

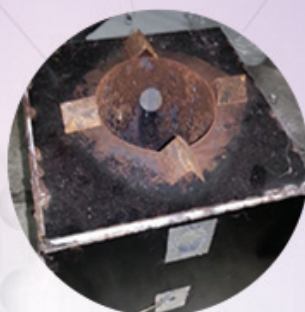
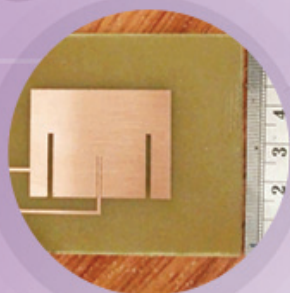
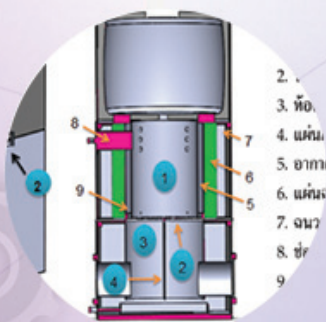


วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2562



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

RMUTI

วารสาร มทร.อีสาน

RMUTI JOURNAL

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน เน้นบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิชาดังต่อไปนี้

1. สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาวิชาเกษตรศาสตร์
3. สาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เป็นสาขาที่ศึกษาแนวความคิด ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ตั้งแต่ระดับอนุภาค ระดับโมเลกุลไปจนถึงทั้งจักรวาล ปฏิบัติทางเคมี ระหว่างอะตอมและโมเลกุล อันเชื่อมโยงถึงองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต และวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต รวมถึงแนวความคิดพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีความสำคัญและมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน ตลอดจนศึกษาถึงประเด็นของการตกเถียงที่สำคัญๆ 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 และบทความในวารสารเป็นแนวความคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสาร มทร.อีสาน RMUTI JOURNAL

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวรรณ ทาสุข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณอรรถ	เปรมปรีดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมณะเสวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยหาดใหญ่
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยัมนิรญา	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประลัมภ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธารีบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดลิ่งซ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	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.ชนิดา
ดร.เยาวพา
ดร.สุกัญญา
ดร.เดือนเพ็ญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์

นางสาวอรุณรักษ์

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
กอเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
สิงห์บุญชัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดุ้ยจินดาชบาพร	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
เยรัมย์ย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

วงศ์ไตรรัตน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

ศิราชมัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

บทความวิจัย

Napier Grass Pyrolysis: Kinetic and Thermodynamics Analysis Kanit Manatura	1
สายอากาศขนาดกะทัดรัดที่แพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวสำหรับการสื่อสารไร้สาย สุธาสินี ละมุลตรี และชาลี จันศรี	14
การศึกษาประสิทธิภาพเตาถ่านแบบช่องหน้าเตา 2 ช่อง วศิษฐ ธีระเจตกุล, อนุชา ดีหลี่ และเผด็จ จันทรวีเศษ	29
การตรวจสอบวัตถุโลหะใต้ดินในชั้นดินที่มีความนำไฟฟ้าสูงด้วยวิธีการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ชนะรบ วิชาลัย	41
คุณสมบัติทางเคมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและการทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มสายชูหมัก จากข้าว 3 สายพันธุ์ วิลาวัลย์ บุญยสุภา, กรรณิการ์ ทองคอนเปரியง, กมลรัตน์ สีหาบุญทอง, วุฒิพงษ์ สูงพล, วิวารณ กั้นโบราณ, นริกร ชุมด้วง, วรณิกา จันทรงาม, อมรรัตน์ ทองดี, อังสุมา ปาเส และปิยวัฒน์ ศักดิ์ศรีบุญดี	52
ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและความคงตัวของเยลลี่ลูกหยีฮาลาลระหว่างการเก็บรักษา รอมลี เจดอเลาะ และชูไฮมิน เจ๊ะมะลี	62
อุบัติการณ์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟทั้งหมดในกุ้งขาว (<i>Litopenaeus vannamei</i>) ที่จำหน่ายในจังหวัดชลบุรี ประเทศไทย สุภัณฑิต นิมรัตน์, วิจิตรา มุลิราช และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย	75
สารประกอบบิวทิลทินในหอยแมลงภู่นิคม <i>Perna viridis</i> บริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด ชนพพล กลิ่นกลบ, กิตติยา เขียวแมน, นิตยา สุดศิริ, อาภาพร บุญมี และสุทิน กิ่งทอง	87
การพัฒนาผลิตภัณฑ์เคบะเค้กโดยใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี ไชยสิทธิ์ พันธุ์พูนจินดา	101
ระบบโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลสำหรับการให้บริการด้านอาหารในธุรกิจบริการด้วยดรกรศาสตร์แบบคลุมเครือ กรณีศึกษา ห้องครัวเปิดของร้านอาหารญี่ปุ่น ศราวุธ แรมจันทร์	115
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากหางค่าง เขื่องใหญ่ มะเดื่อดิน และผลด้านความเป็นพิษ ต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ นวลไย ญารักษา	138
บทความวิชาการ	
เครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับสถานการณ์ภัยพิบัติ ณัฐกานต์ ชุติมารังสรรค์ และวีรยุทธ ชุติมารังสรรค์	149

Table of Contents

Research Articles

Napier Grass Pyrolysis: Kinetic and Thermodynamics Analysis	1
Kanit Manatura	
A Compact Unidirectional Pattern Antenna for Wireless Communications	14
Suthasinee Lamultree and Chalee Jansri	
A Study of the Thermal Efficiency of A Double-Air Inlet Doors Charcoal Stove	29
Vasith Teerajetgu, Anucha Deelee and Phadet Junwiset	
An Investigation of Buried Metal Object in High Electrical Conductivity Soil Layer	41
Using Electrical Resistivity Survey Method	
Chanarop Vichalai	
Chemical Properties, Antioxidant Activity and Sensory Evaluation of	52
Fermented Vinegar from 3 Cultivars of Rice	
Wilawan Boonsupa, Kannikar Tongdonpriang, Kamonrat Seehabuntong, Woottipong Soongpon, Wiwapron Kinboran, Nareeporn Chumduang, Wannipha Janngam, Amonrat Thongdee, Ungsuma Pase, and Piyawat Saksriboondee	
Effect of Hydrocolloids on Quality and Stability of Halal Velvet Tamarind	62
Jelly During Storage	
Romlee Chedoloh and Suhaimin Chehmalee	
Occurrence of Total Heterotrophic Bacteria Isolated from <i>Litopenaeus vannamei</i>	75
Sold in Chon Buri Province, Thailand	
Subuntith Nimrat, Wigitra Musirach, and Verapong Vuthiphandchai	
Butyltin Compounds in Green mussel (<i>Perna viridis</i>) from the Coasts of	87
Chonburi, Rayong and Trat Provinces	
Chanoppholm Klinklob, Kittiya Shearman, Nittaya Sudsiri, Apaporn Boonmee, and Sutin Kingtong	
Development of Crepe Cake using Riceberry Rice Flour Instead of Wheat Flour	101
Chaiyasit Punfujinda	
Digital Logistics for Food Service in Service Business by Fuzzy Logic: A Case Study	115
of Japanese Teppanyaki Kitchen	
Sarawut Ramjan	
Antioxidant Activity of <i>Markhamia stipulata</i>, <i>Caryota maxima</i>, <i>Amphineurion</i>	138
<i>marginatum</i> Extracts and Cytotoxicity Effect on Human Dermal Fibroblast Cells	
Nualyai Yaraksa	
Academic Articles	
Ad Hoc Network for Disaster Scenario	149
Nattakarn Shutimarrungson and Werayut Shutimarrungson	

Napier Grass Pyrolysis: Kinetic and Thermodynamics Analysis

Kanit Manatura^{1*}

Received: January 5, 2019; Revised: February 27, 2019; Accepted: March 5, 2019

Abstract

The pyrolysis behavior, kinetics and thermodynamics analysis of Napier grass were studied. A thermogravimetric analyzer (TGA) and differential thermal analyzer (DTA), at four heating rates: 5, 10, 20 and 30 °C/min were used in the experiments. Pyrolysis parameters were determined using model-fitting with the Coat-Redfern method. The results showed that the grass was roughly decomposed into moisture removal and volatiles release zones. The approximate peak temperature occurred in the major stage during 298 to 337 °C. The characteristic temperatures moved to a higher temperature during thermal degradation. The apparent activation energy and pre-exponential factor also increased with increasing heating rate. The positive values of enthalpies (ΔH), Gibbs free energies (ΔG) and the negative value of entropies (ΔS) exhibited that the Napier grass was endothermic but some exothermic reactions were also found, due to the presence of oxygen in its original components.

Keywords: Napier Grass; Pyrolysis; Kinetic Models; Thermodynamics Parameters

¹ Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhonpatom

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

Introduction

Napier grass is known as elephant grass (*Pennisetum purpureum*) or Uganda grass [1]. It is one type of perennial grasses that include Miscanthus, Switch grass and Reed canary grass [2] that can be used as a renewable resource. Napier grass originates from Africa and it is planted in many countries such as India, China, Brazil, the USA and some European countries [3]. The advantages of Napier grass include easy planting, fast growth, high yield and a mature height approaching 3 - 5 feet [4]. It can be cultivated up to four times in a year with a ratio of energy output to energy input of around 25 : 1 [1] and an annual yield in the range of 10 - 20 oven dry tons per hectare, with some nutrient input required during cultivation [5] - [6].

Fuel products from Napier grass include bioethanol, pyrolysis oil and biogas [7]. The production of bioethanol and pyrolysis oil are more efficient than that of biogas because they are easy to store and transport. The production of pyrolysis oil has more ways of waste recycling and energy recovery than that of bioethanol [7].

Pyrolysis is a thermal conversion process involving biomass, with the feedstock (biomass) converted into solid (biochar), liquid (bio-oil, pyrolysis oil) or gas (biogas) to produce heat, power, or other high value chemical products [2]. During pyrolysis, largely complex hydrocarbon molecules of the biomass decompose into smaller molecules [8]. Moisture release, hemicellulose decomposition, cellulose decomposition and lignin decomposition occur during the process [9]. Thermogravimetric analysis (TGA) is one of the most common and simplest methods to investigate the kinetics and thermodynamics properties of biomass during the pyrolysis process [10].

In kinetic analysis, an iso-conversional model (model-free) and model fitting are applied to simulate kinetic parameters. The model-free methods are accurate and time saving compared to other model-fitting methods [10] when the mass transfer resistance is not counted. It also shows various mechanisms on the conversion process by using many heating rate data [11]. The Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), the Flynn-Wall-Ozawa (FWO) or Friedman methods [2], [10] are examples of the model-free methods that are mainly used to evaluate the activation energy on conversion. Model-fitting methods are matched with choosing experimental results with the best statistical fit of kinetic factors [12]. Magalhães, D., et al. [11] and Freeman, E. S. and Carroll, B. [13] developed model-fitting methods. Many studies on grass and biomass pyrolysis with model-free and model-fitting have been reported in the literatures.

Mohammed, I. Y., et al. [1] studied the effects of temperature, heating rate and nitrogen flow rate on the intermediate pyrolysis of Napier grass in a vertical fixed-bed

tubular reactor. They applied a response surface methodology with a central composite design to model the process and to optimize the process parameters. They found that the optimum bio-oil yield of 50.57 wt% occurred at 600 °C, 50 °C/min with 5 L/min of nitrogen flow.

Collazzo, G. C., et al. [2] investigated the thermal degradation and kinetics of elephant grass in an inert atmosphere using a non-isothermal thermogravimetric analysis method. Model-free methods including KAS and FWO were applied to evaluate the kinetic parameters. The average activation energy of KAS and FWO were 183.8 ± 11.3 kJ/mol and 183.8 ± 10.4 kJ/mol from the conversion of 0 to 0.6 respectively. The activation energies of hemicellulose, cellulose and lignin decomposition were 46.5 - 65.5 kJ/mol, 108 - 127.2 kJ/mol, and 45.6 - 53.5 kJ/mol respectively.

Manatura, K., et al. [14] performed the thermogravimetric analysis method of raw and torrefied *Cryptomeria japonica* at 250 °C and 350 °C in a pure CO₂ environment at three heating rates of 10, 15 and 20 °C/min. They pointed out that thermal degradation occurred in three different stages consisting of dehydration, hemicellulose-cellulose and lignin decomposition at 30.2 - 102.6 °C, 222.6 - 422.1 °C and 426 - 847.2 °C with activation energies of 77, 114 and 50 kJ/mol, respectively. They concluded that increasing the heating rate shifts the mass loss toward a higher temperature, increasing the activation energy and the pre-exponential factor.

The aim of this research is to establish the thermal characteristics of the Napier grass and to describe the pyrolysis characters by fitting a model using Coat-Redfern method. TGA and DTG experiments were addressed in an inert environment at different heating rates. While many reports have considered the kinetic behaviours and parameters of Napier grass, there is still a lack of description of the thermodynamic parameters for the biomass. Thus, this study contributes to the thermodynamic parameters and the gained activation energies can be used to determine the changes of enthalpy (ΔH), free Gibbs energy (ΔG), and entropy (ΔS). The results are useful for the understanding of the Napier grass pyrolysis process and the optimal design of corresponding pyrolysis and gasifier reactors especially downdraft gasifiers.

Materials and methods

Biomass characteristics

Napier grass (Pakchong 1) was used in this study. It was cultivated and collected from the Kasetsart University Kamphaeng Saen campus, Nakhonpathom, Thailand. The Napier grass was sun-dried for two days before being chopped and sieved to a particle size of approximately 1 - 2 mm.

The proximate analysis and ultimate analysis of the grass were characterized according to ASTM D 7582, D 5373, D 4239 and D 5865 and the results are shown in Table 1. These results were close to the values reported by Mesa-Pérez, J. M., et al. [15]. It should be noted that the volatile matter of Napier grass is high (67.50 wt.%), indicating Napier grass is a potential feedstock for the pyrolysis processes.

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Napier grass

Characteristics	This study	Mesa-Pérez, J. M., et al. [15]
Proximate analysis (wt%, ar)		
Moisture	10.94	12.20
Volatile matter	67.50	67.34
Fixed carbon	15.21	15.54
Ash	6.35	4.92
Ultimate analysis (wt%, dry)		
C	40.03	41.16
H	6.44	5.55
O	46.49	46.59
N	0.58	1.78
S	0.11	-
HHV(MJ/kg)	15.75	-

Thermogravimetric analysis

The pyrolysis characteristics of the Napier samples were performed using a TGA analyzer (SDT 2960 Simultaneous, USA) in a nitrogen environment with a flow rate of 100 mL/min. Each Napier grass sample (7 - 10 mg) was placed in an aluminum pan in order to minimize heat and mass transfer phenomena. The sample was heated from 30 °C to 800 °C at four different heating rate (5, 10, 20 and 30 °C/min). The experiment was conducted three times to confirm acceptable results. During the heating process, variations of the mass loss and its derivative with respect to the time and temperature were recorded.

Kinetic analysis

During the pyrolysis process, the conversion (X) of biomass can be represented by

$$X = \frac{w_i - w_t}{w_i - w_f} \quad (1)$$

where w_i , w_t and w_f are the initial sample mass, the sample mass at time t , and the final sample mass, respectively. The rate of conversion was expressed as:

$$\frac{dX}{dt} = k(T)f(X) \quad (2)$$

where k is the decomposition rate constant, and $f(X)$ is the reaction model which expresses the dependence of the conversion rate on the conversion. A heterogeneous function of uniform kinetic reactions of the first order, $f(X)$ can be written as:

$$f(X) = (1 - X)^n \quad (3)$$

The rate constant (k) is temperature dependent which generally is described by the Arrhenius equation as [16]:

$$k = Ae^{-E_a / RT} \quad (4)$$

where A is the pre-exponential factor (s^{-1}), E_a is the activation energy of the decomposition reaction (kJ/mol), R is the universal gas constant, 8.314 J/(mol.K), and T is the absolute temperature (K). Thus, the rate constant can be expanded to:

$$\frac{dX}{dt} = Ae^{-E_a / RT} (1 - X)^n \quad (5)$$

In non-isothermal analysis, the heating rate varies with the reaction time and temperature at a constant heating rate $\left(\frac{dT}{dt} = \beta\right)$ and can be rewritten as [2]:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{A}{\beta} e^{-E / RT} (1 - X)^n \quad (6)$$

This method is a model fitting method that has been widely used in the kinetics of coal and biomass combustion/pyrolysis [11]. It is known that the Coat-Redfern method and can be written as:

$$\text{For } n = 1, \quad \ln\left[-\frac{\ln(1 - X)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\right] - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

$$\text{For } n \neq 1, \quad \ln\left[\frac{1 - (1 - X)^{1-n}}{T^2(1 - n)}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\right] - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

For a plot of Z with $-\frac{1}{T}$ using linear regression with a high correlation coefficient (R^2), E_a can be calculated from the slope. In this case, Z is $\left[-\frac{\ln(1-X)}{T^2}\right]$ for $n = 1$ or $\ln\left[\frac{1-(1-X)^{1-n}}{T^2(1-n)}\right]$ for $n \neq 1$. The intercept $\left[\frac{AR}{BE_a}\right]$ can also be calculated as A .

Thermodynamic analysis

In this study, the thermodynamics parameters of enthalpies (ΔH), Gibbs free energies (ΔG) and entropies (ΔS) were evaluated using Equation (9) - (11).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (9)$$

$$\Delta G = E_a + RT_p \ln\left(\frac{K_B T_p}{hA}\right) \quad (10)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T_p} \quad (11)$$

where K_B , h and T_p are the Boltzmann constant = 1.381×10^{-23} J/K, Plank constant = 6.626×10^{-34} J.s and peak temperature, respectively.

Results and Discussion

Pyrolysis characteristics

The mass loss (TGA) and the rate of mass loss (DTG) for the Napier samples in an inert environment with different pyrolysis temperatures at four heating rates (5, 10, 20 and 30 °C/min) are shown in Figure 1 and 2 respectively.

The characteristics of the samples can be divided into three different stages. The first stage (stage I) represents the moisture removal zone. It occurs at temperatures from 30.2 to 120.1 °C. The mass loss was 8.6 % which agreed with the moisture content in Table 1. The rate of mass loss was quite low in the range 0.1 - 0.21 °C/min.

The second stage (stage II), temperature varied from 200 to 370 °C. The mass loss was about 53 % in this stage while the rate of mass loss was quite high (0.6 to 1 mg/°C). The maximum lost occurred at 335 °C. It was clear that the main volatiles released in this range were in line with Yahiaoui, M., et al. [16] and the volatile content of the sample in Table 1. According to [10], the decomposition of hemicellulose and cellulose occurs in the temperature range 180 - 285 °C and 250 - 360 °C, respectively. Thus, the decomposition

of hemicellulose and cellulose occurred in this second stage. The third stage, (stage III) had a long tail with small values of mass loss and the rate of mass loss. Lignin decomposition occurred in this stage from 350 to 600 °C and furthermore, the temperature until the end of the process left a final solid residue including fixed carbon and ash [10].

The influence of heating rate is also shown in Figure 1 and 2. Raising the heating rate leads to serving a large amount of thermal energy into the system and a longer time may be consumed for the carrier gas to reach an equilibrium state. Thus, the temperature required to decompose the sample also raises causing the maximum rate (peak) curve to move to the right [17]. Increasing the heating rate from 5 to 30 °C/min did not affect the shape of DTG, but shifted peaks to the higher temperature.

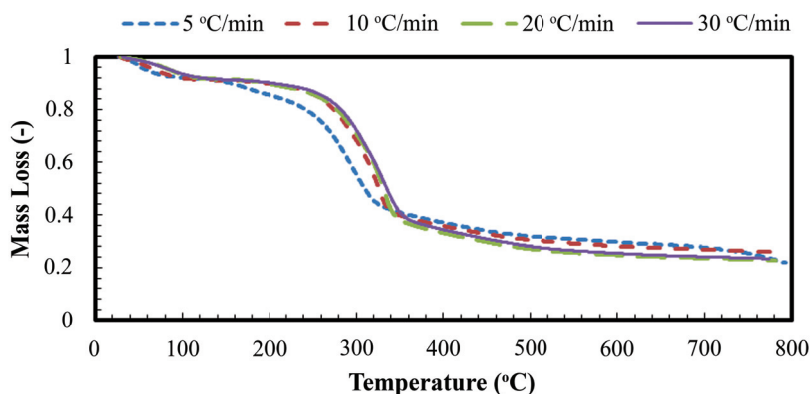


Figure 1 Mass loss curve for heating rates of 5, 10, 20 and 30 °C/min

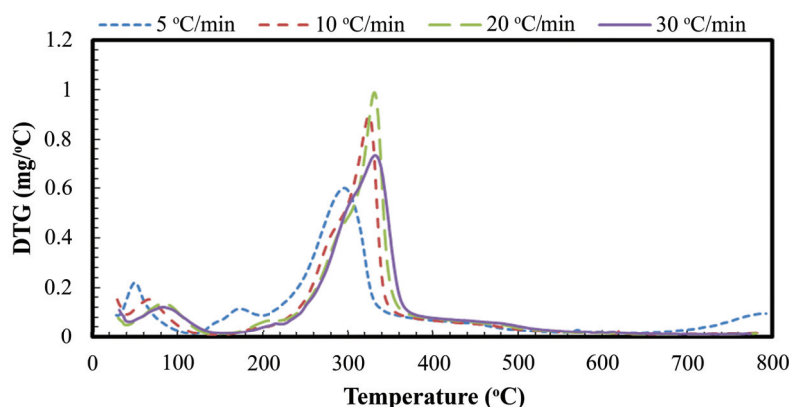


Figure 2 Rate of mass loss curve for heating rates of 5, 10, 20 and 30 °C/min

Kinetic analysis

The results from the TGA and DTG of Napier grass were used to simulate kinetic parameters including the activation energy (E_a), pre-exponential factor (A) and reaction order (n). The fitting methods of Coat-Redfern using Equation (7) and (8) was applied in this study.

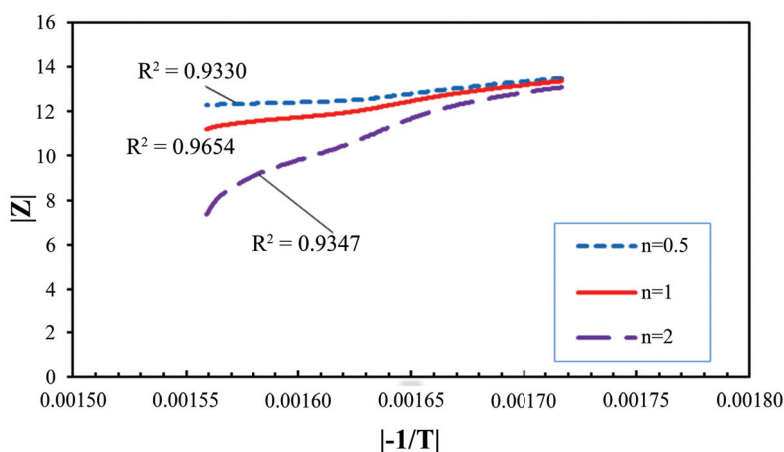


Figure 3 Reaction orders, $n = 0.5, 1$ and 2 at a heating rate of $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Figure 3 displays the reaction orders (n) of the relationship between Z and $-1/T$ for heating rate of $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. It can be seen that most values of n had high values of R^2 (> 0.9) in the range of $0.9330 - 0.9660$. It was found that $n = 1$ produced the highest value of R^2 compared with the other values.

Table 2 also shows the kinetic parameters from the various values of reaction orders at a heating rate of $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Various values of n affected the kinetic factors as seen from Table 2. Raising n from 0.5 to 2 led to increase in E_a and A . It should be noted that the reaction order of 1 represented the case for heating rate of $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ that was also confirmed by the calculation from Figure 3.

Table 2 Kinetic parameters of Napier grass for reaction orders of $0.5, 1$ and 2

n	E_a (kJ/mol)	A (s^{-1})	R^2 (-)
0.5	97.63	2.70×10^6	0.9330
1	114.09	1.29×10^8	0.9654
2	163.62	1.28×10^{13}	0.9347

Table 3 Kinetic parameters of Napier grass obtained using Coat-Redfern model for heating rates of 5, 10, 20 and 30 °C/min

Heating rate (°C/min)	T _i * (°C)	T _p ** (°C)	T _f *** (°C)	E _a (kJ/mol)	A (s ⁻¹)	n (-)	R ² (-)
5	200	298.1	353	90.91	5.84×10^5	1	0.9725
10	201	325.2	357	102.16	7.84×10^6	1	0.9758
20	227	333.8	370	114.09	1.28×10^8	1	0.9654
30	228	337.5	375	113.79	1.58×10^8	1	0.9637

*T_i : Initial decomposition temperature

**T_p : Maximum decomposition rate temperature

***T_f : Final decomposition temperature

Table 3 presents the characteristics of temperature and kinetic parameters of Napier grass at different heating rates. The data in this table can simulate the mass loss using integral numeration with Equation (5) for the selected stage as shown in Figure 4.

When the heating rate was raised, the temperature characteristics (T_i, T_p and T_f) moved up to a higher degree during thermal degradation. The kinetic parameters also increased with the rising heating rate from 10 to 30 °C/min. It can be noticed that the kinetic parameters at 5 °C/min were lower than at 10 °C/min. This may have been caused by the low reaction order at 10 °C/min leading to lower values of the parameters. The thermal characteristics of Napier starting from initial temperature (T_i) to final temperature (T_f) relates to moisture removal and light volatile releasing. The complex hydrocarbon molecules start to break down when the pyrolysis temperature increases.

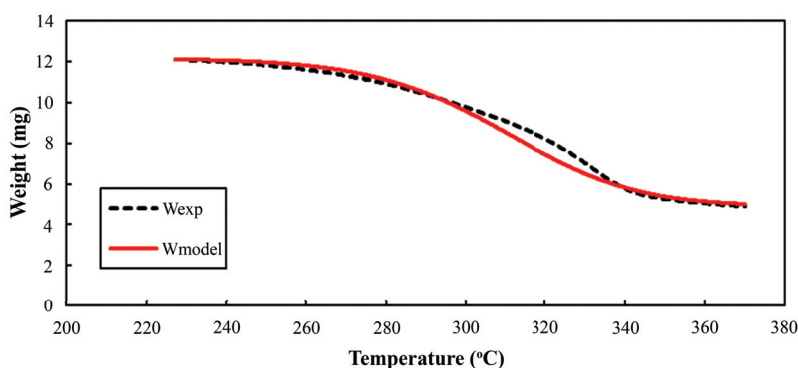


Figure 4 Predicted (Wmodel) and experimental (Wexp) values of mass loss at 20 °C/min

Figure 4 presents the comparison between the simulated and measured data at 227 - 370 °C at 20 °C/min. The simulated curve had a good fit for the range 227 - 300 °C. However, the simulated curve gradually diverted from 300 - 335 °C, because the reaction in this range was quite rapid due to cellulose degradation [2]. Another value of n between 1 and 2 can be used to modify this case to represent the 5 - 10 % error resulting from using the kinetic model for biomass conversion in a linear heating environment [14].

Thermodynamic analysis

To design the large scale pyrolysis process efficiency, not only the kinetic factors but also the thermodynamics factors should be known [9]. In this study, new knowledge of Napier grass in terms of its thermodynamics parameters are presented. The thermodynamic parameters (ΔH , ΔG and ΔS) were determined at peak temperature (T_p) because it represented the maximum rate of Napier process [9]. Table 4 shows the thermodynamic parameters including ΔH , ΔG , and ΔS from the pyrolysis of Napier grass on T_p at 20 °C/min.

Table 4 Thermodynamic parameters of Napier grass on characteristics temperature for heating rate of 20 °C/min

Sample	T_p (°C)	E_a (MJ/kmol)	ΔH (MJ/kmol)	ΔG (MJ/kmol)	ΔS (MJ/(kmol.K))
Rice bran [9]	301.43	164.78	159.96	167.18	-12.46
Chicken manure [9]	330.55	175.33	170.03	175.30	-8.26
Napier (This study)	333.80	114.03	131.40	168.12	-60.52

The ΔH was the deviation of energy between the reagent and the activated complex depended on activation energies [9]. According to Table 4, the positive values of ΔH represented an endothermic reaction which requires an external heat source to convert the samples to their transition state [18] - [19].

The ΔG value is the amount of available energy for biomass in pyrolysis process [18], [20]. The ΔG of Napier grass was 131.40 MJ/kmol which was lower when compared with the ΔG values of the rice bran (167 MJ/kmol) and chicken manure (175 MJ/kmol). It pointed that the pyrolysis of Napier grass consumed less energy compared to the rice bran, and chicken manure.

The ΔS value referred to disorder or randomness of energy and matter in a system [9]. It showed how a state of the sample was near or far from its own thermodynamic equilibrium. Entropy also showed the degree of arrangement of the carbon layers in samples [9].

Their negative values showed exothermic reaction which implied an amount of energy was transferred out of the system to environment. It can be noticed that the absolute values of ΔS and ΔG were contrasted. These may refer to the fact that the absolute values of ΔS for the pyrolysis of Napier was higher than that of the other samples, thus this indicated that Napier grass required more energy to reduce its degree of arrangement.

Conclusions

The kinetic and thermodynamics characteristics of Napier grass on the pyrolysis process were identified using TGA experiments with the model-fitting method. The process can be roughly decomposed into moisture and volatiles components. The temperatures of decomposition and activation energies occurred in the ranges of 200 to 338 °C and 102 to 136 MJ/kmol at heating rate of 5, 10, 20 and 30 °C/min. An endothermic reaction represented the Napier grass pyrolysis due to the positive ΔH and ΔG and the negative ΔS at characteristic temperatures. The existence of oxygen in the Napier grass represented some exothermic reactions.

Acknowledgements

This research was supported by a grant from the Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Thailand. The authors also thank the Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI) for English editing assistance.

References

- [1] Mohammed, I. Y., Abakrb, Y. A., Yusupc, S., and Kazid, K. F. (2017). Valorization of Napier Grass Via Intermediate Pyrolysis: Optimization Using Response Surface Methodology and Pyrolysis Products Characterization. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 142, Part 4, pp. 1848-1866. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.099
- [2] Collazzo, G. C., Broetto, C. C., Perondi, D., Junges, J., Dettmer, A., Dornelles Filho, A. A., Foletto, E. L., and Godinho, M. (2017). A Detailed Non-Isothermal Kinetic Study of Elephant Grass Pyrolysis from Different Models. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 110, Issue 5, pp. 1200-1211. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.012
- [3] Wang, D., Poss, J. A., Donovan, T. J., Shannon, M. C., and Lesch, S. M. (2002). Biophysical Properties and Biomass Production of Elephant Grass Under Saline Conditions. **Journal of Arid Environments**. Vol. 52, Issue 4, pp. 447-456. DOI: 10.1006/jare.2002.1016

- [4] Braga, R. M., Melo, D. A., Aquino, F. M., Freitas, J. C., Marcus A. F. M., Joana M. F. B., and Maria S. B. F. (2014). Characterization and Comparative Study of Pyrolysis Kinetics of the Rice Husk and the Elephant Grass. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. Vol. 115, Issue 2, pp. 1915-1920. DOI:10.1007/s10973-013-3503-7
- [5] Richter, G. M., Riche, A. B., Dailey, A. G., Gezan, S. A., and Powlson, D. S. (2008). Is UK Biofuel Supply from Miscanthus Water-Limited?. **Soil Use and Management**. Vol. 24, Issue 3, pp. 235-245. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2008.00156.x
- [6] Cadoux, S., Riche, A. B., Yates, N. E., and Machet, J. M. (2012). Nutrient Requirements of Miscanthus x Giganteus: Conclusions from a Review of Published Studies. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 38, pp. 14-22. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.015
- [7] Suntivarakorn, R., Treedet, W., Singbua, P., and Teeramaetawat, N. (2018). Fast Pyrolysis from Napier Grass for Pyrolysis Oil Production by Using Circulating Fluidized Bed Reactor: Improvement of Pyrolysis System and Production Cost. **Energy Reports**. Vol. 4, pp. 565-575. DOI: 10.1016/j.egyr.2018.08.004
- [8] Basu, P. (2013). **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction**. Practical Design and Theory. 2nd Edition Academic Press. p. 147
- [9] Xu, Y. and Chen, B. (2013). Investigation of Thermodynamic Parameters in the Pyrolysis Conversion of Biomass and Manure to Biochars Using Thermogravimetric Analysis. **Bioresource Technology**. Vol. 146, pp. 485-493. DOI: DOI: 10.1016/j.biortech.2013.07.086
- [10] Chandrasekaran, A., Ramachandran, S., and Subbiah, S. (2017). Determination of Kinetic Parameters in the Pyrolysis Operation and Thermal Behavior of Prosopis Juliflora Using Thermogravimetric Analysis. **Bioresource Technology**. Vol. 233, pp. 413-422. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.119
- [11] Magalhães, D., Kazanç, K., Riaza, J., Erensoy, S., Kabaklı, Ö., and Chalmers, H. (2017). Combustion of Turkish Lignites and Olive Residue: Experiments and Kinetic Modelling. **Fuel**. Vol. 203, pp. 868-876. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.05.050
- [12] Gil, M.V., Casal, D., Pevida, C., Pis, J. J., and Rubiera, F. (2010). Thermal Behaviour and Kinetics of Coal/Biomass Blends During Co-Combustion. **Bioresource Technology**. Vol. 101, Issue 14, pp. 5601-5608. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.008
- [13] Freeman, E. S. and Carroll, B. (1958). The Application of Thermoanalytical Techniques to Reaction Kinetics: The Thermogravimetric Evaluation of the Kinetics of the Decomposition of Calcium Oxalate Monohydrate. **The Journal of Physical Chemistry**. Vol. 62, Issue 4, pp. 394-397. DOI: 10.1021/j150562a003
- [14] Manatura, K., Lu, J. -H., and Wu, K. -T. (2017). Thermal Decomposition and Kinetic Modeling of Torrefied *Cryptomeria japonica* in a CO₂ Environment. **Biofuels**. pp. 1-11. DOI: 10.1080/17597269.2017.1302666

- [15] Mesa-Pérez, J. M., Cortez, L. A. B., Marín-Mesa, H. R., Rocha, J. D., Peláez-Samaniego, M. R., and Cascarosa, E. (2014). A Statistical Analysis of the Auto Thermal Fast Pyrolysis of Elephant Grass in Fluidized Bed Reactor Based on Produced Charcoal. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 65, Issue 1-2, pp. 322-329. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.072
- [16] Yahiaoui, M., Hadoun, H., Toumert, I., and Hassani, A. (2015). Determination of Kinetic Parameters of *Phlomis bovei* de Noé Using Thermogravimetric Analysis. **Bioresource Technology**. Vol. 196, pp. 441-447. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.07.082
- [17] Quan, C., Li, A., and Gao, N. (2009). Thermogravimetric Analysis and Kinetic Study on Large Particles of Printed Circuit Board Wastes. **Waste Management**. Vol. 29, Issue 8, pp. 2353-2360. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.03.020
- [18] Chen, J., Wang, Y., Lang, X., Ren, X., and Fan, S. (2017). Evaluation of Agricultural Residues Pyrolysis Under Non-Isothermal Conditions: Thermal Behaviors, Kinetics, and Thermodynamics. **Bioresource Technology**. Vol. 241, pp. 340-348. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.036
- [19] Boonchom, B. and S. Puttawong. (2010). Thermodynamics and Kinetics of the Dehydration Reaction of $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Physica B: Condensed Matter**. Vol. 405, No. 9, pp. 2350-2355
- [20] Li, H., Niu, S. L., Lu, C. M., and Cheng, S. Q. (2015). Comparative Evaluation of Thermal Degradation for Biodiesels Derived from Various Feedstocks Through Transesterification. **Energy Conversion and Management**. Vol. 98, pp. 81-88. DOI : 10.1016/j.enconman.2015.03.097

สายอากาศขนาดกะทัดรัดที่แพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวสำหรับการสื่อสารไร้สาย A Compact Unidirectional Pattern Antenna for Wireless Communications

สุธาสินี ละมูลตรี^{1*} และชาลี จันศรี¹
Suthasinee Lamultree^{1*} and Chalee Jansri¹

Received: August 24, 2018; Revised: November 7, 2018; Accepted: December 4, 2018

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่แพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวสำหรับใช้งานในระบบโครงข่ายไร้สายท้องถิ่น สายอากาศนี้ออกแบบที่ความถี่กลาง 2.45 GHz เพื่อคำนวณขนาดของแพตช์รูปสี่เหลี่ยมที่เกิดโหมดเป็นใหญ่ก่อน จากนั้นได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ ของสายอากาศเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด พบว่าสายอากาศนี้ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวตั้งฉากกับระนาบของสายอากาศ มีขนาด S_{11} ต่ำกว่า -10 dB และมีค่าอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 2.7 dBi ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.4 - 2.48 GHz นอกจากนี้พบว่าผลจากการจำลองและการทดสอบมีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

คำสำคัญ : สายอากาศขนาดกะทัดรัด; สายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว; การป้อนสัญญาณเส้นคู่; การสื่อสารไร้สาย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

* Corresponding Author E - mail Address: suthasinee.la@rmuti.ac.th

Abstract

This paper presents a unidirectional pattern antenna implemented by rectangular microstrip patch for wireless local area network. This rectangular patch is firstly designed to provide a dominant mode propagation at 2.45 GHz. Then, parametric studies are investigated to achieve appropriate parameters. It is found that this antenna provides a unidirectional pattern with maximum gain of 2.7 dBi together with magnitude of S_{11} better than -10 dB covered the WLAN frequency from 2.4 - 2.48 GHz. In addition, both simulated and measured results are in good agreement.

