิบัติการคณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์	BD-15 อาคารปฏิบัติการปฐพีศาสตร์	BD-28 อาคารเรียนสาขอกองแบบอุตสาหกรรม
BD-03 อาคารวิศวกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร	BD-16 อาคารโรงอาหารกลาง	BD-29 สนามฟุตบอลและอิมจริย์
BD-03/1 อาคารวิศวกรรมพลังงานเกี่ยวกับ	BD-17 อาคารเรียนรวมวิศวกรรมโยธา	BD-30 อาคารเรียนรวมคณะบริหารธุรกิจ
BD-03/2 อาคารแผนกยานพาหนะ	BD-18 อาคารปฏิบัติการประลอง	BD-31 อาคารห้องสมุด
BD-04 อาคารเรียนรวมคณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์	BD-19 อาคารสถาบันวิจัยและพัฒนา	BD-31/1 อาคารสำนักวิทยบริการ
BD-05 สำนักงานอธิการบดี	BD-20 อาคารเรียนรวมคณะวิศวกรรมศาสตร์	BD-32 อาคารกองพัฒนานักศึกษา
BD-06 อาคารอนุกรมประสงศ์ (โรงพิมพ์)	BD-21 อาคารเรียนวิศวกรรมเครื่องกล	BD-33 อาคารหอพักครูคนาวาสี
BD-07 อาคารเรียนรวมสถาปัตยกรรมศาสตร์	BD-22 อาคารเรียนวิศวกรรมวัสดุ	BD-34 อาคารหอพักนักศึกษาคณะ
BD-08 สำนักงานสภและสถาบันบริการวิชาการ (USI)	BD-22/1 อาคารทดสอบเครื่องจักรกลหนัก	BD-35 อาคารหอพักพัฒนาศรม
BD-09 สำนักงานศูนย์เผยแพร่วิชาการมหาวิทยาลัย (UBI)	BD-22/2 อาคารทดสอบวัสดุ	BD-36 อาคารแฟลตบุคลากร 40 หน่วย (เก่า)
BD-10 อาคารเรียนและสำนักงานคณะศิลปกรรมศาสตร์	BD-23 อาคารโรงฝึกงานช่างยนต์	BD-37 กลุ่มบ้านพักอาจารย์ด้านทิศตะวันตก
BD-11 อาคารปฏิบัติการคณะศิลปกรรมศาสตร์	BD-24 อาคารโรงฝึกงานช่างกลโรงงาน+โรงงานแม่พิมพ์	BD-38 อาคารหอพักนักศึกษหญิง
BD-12 อาคารหอประชุม วิทยาลัย ณ ตลาด	BD-25 อาคารเรียนวิศวกรรมอุตสาหกรรม	BD-39 อาคารหอพักนักศึกษชาย
BD-13 อาคารเรียนรวมวิศวกรรมไฟฟ้า	BD-26 อาคารสำนักงานวิทยาลัยนวัตกรรม	BD-40 อาคารแฟลตบุคลากร 40 หน่วย (ใหม่)

รูปที่ 4 ตำแหน่งและรายชื่ออาคารที่ติดตั้งเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัล

4.2 การตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้ารายอาคาร

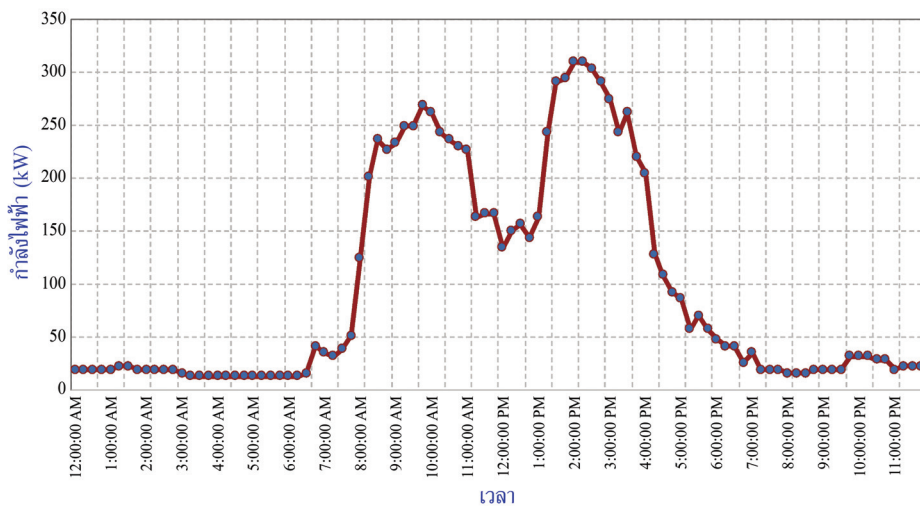
ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอาคารได้จากศูนย์กลางการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า มทร.อีสาน ซึ่งได้ติดตั้งเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัลจำนวน 47 เครื่อง แบ่งเป็น ประเภทตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในระบบ 22 กิโลโวลต์ จำนวน 3 เครื่อง ได้แก่ H1 H2 และ H3 ตามลำดับ และประเภทตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในระบบแรงดันต่ำ 380/230 โวลต์ของแต่ละอาคาร จำนวน 47 อาคาร โดยมีการกำหนดให้เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้านั้นบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าทุก 5 นาทีลงในหน่วยความจำของเครื่องวัด จากนั้นโปรแกรมบริหารจัดการระบบการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าจะดาวน์โหลดข้อมูลจากเครื่องวัดเหล่านั้นผ่านเครือข่ายในระบบมาตรฐานการสื่อสารแบบ RS-485 ซึ่งถูกจัดแบ่งออกเป็น 3 เครือข่ายย่อย ประกอบด้วยสัญลักษณ์เครื่องวัดสีเขียว สีเหลือง และสีชมพู ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อาคารที่ติดตั้งเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัล (44 อาคาร)

4.3 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวัน

จากจำนวนเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.2 นั้น ในบทความนี้จะไม่พิจารณาเครื่องวัดในระบบสายจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ส่วนเครื่องวัดในบางอาคารที่ไม่สามารถส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้าในเครือข่ายได้ เนื่องจากปัจจุบันมีการก่อสร้างอาคารเพิ่มเติมในพื้นที่ของมหาวิทยาลัย ส่งผลให้สายสัญญาณของระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าเกิดความชำรุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องใช้วิธีการนำเครื่องคอมพิวเตอร์ไปเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุดกับเครื่องวัดของอาคารดังกล่าวเพื่อดาวน์โหลดข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 6 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของอาคารเรียนรวมวิศวกรรมไฟฟ้า (BD-13)

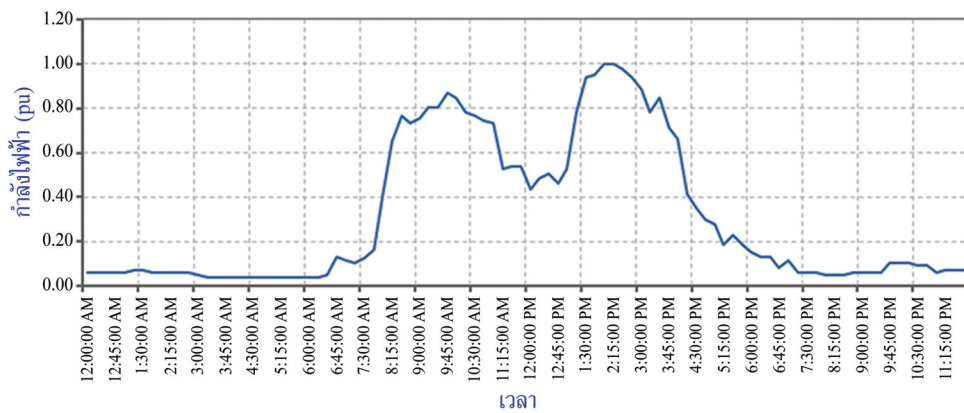
อย่างไรก็ตาม ยังมีเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าจำนวน 13 เครื่อง ที่ไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้เนื่องจากเกิดการชำรุด การรื้อถอนเนื่องจากการสร้างอาคารหลังใหม่ ดังนั้นจึงมีข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่พร้อมในการวิเคราะห์เพียงจำนวน 34 อาคาร โดยคณะผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในวันทำงานที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 มีรายละเอียดการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นข้อมูลของอาคารเรียนรวมวิศวกรรมไฟฟ้า (BD-13) ส่วนอาคารอื่น ๆ อีกจำนวน 33 อาคาร มีข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกันไป แต่ไม่ได้นำเสนอไว้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลมีเป็นจำนวนมาก

ผลการวิเคราะห์

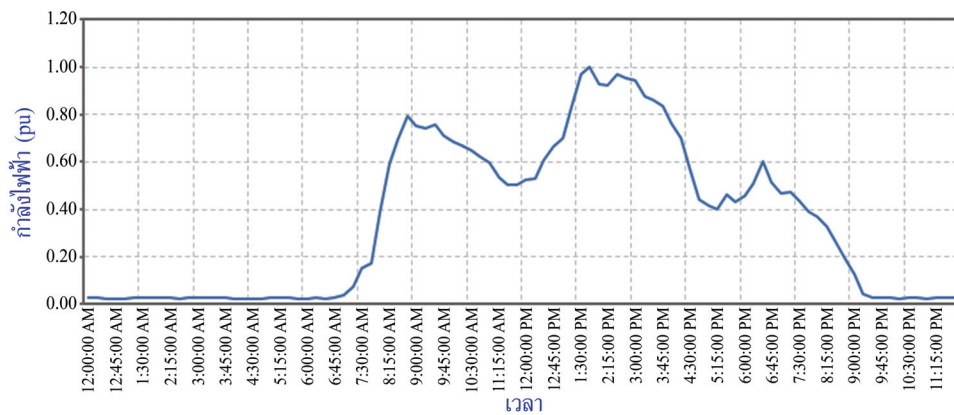
หลังจากได้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 34 อาคารเป้าหมาย ดังที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.3 แล้ว จากนั้นจะนำข้อมูลดังกล่าวมาเข้าสู่กระบวนการทำบรรทัดฐานข้อมูล เพื่อที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการจัดกลุ่มโหนดตามวิธี K-Means หลังจากนั้นจะได้ผลลัพธ์จำนวนกลุ่มของลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้า และพิจารณาเลือกอาคารที่มีความเหมาะสมในการเพิ่มค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยประเมินจากค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า รายละเอียดดังนี้

1. ค่าบรรทัดฐานข้อมูล (Data Normalization)

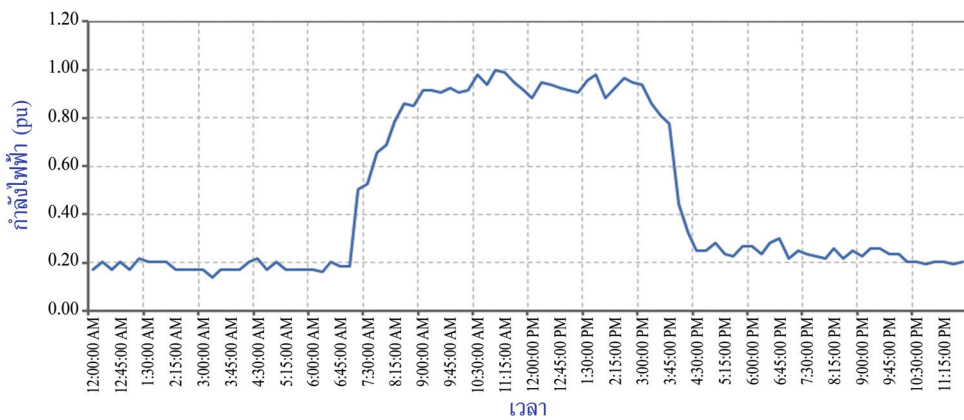
เพื่อต้องการให้ลดความแตกต่างของปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละอาคารที่พิจารณา จึงจำเป็นต้องทำให้ปริมาณการใช้พลังงานนั้นอยู่ในรูปของค่าหนึ่งหน่วย (Per-Unit) ตามสมการที่ (1) ดังนั้นทุกอาคารที่พิจารณาจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากันแต่จะแตกต่างกันที่ลักษณะรูปร่างของการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาในรอบหนึ่งวันดังรูปที่ 7 ส่วนอาคารอื่น ๆ อีกจำนวน 30 อาคาร ที่ผ่านการทำบรรทัดฐานข้อมูลแล้วจะมีลักษณะกราฟที่แตกต่างกันออกไปซึ่งไม่ได้นำเสนอไว้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลมีเป็นจำนวนมาก



(ก) BD-13

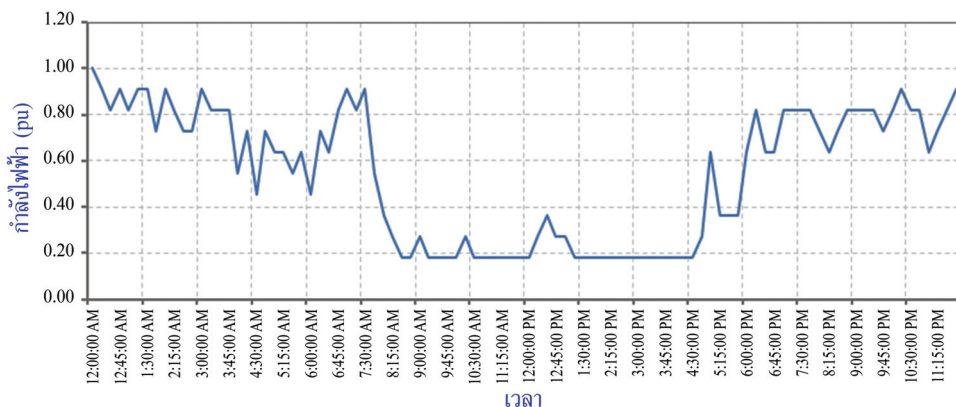


(ข) BD-30



(ค) BD-31

รูปที่ 7 ตัวอย่างข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวันของอาคารที่ผ่านการทำค่าบรรทัดฐานข้อมูลแล้ว

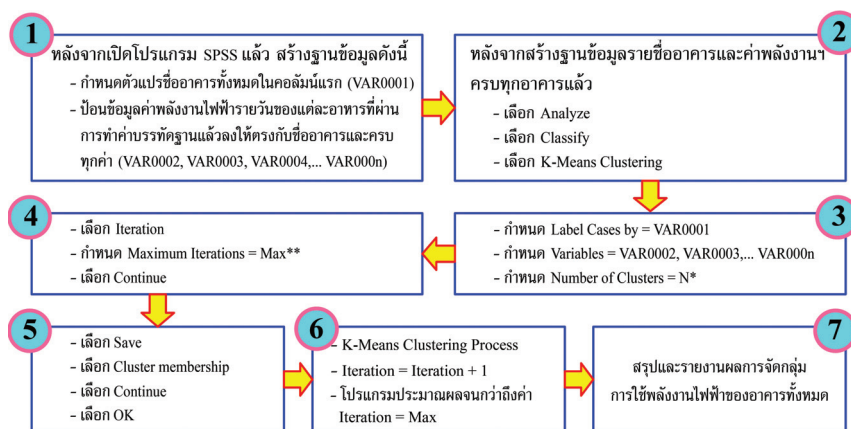


(ง) BD-33

รูปที่ 7 ตัวอย่างข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวันของอาคารที่ผ่านการทำความสะอาดฐานข้อมูลแล้ว (ต่อ)