Keywords: Compact Antenna; Unidirectional Antenna; Double-fed Line; Wireless Communications

บทนำ

ในยุคโลกาภิวัตน์โลกไร้พรมแดนนี้ การสื่อสารโทรคมนาคมและการสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและการทำงานของมนุษย์มากยิ่งขึ้น ปัจจุบันความต้องการใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณในด้านธุรกิจหรือหน่วยงานราชการต่าง ๆ ซึ่งระบบการสื่อสารไร้สายนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินทาง และลดเวลาการติดต่อสื่อสารให้รวดเร็วสะดวกสบายยิ่งขึ้น สำหรับความถี่ปฏิบัติการของระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายนี้อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.40 - 2.48 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.11a/ b/g [1] โดยสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับปฏิบัติการได้จะพิจารณาที่โครงสร้างของสายอากาศที่แข็งแรง น้ำหนักเบา มีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ต่ำกว่า -10 dB (ในงานวิจัยนี้จะพิจารณา $|S_{11}|$ แทน) และค่าอัตราการขยาย (Gain) ที่เหมาะสมตลอดย่าน

ปัจจุบันนักวิจัยได้ให้ความสนใจในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สำหรับการสื่อสารไร้สายอย่างแพร่หลาย [2] - [6] ทั้งนี้เพราะโครงสร้างสายอากาศชนิดนี้มีน้ำหนักเบาสะดวกในการออกแบบเพื่อประกอบหรือติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปพร้อมกับการแมตช์อิมพีแดนซ์บนโครงสร้างของสายอากาศได้ แต่สายอากาศไมโครสตริปมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นที่ค่อนข้างต่ำและครอบคลุมช่วงกว้างความถี่แคบ ทั้งนี้เพราะโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก [2] - [3] ข้อจำกัดนี้สามารถปรับปรุงช่วงกว้างความถี่ได้ด้วยการออกแบบรูปทรงสายอากาศเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันและเพิ่มเทคนิคการปรับจูนอิมพีแดนซ์ร่วมด้วย [7] - [10] อีกทั้งยังเสนอวิธีการเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศด้วยการเพิ่มตัวเรโซเนเตอร์ (Resonator) ระหว่างแถวลำดับ และการปรับแต่งรูปทรงตัวเรโซเนเตอร์ [9], [11] - [12] เป็นต้น อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบดั้งเดิมนี้มีขนาดใหญ่ที่ไม่เหมาะกับการติดตั้งในบางพื้นที่การใช้งาน ดังนั้นจึงมีการนำเสนอเทคนิคที่ช่วยลดขนาดของอากาศลง เช่น การเพิ่มรอยบาก การเจาะช่อง การปรับระนาบกราวน์ และการเชื่อมร่วม (Coupling) เป็นต้น [13] - [16] แต่การได้มาซึ่งขนาดของสายอากาศที่เล็กลงก็ต้องชดเชยด้วยความซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้เสนอ

สายอากาศขนาดเล็กกระทัดรัดที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนรูปสี่เหลี่ยมที่ใช้เทคนิคการเพิ่มช่องเปิดคู่บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR4 ที่มีระนาบกราวน์แบบเต็มส่วน ป้อนสัญญาณด้วยแรงดันขนาดเท่ากันผ่านเส้นไมโครสตริปคู่ที่มีการดัดงอเพื่อช่วยในการปรับจูนอิมพีแดนซ์ สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย โครงข่ายท้องถิ่น โดยในการออกแบบได้พิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวอย่างละเอียดเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมก่อน จากนั้นได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงค่าอัตราขยายของสายอากาศ โดยการจัดเรียงแบบแถวลำดับสำหรับรายละเอียดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในหัวข้อต่อไป

การออกแบบและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศ

โครงสร้างของสายอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายโครงข่ายท้องถิ่นนี้ ได้เลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ความถี่กลาง 2.45 GHz ทั้งนี้เพราะโครงสร้างไม่ซับซ้อน แข็งแรง และน้ำหนักเบา โดยแพตช์สี่เหลี่ยมมีความกว้าง w ความยาว l ที่ป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปคู่พิมพ์บนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR-4 ที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ϵ_r เท่ากับ 4.3 วางบนวัสดุรองรับ (Substrate) ที่มีความสูง h เท่ากับ 1.6 มม. และมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Tangent) δ เท่ากับ 0.02 ส่วนด้านหลังมีแผ่นระนาบกราวน์แบบเต็มส่วนรูปสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง w_g ความยาว l_g ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในการศึกษาเบื้องต้นนี้ได้กำหนดให้ระนาบกราวน์มีค่าความกว้าง w_g เท่ากับ 0.61λ และความยาว l_g เท่ากับ 0.48λ และใช้ค่านี้อย่างคงที่สำหรับตัวที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นรูปสี่เหลี่ยมนี้ได้เพิ่มช่องเปิดคู่ที่มีระยะห่างเท่ากับ d_s มีความยาว l_{s1} l_{s2} ความกว้าง w_{s1} และ w_{s2} ตามลำดับ ในการวิจัยเริ่มต้นด้วยการออกแบบตัวแพร่กระจายคลื่นรูปสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ขึ้นที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.45 GHz โดยคำนวณจากสมการที่ (1) - (3) ที่ได้ทำการชดเชยผลที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟริงกิง (Fringing Effect) ด้วย [3] พบว่าค่าความกว้าง w เท่ากับ 0.31λ และความยาว l เท่ากับ 0.23λ

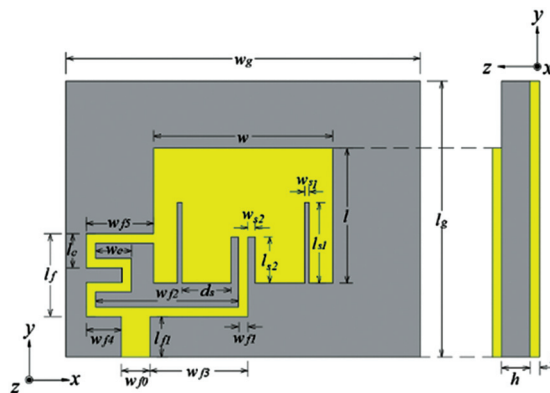
$$w = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$l = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}}} - 2\Delta L \quad (2)$$

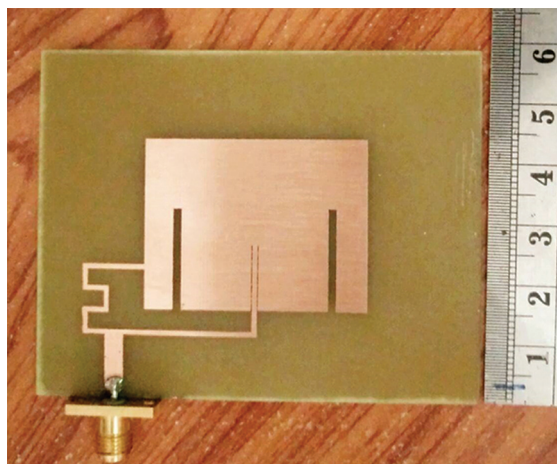
โดยความยาว ΔL คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

สายอากาศนี้ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปแบบเส้นคู่ที่ตั้งฉากกันโดยเส้นป้อนด้านข้างคดงอ (Meandered Line) ให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นเสมือนการโหลดด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitive Load) [2] เพื่อช่วยให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ได้ดีขึ้น สายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปคู่นี้มีความกว้าง w_{fi} และ w_c โดย $i=0,1,\dots,5$ มีความยาว l_f , l_{f1} และ l_c จากการศึกษา เบื้องต้นพบว่า เพื่อให้เกิดเงื่อนไขการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ $50\ \Omega$ ค่าความกว้างเส้นไมโครสตริป w_{f0} เท่ากับ 3.13 มม. และ w_{f1} เท่ากับ 0.72 มม. [16] ในบทความนี้จะพิจารณาขนาดแรงดันที่ป้อนสัญญาณทั้งสองเส้นนี้มีขนาดเท่ากัน ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะใช้เป็นค่าคงที่ตลอดบทความ



(ก) รูปจำลอง



(ข) สายอากาศต้นแบบ

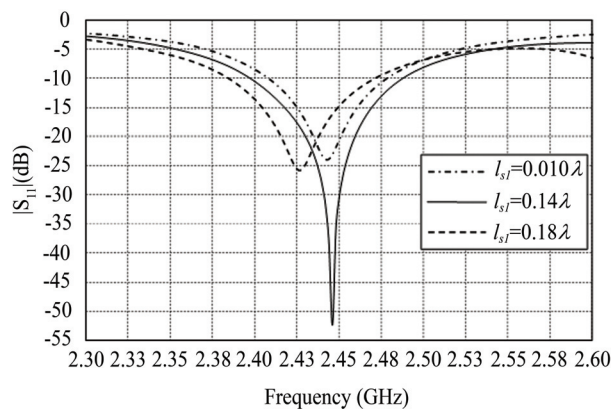
รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศองค์ประกอบเดียว

การศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ

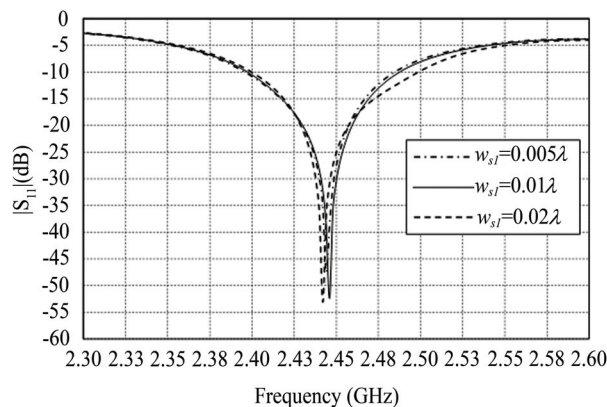
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องเปิด และเส้นป้อนสัญญาณคู่ต่อขนาด S_{11} ที่แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ และช่วงกว้างแถบความถี่ที่สายอากาศนี้สามารถทำงานได้ดี โดยจะพิจารณาที่ $|S_{11}| < -10\ \text{dB}$ สำหรับผลกระทบของความยาวช่องเปิด

l_{s1} ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 พบว่าค่าความยาว l_{s1} ยิ่งมีขนาดสั้น จะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามยิ่งความยาวช่องเปิดนี้ยิ่งยาว จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ต่ำลง ดังนั้นจึงเลือกขนาด l_{s1} เท่ากับ 0.14λ ทั้งนี้เพราะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เข้าใกล้ความถี่กลางที่ออกแบบ และให้ค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ 2.39 – 2.49 GHz

ส่วนความกว้างช่องเปิด w_{s1} นั้น พบว่ายิ่ง w_{s1} ยิ่งกว้างจะส่งผลต่อการเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์ไปยังความถี่ต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 3 และพบว่าความกว้าง w_{s1} ทุกค่าที่แสดงนั้นให้ค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB และครอบคลุมตลอดย่าน WLAN ทั้งหมด แต่ในบทความนี้ได้เลือกค่า w_{s1} เท่ากับ 0.01λ ทั้งนี้เพราะค่านี้ จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เกิดขึ้นใกล้กับความถี่กลาง 2.45 GHz ที่สุดนั่นเอง



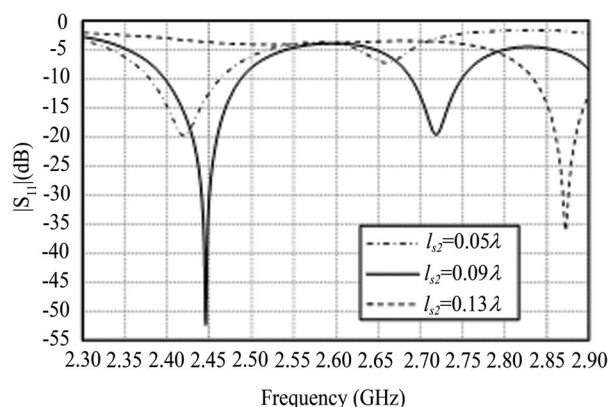
รูปที่ 2 ผลกระทบของความยาวช่องเปิด l_{s1} ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$



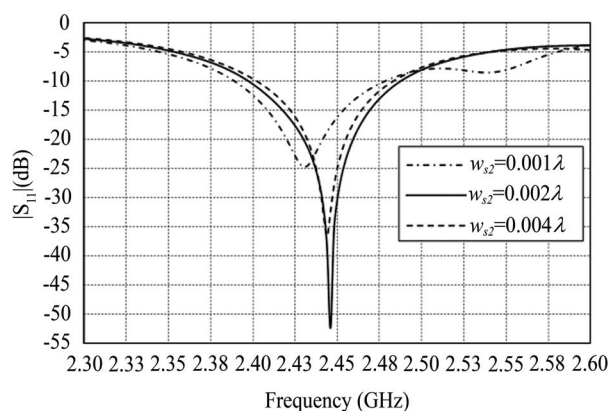
รูปที่ 3 ผลกระทบของความกว้างช่องเปิด w_{s1} ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$

รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของความยาวช่องเปิด l_{s2} ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$ พบว่าค่าความยาว l_{s2} ยิ่งมีขนาดยาวจะยิ่งส่งผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนสูงขึ้นและค่า $|S_{11}|$ มีค่าต่ำมาก และพบว่าค่าความยาวช่องเปิด l_{s2} เท่ากับ 0.09λ เท่านั้นที่ส่งผลให้ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB มาก ๆ และเกิดความถี่เรโซแนนซ์เข้าใกล้ความถี่กลางที่ออกแบบ ดังนั้นจึงเลือกที่ความยาวนี้

สำหรับความกว้างช่องเปิดคู่ที่สอง w_{s2} ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่ ดังนั้นค่าความกว้าง w_{s2} ยิ่งกว้างจะยิ่งทำให้ครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันผลของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ก็ต้องพิจารณาร่วมด้วย จากรูปที่ 5 พบว่า w_{s2} เท่ากับ 0.002λ จะให้ค่า $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุด และให้ความถี่เรโซแนนซ์เข้าใกล้ความถี่กลาง อีกทั้งยังครอบคลุมตลอดย่านความถี่ WLAN อีกด้วย

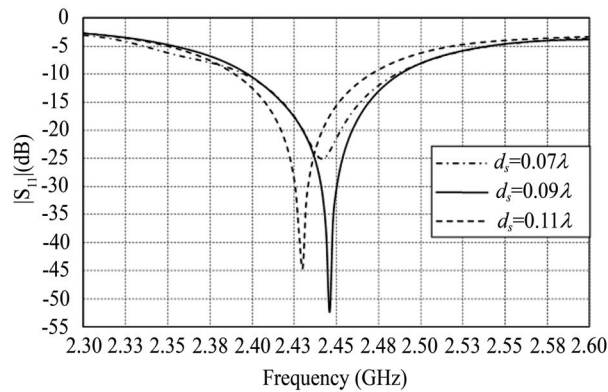


รูปที่ 4 ผลกระทบของความยาวช่องเปิด l_{s2} ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$



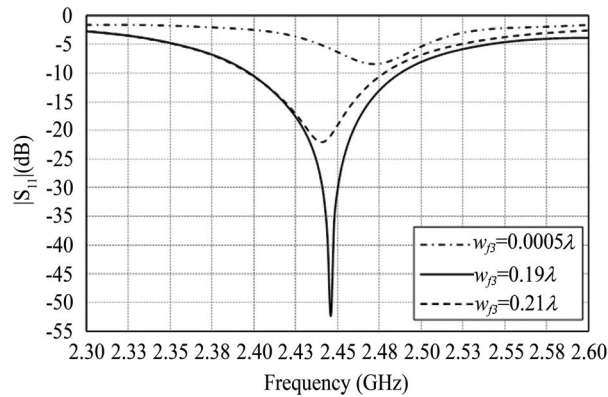
รูปที่ 5 ผลกระทบของความกว้างช่องเปิด w_{s2} ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$

นอกจากจะพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากขนาดของช่องเปิดคู่ที่อยู่บนแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นแล้วนั้น รูปที่ 6 ได้แสดงผลกระทบของระยะห่างระหว่างช่องเปิด d_s ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$ พบว่ายิ่งระยะห่างระหว่างช่องเปิดยิ่งมากยิ่งส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนต่ำลงยิ่งขึ้น และมีเพียงเฉพาะระยะห่างที่เหมาะสมเท่านั้นที่ให้ค่า $|S_{11}|$ ที่ดีที่สุด และให้ความถี่เรโซแนนซ์เข้าใกล้ความถี่กลางที่สุด อีกทั้งยังครอบคลุมตลอดย่านความถี่ WLAN นั่นคือ d_s เท่ากับ 0.09λ

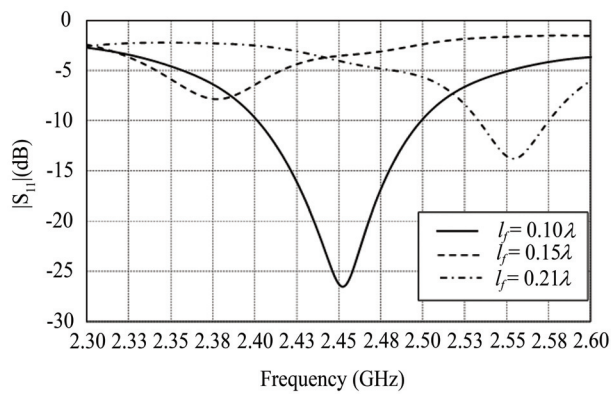


รูปที่ 6 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างช่องเปิด d_s ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$

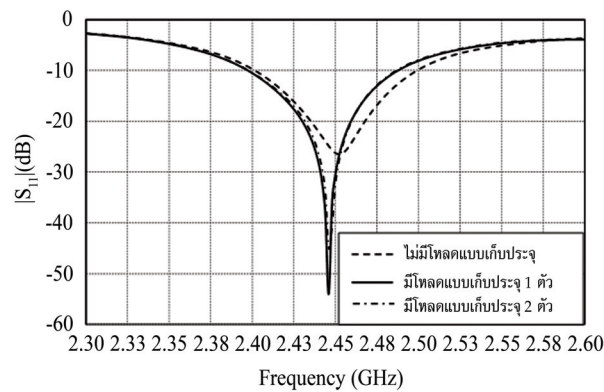
จากรูปที่ 2 - 6 ได้แสดงผลกระทบของพารามิเตอร์สายอากาศที่อยู่บนตัวแพร่กระจายคลื่นแล้วต่อไปจะพิจารณาพารามิเตอร์ของตัวป้อนสัญญาณแบบเส้นคู่ที่มีผลต่อการปรับจูนการแมตช์อิมพีแดนซ์ โดยจะพิจารณาค่าความกว้าง w_{f3} ที่เส้นป้อนสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่า w_{f3} แคบ ๆ หรือตำแหน่งป้อนสัญญาณเข้าใกล้จุดกึ่งกลางของสายอากาศนั้น การแมตช์อิมพีแดนซ์แย่ง แต่เมื่อเลื่อนตำแหน่งป้อนสัญญาณห่างจากจุดกึ่งกลางออกไป พบว่าการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศดียิ่งขึ้น แต่เมื่อเลื่อนตำแหน่งป้อนสัญญาณห่างออกไปมากยิ่งขึ้นกลับทำให้การแมตช์อิมพีแดนซ์แย่งอีกครั้ง ในการออกแบบได้เลือก w_{f3} เท่ากับ 0.19λ เพราะให้ค่าการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ยอมรับได้ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB มาก ๆ ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ 2.39 - 2.49 GHz คิดเป็นช่วงกว้างความถี่ 4 % สำหรับการพิจารณาคำแหน่งการป้อนสัญญาณเส้นที่สองที่ตำแหน่งด้านข้างของแพตช์สี่เหลี่ยมมุมฉาก กรณีที่ยังไม่ตัดต่อเส้นสตริป (ไม่มีโหลดแบบตัวเก็บประจุ) ได้แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า เมื่อเลื่อนตำแหน่งการป้อนเส้นที่สองสูงขึ้นจากขอบล่างทำให้การแมตช์อิมพีแดนซ์แย่ง ตำแหน่งที่ช่วยให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ได้ดีที่สุดคือ ความยาว l_f สั้น ๆ หรืออยู่ใกล้ขอบล่างของแพตช์สี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังนั้นจึงเลือกการป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง $l_f = 0.1\lambda$ ก่อน แล้วทำการปรับจูนเพิ่มเติมด้วยวิธีตัดต่อเส้นสตริปให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้น เปรียบเสมือนการเพิ่มโหลดแบบตัวเก็บประจุ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโหลดแบบตัวเก็บประจุเข้าไปจะช่วยให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ดียิ่งขึ้น โดยการเพิ่มโหลดจำนวนหนึ่งตัวและสองตัวมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -45 dB และ -54 dB ดังแสดงในรูปที่ 9 แต่การเพิ่มจำนวนโหลดมากขึ้นนั้นไม่มีผลที่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มจำนวนโหลดแบบตัวเก็บประจุจะทำให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ดีขึ้นแต่จะครอบคลุมช่วงกว้างความถี่ที่แคบลง ดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกการเพิ่มโหลดเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น อย่างไรก็ตามสายอากาศที่ออกแบบนี้มีคุณสมบัติที่ครอบคลุมความถี่ WLAN ตั้งแต่ 2.4 - 2.48 GHz ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ของเส้นป้อนนั้นได้ทำการปรับจูนละเอียดอีกครั้งทั้งหมด และได้สรุปการออกแบบสายอากาศดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 7 ผลกระทบของความกว้างเส้นป้อนสัญญาณ w_{f3} ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$



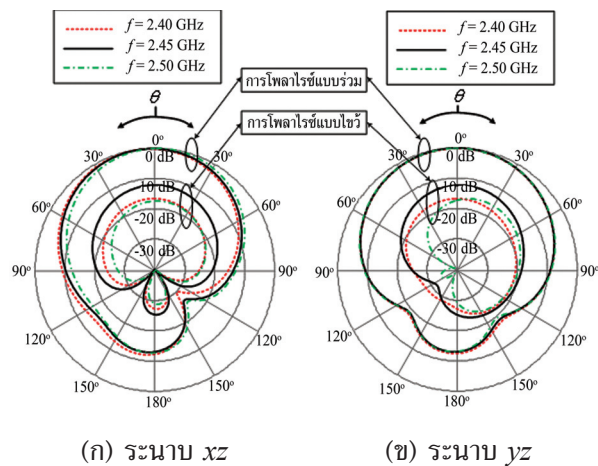
รูปที่ 8 ผลกระทบของความยาว l_f (ยังไม่มีโหลดแบบตัวเก็บประจุ) ที่มีผลต่อ $|S_{11}|$



รูปที่ 9 ผลกระทบของจำนวนโหลดแบบตัวเก็บประจุที่มีผลต่อ $|S_{11}|$

ตารางที่ 1 สรุปพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ

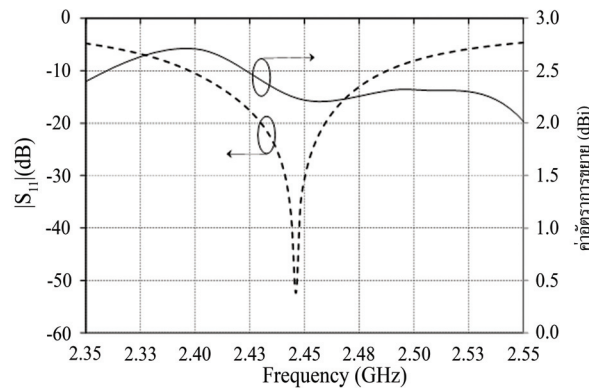
พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	ขนาดทางไฟฟ้า	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	ขนาดทางไฟฟ้า
w_g	74.76	0.61λ	d_s	10.63	0.09λ
l_g	58.28	0.48λ	l_c	4.44	0.04λ
w	37.58	0.31λ	w_c	3.72	0.03λ
l	28.55	0.23λ	l_f	11.88	0.10λ
h	1.6	0.01λ	l_{f1}	10.47	0.09λ
t	0.03	0.0003λ	w_{f0}	3.13	0.03λ
l_{s1}	17	0.14λ	w_{f1}	0.72	0.001λ
l_{s2}	11	0.09λ	w_{f2}	28.43	0.23λ
w_{s1}	1.5	0.01λ	w_{f3}	22.74	0.19λ
w_{s2}	0.3	0.002λ	w_{f4}	4	0.033λ
w_e	3.72	0.003λ	w_{f5}	10.72	0.09λ



รูปที่ 10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลองผล

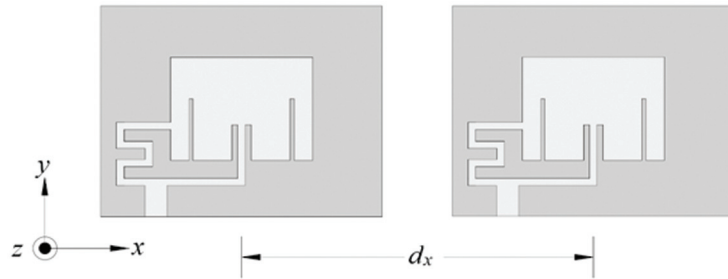
รูปที่ 10 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานด้วยการโฟกัสแบบรวมและแบบไขว้ของสายอากาศที่ได้จากการจำลองผลในระนาบ xz และ yz พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแผ่พลังงานความเข้มสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับระนาบสายอากาศ ($\theta = \theta^\circ$) ตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.4 - 2.5 GHz โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) ในระนาบ xz เท่ากับ 79 องศา ที่ความถี่ 2.4 และ 2.45 GHz และเท่ากับ 77 องศา ที่ความถี่ 2.5 GHz ส่วนความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz มีค่าเท่ากันทั้งสามความถี่ คือ 93 องศา นอกจากนี้พบว่าระดับพหุหลัง (Back Lobe Level) ที่ความถี่ต่ำ ๆ มีค่าระดับพหุหลังค่อนข้างสูงกว่าที่ความถี่สูงที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าระดับพหุหลังสูงที่สุดเท่ากับ -13.84 dB แต่ค่านี้ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เมื่อพิจารณาระดับความแรงของการโฟกัสแบบรวมและแบบไขว้ พบว่าระดับความแรงของการโฟกัสแบบไขว้มีค่าต่ำกว่าการโฟกัสแบบรวม

มากกว่า 12 dB และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio) ของสายอากาศที่ความถี่ 2.4, 2.45 และ 2.5 GHz มีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 19.72 15.74 และ 22.2 dB ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าสายอากาศนี้ให้การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

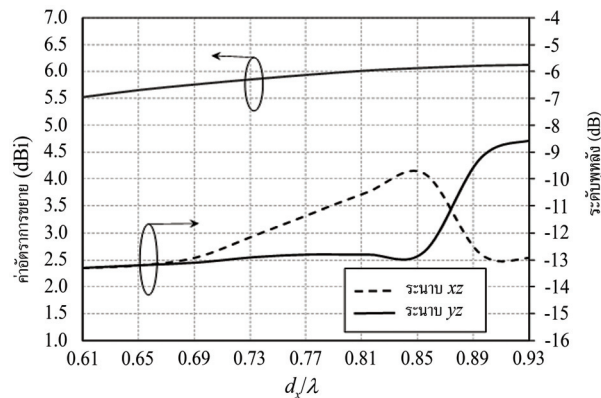


รูปที่ 11 ค่าอัตราการขยายและค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

ข้อสังเกตในการออกแบบสายอากาศแพตช์สี่เหลี่ยมที่มีช่องเปิดคู่และป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปคู่นี้ การเพิ่มช่องเปิดคู่บนตัวแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมนี้มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้นโดยที่ไม่มีผลเสียต่อประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แต่ด้วยสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์มีข้อด้อยคือ ค่าอัตราการขยายจะค่อนข้างต่ำ กล่าวคือ สายอากาศที่นำเสนอองค์ประกอบเดียวนี้อาจมีค่าอัตราการขยายต่ำที่สุดเท่ากับ 2.2 dBi และค่าอัตราการขยายสูงที่สุดเท่ากับ 2.71 dBi ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.4 - 2.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 11 อย่างไรก็ตามข้อด้อยนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการจัดเรียงองค์ประกอบของสายอากาศแบบแถวลำดับด้านข้าง (Side by Side) ดังแสดงดังรูปที่ 12 ซึ่งพบว่า เมื่อพิจารณาแถวลำดับที่มีสององค์ประกอบจัดเรียงห่างกันด้วยระยะ d_x สายอากาศแถวลำดับนี้ยังคงมีแบบรูปการแผ่พลังงานทิศทางเดียวที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับระนาบของสายอากาศ และมีค่าอัตราการขยายที่สูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศห่างกันมากขึ้น แต่ระดับพูลหลัง (Back Lobe Level: BLL) ก็มีขนาดที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 13 อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ระยะห่าง d_x ตั้งแต่ $0.61\lambda - 0.93\lambda$ จะให้ค่าอัตราการขยายที่สูงขึ้นมากกว่า 50 % ของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว โดยค่าระดับความแตกต่างระหว่างพูลหลังเทียบกับลำคลื่นหลักมีค่าต่างกันมากกว่า 15 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการเลือกระยะที่ห่างกันมาก ๆ จะทำให้โครงสร้างรวมของสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ ดังนั้นการเลือกระยะห่างในการจัดเรียงสายอากาศจึงขึ้นอยู่กับการใช้งานและการติดตั้งตามความเหมาะสมของงานนั้น ๆ



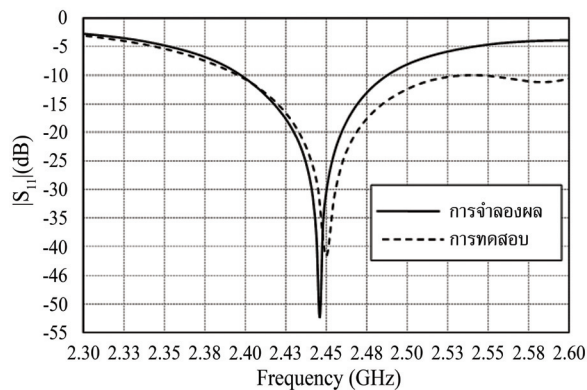
รูปที่ 12 การจัดเรียงองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับแบบด้านข้าง



รูปที่ 13 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศแถวลำดับ

การทดสอบสายอากาศ

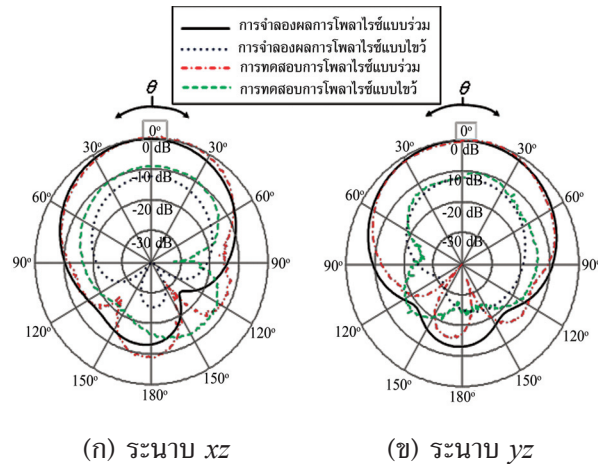
เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อน สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างและการทดสอบสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผล ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C สำหรับคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบ ได้แก่ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในการสร้างสายอากาศต้นแบบ (ดังแสดงในรูปที่ 1(ข)) ได้สร้างตามขนาดที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 โดยส่วนที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นทำจากตัวนำทองแดงหนา 0.03 มม. เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 37.58 มม. ความยาว 28.55 มม. วางบนวัสดุรองรับที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 สูง 1.6 มม. ส่วนด้านหลัง (ด้านล่าง) มีระนาบกราวด์แบบเต็มที่มีค่าความกว้าง 74.76 มม. และความยาว 58.28 มม. ทำหน้าที่สะท้อนคลื่นให้เดินทางเพียงด้านหน้าทิศทางเดียว สำหรับการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศได้ทำการเชื่อมต่อด้วยตัวเชื่อมต่อแบบ SMA ที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบผล $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลองและการทดสอบ

สำหรับการเข้ากันได้ทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกับสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม นั้น สามารถพิจารณาด้วยค่า $|S_{11}|$ โดยจะใช้เกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ $|S_{11}| < -10$ dB จากรูปที่ 14 พบว่าผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศที่ออกแบบนี้มีความสอดคล้องกัน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ความถี่เรโซแนนซ์เกิดขึ้นที่ความถี่เข้าใกล้ความถี่กลาง 2.45 GHz แต่ผลที่ได้จากการจำลองให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีกว่าและให้ค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่าสายอากาศต้นแบบ ทั้งนี้เพราะสายอากาศที่สร้างจริงจะมีผลที่เกิดจากตัวเชื่อมต่อแบบ SMA ร่วมด้วย ในขณะที่การจำลองไม่ได้พิจารณาผลจากตัวเชื่อมต่อร่วมด้วย แต่อย่างไรก็ดีผลที่เกิดขึ้นก็ไม่ได้ทำให้เกิดความเสียหายแต่อย่างใดกับการทำงานของสายอากาศ และสายอากาศต้นแบบนี้ให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีตลอดช่วงความถี่ 2.39 - 2.53 GHz ครอบคลุมช่วงกว้างแถบความถี่ 5 % ซึ่งกว้างกว่าผลที่ได้จากการจำลอง กล่าวคือ ผลจากการจำลองให้ค่า $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ 2.39 - 2.49 GHz มีค่าช่วงกว้างแถบความถี่ 4 %

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่าผลจากการทดสอบสายอากาศต้นแบบให้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว มีค่าความแรงของสนามไฟฟ้าแรงที่สุด ในทิศต้องฉากกับระนาบของสายอากาศสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง จากการจำลองผลที่ความถี่ 2.45 GHz พบว่าค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 79 องศา และในระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 93 องศา ส่วนผลจากการทดสอบพบว่า ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 76 องศา และ 81 องศา เมื่อพิจารณาค่าความแรงของสนามที่มีการโพลาไรซ์แบบไขว้ทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz พบว่าจากการจำลองผลมีค่าสูงสุดประมาณ -12 dB ในขณะที่ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงสุดประมาณ -8 dB อนึ่งสายอากาศนี้ให้ค่าการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และเมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าอัตราการขยายโดยใช้สมการฟรีส (Friis Transmission Equation) [3] โดยใช้สายอากาศสององค์ประกอบที่เหมือนกัน (สายอากาศที่นำเสนอเป็นสายอากาศภาครับและภาคส่ง) โดยไม่นำค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณในภาครับและภาคส่งมาคำนวณร่วมด้วย เพราะในขั้นตอนการทดสอบนี้ได้ทำการปรับเทียบ (Calibration) ที่ปลายสายก่อนการทดสอบแล้ว ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งเท่ากับ 70 เซนติเมตร ดังนั้นค่าการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free Space Loss) เท่ากับ -37.13 dB ค่าอัตราส่วนกำลังงานสายอากาศรับต่อกำลังงานสายอากาศส่งเท่ากับ -34.37 dB ดังนั้นค่าอัตราการขยายของสายอากาศต้นแบบมีค่าเท่ากับ 2.76 dBi



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลองผลและการทดสอบ ที่ความถี่ 2.45 GHz

สรุปและวิจารณ์

บทความนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย ช่องเปิดคู่และเส้นป้อนสัญญาณ ด้วยเส้นไมโครสตริปแบบคู่ที่แพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวสำหรับระบบโครงข่ายไร้สายท้องถิ่น โดยโครงสร้างสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาขนาดของ ไมโครสตริปแบบแพตช์รูปสี่เหลี่ยมเพื่อให้ได้เงื่อนไขการเกิดโหมดเป็นใหญ่ก่อน จากนั้นได้พิจารณาพารามิเตอร์ ของช่องเปิดคู่บนตัวแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมและเส้นป้อนสัญญาณแบบคู่ที่ติดตั้งเหมือนการเพิ่มโหลด แบบตัวเก็บประจุ เพื่อช่วยให้การแมตช์อิมพีแดนซ์ให้ดียิ่งขึ้น พบว่าสายอากาศที่นำเสนอให้แบบรูป การแผ่พลังงานคลื่นทิศทางเดียวที่ให้การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น มีขนาด S_{11} ต่ำกว่า -10 dB และมีค่า อัตราการขยายสูงสุดเท่ากับ 2.7 dBi ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.4 - 2.48 GHz เพื่อปรับปรุงค่าอัตราการ ขยายของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น สามารถทำได้โดยนำสายอากาศสององค์ประกอบมาจัดเรียงแบบแถวลำดับ ด้านข้าง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสม สายอากาศนี้มีค่าอัตราการขยายเพิ่มขึ้นมากกว่า 50 % ของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว นอกจากนี้ได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นเพื่อทดสอบและ เปรียบเทียบผลจากการจำลองพบว่า ผลการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องกันเป็นไปใน ทิศทางเดียวกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ WLAN ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีตามสัญญาเลขที่ ENG 16/62

References

- [1] Chen, Z. N., Qing, X., See, T. S. P., and Toh, W. K. (2012). Antennas for WiFi Connectivity. **Proceedings of the IEEE**. Vol. 100, Issue 7, pp. 2322-2329. DOI: DOI: 10.1109/JPROC.2012.2183830
- [2] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., and Ittipiboon, A. (2001). **Microstrip Antenna Design Handbook**. 1st Edition, Artech House, Norwood.
- [3] Balanis, C. A. (2007). **Antenna Theory: Analysis and Design, 4th Edition**. New York: John Wiley & Sons.
- [4] Jothi Chitra, R. and Nagarajan, V. (2013). Double L-slot Microstrip Patch Antenna Array for WiMAX and WLAN Applications. **Computers and Electrical Engineering**. Vol. 39, Issue 3, pp. 1026-1041. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2012.11.024
- [5] Hoang, T. V. and Park, H. C. (2014). Very Simple 2.45/3.5/5.8 GHz Triple-Band Circularly Polarised Printed Monopole Antenna with Bandwidth Enhancement. **Electronics Letters**. Vol. 50, Issue 24, pp. 1792-1793. DOI: 10.1049/el.2014.2935
- [6] Chakraborty, U., Kundu, A., Chowdhury, S. K., and Bhattacharjee, A. K. (2014). Compact Dual-Band Microstrip Antenna for IEEE 802.11a WLAN Application. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 13, pp. 407-410. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2307005
- [7] Munir, A., Petrus, G., and Nusantara, H. (2013). Multiple Slots Technique for Bandwidth Enhancement of Microstrip Rectangular Patch Antenna. In **2013 International Conference on QiR (Quality in Research), At Yogyakarta, Indonesia**. pp. 150-154. DOI: 10.1109/QiR.2013.6632555
- [8] Hsiao, C., Huang, H., and Hwang, R. (2014). An Impedance Matching Technique for Bandwidth Enhancement of Terminal Antennas. **IEEE International Workshop on Electromagnetics**. pp. 113-114
- [9] Nesbitt, P. B., Tsang, H., Ketterl, T. P., Church, K., and Weller, T. M. (2016). 4 GHz 3D-printed Balun-Fed Bowtie Antenna with Finite Ground Plane for Gain and Impedance Matching Enhancement. In **2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)**. pp. 1-3. DOI: 10.1109/WAMICON.2016.7483854
- [10] Xu, K. D., Xu, H., Liu, Y., Li, J., and Liu, Q. H. (2018). Microstrip Patch Antennas with Multiple Parasitic Patches and Shorting Vias for Bandwidth Enhancement. **IEEE Access**. Vol. 6, pp. 11624-11633. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2794962
- [11] Elumalai, L. G. N., Kanagasabai, M., and Balasubramanian, B. (2013). Implementation of Slotted Meander-Line Resonators for Isolation Enhancement in Microstrip Patch Antenna Arrays. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 2013**. Vol. 12, pp. 15-18. DOI: 10.1109/LAWP.2012.2237156

- [12] Wang, H., Liu, S., Chen, L., Li, W., and Shi, X. (2014). Gain Enhancement for Broadband Vertical Planar Printed Antenna with H-Shaped Resonator Structures. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. Vol. 62, Issue 8, pp. 4411-4415. DOI: 10.1109/TAP.2014.2325955
- [13] Sun, C., Zheng, H., Zhang, L., and Liu, Y. (2014). Analysis and Design of a Novel Coupled Shorting Strip for Compact Patch Antenna with Bandwidth Enhancement. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 13, pp. 1477-1481. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2341596
- [14] He, M., Ye, X., Zhou, P., Zhao, G., Zhang, C., and Sun, H. (2015). A Small-Size Dual-Feed Broadband Circularly Polarized U-Slot Patch Antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. Vol. 14, pp. 898-901. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2384496
- [15] Wu, T. L., Pan, Y. M., Hu, P. F., and Zheng, S. Y. (2017). Design of a Low Profile and Compact Omnidirectional Filtering Patch Antenna. **IEEE Access**. Vol. 5, pp. 1083-1089. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2651143
- [16] Jansri, C., Phongcharoenpanich, C., and Lamultree, S. (2018). Double-Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna for WLAN Applications. **Proceedings of the 2018 International Electrical Engineering Congress**. Krabi, Thailand, 7-9 March 2018, pp. 104-107

การศึกษาประสิทธิภาพเตาถ่านแบบช่องหน้าเตา 2 ช่อง A Study of the Thermal Efficiency of A Double-Air Inlet Doors Charcoal Stove

วศิษฐ ธีระเจตกุล^{1*} อนุชา ดีหลี¹ และเฟด็จ จันทรวีเศษ¹

Vasith Teerajetgu^{1*} Anucha Deelee¹ and Phadet Junwiset¹

Received: November 13, 2018; Revised: January 14, 2019; Accepted: January 21, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการปรับปริมาณลมเข้าหน้าเตาทั้ง 2 ช่องที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพเตาถ่านทำการทดสอบตาม WBT ซึ่งมี 3 การทดสอบ คือพลังงานสูงทดสอบขณะเตาเย็น พลังงานสูงขณะเตาร้อน และการทดสอบขณะพลังงานต่ำ ทดสอบทั้งหมด 4 เงื่อนไข โดยทดสอบเงื่อนไขที่ 1 เปิดช่องลมเข้าหน้าเตา 1 ช่อง (100 %, 0 %) เงื่อนไขที่ 2 เปิดเข้า 100 % ทั้ง 2 ช่อง (100 %, 100 %) เงื่อนไข 3 เปิดเข้า 50 % ทั้ง 2 ช่อง (50 %, 50 %) และเงื่อนไขที่ 4 ใช้ที่ครอบหม้อต่อเนื่องจากเงื่อนไขที่ 3 ผลการทดสอบเปิดช่องลมเข้าหน้าเตา 1 ช่อง 100 % ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน 19.50 % การทดสอบเงื่อนไขที่ 3 เปิดช่องลมเข้า 2 ช่อง 50 % ประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 42.75 % เมื่อควบคุมปริมาณไอเสียออกให้ต่ำลงโดยใช้ที่ครอบหม้อต้มของการทดสอบเงื่อนไขที่ 4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็สูงขึ้นอีกเป็น 50.75 % และอุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงขึ้น อีกทั้งอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะก็ลดลง

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพเชิงความร้อน; เตาถ่าน; เตาหุงต้ม; ช่องหน้าเตา; การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

* Corresponding Author E - mail Address: vasith.te@rmuti.ac.th

Abstract

The objectives of this research were to study the effects on thermal efficiency of the amount of air entering through a double-air inlet doors charcoal stove. The experiment method was carried out following the WBT. The trials were divided into three phases: Trials on the high power (cold start), trials on the high power (hot start) and trials at low power (simmering). Four Trials were conducted. The first trial opened only one of the two inlets fully (100 %, 0 %). The second trial fully opened both inlets (100 %, 100 %). The third trial opened both inlets by half (50 %, 50 %). The last trial used a pot cover in addition to the third trial. The test results indicated that the thermal efficiency of the third trial increased to 42.75 %, higher than the first trial (19.50 %). The condition to slow down the exhaust gas by the pot cover in the last trial gave the highest efficiency value of 50.75 % and the combustion temperature was higher, also the specific fuel consumption was decreased.