2. การจัดกลุ่มโหลครายอาคาร

เทคนิคการจัดกลุ่มด้วยวิธีการ K-Means จะใช้หลักการจัดกลุ่มด้วยวิธีการสร้างจุดศูนย์กลางข้อมูลในลำดับเดียวกันของข้อมูลที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันจะมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกัน ส่วนจะสามารถจัดกลุ่มข้อมูลได้จำนวนกี่กลุ่มนั้น ผู้วิเคราะห์จะต้องเป็นผู้กำหนดเองโดยใช้หลักการกำหนดจำนวนกลุ่มให้มีค่าหลายกลุ่มก่อนในขั้นเริ่มต้นและรันโปรแกรมแบบซ้ำ ๆ หลายครั้งแล้วจึงลดจำนวนกลุ่มลง โดยวิธีการจัดกลุ่มนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS จะมีลำดับขั้นตอน ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ขั้นตอนการจัดกลุ่มโหลวิธี K-Means Clustering ด้วยโปรแกรม SPSS

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการกำหนดตัวแปรในแต่ละคอลัมน์ โดยคอลัมน์แรก (VAR0001) กำหนดตัวแปรเป็นรายชื่ออาคาร ส่วนคอลัมน์ถัดไป (VAR0002, VAR0003,... VAR000n) เป็นตัวแปรค่าบรรทัดฐานค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในแต่ละช่วงเวลา

ขั้นตอนที่ 2 เลือกวิธีการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม โดยเลือกเป็น Analyze, Classify และ K-Means Clustering

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าตัวแปรที่กำหนดไว้เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ โดยแทนค่า Label Cases เป็นรายชื่ออาคาร (VAR0001) และแทนค่า Variables เป็นค่าบรรทัดฐานค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 และผู้วิเคราะห์จะต้องกำหนดค่าจำนวนกลุ่ม (Number of Clusters) ด้วย ซึ่งแนะนำให้กำหนดค่ามากไว้ก่อน จากนั้นจึงลดจำนวนกลุ่มลงแล้ววิเคราะห์ซ้ำ (ในบทความนี้ได้ทดลองซ้ำ ๆ จนได้ค่าที่เห็นผลการจัดกลุ่มมีความชัดเจนที่จำนวนกลุ่มเท่ากับ 3 กลุ่ม)

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดจำนวนรอบ (Iteration) ของการคำนวณซ้ำ ๆ เพื่อให้ได้ผลของการจัดกลุ่มด้วยการวิเคราะห์ระยะห่างของจุดศูนย์กลางกับค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งสามารถกำหนดจำนวนรอบสูงสุด (Max) เท่าไรก็ได้ ขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลตัวแปร แต่ในการวิเคราะห์นั้นถ้าระยะห่างของแต่ละตัวแปรที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันมีค่าเข้าใกล้จุดศูนย์กลางแล้ว โปรแกรมจะหยุดการคำนวณทันทีโดยไม่รอให้ครบจำนวนรอบสูงสุด (ซึ่งในบทความนี้ข้อมูลตัวแปรไม่มาก จึงกำหนด Maximum Iteration = 20)

ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนการกำหนดการรายงานผลการวิเคราะห์ กล่าวคือให้รายงานผลว่าอาคารที่วิเคราะห์นั้นอยู่ในกลุ่มใด โดยการรายงานนั้นโปรแกรมจะระบุค่าตัวเลขกลุ่ม (Cluster Membership)

ขั้นตอนที่ 6 โปรแกรม SPSS จะเริ่มต้นกระบวนการจัดกลุ่มโดยมีเป้าหมายที่การพิจารณาค่าระยะห่างของตัวแปรกับจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่ม ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าระยะห่างของตัวแปรและจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือจำนวนรอบ Iteration = Max จึงจะหยุดการทำงาน

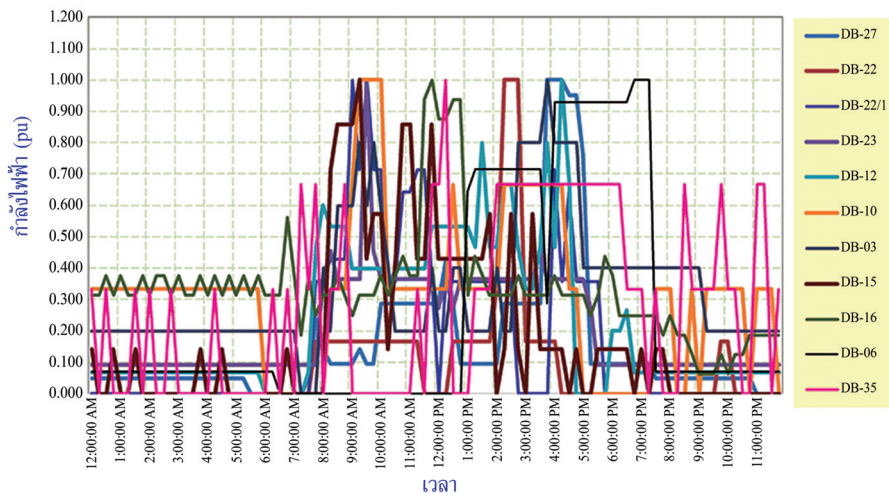
ขั้นตอนที่ 7 ขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งโปรแกรมจะสรุปและรายงานรายชื่ออาคาร (ตัวแปร; Variables) พร้อมทั้งระบุว่าตัวแปรดังกล่าวอยู่ในกลุ่มใดบ้าง

ผลการวิเคราะห์เมื่อกำหนดจำนวนกลุ่มเท่ากับ 3 กลุ่ม ($N = 3$) จำนวนรอบการทำงานซ้ำ 20 รอบ (Maximum Iteration = 20) กลุ่มโหลทรายอาคารจำนวน 34 อาคาร (Variables = 34) พบว่ากลุ่มที่ 1 มีรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่คงที่ ถึงแม้มีการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในช่วงกลางวันก็ตามแต่พบว่าจะมีการใช้เป็นบางเวลาจำนวน 11 อาคาร กลุ่มที่ 2 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อเนื่องมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดแตกต่างกันน้อยกว่ากลุ่มอื่นตลอดทั้งวันจำนวน 4 อาคาร และสุดท้ายกลุ่มที่ 3 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อเนื่องตลอดทั้งวัน โดยมีการใช้ปริมาณน้อยในช่วงเช้าและช่วงเย็น แต่ในช่วงเวลา 08.00 - 16.00 น. มีการใช้พลังงานสูงและต่อเนื่องจำนวน 19 อาคาร ดังรูปที่ 9

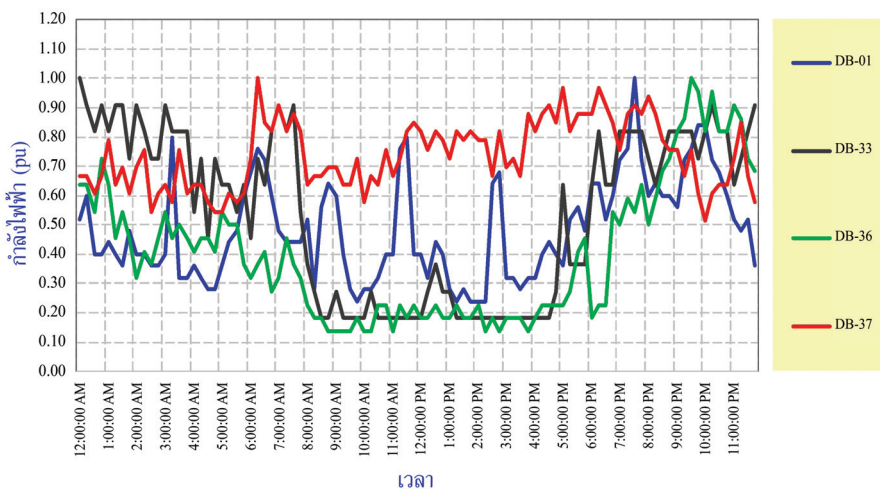
3. การประเมินटरชนประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า

จากผลลัพธ์การจัดกลุ่มแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนั้นในบทความนี้ต้องการคัดเลือกอาคารที่มีพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สอดคล้องและรองรับต่อการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อการปรับปรุงตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า (LF) ซึ่งเป็นค่าटरชนประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สำคัญอีกประการ ดังนั้นเมื่อกำหนดตามสมการที่ (2) จะได้ค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าของแต่ละอาคารดังรูปที่ 10 โดยแยกตามกลุ่มที่วิเคราะห์ได้จะพบว่ากลุ่มที่ 2 โดยรวมจะมีค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าสูง ส่วนกลุ่มที่ 1 และ 3 นั้นโดยรวมมีค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้าต่ำ จึงมีความเหมาะสมที่จะปรับปรุงให้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้ารายอาคารของกลุ่มที่ 1 และ 3 นั้นพบว่ากลุ่มที่ 3 มีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากโดยรวมแล้วแต่ละอาคารมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงต่อเนื่องในช่วงเวลา 08.00 - 16.00 น. ซึ่งเมื่อพิจารณาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาจะผลิตและช่วยจ่ายไฟในช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาดังกล่าว ส่งผลให้อาคารในกลุ่มที่ 3 ที่พิจารณานั้นรับไฟจากระบบของการไฟฟ้าลดลงเนื่องจากมีแหล่งจ่ายไฟจากพลังงานแสงอาทิตย์

บนหลังคาช่วยผลิตและจ่ายไฟทดแทนบางส่วน ทำให้ลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละอาคารลงได้ ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้ามียกระดับสูงขึ้น และยังช่วยเพิ่มค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาพรวมของมหาวิทยาลัยให้ดีขึ้นได้

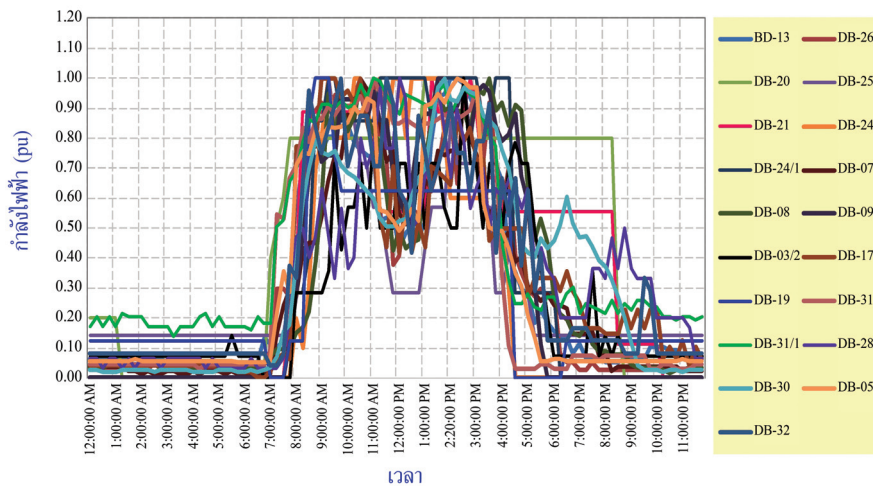


(ก) กลุ่มที่ 1



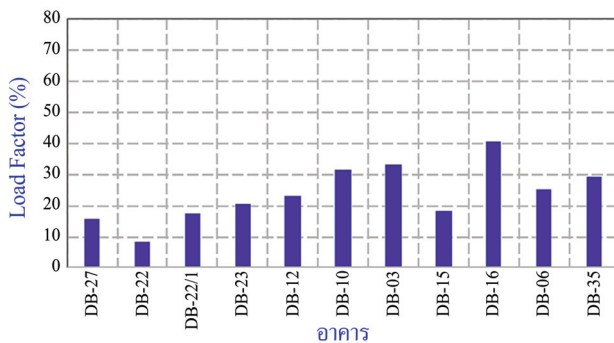
(ข) กลุ่มที่ 2

รูปที่ 9 ผลการจัดกลุ่มการใช้พลังงานไฟฟ้ารายอาคารด้วยวิธี K-Means Clustering

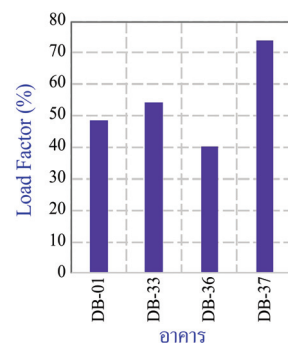


(ค) กลุ่มที่ 3

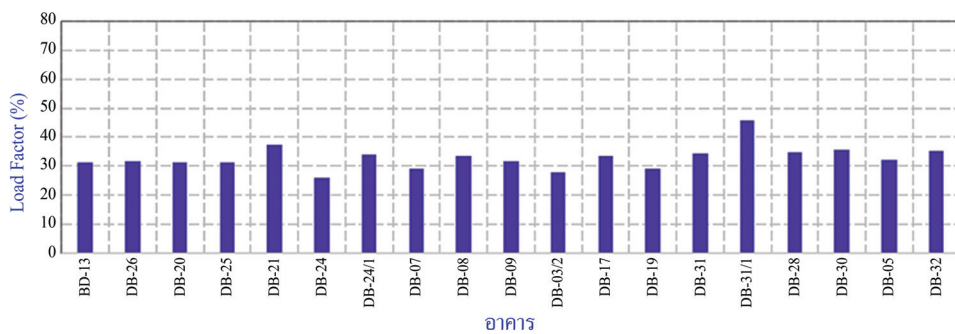
รูปที่ 9 ผลการจัดกลุ่มการใช้พลังงานไฟฟ้ารายอาคารด้วยวิธี K-Means Clustering (ต่อ)



(ก) กลุ่มที่ 1



(ข) กลุ่มที่ 2



(ค) กลุ่มที่ 3

รูปที่ 10 ค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า (Load Factor) ของอาคารในแต่ละกลุ่ม

สรุป

จากสถิติข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยย้อนหลัง 10 ปี พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงกลางวันในเวลาราชการเป็นหลัก แนวทางการลดการใช้และการเพิ่มค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า จำเป็นต้องกำหนดอาคารเป้าหมายโดยใช้วิธีการแยกแยะและจัดกลุ่มอาคาร เพื่อให้สามารถลดค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ด้วยวิธีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารเป้าหมายนั้น ซึ่งเป็นแนวคิดที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ จากผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 34 อาคาร ด้วยวิธีการ K-Mean Clustering ทำให้สามารถแยกแยะจัดกลุ่มโหลทรายอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแบ่งได้ 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 3 จำนวน 19 อาคารนั้น เป็นกลุ่มอาคารที่มีความเหมาะสมทั้งด้านพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า และมีพื้นที่รองรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาได้ ดังนั้นในอนาคตมหาวิทยาลัยสามารถนำข้อมูลการจัดกลุ่มอาคารที่นำเสนอไว้ในบทความนี้ ไปใช้ประกอบการดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาได้อย่างถูกต้องและส่งผลให้ค่าดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้ารายเดือนลดลงได้

References

- [1] Moslener, U., McCrone, A., d’Estais, F., Grüning, C., Louw, A., Boyle, R., Strahan, D., Collins, B., and Stopforth, K. (2017). **Global Trends in Renewable Energy Investment 2017**. Global Trends Report 2017, Frankfurt School of Finance and Management. DOI: 10.13140/RG.2.2.19153.84320
- [2] REN21. (2017). **Renewable 2017 Global Status Report**. Access (26 December 2019). Available (<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>)
- [3] Potisat, T. (2016). Project Development Programmer South-East Asia (GIZ Thailand) Solar PV Business Models for the Public Sector. In **Proceeding of the 2nd Thai-German Community-based Renewable Energy Conference**. October 18, 2016. Century Park Hotel, Bangkok
- [4] Kruangam, D. (2013). Solar PV Rooftop-Energy Production Business that you or Anyone can Own. **Inno Mag**. Vol. 40, No. 231, pp. 7-10 (in Thai)
- [5] Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy. (2014). **Solar PV 358 Rooftop Safety**. December, 2014. (in Thai)
- [6] Karun, T. and Pisut, R. (2015). A Novel Clustering Methods (Two-stage Fuzzy-Possibility C-Means) for Load Profile Clustering. **Kasetsart Engineering Journal**. Vol. 28, No. 91, pp. 23-30. (in Thai)
- [7] Damayanti, R., Abdullah, A. G., Purnama, W., and Nandiyanto, A. B. D. (2017). Electrical Load Profile Analysis Using Clustering Techniques. **Materials Science and Engineering**. Vol. 180, Issue 1, pp. 1-7. DOI: 10.1088/1757-899X/180/1/012081

- [8] Rupali, M., Deorankar, A. V., and Chatur, P. N. (2012). Load Pattern Analysis of Electricity Customers based on Clustering Algorithm. **International Journal of Computer Science and Technology**. Vol. 3, No. 4, pp. 702-705
- [9] Ali Al, W., Jianzhong, W., and Nick, J. (2017). K-means Based Load Estimation of Domestic Smart Meter Measurements. **Applied Energy**. Vol. 194, pp. 333-342. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.046

A Drought Senescence NAC Gene, *OMTN4*, Confers Seed Development Defects in Rice

Sittipun Sinumporn^{1*}

Received: April 1, 2020; Revised: September 2, 2020; Accepted: September 16, 2020

Abstract

Transcription factors are important for gene regulation system in both animals and plants as these factors control various development processes. The NAC (NAM, ATAF, and CUC2) transcription factors play an important role in vital diverse processes and responses to stress. In rice, six NAC transcription factors targeted by *miR164* were designated as *OMTN1-6*. Among them, *OMTN4* (*LOC_Os06g46270*) plays a role in causing negative effects on drought resistance. Bioinformatic information revealed that *OMTN4* is a rice *NAC1/ANAC021* analog gene. In this study, we conducted the gain-of-function of *OMTN4* overexpression and expression analysis. The results suggested that *OMTN4* plays a negative role in inflorescence fertility. β -glucuronidase (GUS) histochemical study revealed that *OMTN4* was expressed in leaf, seed husk, stigma, and root. *OMTN4* expression profile was in correspondence with GUS histochemical result. Subcellular localization demonstrated that *OMTN4* was localized in the nucleus, which was consistent with the other NAC TFs. Partial seed sterile phenotype and expression profile suggested that, other than the negative effect on drought stress, *OMTN4* plays a negative role on inflorescence development.

Keywords: NAC Transcription Factors; *OMTN4*; *Oryza Sativa*; Stigma Development

¹ Rajamangala University of Technology Isan, Thung Kula Ronghai Roiet campus

* Corresponding Author E - mail Address: sittipun.si@rmuti.ac.th

Introduction

Cereals are world's most important staple food. Among them, rice is one of the most important food crops. Grain size, grain number, and yield are determining factors of rice production. Seed setting rate is fluctuating, in which, several factors such as pollen viable rate, have influences. Transcription factor plays a role as a regulator for the transcription process. NAC (NAM/ATAF/CUC) transcription factors are one of the largest plant-specific transcription factors. In NAC members, approximately 150 amino acids are conserved on N terminal while C terminal is usually divergent. Further, NAC transcription factors participate in several plant development cycles [1]. NAC and *miR164* cooperate to fine-tuning leaf senescence. To date, *miR164* is reported to negatively regulate NAC targeted *ORESAR1* (*ORE1* also known as *ANAC092*) for age-dependent cell death in *Arabidopsis*. *ORE1/ANAC092* positively regulates leaf senescence, notably *ore1/anac092* loss-of-function mutation leads to delay leaf senescence and overexpression of *miR164B* led to mRNA of *ORE1* cleavage, while *ORE1* is negatively regulated by the *EIN2*, providing a *miR164* example in negative leaf senescence regulation [2]. Another report clarified that *EIN3* promotes age-dependent leaf senescence and *EIN3* also acts as *EIN2* downstream by directly binding to the *miR164* promoter and suppressing *miR164* transcription. Moreover, *EIN3* expression level is increased during senescence [3], these results imply the regulatory system for fine-tuning senescence regulation gene network. Therefore, it is assumed that, in rice, NAC genes probably targeted by *miR164* system are present. In *Arabidopsis*, *miR164* is coded by *miR164A/B/C* and targeting five NAC transcription factors [3] - [4].

In contrast to *Arabidopsis*, rice genome consists of six genes coding for *miR164* [5] - [6]. Notably, a previous study conducted by Fang, Y., Xie, K., and Xiong, L. [5] identified six NAC transcription factors targeted by *miR164*, which designated as *OMTN1-6*. It should be noted that overexpression of *OMTN4* induces sensitive drought stress during reproductive stage. Other than leaf senescence-related manner, *miR164* target No Apical Meristem (NAM) also plays a crucial role in the fusion process of carpel margins in *Arabidopsis thaliana* and *Medicago truncatula*. NAM expression level is reduced or non-detectable during carpel margin fusion and may repressed via *miR164* [7]. *NAM/miR164* function related to the reproductive organ development is conserved among monocot species including rice [8].

In this study, we performed *OMTN4* function analysis via overexpression approach and spatio-temporal analysis. This study suggests that other than the negative effect on drought resistance function revealed by Fang, Y., Xie, K., and Xiong, L. [5], *OMTN4* also plays a negative role in inflorescence development in rice.

Materials and methods

1. Plant materials

The japonica rice cv. Nipponbare was used as wild type, three transgenic lines of *OMTN4* overexpression (ox) (line 3, 5, 7) and *OMTN4_{pro}::β-glucuronidase (GUS)* plants were grown under controlled conditions of 14 h. day and 10 h. night.

2. RNA isolation and real-time PCR

The total RNA from leaf tissues were extracted using RNeasy pure Kit (For Plant) [TIANGEN Biotech (Beijing) Co., Ltd., China] following the manufacturer's instructions. First strand cDNA was synthesized using ReverTra Ace quantitative PCR RT Master Mix Kit with gDNA remover (Toyobo, Japan) according to the manufacturer's instructions. Quantitative real-time PCR (qRT-PCR) reaction was performed with Light cycler 480 System (Roche, Germany) using SYBR Premix Ex Taq II (Takara, Japan) according to the manufacturer's instructions.

3. Overexpression construct

To generate *OMTN4*-overexpression (ox) construct, confirmed cDNA fragments were used for gene specific primers design and containing In-Fusion® adapter (*Pst*I and *Spe*I for forward and reverse primer, respectively). Purified fragment was then inserted into pCUBi1390 vector driven by ubiquitin promoter. Primer list is given in Table 1. Construct were verified for its accurate information without discrepancy base and the verified construct was transformed into rice cv. Nipponbare mediated by *Agrobacterium* method [9].

Table 1 list of primers used in this study. Underlined indicates engineered sequence for In-fusion using Clontech™ In-fusion® kit

Construct name	Forward primers (5'-3')	Reverse primers (5'-3')
<u>Primers for gene construction amplification</u>		
<i>OMTN4</i> -ox	<u>TCTGCACTAGGTACCTGCAGATG</u> AGCGGGATGAATTCGCT	<u>TAGCGTTAACTAGTTCAAC</u> TGAGTGAGTTCCACAT
<i>OMTN4_{pro}::GUS</i>	<u>CCATGATTACGAATTCGATCGA</u> GGTTGTACGTGGT	<u>CTCAGATCTACCATGGGCCCA</u> CCCCCTCCTCCTCGA
<i>OMTN4</i> -GFP	<u>GCCCAGATCAACTAGTATGAGCG</u> GGATGAATTCGCT	<u>TCGAGACGTCTCTAGAACTGA</u> GTGAGTTCCACATTG

4. β-glucuronidase (GUS) histochemical study

To generate *OMTN4_{pro}::GUS* construct ~2-kb sequence prior *OMTN4* start codon was confirmed by PCR and the gene specific primers, containing In-Fusion® adapter (*Eco*RI

and *NcoI* for forward and reverse primer, respectively), were designed and used for fragment amplification. Purified fragment was inserted into pCAMBIA 1305.1 vector. Primer details are listed in Table 1. Construct was verified for its accurate information without discrepancy base and the verified construct was transformed into rice cv. Nipponbare mediated by *Agrobacterium* method [9]. Various tissues (leaf, root, seed, and seedling) from *OMTN4_{pro}::GUS* transgenic line were incubated in GUS solution as previously described [10]. The incubated tissues were photographed using Stereo microscope model SMZ1500 (Nikon, Japan).

5. Transient expression in rice protoplast

In order to establish *OMTN4*-GFP, the full-cDNA sequence without stop codon was amplified by PCR using gene specific primer pairs (Table 1). PCR product containing engineered restriction enzyme cutting site was subcloned into pCAMBIA1305-GFP using In-Fusion® HD Cloning Kit (Clontech) where the transcription was controlled by 35S promoter. *OMTN4*-GFP and *OsMADS3*-mCherry were co-transformed by polyethylene glycol (PEG) method as describe previously by Yoo, S., Cho, Y., and Sheen, J. [11] with minor modification. Photographs were taken using a confocal laser scanning microscope (Zeiss, Germany). *OsMADS3*-mCherry was used as a nuclear marker [12].

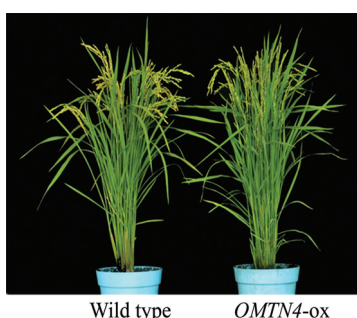
Results

1. Putative Gene identification

NAC1/ANAC021 (AT1g56010) encoded a transcription factor that played a role in shoot apical meristem formation and auxin-mediated lateral root formation [13]. Moreover, *NAC1/ANAC021* was up-regulated during senescence process, and targeted by *miR164* [14] - [15]. MSU rice annotation bioinformatic database showed that *OMTN4* was *NAC1/ANAC021* analog gene. Moreover, both *NAC1/ANAC021* and *OMTN4* were targeted by *miR164* [5], [13]. Since leaf senescence mediated analogous gene of *NAC1/ANAC021* in rice is *OMTN4*, we, therefore, selected *OMTN4* for further study. Together, FPKM of *OMTN4* (*LOC_Os06g46270*) in two inflorescence organs, Post-emergence inflorescence and anther, was 9.25059 and 11.9226, respectively, which was higher compared to the other organs. It is expected that expression of *OMTN4* in inflorescence organs could possess function other than leaf senescence. Protein multiple alignment sequence suggested that NAC1.1, NAC1.2 and *OMTN4* contained highly conserved region on N-terminal (Supplemental S1).

2. *OMTN4*-ox transgenic plant appearance

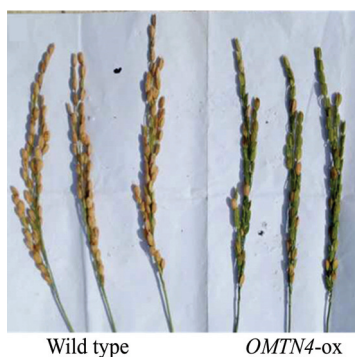
OMTN4 gene encoded 304 amino acid residues containing NAC conserved domain on its N-terminal region. Phenotype between the wild type (cv. Nipponbare) and the *OMTN4*-ox was not significantly different since seed sowing date. However, at 90 days after sowing date, the difference of phenotype of wild type and *OMTN4*-ox was displayed. *OMTN4*-ox leaves exhibited normalcy as well as plant height with slightly higher tiller (Figure 1(a)), all independent transgenic lines exhibited similar morphology. Panicle amount in *OMTN4*-ox was also higher due to higher tiller number. Interestingly, when the spikelet was considered, grain from wild type was filled up and exhibited normal green-brown color at ~90 days after sowing but the panicles from *OMTN4*-ox lines exhibited partial sterile green color with seed setting rate less than 50% in both T₀ and T₁ (Figure 1(b) and (c)) implying that semi-sterility was probably controlled by higher expression level of *OMTN4*. These results indicate that *OMTN4* possesses negative function in controlling grain filling.



(a) Panicle characteristics of wild type and T₁.
WT, wild type; 3, *OMTN4*-ox line 3; 5,
OMTN4-ox line 5; 7, *OMTN4*-ox line 7



(b) Wild type and T₀ panicle characteristics.
WT, wild type; 3, *OMTN4*-ox line 3; 5,
OMTN4-ox line 5; 7, *OMTN4*-ox line 7

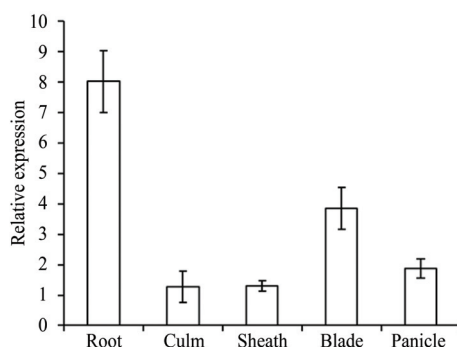


(c) Panicle characteristics of wild type and T₁

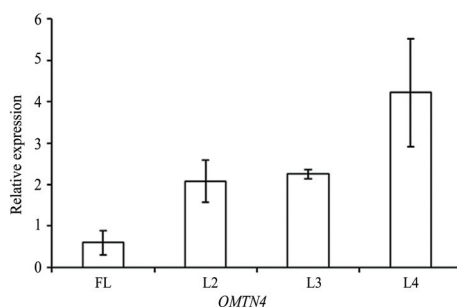
Figure 1 Phenotype of wild type and *OMTN4*-ox transgenic line

2. *OMTN4* expression levels

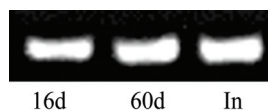
To investigate the spatio-temporal *OMTN4* expression pattern, qRT-PCR was employed to clarify transcript levels in various tissues and leaf age. The result resembled a previous report that *OMTN4* was highly expressed in root and blade with lower expression in culm and panicle (Figure 2(a)) [5]. *OMTN4* expression had an age-dependent pattern with lower expression level in younger leaf and slightly higher expression level in aged leaf. The expression was lower in flag leaf and slightly increased in 2nd leaf from top, 3rd leaf from top and finally higher expressed in 4th leaf from top (Figure 2(b)). In line with previous study, it suggested that *OMTN4* plays an important role in leaf senescence. Semi-quantitative RT-PCR analysis showed that *OMTN4* expressed in leaf and inflorescent (Figure 2(c)).