Keywords: Thermal Efficiency; Charcoal Stove; Cooking Stove; Air Inlet Door; Specific Fuel Consumption

บทนำ

การขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศไทยที่เพิ่มขึ้นทุกปี การใช้พลังงานก็มากขึ้นไปด้วยทุกภาคส่วน ภาคครัวเรือนก็เช่นกัน โดยเฉพาะการใช้พลังงานความร้อนเพื่อการหุงต้มและประกอบอาหารที่โดยทั่วไปมีการใช้พลังงานอยู่ 3 รูปแบบ คือ พลังงานไฟฟ้า แอลพีจี และพลังงานทดแทน (ฟืน ถ่านไม้ แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร) ซึ่งพลังงานทดแทนนี้เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถสร้างและผลิตใช้เองได้โดยใช้เวลาไม่นาน ไม่ต้องรอการทับถมเหมือนเชื้อเพลิงฟอสซิล อีกทั้งปริมาณการผลิตในประเทศยังมีมากจนเหลือเกินกว่าที่ใช้ไป จึงควรมีการสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนในการหุงต้มให้มากขึ้น เช่น การใช้เตาถ่าน เพราะเมื่อเปรียบเทียบค่าจัดซื้อพลังงานจากถ่านไม้ต่อกิโลแคลอรีแล้วมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานจากแอลพีจี แต่ปัญหาของเตาหุงต้มทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นการใช้พลังงานจากแอลพีจี จากถ่านไม้ หรือจากชีวมวล ล้วนแต่เป็นเตาที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำมาก แม้ว่าเราจะมีความสามารถผลิตเชื้อเพลิงถ่านที่ให้ค่าพลังงานสูงใกล้เคียงกับถ่านหินได้แล้ว แต่ความสามารถในการผลิตเตายังได้เตาที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ ในขณะที่นักวิจัยก็ได้พยายามหาแนวทางพัฒนาได้หลายวิธีที่เพิ่มประสิทธิภาพสูงขึ้นได้บ้างแล้ว

การใช้พลังงานจากถ่านของภาคครัวเรือนในประเทศไทย ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ โดยเมื่อตรวจสอบจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน กระทรวงอุตสาหกรรม ที่กำหนดให้ผู้ผลิตถ่านไม้หุงต้มมีค่าความร้อนต้องไม่น้อยกว่า 6,000 kcal/kg [1] ถ่านไม้ปิ้งย่างไม่น้อยกว่า 7,000 kcal/kg [2] ค่าความร้อนดังกล่าวนี้ใกล้เคียงกับถ่านหิน แสดงว่าประเทศไทยสามารถผลิตถ่านที่มีคุณภาพให้ค่าพลังงานสูงได้ แต่ทว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเตาถ่าน กำหนดให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำมาก คือต้องไม่น้อยกว่า

ร้อยละ 25 [3] แสดงว่าการผลิตเตาถ่านที่มีใช้กันอยู่ตามครัวเรือนในประเทศไทย ยังเป็นเตาที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ ควรต้องมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้น

นักวิจัยทำการเปรียบเทียบเตาที่ใช้หุงต้ม 3 รูปแบบ คือ เตาถ่าน เตาแก๊ส LPG และเตาแก๊สชีวมวล พบว่าทั้ง 3 รูปแบบยังมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำมาก โดยเตาชีวมวลมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเตาแก๊ส [4] แม้เตาแก๊สจะมีประสิทธิภาพเพียง 29 % [5] และการทดสอบเตาถ่านตามท้องตลาด หลายรุ่น หลายขนาด ก็มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพียง 16 - 30 % [6] - [7] แม้ว่าจะทดสอบกับเชื้อเพลิงแห้งหลายชนิดก็ยังไม่ได้อยู่ระหว่าง 18 - 31 % [8] เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบเตาถ่านกับเตาแก๊ส LPG แล้ว มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะใกล้เคียงกันแต่เตาแก๊สมีอัตราการเร่งความร้อนได้ดีกว่า ส่วนเตาถ่านจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีกว่าหากเป็นการต้ม นึ่ง หรือใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ๆ [9]

ได้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาเตาถ่านหลายวิธี โดยการออกแบบเตาในลักษณะต่าง ๆ มีการกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็น 2 ด้าน คือ การกักเก็บไว้แลกเปลี่ยนความร้อนกับหม้อหุงต้มได้มากและนานที่สุด และด้านการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์

จึงได้มีผู้ศึกษาการกักเก็บความร้อนหรือสูญเสียความร้อน โดยทดลองเปลี่ยนขนาดเชื้อเพลิงแล้วพบว่าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแต่มีผลต่อการเกิดแก๊ส CO [10] ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากคือ ช่องว่างเส้าเตา [11] - [12] คือถ้ามีช่องว่างมากความร้อนจะสูญเสียไปกับไอเสียมาก แต่หากมีกักบังลมลดความเร็วของไอเสียได้ก็จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นได้ [13] ก็ยังมีเตาบางชนิดมีช่องเติมเชื้อเพลิงแบบเปิด จะมีความร้อนถ่ายเทสูญเสียออกจากช่องเชื้อเพลิงนี้ได้ เตาถ่านโดยทั่วไปทำจากปูนซีเมนต์และดินเหนียว มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก วัสดุมีการดูดซับเก็บความร้อนไว้ในตัวเองได้มากและนาน จะทำให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้ลดลง [10] - [11] ผลเสียคือ ผนังเตาจะร้อนมากทำให้ถ่ายเทความร้อนออกจากผิวผนังด้านนอกได้มาก ซึ่งมีผู้ได้ทดลองป้องกันการสูญเสียความร้อนนี้โดยใช้ฉนวนใยแก้ว ก็ได้ผลดีมากขึ้น [12]

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพด้านที่ 2 คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ จะทำให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงขึ้น มีการพัฒนาโดยเพิ่มขนาดช่องอากาศเข้าทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น มีการปรับปรุงลักษณะเตาให้ห้องเผาไหม้เป็นคอคอด การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นแต่คอคอดกลับเป็นอุปสรรคปิดบังการแผ่รังสีความร้อนขึ้นสู่หม้อหุงต้ม [12] ความสูงของห้องเผาไหม้มาก ๆ ก็เป็นอุปสรรคเช่นกันทำให้การแผ่รังสีไกลเกินไป และยังพบว่ารังสีที่ส่งผลต่อการไหลของอากาศ โดยเพิ่มความหนา เเจาะรูให้เป็นลักษณะตัวฉัตร เพิ่มจำนวนรูให้ได้ 61 รู การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงมากถึง 41 % [14] แต่ก็มีการศึกษาการจำลองการไหลของอากาศผ่านรังผึ้ง พบปัญหาคืออากาศไหลเข้าช่องอากาศด้านล่าง ไหลชนผนังด้านตรงข้ามของทางเข้า ปริมาณอากาศส่วนใหญ่ไหลขึ้นผ่านรูรังผึ้งเพียงด้านเดียว กลับทำให้การเผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์มากนัก อีกทั้งรังผึ้งที่หนาจะดูดเก็บความร้อนไว้มากขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจึงยังไม่สูงมากนัก [15] แต่ก็มีผู้ทดลองปรับอากาศให้มีการเติมไพรมารีและเซคันดารีโดยทดสอบกับเตาพื้นขนาดใหญ่แล้วจะทำให้มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น [16]

ปัญหาวิกฤตพลังงานที่เราจัดหาพลังงานจากฟอสซิลได้ยากมากขึ้น อีกทั้งภาวะเศรษฐกิจที่จะเติบโตการใช้พลังงานก็สูงขึ้น การใช้พลังงานความร้อนเพื่อการหุงต้มก็มากตามไปด้วย แต่มีพลังงานที่มนุษย์สามารถสร้างและผลิตได้เองคือที่เรียกว่า พลังงานทดแทนแบบดั้งเดิม (ถ่าน ฟืน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร) ซึ่งประเทศไทยมีการใช้น้อย สามารถผลิตใช้เองได้และมีคุณภาพค่าความร้อนสูง แต่ปัญหา

ของเตาหุงต้มยังมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ โดยเฉพาะเตาถ่านที่ควรสนับสนุนให้ใช้มากขึ้น มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพียง 18 - 31 % แม้ได้มีการพัฒนาเพิ่มการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้สมบูรณ์จนทำให้ประสิทธิภาพเตาสูงขึ้นได้ถึง 41 % แล้วก็ตาม ยังพบจุดที่ควรพัฒนาอีกหลายจุดที่จะทำให้เตาถ่านมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นได้อีก เช่น การปรับอากาศให้เหมาะสม การบังลมเพื่อควบคุมความร้อนจากไอเสีย การเพิ่มช่องอากาศเข้า การเพิ่มอากาศเข้คันดารี การไม่ใช้ปูนซีเมนต์และดินเหนียวโดยใช้ฉนวนความร้อนอื่น ๆ และการลดการสะสมความร้อนในตัวเตา

ทฤษฎี

หลักการวิเคราะห์และทดสอบของ WBT [17] ให้มีการทดสอบเตาถ่านเป็น 3 ช่วง คือช่วงแรกเป็นช่วงที่เตาให้กำลังสูง แต่ทดสอบเริ่มต้นขณะตัวเตายังเย็น (High Power-Cold Start) ช่วงที่สอง ก็เป็นช่วงให้กำลังสูงแต่เริ่มต้นที่ขณะตัวเตาร้อน เพิ่งผ่านการใช้งานมา (High Power-Hot Start) และช่วงสุดท้ายคือช่วงที่เตาให้กำลังต่ำเป็นช่วงที่เตามีการนำความร้อนไประเหยไอน้ำ (Low Power-Simmer) ให้ทดสอบต่อเนื่องจากช่วงที่สอง โดยให้การทดสอบทุกช่วงมีการคำนวณค่าเพื่อใช้ในการตรวจสอบความสามารถของเตาถ่านแต่ละตัวได้ดังนี้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency: η) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถนำความร้อนจากเชื้อเพลิงไปใช้ในการต้มน้ำในหม้อต้มให้ร้อนและกลายเป็นไอน้ำได้เท่าไร (สมการที่ (1))

$$\eta = \frac{m_w C_p \Delta T + m_v h_{fg}}{m_f \cdot LHV} \quad (1)$$

เมื่อ

- m_w = มวลของน้ำร้อนในหม้อต้มที่เหลือยู่หลังการต้ม kg
- C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ กำหนดค่า 4.186 kJ/kg · K
- ΔT = อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นหลังต้ม °K
- m_v = มวลของน้ำร้อนในหม้อต้มที่หายไปหลังการต้ม kg
- h_{fg} = ความร้อนการกลายเป็นไอของน้ำ กำหนดค่า 2,260 kJ/kg
- m_f = มวลของเชื้อเพลิงถ่านที่หายไปหลังการต้ม kg
- LHV = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านหุงต้ม kJ/kg

อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Burning Rate: R_b) เป็นการใช้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงช่วงการต้มน้ำให้เดือดเทียบกับเวลา เป็นค่าที่บอกถึงการเผาไหม้ในเตาว่าจะสามารถเร่งไฟให้เกิดความร้อนหรือลุกไหม้ได้เร็วแค่ไหน หน่วยเป็น kg/s หรือ g/min (สมการที่ (2))

$$R_b = \frac{m_f}{\Delta t} \quad (2)$$

Δt = ช่วงเวลาการเผาไหม้เชื้อเพลิง s

การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption: sfc) คำนวณใช้พิจารณาค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการระเหยน้ำได้ 1 ลิตร ในช่วงน้ำเดือดระเหยกลายเป็นไอ (ในเวลาที่เท่ากัน) โดยค่าน้อยแปลว่าใช้เชื้อเพลิงน้อยระเหยน้ำได้มาก โดยน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ไปหน่วยเป็น g หรือ kg และปริมาณน้ำที่เหลืออยู่หลังการต้ม หน่วยเป็น kg หรือ Litre (สมการที่ (3))

$$sfc = \frac{m_f}{m_w} \quad (3)$$

พลังงานเชื้อเพลิง (Fire Power: FP) เป็นค่าบอกขนาดกำลังเตา โดยบอกเป็นปริมาณการใช้พลังงานของเชื้อเพลิง มีหน่วยบอกขนาดกำลังเตาเป็น วัตต์ (สมการที่ (4))

$$FP = \frac{m_f \cdot LHV}{\Delta t} \quad (4)$$

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. เตารูปแบบใหม่ 2 รูปแบบ ทั้ง 2 แบบต่างกันเฉพาะช่องอากาศเข้านดารี โดยเรียกชื่อว่า เตา 1 และเตา 2
2. เตาแบบธรรมดาที่ทำซื้อได้ในปัจจุบันมี 2 รูปแบบ โดยเรียกชื่อว่า เตา 3 และเตา 4 โดยเตา 3 ทำจากดินเหนียวเผาเป็นฉนวนและโครงสร้างหลักหุ้มด้วยสังกะสี ส่วนเตา 4 ทำจากเหล็กหล่อขึ้นรูป ไม่มีฉนวน โดยเตาทั้งหมดในงานวิจัยนี้แสดงรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 1 พร้อมรูปประกอบตามรูปที่ 1 และ 2
3. หม้อออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร
4. ถ่านอัดก้อนขนาดมาตรฐาน ค่าความร้อนวัดโดย Bomb Calorimeter 25,400 kJ/kg (6,067.85 kcal/kg)

ตารางที่ 1 รายละเอียดสัดส่วนต่าง ๆ ของเตาแบบใหม่และแบบธรรมดา

รายละเอียด	หน่วย	เตา 1	เตา 2	เตา 3	เตา 4
ความหนาฉนวน (ผนังเตา)	mm	15+35	15+35	35	8
วัสดุฉนวน	-	เซรามิกไฟเบอร์+อากาศ	ดินเหนียว	เหล็กหล่อ	
ความสูงของเตา	mm	400	400	260	225
ความสูงของห้องเผาไหม้	mm	200	200	95	95
เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้	mm	160	160	200	200
ปริมาตรห้องเผาไหม้	cc	4,019.2	4,019.2	2,983	2,983
ความหนาของรังผึ้ง	mm	1	1	25	5
จำนวนรูของรังผึ้ง	-	87	87	24	38

ตารางที่ 1 รายละเอียดสัดส่วนต่าง ๆ ของเตาแบบใหม่และแบบธรรมดา (ต่อ)

รายละเอียด	หน่วย	เตา 1	เตา 2	เตา 3	เตา 4
เส้นผ่านศูนย์กลางรูรั้งผึ้ง	mm	10	10	19	18
พื้นที่ลมผ่านช่องรั้งผึ้ง	mm ²	27,334.8	27,334.8	27,218.7	38,679.2
ความสูงของไส้เตา	mm	17	17	32	45
พื้นที่ไอเสียออก (ปากเตา)	mm ²	7,673.8	7,673.8	13,870.95	20,106.0
พื้นที่ช่องลมเข้าเตา (หน้าเตา)	mm ²	7,696.9	7,696.9	10,500.0	10,500.0
พื้นที่ช่องลมเข้าเซคันดารี	mm ²	1,334.5	667.25	-	-
พื้นที่ช่องเดิมเชื้อเพลิง	mm ²	-	1,256 (ปิด)	-	20,000 (เปิด)
น้ำหนัก	kg	13	13.5	4	3.7
วัสดุโครงสร้าง	-	เหล็ก	เหล็ก	ดินเหนียว	เหล็กหล่อ

เครื่องมือวัด

1. ตาชั่ง OHAUS รุ่น Defender 3000, 1 g - 60 kg
2. เครื่องวัดอุณหภูมิ GRAPHTEC รุ่น Midi Logger GL820 expansion up to Maximum 200 channels
3. เครื่องวิเคราะห์แก๊ส ECOM รุ่น J2KN Pro สามารถวัดค่าแก๊ส N, CO₂, CO, SO₂, O₂ ทดลองในห้องทดสอบไม่มีลม วัดค่าที่เพดานห้องเหนือเตา ตรงข้ามพัดลมดูดอากาศ
4. สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K วัดอุณหภูมิ 3 จุด คือ อุณหภูมิน้ำ พนังเตาด้านนอก และท้องเผาไหม้



(ก) เตาแบบใหม่และฝาครอบ

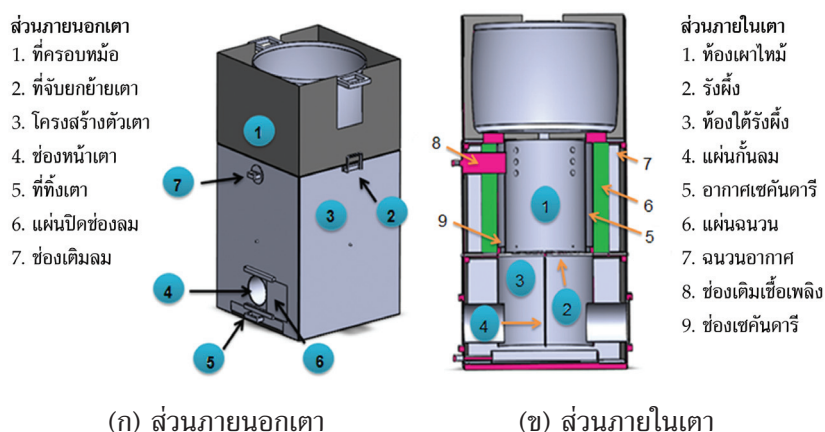


(ข) เตา 3



(ค) เตา 4

รูปที่ 1 เตาแบบใหม่ (เตา 1, 2) และเตาแบบธรรมดา (เตา 3, 4)



รูปที่ 2 ส่วนประกอบภายนอกและภายในเตารูปแบบใหม่ (เตา 1, 2)

วิธีการทดลอง

ทำการทดลองด้วยวิธี Water Boiling Test 3 phase คือ

1. ทดลองขณะเตายืน Phase 1: High Power (Cold Start) ซึ่งนำหมักน้ำ เติมน้ำ 5 ลิตร น้ำหนักถ่าน 1 กิโลกรัม เตรียมเชื้อไฟ 50 กรัมจุดไฟ พอเห็นไฟเริ่มติดแล้วค่อยนำถ่านลงไปในห้องเผาไหม้ นำหม้อต้มตั้งบนเตา จับเวลา วัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์แล้วบันทึกค่าสูงสุด รอให้น้ำเดือด บันทึกอุณหภูมิ 3 จุด (อุณหภูมิ น้ำ ผงเตาด้านนอก และห้องเผาไหม้) เวลา น้ำหนักน้ำ และน้ำหนักถ่านที่เหลือ
2. การทดลองขณะเตาร้อน Phase 2: High Power (Hot Start) ทำซ้ำเหมือน Phase 1 เป็นการทดลองต่อเนื่องจาก Phase 1 ขณะที่เตาถ่านยังร้อนอยู่
3. การทดลองขณะพลังงานต่ำอีก 45 นาที Phase 3: Low Power (Simmering) เป็นการทดลองต่อเนื่องจาก Phase 2 โดยนำถ่านที่เอาออกมาซึ่งจากการทดลองขณะเตาร้อน Phase 2 กลับมาใช้อีก นำหม้อต้มที่เอาออกมาซึ่งกลับต้มต่อ โดยอุณหภูมิของน้ำต้องต่างกันไม่เกิน 6 องศาเซลเซียส จับเวลา วัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ บันทึกค่าสูงสุด รอเวลาถึง 45 นาที แล้วชั่งน้ำหนักน้ำ น้ำหนักถ่านที่เหลือ
4. ทำการทดลองตามเงื่อนไขการเปิดช่องลมหน้าเตา ตามรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไข	เตา 1			เตา 2			เตา 3			เตา 4		
	c	h	s	c	h	s	c	h	s	c	h	s
เปิดช่องลมช่องเดียว 100 %	●	●	●	-	-	-	●	●	●	●	●	●
เปิดช่องลม 2 ช่อง 100 %	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-
เปิดช่องลม 2 ช่อง 50 %	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-
เปิดช่องลม 2 ช่อง 50 % + ที่ครอบหม้อ	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ: c = Cold Start h = Hot Start s = Simmering

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การรายงานผลประสิทธิภาพเชิงความร้อนตาม IWA (International Workshop Agreement) ของ WTB

ตารางที่ 3 ผลการทดลองในเงื่อนไขเปิดช่องลมเข้าเตาช่องเดียว 100 %

เงื่อนไข	หน่วย	เตา 1			เตา 3			เตา 4		
		c	h	s	c	h	s	c	h	s
อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงสุด	OC	772	791	764	646	*	*	488	*	*
อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง	g/min	9.5	8.3	8.2	8.3*	*	—*	8.4*	*	*
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (กำลังสูง)	%	19.50	—	12.00*	—	10.00*	—	—	—	—
การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ (กำลังต่ำ)	g/litre	—	—	74	—	—	*	—	—	*
พลังงานเชื้อเพลิง	kW	4.3	3.8	3.7	3.7	—	*	3.8	—	*
คาร์บอนมอนอกไซด์	mg/m ³	2	3	3	4	—	*	4	—	*

หมายเหตุ: * เตาธรรมดาตามท้องตลาดไม่สามารถทำให้น้ำเดือดได้โดยใช้เชื้อเพลิงในการทดลอง 1 กิโลกรัม ต้มน้ำ 5 ลิตร และยังทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 83 องศาเซลเซียส ไม่ถึงจุดเดือด

การเปรียบเทียบเตา 1 เตา 3 และเตา 4

1. จากตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบเตา 1 เตา 3 และเตา 4 พบว่า ค่าพลังงานเชื้อเพลิง ชี้นาเดเตาว่ามิก้าใกล้เคียงกันหมดคือ 3 - 4 kW แต่เตา 1 มีค่าสูงที่สุดสอดคล้องกับค่าอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงและค่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่สูงที่สุดด้วย หากพิจารณาดูตารางที่ 1 ข้อมูลเตา 3 และเตา 4 มีพื้นที่ช่องหน้าต่างมาก ลมเข้าได้มากกว่า มีพื้นที่อากาศผ่านรูรั้งฝิ่งมากกว่า แต่จำนวนรูรั้งฝิ่งน้อยกว่าเตา 1 จำนวนรูรั้งฝิ่งน้อยทำให้การเผาไหม้ของเตา 3 และเตา 4 ต่ำกว่าเตา 1 สอดคล้องกับ [14] และเมื่อเผาไหม้แล้วด้วยความสูงของห้องเผาไหม้เตา 3 และ 4 ที่น้อยมาก อีกทั้งความสูงเส้าเตาและพื้นที่ไอเสียออกมามากกว่าเตา 1 ทำให้ความร้อนถ่ายเทผ่านปากเตาออกไปกับไอเสียได้เร็ว อุณหภูมิห้องเผาไหม้จึงต่ำกว่าเตา 1 [11] - [12]

2. การที่เตา 1 มีอากาศเข่นคดรีทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น สอดคล้องกับ [15] แสดงว่าเตา 1 มีปริมาณอากาศเข้าหน้าต่างที่เหมาะสมกว่า ผ่านรูรั้งฝิ่งผสมกับเชื้อเพลิงได้ดีกว่า ความร้อนออกเป็นไอน้ำน้อยกว่า ทำให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงกว่า

3. ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (กำลังสูง) คือ ช่วงกำลังแรงไฟ เชื้อเพลิงกำลังแรงการลุกไหม้อย่างมาก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา 1 สูงกว่าเตา 3 และเตา 4 ยังมีค่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้เตา 1 ที่สูงกว่าแสดงถึงการกักเก็บความร้อนไว้ในเตาและนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีด้วย เพราะเตา 1 ใช้ฉนวนความร้อนที่หนากว่าเป็นเซรามิกไฟเบอร์รวมทั้งมีชั้นฉนวนอากาศ จึงกักเก็บความร้อนและใช้ประโยชน์ได้มากกว่าซึ่งสอดคล้องกับ [12] ประสิทธิภาพเตา 1 จึงสูงที่สุด ส่วนเตา 4 ต่ำที่สุดเพราะมีฉนวนบางที่สุดแล้วยังมีช่องเปิดสำหรับเติมเชื้อเพลิง ทำให้ความร้อนสูญเสียย้อนออกมาจากที่สูญเสียไปทางไอเสีย

4. ในการทดลองนี้ใช้ถ่านเพียง 1 กิโลกรัม ทดลองกับเตา 3 และเตา 4 จึงได้ความร้อนไม่เพียงพอที่จะทำให้น้ำเดือดได้ เพราะเตากักเก็บความร้อนไว้ได้น้อยเกินไป แม้การเผาไหม้จะเผาไหม้ได้ดี ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ 4 mg/m^3 แล้วก็ตาม

ตารางที่ 4 ผลการทดลองในเงื่อนไขเปิดช่องลมเข้าเตา 2 ช่อง 100 %

	หน่วย	เงื่อนไข	เตา 1			เตา 2		
			c	h	s	c	h	S
อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงสุด	°C	เปิดช่องลมเข้าเตา 1 ช่อง 100 %	772	791	764			
อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง	g/min		9.5	8.3	8.2			
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (กำลังสูง)	%		19.50		-			
การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ (กำลังต่ำ)	g/litre		-	-	74.0			
พลังงานเชื้อเพลิง	kW		4.3	3.8	3.7			
คาร์บอนมอนอกไซด์	mg/m ³		2	3	3			
อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงสุด	°C	เปิดช่องลมเข้าเตา 2 ช่อง 100 %	902	913	878	914	913	897
อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง	g/min		11.0	10.0	9.3	11.3	10.8	9.5
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (กำลังสูง)	%		29.00		-	27.00		-
การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ (กำลังต่ำ)	g/litre		-	-	91.0	-	-	101.0
พลังงานเชื้อเพลิง	kW		3.8	3.1	4.3	4.1	3.2	4.7
คาร์บอนมอนอกไซด์	mg/m ³		2	3	2	2	2	2
อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงสุด	°C	เปิดช่องลมเข้าเตา 2 ช่อง 50 %	882	891	854	893	906	877
อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง	g/min		9.7	8.7	8.2	9.7	8.8	8.6
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (กำลังสูง)	%		42.75		-	41.50		-
การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ (กำลังต่ำ)	g/litre		-	-	83.0	-	-	85.5
พลังงานเชื้อเพลิง	kW		4.4	3.9	3.9	4.4	4.0	4.1
คาร์บอนมอนอกไซด์	mg/m ³		3	3	1	3	1	1
อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงสุด	°C	เปิดช่องลมเข้าเตา 2 ช่อง 50 % (มีคราบไหม)	914	915	882	915	918	883
อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง	g/min		10	8.9	8.2	10.2	9.3	8.6
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (กำลังสูง)	%		50.75		-	49.50		-
การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ (กำลังต่ำ)	g/litre		-	-	79.0	-	-	81.0
พลังงานเชื้อเพลิง	kW		4.6	4.0	3.9	4.6	4.2	4.1
คาร์บอนมอนอกไซด์	mg/m ³		2	2	1	2	2	1

หมายเหตุ: c = Cold Start

h = Hot Start

s = Simmering

การเปรียบเทียบการปรับปริมาณลมเข้าหน้าเตา 1 ช่อง และ 2 ช่อง

1. จากตารางที่ 4 ในส่วนของเตา 1 เปรียบเทียบการปรับปริมาณลมเข้าหน้าเตาจาก 1 ช่อง เป็นเข้า 2 ช่อง 100 % จะทำให้มีลมเข้ามากขึ้นสองเท่า ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเร็วขึ้น อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงขึ้น แสดงว่าการเผาไหม้ให้ความร้อนออกมามากขึ้นแต่พลังงานเชื้อเพลิงลดลงแสดงว่าใช้เวลานานขึ้นกว่าน้ำจะเดือด แต่ก็ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นจาก 19.50 % เป็น 29.00 % และปริมาณลมที่เข้ามากขึ้นยังส่งผลต่อการใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นในการระเหยน้ำช่วง Low Power เพราะค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะสูงขึ้นจาก 74 g/litre เป็น 91 g/litre

2. เมื่อปรับปริมาณลมเข้าลดลง โดยเปิดช่องลมเข้าทั้ง 2 ช่อง เพียง 50 % ทำให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงช้าลง อุณหภูมิห้องเผาไหม้ก็ลดลง หมายถึง การเผาไหม้ให้ความร้อนออกมาน้อยลง แต่พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นแสดงว่าน้ำเดือดเร็วขึ้น อันเนื่องจากปริมาณลมหรือความเร็วลมลดลงการสูญเสียความร้อนออกไปกับไอเสียจึงช้าลง สามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้นานขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นจาก 29.0 % เป็น 42.75 % และยังมีความร้อนกักเก็บไว้ระเหยน้ำมากขึ้น ประหยัดเชื้อเพลิงเพราะค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ ลดลงจาก 91 g/litre เหลือ 83 g/litre

3. เมื่อกักลดปริมาณไอเสียออกโดยมีที่ครอบหม้อต้มน้ำ พบว่าอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิห้องเผาไหม้กลับสูงขึ้น พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแสดงว่าน้ำเดือดเร็วขึ้นอีกเล็กน้อย อันเนื่องจากสามารถลดปริมาณการสูญเสียความร้อนออกไปกับไอเสียให้ช้าลงได้อีก สามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้มากขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงจึงขึ้นจาก 42.75 % เป็น 50.75 % และประหยัดเชื้อเพลิงในการระเหยน้ำโดยค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะจาก 83 g/litre ลดลงเหลือ 79 g/litre

การเปรียบเทียบเตา 1 และเตา 2

1. การพิจารณาเตา 2 ที่มีการลดพื้นที่ช่องลมเข้าเซคันดารีลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของเตา 1 พบว่า ที่ปริมาณลมเข้า 100 % เท่ากัน แต่เตา 2 มีปริมาณลมเข้าเซคันดารีน้อยกว่า ทำให้มีปริมาณลมส่วนใหญ่จะไหลผ่านห้องเผาไหม้มากกว่า หรืออาจจะมียลมไหลผ่านช่องเซคันดารีเร็วกว่า (อันเนื่องจากพื้นที่แคบกว่า) การเผาไหม้ดีกว่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงกว่าแต่ปริมาณไอเสียก็ไหลออกได้เร็วขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 27.0 % ต่ำกว่าเตา 1 อย่างชัดเจน ใช้เชื้อเพลิงมากกว่าและค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ 101 g/litre สูงกว่าเตา 1 ค่อนข้างมาก

2. เมื่อลดปริมาณลมเข้าและไอเสียออก โดยลดช่องลมเข้ารวมถึงมีฝาครอบหม้อต้มเมื่อเปรียบเทียบกับเตา 1 แล้ว ก็พบว่าเตา 1 ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าทั้งค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะ แต่ก็แตกต่างกันไม่มากนัก การมีช่องลมเซคันดารีจะช่วยลดความเร็วลมผ่านห้องเผาไหม้ชะลอความร้อนจากการเผาไหม้เก็บไว้ใช้ประโยชน์ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่ที่ความเร็วลมเข้าออกต่ำ ๆ พื้นที่ช่องลมเข้าเซคันดารีที่แตกต่างกัน ให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก

บทสรุป

1. สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเตาได้โดยปรับปรุงปัจจัย 3 ด้าน คือ การปรับเพิ่มปริมาณลมเข้าหน้าเตา การเพิ่มจำนวนรูรั่วซึ่งจะทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ดียิ่งขึ้น และการควบคุมความร้อนออกจากเตาด้วยการหุ้มฉนวนความร้อนรวมทั้งการลดพื้นที่ช่องไอเสียออก

2. การปรับเพิ่มลมโดยให้ลมเข้าหน้าเตา 2 ช่อง แม้จะทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเร็วขึ้นและอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะก็สูงขึ้นอีกด้วย ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเพิ่มขึ้นได้อีกประมาณ 10 % (จาก 19.50 % เพิ่มขึ้นเป็น 29.0 %)

3. การปรับลดปริมาณลมเข้าหน้าเตา 2 ช่อง ลดลงครึ่งหนึ่ง การเผาไหม้เชื้อเพลิงช้าลง แต่การเผาไหม้ยังสมบูรณ์เพียงพอ ความร้อนที่ออกไปกับไอเสียก็ช้าลง ทำให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเพิ่มขึ้นเป็น 42.75 % อีกทั้งอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะก็ลดลง

4. การควบคุมปริมาณไอเสียออกโดยการใส่ฝาครอบ สามารถลดปริมาณความร้อนไปกับไอเสียได้ ทำให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตายังเพิ่มขึ้นเป็น 50.75 % และอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเพาะก็ลดลงได้อีกด้วย

5. การเพิ่มช่องลมเข้านดารี ทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น และต้องไม่ทำให้ความเร็วลมมากขึ้นจะทำให้ไอเสียไหลออกได้เร็วขึ้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้ต่ำลงได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านงบประมาณ การใช้สถานที่ วัสดุและครุภัณฑ์

References

- [1] Thai Industrial Standard Institute. **TCPS.657/2547 Thai Community Product Standard Wood Charcoal for Cooking**. Ministry of Industry
- [2] Thai Industrial Standard Institute. **TCPS.658/2547 Thai Community Product Standard Wood Charcoal for Grilling**. Ministry of Industry
- [3] Thai Industrial Standard Institute. **TCPS.443/2547 Thai Community Product Standard Charcoal Stove**. Ministry of Industry
- [4] Kaewluan, S., Chantosee, D., Chansri, S., and Piyaat, W. (2013). Performance Testing of the 20 kW Biomass Gas Stove. **SWU Engineering Journal**. Vol. 8, No. 1, pp. 24-33 (in Thai)
- [5] Janjit, J. and Matthujak, A. (2009). Thermal Efficiency Improvement of Household Cooking Burner by Porous Radiant Recirculated Cover. **The 23rd Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand**. AEC-006248. Chiang Mai. Secretariat of ME-NETT 23 - THAILAND. (in Thai)
- [6] Chaichana, T., Ali, M., and Longsaman, M. (2013). The Study of Thermal Efficiency of Household Cooking Stove. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**. Vol. 32, No. 5, pp. 626-630 (in Thai)
- [7] Chorchong, T. and Im-in, W. (2014). Program Simulation of Efficiency Stove and Dowd-draft Gasifier Biomass Stove. In **Proceedings of the Pibulsongkram Research Conference**. Pibulsongkram Rajabhat University. pp. 75-82 (in Thai)

- [8] Sae-ung, P. and Vichanong, N. (2010). Feasibility Study of Agricultural Waste Application for Briquette Fuel. **The 7th KU-KPS Conference**. Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus. pp. 711-717 (in Thai)
- [9] Sanasen, P. (1968). **A Comparative Study in The Use of Charcoal and Gas for Cooking**. Master's Thesis. Faculty of Agriculture, Kasetsart University. (in Thai)
- [10] Kumar, A., Prasad, M., and Mishra, K. P. (2013). Coparative Study of Effect of Different Parameters on Performance and Emission of Biomass Cook Stove. **International Journal of Research in Engineering & Technology**. Vol. 1, Issue 3, pp. 121-126
- [11] Kryvongwon, P. (2003). **Testing and Efficiency Improvement of Charcoal Stove**. Master's Thesis. Energy Management Technology. School of Energy and Materials. King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- [12] Kshirsagar, M. P. (2009). Experimental Study for Improving Energy Efficiency of Charcoal Stove. **Journal of Scientific & Industrial Research**. Vol. 68, pp. 412-416
- [13] Panklib, T. (2014). Equipment for Increases Efficiency of Cooking Stove and Power Generator. **The Journal of Applied Science**. Vol. 13, No. 1, pp. 1-13
- [14] Promdon, A. and Sriveeraku, T. (2012). Thermal Efficiency Test of High Efficiency Cooking Stove (HECS) with Variations on the Number and Diameter Ratio of the Grate's Holes. **The 26rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand**. ATM-2010. Chiang Rai. Secretariat of ME-NETT 26 - THAILAND.
- [15] Wichangarm, M. and Sriveeraku, T. (2012). Simulation of Air Flow through a High Efficiency Cooking Stove's Grate using CFD. **Journal of Science and Technology Ubon Ratchathani University**. Vol. 14, No. 2, pp. 24-34 (in Thai)
- [16] Obaidullah, M., Dyakov, I. V., Thomassin, J. D., Duquesne, T., Bramc, S., Contino, F., and De Ruyck, J. (2014). CO Emission Measurements and Performance Analysis of 10 kW and 20 kW Wood Stoves. **Energy Procedia**. Vol. 61, pp. 2301-2306. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.443
- [17] Global Alliance for Clean Cookstove. (2015). **The Water Boiling Test**. Cookstove Emissions and Efficiency in a Controlled Laboratory Setting. Ver. 4.2.3. Access (17 March 2015). Available (<http://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>)

การตรวจสอบวัตถุโลหะใต้ดินในชั้นดินที่มีความนำไฟฟ้าสูงด้วยวิธีการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

An Investigation of Buried Metal Object in High Electrical Conductivity Soil Layer Using Electrical Resistivity Survey Method

ชนะรบ วิชาลัย^{1*}

Chanarop Vichalai^{1*}

Received: December 6, 2018; Revised: March 3, 2019; Accepted: March 8, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้นำเสนอการสำรวจโลหะวัตถุที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่มีการนำไฟฟ้าสูงด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบโครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐาน เช่น แนวท่อก๊าซ ท่อประปา หรือวัตถุที่เป็นโลหะอื่น ๆ ที่ฝังอยู่ใต้ดิน เพื่อประโยชน์ในการวางแผนเพื่อพัฒนา จัดระเบียบ ซ่อมแซม และบำรุงรักษา แต่อย่างไรก็ตามการสำรวจด้วยวิธีการทางธรณีฟิสิกส์วิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทำการวัดค่าบนพื้นดินที่มีการนำไฟฟ้าต่ำหรือพื้นดินที่มีความต้านทานไฟฟ้า โดยการศึกษานี้ได้ทำการฝังถึงโลหะรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $1 \times 1 \times 1$ ม. ที่ความลึก 50 ซม. ได้พื้นดินเหนียวแล้วทำการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 3 มิติ ด้วยรูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าแบบ Pole-Pole และการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ด้วยรูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าแบบ Wenner จากการศึกษาพบว่าผลการวัดค่าแบบ 3 มิติ ในชั้นดินสามารถตรวจพบถึงโลหะได้แต่มีรูปร่างไม่ชัดเจน หลังจากนั้นได้ทำการเพิ่มประจุไฟฟ้าเข้าสู่ถึงโลหะด้วยการต่อเข้ากับขั้วบวก (+) ของแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ เพื่อเพิ่มความแตกต่างของสภาพความต้านทานไฟฟ้าของถึงโลหะและดินเหนียวรอบข้างพบว่า ผลการสำรวจชั้นสุดท้ายสามารถระบุตำแหน่งและรูปร่างของถึงโลหะที่ฝังไว้ได้อย่างถูกต้อง ผลการวัดค่าแบบ 2 มิติ ในเบื้องต้นไม่พบถึงถึงโลหะที่ถูกฝังไว้ แต่เมื่อหลังจากเชื่อมต่อถึงโลหะกับแบตเตอรี่แล้วสามารถตรวจพบถึงโลหะได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : ธรณีฟิสิกส์; ความต้านทานไฟฟ้า; การนำไฟฟ้า; ดินเหนียว; โลหะ

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

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

Abstract

This study presents an investigation of buried metal object in Bangkok soft clay which has high electrical conductivity using electrical resistivity imaging (EI) as aimed to be applied for an application of underground infrastructures investigation planning and development such as gas pipeline, water line, or other buried metal objects. However, the electrical resistivity survey method has the best performance when applied over resistive terrain. This study, a metal cube about the size of 1 x 1 x 1 m was buried at 0.5 m-depth in the Bangkok soft clay ground. Afterward, 3D electrical resistivity imaging using pole-pole electrode configuration and 2D electrical resistivity imaging using Wenner electrode configuration had been performed to investigate a buried metal cube. The initial investigation result, 3D resistivity result hard to indicate buried metal object as it presents unclear shape. Next, the electrical wire was connected from buried object to the positive pole of the 12 v battery as aimed to make a contrast of electrical properties between the metal object and soft clay media. The final 3D resistivity result indicates the shape and position of buried metal more correctly. 2D resistivity imaging result at the initial stage indicates no buried metal object. After the buried metal object was connected to the battery, it has clearly identified in the 2D resistivity result.

Keywords: Geophysics; Resistivity; Conductivity; Clay; Metal

บทนำ

ธรณีฟิสิกส์เป็นการประยุกต์หลักการทางฟิสิกส์เพื่อศึกษาโลก [1] ด้วยการวัดค่าต่าง ๆ ทางกายภาพที่บริเวณพื้นผิวหรือใต้ผิวดินในหลุมเจาะ แล้วทำการประมวลผลและวิเคราะห์ผลที่วัดได้ เพื่อแปลความหมายร่วมกับความรู้ทางธรณีวิทยา เพื่อมุ่งหมายที่จะทราบได้ถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพภายในโลกที่เกิดขึ้น ทั้งในแนวราบและในแนวดิ่ง ซึ่งความรู้ทางธรณีฟิสิกส์สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย [2] โดยเฉพาะการสำรวจแหล่งปิโตรเลียม แหล่งน้ำบาดาล แหล่งแร่ งานทางวิศวกรรมโยธา และงานทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเครื่องมือและความลึกของผลการสำรวจยังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัยภายนอกโดยเฉพาะสภาพแวดล้อมในการวัดค่าจะต้องเหมาะสมกับแต่ละวิธีการสำรวจ [3] การสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์อีกวิธีการหนึ่งที่อาศัยคุณลักษณะทางกายภาพของวัตถุต่าง ๆ ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะตัว [1] - [3] ซึ่งวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยการวัดค่าในหลุมเจาะหรือทำการวัดค่าที่ผิวดิน ซึ่งการวัดค่าที่ผิวดินจะมีรูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าแบบต่าง ๆ โดยค่าความลึกของการสำรวจขึ้นอยู่กับระยะห่างและรูปแบบ

การวางขั้วไฟฟ้า [4] อีกทั้งยังต้องมีสภาพของพื้นดินที่มีความต้านทานไฟฟ้าเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกระจายตัวลงไปในระดับลึก แต่ถ้าดินในชั้นบนมีการนำไฟฟ้าสูง (High Conductivity) จะทำให้ไฟฟ้าไหลผ่านชั้นบนที่มีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าชั้นลึกที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า [2] จึงทำให้ผลการสำรวจคลาดเคลื่อน

การประยุกต์ใช้วิธีการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในการตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุที่เป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมหรือสาธารณูปโภคเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อการจัดการก่อสร้าง ในการหลีกเลี่ยงความเสียหายและอันตรายต่อวัตถุที่ถูกฝังอยู่ใต้ดิน อาทิเช่น แนวท่อก๊าซ ท่อน้ำประปา แนวท่อร้อยสายไฟฟ้า เป็นต้น หากพิจารณาโดยละเอียดแล้ว วัตถุที่เป็นโลหะจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ดี จึงไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยวิธีการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ ด้วยเหตุผลนี้วิธีการทางธรณีฟิสิกส์วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมในการใช้เพื่อตรวจสอบวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้

กรุงเทพมหานครและมหานครหลายแห่งทั่วโลกตั้งอยู่บนพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวซึ่งมีการนำไฟฟ้าสูง [4] และโดยปกติของเมืองใหญ่จึงมีโครงข่ายสาธารณูปโภคใต้ดินอยู่อย่างหนาแน่น ดังนั้นวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ในระดับตื้นเกือบทั้งหมดจึงไม่สามารถกระทำได้อาจเนื่องจากสัญญาณของเครื่องมือสำรวจถูกลดทอนหรือดูดซับโดยชั้นดินที่มีความชื้นและความนำไฟฟ้าของชั้นดิน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอย่างถี่ถ้วนตามหลักการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัตถุต่างชนิดกันจะสามารถถูกตรวจพบได้เมื่อวัตถุทั้งสองมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะเมื่อวัตถุสองชนิดมีความต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ส่วนความละเอียดของผลการสำรวจขึ้นอยู่กับระยะห่างของขั้วไฟฟ้า โดยวัตถุจะสามารถตรวจพบได้ต้องมีขนาดไม่น้อยกว่าระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตรวจสอบวัตถุโลหะใต้ดินด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยการสร้างเงื่อนไขทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการตรวจพบวัตถุ ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่วัตถุโลหะเพื่อสร้างความแตกต่างทางด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัตถุโลหะและดินโดยรอบโดยการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีปกติและวิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่วัตถุใต้ดิน (Mise-A-La-Masse)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจเพื่อการตรวจสอบหาวัตถุที่ฝังอยู่ใต้ดินโดยส่วนใหญ่นิยมใช้การสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ (Ground Penetration Radar; GPR) เนื่องจากมีระยะเวลาในการสำรวจที่สั้นและให้ผลการสำรวจได้ทันที [5] แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการสำรวจบนพื้นที่ที่เป็นดินเหนียว [6] เนื่องจากดินเหนียวมีค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ที่สูงทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ (Signal Attenuation) สูง [7] จึงมีแนวทางในการแก้ไขปัญหาการลดทอนของสัญญาณได้ 2 แนวทาง คือ 1) ลดความถี่ของสัญญาณในการสำรวจหรือ 2) เพิ่มกำลังส่งของเครื่องมือสำรวจ โดยแนวทางแรกคือการลดความถี่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะสามารถตรวจพบวัตถุได้ จึงมีเพียงแนวทางเดียวในการแก้ไขปัญหาคือเพิ่มกำลังส่งของเครื่องมือสำรวจ แต่เป็นการยากที่จะทำได้เนื่องจากเครื่องมือที่จำหน่ายได้ถูกควบคุมด้วยกฎหมายการสื่อสารระหว่างประเทศเพื่อป้องกันการส่งสัญญาณรบกวนต่อเครือข่ายสื่อสาร ดังนั้นวิธีการสำรวจด้วย GPR จึงไม่สามารถกระทำได้ในดินเหนียว

วิธีการสำรวจด้วยวิธีการอื่น ๆ อาทิเช่น การสำรวจด้วยคลื่นสั่นสะเทือน (Seismic Survey) ซึ่งวิธีการนี้ไม่สามารถตรวจพบวัตถุขนาดเล็กได้ โดยวัตถุขนาดเล็กที่สุดที่สามารถตรวจพบได้ต้องมีขนาดอย่างน้อยเท่ากับ 0.5 เท่าของความยาวคลื่น [8] ถ้าหากใช้วิธีการสำรวจด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ก็ไม่สามารถให้ผลการสำรวจได้เนื่องจากเป็นคลื่นกล (Mechanical Wave) ความถี่สูง เกิดการลดทอนของสัญญาณสูงด้วยเช่นกัน ส่วนวิธีการสำรวจด้วยการวัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Survey) หรือวิธีการสำรวจด้วยการวัดแม่เหล็ก (Magnetic Survey) สามารถกระทำได้โดยผลการสำรวจสามารถบอกตำแหน่งในแนวราบได้คร่าว ๆ แต่ไม่สามารถบอกระดับความลึกของวัตถุได้อย่างถูกต้อง

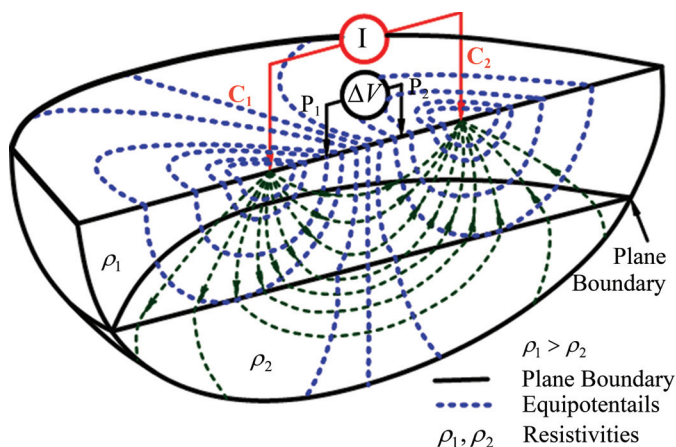
ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงการสำรวจด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า เพื่อที่จะสามารถตรวจพบโลหะที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินได้โดยใช้แนวความคิดจากวิธีการสำรวจด้วยเทคนิค Mise-A-La-Masse [9] ที่ได้มีการประยุกต์เพื่อใช้ในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ใช้เพื่อการสำรวจแหล่งแร่โลหะ [10] - [11] สำรวจโครงสร้างทางธรณีวิทยา [12] และงานทางด้านวิศวกรรมโยธา [13] โดยเฉพาะใช้ในการตรวจสอบความยาวของเสาเข็ม [14]

ทฤษฎีการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

ปริมาณความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, R) 1 โอห์ม (Ω) คือ ความต้านทานที่ยอมให้กระแส 1 แอมแปร์ (A) ไหลผ่านเมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1 โวลต์ (V) โดยความต้านทานของตัวต้านทานจะขึ้นอยู่กับความยาว (l) พื้นที่หน้าตัด (A) และค่าความต้านทานเฉพาะวัสดุแต่ละอย่าง (Resistivity, ρ) เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกปล่อยลงไปที่ผิวดินกระแสไฟฟ้าจะกระจายตัวเป็นรูปครึ่งทรงกลมและกระแสจะไหลตั้งฉากกับพื้นผิวที่เป็นจุดปล่อยกระแส สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 1 และสมการที่ (1)

$$v = IR = I \frac{\rho l}{2\pi r} \quad (1)$$

เมื่อ r คือ ระยะรัศมีห่างจากจุดปล่อยกระแสถึงจุดที่เราทำการพิจารณา
 I คือ กระแสไฟฟ้า



รูปที่ 1 การกระจายตัวของกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า [15]

ในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในภาคสนามจะใช้ขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ C_1 และ C_2 และขั้ววัดกระแสไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ P_1 และ P_2 (รูปที่ 1) ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าเสมือนในระดับความลึกในแนวดิ่ง ณ จุดตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว โดยค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วหาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2)

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right) \quad (2)$$

ในทางปฏิบัติค่าความต้านทานไฟฟ้าเสมือน (Apparent Resistivity; ρ_a) สามารถหาได้จากสมการที่ (3) - (4)

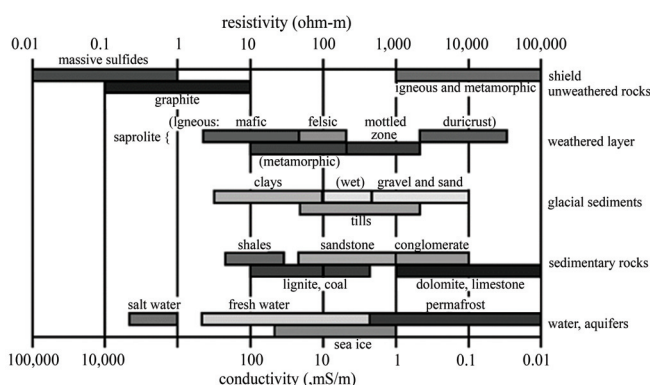
$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)} \quad (4)$$

โดยที่

k คือ ค่าตัวคูณทางเรขาคณิตขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งแท่งปล่อยกระแสไฟฟ้า
 r_{C1P1} คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ผลการสำรวจจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแสดงเป็นรูปตัดของชั้นดินที่แสดงถึงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่วัดและประมวลผลได้ โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าแสดงเป็นสีที่ต่างกันเป็นช่วง ๆ ตามมาตราส่วนแถบสีที่กำหนด การแปลผลข้อมูลการสำรวจถึงชนิดของดินจะเทียบเคียงจากข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของแต่ละวัสดุดังรูปที่ 2 ส่วนลักษณะทางธรณีวิทยาสามารถแปลผลได้จากลักษณะการกระจายตัวของค่าความต้านทานไฟฟ้า



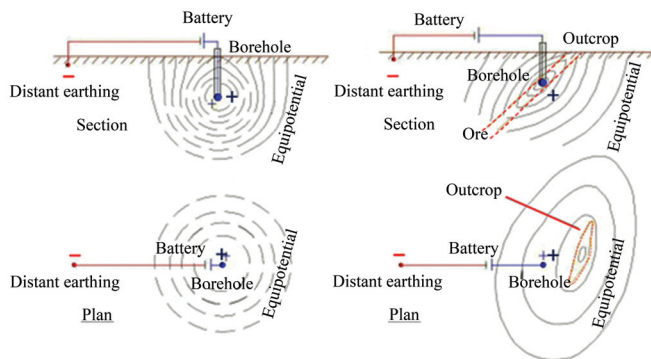
รูปที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุธรณีวิทยา [15]

การสำรวจด้วยเทคนิค **Mise-A-La-Masse**

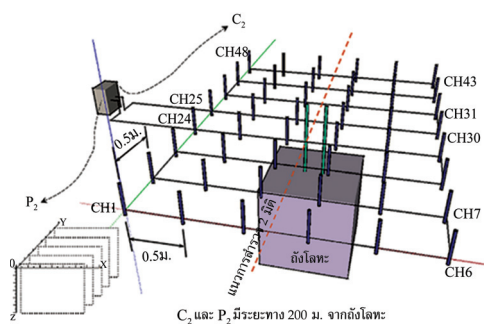
Mise-A-La-Masse เป็นเทคนิคการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งที่ใช้ในการสำรวจแร่โลหะตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 [16] ในการตรวจสอบสายแร่โลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูง ในวิธีการนี้ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ปล่อยกระแสไฟฟ้าหนึ่งขั้ว (C_1) ถูกติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งบนแนวของสายแร่ที่โผล่ขึ้นมาบนผิวดิน (Out Crop) หรือที่ระดับความลึกที่พบแร่ในหลุมเจาะ (รูปที่ 3)

วิธีการดำเนินการวิจัย

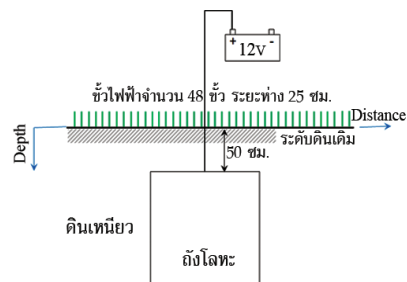
การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการขุดหลุมฝังวัตถุโลหะตัวอย่างเป็นถึงโลหะขนาด $1 \times 1 \times 1$ ม. ในดินเหนียวที่มีระดับความลึก 0.5 ม. จากผิวดินถึงผิวนบนของถึง การก่อสร้างเริ่มต้นด้วยการขุดหลุมฝังถึงโลหะด้วยแรงงานคนโดยใช้จอบและเสียมเป็นเครื่องมือ หลุมที่ขุดมีขนาดที่พอดีในการวางถึงและพื้นล่างของหลุมจะต้องได้ระดับ เมื่อวางถึงจะต้องได้ระดับในแนวราบให้มากที่สุดแล้วทำการเชื่อมต่อสายไฟฟ้าขนาด AWG 10 เข้ากับถึงโลหะสำหรับการจ่ายไฟฟ้าในขั้นตอนของการทดสอบ หลังจากนั้นทำการกลบหลุมด้วยดินเหนียวที่ขุดออกมาทีละชั้นที่มีความหนาไม่เกิน 15 ซม. แล้วทำการบดอัดทีละชั้นเพื่อให้ดินมีสภาพใกล้เคียงกับดินเดิมมากที่สุด รายละเอียดแบบจำลองของการศึกษานี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค Mise-A-La-Masse [9]

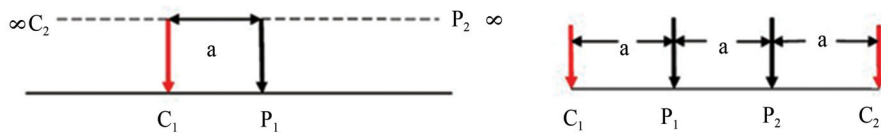


(ก) รูปแบบการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 3 มิติ



(ข) แบบจำลองถึงโลหะที่ถูกฝังอยู่ในดินเหนียว และการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

รูปที่ 4 แบบจำลองในการศึกษา



(ก) รูปแบบการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ Pole-Pole (ข) รูปแบบการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ Wenner
รูปที่ 5 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้า

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องมือ Syscal R1+ แบบอัตโนมัติที่มีจำนวน 48 ช่องสัญญาณ ในการวัดค่าแบบ 3 มิติ ได้กำหนดให้ทำการวัดค่าด้วยรูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าแบบ Pole-Pole (รูปที่ 5(ก)) โดยมีขั้วไฟฟ้าตามแนวกว้าง 6 แนว และแนวยาว 8 แนว รวมทั้งหมด 48 ขั้ว ทำหน้าที่เป็นขั้วกระแส (C_1) และขั้ววัดความต่างศักย์ (P_1) ส่วนขั้วไฟฟ้าระยะไกล (Remote Electrode) จำนวน 2 ขั้วคือ C_2 และ P_2 ถูกติดตั้งไว้ที่ระยะห่างจากตำแหน่งที่วัดค่าเป็นระยะทางข้างละ 200 ม. จากเครื่องมือวัดดังรูปที่ 4(ก) การวัดค่าจะเริ่มทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยทำการจ่ายกระแสที่ช่องสัญญาณที่ 1 (C_1) และมีขั้ววัดความต่างศักย์ (P_1) ที่ช่องสัญญาณที่ 2 เมื่อวัดค่าเสร็จแล้วทำการย้ายขั้ววัดความต่างศักย์ (P_1) ไปที่ช่องสัญญาณที่ 3 และย้ายไปเรื่อย ๆ จนถึงช่องสัญญาณที่ 48 หลังจากนั้นทำการย้ายจุดจ่ายกระแส ไปยังที่ช่องสัญญาณที่ 2 (C_1) และมีขั้ววัดความต่างศักย์ (P_1) ที่ช่องสัญญาณที่ 3 เมื่อวัดค่าเสร็จแล้วทำการย้ายขั้ววัดความต่างศักย์ (P_1) ไปที่ช่องสัญญาณที่ 4 และย้ายไปเรื่อย ๆ จนถึงช่องสัญญาณที่ 48 และทำซ้ำโดยทำการย้ายจุดจ่ายกระแสไปยังช่องสัญญาณถัดไป โดยการวัดค่าจะสิ้นสุดเมื่อขั้วจ่ายกระแส ไฟฟ้า (C_1) อยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 47 และขั้ววัดไฟฟ้า (P_1) อยู่ที่ช่องสัญญาณที่ 48

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้กำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่ามากกว่า 50 มิลลิโวลต์ โดยค่ากระแสที่ปล่อยจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความต้านทานไฟฟ้าของพื้นดินและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

การวัดค่ารอบแรกได้กระทำหลังจากการก่อสร้างเป็นระยะเวลา 7 วัน แล้วทำการติดตั้งเครื่องมือตามรูปที่ 4 แล้วทำการวัดค่าครั้งต่อมาโดยทำการต่อสายไฟฟ้าที่เชื่อมติดกับตัวถังโลหะได้ถูกต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ก่อนการวัดค่า แล้วทำการวัดค่าเหมือนกันทุกอย่างเหมือนกันกับการวัดค่าในรอบแรก

นอกเหนือจากนั้นแล้วเพื่อให้ผลการสำรวจที่ละเอียดมากขึ้น การศึกษาได้ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ (รูปที่ 4(ข)) มีแนวการสำรวจ 1 แนวผ่านศูนย์กลางของถังโลหะตามแนวยาวของรูปแบบการวัดค่าแบบ 3 มิติ โดยใช้รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าแบบ Wenner (รูปที่ 5(ข)) ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 25 ซม. และมีจำนวนขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 48 ขั้ว โดยทำการวัดค่าด้วยวิธีการวัดค่าแบบปกติ และทำการวัดค่าแบบจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ถังโลหะเช่นเดียวกับการวัดค่าแบบ 3 มิติ

ข้อมูลการสำรวจแบบ 3 มิติ และ 2 มิติ ที่ได้จะถูกทำการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม RES3DINV [17] และ RES2DINV [18] ตามลำดับ โดยผลที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้ากระจายตัวอยู่เป็นภาพตัดขวางแบบ 3 มิติ และ 2 มิติ สามารถนำผลที่ได้ไปแสดงผลเป็นรูปตัดในแนวตั้งหรือแนวนอนด้วยโปรแกรมนี้นี้ หรือโปรแกรมอื่นได้

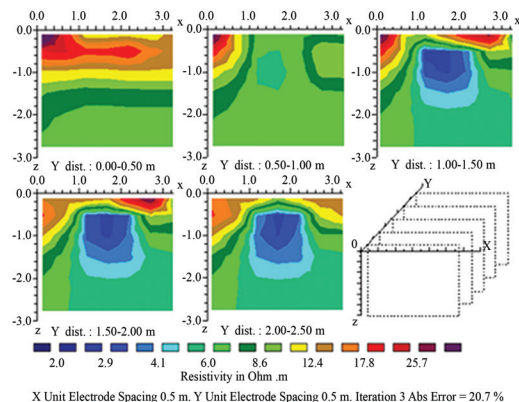
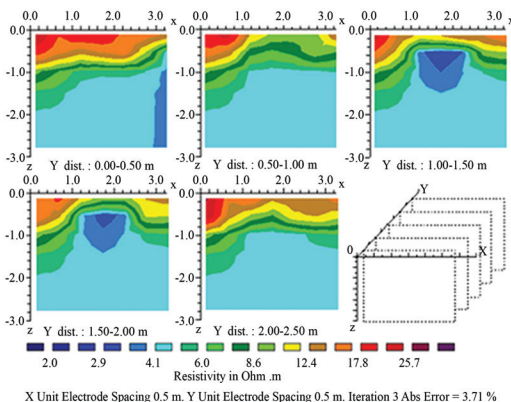
ผลการวิจัย

จากการฝังถึงโลหะ (รูปที่ 6) แล้วทำการบันทึกผลการสำรวจ และประมวลผลการสำรวจ พบว่าผลการสำรวจในรูปแบบ 3 มิติ ในชั้นดินสามารถตรวจพบถึงโลหะได้แม้มีรูปร่างลักษณะที่ไม่ชัดเจน (รูปที่ 7(ก)) โดยถึงโลหะที่พบแสดงเป็นพื้นที่ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าประมาณ 2 โอห์ม-ม. ในรูปตัดตามขวางที่ 1.00 - 2.00 ม. เมื่อทำการต่อถึงโลหะเข้ากับแบตเตอรี่แล้วพบว่า ผลการสำรวจสามารถแสดงได้ถึงลักษณะรูปร่างของถึงโลหะที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมอย่างชัดเจนซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าประมาณ 2 โอห์ม-ม. (รูปที่ 7(ข))



รูปที่ 6 การขุดหลุมเพื่อฝังถึงโลหะ

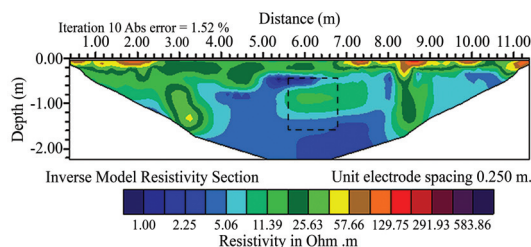
ผลการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ แบบปกติในชั้นดิน (รูปที่ 8(ก)) ไม่สามารถตรวจพบถึงโลหะที่ฝังเอาไว้ได้ แต่อย่างไรก็ตามได้พบตำแหน่งที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ คือ ช่วง 1 - 2 โอห์ม-ม. ที่ความลึก 50 ซม. ในช่วงระยะทาง (Distance) 5 - 6 ม. คล้ายกับลักษณะของพิกัดบนของถึงโลหะแต่ไม่ได้แสดงถึงรูปร่างทั้งหมดของถึงโลหะทั้งลูก แต่ภายหลังจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สู่ถึงโลหะแล้ว ผลการสำรวจสามารถตรวจพบถึงโลหะที่ฝังเอาไว้ได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 8(ข)) แต่เนื่องด้วยวิธีการประมวลผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าแปลกปลอม (Artifact) ที่แสดงเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำในตำแหน่งด้านซ้ายและด้านขวาของตำแหน่งที่เป็นถึงโลหะ ตลอดจนไม่แสดงถึงขอบด้านล่างของถึง โดยผลการสำรวจนี้มีความผิดพลาดสมบูรณ์ของผลการทดสอบนี้ มีค่าเท่ากับ 37.1 %



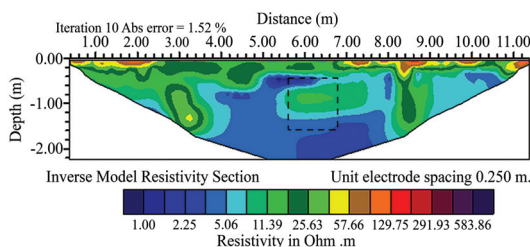
(ก) ผลการสำรวจด้วยวิธีการปกติ

(ข) ผลการสำรวจภายหลังจ่ายไฟฟ้าให้กับถึงโลหะ

รูปที่ 7 ผลการสำรวจแบบ 3 มิติ



(ก) ผลการสำรวจด้วยวิธีการปกติ



(ข) ผลการสำรวจภายหลังจ่ายไฟฟ้าให้กับถังโลหะ

รูปที่ 8 ผลการสำรวจแบบ 2 มิติ

อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

ผลการสำรวจด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 3 มิติ สามารถตรวจพบถังโลหะที่ถูกฝังไว้ในดินเหนียว ซึ่งเป็นดินที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำได้แต่ไม่ชัดเจน แต่เมื่อทำการสร้างเงื่อนไขทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการตรวจพบวัตถุด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่วัตถุโลหะเพื่อสร้างความแตกต่างทางด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัตถุโลหะและดินโดยรอบ เมื่อทำการเชื่อมต่อถังโลหะเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่แล้วได้ผลการสำรวจที่ชัดเจนขึ้นดังนี้

ผลการสำรวจแบบ 3 มิติ พบว่าขนาดของวัตถุที่ตรวจพบได้ตามแนวราบมีขนาดใหญ่กว่าความเป็นจริงราว 15 ซม. และมีความถูกต้องในด้านความลึกจากผิวดินถึงผิวด้านบนของถังโลหะ คือ 50 ซม. ส่วนระดับความลึกขอบด้านล่างของถังโลหะยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ในส่วนของผลการสำรวจแบบ 3 มิติ ในรูปแบบปกติ (รูปที่ 7(ก)) ไม่สามารถระบุตำแหน่งผิวด้านล่างได้เนื่องจากการกระจายตัวของค่าความต้านทานไฟฟ้ามีรูปร่างที่ไม่สอดคล้องกับลักษณะของถังโลหะ แต่หากพิจารณาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ณ ตำแหน่งผิวด้านล่างของถังโลหะ พบว่ามีความลึกที่ 1.4 ม. กล่าวคือ มีระยะความลึกน้อยกว่าความลึกจริง 0.3 ม. ส่วนของผลการสำรวจแบบ 3 มิติ ที่ประยุกต์ตามหลักการ Mise-A-La-Masse (รูปที่ 7(ข)) พบว่าการกระจายตัวของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ระดับความลึกประมาณ 1.6 ม. มีความสอดคล้องกับลักษณะของขอบด้านล่างของถังโลหะ โดยมีระยะความลึกมากกว่าความลึกจริง 10 ซม.

ผลการสำรวจแบบ 2 มิติ ที่มีแนวการสำรวจกึ่งกลางของวัตถุเมื่อมองจากด้านบน แสดงเป็นภาพตัดขวาง ซึ่งผลการสำรวจด้วยวิธีการปกติ ไม่อาจตรวจพบได้ถึงวัตถุที่มีรูปร่างคล้ายถังโลหะที่ฝังไว้พบได้เพียงกลุ่มของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำประมาณ 1 โอห์ม-ม. ที่ระดับความลึก 0.4 ม. ณ ตำแหน่งใกล้เคียงกับถังโลหะ ซึ่งแตกต่างจากผลการสำรวจด้วยเทคนิค Mise-A-La-Masse ที่สามารถแสดงถึงขอบเขตของถังโลหะทั้งผิวด้านบนและด้านข้างของถังโลหะได้อย่างชัดเจนที่ระดับความลึก 0.4 ม. และในขอบของถังโลหะในแนวราบที่ 5.75 - 6.8 ม. แต่อย่างไรก็ตามผลการสำรวจไม่สามารถระบุตำแหน่งของผิวด้านล่างของถังโลหะได้ ตลอดจนค่าความผิดพลาดจากการประมวลผลข้อมูล (Iteration Error) ด้วยโปรแกรม RES2DINV ของผลที่ได้จากเทคนิคการวัดค่า Mise-A-La-Masse คือ 37.1 % ซึ่งมีค่าสูงกว่าการวัดค่าแบบปกติ คือ 1.52 % ซึ่งเป็นค่า RMS Error จากการประมวลผลย้อนกลับ (Inverse Modeling) ด้วยวิธีการ Finite-Difference

ในการสำรวจแบบ 3 มิติ จะมีความยุ่งยากในการปฏิบัติงานในภาคสนามเนื่องจากต้องการพื้นที่ในการติดตั้งขั้วไฟฟ้าและระยะห่างในการติดตั้งขั้วไฟฟ้าระยะไกลจำนวน 2 ขั้ว (C_2 และ P_2) ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่มีข้อดีคือ มีความสะดวกในการติดตั้งเครื่องมือให้ผลเป็นรูปตัดขวางของชั้นดินที่มีความละเอียดสูงกว่าแบบ 3 มิติ ที่จำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากัน

การประยุกต์ใช้เทคนิค Mise-A-La-Masse เพื่อหาวัตถุโลหะที่ฝังอยู่ใต้ดินในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสู่ท่อโลหะใต้ดินในส่วนที่โผล่ขึ้นมาบนผิวดินหรือช่องเปิดสำหรับซ่อมท่อ/ควบคุม แต่ถ้าหากแนวท่อหรือวัตถุที่ฝังอยู่ใต้ดินไม่มีส่วนที่โผล่ขึ้นมาบนผิวดิน จะต้องขุดเปิดในจุดที่สะดวกและปลอดภัยที่สุดเพื่อทำการจ่ายกระแสสู่วัตถุที่ต้องการตรวจสอบ

หากวัตถุที่ฝังอยู่ใต้ดินเป็นวัตถุที่ไม่ใช่โลหะก็สามารถตรวจพบได้โดยง่าย แต่หากมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ตัวของวัตถุที่น่าสนใจ เช่น ชั้นดินที่มีความนำไฟฟ้าสูง ชั้นน้ำเค็ม น้ำบาดาล น้ำพุร้อน [2] ก็จะทำให้ได้ผลการสำรวจที่ดีขึ้น สามารถจำแนกชั้นวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าสูงได้ดีขึ้น

References

- [1] Peangta, S. (2007). **Exploration Geophysics**. Department of Geotechnology, Faculty of Technology, Khon Kean University (in Thai)
- [2] John M. Reynolds. (2011). **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. 2nd Edition Wiley-Blackwell
- [3] Richard Van Blaricom. (1980). **Practical Geophysics for the Exploration Geologist**. Northwest Mining Association (U.S.)
- [4] Loke, M. H. (2018). **Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys**. Access (27 July 2018). Available (<http://www.geotomosoft.com>)
- [5] David, J. Daniels. (2004). **Ground Penetrating Radar**. 2nd Edition. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom
- [6] Birstow, C. S. and Jol, H. M. (2003). **Ground Penetrating Radar in Sediments**. The Geological Society Publication No. 211, London
- [7] Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Line. **Water Resources Research**. Vol. 16, pp. 574-582. DOI: 10.1029/WR016i003p00574
- [8] Öz Yilmaz. (2001). **Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data**. Society of Exploration Geophysicists. p. 2065
- [9] Paranis, D. S. (1973). **Methods in Geochemistry and Geophysics**, 3, The Mise-A-La-Masse Method, Mining Geophysics, 2nd Revised Edition, pp. 195-202
- [10] Paranis, D. S. (1967). **Three-Dimensional Electric Mise-A-La-Masse Survey of An Irregular Lead-Zinc-Copper Deposit in Central Sweden**. The 29th Meeting of the European Association of Exploration Geophysicists Held in Stockholm. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1967.tb01796.x

- [11] Dinesh, G., Radhe, S., Agarwal, A. K., Bhattacharya, B. B., and Banerjee, B. (1999). Principles of Mise-A-La-Masse Method and its Application to Polymetallic Sulphide Deposits of Rajasthan. **Journal of Geological Society of India**. Vol. 53, Issue 1, pp. 49-57
- [12] Beasley, C. W. and Ward, S. W. (1986). Three Dimensional Mise-A-La-Masse Modeling Applied to Mapping Fracture Zones. **Geophysics**. Vol. 51, pp. 98-111
- [13] Wightman, W. E., Jalinoos, F., Sirles, P., and Hanna, K. (2003). **Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems**. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, Publication No. FHWA-IF-04-021
- [14] Ping, D., Jingliang, F., Zhengzhou, C., Liangshu, W., Xinnan, G., and Ran, Q. (2008). Applying Mise-A-La-Masse Method to Determine the Length of Reinforcement in Bored In Situ Concrete Piles. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**. Vol. 13, No. 2, pp. 51-56.
- [15] Palacky, G. J. (1987). Resistivity Characteristics of Geologic Targets. **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**. Publisher: Society of Exploration Geophysicists Tulsa Vol. 1, pp. 53-129
- [16] Schlumberger, C. (1920). **Etude Sur la Prospection Electrique Du Sous-Sol**. Gauthier-Villars, Paris, p. 94
- [17] Loke, M. H. (2004). **RES3DINV Version 2.14**. Access (27 July 2018). Available (<http://www.geotomosoft.com>)
- [18] Loke, M. H. (2004). **RES2DINV Version 3.54**. Access (27 July 2018). Available (<http://www.geotomosoft.com>)

คุณสมบัติทางเคมี ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและการทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มสายชูหมักจากข้าว 3 สายพันธุ์

Chemical Properties, Antioxidant Activity and Sensory Evaluation of Fermented Vinegar from 3 Cultivars of Rice

วิลาวัลย์ บุญยศุภา^{1*} กรรณิการ์ ทองดอนเปรียง¹ กมลรัตน์ สีหาบุญทอง¹ วุฒิพงษ์ สูงพล¹ วิวารณ์ ก็นโบราณ¹ นริกร ชุมด้วง¹ วรณิกา จันทรงาม¹ อมรรัตน์ ทองดี¹ อังสุมา ปาเส¹ และ ปิยวัฒน์ ศักดิ์ศรีบุญดี¹

Wilawan Boonsupa^{1*} Kannikar Tongdonpriang¹ Kamonrat Seehabuntong¹ Woottipong Soongpon¹ Wiwaporn Kinboran¹ Nareporn Chumduang¹ Wannipha Janngam¹ Amonrat Thongdee¹ Ungsuma Pase¹ and Piyawat Saksriboondee¹

Received: October 19, 2018; Revised: November 22, 2018; Accepted: January 23, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการผลิตน้ำส้มสายชูหมักจากไวน์ข้าวที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวสังข์หยด และข้าวไรซ์เบอร์รี่ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำส้มสายชูหมักที่ผลิตได้ และทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มสายชูหมักพร้อมดื่มด้วยวิธี 9-Point Hedonic Rating Scale ไวน์ข้าวที่หมักได้หลังปรับค่าปริมาณแอลกอฮอล์เป็นร้อยละ 7 แล้วเติมเชื้อแบคทีเรีย *Acetobacter pasteurianus* ที่มีปริมาตรร้อยละ 10 ปริมาตร/ปริมาตร หมักที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 15 วัน ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างในวันที่ 0 5 10 และ 15 ของการหมักพบว่าปริมาณแอลกอฮอล์มีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณกรดอะซิติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังสิ้นสุดการหมักพบว่า น้ำส้มสายชูหมักจากข้าวสังข์หยดมีปริมาณกรดอะซิติกสูงสุดคือ ร้อยละ 6.26 น้ำส้มสายชูหมักจากข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวสังข์หยด และข้าวไรซ์เบอร์รี่ มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระวัดโดยวิธี DPPH เท่ากับร้อยละ 74.95 72.56 และ 74.73 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคของผลิตภัณฑ์น้ำส้มสายชูข้าวหมักพร้อมดื่มพบว่า ได้รับคะแนนเฉลี่ยความชอบรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีคะแนนความชอบอยู่ในระดับความชอบเล็กน้อย

คำสำคัญ : น้ำส้มสายชูหมัก; ข้าวกล้องหอมมะลิ; ข้าวสังข์หยด; ข้าวไรซ์เบอร์รี่; ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม มหาสารคาม

¹ Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham

* Corresponding Author E - mail Address: wilawanboonsupa@ymail.com

Abstract

This study was conducted to produce fermented vinegars from three cultivars of rice, namely hommali brown rice sangyod and riceberry cultivars. The aim of the present study was to determine the chemical properties of the vinegars and their antioxidant activities. Sensory evaluation of the vinegars based on the 9 point hedonic rating scale was included in this study. Vinegar fermentation was performed by inoculating 10 % (v/v) of *Acetobacter pasteurianus* into each of three rice wines with their initial alcohol content were adjusted to 7 % (v/v). The fermentation was conducted for 15 days at ambient temperature (30 °C) and sampling was performed at 5-day intervals. It was observed for all samples that the level of alcohol decreased continuously over the fermentation period, which was consistent to the increased level of acetic acid. At the end of the fermentation process the fermented vinegar produced from the Sangyod rice exhibited the highest level of acetic acid of 6.26 %. Antioxidant activities observed for the vinegars produced from the hommali brown rice, Sangyod and Riceberry cultivar were 74.95 72.56 and 74.73 %, respectively. The results of the consumer acceptance test of ready-to-drink fermented rice vinegar showed that the average score of overall acceptance was not significantly different. ($P > 0.05$). The score was like slightly.