(a) Spatial *OMTN4* transcription in different rice organs



(b) *OMTN4* transcription level in different leaves. FL, flag leaf; L2, 2nd leaf from top; L3, 3rd leaf from top; L4, 4th leaf from top



(c) Semi-quantitative RT-PCR analysis. 16d, Leaf tip at 16 days after planting; 60d, Leaf tip at 60 days after planting; In, Inflorescence

Figure 2 Spatio-temporal transcription pattern and dark treatment

3. *OMTN4* spatial investigation via GUS activity

To determine the *OMTN4* spatial expression, assessment of *OMTN4_{pro}::β-glucuronidase* (*GUS*) activity in transgenic lines were performed. The result elucidated *GUS* activity was strongly detected in leaf (Figure 3(a) and (b)) and in consistent with previous study, which elucidated that *OMTN4* expression was detectable in leaf [5]. Other than a role in leaf, *OMTN4_{pro}::GUS* activity also appeared in root (Figure 3(c)), seed husk (Figure 3(d), stigma (Figure 3(e), as well as seedling shoot and root (Figure 3(f). *GUS* activity in husk and stigma implied that *OMTN4* might be related to seed development.

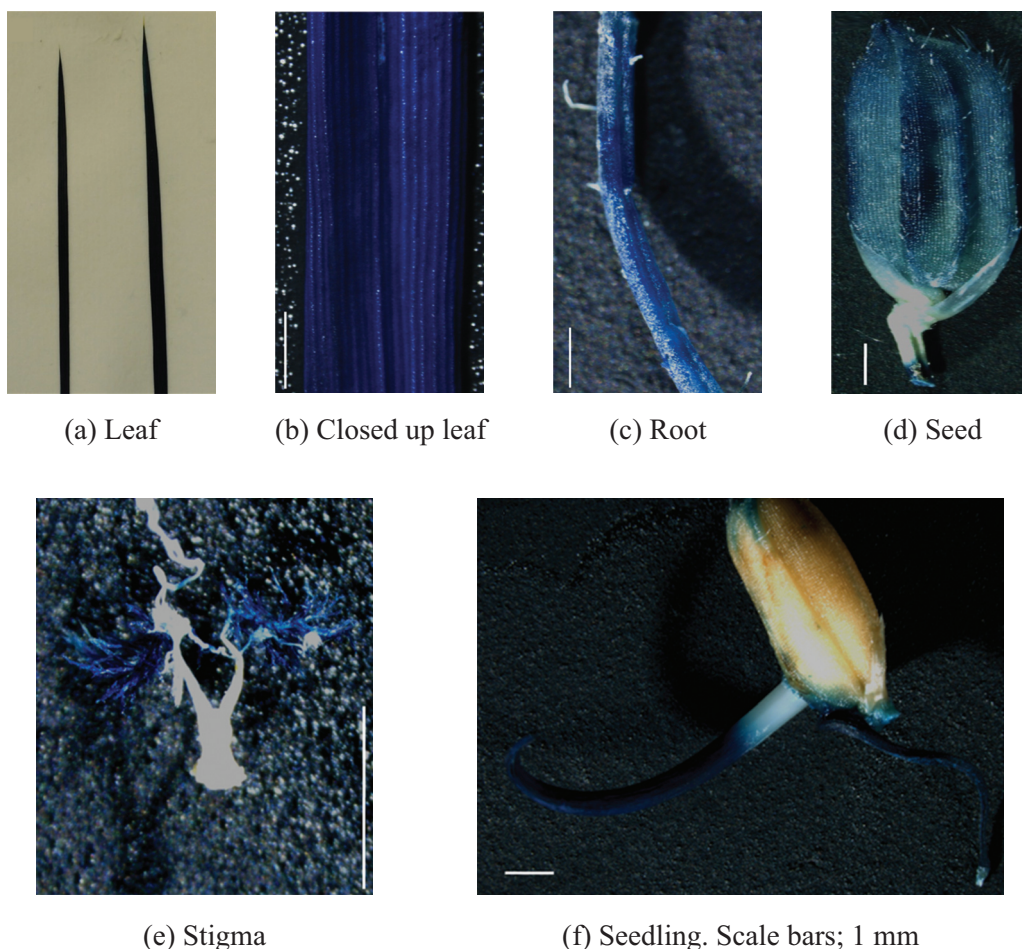


Figure 3 GUS histochemical staining of *OMTN4_{pro}::GUS* transgenic line

4. Subcellular localization of *OMTN4*

Previous reports indicated that most of transcription factors were in the nucleus, although, some NAC family members appeared in plasma membrane or endoplasmic reticulum [5]. To bioinformatical forecast this issue, we performed subcellular localization

prediction by SLP-Local (<http://sunflower.kuicr.kyoto-u.ac.jp/~smatsuda/slplocal.html>), which indicated that OMTN4 proteins were probably located in nucleus or cytosol (data not shown). In order to experimentally determine whether the *OMTN4* localized in nucleus, subcellular location of *OMTN4*-GFP were analyzed using full length cDNA without stop codon merging in-frame with GFP coding protein in rice protoplast. Previous study has clarified that *OsMADS3* is in nucleus [12]; hence, *OsMADS3*-mCherry was employed as a nuclear positive control. The construct was transiently expressed in rice protoplast. Laser scanning confocal image of green florescent signal resulted from In-frame fusion of *OMTN4*-GFP, which were co-expressed with mCherry signal from those of *OsMADS3*-mCherry (Figure 4(a) - (h)). The co-localization confirmed that *OMTN4*-GFP were localized in nucleus, suggesting that OMTN4 was nuclear protein. These evidences are in consistent with *OMTN4* role as a transcription factor.

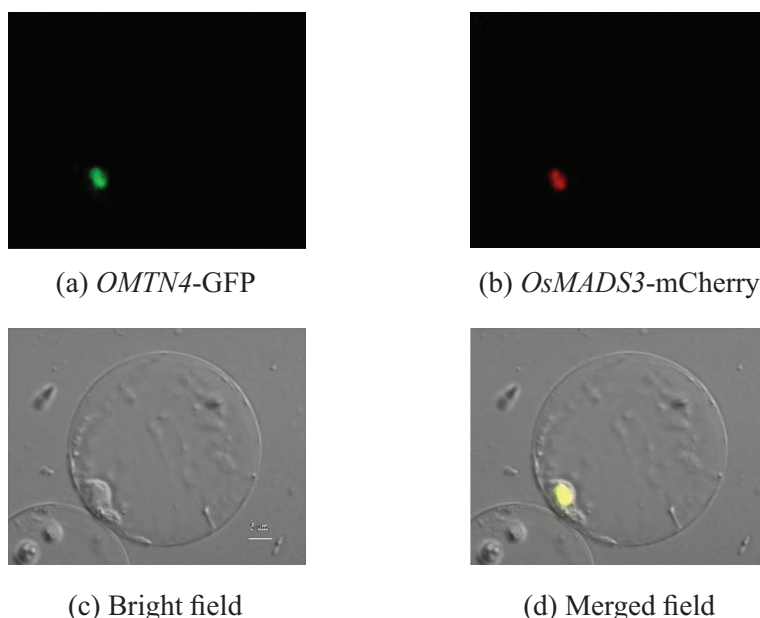


Figure 4 Subcellular localization of the OMTN4 protein in rice protoplasts under confocal laser scanning microscope

Discussion

Senescence is regulated by complex gene network and many NAC family genes play a crucial role in senescence regulatory network [1], other than the control of leaf senescence, transcription factors might possess multi-functional roles in various development mechanisms. *ANAC092/ORE1*, a NAC gene member targeted by *miR164*, was first discovered in *Arabidopsis* [2]. In rice, six *miR164*-targeted NAC genes, designated as *OMTN1-6*, among

them, *OMTN2*-, *OMTN3*-, *OMTN4*-, and *OMTN6*-ox contain negative effect on drought stress resistance. *OMTN4*-ox caused 76, and 371 genes up- and down-regulation, respectively [5]. It should be noted that high number of down-regulated genes possibly due to *OMTN4* induced signal cascade. As a result, a lot of genes have shut or reduced their functions, in order to relocate the nutrients and energy to sink organs [5].

In this study, we elucidated that *OMTN4*-ox expressed in root, culm, sheath, blade and panicle at varying degrees (Figure 2(a)). Interestingly, its expression pattern in FL, L2, L3, L4 was in line with the role to negatively regulate drought resistance in rice (Figure 2(b)). Further, *OMTN4*-ox might not only affect increasing susceptibility to drought stress but also grain development (Figure 1(b) and (c)) suggesting that *OMTN4* possesses a negative effect on grain development process. GUS histochemical result elucidated that *OMTN4* participates in shoot and root development in rice seedling (Figure 4(f)). According to previous study, *OMTN4* expression profile was highly detectable in stamen [5], suggesting that *OMTN4* plays a crucial role in pollen development. Moreover, GUS activity results implied that *OMTN4* expressed in stigma (Figure 3(e)). It is possible that higher expression of *OMTN4* may interfere with stigma development process, directly or indirectly via recruiting other transcription factors. A previous report identified that MYB transcription factor members participate in stigma development [16]. *OMTN4* may act as negative control to MYB to regulate stigma development. Stigma development malfunction or abortion owing to *OMTN4*-ox may be necessary to save the plant life in special conditions, in response to higher *OMTN4* expression. Present knowledge elucidates that *OMTN4* function responds to drought stress signal. NAC overexpression study in *Arabidopsis* elucidated that *ANAC046*-ox lines germinate later than in wild type, and at 40 days after sowing *ANAC046*-ox lines exhibited wavy rosette leaves and smaller size than in WT plants while knock-out lines and SRDX lines were slightly larger. When senescence is considered, *ANAC046*-ox lines showed yellowing leaves at 35 and 50 days after sowing. Moreover, in the case of incubation in the dark for 13 days, *ANAC046*-ox exhibited pale green and smaller-sized leaves than WT [17]. In line with *ANAC046* where negative regulation to plant growth rate and positive regulation to senescence was reported, therefore, *OMTN4* negative effect may not only restrict negative drought stress and sterile seed regulation but whenever plants encountered stresses, many signal cascades occurred, including reproductive organ abortion. These evidences together lead to the conclusion that *OMTN4* probably acts as negative regulator to various processes in rice development, in order to fine-tune downstream process in response to the environmental changes.

Previous report conducted by Vialette-Guiraud, A., Chauvet, A., Gutierrez-Mazariegos, J., Eschstruth, A., Ratet, P., and Scutt, C. [7] elucidated that NAM gene targeted by *miR164*

expression was reduced during carpel margin fusion. Moreover, *miR164* resistant form led to failure in carpel margin fusion in *MtNAM* with different defects such as unfused or absent stamens, unfused carpel margins although some flowers' development were normal. Prior study showed that reduced NAM expression via *miR164* strategy is essential for flower development, especially carpel margin fusion, in *Arabidopsis* and *Medicago truncatula* [7]. In consistent to our study, *OMTN4* overexpression may cause incomplete flower development in some flowers, as a result of failure of seed development.

To date, a lot of NAC transcription factors have been reported to play an important role in plant development. Our study has provided evidence on how *OMTN4* may be required for balancing seed amount and input factor. Stringent conditions lead to abortion of seed development. Dealing with environmental challenges is essential for plant survival to extend its longevity. Further study about the mechanism involved in seed abortion influenced by *OMTN4* will establish a valuable knowledge for basic rice molecular genetics which will be useful for understanding gene function.

Conclusion

Plants' largest and specific transcription factor family, the NAC (NAM, ATAF, and CUC2) plays an important role in vital diverse processes and responses to stress. Belonging to one of the NAC TFs, *OMTN4* was investigated in this study. *OMTN4* overexpression, qRT-PCR, GUS, and subcellular localization result were elucidated. Ectopic inflorescence morphology and *OMTN4* spatial expression were revealed. As NAC transcription factor, *OMTN4* was in rice cell nuclear region. GUS staining and qRT-PCR elucidated that *OMTN4* expression was detected in various developmental organs. Future study including CRISPR gene knockout will elucidate *OMTN4* loss-of-function characteristic. Finally, this study contributed to *OMTN4* gain-of-function and negative inflorescence development as key results.

References

- [1] Sakuraba, Y., Piao, W., Lim, J. H., Han, S. H., Kim, Y. S., An, G., and Paek, N. C. (2015). Rice ONAC106 Inhibits Leaf Senescence and Increases Salt Tolerance and Tiller Angle. **Plant Cell Physiol.** Vol. 56, Issue 12, pp. 2325-2339. DOI: 10.1093/pcp/pcv144
- [2] Kim, J., Woo, H., Kim, J., Lim, P., Lee, I., Choi, S., Hwang, D., and Nam, H. (2009). Trifurcate Feed-Forward Regulation of Age-Dependent Cell Death Involving *miR164* in Arabidopsis. **Science.** Vol. 323, Issue 5917, pp. 1053-1057. DOI: 10.1126/science.1166386