Keywords: Fermented Vinegar; Hommali Brown Rice; Sangyod Rice; Riceberry Rice; Antioxidant Activity

บทนำ

มลพิษทางอากาศ การสูบบุหรี่และก๊าซจากโรงงานอุตสาหกรรม รังสี UV ล้วนทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นในร่างกาย อนุมูลอิสระมีผลต่อการอักเสบและทำลายเนื้อเยื่อ มีผลต่อความเสื่อมหรือการแก่ของเซลล์ ส่งผลเสียต่อสุขภาพ ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสนใจรับประทานเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพมากขึ้น โดยเฉพาะเครื่องดื่มที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) เป็นสารประกอบที่สามารถป้องกันหรือชะลอกระบวนการเกิดออกซิเดชันในร่างกาย เช่น การย่อยสลายโปรตีนและไขมันจากอาหารที่กินเข้าไป น้ำส้มสายชูหมักเป็นเครื่องดื่มที่ได้จากกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ด้วยแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก ทำให้เกิดกรดอะซิติก น้ำส้มสายชูหมักที่สามารถนำไปบริโภคโดยผสมกับน้ำผึ้งและน้ำเรียกว่า น้ำส้มสายชูพร้อมดื่ม ซึ่งมีคุณประโยชน์ต่อร่างกายหากดื่มในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันโรคเบาหวาน [1] ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระช่วยในการยับยั้งการเกิดโรคมะเร็ง และช่วยทำให้หลอดเลือดหัวใจไม่ตีบตัน ดังเช่นงานวิจัย [2] ได้ทำการผลิตน้ำส้มสายชูหมักจากไวน์ข้าวเหนียวดำที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ 2 แบบ ได้แก่ ข้าวเหนียวดำยี่ห้อไรท์พรี และข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มพัว จากผลการทดลองพบว่า น้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าวเหนียวพันธุ์ลิ้มพัว มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าน้ำส้มสายชูข้าวเหนียวดำยี่ห้อไรท์พรี โดยน้ำส้มสายชู

จากข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มฟัวมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเท่ากับร้อยละ 72.53 จากเหตุผลดังกล่าวนี้ น้ำส้มสายชูหมักจากข้าวจึงเป็นเครื่องดื่มที่น่าสนใจ สามารถนำมาผลิตเป็นเครื่องดื่มที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทย ข้าวนอกจากเป็นแหล่งของพลังงานที่สำคัญแล้ว ข้าวยังมีบทบาทที่เป็นตัวช่วยเสริมในการป้องกันโรคไม่ติดต่อเรื้อรังได้ ข้าวในปัจจุบันจะพบเห็นว่ามีหลากหลายสายพันธุ์อย่างมาก การที่ข้าวมีสีที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของข้าวเหล่านั้นมีคุณค่าโภชนาการที่แตกต่างกันด้วย เช่น ข้าวสีขาวมักจะมีสารแกมมา ออไรซานอลสูง ข้าวกล้องที่มีเมล็ดสีขาวมีคุณค่าโภชนาการที่ดีเกือบทุกสายพันธุ์ โดยเฉพาะวิตามินบีหนึ่ง ช่วยในการป้องกันโรคเหน็บชา ส่วนข้าวที่มีสีม่วงเข้ม เช่น ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ข้าวกลุ่มนี้จะมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูงกว่าข้าวสีขาว เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ โพลีฟีนอล หรือสารแอนโทไซยานิน [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี การจัดการด้านอนุมูลอิสระ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มสายชูหมักจากข้าว 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวสังข์หยด ข้าวไรซ์เบอร์รี่

1. วิธีการทดลองผลิตไวน์ข้าว

นำข้าว (ยี่ห้อหงษ์ทองไลท์) ไปนึ่งให้สุก จากนั้นนำข้าวที่นึ่งสุกปริมาณ 500 กรัม มาคลุกกับลูกแป้งข้าวหมาก (ซื้อจากแป้งข้าวหมากน่านน้อย จังหวัดตราด) ปริมาณ 5 กรัม คลุกเคล้าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 4 วัน ปรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่ 29 องศาบริกซ์ โดยใช้น้ำเชื่อม (60 องศาบริกซ์) กรองเอาเฉพาะน้ำจากข้าว นำมาทำการฆ่าเชื้อโดยใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงประมาณ 35 องศาเซลเซียส เตรียมยีสต์สำหรับทำไวน์ โดยนำยีสต์ปริมาณ 5 กรัม ผสมน้ำอุ่น 60 มิลลิลิตร ใส่เชื้อยีสต์ผงที่ใช้สำหรับทำไวน์ (ซื้อจาก V Uncle Pi ยีสต์และอุปกรณ์ทำไวน์) *Saccharomyces cerevisiae* (Montracht) โดยใช้ยีสต์ผงร้อยละ 0.75 ต่อปริมาตรน้ำข้าว ปิดฝาขวดพลาสติกด้วยผ้าขาวบางที่รัดหนัวยาง เพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถระเหยออกได้หมักไวน์เป็นเวลา 4 วัน เมื่อครบเวลาทำการดูส่วนผสมในขวดใหม่ จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และบ่มไวน์ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน

2. วิธีการผลิตน้ำส้มสายชูจากไวน์ข้าว

จากไวน์ข้าวของแต่ละสายพันธุ์ที่เตรียมได้ นำไปปรับปริมาณแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 7 โดยเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ฆ่าเชื้อ แล้วถ่ายเชื้อ *Acetobacter pasteurianus* TISTR 521 ร้อยละ 10 ที่เตรียมจากอาหารเลี้ยงเชื้อ Glucose yeast extract broth เขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 วัน ลงในไวน์ข้าวแต่ละสายพันธุ์ สายพันธุ์ละ 3 ฟลาสก์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 15 วัน เก็บตัวอย่างในวันที่ 0 5 10 และ 15 วัน ตัวอย่างละ 3 ฟลาสก์ เมื่อหมักน้ำส้มสายชูครบ 15 วัน ทำการหยุดกระบวนการหมัก โดยการฆ่าเชื้อน้ำส้มสายชูที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของไวน์และน้ำส้มสายชู

วัดปริมาณแอลกอฮอล์ ปริมาณกรดอะซิติก น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตส คัดแปลงจากวิธีการของ Aguiar, A. et al. [4] โดยการเก็บตัวอย่างไวน์และน้ำส้มสายชูใส่ microtube ปิดด้วยพาราฟิล์ม เก็บไว้ในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (เก็บไว้ 1 เดือน) ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC-RID) (ยี่ห้อ shimadzu HPLC-RID system) โดยใช้คอลัมน์ Aminex HPX-87H column (300 x 7.8 mm.) อัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิคอลัมน์ 45 องศาเซลเซียส

วัฏภาคเคลื่อนที่คือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.005 โมล/ลิตร และใช้ตัวตรวจวัดแบบ Reflective Index Detector (RID-10A)/Degrasser DGU-20-As/PumpLC-20AD/Auto sampler sil-20A/Column oven CTO-20A คำนวณปริมาณแอลกอฮอล์ ปริมาณกรดอะซีติก น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโตสของตัวอย่างจากกราฟเส้นตรงของสารละลายมาตรฐาน

4. การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของน้ำส้มสายชู การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH [5]

เตรียมสารละลาย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมล โดยละลายด้วยเอทานอลร้อยละ 95 ปีเปดตัวอย่างปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และปีเปด DPPH ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ให้ทำปฏิกิริยากันในหลอดทดลองนำไปเขย่าให้เข้ากัน รอให้สารละลายทำปฏิกิริยากัน 20 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงของสารที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยใช้เอทานอลเป็น blank สมการที่ (1)

$$\text{Inhibition (\%)} = ((A_{\text{DPPH}} - A_{\text{Sample}})/A_{\text{DPPH}}) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

A_{DPPH} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH Control

A_{Sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยากับ DPPH

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด [6]

ปีเปดตัวอย่าง 1.0 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองและเติมน้ำกลั่น 9.5 มิลลิลิตร (สำหรับ blank ใช้เอทานอลร้อยละ 95 แทนสารตัวอย่าง) เติมสารละลาย Folin-ciocalteau ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (มิลลิกรัม/ลิตร)

5. การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มสายชูพร้อมดื่มจากไวน์ข้าวมีส่วนผสมดังนี้ น้ำส้มสายชูจากไวน์ข้าว 3 สายพันธุ์ 200 มิลลิลิตร น้ำผึ้ง 150 มิลลิลิตร น้ำเปล่า 150 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำน้ำส้มสายชูพร้อมดื่มจากไวน์ข้าวไปทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยใช้การทดสอบแบบ 9-point Hedonic rating scale ช่วงคะแนน 1 (ไม่ชอบมากที่สุด) ถึง 9 (ชอบมากที่สุด) ใช้ผู้ทดสอบชิมโดยเป็นผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ให้คะแนนความชอบในด้านความใส สี กลิ่น น้ำส้มสายชูรสเปรี้ยว รสหวาน และความชอบรวม วางแผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD)

6. การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) ทรีทเมนต์ละ 2 ซ้ำ นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วยวิธี One way ANOVA และวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการทดลองและอภิปราย

1. คุณภาพทางเคมีของไวน์ในระหว่างการหมัก

ผลการวิเคราะห์ทางเคมี ปริมาณแอลกอฮอล์ กรดอะซิติก น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโตส จากการหมักไวน์ข้าวเป็นเวลา 4 วัน โดยพบว่า ไวน์ที่ผลิตจากข้าวสังข์หยด มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุด เท่ากับร้อยละ 13.61 $\pm$ 0.01 (ตารางที่ 1) ปริมาณแอลกอฮอล์ในไวน์เกิดจากการย่อยน้ำตาลของยีสต์ เปลี่ยนให้เป็นเอทานอล [7] จากการทดลองพบว่า ไวน์ข้าวสังข์หยดมีปริมาณแอลกอฮอล์มากกว่าไวน์ข้าวขาว ที่ปลูกในมาเลเซีย (ร้อยละ 11.48) [8] การที่ไวน์ข้าวสังข์หยดมีปริมาณแอลกอฮอล์สูงกว่าไวน์ข้าวขาวนั้น เนื่องจากการทดลองผลิตไวน์ข้าวขาวไม่ได้มีการเติมน้ำตาลในช่วงการหมัก ซึ่งในกระบวนการหมักดังกล่าว ยีสต์จำเป็นต้องใช้น้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้เกิดแอลกอฮอล์ โดยการเปลี่ยนไพรูเวตให้เป็นเอทานอล ในสภาพที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน ผ่านกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis Pathway) โดยยีสต์จะใช้น้ำตาล ส่วนหนึ่งในการเจริญเพื่อเพิ่มปริมาณเซลล์ และบางส่วนจะถูกนำไปใช้สังเคราะห์สารเมแทบอไลต์อื่น ๆ ได้แก่ เอทานอล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก กรดแล็กติก กรดซัคซินิก ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 [9] จากการทดลองพบว่า ปริมาณแอลกอฮอล์ในไวน์ข้าวสังข์หยดมีปริมาณสูงสุด แสดงให้เห็นว่า ยีสต์มีความสามารถย่อยสลายน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโตสในข้าวสังข์หยดอย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ในวันที่ 1 ของการหมัก ปริมาณน้ำตาลกลูโคสในไวน์ข้าวสังข์หยดมีปริมาณ มากที่สุด และเมื่อหมักถึงวันที่ 4 ปริมาณน้ำตาลกลูโคสในไวน์ข้าวสังข์หยดเหลือน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับไวน์ข้าวกล้องหอมมะลิและไวน์ข้าวไรซ์เบอร์รี่

ตารางที่ 1 ปริมาณแอลกอฮอล์ในระหว่างการหมักไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์

ไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละ) / ระยะเวลาการหมัก (วัน)			
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
ข้าวกล้องหอมมะลิ	6.27 $\pm$ 0.02 ^b	10.06 $\pm$ 0.06 ^b	12.34 $\pm$ 0.02 ^b	13.51 $\pm$ 0.06 ^a
ข้าวสังข์หยด	7.31 $\pm$ 0.01 ^a	11.11 $\pm$ 0.02 ^a	13.60 $\pm$ 0.03 ^a	13.61 $\pm$ 0.01 ^a
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	6.06 $\pm$ 0.02 ^c	9.33 $\pm$ 0.02 ^c	9.83 $\pm$ 0.01 ^c	10.25 $\pm$ 0.00 ^b

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณไวน์จำนวน 2 ข้ำตามแนวดิ่ง ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 ปริมาณกรดอะซีติกในระหว่างการหมักไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์

ไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์	ปริมาณกรดอะซีติก (ร้อยละ) / ระยะเวลาการหมัก (วัน)			
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
ข้าวกล้องหอมมะลิ	0.16±0.01 ^b	0.19±0.01 ^a	0.20±0.01 ^b	0.20±0.01 ^b
ข้าวสังข์หยด	0.18±0.00 ^a	0.19±0.00 ^a	0.23±0.01 ^a	0.25±0.01 ^a
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.12±0.00 ^c	0.13±0.00 ^b	0.14±0.01 ^c	0.14±0.01 ^c

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณไวน์จำนวน 2 ข้ำตามแนวดิ่ง ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำตาลกลูโคสจากการหมักไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์

ไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์	ปริมาณน้ำตาลกลูโคส (ร้อยละ) / ระยะเวลาการหมัก (วัน)			
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
ข้าวกล้องหอมมะลิ	2.79±0.00 ^c	2.65±0.01 ^b	2.45±0.02 ^c	2.25±0.02 ^b
ข้าวสังข์หยด	4.61±0.01 ^a	2.93±0.01 ^a	2.74±0.02 ^a	2.21±0.03 ^b
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	3.00±0.00 ^b	2.89±0.01 ^a	2.55±0.01 ^b	2.47±0.01 ^a

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณไวน์จำนวน 2 ข้ำตามแนวดิ่ง ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสของการหมักไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์

ไวน์ที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์	ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตส (ร้อยละ) / ระยะเวลาการหมัก (วัน)			
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
ข้าวกล้องหอมมะลิ	4.87±0.01 ^b	3.04±0.02 ^b	2.60±0.02 ^b	2.60±0.00 ^b
ข้าวสังข์หยด	2.95±0.02 ^c	2.38±0.01 ^c	0 ^c	0 ^c
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	4.93±0.01 ^a	3.30±0.00 ^a	2.87±0.01 ^a	2.84±0.01 ^a

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณไวน์จำนวน 2 ข้ำตามแนวดิ่ง ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

2. คุณภาพทางเคมีของน้ำส้มสายชูในระหว่างการหมักและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มสายชูพร้อมดื่ม

ปริมาณแอลกอฮอล์และปริมาณกรดอะซีติก จากการผลิตน้ำส้มสายชูหมักจากไวน์ข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวสังข์หยด และข้าวไรซ์เบอร์รี่ โดยทำการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Acetobacter pasteurianus* เป็นเวลา 15 วัน พบว่าวันที่ 15 ของการหมักน้ำส้มสายชูจากข้าวสังข์หยดเหลือปริมาณแอลกอฮอล์น้อยที่สุด

คือ ร้อยละ 0.45 ± 0.01 (ตารางที่ 5) ส่งผลให้ปริมาณกรดอะซีติกของน้ำส้มสายชูจากข้าวสังข์หยดมีปริมาณกรดอะซีติกสูงสุดเท่ากับร้อยละ 6.26 ± 0.01 ดังแสดงในตารางที่ 6 ปริมาณกรดอะซีติก ที่ได้เกิดจากการทำงานของเชื้อผลิตกรดอะซีติกเปลี่ยนเอทานอลให้เป็นกรดอะซีติก จากการหมักน้ำส้มสายชูที่ผลิตจากไวน์ข้าว 3 สายพันธุ์พบว่า น้ำส้มสายชูจากไวน์ข้าวสังข์หยดมีปริมาณกรดอะซีติกมากกว่าน้ำส้มสายชูจากข้าว *Makgeoli* (ร้อยละ 5.61 ± 0.03) [10] ซึ่งน้ำส้มสายชูจากข้าว *Makgeoli* เริ่มต้นหมักโดยมีปริมาณแอลกอฮอล์เริ่มต้นร้อยละ 4 จึงทำให้แบคทีเรียผลิตกรดอะซีติกย่อยสลายแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นกรดอะซีติกได้น้อยกว่าน้ำส้มสายชูจากข้าวสังข์หยด

ตารางที่ 5 ปริมาณแอลกอฮอล์ในระหว่างการหมักน้ำส้มสายชูที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์

น้ำส้มสายชูที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละ) / ระยะเวลาการหมัก (วัน)			
	วันที่ 0	วันที่ 5	วันที่ 10	วันที่ 15
ข้าวกล้องหอมมะลิ	7.14 ± 0.01^b	3.11 ± 0.02^a	1.61 ± 0.02^c	0.50 ± 0.00^b
ข้าวสังข์หยด	7.97 ± 0.01^a	3.03 ± 0.02^c	2.75 ± 0.07^a	0.45 ± 0.01^c
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	7.10 ± 0.14^b	3.05 ± 0.01^b	1.80 ± 0.01^b	0.61 ± 0.01^a

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณไวน์จำนวน 2 ซ้ำตามแนวดิ่ง ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 6 ปริมาณกรดอะซีติกในระหว่างการหมักน้ำส้มสายชูที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์

น้ำส้มสายชูที่ผลิตจากข้าว 3 สายพันธุ์	ปริมาณกรดอะซีติก (ร้อยละ) / ระยะเวลาการหมัก (วัน)			
	วันที่ 0	วันที่ 5	วันที่ 10	วันที่ 15
ข้าวกล้องหอมมะลิ	0.11 ± 0.01^{ns}	2.54 ± 0.01^a	3.46 ± 0.02^b	5.41 ± 0.01^c
ข้าวสังข์หยด	0.12 ± 0.01^{ns}	2.27 ± 0.01^c	2.80 ± 0.02^c	6.26 ± 0.01^a
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.12 ± 0.01^{ns}	2.31 ± 0.02^b	4.48 ± 0.01^a	6.02 ± 0.01^b

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวดิ่งของปริมาณน้ำส้มสายชูจำนวน 2 ซ้ำ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ^{ns} = not significant

3. การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของน้ำส้มสายชูหมักจากข้าว 3 สายพันธุ์

จากการทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวสายพันธุ์สังข์หยด และข้าวสายพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ด้วยวิธี DPPH ผลการตรวจสอบพบว่า น้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าวกล้องหอมมะลิและข้าวไรซ์เบอร์รี่มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 74.95 ± 0.23 และ 74.73 ± 0.38 (ตารางที่ 7) จากการทดลองพบว่า ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำส้มสายชูหมักที่ทำจากข้าวกล้องหอมมะลิ มีปริมาณมากกว่าน้ำส้มสายชูจากมันฝรั่งสีม่วงผสมข้าว *Makgeoli* (ร้อยละ

67.63) [10] ซึ่งน้ำส้มสายชูข้าวกล้องหอมมะลิมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าน้ำส้มสายชูจากมันฝรั่งสีม่วงผสมข้าว *Makgeoli* อาจเนื่องจากข้าวกล้องมีสารต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าข้าวขาว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shimoji, Y. et al. [11] ได้ทำการทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระระหว่างน้ำส้มสายชูที่ผลิตจากข้าวขัดสีและข้าวไม่ขัดสี พบว่าน้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าวไม่ขัดสีมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ($IC_{50} = 1,710 \mu\text{g/ml}$) มากกว่าน้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าวขัดสี ($IC_{50} = 3,340 \mu\text{g/ml}$) การทดสอบปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดของน้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวสังข์หยด และข้าวไรซ์เบอร์รี่ พบว่าน้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าวกล้องหอมมะลิ มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ $285.58 \pm 4.11 \text{ mg/l}$ รองลงมาคือน้ำส้มสายชูข้าวไรซ์เบอร์รี่ และน้ำส้มสายชูจากข้าวสังข์หยดซึ่งปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ร้อยละฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดของน้ำส้มสายชูจากข้าว 3 สายพันธุ์

ชนิดของข้าว	DPPH (% inhibition)	ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)
ข้าวกล้องหอมมะลิ	74.95 ± 0.23^a	285.58 ± 4.11^a
ข้าวสังข์หยด	72.56 ± 0.54^b	135.78 ± 0.96^c
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	74.73 ± 0.38^a	275.11 ± 3.44^b

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งของปริมาณน้ำส้มสายชูจำนวน 3 ข้าว ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

4 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส น้ำส้มสายชูพร้อมดื่มจากน้ำส้มสายชูหมักของข้าว 3 สายพันธุ์ จากการวิเคราะห์พบว่า น้ำส้มสายชูจากข้าวกล้องหอมมะลิ มีสีเหลืองใส มีกลิ่นของน้ำส้มสายชูอ่อน ๆ น้ำส้มสายชูจากข้าวสังข์หยด มีสีเหลืองใส มีกลิ่นน้ำส้มสายชูแรง และน้ำส้มสายชูจากข้าวไรซ์เบอร์รี่มีสีน้ำตาลอ่อน มีกลิ่นน้ำส้มสายชูแรง จากการทดลองพบว่า น้ำส้มสายชูพร้อมดื่มที่ทำจากข้าวต่างสายพันธุ์มีคะแนนการยอมรับด้านความใสต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ส่วนการยอมรับด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบรวมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) การยอมรับในภาพรวมพบว่า น้ำส้มสายชูที่ผลิตจากข้าวกล้องหอมมะลิมีระดับความชอบรวมเท่ากับ 6.20 ± 1.93 ซึ่งอยู่ในระดับความชอบเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความชอบรวมของน้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าว 3 สายพันธุ์พบว่า น้ำส้มสายชูพร้อมดื่มที่ผลิตขึ้นไม่ได้มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่โดดเด่น จนทำให้ผู้บริโภครู้สึกชอบอย่างมีนัยสำคัญมีเพียงลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความใสเท่านั้นที่ผู้บริโภคสามารถแยกแยะได้ชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มสายชูพร้อมดื่มจากข้าว 3 สายพันธุ์

น้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าว 3 สายพันธุ์	คะแนนคุณลักษณะ				
	ความใส	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบรวม
ข้าวกล้องหอมมะลิ	6.90±1.29 ^a	6.30±1.49 ^{ns}	7.00±1.94 ^{ns}	6.20±2.30 ^{ns}	6.20±1.93 ^{ns}
ข้าวสังข์หยด	7.60±0.70 ^a	6.70±1.06 ^{ns}	5.70±2.06 ^{ns}	6.60±2.22 ^{ns}	5.50±2.32 ^{ns}
ข้าวไรซ์เบอร์รี่	5.60±1.84 ^b	6.50±1.58 ^{ns}	6.30±1.42 ^{ns}	6.00±2.45 ^{ns}	5.30±1.70 ^{ns}

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งของปริมาณน้ำส้มสายชูจำนวน 2 ข้ำ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ^{ns} = not significant

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองหมักน้ำส้มสายชูจากข้าว 3 สายพันธุ์พบว่า น้ำส้มสายชูหมักจากข้าวสังข์หยด มีปริมาณกรดอะซิติกสูงสุด คือ ร้อยละ 6.26 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดของน้ำส้มสายชูที่ทำจากข้าว 3 สายพันธุ์ พบว่าน้ำส้มสายชูหมักจากข้าวสายพันธุ์หอมมะลิ มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด (ร้อยละ 74.95 และ 285.58 มิลลิกรัม/ลิตร) ด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัสน้ำส้มสายชูพร้อมดื่มพบว่า มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในด้านความใส แต่ด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบรวมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

References

- [1] Ho, C. W., Lazim, A. M., Fazry, S., Zaki, U. K. H. H., and Lim, S. J. (2017). Varieties, Production, Composition and Health Benefits of Vinegars: A Review. **Food Chemistry**. Vol. 221, pp.1621-1630. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.10.128
- [2] Boonsupa, W., Thongdonpean, K., and Keawmad, P. (2017). Chemical Property, Antioxidant Activity and Sensory Evaluation of Fermented Vinegar from 2 Type of Black Glutinous Rice. **Science and Technology Nakon Sawan Rajabhat University Journal**. Vol. 9, No. 10, pp. 69-77 (in Thai)
- [3] Rocejanassaroj, A. (2008). **Antioxidant in Black Rice, Black Sticky Rice and Red Rice; Protective Effect on Cytotoxicity and Genotoxicity by Free Radicals and Gene Expression on Lipid Accumulation in Culture Cells**. M.S. Dissertation Chulalongkorn University (in Thai)
- [4] Aguiar, A., Nascimento, R. A. D. A., Ferretti, L. P., and Goncalves, A. R. (2005). Determination of Organic Acids and Ethanol in Commercial Vinegars. **Brazilian Journal of Food Technology**. pp. 51-56
- [5] Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., and Berset, C. (1995). Use of Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. **Lebensm Wiss Technology**. Vol. 28, pp. 25-30. DOI: 10.1016/S0023-6438(95)80008-5

- [6] Singleton, V. L. and Rossi, J. A. (1965) .Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**. Vol. 16, Issue 3, pp. 144-158
- [7] Danvirutai, P. and Laopaiboon, P. (2005). **Fruit Wine, and Sato, How Produced with Confidence**. Fermentation Research Center for Value Added Agricultural Products. (in Thai)
- [8] Palaniveloo, K. and Vairappan, C. S. (2013). Biochemical Properties of Rice Wine Produced From Three Different Starter Cultures. **Journal of Tropical Biology and Conservation**. Vol. 10, pp. 31-41
- [9] Jitjaroen, W. (2013). **Wine maker handbook**. Chaing Mai Publishers. (in Thai)
- [10] Chun, J. E., Baik, M. Y., and Kim, B. Y. (2014). Manufacture and Quality Evaluation of Purple Sweet Potato *Makgeolli* Vinegar Using a 2-Stage Fermentation. **Food Science and Biotechnol.** Vol. 23, Issue 4, pp. 1145-1149. DOI: 10.1007/s10068-014-0156-7
- [11] Shimoji, Y., Tamura, Y., Nakamura, Y., Nanda, K., Nishidai, S., Nishikawa, Y., Ishinara, N., Uenakai, K., and Ohigashi, H. (2002). Isolation and Identification of DPPH Radical Scavenging Compounds in Kurosu (Japanese Unpolished Rice Vinegar). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 50, pp. 6501-6503. DOI: 10.1021/jf020458f

ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและความคงตัวของเยลลี่ลูกทึยฮาลาลระหว่างการเก็บรักษา

Effect of Hydrocolloids on Quality and Stability of Halal Velvet Tamarind Jelly During Storage

รอมลี เจดอเลาะ^{1*} และซูไฮมิน เจ๊ะมะลี²

Romlee Chedoloh^{1*} and Suhaimin Chehmalee²

Received: August 31, 2018; Revised: November 30, 2018; Accepted: December 6, 2018

บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกทึยฮาลาลในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้มีความสำคัญต่อความมั่นใจของผู้บริโภคมุสลิม การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีและความคงตัวของเยลลี่ลูกทึยฮาลาลระหว่างการเก็บรักษา ทำการเติมคาราจีแนนและเพกทินทดแทนเจลาตินร้อยละ 0.50 และ 1.00 พบว่าการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนที่ระดับร้อยละ 0.50 ตัวอย่างได้รับคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด คือ 7.70 (ความชอบระดับปานกลาง) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (Water Activity: a_w) และค่าพีเอชเท่ากับ 0.84 และ 4.05 การประเมินอายุการเก็บรักษาสามารถบรรจุในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ลามิเนตที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 8 สัปดาห์ โดยมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกินตามที่มาตรฐานกำหนด 1×10^4 โคโลนีต่อกรัม ซึ่งให้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมที่ระดับคะแนน 6.81 (ความชอบระดับเล็กน้อย) จากผลการทดลองคาราจีแนนร้อยละ 0.50 และเจลาตินร้อยละ 0.50 สามารถใช้เป็นส่วนประกอบสำหรับการผลิตเยลลี่ลูกทึยฮาลาล

คำสำคัญ : เยลลี่; ลูกทึย; คาราจีแนน; เพกทิน; อายุการเก็บรักษา

¹ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, ยะลา

¹ Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยฟาฏอนี ปัตตานี

² Faculty of Science and Technology, Fatoni University, Pattani

* Corresponding Author E - mail Address: romalee.c@yru.ac.th

Abstract

The development of halal velvet tamarind jelly products was important for Muslim consumer confidence. The objectives of this study were to determine the effects of hydrocolloid on physical and chemical properties and to monitor stability of velvet tamarind jelly. The substitution of gelatin by carrageenan and pectin at 0, 50 and 100 % showed that gelatin substituted with 50 % carrageenan exhibited the highest overall likeness score which was 7.70 (like moderately). The water activity (a_w) and pH of jelly products were 0.84 and 4.05. The stability of jelly samples packed in aluminium foil bag during 8 weeks at 4 °C was investigated. The total bacterial count was detected but it did not exceed the limitation of standards at 1×10^4 cfu/g. The overall likeness score was 6.81 (like slightly). From the results, 50 % carrageenan and 50 % gelatin could be used as ingredients for halal velvet tamarind jelly production.

Keywords: Jelly; Velvet Tamarind; Carrageenan; Pectin; Shelf-Life

บทนำ

ผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลมีความสำคัญต่อความมั่นใจและการยอมรับของผู้บริโภคมุสลิม การพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยส่วนผสมจากวัตถุดิบฮาลาลที่ได้ผ่านการรับรองจากองค์กรที่มีความเชื่อถือทั้งในและต่างประเทศจะช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบและวิเคราะห์อาหารฮาลาล โดยเฉพาะสารต้องสงสัยในอาหารฮาลาล มีการใช้สารให้ความคงตัวที่หะรอม (สิ่งที่ไม่อนุมัติในศาสนาอิสลาม) ประเภทเจลาตินที่ผลิตจากหนังหรือกระดูกหมู [1] ในผลิตภัณฑ์ประเภทเยลลี่ผลไม้ การใช้สารทดแทนหรือการใช้เจลาตินที่ฮาลาลช่วยในการประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นฮาลาล [2] แต่เจลาตินที่ฮาลาลจากหนังปลายังมีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าเจลาตินหมู ต้องมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ คาราจีแนน และเพกทิน ในการปรับคุณสมบัติการยืดหยุ่น และความคงตัวของเจล วิเคราะห์อาหารฮาลาลต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ระดับสูง ทรัพยากรบุคคลและค่าใช้จ่ายสูง จึงจำเป็นต้องผลิตอาหารฮาลาลตั้งแต่การใช้ส่วนผสมที่ฮาลาล ซึ่งจะง่ายต่อการตรวจสอบอาหารฮาลาล หากมีการใช้เจลาตินที่ไม่ฮาลาลแล้วนั้นมีความยากในการตรวจวิเคราะห์และระบุสารต้องสงสัยในอาหารฮาลาล เสี่ยงประมาณ เวลาในการตรวจสอบ รวมทั้งการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใช้ผลไม้ที่อยู่ในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ และเป็นอัตลักษณ์ คือลูกหยี ซึ่งมีรสชาติเปรี้ยวหวาน สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเยลลี่ได้ ลูกหยีมีคุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย สารแอนติออกซิแดนท์ กรดอินทรีย์ วิตามินซี เยื่อใยอาหาร [3] - [4] และแร่ธาตุอาหาร ได้แก่ แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก และแมกนีเซียม [5] โดยทั่วไปแล้วผู้ประกอบการในพื้นที่ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ลูกหยีกวน ลูกหยี 3 รส และลูกหยีเคลือบน้ำตาล ซึ่งจัดเป็นผลิตภัณฑ์แบบเดิม ไม่มีความหลากหลาย [6] หากมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่ที่ฮาลาลช่วยในการเพิ่มรูปแบบผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผู้ประกอบการได้ ดังนั้นศึกษาการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินต่อสมบัติทางกายภาพและเคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์

เยลลี่ลูกหยี และศึกษาอายุการเก็บรักษาของเยลลี่ลูกหยีต่อสมบัติทางกายภาพและเคมี และการยอมรับของผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัส เพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์อาหารในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนใต้เป็นที่รู้จักและมีมาตรฐานอาหารที่ดีในประเทศไทยต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

ลูกหยีที่นำมาจากสถานประกอบการอามานีลูกหยี อำเภอเมือง จังหวัดยะลา ช่วงเดือนพฤษภาคม 2559 ทำการคัดเลือกลูกหยีที่มีคุณภาพ ทำการกะเทาะเปลือกให้แตก แล้วคัดแยกเปลือกออกจากเนื้อลูกหยี นำเนื้อลูกหยีแกะเมล็ดออกด้วยมีด และบรรจุเนื้อลูกหยีในถุงพลาสติกชนิด PP และเจลาตินปลาฮาลาล จากบริษัทฮาลามิกส์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศไทย ซึ่งมีสมบัติดังนี้ ความแข็งแรงของเจล 247 บลูมกรัม ค่าพีเอช 5.6 ความชื้นและโปรตีนร้อยละ 11.1 และ 86.5 ตามลำดับ น้ำตาลทรายยี่ห้อมิตรผล ประเทศไทย เกลือยี่ห้อปทุมทิพย์ ประเทศไทย กลูโคสไซรัป ยี่ห้อปลาแฟนชีคาร์ฟ ประเทศไทย ใช้คาราจีแนนและเพกทิน (เพกทินที่มีค่า DM ประมาณร้อยละ 62 - 68) เกรตอาหารจากบริษัทเคมีภัณฑ์คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ลามิเนต (AL; BOPP + Aluminum + LLDPE) ขนาด 7 x 8 นิ้ว หนา 100 ไมครอน

2. การศึกษาการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินต่อสมบัติทางกายภาพและเคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของเยลลี่ลูกหยีฮาลาล

2.1 การผลิตเยลลี่ลูกหยีฮาลาล

ทำการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินที่ระดับร้อยละ 0 50 และ 100 5 ชุดการทดลอง ดังนี้

- 1) ชุดควบคุม
- 2) การทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนร้อยละ 50
- 3) การทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนร้อยละ 100
- 4) การทดแทนเจลาตินด้วยเพกทินร้อยละ 50
- 5) การทดแทนเจลาตินด้วยเพกทินร้อยละ 100 ทำการผลิตเยลลี่ลูกหยีโดยนำเนื้อลูกหยีผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1 : 3 ปั่นด้วยเครื่องปั่นผสม 3 นาที ทำการกรองน้ำลูกหยีด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้น นำน้ำลูกหยี 300 กรัม (ร้อยละ 44.78) และน้ำตาล 300 กรัม (ร้อยละ 44.78) ผสมเจลาตินจากปลา 20 กรัม (ร้อยละ 2.99) น้ำอุ่น 18 กรัม (ร้อยละ 2.69) กลูโคสไซรัป 31.5 กรัม (ร้อยละ 4.70) และเกลือ 0.5 กรัม (ร้อยละ 0.07) นำส่วนผสมทั้งหมดใส่ลงในกระทะและให้ความร้อนที่ไฟระดับอ่อน กวนผสมให้เข้ากัน โดยควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอาหาร รุ่น TMO-10 ประเทศจีน นานประมาณ 5 นาที นำส่วนผสมเทลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนรูปดอกไม้ ซึ่งขนาดของหลุมความลึก 1 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ตั้งให้เย็นแล้วนำไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง

2.2 การวิเคราะห์

นำตัวอย่างเยลลี่ลูกทียี่มาทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่าสี ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Color Flex) รุ่น Hunter lab CX 1471 ประเทศญี่ปุ่น วิเคราะห์ความชื้นด้วยเครื่องอบตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) รุ่น UF260 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี วัดค่า a_w ด้วยเครื่องวัดค่า a_w ตรา Aqualab รุ่น S36090 ประเทศสหรัฐอเมริกา วิเคราะห์เยื่อใยด้วยเครื่องวิเคราะห์เยื่อใยอาหาร ตรา VELP SCIENTIFICA รุ่น FIWE สหรัฐอเมริกา วิเคราะห์เถ้าด้วยเตาเผาไฟฟ้า ตรา Carbolite รุ่น S302RR ประเทศสหรัฐอเมริกา คาร์โบไฮเดรต (จากการคำนวณ) และวัดค่าพีเอช ด้วยเครื่องวัดพีเอช ตรา Schott รุ่น G 0840 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ [7] และนำผลิตภัณฑ์เยลลี่วิเคราะห์เนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) แรงยึดเหนี่ยว (Cohesiveness) ความเหนียว (Gumminess) ความยืดหยุ่น (Springiness) และความทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น (TA-XT2i) ประเทศอังกฤษ ตั้งเครื่องโดยมีค่า Pre-Test Speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที Test Speed 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และหัวกด Probe P/50 ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ และทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส จากนักศึกษาที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน (Untrained Panel) มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลาจำนวน 50 คน โดยวิธี 9-Point Hedonic Scale [8] โดยทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ ความยืดหยุ่น ความยากง่ายในการเคี้ยว เนื้อสัมผัส ความหวาน ความเค็ม ความเปรี้ยว และความชอบโดยรวม

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) และการวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCBD) ในการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. การศึกษาความคงตัวของเยลลี่ลูกทียี่ฮาลาลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัสระหว่างการเก็บรักษาแบบแช่เย็น

3.1 การเก็บรักษาและการวิเคราะห์

ทำการผลิตเยลลี่ลูกทียี่ฮาลาลตามชุดการทดลองที่ได้รับคัดเลือกจากข้อ 2 และทำการบรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ (AL; BOPP + Aluminum + LLDPE) ขนาด 7×8 นิ้ว² เยลลี่ลูกทียี่ 15 ชิ้น (ขนาด 1.5×1.0 เซนติเมตร น้ำหนักชิ้นละ 4.53 กรัม) และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำการเก็บตัวอย่าง 0 2 4 6 และ 8 สัปดาห์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ ปริมาณความชื้น วัดค่าพีเอช วิเคราะห์ปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และวิเคราะห์เชื้อยีสต์และรา [7] จากนั้นนำมาทดสอบทางประสาทสัมผัส จากนักศึกษาที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน (Untrained Panel) มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จำนวน 50 คน โดยใช้วิธี 9-Point Hedonic Scale [8] ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ ความยืดหยุ่น ความยากง่ายในการเคี้ยว เนื้อสัมผัส ความหวาน ความเค็ม ความเปรี้ยว และความชอบโดยรวม

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ และวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ในการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ของผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกทึย วิเคราะห์ ความแปรปรวน และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลของการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินต่อสมบัติทางกายภาพและเคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของเยลลี่ลูกทึย

1.1 ค่าสี ค่าสีของเยลลี่ลูกทึยฮาลาลที่มีการทดแทนด้วยคาราจีแนนและเพกทินมีความแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 1) เมื่อทำการทดแทนด้วยคาราจีแนนทั้ง 2 ระดับ และเพกทินที่ระดับร้อยละ 50 มีผลทำให้เยลลี่มีค่า L^* สูงกว่าชุดควบคุม ($p \leq 0.05$) ส่วนการทดแทนด้วยเพกทินร้อยละ 100 มีผลทำให้ค่า L^* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยทั่วไป ค่า L^* บ่งบอกถึงความสว่างของสีผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาค่า a^* และ b^* พบว่าเยลลี่ลูกทึยฮาลาลที่มีการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนร้อยละ 100 และเพกทินร้อยละ 50 และร้อยละ 100 มีค่า a^* และ b^* สูงกว่าชุดควบคุม ($p \leq 0.05$) ส่วนตัวอย่างเยลลี่ที่มีการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนร้อยละ 50 มีค่า a^* และ b^* ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุกชุดการทดลอง ($p \leq 0.05$) ค่า a^* และ b^* บ่งบอกถึงความเป็นสีแดง/สีเขียว และความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อทำการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนเพียงร้อยละ 50 มีผลทำให้เยลลี่มีความสว่างเพิ่มขึ้น และมีความเป็นสีแดงและความเป็นสีเหลืองลดลง ทำให้เยลลี่มีลักษณะสีอ่อนกว่าทุกชุดการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเติมคาราจีแนนร้อยละ 50 มีผลทำให้ลดปริมาณเจลาตินซึ่งเป็นโปรตีน มีผลทำให้โอกาสในการเกิดลคปฏิกิริยาเมลลาร์ดระหว่างกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ระหว่างการให้ความร้อน [9] - [10] อย่างไรก็ตามเยลลี่ที่ได้จากชุดการทดลองอื่นนั้นไม่มีสีเข้มกว่าชุดควบคุม อาจเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของคาราจีแนนและเพกทิน ซึ่งเป็นกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ การอุ้มน้ำ และการจัดเรียงตัวระหว่างการเกิดเจลแตกต่างกัน คาราจีแนนจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติในการทำให้เกิดสีเข้มขึ้น รวมทั้งการผลิตผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกทึยมีองค์ประกอบด้วยน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อนทำให้ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน โดยสารสีในอาหารมีการเปลี่ยนเป็นสารสีเหลืองจนถึงน้ำตาลและน้ำตาลแดง [10] - [12]

ตารางที่ 1 ค่าสีของเยลลี่ลูกทึยฮาลาลที่ทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินที่ระดับแตกต่างกัน

ค่าสี	ชุดควบคุม	คาราจีแนน (ร้อยละ)		เพกทิน (ร้อยละ)	
		50	100	50	100
L^*	26.06±0.01 ^d	29.62±0.02 ^b	28.80±0.01 ^c	29.93±0.01 ^a	23.18±0.01 ^c
a^*	3.94±0.01 ^d	2.90±0.01 ^c	5.62±0.01 ^c	5.65±0.01 ^b	7.53±0.01 ^a
b^*	8.01±0.01 ^d	7.86±0.01 ^c	9.93±0.01 ^a	9.19±0.01 ^b	9.03±0.01 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) 50 และ 100 คือ ร้อยละการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทิน

1.2 เนื้อสัมผัสของเยลลี่ การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์เยลลี่ที่ใช้คาราจีแนนและเพกทินทดแทนเจลาตินร้อยละ 0 50 และ 100 พบว่าชนิดและปริมาณของการทดแทนเจลาตินมีผลต่อเนื้อสัมผัส ด้านความแข็ง (Hardness) แรงยึดเหนี่ยว (Cohesiveness) ความเหนียว (Gumminess) ความยืดหยุ่น (Springiness) และความทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยที่ปริมาณคาราจีแนนทดแทนเจลาตินเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความแข็ง แรงยึดเหนี่ยว ความเหนียว และความทนต่อการเคี้ยวลดลง เนื่องจากคาราจีแนนมีความคงตัวที่ความกรด - ต่างเป็นกลาง เมื่อ เยลลี่เป็นกรดพีเอชช่วง 3.0 - 3.8 จะเกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic Linkage) มีผลทำให้สูญเสียความหนืดและการเกิดเจลของผลิตภัณฑ์ ส่งผลต่อค่าความแข็ง แรงยึดเหนี่ยว ความเหนียว ความทนต่อการเคี้ยวลดลง [13] การใช้เพกทินที่ร้อยละ 50 ทำให้มีค่า TPA สูงที่สุด เนื่องจากมีการจับเครือข่ายกับเจลาตินและเพกทินอย่างเหมาะสม ส่งผลต่อโครงสร้างร่างแห ไฮโดรคอลลอยด์จากโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต มีความยืดหยุ่นและแข็งแรง ส่งผลต่อค่าความแข็ง ความเหนียว และความทนต่อการเคี้ยวสูงที่สุดในการศึกษานี้ ขณะที่การทดแทนด้วยเพกทินร้อยละ 100 ส่งผลต่อการยึดเกาะของเจลลดลง และเนื้อสัมผัสนุ่ม ซึ่งเนื้อสัมผัสของเยลลี่จากการก่อตัวเกิดเจลของโปรตีนจากเจลาตินทำให้เนื้อสัมผัสคล้ายกับแยม สามารถวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ได้ ส่วนค่าแรงยึดเหนี่ยวลดลงตามปริมาณของคาราจีแนนเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2) เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เยลลี่มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชมีผลเนื่องจากความแข็งแรงของเจลลดลงตามความเป็นกรดของอาหารที่เพิ่มขึ้น [14]

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกหยีที่ทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทิน

วิเคราะห์	ชุดควบคุม	คาราจีแนน (ร้อยละ)		เพกทิน (ร้อยละ)	
		50	100	50	100
ความแข็ง (N)	40.14±2.44 ^b	18.62±0.67 ^c	11.33±0.43 ^d	157.80±2.74 ^a	เนื้อนุ่มและ
แรงยึดเหนี่ยว *	0.90±0.01 ^a	0.62±0.01 ^c	0.51±0.01 ^d	0.68±0.01 ^b	และเจล
ความเหนียว (N)	36.13±1.16 ^b	11.65±0.28 ^d	5.82±0.21 ^c	107.17±2.54 ^a	ไม่ยึดเกาะ**
ความยืดหยุ่น *	0.96±0.01 ^{ab}	0.91±0.02 ^c	0.94±0.01 ^b	0.95±0.01 ^a	
ความทนต่อการเคี้ยว (N)	34.81±1.25 ^b	10.68±0.13 ^d	5.50±0.15 ^c	101.96±1.80 ^a	

หมายเหตุ : * ไม่มีหน่วย

** ไม่สามารถวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วย TPA เนื่องจากตัวอย่างผลิตภัณฑ์นั้นนุ่มและไม่เกาะตัว

1.3 ความชื้น และค่า a_w การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและค่า a_w ในผลิตภัณฑ์เยลลี่ที่ใช้คาราจีแนน และเพกทินพบว่า ชนิดและปริมาณการทดแทนเจลาตินจากคาราจีแนนและเพกทินมีผลต่อความชื้นและค่า a_w แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) การทดแทนเจลาตินร้อยละ 0 50 และ 100 พบว่าผลิตภัณฑ์เยลลี่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 34.71±0.48 29.53±0.59 และ 30.37±1.25 ตามลำดับ การทดแทนในสัดส่วนร้อยละ 50 มีส่วนช่วยในการลดปริมาณความชื้น แต่การทดแทนด้วยคาราจีแนนร้อยละ 100 ลดปริมาณความชื้นได้น้อยกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้ทดแทนเจลาติน เช่นเดียวกันกับการทดแทนเจลาตินด้วยเพกทินเท่ากับ 34.71±0.48 28.99±0.10 และ 30.10±2.03 ตามลำดับ ส่วนค่า a_w ในตัวอย่างเยลลี่ลูกหยี

มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.84 - 0.89 (ตารางที่ 3) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่จัดเป็นอาหารกึ่งแห้ง ซึ่งมี a_w ระหว่าง 0.60 - 0.85 ซึ่งถ้าค่า a_w ที่มีค่าต่ำกว่า 0.85 สามารถป้องกันการเสื่อมเสียและการเจริญจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกทึยมีค่าพีเอชเท่ากับ 2.81 - 4.37 จัดอยู่ในอาหารประเภทกรดสูง [15] การที่ปริมาณความชื้นแตกต่างกันเกิดจากผลของความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการจับกับน้ำแตกต่างกันของสารที่ทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทิน ในขั้นตอนการละลายส่วนผสมก่อให้เกิดการระเหยน้ำออกในการผลิตเยลลี่ ขณะที่ค่า a_w การทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนซึ่งจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตมีสมบัติเป็นไฮโดรคอลลอยด์คือ คุณค่าจากการที่คาราจีแนนมีโมเลกุลของน้ำตาลกาแล็กโทส (Galactose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ ให้มีคุณสมบัติของละลายได้ดีในน้ำร้อน เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเจล (Gel) ประเภท Thermoreversible Gel มีลักษณะใส เนื้อสัมผัสแข็ง แน่น แต่เปราะ ซึ่งเกิดเจลได้ทั้งกับน้ำ น้ำผลไม้ และน้ำมัน เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการสร้าง Polymer Network 3 มิติ แต่ละสายของโพลีเมอร์จะรวมตัวกันเข้าเกิด Junction Point (Gel I) และเมื่อปล่อยให้เย็นลงอีกจะเกิดการเกาะกันของ Junction Point มากขึ้น [15] - [16] เช่นเดียวกันกับเพกทินจัดเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ประเภท Heteropolysaccharide [17] ทำให้มีค่า a_w เพิ่มตามปริมาณการทดแทนคาราจีแนนและเพกทิน ดังนั้นปริมาณน้ำอิสระลดลง โดยเฉพาะร้อยละ 50 ของการทดแทนเกิดจากน้ำยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณการทดแทนด้วยคาราจีแนนร้อยละ 100 มีค่า a_w ไม่แตกต่างจากการเติมเจลาติน ซึ่งการเชื่อมประสานของโครงสร้างเป็นร่างแหของเยลลี่ ซึ่งเจลาตินแตกต่างกับคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน และโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนยังมีความแตกต่างกันอีกด้วย [10]

1.4 องค์ประกอบทางเคมี การศึกษาการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินต่อปริมาณเยื่อใยพบว่า การเพิ่มปริมาณของคาราจีแนนและเพกทินส่งผลต่อปริมาณเยื่อใยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การเพิ่มเพกทินส่งผลต่อปริมาณเยื่อใยเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณคาราจีแนนโดยการทดแทนเจลาตินที่ร้อยละ 0 50 และ 100 พบว่ามีปริมาณเยื่อใยร้อยละ 1.81 ± 0.05 2.59 ± 0.04 และ 3.55 ± 0.11 ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มเพกทินที่ระดับการทดแทนเดียวกันมีปริมาณเยื่อใยร้อยละ 1.81 ± 0.05 2.72 ± 0.05 และ 3.87 ± 0.01 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ซึ่งการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินมีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณของเยื่อใยเพิ่มขึ้นง่ายต่อการขับถ่ายและมีการเพิ่มการเจริญเติบโตของโปรไบโอติก (Probiotic) ในการหมักในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์ สร้างภูมิคุ้มกันของร่างกายและความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร [10] ส่วนปริมาณเถ้าในผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกทึยพบว่า การทดแทนคาราจีแนนและเพกทินมีผลต่อปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนที่ร้อยละ 0 50 และ 100 พบว่ามีปริมาณเถ้าร้อยละ 0.32 ± 0.04 2.77 ± 0.34 และ 3.31 ± 0.92 ตามลำดับ ขณะที่การทดแทนเจลาตินด้วยเพกทินที่ระดับร้อยละเดียวกันมีผลต่อปริมาณเถ้าร้อยละ 0.32 ± 0.04 1.80 ± 0.03 และ 2.72 ± 0.76 ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตด้วย การคำนวณในผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกทึยที่ใช้คาราจีแนนและเพกทินทดแทนเจลาตินร้อยละ 0 50 และ 100 พบว่าการเพิ่มปริมาณของคาราจีแนนและเพกทินส่งผลต่อปริมาณของคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทิน โดยมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 61.18 - 63.31 และ 61.18 - 64.64 ซึ่งจะมีค่าที่เพิ่มตามปริมาณของการเพิ่มคาราจีแนนและเพกทินที่ระดับการทดแทนเจลาตินร้อยละ 50 แต่จะลดลงเมื่อใช้คาราจีแนนและเพกทินร้อยละ 100 เนื่องจากมีการอุ้มน้ำทำให้ปริมาณความชื้นเพิ่ม แล้วทำให้ปริมาณของคาร์โบไฮเดรตลดลงขณะที่ปริมาณโปรตีนและไขมัน พบว่า

ปริมาณของโปรตีนและไขมันมีปริมาณน้อย คือ ร้อยละ 0.81 - 1.25 และ 0.65 - 0.67 (ตารางที่ 3) โดยทั่วไปโปรตีนและไขมันในตัวอย่างผักและผลไม้มีปริมาณน้อยในช่วงร้อยละ 0.10 - 1.5 [14] ปกติเจลาตินจากปลามีโปรตีนร้อยละ 88 ไขมันร้อยละ 0.6 - 1.6 เกลือร้อยละ 0.9 และความชื้นร้อยละ 9.4 - 10.2 [18] ส่วนการจำแนกประกอบด้วย โยอาหารชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย Total Carbohydrates ร้อยละ 56.44 - 64.82 โปรตีนร้อยละ 1.35 - 6.12 [19] ขณะที่เพกทินมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 3.08 เกลือร้อยละ 2.03 Total Dietary Fibers ร้อยละ 30.34 Soluble Fibers ร้อยละ 15.04 และ Insoluble Fibers ร้อยละ 28.67 [16] ซึ่งการเติมสารที่ทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนเสริมคุณค่าทางโภชนาการด้านใยอาหาร ขณะที่ลดปริมาณโปรตีน

1.5 ค่าพีเอช การวัดค่าพีเอชในผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกหอยที่ใช้คาราจีแนนและเพกทินทดแทนเจลาตินร้อยละ 0 50 และ 100 พบว่าการเพิ่มปริมาณของคาราจีแนนและเพกทิน ส่งผลต่อค่าพีเอชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยการเพิ่มคาราจีแนนที่ระดับร้อยละ 0 50 และ 100 ทำให้ค่าพีเอชมีความเป็นกรดน้อยลง ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 3.28 ± 0.01 4.05 ± 0.01 และ 4.37 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Sirisee, U. [15] การศึกษาการใช้คาราจีแนนทดแทนเจลาตินในการทำเยลลี่ผลหม่อนมีค่าพีเอชเท่ากับ 2.72 - 2.74 ซึ่งความแตกต่างของค่าพีเอชขึ้นอยู่กับปริมาณกรดในผลิตภัณฑ์ เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดทาร์ทาริก เป็นต้น (ในการทดลองนี้ ไม่มีการเติมกรด) การเติมกรดควรคำนึงถึงคุณลักษณะของการเกิดเจลภายในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกรดมีผลต่อเนื้อสัมผัส การเกิดตาข่ายระหว่างสารก่อเจลและความแข็งแรงของเจล ขณะที่การเพิ่มปริมาณเพกทินในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.28 ± 0.01 2.91 ± 0.01 และ 2.81 ± 0.01 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ค่าที่วัดได้อยู่ในสภาวะเป็นกรด ส่งผลต่อความคงตัวของเจลาติน คาราจีแนน และเพกทินที่เดิมเป็นส่วนผสมมีการจัดเรียงตัวเป็นตาข่ายที่แตกต่างกัน ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Sirisee, U. [15] ศึกษาการใช้กัมประภทเพกทินในเยลลี่ผลหม่อน ซึ่งมีค่าพีเอช 3.07 - 3.17 โดยปกติค่าพีเอชมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เยลลี่อยู่ระหว่าง 2.8 - 3.5 ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่ 3.2 ตาม มอก. 263-2521 [15] โดยปกติเนื้อลูกหอยมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.83 - 2.98 [4] เมื่อมีการเติมสารคาราจีแนน และเพกทิน ส่งผลต่อค่าพีเอชของผลิตภัณฑ์ลดลงจากการเจือจางด้วยส่วนผสมอื่น ๆ เมื่อมีค่าพีเอชที่เกินกว่ามาตรฐานกำหนดให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่สั้น หากเก็บรักษาทำให้เชื้อเจริญเติบโตโดยเฉพาะเชื้อรา อาจจะไม่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค [20] - [21]

1.6 การทดสอบทางประสาทสัมผัส การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกหอยที่ทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทินพบว่า คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้าน สี กลิ่น รสชาติ ความยืดหยุ่น ความยากง่ายในการเคี้ยว เนื้อสัมผัส รสหวาน รสเค็ม รสเปรี้ยว และความชอบโดยรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส และสมบัติทางเคมี โดยเฉพาะความเป็นกรดของเยลลี่ลูกหอย โดยปริมาณของคาราจีแนนเพิ่มขึ้นที่ระดับร้อยละ 50 ส่งผลให้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสดีกว่าการใช้เพกทินที่ระดับเดียวกัน โดยที่เลือกการทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนที่ร้อยละ 50 ซึ่งให้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมที่ระดับคะแนน 7.70 ± 0.65 (ความชอบระดับปานกลาง) (ตารางที่ 4) การเติมเพกทินร้อยละ 100 การทดสอบทางประสาทสัมผัสมีคะแนนความชอบสี กลิ่น รสชาติ แต่เนื้อโครงสร้างของเยลลี่ใช้เพกทินไม่ก่อให้เกิดเจลไม่สามารถสร้างเครือข่าย ซึ่งสามารถวัดจากความยากง่ายในการเคี้ยว โดยมีลักษณะเหนียวปานกลาง ไม่ละเอียดเกินไปหรือ

เหนียวเกินไป เมื่อมีการกักผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกหยี ซึ่งมีคะแนน 7.20 ± 0.55 (ความชอบระดับปานกลาง) แต่ผู้ทดสอบพิจารณาของลักษณะปรากฏมากกว่าเนื้อสัมผัสของเยลลี่ จึงทำให้คะแนนการทดสอบอยู่ในระดับดี ส่วนรสชาติมีการทดสอบภาพรวมของผลิตภัณฑ์ของความเปรี้ยวของลูกหยีและคุณสมบัติเฉพาะของไฮโดรคอลลอยด์

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์เยลลี่ที่ทดแทนด้วยคาราจีแนนและเพกทิน

การวิเคราะห์	ชุดควบคุม	คาราจีแนน (ร้อยละ)		เพกทิน (ร้อยละ)	
		50	100	50	100
ความชื้น (g/100g)*	34.71 ± 0.48^a	29.53 ± 0.59^b	30.37 ± 1.25^b	28.99 ± 0.10^b	29.250 ± 0.56^b
เยื่อใย (g/100g)*	1.81 ± 0.05^c	2.59 ± 0.04^d	3.55 ± 0.11^b	2.72 ± 0.05^c	3.87 ± 0.01^a
เถ้า (g/100g)*	0.32 ± 0.04^c	2.77 ± 0.34^{ab}	3.31 ± 0.92^a	1.80 ± 1.31^b	2.72 ± 0.76^{ab}
โปรตีน (g/100g)*	1.25 ± 0.05^a	1.13 ± 0.03^c	0.90 ± 0.02^c	1.17 ± 0.04^{bc}	0.81 ± 0.03^c
ไขมัน (g/100g)*	0.67 ± 0.01^{ns}	0.66 ± 0.02^{ns}	0.67 ± 0.01^{ns}	0.66 ± 0.02^{ns}	0.65 ± 0.02^{ns}
คาร์โบไฮเดรต (g/100g)*	61.20 ± 0.38^c	63.31 ± 0.24^{ab}	61.18 ± 1.42^c	64.64 ± 1.34^a	61.83 ± 1.31^{bc}
a_w	0.89 ± 0.01^a	0.84 ± 0.02^b	0.88 ± 0.01^a	0.85 ± 0.01^b	0.86 ± 0.01^b
ค่าพีเอช	3.28 ± 0.01^c	4.05 ± 0.01^b	4.37 ± 0.01^a	2.91 ± 0.01^d	2.81 ± 0.01^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

* ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก (Wet Basis)

ตารางที่ 4 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเยลลี่ลูกหยีที่หาลาดทดแทนเจลาตินด้วยคาราจีแนนและเพกทิน

คุณลักษณะ	ชุดควบคุม	คาราจีแนน (ร้อยละ)		เพกทิน (ร้อยละ)	
		50	100	50	100
สี	7.72 ± 0.61^a	7.43 ± 0.89^{ab}	7.10 ± 0.71^b	7.10 ± 0.88^b	7.16 ± 1.17^b
กลิ่น	7.56 ± 0.85^a	7.10 ± 0.99^{ab}	7.00 ± 0.78^{abc}	6.43 ± 1.65^c	6.80 ± 1.39^b
รสชาติ	7.62 ± 0.69^a	7.23 ± 1.33^{ab}	6.66 ± 0.95^{bc}	6.16 ± 2.06^c	6.66 ± 1.64^{bc}
ความยืดหยุ่น	7.27 ± 1.41^a	6.86 ± 0.97^a	5.86 ± 1.22^b	5.60 ± 2.15^{bc}	4.86 ± 2.20^c
ความยากง่ายในการเคี้ยว	7.26 ± 1.36^a	7.20 ± 0.55^a	5.83 ± 1.74^b	5.83 ± 1.31^c	5.43 ± 1.86^c
เนื้อสัมผัส	7.20 ± 0.96^a	7.33 ± 0.71^a	6.13 ± 1.59^b	6.46 ± 0.86^b	5.16 ± 1.87^c
รสหวาน	7.67 ± 0.97^a	7.56 ± 0.81^a	7.00 ± 0.98^c	6.26 ± 1.31^c	6.46 ± 1.38^{bc}
รสเค็ม	7.43 ± 1.35^a	7.23 ± 1.22^{ab}	6.76 ± 1.19^{abc}	6.53 ± 1.56^{bc}	6.13 ± 1.67^c
รสเปรี้ยว	7.50 ± 1.10^a	7.20 ± 1.37^{ab}	6.56 ± 1.07^{bc}	6.13 ± 1.85^c	6.73 ± 1.70^{abc}
ความชอบโดยรวม	7.60 ± 0.74^a	7.70 ± 0.65^a	6.76 ± 1.43^b	6.86 ± 0.77^b	6.36 ± 1.16^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

2. ความคงตัวสมบัติทางกายภาพและเคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของเยลลี่ลูกหยี ชาลาระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น

การศึกษาความคงตัวของเยลลี่ลูกหยีที่มีการเติมเจลาติน (ร้อยละ 50) และคาราจีแนน (ร้อยละ 50) ในถุงอูมิเนียมพอยล์ลามิเนตเก็บรักษาที่ระยะเวลา 0 2 4 6 และ 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่าระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้น ค่า a_w และค่าพีเอช แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความชื้นและค่า a_w มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ค่า a_w ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากระยะเวลา 0 สัปดาห์ มีค่า 0.85 ± 0.01 เพิ่มขึ้น 0.87 ± 0.01 ที่ระยะเวลา 8 สัปดาห์ (ตารางที่ 5) เนื่องจากไอน้ำและความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์แทรกเข้าสู่เนื้อเยลลี่ ส่วนปริมาณความชื้นมีปริมาณที่เพิ่มตามระยะเวลาที่เก็บรักษา จากปริมาณความชื้นร้อยละ 26.12 ± 1.76 (0 สัปดาห์) และ 31.07 ± 0.53 (8 สัปดาห์) ซึ่งค่า a_w สอดคล้องกับปริมาณคุณภาพของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อยีสต์และรา จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการเก็บรักษา 0 - 8 สัปดาห์ มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 25 โคโลนีต่อกรัม ขณะที่ปริมาณเชื้อยีสต์และรา ไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ (ตารางที่ 6) ซึ่งไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด 1×10^4 โคโลนีต่อกรัม และ 100 โคโลนีต่อกรัม [22] - [23]

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ค่าพีเอช และค่า a_w ของผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกหยีที่เก็บรักษา 0 - 8 สัปดาห์

การวิเคราะห์	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์	8 สัปดาห์
ความชื้น (g/100g)	26.12 ± 1.76^c	27.12 ± 2.08^{bc}	29.21 ± 0.34^{ab}	29.53 ± 0.59^{ab}	31.07 ± 0.53^a
a_w	0.85 ± 0.01^b	0.85 ± 0.01^b	0.87 ± 0.01^a	0.87 ± 0.01^a	0.87 ± 0.01^a
ค่าพีเอช	4.05 ± 0.01^d	4.11 ± 0.02^c	4.18 ± 0.03^b	4.34 ± 0.01^a	4.33 ± 0.01^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 6 ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกหยี

การวิเคราะห์	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์	8 สัปดาห์
เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด	<25	<25	<25	<25	<25
เชื้อยีสต์และรา	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกหยีที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 0 - 8 สัปดาห์ พบว่าระดับคะแนนความชอบเฉลี่ยของผู้ทดสอบด้าน สี กลิ่น รสชาติ ความยืดหยุ่น ความยากง่ายในการเคี้ยว เนื้อสัมผัส รสหวาน รสเค็ม รสเปรี้ยว และความชอบโดยรวมลดลง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากระหว่างการเก็บรักษามีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพและเคมี ส่งผลต่อคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสลดลงตามระยะเวลาโดยที่ระยะเวลาเก็บรักษาที่ 0 สัปดาห์ มีคะแนนการทดสอบด้านความชอบโดยรวมเท่ากับ 7.40 ± 0.50 (ความชอบค่อนข้างดี) เมื่อระยะเวลาการเก็บที่ 8 สัปดาห์ คะแนนการทดสอบลดลงเท่ากับ 6.81 ± 0.56 (ความชอบปานกลาง) (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาของเยลลี่ลูกทึยฮาลาลต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส

คุณลักษณะ	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์	8 สัปดาห์
สี	7.46±0.51 ^{ns}	7.26±0.59 ^{ns}	7.13±0.51 ^{ns}	7.12±0.63 ^{ns}	6.93±0.58 ^{ns}
กลิ่น	7.40±0.63 ^{ns}	7.06±0.79 ^{ns}	6.93±0.59 ^{ns}	6.91±0.70 ^{ns}	6.80±0.77 ^{ns}
รสชาติ	7.93±0.96 ^a	7.41±0.82 ^{ab}	7.33±0.71 ^{ab}	7.20±0.67 ^b	6.93±1.03 ^b
ความยืดหยุ่น	7.40±0.50 ^a	7.06±0.96 ^{ab}	6.93±0.79 ^{ab}	6.66±0.81 ^b	6.50±0.63 ^b
ความง่ายในการเคี้ยว	7.06±0.88 ^{ns}	7.01±0.84 ^{ns}	7.00±0.75 ^{ns}	6.80±0.77 ^{ns}	6.93±0.96 ^{ns}
เนื้อสัมผัส	7.60±0.87 ^{ns}	7.40±1.05 ^{ns}	7.33±0.72 ^{ns}	7.20±0.86 ^{ns}	7.06±0.70 ^{ns}
รสหวาน	7.66±0.81 ^a	7.46±0.63 ^{ab}	7.13±0.51 ^{bc}	7.07±0.59 ^{bc}	6.93±0.70 ^c
รสเค็ม	7.33±0.89 ^{ns}	7.28±1.06 ^{ns}	7.26±0.70 ^{ns}	7.06±1.03 ^{ns}	7.06±1.62 ^{ns}
รสเปรี้ยว	7.40±0.63 ^a	7.26±0.70 ^{ab}	7.13±0.74 ^{ab}	6.80±0.69 ^{bc}	6.53±0.63 ^c
ความชอบโดยรวม	7.40±0.50 ^a	7.26±0.59 ^a	7.13±0.51 ^{ab}	6.80±0.56 ^b	6.81±0.56 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

^{ns} ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

การประเมินทางประสาทสัมผัส 9-Point Hedonic Scale

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่ลูกทึยฮาลาล สามารถเติมคาราจีแนนทดแทนเจลาตินร้อยละ 50 ซึ่งได้รับคะแนนความชอบจากผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสสูงสุด และมีคุณสมบัติของเยลลี่ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (519/2547) แต่มีข้อควรปรับปรุงในส่วนของค่าพีเอช ซึ่งสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดเล็กน้อย อาจทำให้อายุการเก็บรักษาล้นลง อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเมื่อนำผลิตภัณฑ์เยลลี่เก็บรักษาในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ลามิเนต ทำให้มีความคงตัวของคุณภาพทั้งสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ทางประสาทสัมผัส และเชื้อจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาการเก็บ 8 สัปดาห์ มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 25 โคโลนีต่อกรัม และไม่พบเชื้อยีสต์และรา ส่วนระดับคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความชอบความยืดหยุ่น รสเปรี้ยว และรสหวาน ดังนั้นการผลิตเยลลี่ลูกทึยควรพัฒนาการเติมสารปรับความเป็นกรดเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ได้มาตรฐานร่วมกับการเติมไฮโดรคอลลอยด์ผสมเพื่อให้มีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษานานขึ้น

References

- [1] Hashim, E. F., Yan, H. J., and Abd Ghani, I. F. (2017). Preliminary Characterization on Physical Properties of Selected Marine Fish Skins as Alternative Sources of Halal Gelatin. **Food Science and Nutrition Technology**. Vol. 2, Issue 2, pp. 1-5

- [2] Batu, A., Regenstein, J. M., and Dogan, I. S. (2015). Gelatin Issues in Halal Food Processing for Muslim Societies. **Electronic Turkish Studies**. Vol. 10, Issue 14, pp. 37-51. DOI: 10.7827/TurkishStudies.8928
- [3] Adepoju, O. T. (2009). Proximate Composition and Micronutrient Potentials of Three Locally Available Wild Fruits in Nigeria. **African Journal of Agricultural Research**. Vol. 4, Issue 9, pp. 887-892
- [4] Chedoloh, R. (2018). Study on Post-Harvest Management of Fresh Black Velvet Tamarind and Dehydrating Methods on the Properties and Sensory Evaluation of Pre-processed Product. **RMUTSV Research Journal**. Vol. 10, No. 1, pp. 52-64 (in Thai)
- [5] Ofosu, D. O., Opata, N. S., Gyampo, O., and Odamtten, G. T. (2013). Determination of the Elemental Composition of the Pulp, Seed and Fruit Coat of Black Velvet Tamarind (*Dialium guineense*) Using Instrumental Neutron Activation Analysis. **Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology**. Vol. 6, Issue 19, pp. 3536-3539. DOI: 10.19026/rjaset.6.3557
- [6] Chedoloh, R., Niseng, Z., and Yoush, H. (2018). **Development of Production Processes and Products to Increase Value Velvet Tamarind in Three Southern Border Provinces**. Bangkok, Thailand : The Thailand Research Fund. (in Thai)
- [7] AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 15th edition. Virginia: Association of Official Analytical Chemists
- [8] Meilgaard, M., Civille, G. V., and Carr, B. T. (1999). **Sensory Evaluation Techniques**. 3rd edition. New York: CRC
- [9] Teodorowicz, M., Neerven, J. V., and Savelkoul, H. (2017). Food Processing: The Influence of the Maillard Reaction on Immunogenicity and Allergenicity of Food Proteins. **Nutrients**. Vol. 9, pp. 835-853. DOI: 10.3390/nu9080835
- [10] Rattanapanone, N. (2002). **Food Chemistry**. 1st edition. Bangkok, Thailand: Odean Store
- [11] Sunta, R. (2008). **Development of Longon Chewy Candy Formulation**. Ms. Food Science and Technology Department of Food Engineering, Graduate School Chiang Mai University. (in Thai)
- [12] Lasztity, R. (2009). **Food Quality and Standard**. Oxford, United Kingdom, Vol. 1
- [13] Nopchinda, S. (2014). Probiotics for Health Promotion. **Journal of The Royal Thai Army Nurses**. Vol. 15, Issue 3, pp. 430-435
- [14] Supamiyotin, P. (2013). **Fruit and Vegetable Technology**. Bangkok, Thailand: Odean Store
- [15] Sirisee, U. (2009). **Substitution of Gums in Mulberry Jelly Part I: Application of Carrageenan to Replace Gelatin in Mulberry Jelly**. Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok (in Thai)
- [16] Sato, M. F., Rigoni, D. C., Canteri, M. H. G., Petkowicz, C. L. O., Nogueira, A., and Wosiacki, G. (2011). Chemical and Instrumental Characterization of Pectin from Dried Pomace of Eleven Apple Cultivars. **Acta Scientiarum Agronomy**. Vol. 33, No. 3, pp. 383-389. DOI: 10.4025/actasciagron.v33i3.7125

- [17] Sundarraj, A. A. and Ranganathan, T. V. (2017). A Review - Pectin from Agro and Industrial Waste. **International Journal of Applied Environmental Sciences**. Vol. 12, Number 10, pp. 1777-1801
- [18] Silva, R. S. G., Bandeira, S. F., and Pinto, L. A. A. (2017). Characteristics and Chemical Composition of Skins Gelatin from Cobia (*Rachycentron canadum*). **LWT - Food Science and Technology**. Vol. 57, Issue 2, pp. 580-585. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.02.026
- [19] Webber, V., Carvalho, S. M. D., Ogliari, P. J., Hayashi, L., and Barreto, P. L. M. (2012). Optimization of the Extraction of Carrageenan from *Kappaphycus alvarezii* Using Response Surface Methodology. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Vol. 32, Issue 4, pp. 812-818. DOI: 10.1590/S0101-20612012005000111
- [20] Thai Industrial Standards Institute. (2004). **Thai Community Products Standards 519/2547: Soft Jelly**. Bangkok, Thailand: TISI, Ministry of Industry. (in Thai)
- [21] Dipiyoti, S. and Suwendu, B. (2010). Hydrocolloid as Thickening and Gelling Agent in Food: a Critical Review. **Journal of Food Science and Technology**. Vol. 47, Issue 6, pp. 587-597. DOI: 10.1007/s13197-010-0162-6
- [22] Thai Industrial Standards Institute. (2004). **Thai Community Products Standards 519/2547: Soft Jelly**. Bangkok, Thailand: TISI, Ministry of Industry. (in Thai)
- [23] Pye, J. (1997). Gelatin and Applications, pp 28-40. In S. Maneepan, ed. **Symposium on Confectionery Technology**. Food Science and Technology Association of Thailand. Bangkok, Thailand. (in Thai)

อุบัติการณ์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดในกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) ที่จำหน่ายในจังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

Occurrence of Total Heterotrophic Bacteria Isolated from *Litopenaeus vannamei* Sold in Chon Buri Province, Thailand

สุบัตติต นิมรัตน์^{1*} วิจิตรา มุสิราช¹ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย¹

Subuntith Nimrat^{1*} Wigitra Musirach¹ and Verapong Vuthiphandchai¹

Received: October 8, 2018; Revised: December 19, 2018; Accepted: December 25, 2018

บทคัดย่อ

จากการศึกษาปริมาณและการแพร่กระจายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดจากตัวอย่างกุ้งขาวที่วางจำหน่ายในจังหวัดชลบุรี ประเทศไทย จำนวน 40 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 3.13×10^4 ถึง 1.50×10^7 CFU/g และเมื่อทำการจำแนกชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด พบแบคทีเรียสกุล *Flavobacterium* spp. มากที่สุดของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด และรองลงมาคือ *Aeromonas* spp., *Bacillus* spp., *Vibrio* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Corynebacterium* spp., *Moraxella* spp., *Enterobacter* spp., *Proteus* spp., *Serratia* spp., *Acinetobacter* spp., *Alcaligenes* spp., *Pasteurella* spp., *Citrobacter* spp., *Escherichia* spp., *Klebsiella* spp., *Yersinia* spp. และ *Shigella dysenteriae* ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเกณฑ์มาตรฐานทางจุลชีววิทยาของกุ้งขาวโดยกำหนดจากปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด พบว่าตัวอย่างกุ้งขาวส่วนใหญ่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์และญี่ปุ่น

คำสำคัญ : แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด; กุ้งขาว; จังหวัดชลบุรี; ประเทศไทย

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี

¹ Faculty of Science, Burapha University, Chon Buri

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

Abstract

A study regarding quantity and distribution of total heterotrophic bacteria isolated from 40 samples of *Litopenaeus vannamei* purchased in Chon Buri Province, Thailand was conducted. Results showed that total heterotrophic bacteria ranged from 3.13×10^4 to 1.50×10^7 CFU/g. The most predominant heterotrophic bacteria in this study were *Flavobacterium* spp. followed by the less extent numbers of *Aeromonas* spp., *Bacillus* spp., *Vibrio* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Corynebacterium* spp., *Moraxella* spp., *Enterobacter* spp., *Proteus* spp., *Serratia* spp., *Acinetobacter* spp., *Alcaligenes* spp., *Pasteurella* spp., *Citrobacter* spp., *Escherichia* spp., *Klebsiella* spp., *Yersinia* spp. and *Shigella dysenteriae*, respectively. Based on a microbiological standard of total heterotrophic bacteria, most of the tested shrimp samples in this study did not meet the microbiological quality of USA, Australia, New Zealand and Japan.

Keywords: Total Heterotrophic Bacteria; *Litopenaeus vannamei*; Chon Buri Province; Thailand

บทนำ

ในปัจจุบันโลกได้มีการพัฒนาไปอย่างกว้างไกลพร้อมทั้งมีประชากรเพิ่มมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาที่สำคัญ คือ การขาดแคลนอาหาร แต่สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศที่มีทรัพยากรธรรมชาติและความหลากหลายทางชีวภาพจึงได้มีการวางโครงการให้ประเทศไทยเป็นครัวของโลก เพราะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม การส่งออกส่วนใหญ่เป็นการส่งออกสินค้าประเภทอาหารต่าง ๆ มากมาย รวมทั้งอาหารทะเล ซึ่งความต้องการอาหารทะเลเพิ่มสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันปริมาณของสัตว์ทะเลตามธรรมชาติมีน้อยลง จึงทำให้เกิดเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยเฉพาะกุ้งที่มีการเพาะเลี้ยงแพร่หลายในหลายประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับประเทศไทยมีสถิติการส่งออกกุ้งกุลาดำเป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่ในปี พ.ศ. 2546 กุ้งกุลาดำประสบกับปัญหาภัยไข้ช้ำ ขาดแคลนพ่อแม่พันธุ์คุณภาพดี นอกจากนี้ยังประสบปัญหาเกี่ยวกับโรคไวรัสดวงขาว [1] จึงได้มีการหาพันธุ์กุ้งขาวแวนนาไมเข้ามาแทนกุ้งกุลาดำที่มีอยู่เดิมเพื่อเป็นตัวเสริม แต่กุ้งขาวแวนนาไมมีการเพาะเลี้ยงกันมากทั้งในประเทศไทยและประเทศในแถบเอเชียอีกหลายประเทศ จึงเกิดการแข่งขันกันในการผลิตและการแข่งขันทางตลาดจึงมีมากขึ้น

กุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) เป็นกุ้งทะเลขนาดกลาง ความยาวสูงสุด 23 เซนติเมตร พบทั่วไปในแถบชายฝั่งทะเลของมหาสมุทรแปซิฟิกตอนใต้ นิยมเลี้ยงกันในอเมริกากลางและใต้ มีวงจรชีวิตคล้ายกับกุ้งทะเลทั่วไป พื้นที่ที่มีการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวในประเทศไทยมีหลายจังหวัด ได้แก่ ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ฉะเชิงเทรา ประจวบคีรีขันธ์ และสมุทรสงคราม โรคติดเชื้อจากแบคทีเรียเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุตสาหกรรมการเลี้ยงกุ้งขาว เช่น การติดเชื้อแบคทีเรียกลุ่ม *Vibrio* ซึ่งกุ้งขาวที่ติดเชื้อมักจะมีอัตราการตาย 100 เปอร์เซ็นต์ โดยเชื้อเหล่านี้มักเป็นเชื้อประจำถิ่นในระบบการเลี้ยงกุ้ง การเพิ่มจำนวนของเชื้อที่สูงขึ้นจนทำให้มีจำนวนที่สามารถก่อโรคนอกได้ มีสาเหตุมาจากระบบการเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่นสูง

ทำให้กุ้งมีสภาวะเครียด ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของสภาพในบ่อเลี้ยง เช่น ความเค็ม อุณหภูมิ ปริมาณ ออกซิเจน เป็นต้น [2]

นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียที่ปนเปื้อนมาจากแหล่งน้ำที่กุ้งอาศัยอยู่ เครื่องมือที่ใช้ในการจับสัตว์น้ำ และน้ำที่ใช้ในการทำความสะดวก เป็นต้น โดยแบคทีเรียที่พบมากในกุ้ง ได้แก่ *Pseudomonas*, *Acinetobacter* และ *Moraxella* การเน่าเสียของกุ้งจะเกิดขึ้นที่หลังกุ้งตายและมีการเน่าเสียอย่างรวดเร็วโดยเกิดจากแบคทีเรียที่ติดมากับเปลือกกุ้ง ได้แก่ *Alteromonas*, *Pseudomonas*, *Moraxella*, *Micrococcus* และ *Vibrio* [3] ซึ่งแบคทีเรียบางสายพันธุ์ที่พบปนเปื้อนในกุ้งสามารถก่อโรคในมนุษย์ได้ เช่น *Vibrio parahaemolyticus* ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ *V. vulnificus* ก่อให้เกิดการติดเชื้อในกระแสเลือด [4] ด้วยเหตุนี้การศึกษารังนี้จึงมีความสนใจที่ศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียที่พบในกุ้งขาวซึ่งเป็นเรื่องที่มีความสำคัญทั้งในด้านการเพาะเลี้ยงและด้านสุขภาพของกุ้งขาวที่วางขายตามท้องตลาดทั่วไป ซึ่งจะมีผลต่อผู้บริโภค และเพื่อตรวจสอบคุณภาพของกุ้งให้มีมาตรฐานเป็นที่ยอมรับทั้งในประเทศและต่างประเทศ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่าง สุ่มเก็บตัวอย่างกุ้งขาวที่วางจำหน่ายตามท้องตลาดในจังหวัดชลบุรี จำนวน 31 ร้าน รวมทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ในระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2548 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 โดยนำตัวอย่างกุ้งขาวมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และนำมาตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการภายใน 6-8 ชั่วโมง

2. การตรวจวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด โดยวิธีมาตรฐานตามวิธีของ **Bacteriological Analytical Manual** [5] ซึ่งตัวอย่างกุ้งขาว 25 กรัม ลงใน 0.85 % Normal saline 225 มิลลิลิตร ตีบดให้ละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องตีผสม (Stomacher) และเจือจางแบบ 10 เท่า ให้ได้ระดับความเจือจาง $10^{-1} - 10^{-8}$ ด้วย 0.85 % Normal Saline จากนั้นเปิดตัวอย่างแต่ละระดับความเจือจางปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar เพื่อนับจำนวนแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด (โดยแต่ละความเจือจางทำ 3 ซ้ำ) จากนั้นใช้แท่งแก้วสามเหลี่ยมที่ปราศจากเชื้อเกลี่ยตัวอย่างให้ทั่วผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อและทิ้งให้แห้ง จากนั้นนำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีและคำนวณโคโลนีทั้งหมดในหน่วย CFU/g จากนั้นนำโคโลนีที่มีลักษณะแตกต่างกันไปทดสอบสมบัติทางชีวเคมีเพื่อจำแนกชนิดของแบคทีเรียตาม *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology* [6]

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ข้อมูลที่ได้แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วย Duncan's Multiple Rang Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิจัย

จากการเก็บตัวอย่างกุ้งขาวที่วางจำหน่ายตามตลาดต่าง ๆ ภายในจังหวัดชลบุรี จำนวน 40 ตัวอย่าง พบปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด ดังตารางที่ 1 โดยพบว่าตัวอย่างที่ 11 มีปริมาณ

แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดมากที่สุด คือ $1.50 \pm 0.07 \times 10^7$ CFU/g และตัวอย่างที่ 5 มีปริมาณแบคทีเรียที่น้อยที่สุด คือ $3.13 \pm 1.62 \times 10^4$ CFU/g เมื่อจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดโดยใช้การทดสอบคุณสมบัติทางชีวเคมีตาม Bergey's Manual of Determinative Bacteriology และ Bergey's Manual of Systematic Bacteriology พบแบคทีเรียสกุลต่าง ๆ ได้แก่ *Flavobacterium* spp. พบมากที่สุดจากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด รองลงมาคือ *Aeromonas* spp., *Bacillus* spp., *Vibrio* spp., *Staphylococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Corynebacterium* spp., *Moraxella* spp., *Enterobacter* spp., *Proteus* spp., *Serratia* spp., *Acinetobacter* spp., *Alcaligenes* spp., *Pasteurella* spp., *Citrobacter* spp., *Escherichia* spp., *Klebsiella* spp., *Yersinia* spp. และ *Shigella dysenteriae* ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดที่พบในตัวอย่างกุ้งขาวที่จำหน่ายภายในจังหวัดชลบุรี

ตัวอย่าง	แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด (CFU/g)	ตัวอย่าง	แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมด (CFU/g)
1	$1.03 \pm 0.15 \times 10^5$ h	21	$4.06 \pm 0.40 \times 10^5$ gh
2	$1.32 \pm 0.19 \times 10^5$ h	22	$1.09 \pm 0.12 \times 10^6$ c
3	$3.93 \pm 0.77 \times 10^4$ h	23	$2.17 \pm 0.32 \times 10^6$ c
4	$6.87 \pm 1.40 \times 10^4$ h	24	$1.09 \pm 0.03 \times 10^5$ h
5	$3.13 \pm 1.62 \times 10^4$ h	25	$5.56 \pm 0.20 \times 10^5$ g
6	$1.27 \pm 0.11 \times 10^5$ h	26	$1.64 \pm 0.19 \times 10^5$ gh
7	$9.83 \pm 1.82 \times 10^4$ h	27	$2.60 \pm 1.01 \times 10^5$ gh
8	$2.90 \pm 0.6 \times 10^5$ gh	28	$5.00 \pm 1.73 \times 10^4$ h
9	$1.47 \pm 0.13 \times 10^6$ d	29	$1.09 \pm 0.36 \times 10^6$ c
10	$3.26 \pm 0.58 \times 10^5$ gh	30	$5.73 \pm 0.56 \times 10^5$ g
11	$1.50 \pm 0.07 \times 10^7$ a	31	$7.50 \pm 0.92 \times 10^4$ h
12	$3.20 \pm 0.28 \times 10^5$ gh	32	$6.73 \pm 0.99 \times 10^4$ h
13	$1.15 \pm 0.07 \times 10^7$ b	33	$1.30 \pm 0.24 \times 10^5$ h
14	$9.93 \pm 1.97 \times 10^4$ h	34	$9.13 \pm 1.01 \times 10^4$ h
15	$1.23 \pm 0.37 \times 10^5$ h	35	$9.63 \pm 1.70 \times 10^4$ h
16	$1.05 \pm 0.20 \times 10^5$ h	36	$5.35 \pm 3.75 \times 10^4$ h
17	$7.80 \pm 1.13 \times 10^4$ h	37	$4.00 \pm 0.35 \times 10^4$ h
18	$5.60 \pm 0.71 \times 10^4$ h	38	$5.70 \pm 2.00 \times 10^4$ h
19	$3.76 \pm 0.70 \times 10^5$ gh	39	$8.95 \pm 0.91 \times 10^5$ f
20	$3.90 \pm 0.35 \times 10^5$ gh	40	$1.22 \pm 0.28 \times 10^5$ h

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันในแนวดังแสดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 ชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเชื้อโรโทรปทั้งหมดที่พบในตัวอย่างผู้ป่วยที่จำหน่ายภายในจังหวัดชลบุรี

แบคทีเรียกลุ่มเชื้อก่อโรตรูปยี่หมัด (%)																				
ตัวอย่าง	<i>Acinetobacter</i> spp.	<i>Aeromonas</i> spp.	<i>Alcaligenes</i> spp.	<i>Bacillus</i> spp.	<i>Citrobacter</i> spp.	<i>Corynebacterium</i> spp.	<i>Enterobacter</i> spp.	<i>Escherichia</i> spp.	<i>Flavobacterium</i> spp.	<i>Klebsiella</i> spp.	<i>Moraxella</i> spp.	<i>Pasteurella</i> spp.	<i>Proteus</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp.	<i>Serratia</i> spp.	<i>Shigella dysenteriae</i>	<i>Staphylococcus</i> spp.	<i>Vibrio</i> spp.	<i>Yersinia</i> spp.	Unidentified bacteria
1	-	10	-	40	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	40	-	-	-
2	-	11.36	-	-	-	-	28.78	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	45.45	9.85	-	-
3	-	33.46	-	-	-	-	-	-	28.20	-	-	-	-	-	-	-	38.46	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	37.68	-	-	-	-	-	-	-	-	47.83	14.49	-
5	-	25.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45.16	-	3.22	25.81	-	-	-
6	-	-	-	-	-	17.32	58.27	-	-	-	-	-	-	24.41	-	-	-	-	-	-
7	-	38.78	-	45.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.24	-	-	5.10
8	-	-	24.14	-	-	-	31.03	-	32.76	-	-	-	-	-	-	-	17.24	-	-	-
9	-	-	-	24.48	-	-	-	-	15.31	-	-	12.5	-	-	-	-	48.98	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	9.37	-	-	28.13	-	-	37.5	-	-	-
11	-	10.09	-	28	-	-	18	-	55.33	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	2
12	-	-	-	-	28.12	21.87	-	-	38.06	-	-	-	-	-	12.5	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	6.42	-	-	38.88	-	-	-	17.43	-	-	-	-	33.94	-	3.67
14	25.25	-	-	-	-	18.18	-	-	38.88	-	-	-	-	-	-	-	23.23	-	-	2.02
15	-	66.67	-	-	-	8.33	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-
16	-	-	-	47.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.92	10.38	-	-	24.53	-	-
17	-	32.05	-	28.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39.74	-	-