- [3] Li, Z., Peng, J., Wen, X., and Guo, H. (2013). *ETHYLENE-INSENSITIVE3* Is a Senescence-Associated Gene That Accelerates Age-Dependent Leaf Senescence by Directly Repressing *miR164* Transcription in Arabidopsis. **Plant Cell**. Vol. 25, pp. 3311-3328. DOI: 10.1105/tpc.113.113340
- [4] Laufs, P. (2009). How to Dissect a Leaf: A Role for the *NAM/CUC3* Genes and the microRNA *miR164*. **Comparative Biochemistry and Physiology - Part A Molecular & Integrative Physiology**. Vol. 153, Issue. 2, p. S174. DOI: 10.1016/j.cbpa.2009.04.367
- [5] Fang, Y., Xie, K., and Xiong, L. (2014). Conserved *miR164*-targeted NAC Genes Negatively Regulate Drought Resistance in Rice. **Journal of Experimental Botany**. Vol. 65, Issue 8, pp. 2119-2135. DOI: 10.1093/jxb/eru072
- [6] Sunkar, R., Zhou, X., Zheng, Y., Zhang, W., and Zhu, J. (2008). Identification of Novel and Candidate miRNAs in Rice by High Throughput Sequencing. **BMC Plant Biology**. Vol. 8, DOI: 10.1186/1471-2229-8-25
- [7] Vialette-Guiraud, A., Chauvet, A., Gutierrez-Mazariegos, J., Eschstruth, A., Ratet, P., and Scutt, C. (2016). A Conserved Role for the *NAM/miR164* Developmental Module Reveals a Common Mechanism Underlying Carpel Margin Fusion in Monocarpous and Syncarpous Eurosids. **Frontiers in Plant Science**. Vol. 6, DOI: 10.3389/fpls.2015.01239
- [8] Shang, H., Li, W., Zou, C., and Yuan, Y. (2013). Analyses of the NAC Transcription Factor Gene Family in *Gossypium raimondii* Ulbr.: Chromosomal Location, Structure, Phylogeny, and Expression Patterns. **Journal Integration Plant Biology**. Special Issue: Cotton Genetics and Genomics. Vol. 55, Issue 7, pp. 663-676. DOI: 10.1111/jipb.12085
- [9] Lin, Y. and Zhang, Q. (2005). Optimising the Tissue Culture Conditions for High Efficiency Transformation of Indica Rice. **Plant Cell Report**. Vol. 23, pp. 540-547. DOI: 10.1007/s00299-004-0843-6
- [10] Ye, R., Zhou, F., and Lin, Y. (2012). Two Novel Positive Cis-Regulatory Elements Involved in Green Tissue-Specific Promoter Activity in Rice (*Oryza sativa* L ssp.). **Plant Cell Report**. Vol. 31, pp. 1159-1172. DOI: 10.1007/s00299-012-1238-8
- [11] Yoo, S., Cho, Y., and Sheen, J. (2007). Arabidopsis Mesophyll Protoplasts: A Versatile Cell System for Transient Gene Expression Analysis. **Nature Protocols**. Vol. 2, No. 7, pp. 1565-1572. DOI: 10.1038/nprot.2007.199
- [12] Wu, W., Zheng, X., Lu, G., Zhong, Z., Gao, H., Chen, L., Wu, C., Wang, H., Wang, Q., Zhou, K., Wang, J., Wu, F., Zhang, X., Guo, X., Cheng, Z., Lei, C., Lin, Q., Jiang, L., Wang, H., Ge, S., and Wan, J. (2013) Association of Functional Nucleotide Polymorphisms at *DTH2* with the Northward Expansion of Rice Cultivation in Asia. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**. Vol. 110, pp. 2775-2780. DOI: 10.1073/pnas.1213962110
- [13] Chen, X., Cheng, J., Chen, L., Zhang, G., Huang, H., Zhang, Y., and Xu, L. (2016). Auxin-Independent NAC Pathway Acts in Response to Explant-Specific Wounding and Promotes Root Tip Emergence during de Novo Root Organogenesis in Arabidopsis. **Plant Physiology**. Vol. 170, pp. 2136-2145. DOI: 10.1104/pp.15.01733

- [14] Kim, J., Murphy, A., Baek, D., Lee, S., Yun, D., Bressan, R., and Narasimhan, M. (2011). *YUCCA6* Over-expression Demonstrates Auxin Function in Delaying Leaf Senescence in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**. Vol. 62, Issue 11, pp. 3981-3992. DOI: 10.1093/jxb/err094
- [15] Guo, H., Xie, Q., Fei, J., and Chua, N. (2005). MicroRNA Directs mRNA Cleavage of the Transcription Factor NAC1 to Downregulate Auxin Signals for Arabidopsis Lateral Root Development. **The Plant Cell**. Vol. 17, pp. 1376-1386. DOI: 10.1105/tpc.105.030841
- [16] Gomez-Gomez, L., Trapero-Mozos, A., Gomez, M., Rubio-Moraga, A., and Ahrazem, O. (2012). Identification and Possible Role of a MYB Transcription Factor From Saffron (*Crocus sativus*). **Journal of Plant Physiology**. Vol. 169, Issue 5, pp. 509-515. DOI: 10.1016/j.jplph.2011.11.021
- [17] Oda-Yamamizo, C., Mitsuda, N., Sakamoto, S., Ogawa, D., Ohme-Takagi, M., and Ohmiya, A. (2016). The NAC Transcription Factor *ANAC046* is a Positive Regulator of Chlorophyll Degradation and Senescence in Arabidopsis Leaves. **Scientific Report**. Vol. 6, pp. 23609

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

Factors Affecting Anaerobic Digestion Efficiency to Produce Biogas

ปิยะวดี ศรีวิชัย^{1*} และชุมาพร รดสีดา¹

Piyavadee Srivichai^{1*} and Chumaporn Rodsrida¹

Received: December 17, 2019; Revised: May 22, 2020; Accepted: May 22, 2020

บทคัดย่อ

จากวิกฤติการขาดแคลนพลังงานที่เกิดขึ้น การพิจารณาหาแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy) จึงมีความสำคัญในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานทดแทนจากก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมาจากระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ของสารชีวมวล และของเสียอินทรีย์ต่าง ๆ เนื่องจากก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การให้ความร้อน (Heating) การขนส่ง (Transportation) แสงสว่าง (Lighting) และการผลิตกระแสไฟฟ้า (Electricity) ดังนั้นเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพ บทความนี้จึงสนใจทำการทบทวนและรวบรวมผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ (Temperature) ค่าพีเอช (pH) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) อัตราการระบวรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) ระยะเวลาเก็บกัก (Retention Time) ปริมาณธาตุอาหาร (Nutrients) ความชื้น (Moisture) ปริมาณของแข็งรวม (Total Solids) การกวนผสม (Mixing) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (Volatile Fatty Acids to Alkalinity) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิจารณาแก่ผู้ที่สนใจใช้ระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทน

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ; การหมักย่อยแบบไร้อากาศ; ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

¹ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

¹ Faculty of Medicine, University of Phayao

* Corresponding Author E - mail Address: u4108047@hotmail.com

Abstract

Under the energy crisis, searching for the source of renewable energy plays an important role nowadays. Especially, biogas as the renewable energy generated from the anaerobic digestion process of various biomass and organic wastes. Due to biogas is clean renewable energy and environmentally friendly, it can be used beneficially in many ways such as heating, transportation, lighting, and electrical production. Thus, to obtain a qualified biogas from an efficient anaerobic digestion process, this paper is interested in reviewing several factors such as pH, carbon to nitrogen ratio, organic loading rate, retention time, moisture, total solids, nutrient, mixing, and volatile fatty acids to alkalinity ratio, etc. These factors are the vital factors influencing the biogas production efficiency. Moreover, it can be used as the basic guideline for considering the anaerobic digestion application to produce further biogas as a renewable energy.

Keywords: Biogas; Anaerobic Digestion; Factor; Efficiency

บทนำ

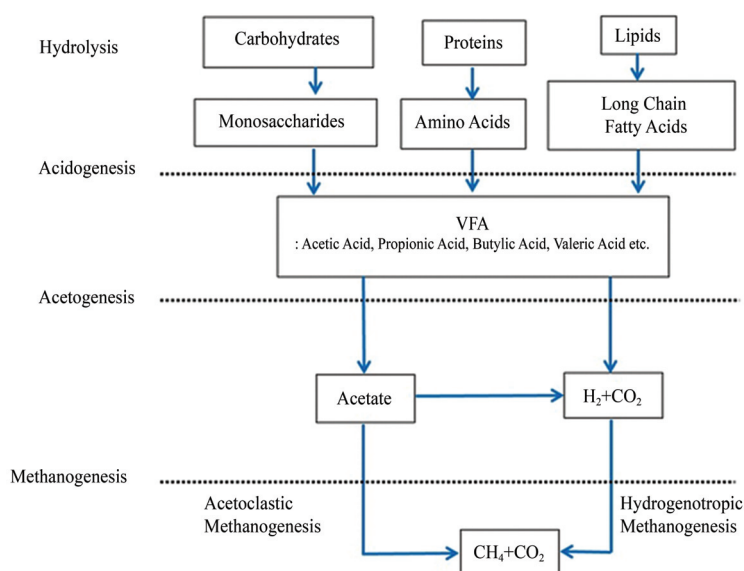
พลังงานเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำรงและพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ พลังงานได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ให้หลายภาคส่วน เช่น ทางอุตสาหกรรม การเกษตร ภาคครัวเรือน เป็นต้น จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคมเมืองอย่างรวดเร็ว รวมถึงปัญหาแหล่งพลังงานปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดให้มีสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจาก 7,413 พันตัน น้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2555 เป็น 25,000 น้ำมันดิบ ในปี พ.ศ. 2564 หรือคิดเป็นร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมด [1]

จากความต้องการดังกล่าวได้มีความพยายามที่หาแหล่งพลังงานทดแทนจากแหล่งต่าง ๆ เช่น แสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น และได้มีการศึกษาพบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลหรือของเสียต่าง ๆ เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพเหมาะที่จะนำมาช่วยในการแก้ปัญหาข้างต้นได้ [2] การนำมาใช้เป็นการช่วยลดมลพิษผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน โดยช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases, GHGs) จากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า [3] - [4] ซึ่งก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ โดยใช้สารอินทรีย์จากแหล่งต่าง ๆ เป็นวัสดุตั้งต้น เช่น เศษพืชจากการเกษตร เศษอาหาร หรือของเสียจากกระบวนการต่าง ๆ เป็นการนำกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์มาใช้ และมีการเก็บเกี่ยวมีเทนจากกระบวนการย่อยเป็นการช่วยลดปริมาณก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งปกติก๊าซมีเทนจะส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกือบ 21 เท่า [5] และพบว่ากากที่เหลือจากการหมักย่อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยชีวภาพ (Bio Fertilizer) และสารปรับปรุงดิน (Soil Amendments) ได้อย่างดีด้วย [6] - [7] โดยก๊าซชีวภาพที่ดีมีความเหมาะสมและคุ้มค่าต่อการนำมาใช้ประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์

ควรมีร้อยละของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 50 [8] ดังนั้นเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพจึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ และความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงสนใจทบทวนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความสำคัญส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยแบบไร้อากาศ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมระบบหมักย่อยให้มีความเหมาะสมต่อไป

กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Process)

กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Process) เป็นกระบวนการที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศและมีการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปก๊าซชีวภาพ (Biogas) จะประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 55 - 70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 30 - 45 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และแอมโมเนีย (NH_3) อีกเล็กน้อยประมาณร้อยละ 1 - 2 และความชื้นอีกประมาณร้อยละ 1 - 5 [9] ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ต้องการจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน โดยกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อได้มาซึ่งก๊าซมีเทนจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน [10] ดังนี้ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Production Process) [11] - [12]

1. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนแรกของการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งจะเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ซับซ้อน เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เป็นต้น ให้อยู่ในรูปสารที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน ซึ่งกลายเป็นสารที่จุลินทรีย์สามารถดูดซึม (Absorption) และใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ โดยจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม Cellulomonas, Eubacteria, Clostridium, และ Ruminococcus [13]

2. แอซิโดจีเนซิส (Acidogenesis)

เป็นการย่อยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กข้างต้นให้กลายเป็นแอลกอฮอล์ (Alcohols) และกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids, VFA) เช่น กรดอะซิติก โพรพาโนอิกและบิวทิริก โดยมีแบคทีเรียในกลุ่ม Acid Forming Bacteria ประกอบด้วย Pseudomonas, Bacillus, Clostridium, และ Streptococcus [14]

3. อะซิโตรจีเนซิส (Acetogenesis)

เป็นการเปลี่ยนกรดไขมันระเหย และแอลกอฮอล์ ให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และกรดอะซิติก โดยแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องคือกลุ่ม Syntrophobacteria และ Syntrophomonas [15] ขั้นตอนนี้มีความสำคัญ เนื่องจากการผลิตอะซิติกสูงถึงร้อยละ 25 และก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 11 ซึ่งทั้ง 2 ตัวเป็นตัวกลางหลักในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ในขณะที่สารตัวกลางบางตัว เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก็สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยตรงเช่นกัน

4. เมทาโนจีเนซิส (Methanogenesis)

เป็นขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน โดยทั่วไปมี 3 วิธีหลัก ๆ คือ [16]

4.1 การเปลี่ยนเมทิลของโมเลกุลอะซิเตดให้กลายเป็นก๊าซมีเทนเรียกขั้นตอนนี้ว่า Acetoclastic Methanogenesis โดยเมทาโนเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้เรียกว่า Acetoclastic Methanogens

4.2 การรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยก๊าซไฮโดรเจน เรียกขั้นตอนนี้ว่า Hydrogenotrophic Methanogenesis โดยเมทาโนเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้เรียกว่า Hydrogenotrophic Methanogens

4.3 เป็นการเปลี่ยนกลุ่มเมทิล (Methyl Group) ของสารต่าง ๆ ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน เรียกขั้นตอนนี้ว่า Methylotrophic Methanogenesis โดยเมทาโนเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้เรียกว่า Methylotrophic Methanogens

การเกิดมีเทนโดยส่วนใหญ่จะมาจาก 2 ขั้นตอนเป็นหลัก คือ Acetoclastic Methanogenesis และ Hydrogenotrophic Methanogenesis ซึ่งโดยทั่วไปพบว่า เกือบร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้มาจากโมเลกุลอะซิเตดของขั้นตอน Acetoclastic Methanogenesis [17]

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมักย่อยโดยไร้อากาศ (Factors Affecting Efficiency of Anaerobic Digestion)

1. อุณหภูมิ (Temperature)

เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งส่งผลถึงคุณภาพและปริมาณก๊าซที่ผลิตได้อีกด้วย เช่น การศึกษาของ Rameshprabu, R. and Yuwalee, U. [18] พบว่าการหมักย่อยแบบไร้อากาศของจอกแหน (Duckweed) ในขวดทดลองขนาด 2 ลิตร ด้วยระยะเวลาเก็บ 45 วันที่อุณหภูมิช่วงมีโซฟิลิก (35 °C) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 10,377 มิลลิลิตรต่อลิตร และในช่วงเทอร์โมฟิลิก (50 °C) ผลิตได้ลดลงเล็กน้อยเหลือเท่ากับ 9,981 มิลลิลิตรต่อลิตร ขณะที่อุณหภูมิห้อง (23 - 28 °C) ลดลงเหลือเพียง 7,864 มิลลิลิตรต่อลิตร ซึ่งโดยทั่วไปเราแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการหมักได้ 3 ช่วงด้วยกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะในการหมักย่อยแบบไร้อากาศในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

สภาวะในการหมัก	ช่วงอุณหภูมิในการเดินระบบ (°C)	ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (°C)
Psychrophilic	< 15	-
Mesophilic	15 - 45	35
Thermophilic	45 - 65	55

หมายเหตุ อุณหภูมิต่ำกว่า 10 °C ส่งผลกระทบบังเกิดการหยุดผลิตก๊าซชีวภาพ [19]

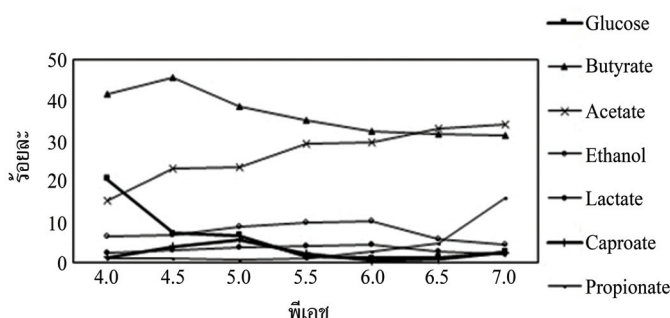
สภาวะ Mesophilic และ Thermophilic เป็นสภาวะที่นิยมใช้ในการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งสภาวะที่ Thermophilic เหมาะสำหรับขั้นตอนในช่วงแรกของการย่อยในขั้นตอน Hydrolysis และ Acidogenesis ในขณะที่ช่วงหลังของขั้นตอน Acetogenesis และการผลิตมีเทน Methanogenesis ควรใช้สภาวะ Mesophilic เพื่อไม่ให้มีสภาวะเป็นกรด (Acidification) เกิดมากและเร็วเกินไป ทำให้กรดไขมันระเหยไม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ทัน [20] ส่งผลกระทบบังต่อการผลิตก๊าซมีเทนลดลงของเมทาโนเจน (Methanogen) ซึ่งเมทาโนเจนค่อนข้างไว (Sensitivity) ต่อพีเอชที่ลดลงจากการสะสมของกรดไขมันระเหย อีกทั้งการหมักด้วยสภาวะ Thermophilic ยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนกับระบบหมักย่อย ด้วยเหตุนี้จึงควรคำนึงถึงความเหมาะสมค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้อุณหภูมิในแต่ละช่วงของการหมักย่อย โดยการให้ความร้อนกับระบบหมักย่อยอาจนำไปใช้สำหรับการย่อยสลายที่ย่อยสลายยาก ๆ เช่น ลิกนิน ไขมัน และโปรตีน [21] หรือในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำอากาศหนาว [22] เป็นต้น

2. ค่าพีเอช (pH Value)

เป็นพารามิเตอร์ในการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการหมักต้องการช่วงพีเอชที่เหมาะสมไม่เหมือนกัน โดยขั้นตอน Acidogenesis มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 5.5 - 6.5 [23] อีกทั้งยังพบว่าค่าพีเอชของระบบหมักย่อยมีผลต่อชนิดกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากขั้นตอน Acidogenesis ซึ่งจากการศึกษาของ Herbert, H. P. F. and Hong, L. [24] พบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 5.5 พบกรดบิวทิริก (Butyric Acid) เป็นกรดหลักที่พบ แต่ที่พีเอชมากกว่า 5.5 จะพบกรดอะซิติก (Acetic Acid) เป็นหลัก ในขณะที่กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) พบได้มากที่สุดที่พีเอชค่อนข้างเป็นกลางจากการหมักย่อยน้ำตาลกลูโคส ดังรูปที่ 2 ด้วยเหตุนี้ขั้นตอน Acidogenesis เกิดได้ดีที่พีเอช 5.5 - 6.5 จึงควรพบกรดอะซิติก เป็นหลักและรองลงมาเป็นกรดบิวทิริก

สำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 6.8 - 7.2 [25] - [26] ซึ่งเมทาโนเจนที่ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทนค่อนข้างไว (Sensitivity) ต่อค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก พบว่าเมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 6.6 อัตราการเจริญเติบโตของเมทาโนเจนจะลดลง [27] และมีการแนะนำว่าในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศควรมีความเข้มข้นของกรดอะซิติกไม่ควรเกิน 3,000 - 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร [28] และกรดโพรไพโอนิกไม่เกิน 900 มิลลิกรัม/ลิตร [29] จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและการเจริญเติบโตของเมทาโนเจน จากปัญหาดังกล่าวจึงมีหลาย ๆ งานวิจัยแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยปรับไปใช้การหมักย่อยไร้อากาศแบบสองขั้นตอนแทน (Two - Stage Anaerobic Digestion) ซึ่งมีการแยกถึงปฏิกิริยาระหว่างการหมักกรดและถังหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อไม่ให้พีเอชที่ลดลงจากการผลิตกรดไขมันระเหยส่งผลกระทบต่อเมทาโนเจนที่ทำหน้าที่ผลิตก๊าซมีเทน เช่น

การศึกษาของ Liu, X., Li, R., and Ji, M. [30] พบว่าการหมักร่วมระหว่างตะกอนจากระบบเอเอสและเศษอาหาร โดยใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอน ช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นเมื่อเดินระบบด้วยอัตรากระบวนการทุกสารอินทรีย์สูง ๆ เมื่อเทียบกับระบบหมักหนึ่งขั้นตอนซึ่งมีปัญหาเรื่องของการสะสมของกรดไขมันในระบบเกิดขึ้น



รูปที่ 2 ผลของค่าพีเอชต่อประเภทของผลิตภัณฑ์ที่พบในน้ำหมักจากการย่อยกลูโคส [24], [31]

3. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

เป็นอัตราส่วนที่สะท้อนให้เห็นระดับของสารอาหารในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งช่วงของอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมแนะนำไว้ที่ระหว่าง 20 - 30 [32] โดยทั่วไปการหมักย่อยจึงใช้ที่เท่ากับ 25 ในการเดินระบบ ซึ่งอัตราส่วน C/N จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาหมัก (ตารางที่ 2) สำหรับการหมักย่อยของวัสดุที่มีอัตราส่วน C/N สูงกว่าค่าที่เหมาะสม ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนซึ่งจำเป็นสำหรับการสร้างเซลล์ของแบคทีเรียจะลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือแต่คาร์บอนในระบบ ส่งผลให้แบคทีเรียและเมทาโนเจนไม่สามารถเจริญเติบโตและหยุดการผลิตก๊าซชีวภาพ ในขณะที่วัสดุนำมาหมักมีอัตราส่วน C/N ต่ำ โดยมีปริมาณไนโตรเจนที่สูง เมื่อเกิดการย่อยส่งผลให้มีการผลิตก๊าซแอมโมเนียเป็นจำนวนมากในระบบหมักย่อยทำให้ระบบมีความเป็นด่างรุนแรง และอาจส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และเกิดความเป็นพิษต่อเมทาโนเจนจนเกิดการตายได้ [33] - [34]

ตารางที่ 2 อัตราส่วน C/N และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุหมักแต่ละชนิด

วัสดุหมัก	อัตราส่วน C/N	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (l/kg TVS)	วัสดุหมัก	อัตราส่วน C/N	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (l/kg TVS)
1. ฟางข้าว	90	280	6. ใบสะเดา	26	650
2. มูลแกะ	24	700	7. เศษหญ้า	25	350
3. มูลวัว	13	500	8. มูลหมู	15	28
4. มูลม้า	22	550	9. ต้นอ้อย	53	200
5. มูลไก่	15	350	10. ชานอ้อย	82	150

ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับให้อัตราส่วน C/N ให้เหมาะสมกับกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ จึงมีการนำวัสดุหมักต่างชนิดมาทำการหมักร่วมกัน และหาอัตราส่วนการหมักร่วมที่เหมาะสม เช่น การศึกษาของ Siddiqui, Z., Horan, N. J., and Anaman, K. [35] ทำการหมักร่วมระหว่างของเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร (อัตราส่วน C/N เท่ากับ 30) กับกากตะกอนจากระบบเอเอส (อัตราส่วน C/N เท่ากับ 5.4) โดยพบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดีที่สุดเท่ากับ 239 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด เมื่อใช้อัตราส่วนของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารต่อตะกอนเท่ากับ 11/89 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 15

4. อัตราการบรรทุสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

เป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ต่อปริมาตรของถังและระยะเวลา เป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมให้เหมาะสมเนื่องจาก OLR ที่ป้อนมากเกินไป (Overloading) ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ถูกย่อยกลายเป็นกรดไขมันระเหยปริมาณมากและไม่สามารถกลายเป็นก๊าซมีเทนได้ทัน ทำให้เกิดสภาวะเป็นกรด (Acidification) [36] ในขณะที่ OLR ต่ำเกินไปก็จะส่งผลตรงกันข้ามคือเกิดสภาวะความเป็นด่างเช่นกัน ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรีย [37] อีกทั้งยังพบว่า OLR ยังมีผลต่อชนิดของแบคทีเรียและอาร์เคีย ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง OLR กับชนิดของแบคทีเรียไร้อากาศและอาร์เคีย

อัตราการบรรทุ สารอินทรีย์	ชนิดแบคทีเรียไร้อากาศ (Anaerobic Bacteria) [38] - [39]	ชนิดอาร์เคีย (Archeae) [40]
สูง	- <i>Chloroflexi</i> - <i>Gammaproteobacteria</i> - <i>Actinobacteria</i> - <i>Bacteroidetes</i> - <i>Deferribacteres</i> - <i>Methanobacterium</i> - <i>Methanocelleus</i>	- <i>Methanosarcina</i>
ต่ำ	- <i>Firmicutes</i> - <i>Syntrophomonas</i> - <i>Synergistacea</i> - <i>Anaerovibrio</i>	- <i>Methanosaeta</i>

5. ระยะเวลาในการกักเก็บ (Retention Time)

เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จนเสิร์ฟสมบูรณ์กลายเป็นก๊าซมีเทนเกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่จะต้องย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) [41]

$$\text{ระยะเวลาการกักเก็บ (Retention Time, RT)} = \frac{(V) \text{ ปริมาณถังปฏิกรณ์}}{(Q) \text{ อัตราการไหล}} \quad (1)$$

ระยะเวลาในการกักเก็บที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ด้วย เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักย่อย อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบ และลักษณะองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อระยะเวลาในการกักเก็บ [42]

ปัจจัย	ความสัมพันธ์ต่อระยะเวลาในการกักเก็บ	
	ระยะเวลาในการกักเก็บนาน	ระยะเวลาในการกักเก็บน้อย
อุณหภูมิในการหมักย่อย	อุณหภูมิในการหมักย่อยปานกลาง โดยใช้สภาวะ Mesophilic ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการกักเก็บนานขึ้น	อุณหภูมิในการหมักย่อยสูง โดยใช้สภาวะ Thermophilic ส่งผลให้ใช้เวลาในการกักเก็บสั้นลง ระบบก็สามารถย่อยได้สมบูรณ์
อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR)	OLR ที่ป้อนเข้าระบบสูง จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการกักเก็บนานขึ้น เพื่อให้การย่อยเกิดสมบูรณ์ ขนาดของถังอาจต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย	OLR ที่ป้อนเข้าระบบต่ำ ส่งผลให้ใช้เวลาในการกักเก็บสั้นลงการย่อยก็สามารถเกิดสมบูรณ์ ไม่มีสารอินทรีย์ค้างในระบบ
ลักษณะองค์ประกอบของสารอินทรีย์	สารอินทรีย์มีองค์ประกอบซับซ้อนย่อยยาก เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บนาน	สารอินทรีย์มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อน เช่น น้ำตาล แป้ง เป็นต้น สามารถย่อยได้โดยง่าย และใช้เวลาในการกักเก็บสั้นลง

โดยทั่วไประยะเวลาในการกักเก็บสำหรับการหมักที่สภาวะมีโซฟิลิกจะเสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 15 - 30 วัน [43] ถ้าระยะเวลาในการกักเก็บต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม จะส่งผลให้การหมักย่อยเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์มีการสะสมของกรดไขมันระเหยปริมาณมากที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ทันทีทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงต่ำ และในที่สุดแล้วอาจส่งผลให้ระบบล้มเหลว การผลิตก๊าซชีวภาพลดลงจนถึงขั้นการหยุดผลิตได้ [44] ในขณะที่ระยะเวลาในการกักเก็บสูงเกินไป จะทำให้ขนาดของถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น และเป็นการสิ้นเปลืองค่าลงทุนในการก่อสร้างถังที่สูงเกินไป ด้วยเหตุนี้จึงควรควบคุมระยะเวลาในการกักเก็บให้เหมาะสมมากที่สุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

6. ธาตุอาหาร (Nutrients)

เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งมีการแบ่งประเภทของสารอาหารตามปริมาณที่จุลินทรีย์ต้องการออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

6.1 ธาตุอาหารหลัก (Macro - Nutrients) ได้แก่ ไนโตรเจน คาร์บอน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ซัลเฟอร์และแมกนีเซียม เป็นธาตุอาหารที่ต้องการปริมาณมากมีความสำคัญ เป็นส่วนประกอบหลักของเซลล์และมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (C:N:P) ที่แนะนำสำหรับการหมักแบบไร้อากาศเท่ากับ 200:5:1 [26]

6.2 ธาตุอาหารรอง (Micro - Nutrients) เป็นธาตุอาหารที่ต้องการปริมาณน้อยแต่มีความสำคัญเช่นกัน ซึ่งถ้าขาดอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากช่วยในการทำงานของเอนไซม์และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ภายในเซลล์จุลินทรีย์ ความสำคัญของธาตุอาหารแต่ละชนิดและปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความสำคัญของธาตุอาหาร และปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ [9], [45]

สารเคมี	ความสำคัญ	ความเข้มข้นที่เหมาะสม
<u>ธาตุอาหารหลัก</u>		
- คาร์บอน	โครงสร้างเซลล์และแหล่งพลังงาน	-
- ไนโตรเจน	การสังเคราะห์โปรตีน	น้อยกว่า 400 mg/l
- โฟสเฟอรัส	เพิ่มความสามารถในการผ่านเข้าออกบริเวณผนังเซลล์ของสารเคมี (Permeability)	465 mg/l
- โพแทสเซียม	การสังเคราะห์ดีเอ็นเอ	3.05 - 6.18 g/kg TS
- ซัลเฟอร์	ส่วนประกอบเอนไซม์หลายชนิด	3.05 - 6.18 g/kg TS
- แมกนีเซียม	ส่วนประกอบเอนไซม์หลายชนิด	0.02 mg/l
<u>ธาตุอาหารรอง</u>		
- เหล็ก	ส่วนประกอบของเอนไซม์ CODH	1,000 - 5,000 ppm
- นิกเกิล	ส่วนประกอบของเอนไซม์ CODH, การสังเคราะห์ F430 และสำคัญต่อ Sulfate Reducing Bacteria	0.029 - 27 mg/l
- เซลีเนียม	เมตาบอลิซึมของกรดไขมัน, ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH	0 - 10 mg/kg TVS
- ทังสเตน	ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH	0.658 - 100 mg/l
- สังกะสี	ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH และ CODH	0.0327 - 2 mg/l
- โคโรเนียม	ส่วนประกอบของเอนไซม์ Hydrogenase	4 - 5 mg/l
- โมลิบดีนัม	ส่วนประกอบของเอนไซม์ FDH, ยับยั้งการทำงานของ Sulfate Reducing Bacteria	0.029 - 5 mg/l

หมายเหตุ: CODH; เอนไซม์ Carbon Monoxide Dehydrogenase, FDH; เอนไซม์ Formate Dehydrogenase, F430; โคเอนไซม์จากเมทาโนเจน, TVS; Total Volatile Solids

7. ความชื้น (Moisture) ปริมาณของแข็งรวม (Total Solids)

ระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่ใช้เป็นแบบเปียกหรือแบบแห้งนั้น ขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของวัสดุหมัก ซึ่งการหมักย่อยแบบเปียกนิยมนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าแบบแห้ง โดยในการหมักย่อยนั้นจะมีปริมาณของแข็งรวมน้อยกว่าร้อยละ 15 วัสดุหมักจึงมีลักษณะค่อนข้างเหลว โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 85 ในขณะที่การหมักย่อยแบบแห้งจะมีร้อยละความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 85 ซึ่งความชื้นมีความสำคัญในระบบหมักย่อยเป็นอย่างมาก เนื่องจากช่วยในการละลายสารอาหารให้กับจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ นอกจากนี้ยังช่วยในการเคลื่อนที่ของจุลินทรีย์ภายในวัสดุหมักเพื่อไปสัมผัสกับสารอินทรีย์และทำการย่อย พบว่าถ้าความชื้นในระบบหมักย่อยไม่เหมาะสมหรือมีค่าต่ำโดยมีร้อยละของแข็งมากเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง

8. การกวนผสม (Steering/Mixing)

การกวนผสมภายในถังปฏิกริยาหมักย่อยเป็นการกระตุ้นให้การย่อยดีขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์มีโอกาสในการสัมผัสวัสดุหมัก อีกทั้งยังเป็นการทำให้วัสดุหมักมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งพบว่าการทดลองที่ไม่มีการกวนผสมอาจจะส่งผลเสียให้เกิดฟองแข็ง (Scum) ลอยที่ผิวหน้าปิดกั้นการปล่อยก๊าซมีเทนออกจากถังปฏิกริยา โดยมีการศึกษาของ Kozłowski, K., Mazurkiewicz, J., Chełkowski, D., Jeżowska, A., Cieślík, M., Brzoski, M., Smurzyńska¹, A., Dongmin, Y., and Wei, Q. [46] พบว่าการกวนผสมทุกวันช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 ผลิตได้เท่ากับ 265 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีการกวนผสมในถังปฏิกริยาผลิตได้ 225 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย แต่อย่างไรก็ตามการกวนผสมที่มากเกินไปก็อาจส่งผลเสียต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบหมักย่อย เนื่องจากระบบเกิดการย่อยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการสะสมกรดไขมันระเหยในระบบจำนวนมากเกินไป ทำให้พีเอชของระบบลดลงต่ำมากจนในที่สุดระบบหมักย่อยล้มเหลว อีกทั้งการนำการกวนผสมไปใช้ในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ จะต้องมีการวิเคราะห์ความเหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพที่มากขึ้นกับความคุ้มค่าของพลังงานที่ใช้ในการกวนผสมซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Operating Cost) เพิ่มขึ้นว่ามีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์หรือไม่

9. อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (Volatile Fatty Acids to Alkalinity Ratio)

อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างใช้แสดงเสถียรภาพของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ โดยอัตราส่วนดังกล่าวเป็นผลมาจาก 2 พารามิเตอร์ คือ ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยและสภาพความเป็นด่าง ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ง่ายและสะดวกเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วัดเสถียรภาพของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศอย่างต่อเนื่อง ในการเดินระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศจำเป็นต้องควบคุมอัตราส่วนให้เหมาะสม โดยจากการศึกษาของ Lili, M., Biro, G., Sulyok, E., Petis, M., Borbely, J., and Tamas, J. [47] พบว่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างระหว่าง 0.3 - 0.4 มีความเหมาะสมสำหรับระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด โดยระบบมีเสถียรภาพไม่เสี่ยงต่อสภาพความเป็นกรดจากกรดไขมันระเหยที่สะสมในระบบ ในขณะที่อัตราส่วนที่น้อยกว่า 0.3 เป็นผลมาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบต่ำเกินไป และอัตราส่วนที่มากกว่า 0.4 อาจมาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบมากเกินไป หรือระบบมีสภาพความเป็นด่างต่ำ

สรุปผล

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งประสิทธิภาพของระบบหมักย่อยจะถูกประเมินจากความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Production Potential) ของจุลินทรีย์ และสภาวะการทำงานของระบบหมักย่อยว่ามีเสถียรภาพ (Stability) มากน้อยเพียงใด โดยปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศประกอบด้วย อุณหภูมิ ค่าพีเอช อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ระยะเวลาในการกักเก็บอาหารอาหาร ความชื้น ปริมาณของแข็งรวม และการกวนผสม เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงอย่างยิ่งในการเดินระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศที่จะต้องทำการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการหมักย่อยสูงสุด

ซึ่งอาจนำเกณฑ์ที่มีการแนะนำหรือจากการศึกษาวิจัยของผู้อื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลอง ที่ทำการศึกษาอยู่ไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศ ทำให้กรอบของการศึกษา วิจัยแคบลง ช่วยให้ประหยัดเวลาและงบประมาณในการทำวิจัย ด้วยเหตุนี้ผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบหมักย่อย แบบไร้อากาศจึงควรศึกษาและทำความเข้าใจก่อนเบื้องต้นเกี่ยวกับปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ ในการเดินระบบหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศ เพื่อวางแผนการวิจัยได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมต่อไป

References

- [1] Rapephat, S. (2017). Review-Renewable Energy for National Security. **NDC Security**. Thailand National Defence College. Vol. 4, pp. 1-12
- [2] Ministry of energy. (2017). **Annual report 2017**. Bangkok: Office of the Permanent Secretary.
- [3] Buadit, T., Aroonsrimrakot, S., Bhaktikul, K., and Thavipoke, P. (2013). Biogas Production and Greenhouse Gases Reduction from Wastewater at Mahidol University, Salaya Campus, Thailand. **APCBEE Procedia**. Vol. 5, pp.169-174. DOI: 10.1016/j.apcbee.2013.05.030
- [4] Saeed, E., Ramin, K., and Masih, S. (2011). Greenhouse Gas Emissions Reduction through a Biogas Plant: A Case Study of Waste Management Systems at FEKA Dairy Farm. In **2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE**. IACSIT Press, Singapore. Vol. 6, pp. 445-448
- [5] Mohajan, H. K. (2012). Dangerous Effects of Methane Gas in Atmosphere. **International Journal of Economic and Political Integration**. Vol. 1, No. 2, pp. 3-10
- [6] Dragicevic, I., Sogn, T. A., and Eich-Greatorex, S. (2018). Recycling of Biogas Digestates in Crop Production Soil and Plant Trace Metal Content and Variability. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. Vol. 2, pp. 1-14. DOI: 10.3389/fsufs.2018.00045
- [7] Sogn, T. A., Dragicevic, I., Linjordet, R., Krogstad, T., Eijsink, V. G. H., and Eich-Greatorex, S. (2018). Recycling of Biogas Digestates in Plant Production: NPK Fertilizer Value and Risk of Leaching. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**. Vol. 7, No. 1, pp. 49-58. DOI: 10.1007/S40093-017-0188-0
- [8] Ahmmad, R. M. and Haque, S. (2014). Providing Electricity by Digester Types on Biogas Productions from Municipal Solid Waste in Dhaka City, Bangladesh. **International Journal of Energy, Information and Communications**. Vol. 5, Issue 3, pp. 13-22. DOI: 10.14257/ijeic.2014.5.3.02
- [9] Jorgensen, P. J. (2009). **Biogas-Green Energy**. 2nd Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University: Digisource Danmark A/S
- [10] Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., and Iyyappan, J. (2018). Biogas Production-A Review on Composition, Fuel Properties, Feed Stock and Principles of Anaerobic Digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 90, No. C, pp. 570-582. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.093

- [11] Merlin, C. P., Gopinath, L. R., and Divya, D. (2014). A Review on Anaerobic Decomposition and Enhancement of Biogas Production through Enzymes and Microorganisms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 34, pp. 167-173. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.010
- [12] Wenche, H. B., Carlos, D., and Rune, B. (2015). Temperature Effects in Anaerobic Digestion Modeling. In **Proceedings of the 56th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 56)**. October, 7-9, 2015, Linköping University, Sweden. pp. 261-269. DOI: 10.3384/ecp15119261
- [13] Sithara, M. S. and Kiran, J. (2018). Review on Factors Affecting Biogas Production. **International Journal for Technological Research in Engineering**. Vol. 5, Issue 9, pp. 3693-3697
- [14] Aderonke, K. A., Wasiu, A. A., and Moses, O. O. (2017). Microbial Dynamics and Biogas Production During Single and Co-Digestion of Cow Dung and Rice Husk. **Applied Environmental Research**. Vol. 39, No. 2, pp. 67-76. DOI: 10.35762/AER.2017.39.2.6
- [15] Ali, S. F., Mahmood, Q., Maroof, S. M., Pervez, A., and Asad, A.S. (2014). Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis. **Scientific World Journal**. Vol. 2014, pp. 1-21. DOI: 10.1155/2014/183752
- [16] Neeti, L., Preeti, L., Amir, A. S., Rakshanda, B., Rouf, R. D., and Pooja, D. (2017). Methanogenesis: Are Ruminants only Responsible: A Review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**. Vol. 6, No. 6, pp. 2347-2352
- [17] Sikora, A., Detman, A., Chojnacka, A., and Blaszczyk, M. K. (2017). Anaerobic Digestion: I. A Common Process Ensuring Energy Flow and the Circulation of Matter in Ecosystems. II. A Tool for the Production of Gaseous Biofuels. **Fermentation Processes**. DOI: 10.5772/64645
- [18] Rameshprabu, R. and Yuwalee, U. (2016). Effect of Temperature on the Performance of Biogas Production from Duckweed. **Chemistry Research Journal**. Vol. 1, No. 1, pp. 58-66
- [19] Lokendra, S., Alam, S. I., and Ramana, K. V. (1999). Effect of Fluctuating Temperature Regime on Psychrophilic Anaerobic Digestion of Night Soil. **Defence Science Journal**. Vol. 49, No. 2, pp. 135-140. DOI: 10.14429/dsj.49.3798
- [20] Kim, M., Gomec, C. Y., Ahn, Y., and Speece, R. E. (2003). Hydrolysis and Acidogenesis of Particulate Organic Material in Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion. **Environ Technol**. Vol. 24, Issue 9, pp. 1183-1190. DOI: 10.1080/09593330309385659
- [21] Salihu, A. and Alam, M. Z. (2016). Pretreatment Methods of Organic Wastes for Biogas Production. **Journal of Applied Sciences**. Vol. 16, Issue 3, pp. 124-137. DOI: 10.3923/jas.2016.124.137
- [22] Zhang, T., Tan, Y., and Zhang, X. (2016). Using a Hybrid Heating System to Increase the Biogas Production of Household Digesters in Cold Areas of China: An Experimental Study. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 103, pp. 1299-1311. DOI:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.05.027
- [23] Ozcan, K. (2018). **Bioenergy and Biofuels**. Taylor & Francis Group
- [24] Herbert, H. P. F. and Hong, L. (2002). Effect of pH on Hydrogen Production from Glucose by Mixed Culture. **Bioresource Technology**. Vol. 82, Issue 1, pp. 87-93. DOI: 10.1016/s0960-8524(01)00110-9

- [25] Appels, L., Baeyens, J., Degève, J., and Dewil, R. (2008). Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**. Vol. 34, Issue 6, pp 755-781. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.06.002
- [26] Rajeshwari, K. V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Kusum, L., and Kishore, V. V. N. (2000). State-of-the-art of Anaerobic Digestion Technology for Industrial Wastewater Treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 4, No. 2, pp. 135-156. DOI: 10.1016/S1364-0321(99)00014-3
- [27] Gary, N. F. (2004). **Biology of Wastewater Treatment**. Imperial College Press
- [28] Holm-Nielsen, J. B., Lomborg, C. J., Oleskowicz-opiel, P., and Esbensen, K. H. (2008). On-line Near Infrared Monitoring of Glycerol-Boosted Anaerobic Digestion Processes: Evaluation of Process Analytical Technologies. **Biotechnology Bioengineering**. Vol. 99, Issue 2, pp. 302-313. DOI: 10.1002/bit.21571
- [29] Wang, Y., Zhang, Y., Wang, J., and Meng, L. (2009). Effects of Volatile Fatty Acid Concentrations on Methane Yield and Methanogenic Bacteria. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 33, No. 5, pp. 848-853. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.01.002
- [30] Liu, X., Li, R., and Ji, M. (2019). Effects of Two-Stage Operation on Stability and Efficiency in Co-Digestion of Food Waste and Waste Activated Sludge. **Energies**. Vol. 12, Issue 14, pp. 1-21. DOI: 10.3390/en12142748
- [31] Kebreab, E., Dijkstra, J., Bannink, A., and France, J. (2009). Recent Advances in Modeling Nutrient Utilization in Ruminants. **Journal of Animal Science**. Vol. 87, Issue Supple 1414, pp. 111-122. DOI: 10.2527/jas.2008-1313
- [32] Dioha, I. J., Ikeme, C. H., Nafi'u, T., Soba, N. I., and Yusuf, M. B. S. (2013). Effect of Carbon to Nitrogen Ratio on Biogas Production. **International Research Journal of Natural Sciences**. Vol. 1, No. 3, pp. 1-10.
- [33] Kigozi, R., Aboyade, A., and Muzenda, E. (2014). Biogas Production Using the Organic Fraction of Municipal Solid Waste as Feedstock. **International Journal of Advances in Mechanical & Automobile Engineering**. Vol. 1, No. 1, pp. 107-114
- [34] Dieter, D. and Angelika, S. (2008). **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Germany: John Wiley & Sons
- [35] Siddiqui, Z., Horan, N. J., and Anaman, K. (2011). Optimisation of C:N Ratio for Co-Digested Processed Industrial Food Waste and Sewage Sludge Using the BMP Test. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**. Vol. 9, Issue 1, pp. 1-12. DOI: 10.1515/1542-6580.2327
- [36] Mel, M., Mohd, S. N., Avicenna, Ihsan, S. I., Ismail, A. F., and Yaacob, S. (2015). Effect of Organic Loading Rate (OLR) of Slurry on Biogas Production Quality. **Advanced Materials Research**. Vol. 1115, pp. 325-330. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1115.325
- [37] Mahanta, P., Saha, U. K., Dewan, A., Kalita, P., and Buragohain, B. (2005). Biogas Digester: A Discussion on Factors Affecting Biogas Production and Field Investigation of a Novel Duplex Digester. **Journal of the Solar Energy Society of India**. Vol. 15, No. 2, pp. 1-12