ตารางที่ 2

ชนิดของแบบที่เรียกกลุ่มเซทเพอโรโทรปึงหมดพเปนด้วยอย่างกุงชาวที่จำหนายภายในจังหวัดชลบุรี (ต่อ)

แบคทีเรียกลุ่มสาเหตุโรคลำไส้ใหญ่บวม (%)																				
ตัวอย่าง	Unidentified bacteria																			
	<i>Acinetobacter</i> spp.	<i>Aeromonas</i> spp.	<i>Alcaligenes</i> spp.	<i>Bacillus</i> spp.	<i>Citrobacter</i> spp.	<i>Corynebacterium</i> spp.	<i>Enterobacter</i> spp.	<i>Escherichia</i> spp.	<i>Flavobacterium</i> spp.	<i>Klebsiella</i> spp.	<i>Moraxella</i> spp.	<i>Pasteurella</i> spp.	<i>Proteus</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp.	<i>Serratia</i> spp.	<i>Shigella dysenteriae</i>	<i>Staphylococcus</i> spp.	<i>Vibrio</i> spp.	<i>Yersinia</i> spp.	
18	51.78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	23.22	-	-
19	-	13.51	-	-	-	-	47.03	-	-	-	-	-	-	40.54	-	-	-	-	-	-
20	-	-	17.95	-	-	-	-	-	-	-	41.03	-	-	-	-	-	33.33	-	-	-
21	-	-	-	37.5	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	42.5	-	-
22	-	17.43	-	-	-	-	-	-	35.32	-	-	-	-	11.93	-	-	-	32.11	-	-
23	-	-	-	42.86	-	-	19.05	-	57.14	-	-	-	-	-	14.68	-	-	-	-	-
24	-	41.28	-	39.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.59
25	-	37.5	-	-	-	-	14.28	-	-	-	-	-	-	33.93	-	-	14.28	-	-	-
26	-	-	-	31.52	-	-	-	-	17.58	-	-	-	9.1	-	-	-	20	20.61	-	3.03
27	-	34.61	-	15.38	-	-	-	-	31.25	-	-	-	19.23	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	20	-	-	40	-	-	20	-	-	-	-	-	20	-	-
29	-	24.77	-	-	-	24.77	-	-	32.11	-	-	-	-	18.35	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-	56.14	-	38.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.26
31	-	-	-	-	-	-	-	-	57.33	-	22.27	-	-	-	-	16	-	-	-	4
32	-	-	-	-	-	25.37	-	-	43.28	-	-	-	31.34	-	-	-	-	-	-	-
33	-	16.92	-	29.23	-	-	-	-	30.77	-	-	-	-	17.69	-	-	-	-	-	5.38
34	-	38.46	-	-	-	-	-	-	40.66	-	20.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-

สรุปและอภิปรายผล

1. ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดในตัวอย่างกุ้งขาว

จากการศึกษาปริมาณและการแพร่กระจายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดในตัวอย่างกุ้งขาวจำนวน 40 ตัวอย่าง โดยทำการซื้อตัวอย่างกุ้งขาวมาจากร้านค้าภายในตลาดจังหวัดชลบุรี ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างกุ้งขาวมีปริมาณแบคทีเรียอยู่ในช่วง $3.13 \pm 1.62 \times 10^4$ ถึง $1.50 \pm 0.07 \times 10^7$ CFU/g โดยส่วนใหญ่ (62.5 เปอร์เซ็นต์) ของตัวอย่างกุ้งขาวจะพบปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดมากกว่า 10^5 CFU/g ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Hatha, A. A. M., et al. [7] กล่าวว่ากุ้งกุลาดำที่ปอกเปลือกแต่ยังมีหางอยู่พบแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดมากกว่า 10^5 CFU/g เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดในตัวอย่างกุ้งขาวจำนวน 40 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดมีความแตกต่างกันและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับปริมาณและชนิดของแบคทีเรียที่พบแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันของสถานที่ในการเพาะเลี้ยง น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยง อุณหภูมิ ค่า pH ของน้ำ และความแตกต่างของสุขาภิบาลในแต่ละตลาด ซึ่งในแต่ละตลาดและแต่ละร้านที่จำหน่ายอาจมีสัญลักษณ์ของผู้ขายหรือภาชนะที่ใช้ ตลอดจนน้ำที่ใช้ทำความสะอาดมีความแตกต่างกัน

เมื่อนำมาจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียพบว่า แบคทีเรียที่พบการปนเปื้อนสูงที่สุดเป็นลำดับที่ 1 คือ *Flavobacterium* spp. การปนเปื้อนจากแบคทีเรียสกุลนี้บ่งบอกถึงการปนเปื้อนมาจากธรรมชาติ เช่น ดินและน้ำ ซึ่งอาจเกิดจากสถานที่ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งหรือน้ำที่ใช้ทำความสะอาด *Flavobacterium* บางสายพันธุ์อาจก่อให้เกิดโรคในสัตว์น้ำ [8] และเป็นเชื้อฉวยโอกาสที่อาจก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ในเด็ก และคนที่มีภูมิคุ้มกันอ่อนแอ จากรายงานของ Maclean, L. L., et al. [9] ที่กล่าวว่า *Flavobacterium* สามารถก่อให้เกิดโรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบได้ ถ้าเกิดการสัมผัสเชื้ออาจก่อให้เกิดอันตรายได้ ดังนั้นควรล้างกุ้งให้สะอาดก่อนนำมาปรุงอาหารเพื่อลดจำนวนแบคทีเรีย และควรปรุงให้สุกก่อนรับประทาน แบคทีเรียที่พบการปนเปื้อนสูงเป็นลำดับที่ 2 คือ *Aeromonas* spp. การปนเปื้อน *Aeromonas* spp. บ่งบอกถึงการปนเปื้อนที่อาจมีสาเหตุมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ เนื่องจาก *Aeromonas* spp. เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอย่างอิสระในน้ำจืดหรือน้ำกร่อย [10] บางครั้งพบในปลา ในดินหรือในอาหาร และเป็นเชื้อฉวยโอกาส สามารถติดเชื้อในคนที่มีภูมิคุ้มกันอ่อนแอ อาจก่อให้เกิดโรคท้องร่วงอย่างรุนแรงในเด็ก [11] ดังนั้นควรแนะนำให้เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงระมัดระวังเพื่อป้องกันการติดเชื้อและป้องกันการระบาดของแบคทีเรียกลุ่มนี้ แบคทีเรียที่พบการปนเปื้อนสูงเป็นลำดับที่ 3 คือ *Bacillus* spp. บ่งบอกถึงการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจมาจากน้ำและดินที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง หรือน้ำที่ใช้ในการทำความสะดวกทั้งรวมถึงเครื่องมือในการจับสัตว์น้ำ [3] *Bacillus* บางสายพันธุ์อาจก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ [12] แบคทีเรียที่พบการปนเปื้อนสูงเป็นลำดับที่ 4 คือ *Vibrio* spp. และ *Staphylococcus* spp. ซึ่งการปนเปื้อนจาก *Vibrio* spp. บ่งบอกถึงอันตรายของการเกิดโรคในกุ้ง เนื่องจาก *Vibrio* จะก่อให้เกิดโรควิบริโอซิส (Vibriosis) [13] และอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคได้ [11] ส่วนการปนเปื้อนจากแบคทีเรียสกุล *Staphylococcus* spp. บ่งบอกถึงลักษณะของผู้ที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงาน โดยอาจมีการสัมผัสจากผู้ขายหรือเกษตรกรที่เพาะเลี้ยง เนื่องจาก *Staphylococcus* spp. เป็นเชื้อที่พบบริเวณผิวหนังมนุษย์

แบคทีเรียที่พบการปนเปื้อนสูงเป็นลำดับที่ 5 คือ *Pseudomonas* spp. ซึ่ง *Pseudomonas* เป็นเชื้อฉวยโอกาส อาจก่อให้เกิดโรคกับเด็กและผู้ที่มีภูมิคุ้มกันอ่อนแอ [10]

นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนจากแบคทีเรียสกุลอื่น ๆ เช่น *Corynebacterium* spp., *Moraxella* spp., *Enterobacter* spp., *Proteus* spp. และ *Serratia* spp. โดย *Corynebacterium* spp. เป็นแบคทีเรียที่พบในสิ่งแวดล้อมและบางสายพันธุ์อาจก่อให้เกิดโรค [3], [14] สำหรับ *Moraxella* spp. เป็นแบคทีเรียที่พบมากในกุ้ง [3] เป็นเชื้อฉวยโอกาส บางสายพันธุ์อาจก่อให้เกิดการอักเสบของโพรงกระดูก ที่กะโหลกศีรษะและโรคเยื่อหุ้มหัวใจอักเสบ [15] สำหรับ *Enterobacter* spp. เป็นแบคทีเรียที่พบในสิ่งแวดล้อม และเป็นเชื้อฉวยโอกาสอาจก่อให้เกิดโรคในคนได้ [16] ส่วนการปนเปื้อนจากแบคทีเรียสกุล *Proteus* spp. บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษากุ้งเพราะกุ้งที่เก็บในอุณหภูมิสูงประมาณ 16.7 - 22.2 องศาเซลเซียส มักเกิดการเน่าเสียโดยเชื้อกลุ่ม *Proteus* sp. [3] นอกจากนี้ *Proteus* sp. เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้าง สารฮีสตามีน [17] และแบคทีเรียสกุล *Serratia* spp. ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่พบในธรรมชาติแพร่กระจาย อยู่ในดิน เป็นเชื้อฉวยโอกาสทำให้เกิดติดเชื้อในเด็กแรกเกิดหรือผู้ที่อ่อนแอได้ [10]

นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนจาก *Acinetobacter* spp., *Alcaligenes* spp., *Pasteurella* spp., *Citrobacter* spp., *Klebsiella* spp., *Yersinia* spp., และ *Shigella dysenteriae* สำหรับการปนเปื้อน จาก *Alcaligenes* spp. และ *Acinetobacter* spp. บ่งบอกถึงการปนเปื้อนมาจากสิ่งแวดล้อม แต่เป็น เชื้อฉวยโอกาสสามารถก่อโรคในคนได้ [16] ดังนั้นควรระมัดระวังในการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเพื่อป้องกัน ไม่ให้เกิดการติดเชื้อจากสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคได้ สำหรับ *Pasteurella* spp. เป็นแบคทีเรีย ที่สามารถพบได้ในเยื่อเมือกของสัตว์ป่าและสัตว์ที่เลี้ยงไว้ในครัวเรือน [18] สำหรับการปนเปื้อนจาก แบคทีเรียสกุล *Pasteurella* spp. อาจเนื่องมาจากการปนเปื้อนข้ามจากสัตว์เลี้ยงจากแหล่งที่ขายหรือ แหล่งที่เพาะเลี้ยง *Citrobacter* spp. เป็นเชื้อที่พบในสิ่งแวดล้อมแต่เป็นเชื้อฉวยโอกาส บางสายพันธุ์ อาจก่อให้เกิดโรค Enteric Fever เป็นโรคที่ติดเชื้อทางกระแสเลือด สำหรับ *Klebsiella* spp. เป็นแบคทีเรีย ที่สามารถพบในสิ่งแวดล้อม [10] แต่สามารถเป็นเชื้อฉวยโอกาสอาจก่อโรคในคนได้ สำหรับ *Yersinia* spp. เป็นแบคทีเรียที่พบจากดิน น้ำ บางสายพันธุ์สามารถก่อโรค

Shigella dysenteriae พบในตัวอย่างที่ 5 สำหรับ *Shigella* เป็นแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุ ของโรคบิด มีอาการปวดท้องรุนแรง และถ่ายอุจจาระเป็นมูกเลือด *Shigella dysenteriae* สามารถพบได้ ในน้ำ อาหาร และแยกได้จากผู้ป่วย [19] นอกจากนี้การปนเปื้อนจาก *Shigella* อาจเนื่องมาจากการสัมผัส ของผู้ที่มีสุขลักษณะส่วนบุคคลไม่ดีจึงทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ ซึ่ง *Shigella* จะสามารถรอดชีวิตใน อาหารทะเลได้ และมีอัตราเสี่ยงในการเกิดโรค Shigellosis ได้ [20] โดยปริมาณเชื้อที่ทำให้เกิดโรคคือ 10^3 CFU/g แต่อย่างไรก็ตาม *Shigella* สามารถถูกยับยั้งโดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที [12] จากการทดลองสามารถพบแบคทีเรียสกุลต่าง ๆ เช่น *Pseudomonas* spp. *Alcaligenes* spp. *Acinetobacter* spp. และ *Citrobacter* spp. สอดคล้องกับการรายงานของ Lakshmanan, R., et al. [21] รายงานว่า พบแบคทีเรียสกุล *Alcaligenes*, *Flavobacteria*, *Acinetobacter* และ *Pseudomonas* ในตัวอย่างปลาและกุ้งที่เก็บรักษาด้วยน้ำแข็ง และสามารถพบ *Aeromonas*, *Proteus*, *Citrobacter*, *Vibrio* และ *Acinetobacter* ในปลาทูน่า [22] ดังนั้นก่อนการบริโภคผู้บริโภคควรล้างทำความสะอาดเพื่อลดปริมาณ แบคทีเรียที่ปนเปื้อนมากับตัวกุ้ง และควรปรุงให้สุกก่อนรับประทานเพื่อลดหรือทำลายแบคทีเรียที่เป็น อันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค

2. มาตรฐานของตัวอย่างกุ้งขาว

จากการศึกษาปริมาณและการแพร่กระจายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดจากตัวอย่างกุ้งขาวที่วางจำหน่ายตามตลาดต่าง ๆ ภายในจังหวัดชลบุรี จำนวน 40 ตัวอย่าง เมื่อพิจารณาเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพทางจุลชีววิทยาของกุ้งขาวโดยพิจารณาเพียงปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดจะสามารถแบ่งมาตรฐานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 มาตรฐานทางจุลชีววิทยาอาหารทะเลส่งออกของประเทศออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ [23] ที่กำหนดค่า Standard Plate Count (SPC) ต้องมีค่าไม่เกิน 5.0×10^6 CFU/g พบว่าตัวอย่างกุ้งขาวในการศึกษาครั้งนี้ 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องจากมีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปทั้งหมดสูงเกินมาตรฐาน และกลุ่มที่ 2 คือ มาตรฐานทางจุลชีววิทยาอาหารทะเลส่งออกของประเทศญี่ปุ่นที่กำหนดค่า Standard Plate Count (SPC) ต้องมีค่าไม่เกิน 1.0×10^5 CFU/g จากผลการศึกษาพบว่ากุ้งขาวที่นำมาทดสอบเกินมาตรฐานกลุ่มที่ 2 สูงเกิน 62.5 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่ 3 กำหนดค่า Standard Plate Count (SPC) ต้องมีค่าไม่เกิน 1×10^6 CFU/g ตามมาตรฐานทางจุลชีววิทยาอาหารทะเลส่งออกของประเทศสหรัฐอเมริกา [24] พบตัวอย่างที่เกินมาตรฐาน 15 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นตัวอย่างกุ้งขาวที่วางจำหน่ายตามตลาดภายในจังหวัดชลบุรี เมื่อพิจารณาถึงเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพทางจุลชีววิทยาของกุ้งขาว พบว่าส่วนใหญ่ตัวอย่างกุ้งขาวที่นำมาวิเคราะห์ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและไม่สามารถส่งออกไปยังประเทศต่าง ๆ คือ ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกาได้ นอกจากนั้นยังพบแบคทีเรียก่อโรคหลายชนิด ดังนั้นควรมีการพัฒนามาตรฐานกุ้งขาวให้ได้ตามมาตรฐานโดยอาจมีการแนะนำให้เกษตรกรรู้จักแนวทางป้องกันและการรักษาอาการการติดเชื้อแบคทีเรียของกุ้งขาว และควรปรับปรุงด้านสุขาภิบาลของสถานที่วางจำหน่ายกุ้งขาว เพื่อสามารถส่งออกและเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

กิตติกรรมประกาศ

ทีมงานวิจัยขอขอบคุณแหล่งสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่มีรองศาสตราจารย์ ดร.สุภัททิ์ นิมรัตน์ เป็นหัวหน้าทีมวิจัย และภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ช่วยสนับสนุนอุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการศึกษาครั้งนี้

References

- [1] Limsuwan, C. and Janratchakul, P. (2004). **Shrimp Farming Industry in Thailand**. Bangkok: National Research Council of Thailand
- [2] Sudthonghong, C. (2018). **White Feces Syndrome in *Litopenaeus vannamei***. Coastal Aquaculture Research and Development Regional Center 2 (Samutsakhon). Access (20 April 2017). Available (https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20170421131716_file.pdf)
- [3] Utarapichat, B. (2009). **Food Microbiology**. Songkhla: Thaksin University Book Center. (in Thai)
- [4] Wittman, R. J. and Flick, G. J. (1995). Microbial Contamination of Shellfish: Prevalence, Risk to Human Health, and Control Strategies. **Annual Review of Public Health**. Vol. 16, pp. 123-140. DOI: 10.1146/annurev.pu.16.050195.001011

- [5] FDA. Maturin, L. J. and Peeler, J. T. (1998). **Chapter 3: Aerobic Plate Count, Bacteriological Analytical Manual [BAM]**. Access (3 August 2011). Available (<https://www.scribd.com/doc/61521962/Bacteriological-Analytical-Manual-BAM-BAM-Aerobic-Plate-Count>)
- [6] Holt, J. G. and Bergey, D. H. (1994). **Bergey's Manual of Determinative Bacteriology**. Baltimore: Williams and Wilkins
- [7] Hatha, A. A. M., Maqbool, T. K., and Kumar, S. S. (2003). Microbial Quality of Shrimp Products of Export Trade Produced from Aquacultured Shrimp. **International Journal of Food Microbiology**. Vol. 82, pp. 213-221
- [8] Dalsgaard, I. (2001). Selection of Media for Antimicrobial Susceptibility Testing of Fish Pathogenic Bacteria. **Aquaculture**. Vol. 196, No. 3-4, pp. 267-275
- [9] Maclean, L. L., Vinogradov, E., Crump, E. M., Perry, M. B., and Kay, W. W. (2001). The Structure of the Lipopolysaccharide O-antigen Produced by *Flavobacterium psychrophilum* (259-93). **European Journal of Biochemistry**. Vol. 268, Issue 9, pp. 2710-2716. DOI: 10.1046/j.1432-1327.2001.02163.x
- [10] Baron, E. J., Peterson, L. R., and Finegold, S. M. (1994). **Bailey & Scott's Diagnostic Microbiology**. St. Louis: Mosby-Year Book
- [11] Suwanphinid, N. (2004). **Bacteria Associated with the Disease**. Department of Biology, Faculty of Science, Srinakharinwirot University. Bangkok: Nobel Print. (in Thai)
- [12] Food and Drug Administration. (2000). **Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies**. Access (22 April 2006). Available (<http://www.cfsan.fda.gov/~comm/ift-over.html>)
- [13] Nimrat, S., Sakanuchaichan, K., Chuersuwan, N., and Vuthiphandchai, V. (2005). Prevalence of *Vibrio* spp. in Aquatic Organisms Collected from Natural Environments and Aquaculture Systems. **Burapha Science Journal**. Vol. 10, No. 1-2, pp. 83-91
- [14] Suwanphinid, N. and Suwanphinid, P. (2001). **General Microbiology**. (3rd ed.). Bangkok: Chulalongkorn University Printing House.
- [15] Koneman, W. E., Allen, S. D., Janda, W. M., Schreckenberger, P. C., and Winn, W. C. (1997). **Color Atlas and Textbook of Diagnostic Microbiology**. Philadelphia: Lippincott
- [16] Suphawed, S. and Wonchid, M. (1993). **Basic Bacteria**. Bangkok: Siriyod Printing.
- [17] Kalamaki, M., Price, R. J., and Fung, D. Y. C. (1997). Rapid Methods for Identifying Seafood Microbial Pathogens and Toxins. **Journal of Rapid Methods and Automation in Microbiology**. Vol. 5, Issue 2. pp. 87-137. DOI: 10.1111/j.1745-4581.1997.tb00155.x
- [18] Gautier, A. L., Dubois, D., Escande, F. O., Avril, J. L., Cuot, P. T., and Gaillot, O. (2005). Rapid and Accurate Identification of Human Isolate of *Pasteurella* and Related Species by Sequencing the *sodA* Gene. **Journal of Clinical Microbiology**. Vol. 43, No. 5, pp. 2307-2314. DOI: 10.1128/JCM.43.5.2307-2314.2005

- [19] Faruque, S. M., Khan, R., Kamruzzaman, M., Yamasaki, S., Ahmad, Q. S., Azim, T., Nair, G. B., Takeda, Y., and Sack, D. A. (2002). Isolation of *Shigella dysenteriae* Type 1 and *S. flexneri* Strains from Surface Waters in Bangladesh: Comparative Molecular Analysis of Environmental *Shigella* Isolates versus Clinical Strains. **Applied and Environmental Microbiology**. Vol. 68, No. 8, pp. 3908-3913. DOI: 10.1128/aem.68.8.3908-3913.2002
- [20] Huss. H. H., Reilly, A., and Embarek, P. K. B. (2000). Prevention and Control of Hazards in Seafood. **Food Control**. Vol. 11, No. 2, pp. 149-156
- [21] Lakshmanan, R., Shakila, R. J., and Jeyasekaran, G. (2002). Survival of Amine-Forming Bacteria During the Ice Storage of Fish and Shrimp. **Food Microbiology**. Vol. 19, Issue 6, pp. 617-625. DOI: 10.1006/fmic.2002.0481
- [22] Middlebrooks, B. L., Toom, P. M., Douglas, W. L., Harrison, R. E., and McDowell, S. (1998). Effects of Storage Time and Temperature on the Microflora and Amine-Development in Spanish Mackerel (*Scomberomorus maculatus*). **Journal of Food Science**. Vol. 53, Issue 4, pp. 1024-1029. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb13522.x
- [23] Fish Inspection and Quality Control Division Department of Fisheries. (2009). **Microbiological Standards of the Product**. Access (8 August 2018). Available (<https://www.fisheries.go.th/quality/Std%20micro.php>)
- [24] ICMSF. (1986). **Microorganisms in Foods 2 - Sampling for Microbiological Analysis: Principles and Specific Applications**. Toronto, Ontario, Canada, University of Toronto Press (second edition). Access (29 March 2006). Available (<http://seafood.ucdavis.edu/haccp/compendium/chapt09.htm>)

สารประกอบบิวทิลทินในหอยแมลงภู่นิชนิด *Perna viridis* บริเวณชายฝั่งทะเล
จังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด

Butyltin Compounds in Green mussel (*Perna viridis*) from the Coasts of Chonburi, Rayong and Trat Provinces

ชนพพล กลิ่นกลบ¹ กิตติยา เชียร์แมน² นิตยา สูดศิริ² อาภาพร บุญมี³ และสุทิน กิ่งทอง^{1*}

Chanoppholm Klinklob¹ Kittiya Shearman² Nittaya Sudsiri² Apaporn Boonmee³
and Sutin Kingtong^{1*}

Received: September 27, 2018; Revised: December 20, 2018; Accepted: December 27, 2018

บทคัดย่อ

สารประกอบบิวทิลทินเป็นสารที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมบริเวณชายฝั่งทะเลเนื่องจากการใช้สีทาเรือที่มีสารไตรบิวทิลทิน เป็นส่วนผสม สารกลุ่มนี้สามารถหลุดออกจากเรือสะสมในสิ่งแวดล้อม และมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางทะเล ภายหลังองค์การทางทะเลระหว่างประเทศจึงประกาศยกเลิกการใช้สารกลุ่มนี้ในสีทาเรือตั้งแต่ปี ค.ศ. 2008 เป็นต้นมา แต่เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีการสะสมยาวนานจึงควรมีการตรวจวัดปริมาณอย่างต่อเนื่อง สำหรับประเทศไทยพบรายการการปนเปื้อนของสารประกอบบิวทิลทินในสัตว์เป็นครั้งแรกในหอยแมลงภู่นิชนิด *Perna viridis* บริเวณชายฝั่งทะเล ในปี ค.ศ. 1994 และ 1995 โดยพบสารประกอบบิวทิลทินในหอยแมลงภู่นิบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทยปริมาณเฉลี่ย 49 ng/g ของน้ำหนักสด โดยในจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด มีปริมาณเฉลี่ย 32 73 และ 16 ng/g ของน้ำหนักสด ตามลำดับ และในปี ค.ศ. 2004 มีการตรวจวัดในหอยแมลงภู่นิชนิดนี้อีกครั้ง บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน พบสารประกอบบิวทิลทินปริมาณเฉลี่ย 35 ng/g ของน้ำหนักสด โดยในภาคตะวันออกพบรายงานในจังหวัดชลบุรีมีปริมาณเฉลี่ย 70 ng/g ของน้ำหนักสด อย่างไรก็ตามภายหลังการยกเลิกการใช้สารกลุ่มนี้ในสีทาเรือในปี ค.ศ. 2008 ยังไม่พบรายงานการปนเปื้อนของสารกลุ่มนี้ในหอยแมลงภู่นิอีก การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัด

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี

¹ Faculty of Science, Burapha University, Chonburi

² ฝ่ายมาตรวิทยาและชีวเคมี สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ คลอง 5 คลองหลวง ปทุมธานี

² Chemical Metrology and Biometry Department, National Institute of Metrology, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี

³ Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

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

ปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในหอยแมลงภู่นกชนิด *Perna viridis* บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด โดยใช้สาร Sodium tetraethylborate ในการสร้างอนุพันธ์ของสารประกอบทิน และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS ผลการศึกษาพบว่าสามารถตรวจพบสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่นกมีปริมาณเฉลี่ย 2.66 ng/g ของน้ำหนักแห้ง คิดเป็น 0.49 ng/g ของน้ำหนักสด โดยแบ่งเป็นจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด มีค่าเฉลี่ย 1.04 5.98 และ 0.95 ng/g ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 0.23 1.10 และ 0.15 ng/g ของน้ำหนักสด ตามลำดับ ข้อมูลจากการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการสะสมของสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่นกมีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่พบในอดีต

คำสำคัญ : บิวทิลทิน; หอยแมลงภู่นก; ไตรบิวทิลทิน; ไดบิวทิลทิน

Abstract

Butyltin compounds are marine environmental pollutant according to their used as tributyltin-based boat paint. These pollutants can be released from ship hulls and contaminated marine environments including water, sediment and animals. The effect of butyltin compounds were extensively reported leading to the global ban on usage of tributyltin-based boat paint by the International Maritime Organization in 2008. Since butyltin compounds are persistent organic pollutants (POPs), continuously monitoring is required. For Thailand, measurements of butyltin compounds were initially performed in mussel *Perna viridis* during years 1994 - 1995 from the coast of Thailand with mean accumulation levels of 49 ng/g wet weight basis. In the East coast, mean accumulation levels of 32, 73 and 16 ng/g wet weight were reported in Chonburi, Rayong and Trat Provinces, respectively. Later, in 2004, butyltins accumulations in mussel were monitored again in the Upper Gulf of Thailand with mean accumulation level of 35 ng/g wet weight. In the East coast, accumulation level of 70 ng/g wet weight was reported in Chonburi. However, none of tissue accumulation has been reported after the ban of butyltin compounds in 2008. This work therefore aimed to measure accumulation level of butyltin compounds in the mussel *Perna viridis* inhabiting along the East coasts of Thailand including Chonburi, Rayong and Trat Provinces. The analyses were performed by using sodium tetraethylborate in derivatization steps and analyzed with a GC-MS. Results showed that butyltin compounds were measured in mussels with mean accumulation level of 2.66 ng/g dry weights which was equivalent to 0.49 ng/g wet weights. The mean accumulation levels of Chonburi, Rayong and Trat Provinces were 1.04, 5.98 and 0.95 ng/g dry weight in which equivalent to 0.23, 1.10 and 0.15 ng/g wet weight basis. Our results indicated that bioaccumulations of butyltin compounds in mussels were extremely decreased comparing to previous reports.

Keywords: Butyltin; Mussel; Dibutyltin; Tributyltin

บทนำ

สารประกอบบิวทิลทิน (Butyltin Compounds; BTs) เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลประกอบด้วย ธาตุดีบุก (Sn) และหมู่บิวทิล ($-C_4H_9$) ซึ่งสารที่เป็นที่รู้จักกันดีในกลุ่มนี้คือ สารไตรบิวทิลทิน (Tributyltin; TBT) เนื่องจากการรายงานการปนเปื้อนและผลกระทบของสาร TBT ในสิ่งแวดล้อมทางทะเลเป็นจำนวนมาก สาร TBT นี้ถูกใช้ในสีทาเรือเพื่อป้องกันการเกาะบนผิวเรือของเพรียงและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตาม สารนี้สามารถละลายออกมาจากผิวเรือและปนเปื้อนในระบบนิเวศชายฝั่งทะเลและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเป็นอย่างมาก จนถือได้ว่าเป็นสารพิษที่มีความร้ายแรงมากที่สุดชนิดหนึ่งในระบบนิเวศทางทะเล [1] โดยผลกระทบที่เป็นที่รู้จักกันดีของสารประกอบบิวทิลทินคือ ทำให้หอยฝาเดียวในกลุ่ม Neogastropod เกิดการเปลี่ยนเพศจากเพศเมียเป็นเพศผู้ (Imposex) ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างของประชากรหอยฝาเดียวในพื้นที่และอาจทำให้ประชากรหอยฝาเดียวลดลง [2] สำหรับหอยสองฝาพบว่าส่งผลกระทบต่อพัฒนาการและการเจริญของตัวอ่อน และในหอยนางรมตัวเต็มวัยพบว่าทำให้หอยนางรมมีการสร้างเปลือกผิดปกติ ทำให้ผลผลิตต่ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงหอยนางรมเป็นอย่างมาก [2] - [3] นอกจากนี้ สารไตรบิวทิลทินยังสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหารรวมถึงผู้บริโภคอันดับสุดท้าย เช่น มนุษย์ และอาจส่งผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันทำให้สุขภาพอ่อนแอลงอีกด้วย [4] การปนเปื้อนของสาร TBT นอกจากจะพบในรูปของ TBT แล้วยังพบว่าการปนเปื้อนของสารบิวทิลทินที่เกิดจากการสลายตัวของ TBT เป็นอนุพันธ์ Dibutyltin (DBT), Monobutyltin (MBT) ในสิ่งแวดล้อมทางทะเลในทุกภูมิภาคของโลก ทั้งในน้ำทะเล ดินตะกอน [4] และสิ่งมีชีวิต เช่น สาหร่าย [5] กล้วยทะเล [6] หอยทะเล [7] - [8] ครัสเตเชียน [9] และปลา [10] เป็นต้น

จากรายงานการปนเปื้อนและผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศดังที่กล่าวมาแล้วทำให้หลายประเทศ กำหนดมาตรการห้ามใช้สาร TBT ในสีทาเรือ ต่อมาองค์การทางทะเลระหว่างประเทศ International Maritime Organization (IMO) จึงได้มีข้อกำหนดห้ามผลิตสีทาเรือที่มีส่วนผสมของสาร TBT ในปี ค.ศ. 2003 และห้ามใช้สีทาเรือที่มีองค์ประกอบของสาร TBT ในปี ค.ศ. 2008 เป็นต้นมา [11] ทำให้สถานการณ์การปนเปื้อนของสารประกอบบิวทิลทินในหลายประเทศมีแนวโน้มที่ลดลง อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถตรวจพบสารกลุ่มนี้ได้ทั้งในน้ำทะเล ดินตะกอน และสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสารประกอบบิวทิลทินจัดเป็นสารที่มีความคงทนและสลายตัวช้า (Persistent Organic Pollutants; POPs) จึงสามารถปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ยาวนาน [12] โดยค่าครึ่งชีวิตในน้ำทะเล ดินตะกอน และหอยสองฝาอยู่ที่ 0.78 2.89 และ 1.12 ปี ตามลำดับ [13] นอกจากนี้ยังมีปัจจัยเสี่ยงอื่นที่อาจทำให้การปนเปื้อนของสารกลุ่มนี้ลงสู่สิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากภายใต้ข้อกำหนดของ IMO ยังอนุญาตให้ใช้สาร TBT ในสีทาเรือ สำหรับเรือที่มีขนาดใหญ่เกิน 25 เมตร และนอกจากสีทาเรือแล้ว สารอนุพันธ์ DBT และ MBT ยังมีการใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เช่น ใช้ป้องกันเชื้อราในระบบหล่อเย็น ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า ใช้ในการถนอมอาหาร ใช้ป้องกันเชื้อราในโรงไม้ เป็นต้น [14] - [15] ดังนั้นจึงควรมีการติดตามตรวจสอบและเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารบิวทิลทินอย่างต่อเนื่อง

แม้ว่าภายหลังการประกาศห้ามใช้สารประกอบบิวทิลทินในสีทาเรือส่งผลให้สถานการณ์การปนเปื้อนของสารประกอบบิวทิลทินในสิ่งมีชีวิตเริ่มมีแนวโน้มลดลงในหลายพื้นที่ทั่วโลก [16] - [18] อย่างไรก็ตามก็

ปัจจุบันยังสามารถตรวจพบการปนเปื้อนของสารกลุ่มนี้ในปริมาณมากและยังไม่มีแนวโน้มว่าจะลดลงในบางภูมิภาคของโลก [19] สำหรับประเทศไทยมีการตรวจวัดการปนเปื้อนของสารบิวทิลทินในสิ่งมีชีวิตน้อย โดยพบรายงานการศึกษาในหอยแมลงภู่นก (*Perna viridis*) ก่อนที่มีการประกาศห้ามใช้สารประกอบบิวทิลทินในสีทาเรือ โดยในปี ค.ศ. 1994 - 1995 พบปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่นกบริเวณชายฝั่งทะเลประเทศไทยเฉลี่ย 49 ng/g ของน้ำหนักสด โดยจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด พบปริมาณอยู่ที่ 32 73 และ 16 ng/g ของน้ำหนักสด ตามลำดับ [20] และในปี ค.ศ. 2004 พบปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่นกบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบนเฉลี่ย 35 ng/g ของน้ำหนักสด โดยจังหวัดชลบุรีพบปริมาณอยู่ที่ 70 ng/g ของน้ำหนักสด [21] อย่างไรก็ตามยังไม่พบรายงานการปนเปื้อนของสารประกอบกลุ่มนี้ในสิ่งมีชีวิตบริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศไทยภายหลังประกาศห้ามใช้สารกลุ่มนี้ในสีทาเรือ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดการปนเปื้อนของสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตบริเวณชายฝั่งทะเล โดยทำการศึกษาในหอยแมลงภู่นกชนิด *Perna viridis* มีถิ่นอาศัยบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกของประเทศไทย เช่น จังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด เป็นต้น ซึ่งเป็นจังหวัดในภูมิภาคที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ มีเขตอุตสาหกรรมที่สำคัญ และเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์การลงทุน อีกทั้งพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกยังเป็นเป้าหมายสำคัญสำหรับเป็นฐานการผลิตอุตสาหกรรมหลักของประเทศในอนาคต และการพัฒนาท่าเรือ จึงมีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนสารเคมีสู่สิ่งแวดล้อมรวมถึงสารกลุ่มบิวทิลทิน

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาประกอบด้วย บริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด ตามพิกัดในตารางที่ 1 และรูปที่ 1 ทำการเก็บตัวอย่างหอยแมลงภู่นกชนิด *Perna viridis* จากพื้นที่ศึกษาในเดือนสิงหาคม ปี พ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015) ในการเก็บตัวอย่างทำการสุ่มเก็บหอยแมลงภู่นกที่มีขนาดตั้งแต่ 5 เซนติเมตรขึ้นไป ใต้น้ำหนักรวมเปลือกประมาณ 1 กิโลกรัม และเน้นการเก็บตัวอย่างให้ครอบคลุมพื้นที่มากที่สุดตามระเบียบวิธีวิจัย ซึ่งผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการสัตว์ทดลองของมหาวิทยาลัย หลังจากเก็บตัวอย่างแล้วแช่เย็นในน้ำแข็งทันทีเพื่อขนย้ายไปยังห้องปฏิบัติการ ทำการแกะเปลือกเพื่อนำเอาเนื้อเยื่อสดรวมกันและทำการบดให้ละเอียด แล้วชั่งเนื้อเยื่อใต้น้ำหนัก 150 กรัม แล้วจึงนำไปทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze-Drying) เก็บเนื้อเยื่อที่แห้งแล้วในขวดแก้วทึบแสงและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส เพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

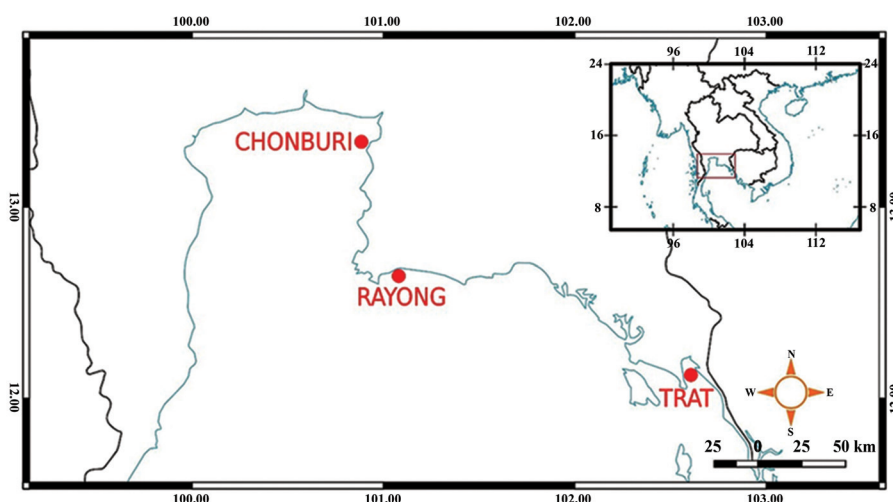
2. สารเคมีและการเตรียมสารมาตรฐาน

สารมาตรฐาน (Standard) บิวทิลทินที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ประกอบด้วย Monobutyltin chloride ($[\text{CH}_3\text{CH}_2]_3\text{SnCl}_3$, 95 %, Sigma-Aldrich), Dibutyltin chloride ($[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3]_2\text{SnCl}_2$, 96 %, Sigma-Aldrich) และ Tributyltin chloride ($[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3]_3\text{SnCl}$, 96 %, Sigma-Aldrich) นอกจากนี้ยังใช้สาร Tripropyltin (TPrT) ($(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2)_3\text{SnCl}$, 99 %, Sigma-Aldrich) สำหรับเป็น Internal standard และใช้สาร Sodium diethyldithiocarbamate ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{NS}_2\text{Na} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich) สำหรับกระบวนการ derivatization

เตรียมสารมาตรฐาน Monobutyltin chloride ($[\text{CH}_3\text{CH}_2]_3\text{SnCl}_3$, 95%), Dibutyltin chloride ($[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2]_2\text{SnCl}_2$, 96%), Tributyltin chloride ($[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3]_3\text{SnCl}$, 96%) ในเมทานอล ให้ได้ความเข้มข้น 1 g/L และเตรียม internal standard Tripropyltin (TPrT) ($(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2)_3\text{SnCl}$ 99 %) ในเมทานอลให้ได้ความเข้มข้น 10 mg/L สารละลายมาตรฐานทั้งหมดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการวิเคราะห์เตรียมสารละลาย Organotin catching โดยใช้ Sodium diethyldithiocarbamate ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{NS}_2\text{Na} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 6 % ในเอทานอล และเตรียม Acetate buffer pH 4.5 ± 0.3 โดยใช้ Sodium acetate ($\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$)

ตารางที่ 1 พิกัดสถานที่เก็บตัวอย่างหอยแมลงภู่นิคม *Perna viridis* และน้ำหนักเนื้อเยื่อสดและน้ำหนักแห้ง หลังจากทำแห้งแบบเยือกแข็ง

Location	Coordinates	Wet weight (g)	Dry weight (g)
Chonburi	13.329327N/100.904132E	150	29.26
Rayong	12.666802N/101.167804E	150	27.49
Trat	12.131474N/102.570505E	150	23.55



รูปที่ 1 แผนที่จุดเก็บตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ (ดัดแปลงจากโปรแกรม QGIS)