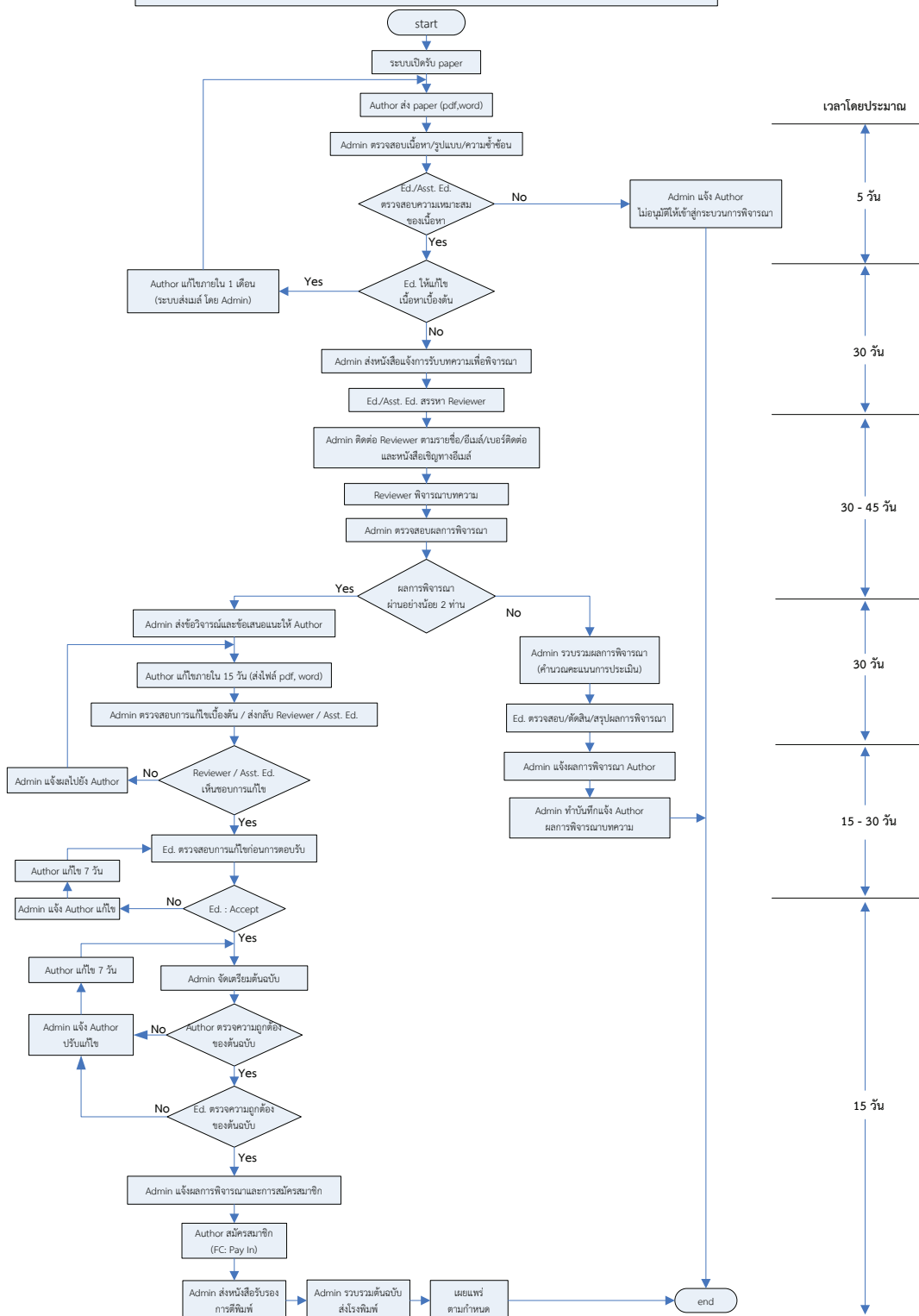
- [38] Rincón, B., Borja, R., González, J. M., Portillo, M. C., and Sáiz-Jiménez, C. (2008). Influence of Organic Loading Rate and Hydraulic Retention time on the Performance, Stability and Microbial Communities of One-Stage Anaerobic Digestion of Two-Phase Olive Mill Solid Residue. **Biochemical Engineering Journal**. Vol. 40, Issue 2, pp. 253-261. DOI: 10.1016/j.bej.2007.12.019
- [39] He, J., Wang, X., Yin, X. B., Li, Q., Li, X., Zhang, Y. F., and Deng, Y. (2018). Insights Into Biomethane Production and Microbial Community Succession During Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Waste Cooking oil Under Different Organic Loading Rates. **AMB Express**. Vol. 8, No. 1, pp. 1-12. DOI: 10.1186/s13568-018-0623-2
- [40] Franke-Whittle, I. H., Walter, A., Ebner, C., and Insam, H. (2014). Investigation Into the Effect of High Concentrations of Volatile Fatty Acids in Anaerobic Digestion on Methanogenic Communities. **Waste Management**. Vol. 34, Issue 11, pp. 2080-2089. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.07.020
- [41] Mogens, H., Mark, V. L., George, E., and Damir B. (2008). **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design**. IWA Publishing
- [42] Masila, N., Salmi, N. A. S., Omar, S. J. E., Mohd, Z. S., and Ku, H. K. H. (2017). Factors Affecting Production of Biogas from Organic solid Waste via Anaerobic Digestion Process: A Review. **Journal of Solid State Science & Technology**. Vol. 25, No. 1, pp. 29-39
- [43] Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., and Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. Vol. 15, No. 10, pp. 1-16. DOI: 10.3390/ijerph15102224
- [44] Chen, C., Guo, W., Ngo, H. H., Lee, D. J., Tung, K. L., Jin, P., Wangd, J., and Wud, Y. (2016). Challenges in Biogas Production from Anaerobic Membrane Bioreactors. **Renewable Energy**. Vol. 98, pp. 120-134
- [45] Boonyakitsombut, S., Kim, M. I., Ahn, Y. H., and Speece, R. E. (2002). Degradation of Propionate and its Precursors: The Role of Nutrient Supplementation. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 6, Issue 4, pp. 379-387. DOI: 10.1007/BF02841992
- [46] Kozłowski, K., Mazurkiewicz, J., Chełkowski, D., Jeżowska, A., Cieślík, M., Brzoski, M., Smurzyńska1, A., Dongmin, Y., and Wei, Q. (2018). The Effect of Mixing During Laboratory Fermentation of Maize Straw with Thermophilic Technology. **Journal of Ecological Engineering**. Vol. 19, No. 5, pp. 93-98. DOI: 10.12911/22998993/91270
- [47] Lili, M., Biro, G., Sulyok, E., Petis, M., Borbely, J., and Tamas, J. (2011). Novel Approach on the Basis of FOS/TAC Method. In **Proceeding International Symposia Risk Factors for Environment and Food Safety & Natural Resources and Sustainable Development & 50 Years of Agriculture Researche in Oradea**; University of Oradea, Oradea: Faculty of Environmental Protection. pp. 802-807



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ
3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- ระยะขอบ
 - ขอบบน (Top Margin) 2.54 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.54 ซม.
 - ขอบขวา (Right Margin) 2.54 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 3.17 ซม.
- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า
- รูปแบบตัวอักษร บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK
บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman
- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า
- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียน ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 และจัดชิดซ้าย
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย
- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 14
- ที่อยู่ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 13
ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 11
- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย” “สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
 - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา
 - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
 - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
 - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา

- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 11

- ชื่อตาราง

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “ตารางที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านบน ขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา
วางด้านบน ขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 11 ไม่หนา

- ชื่อรูปภาพ

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “รูปที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านล่างจัดขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Figure x” ใช้ขนาดตัวอักษร 11 ตัวหนา
วางด้านล่างจัดขีดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 11 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป
บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมี
ภาษาไทย

2. ชื่อผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียด
ต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding
Author) ด้วยการระบุ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ด้วย
กำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. บทคัดย่อ (Abstract) ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา
ประกอบไปด้วยเนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียน
ลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ
1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมาย
เดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ

4. คำสำคัญ (Key words) เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้น
ในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มี
ความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น
จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีความสำคัญได้น้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

****หมายเหตุ :** เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (**Introduction**) เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (**Materials and Methods**) / วิธีดำเนินการวิจัย (**Research Methodology**) อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน

3. ผลการวิจัย (**Results**) เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ และ/หรือ ตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. การอภิปรายผล (**Discussion**) เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัย และการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. บทสรุป (**Conclusion**) สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ (**Acknowledgements**) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

7. เอกสารอ้างอิง (**References**) เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหาโดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (**Introduction**) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (**Method**) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ

3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (**Results**) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็น โดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. สรุป (**Conclusion**) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. เอกสารอ้างอิง (**References**) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้รูปแบบ IEEE ระบบตัวเลข (**Numerical System**) เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมาย

วงเล็บกรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับ จากนั้นย่อไปหามาก เช่น [1] - [3] หรือ [1], [2], [5] เป็นต้น

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference list)

1) หนังสือ

[X] ผู้แต่ง.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อหนังสือ.// ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).// เมืองที่พิมพ์:/: สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น

- [1] Herren, Ray V. (1994). **The Science of Animal Agriculture**. Albany, N.Y. : Delmar Publishers.

2) หนังสือแปล

[X] ผู้แต่ง.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อเรื่องของหนังสือแปล// แปลจาก(ชื่อเรื่องในภาษาเดิม).// โดย/ ชื่อผู้แปล.// ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).// เมืองที่พิมพ์:/: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [2] Grmek, Mirko D. (1990). **History of AIDS : Emerging and Origin of a Modern Pandemic**. Translated by Russell C. Maulitz, and Jacalyn Duffin. Princeton, N.J.: University Press

3) บทความหรือบทในหนังสือ

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ชื่อเรื่อง./ ชื่อบรรณาธิการหรือผู้รวบรวม(ถ้ามี).// หน้า/เลขหน้า.// สถานที่พิมพ์:/: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [3] McTaggart, J. M. E. (1993). The Unreality of Time. **Philosophy of Time**. Robin Le Poidevin, and Murray MacBeath, eds. pp. 23-34. Oxford : Oxford University Press

4) บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ ชื่อบรรณาธิการ(ถ้ามี).// ชื่อเรื่องรายงานการประชุม.// หน้า/เลขหน้า.// สถานที่พิมพ์:/: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [4] Beales, P. F. (1980). The Status of Malaria in Southeast Asia. **Proceedings of the Third Asian Congress of Pediatrics**. Aree Valyasevi, and Vidhaya Mekanandha, eds. pp. 52-58. Bangkok : Bangkok Medical Publisher

5) วารสาร

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ ชื่อวารสาร.// ปีที่./ ฉบับที่./ หน้า/เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

- [5] Vitsanusat, A. and Phachirarat, S. (2015). Measurement of Radon in Drinking Water at Amphur Meaung, Khonkhaen Province with Ionization chamber. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 12-20

6) บทความในหนังสือพิมพ์

[X] ชื่อผู้เขียน.// (ปี./วัน./เดือน).// ชื่อบทความ./ใน/ชื่อหนังสือพิมพ์./หน้า/เลขหน้า
ตัวอย่างเช่น

- [6] Vitit Muntarbhorn. (1994. 21. March). **The Sale of Children as a Global Dilemma.**
Bangkok Post. p. 4

7) บทความในสารานุกรม

[X] ชื่อผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ใน/ชื่อสารานุกรม.// เล่มที่:/ หน้า/เลขหน้า-เลขหน้า
ตัวอย่างเช่น

- [7] Morrow, Blaine Victor. (1993). Standards for CD-Rom Retrieval. **Encyclopedia of Library and Information Science.** Vol. 51, pp. 380-389

8) วิทยานิพนธ์

[X] ผู้เขียนวิทยานิพนธ์.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อวิทยานิพนธ์./ระดับวิทยานิพนธ์/ชื่อสาขา/คณะ/
มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างเช่น

- [8] Phillips, O. C., Jr. (1962). **The Indfluence of Ovidd on Lucan's Bellum Civil.** Ph.D.
Dissertation University of Chicago

9) สื่ออิเล็กทรอนิกส์ (สื่ออิเล็กทรอนิกส์) : www

[X] ผู้เขียน.//ปี./ชื่อบทความ./ชื่อวารสารหรือนิตยสาร./ปีที่(เดือนหรือฉบับที่):/เลขหน้า(ถ้ามี).//
เข้าถึงเมื่อ (วัน เดือน ปีที่ค้นข้อมูล)/เข้าถึงได้จาก (ที่อยู่ของบทความหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์ URL)

ตัวอย่างเช่น

- [9] Department of the Environment and Heritage. (1999). **Guide to Department and Agency Libraries.** Access (17 November 2000). Available (<http://www.erin.gov.au/library/guide.html>)

10) ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

[X] ชื่อหน่วยงาน.// (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/เล่มที่(ถ้ามี).//ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).//เมืองที่พิมพ์:/
สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [10] Prince of Songkla University. (2009). **Annual Report 2008.** Songkhla: Prince of
Songkla University

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

[X] ชื่อบรรณาธิการ หรือผู้รวบรวม หรือผู้เรียบเรียง.// (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ.//เล่มที่ (ถ้ามี)//
ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี)//เมืองที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [11] Rueangwit Limpanat. (2000). **Local - India.** Chonburi: Department of History
Faculty of Humanities And social science Burapa university

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภูษนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ได้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภษย่อย ควรจัดให้รูปภษย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อยที่ 1



(ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

- สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),... แทนการกำหนดรูปภาพย่อย
- 7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด
 - 8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกันเพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ
 - 9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
 - 10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด
- 6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

Table Head	Table Column Head	
	Subhead (unit)	Subhead (unit)
xxx	123	456
xxx	321	654

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

- 1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman ขนาด 11
- 3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

$$y = ax + b \quad (1)$$

- 4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้ระบุเลขและเขียนไว้ในวงเล็บ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

- 1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutjo/index> โดยดำเนินการสมัครสมาชิก และชำระค่าสมาชิกจำนวน 1,000 บาท ซึ่งจะมีอายุสมาชิก 1 ปี
- 2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก.....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ ☐ บทความจากวิทยานิพนธ์/สารนิพนธ์

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม

1.

2.

3.

4.

สาขาหลักของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ วิศวกรรมศาสตร์ ENG ☐ เกษตรศาสตร์ AGR ☐ สหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถิติ IG

สาขารองของบทความ (สามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)

☐ ไฟฟ้า ☐ อิเล็กทรอนิกส์ ☐ คอมพิวเตอร์

☐ สื่อสาร-โทรคมนาคม ☐ ลัทธิศาสตร์ ☐ ศิลปะและการออกแบบ

☐ วัสดุและโลหะ ☐ โยธา-สำรวจ ☐ สิ่งแวดล้อม

☐ พลังงาน ☐ สถาปัตยกรรม ☐ พืชไร่

☐ พืชสวน ☐ วิทยาศาสตร์การอาหาร ☐ ICT

☐ อุตสาหการ ☐ เคมี ☐ คณิตศาสตร์

☐ สถิติประยุกต์ ☐ เครื่องกล ☐ โภชนศาสตร์

☐ ฟิสิกส์ ☐ อื่น ๆ

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

2. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์
2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ
3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำผู้เขียน” ที่ทางกองบรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาดำเนินการที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง
.....
โดย
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสาร มทร.อีสาน
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)

(.....)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ที่อยู่

.....โทรศัพท์.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ.....

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

☐ วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี มี 3 ฉบับ 1,000 บาท)

โดย ☐ สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

☐ ต่ออายุสมาชิก จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน.....บาท

(ตัวอักษร).....

ซึ่งได้ชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการจ่ายเงินและใบสมัครสมาชิก มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน การสมัครสมาชิกจะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้สมัคร
(.....)



หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
สังกัดหน่วยงาน
มีความประสงค์ขออนุญาตพิจารณาบทความเรื่อง
.....
.....
ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่..... และยินยอม
รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน บาท
(.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย
ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย
มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการถอนบทความ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่
E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลการชำระเงิน
จะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ
(.....)



RMUTI

ราชมงคลอีสาน



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol. 13 No. 3 September - December 2020



Institute of Research and Development

Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064

E-mail : rmuti.journal@gmail.com <http://ird.rmuti.ac.th/2015>