3. การสกัดตัวอย่างและปฏิกิริยา

การสกัดสารชีวพิษจากตัวอย่างเนื้อเยื่อในการศึกษาครั้งนี้ดัดแปลงจากงานวิจัย [22] โดยใช้เทคนิคการสกัดแบบ Solid-Liquid Extraction (SLE) นำตัวอย่างหอยแมลงภู่นิคมที่ทำแห้งแบบเยือกแข็ง โดยชั่งตัวอย่างแห้ง 2 กรัม ใส่ในหลอดทดลองฝาเกลียวขนาด 50 mL เติมน้ำ Ultrapure deionized ($18.2 \text{ M}\Omega/\text{cm}$) ปริมาตร 5 mL ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นเติมสารละลาย Tripropyltin (TPrT) ความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 100 μL นำไป sonicate นาน 30 นาที เติม Acetone ปริมาตร 10 mL และสารละลาย Sodium diethyldithiocarbamate 6 % ปริมาตร 100 μL นำไป sonicate อีก 20 นาที

จากนั้นเติม Acetate Buffer pH 4.5 ปริมาตร 10 mL เขย่านาน 1 นาที จากนั้นเติม Sodium tetraethylborate ($\text{NaB}(\text{Et})_4$) ปริมาตร 100 μL เดิมลงไปให้หมดสัปดาห์ก่อนหน้า ทำการเขย่านาน 30 นาที และเติม Hexane ปริมาตร 5 mL เขย่านาน 10 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 rpm นาน 10 นาที คัดสารละลายชั้น Hexane มาใส่ในหลอดทดลองอันใหม่ ทำการสกัดซ้ำอีกครั้งโดยเติม Hexane ปริมาตร 5 mL เขย่านาน 10 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 rpm นาน 10 นาที และคัดสารละลาย Hexane ขึ้นมาใส่ในหลอดทดลองก่อนหน้า และนำไปประเหยด้วยก๊าซไนโตรเจน ให้เหลือปริมาตร 1 mL ทำความสะอาดสารสกัดที่ได้ด้วย Florisil Column จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ต่อไป ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืน (Recovery) ในการวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการเติมสารละลายมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นที่แน่นอนใส่ลงไปเป็นตัวอย่าง (Spike) จากนั้นทำการสกัดและวิเคราะห์ผลเหมือนกันกับขั้นตอนการสกัดตัวอย่าง ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงเป็นร้อยละ

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS

การวิเคราะห์สารประกอบบิวทิลทินในครั้งนี้ดัดแปลงจากงานวิจัย [22] โดยนำสารสกัดปริมาตร 2 μL มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) รุ่น Agilent 5975C, Agilent Technologies (USA) โดยใช้คอลัมน์ชนิด HP-5MS 5 % phenyl ที่เคลือบด้วย methyl siloxane 95 % ขนาด 30 m $\times$ 0.25 μm $\times$ 0.25 mm ยี่ห้อ Agilent Technologies และให้อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทุก ๆ 1 นาที จนถึงอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และคงที่เป็นเวลา 1 min และเพิ่มอุณหภูมิอีก 30 องศาเซลเซียส ทุก ๆ 1 นาที จนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที อุณหภูมิ inlet 250 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซตัวพา 1.0 mL/min โดยมีก๊าซฮีเลียม (He) เป็นตัวนำพาสารที่อัตรา 50 mL/min เข้าสู่คอลัมน์ และใช้ตัวตรวจวัด (Detector) คือ Mass Spectrometer (MS) ทำการวิเคราะห์หาสารประกอบบิวทิลทินที่อยู่ในเนื้อเยื่อตัวอย่างโดยเทียบกับปริมาณสารมาตรฐาน สารมาตรฐานที่ใช้คือ ไตรบิวทิลทินคลอไรด์ ไคบิวทิลทินคลอไรด์ และโมโนบิวทิลทินคลอไรด์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยเปรียบเทียบเวลาที่สารตัวอย่างถูกชะออกจากคอลัมน์กับ Retention Time (Rt) และการยืนยันด้วยมวลโมเลกุล (Molecular Mass) ของสารแต่ละชนิด แล้วทำการหาปริมาณตัวอย่างโดยสร้างกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 5 จุด (0.1 0.5 1 50 และ 100 $\mu\text{g/L}$) แล้วเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานกับสัดส่วนพื้นที่ใต้พีค (Peak Area Ratio) ของสารมาตรฐานกับ Internal Standard แล้วใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้มาคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง โดยหน่วยของสารประกอบบิวทิลทินที่ตรวจพบมีหน่วยเป็นนาโนกรัม ต่อกรัมในน้ำหนักแห้ง (ng/g dry weight)

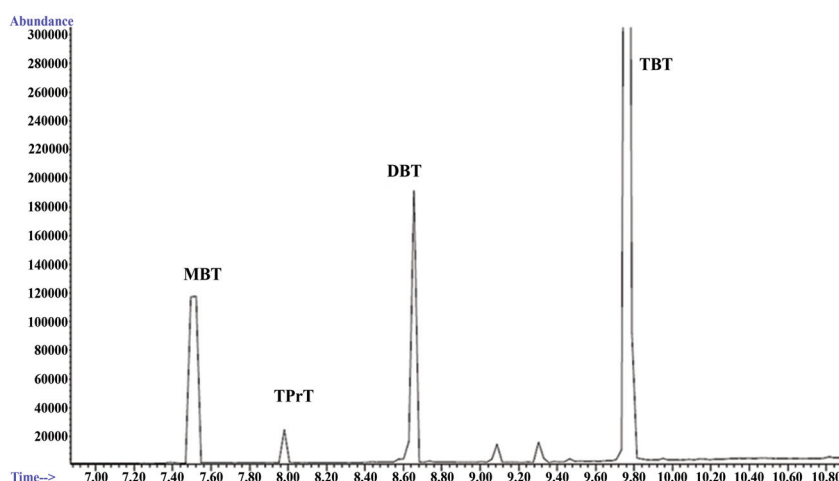
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. เทคนิคการสกัดแบบ Solid-Liquid Extraction (SLE) และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS

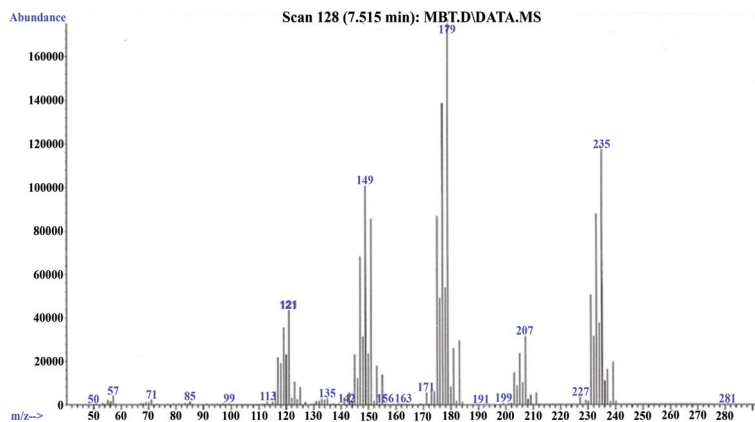
เมื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในสารละลายมาตรฐานเทียบกับตัวอย่างด้วยเครื่อง GC-MS ในโหมด Scan และโหมด Selection Ion Monitoring (SIM) พบว่าสารประกอบบิวทิลทินแต่ละอนุพันธ์มี Ions (m/z) คือ โมโนบิวทิลทิน (MBT) 179-149-207 มี target ion 235 แสดงเวลาในโครมาโตแกรมที่ 7.52 นาที ไคบิวทิลทิน (DBT) 207-179-146 มี target ion 263 แสดงเวลา

ในโครมาโตแกรมที่ 8.65 นาที และไตรบิวทิลทิน (TBT) 207-177-151 มี target ion 291 แสดงเวลาในโครมาโตแกรมที่ 9.78 นาที ช่วงเวลาที่แสดงในโครมาโตแกรมนั้นแตกต่างกันตามมวลและประจุของโมเลกุลแต่ละชนิด โดยมวลโมเลกุลของ MBT จะปรากฏออกมาในแผนภาพโครมาโตแกรมก่อน เนื่องจากสภาพการมีขั้วของ MBT ที่มีขั้วมากกว่า DBT และ TBT และในการวิจัยครั้งนี้ได้มีการเติม Internal Standards โดยใช้สารมาตรฐาน tripropyltin (TPrT) เพื่อชดเชยการสูญเสียสารมาตรฐานในขั้นตอนการสกัดจนถึงขั้นตอนการวิเคราะห์โดยจะแสดง Ion (m/z) ที่ 191-249-247 มี target ion 193 แสดงเวลาในโครมาโตแกรมที่ 7.98 นาที (รูปที่ 2 - 3 และตารางที่ 2) ส่วนผลของการทำ recovery ของสาร TBT, DBT และ MBT อยู่ระหว่าง 120 135 และ 112 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการสกัดแบบ SLE และใช้ sodium tetraethylborate ($\text{NaB}(\text{Et})_4$) เป็นตัวทำปฏิกิริยา สามารถทำการสกัดและวิเคราะห์ผลได้ทั้งในสารละลายมาตรฐานและสารที่อยู่ในตัวอย่างสิ่งมีชีวิต

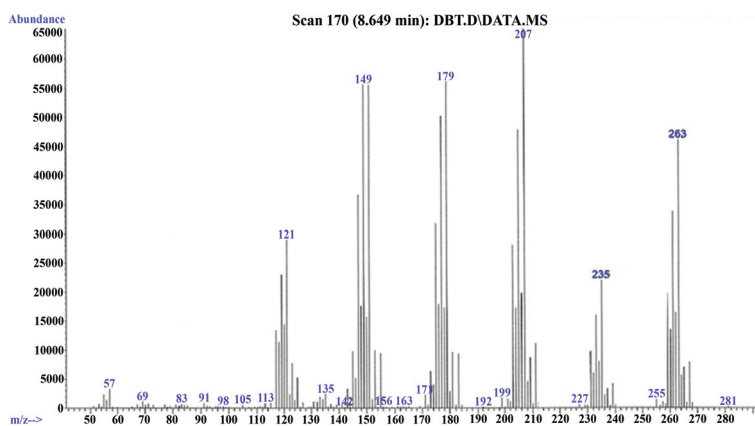
การวิเคราะห์สารประกอบบิวทิลทินในการศึกษาครั้งนี้ สามารถระบุค่าคุณลักษณะของวิธีการวัดด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้ (1) ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณ (Limit Of Quantification; LOQ) หรือความเข้มข้นระดับแรกที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่างของสารประกอบบิวทิลทินทั้ง 3 อนุพันธ์มีค่า 0.1 ng/g (2) ขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit Of Detection; LOD) หรือค่าความเข้มข้นที่สามารถตรวจวัดสัญญาณได้ในตัวอย่างของสารประกอบบิวทิลทินทั้ง 3 อนุพันธ์มีค่า 0.5 ng/g และ (3) ความเที่ยงของการวิเคราะห์ (Precision) เป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งการหาค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนในการวิจัยครั้งนี้ของไตรบิวทิลทิน ไดบูทิลทิน และโมโนบิวทิลทินอยู่ที่ 120 135 และ 112 % ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว (ตารางที่ 3)



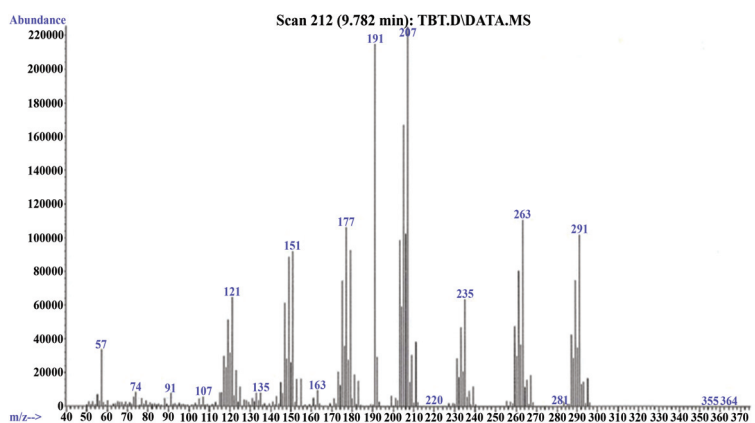
รูปที่ 2 โครมาโตแกรมของสารประกอบบิวทิลทินที่ผ่านกระบวนการ derivatization ด้วย $\text{NaB}(\text{Et})_4$ และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS พบ TIC chromatograms ของสารประกอบบิวทิลทินทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Monobutyltin (MBT), Dibutyltin (DBT) และ Tributyltin (TBT) ที่เวลา 7.52 8.65 และ 9.78 นาที ตามลำดับ และพบ Internal Standard Tripropyltin (TPrT) ที่เวลา 7.98 นาที



(ก) MBT



(ข) DBT



(ค) TBT

รูปที่ 3 Mass spectra ของ MBT DBT and TBT ที่ทำการวิเคราะห์ด้วย GC-MS ในโหมด Scan

ตารางที่ 2 ไอออนและ Retention Time ของสารประกอบบิวทิลทิน และ Internal Standard Tripropyltin (TPrT)

Butyltin compounds	Ions (m/z)	Target ion	Retention time (min)
Monobutyltin (MBT)	233 - 179 - 177	235	7.52
Dibutyltin (DBT)	261 - 179 - 177	263	8.65
Tributyltin (TBT)	289 - 261 - 263	291	9.78
Tripropyltin (TPrT)	191 - 249 - 247	193	7.98

ตารางที่ 3 ค่าคุณลักษณะของวิธีการวัดด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (n = 3)

Butyltin compounds	LOD (ng/g)	LOQ (ng/g)	Precision (%RSD)	Recovery (%)	Linearity (r ²)
Monobutyltin (MBT)	0.10	0.50	13	112	0.991
Dibutyltin (DBT)	0.10	0.50	12	135	0.992
Tributyltin (TBT)	0.10	0.50	16	120	0.993

2. ปริมาณสารประกอบบิวทิลทินที่ตรวจพบในหอยแมลงภู่

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่ชนิด *Perna viridis* บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด ในการศึกษาครั้งนี้ (ตารางที่ 4) พบปริมาณรวมของสารประกอบบิวทิลทิน (Σ BTs) ในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่มีค่า 1.04 5.98 และ 0.95 ng/g dry weight ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยของทุกพื้นที่รวมกันเป็น 2.66 ng/g dry weight โดยพบปริมาณรวมของสารประกอบบิวทิลทินมากที่สุดในพื้นที่ระยองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.98 ng/g dry weight โดยตรวจพบอนุพันธ์ DBT เพียงอย่างเดียว รองลงมาคือจังหวัดชลบุรีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.04 ng/g dry weight ประกอบด้วยอนุพันธ์ TBT และ DBT 0.68 และ 0.36 ng/g dry weight ตามลำดับ ไม่พบ MBT ส่วนจังหวัดตราดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 ng/g dry weight ตรวจพบอนุพันธ์ DBT ส่วนอนุพันธ์ TBT พบได้เล็กน้อยคือมีปริมาณมากกว่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ; < 0.10 ng/g dry weight) แต่มีปริมาณน้อยกว่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD; < 0.50 ng/g dry weight) และไม่พบอนุพันธ์ MBT เนื่องจากการศึกษาในอดีตพบรายงานปริมาณการสะสมของสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อในหน่วย ng/g ของน้ำหนักสด (Wet Weight) ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผู้วิจัยจึงได้ทำการเปลี่ยนหน่วยจาก Dry Weight เป็นหน่วย Wet Weight โดยใช้ข้อมูลน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของเนื้อหอยในตารางที่ 1 ทำให้ได้ข้อมูลเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งทำให้ปริมาณรวมของสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่พบในจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด มีค่าเท่ากับ 0.23 0.10 และ 0.15 ng/g dry weight ตามลำดับ และ มีค่าเฉลี่ยของทุกพื้นที่รวมกันเป็น 0.49 ng/g dry weight

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาการสะสมของสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด จากการศึกษาในครั้งนี้กับในอดีตพบว่าปริมาณการสะสมของสารกลุ่มนี้ในหอยแมลงภู่ลดลงอย่างมาก โดยในอดีตที่มีการเก็บตัวอย่างในปี ค.ศ. 1994/1995

ที่พบปริมาณการสะสมของสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่นกในจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด เท่ากับ 32.73 และ 16 ng/g dry weight ตามลำดับ [20] และในปี ค.ศ. 2004 ที่พบรายงานในจังหวัดชลบุรี 70 ng/g dry weight [21] ปัจจุบันลดลงเหลือ 0.23-0.10 และ 0.15 ng/g dry weight ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประกาศขององค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (IMO) ที่ห้ามใช้สีทาเรือที่มีส่วนผสมของสาร TBT ในปี ค.ศ. 2008 มีผลทำให้ปริมาณการสะสมของสารบิวทิลทินในหอยแมลงภู่นกมีแนวโน้มลดลงในจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด

เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานความปลอดภัยของสารปนเปื้อนในอาหาร พบว่าไม่มีการระบุเกณฑ์ขั้นต่ำของสารประกอบบิวทิลทินในอาหาร เนื่องจากสารกลุ่มนี้ไม่พบข้อมูลความเป็นพิษที่แน่นอนต่อมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม แต่มีผลกระทบรุนแรงต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง โดยเฉพาะกลุ่มสัตว์กลุ่มหอย (Mollusk) แต่เนื่องจากสารประกอบบิวทิลทินมีดีบุก หรือ Tin (Sn) เป็นองค์ประกอบ เมื่อพิจารณาตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 98 พ.ศ. 2529 (ค.ศ. 1986) เรื่องมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน กำหนดให้ตรวจพบปริมาณดีบุกได้ไม่เกิน 250 มิลลิกรัม/อาหาร 1 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 250,000 ng/g dry weight [23] ดังนั้นเมื่อเทียบกับปริมาณที่พบในงานวิจัยครั้งนี้จึงไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ระบุไว้ในมาตรฐานข้างต้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณการสะสมของสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่นกจะอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค แต่ก็ควรติดตามตรวจสอบต่อไปเนื่องจากความเข้มข้นดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพประชากรของหอยแมลงภู่นก รวมถึงสัตว์น้ำชนิดอื่น ในระยะยาวอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของประชากรได้ ซึ่งควรทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

เมื่อพิจารณาสถานการณ์การปนเปื้อนของสารประกอบบิวทิลทินทั่วโลก ภายหลังที่ IMO ประกาศห้ามใช้สีทาเรือที่มีส่วนผสมของสารประกอบบิวทิลทินในปี ค.ศ. 2008 พบว่าได้มีการเฝ้าระวังและติดตามตรวจสอบการปนเปื้อนสารประกอบบิวทิลทินที่สะสมและแพร่กระจายในระบบนิเวศต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องทั้งในมวลน้ำ สิ่งมีชีวิต และตะกอนดิน ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวโน้มการสะสมสารประกอบบิวทิลทินอย่างต่อเนื่อง การศึกษาในปัจจุบันพบว่าสถานการณ์การปนเปื้อนสารประกอบบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มลดลงในหลายประเทศ ยกตัวอย่างเช่น ประเทศเกาหลีใต้ ในปี ค.ศ. 2008/2009 ตรวจพบปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในน้ำทะเลเฉลี่ย 2 ng/L ซึ่งลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 1995/1997 ที่พบปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในน้ำทะเลเฉลี่ย 34 ng/L และพบปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยนางรมลดลงประมาณ 4 เท่า คือจาก 714 ng/g dry weight ในปี ค.ศ. 1995/1997 ลดลงเป็น 158 ng/g dry weight ในปี ค.ศ. 2008/2009 อย่างไรก็ตามปริมาณการสะสมของสารประกอบบิวทิลทินในดินตะกอนไม่มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือพบการสะสมของสารประกอบบิวทิลทินในตะกอนดินเฉลี่ย 284 ng/g dry weight ในปี ค.ศ. 1995/1997 และ 256 ng/g dry weight ในปี ค.ศ. 2008/2009 [24] - [25] อย่างไรก็ตามในบางประเทศยังสามารถตรวจพบสารประกอบบิวทิลทินได้ในปริมาณสูง เช่น ประเทศชิลี มีการตรวจวัดในเนื้อเยื่อของหอยฝาเดียว 3 ชนิด ได้แก่ *Acanthina monodon*, *Xanthochorus cassidiformis* และ *Oliva peruviana* บริเวณชายฝั่งทะเลตอนกลางของประเทศ พบการปนเปื้อนในเนื้อเยื่อสูง และในบางพื้นที่พบได้สูงที่สุดถึง 600 ng/g ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศชิลีได้ อีกทั้งปริมาณการสะสมในตะกอนดินยังไม่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับอดีต [26] และปริมาณดังกล่าวสอดคล้องกับประเทศอื่น ๆ ที่อยู่ในภูมิภาคเดียวกัน เช่น เปรู [19] เนื่องจากประเทศชิลีและเปรูไม่ได้ลงนามในข้อตกลงของ IMO จึงทำให้แนวโน้มการปนเปื้อนยังมีปริมาณสูงอยู่

ตารางที่ 4 ปริมาณสารประกอบบิวทิลทินที่ตรวจพบการสะสมในหอยแมลงภู่น้ำจืด *Perna viridis* น้ำหนักแห้ง มีหน่วยเป็น ng/g dry weight

Location	Tributyltin (TBT)	Dibutyltin (DBT)	Monobutyltin (MBT)	Σ BTs (TBT + DBT + MBT)
Chonburi	0.68±0.14	0.36±0.10	N.D.	1.04
Rayong	N.D.	5.98±3.36	N.D.	5.98
Trat	<LOQ	0.95±0.83	N.D.	0.95
Average	0.23	2.43	N.D.	2.66

N.D: below detection limit, LOQ: Limit of quantification

ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบบิวทิลทินที่ตรวจพบการสะสมในหอยแมลงภู่น้ำจืด *Perna viridis* น้ำหนักสด หน่วยเป็น ng/g wet weight

Location	Tributyltin (TBT)	Dibutyltin (DBT)	Monobutyltin (MBT)	Σ BTs (TBT + DBT + MBT)
Chonburi	0.13±0.03	0.07±0.02	0.03±0.02	0.23
Rayong	N.D.	1.10±0.62	N.D.	1.10
Trat	<LOQ	0.15±0.13	N.D.	0.15
Average	0.05	0.44	N.D.	0.49

N.D: below detection limit, LOQ: Limit of quantification

บทสรุป

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบบิวทิลทินโดยเทคนิคการสกัดแบบ solid-liquid extraction และใช้สาร Sodium tetraethylborate ($\text{NaB}(\text{Et})_4$) ในการสังเคราะห์อนุพันธ์ของสารประกอบทิน และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS) ในครั้งนี้สามารถวิเคราะห์สารประกอบบิวทิลทินในหอยแมลงภู่น้ำจืด *Perna viridis* บริเวณชายฝั่งภาคจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด พบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.04 5.98 และ 0.95 ng/g dry weight ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นหน่วยในน้ำหนักสดจะเทียบเท่ากับ 0.23 0.10 และ 0.15 ng/g wet weight ตามลำดับ แม้ว่ายังคงพบการปนเปื้อนสารประกอบบิวทิลทินในสิ่งมีชีวิต แต่มีแนวโน้มการปนเปื้อนลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับการรายงานการปนเปื้อนสารประกอบบิวทิลทินในอดีต และเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานความปลอดภัยของสารปนเปื้อนตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่องมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนพบว่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ระบุไว้ นอกจากนี้ผลจากการศึกษาในครั้งนี้และในรายงานจากประเทศอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่ามาตรการที่ IMO ประกาศใช้เป็นผลทำให้การปนเปื้อนลดลงในหลายพื้นที่ทั่วโลก รวมถึงในพื้นที่ชายฝั่งทะเลจังหวัดชลบุรี ระยอง และตราด อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถพบการสะสมของสารกลุ่มนี้สูงในบางประเทศโดยเฉพาะ

ประเทศที่ไม่มีกฎหมายควบคุมการใช้สารกลุ่มนี้โดยตรง นอกจากนี้การศึกษาค้างนี้ทำการวิเคราะห์ในตัวอย่างสัตว์เท่านั้น และทำการเก็บตัวอย่างจากพื้นที่สามจังหวัด ดังนั้นจึงควรมีการตรวจวัดเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องในอนาคต โดยควรทำการตรวจวัดในมวลน้ำและในดินตะกอนเปรียบเทียบกับ ซึ่งจะทำให้เห็นแนวโน้มการปนเปื้อนได้ชัดเจนขึ้น เนื่องจากสารกลุ่มนี้เป็นสารที่มีการสะสมยาวนาน Persistent Organic Pollutants (POPs) จึงอาจมีการสะสมในสิ่งแวดล้อมได้ยาวนาน

References

- [1] Goldberg, E. D. (1986). TBT: An Environmental Dilemma. **Environment Science and Policy for Sustainable Development**. Vol. 28, Issue 8, pp. 17-44. DOI: 10.1080/00139157.1986.9928814
- [2] Bryan, G. W., Gibbs, P. E., Hummerstone, L. G., and Burt, G. R. (1986). The Decline of the Gastropod *Nucella lapillus* Around South West England: Evidence for the Effect of Tributyltin From Antifouling Paints. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**. Vol. 66, Issue 3, pp. 611-640. DOI: 10.1017/S0025315400042247
- [3] Alzieu, C. L., Sanjuan, J., Deltreil, J. P., and Borel, M. (1986). Tin Contamination in Arcachon Bay: Effects on Oyster Shell Anomalies. **Marine Pollution Bulletin**. Vol. 17, Issue 11, pp. 494-498. DOI: 10.1016/0025-326X(86)90636-3
- [4] Antizar-Ladislao, B. (2008). Environmental Levels, Toxicity and Human Exposure to Tributyltin (TBT)-Contaminated Marine Environment. **Environment International**. Vol. 34, Issue 2, pp. 292-308. DOI: 10.1016/j.envint.2007.09.005
- [5] Sidharthan, M., Young, K. S., Woul, L. H., Soon, P. K., and Shin, H. W. (2002). TBT Toxicity on the Marine Microalga *Nannochloropsis oculata*. **Marine Pollution Bulletin**. Vol. 45, Issue 1-12, pp. 177-180. DOI: 10.1016/S0025-326X(01)00283-1
- [6] Jensen, H. F., Holmer, M., and Dahllöf, I. (2004). Effects of Tributyltin (TBT) on the Seagrass *Ruppia maritima*. **Marine Pollution Bulletin**. Vol. 49, Issue 7-8, pp. 564-573. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2004.03.010
- [7] Oehlmann, J., Stroben, E., Schulte-Oehlmann, U., and Bauer, B. (1998). Imposex Development in Response to TBT Pollution in *Hinia incrassata* (Ström, 1768) (Prosobranchia, Stenoglossa). **Aquatic Toxicology**. Vol. 43, No. 4, pp. 239-260. DOI: 10.1016/S0166-445X(98)00058-7
- [8] Horiguchi, T., Kojima, M., Hamada, F., Kajikawa, A., Shiraishi, H., Morita, M., and Shimizu, M. (2006). Impact of Tributyltin and Triphenyltin on Ivory Shell (*Babylonia japonica*) Populations. **Environmental Health Perspectives**. Vol. 114, Supplement 1, pp. 13-19. DOI: 10.1289/ehp.8047
- [9] Ohji, M., Arai, and T., Miyazaki, N. (2005). Acute Toxicity of Tributyltin to the Caprellidea (Crustacea: Amphipoda). **Marine Environmental Research**. Vol. 59, Issue 3, pp. 197-201. DOI: 10.1016/j.marenvres.2004.02.002
- [10] Zhang, J., Zuo, Z., Chen, Y., Zhao, Y., Hu, S., and Wang, C. (2007). Effect of Tributyltin on the Development of Ovary in Female Cuvier (*Sebastiscus marmoratus*). **Aquatic Toxicology**. Vol. 83, Issue 3, pp. 174-179. DOI: 10.1016/j.aquatox.2007.03.018

- [11] International Maritime Organization (IMO). (2001). **International Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships**. Access (August, 2018). Available ([http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-the-Control-of-Harmful-Anti-fouling-Systems-on-Ships-\(AFS\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-the-Control-of-Harmful-Anti-fouling-Systems-on-Ships-(AFS).aspx))
- [12] Cole, R. F., Mills, G. A., Parker, R., Bolam, T., Birchenough, A., Kröger, S., and Fones, G. R. (2015). Trends in the Analysis and Monitoring of Organotins in the Aquatic Environment. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**. Vol. 8, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.teac.2015.05.001
- [13] Choi, M., Moon, H. B., Yu, J., Eom, J. Y., and Choi, H. G. (2009). Butyltin Contamination in Industrialized Bays Associated with Intensive Marine Activities in Korea. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**. Vol. 57, No. 1, pp. 77-85. DOI: 10.1007/s00244-008-9235-1
- [14] Fent, K. (1996). Ecotoxicology of Organotin Compounds. **Critical Reviews in Toxicology**. Vol. 26, Issue 1, pp. 3-117. DOI: 10.3109/10408449609089891
- [15] Champ, M. A. (2000). A Review of Organotin Regulatory Strategies, Pending Actions, Related Costs and Benefits. **Science of the Total Environment**. Vol. 258, Issue 1-2, pp. 21-71. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00506-4
- [16] Mattos, Y., Stotz, W. B., Romero, M. S., Bravo, M., Fillmann, G., and Castro, Í. B. (2017). Butyltin Contamination in Northern Chilean Coast: Is there a Potential Risk for Consumers. **Science of the Total Environment**. Vol. 595, pp. 209-217. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.264
- [17] Kim, T., Jeon, S., Hong, S., Song, S. J., Kwon, B. O., Ryu, J., and Khim, J. S. (2017). Spatiotemporal Distributions of Butyltin Compounds in Various Intertidal Organisms Along the Samcheok and Tongyeong Coasts of Korea. **Chemosphere**. Vol. 172, pp. 268-277. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.152
- [18] Chen, C. W., Chen, C. F., Ju, Y. R., and Dong, C. Di. (2016). Assessment of the Bioaccumulation and Biodegradation of Butyltin Compounds by *Thalamita crenata* in Kaohsiung Harbor, Taiwan. **International Biodeterioration & Biodegradation**. Vol. 113, pp. 97-104. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.02.018
- [19] Castro, Í. B., Iannacone, J., Santos, S., and Fillmann, G. (2018). TBT is Still a Matter of Concern in Peru. **Chemosphere**. Vol. 205, pp. 253-259. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.097
- [20] Kan-Atireklap, S., Tanabe, S., Sanguansin, J., Tabucanon, M. S., and Hungspreugs, M. (1997). Contamination by Butyltin Compounds and Organochlorine Residues in Green Mussel (*Perna viridis*, L.) from Thailand Coastal Waters. **Environmental Pollution**. Vol. 97, Issue 1-2, pp. 79-89. DOI: 10.1016/S0269-7491(97)00070-5
- [21] Harino, H., Ohji, M., Wattayakorn, G., Arai, T., Rungsupha, S., and Miyazaki, N. (2006). Occurrence of Antifouling Biocides in Sediment and Green Mussels from Thailand. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**. Vol. 51, Issue 3, pp. 400-407. DOI: 10.1007/s00244-005-0246-x

- [22] Yáñez, J., Rizzo, P., Mansilla, H. D., Bravo, M., Quiroz, W., and Santander, P. (2016). Speciation Analysis of Organotin Compounds (OTCs) by a Simultaneous Hydride Generation-Liquid/Liquid Extraction and GC-MS Determination. **Microchemical Journal**. Vol. 126, pp. 460-465. DOI: 10.1016/j.microc.2016.01.002 MICROC 2387
- [23] Ministry of Public Health. (1986). **Prescribing Standards of Contaminated Substances**. No. 98
- [24] Shim, W. J., Oh, J. R., Kahng, S. H., Shim, J. H., and Lee, S. H. (1998). Accumulation of Tributyl and Triphenyltin Compounds in Pacific Oyster *Crassostrea gigas* from the Chinhae Bay System, Korea. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**. Vol. 35, Issue 1, pp. 41-47. DOI: 10.1007/s002449900346
- [25] Kim, N. S., Hong, S. H., Yim, U. H., Shin, K. H., and Shim, W. J. (2014). Temporal Changes in TBT Pollution in Water, Sediment, and Oyster from Jinhae Bay After the Total Ban in South Korea. **Marine Pollution Bulletin**. Vol. 86, Issue 1-2, pp. 547-554. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.06.035
- [26] Batista, R. M., Castro, I. B., and Fillmann, G. (2016). Imposed and Butyltin Contamination Still Evident in Chile After TBT Global Ban. **Science of the Total Environment**. Vol. 566-567, pp. 446-453. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.039

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครปเค้กโดยใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี Development of Crepe Cake using Riceberry Rice Flour Instead of Wheat Flour

ไชยสิทธิ์ พันธุ์พูนจินดา^{1*}

Chaiyasit Punfujinda^{1*}

Received: February 26, 2019; Revised: March 27, 2019; Accepted: April 22, 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครปเค้กโดยใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี พบว่าสูตรพื้นฐานที่เหมาะสมมีองค์ประกอบ แป้งเค้ก น้ำตาลทราย ไข่ไก่ นมสด เนยละลาย วิปปิงครีม ในปริมาณ 112 75 240 300 75 และ 400 กรัม ตามลำดับ สูตรพื้นฐานที่เสริมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่แทนแป้งสาลีร้อยละ 80 มีคะแนนทางคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ยอมรับไม่แตกต่างกันทางสถิติกับผลิตภัณฑ์ที่ได้คะแนนคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูงที่สุด ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความแข็ง (Hardness) ลดลง ($p \leq 0.05$) เมื่อมีการใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่า a_w คุณภาพทางเคมีของเครปเค้ก แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 80 ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ความชื้น โปรตีน เถ้าและกากใย ปริมาณร้อยละ 39.33 11.10 41.47 7.18 0.92 และ 3.04 ตามลำดับ ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ 45.85 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม คะแนนความชอบโดยรวมของเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่อยู่ในระดับความชอบปานกลาง ถ้ามีเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่จำหน่ายผู้บริโภคจะซื้อร้อยละ 100

คำสำคัญ : แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่; ข้าวไรซ์เบอร์รี่; เครปเค้ก; เค้ก

¹ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹ Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

* Corresponding Author E - mail Address: chaiyasit_p@rmutt.ac.th

Abstract

The purpose of this research was to study the suitable formula of crepe cake by adding riceberry rice flour. The result indicated the elementary formula includes wheat flour, sugar, egg, milk, melt unsalted butter and whipping cream 112, 75, 240, 300, 75 and 400 gram respectively. The highest consumer acceptance of riceberry rice flour crepe cake not statistically different with product was adding 80 % riceberry rice flour. Brightness (L^*) and hardness decreased ($p \leq 0.05$) with riceberry flour. But did not affect the a_w . The chemical quality of crepe cake with 80 % riceberry rice flour consistd of carbohydrate, fat, moisture, protein, ashes and fiber were 39.33, 11.10, 41.47, 7.18, 0.92 and 3.04 respectively. Antioxidant was 45.85 milligram per 100 gram of sample. The overall liking of crepe cake with 80 % riceberry rice flour was medium like. If the obtained product is on sale, 100 % of consumer would buy.

Keywords: Riceberry Rice Flour; Riceberry; Crepe Cake; Cake

บทนำ

เครปเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งนิยมบริโภคเป็นของหวาน อาหารว่างหรืออาหารทานเล่น เครปมีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปซึ่งหารับประทานง่าย ลักษณะของเครปจะแตกต่างกันไปตามประเภท ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตมีทั้ง เครปกรอบ เครปเย็น การนำมาซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น เรียกว่า เครปเค้ก และทอดด้วยแป้งแผ่นเดียวเรียก เครปทอ มีวิธีการทำที่ง่ายโดยไม่ต้องใช้เตาอบสามารถรับประทานได้ทุกเพศทุกวัย ในส่วนประกอบของเนื้อแป้งเครป จะใช้แป้งสาลีเป็นส่วนประกอบ [1] และส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำตาล ไข่ไก่ นมสด เป็นต้น

ชาวไทย มีคุณสมบัติชนมากมายโดยเฉพาะชาวไรซ์เบอร์รี่ มีธาตุเหล็กและสารต้านอนุมูลอิสระสูง [2] เพื่อป้องกันการเกิดโรคมะเร็งอาหารที่อยู่ในจำพวกข้าวสูงจึงช่วยลดการดูดซึมน้ำตาล ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดขึ้นช้ากว่าการบริโภคข้าวกล้องและข้าวขาวขัดทั่วไป จึงเหมาะกับผู้ป่วยเบาหวานมีสรรพคุณช่วยลดระดับไขมันและคอเลสเตอรอล ช่วยทำให้ระบบขับถ่ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากคุณสมบัติของข้าวไทยผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่า เครปเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่เข้าถึงกลุ่มผู้บริโภคที่ง่ายที่สุด และราคาถูก อีกทั้งชาวไทยยังมีสรรพคุณทางยา ผู้วิจัยจึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่เครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ให้มีความหลากหลายสำหรับกลุ่มคนรักสุขภาพ และยังเป็นการสนับสนุนการใช้ข้าวไทยให้เป็นที่รู้จักเพิ่มมากขึ้น ส่งเสริมการนำวัตถุดิบในไทยมาใช้อุตสาหกรรมเบเกอรี่

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาคุณภาพทางกายภาพ เคมี และทดสอบผู้บริโภค

วัสดุและอุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

ส่วนประกอบวัตถุดิบของเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ประกอบด้วย แป้งเค้กยี่ห้อ UFM แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ เนยเค็มยี่ห้อ Home Fresh Gold เกลือ น้ำตาลทรายละเอียดยี่ห้อลิน ไข่ไก่เบอร์ 1 ยี่ห้อ CP วิปปิงครีมยี่ห้อโฟร์โมสต์ และนมสดรสจืดยี่ห้อเมจิ

2. อุปกรณ์ในการทำเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

ประกอบด้วย เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ถ้วยตวงของเหลว ถ้วยตวงของแห้ง ช้อนตวง ตะกร้อมือ อ่างผสม กระทะเทฟลอน ที่ร่อนแป้ง กระดาษไข เตาไฟฟ้า พายไม้ และพายพลาสติก

3. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณภาพ

3.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี วิเคราะห์ความชื้น เถ้า ไขมัน (ปิโตรเลียมอีเทอร์) โปรตีน (Sulfuric acid (H_2SO_4), Boric acid, Selenium mixture, Sodium hydroxide (NaOH), Mixed indicator (Methyl red and Bromocresol green)) และไฟเบอร์ (Sulfuric acid (H_2SO_4), Sodium hydroxide (NaOH), Acetone, Antifoam) ของตัวอย่างตามวิธีของ AOAC [3] ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดคำนวณจาก 100 % ลบด้วยปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน และไฟเบอร์ รวมถึงการวิเคราะห์ปริมาณ Antioxidant (absolute ethanol) ด้วยวิธี DDPH-method โดยใช้อุปกรณ์ดังนี้

- 3.1.1 เครื่องย่อยโปรตีน (Digestion unit) ยี่ห้อ Buchi รุ่น K-435
- 3.1.2 เครื่องกลั่นโปรตีน (Distillation unit) ยี่ห้อ Buchi รุ่น K 314
- 3.1.3 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Binder PD 53/E2
- 3.1.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Ney 2-525 Series II
- 3.1.5 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.6 จานคอนเวย์ (Conway unit)
- 3.1.7 อุปกรณ์วิเคราะห์ไขมัน ตามวิธี AOAC [3]
- 3.1.8 เครื่องแก้วต่าง ๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์
- 3.1.9 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น AC2115
- 3.1.10 เครื่อง UV-VIS spectrophotometer ตามวิธี DDPH-method

3.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

ทำการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น colour flex และวัดคุณภาพทางเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัด Texture analyzer รุ่น TA.XT2

3.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส แบบ 9-Point Hedonic Scale และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทางประสาทสัมผัส เช่น ถ้วยพลาสติก หรือถุงพลาสติก ไม้จิ้มอาหาร กระดาษเช็ดปาก ปากกา และแก้วน้ำ กระดาษบอกรหัสตัวอย่าง

4. อุปกรณ์ในการประมวลผลข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SPSS for Windows สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่าความแตกต่างเพื่อทดสอบหาค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

วิธีการวิจัย

1. ขั้นตอนการคัดเลือกสูตรพื้นฐานของเครปเค้กที่เหมาะสม

การคัดเลือกสูตรพื้นฐานที่เหมาะสมโดยการนำสูตรเครปเค้กจำนวน 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1 มาทำการผลิตเครปเค้กตามกระบวนการผลิตในรูปที่ 1 หลังจากนั้นนำเครปเค้กที่ได้ทั้ง 3 สูตร มาทำการทดสอบความชอบของผู้บริโภค สถานที่ทดสอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale จำนวน 30 คน วิธีการทดสอบแบบ Central Location Test ทดสอบในคุณลักษณะทางด้าน ลักษณะปรากฏโดยรวม สีของผลิตภัณฑ์ กลิ่นโดยรวม กลิ่นรสโดยรวม ความนุ่ม และความชอบโดยรวม นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS for Windows ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test และคัดเลือกสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบสูงสุดเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาสูตรเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ต่อไป

ตารางที่ 1 สูตรมาตรฐานทั้ง 3 สูตรของเครปเค้ก

ส่วนประกอบ	สูตรที่ 1 (ร้อยละ)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ)	สูตรที่ 3 (ร้อยละ)
แป้งเค้ก	10	-	13
แป้งอเนกประสงค์	-	12	-
น้ำตาล	6	3	2
ไข่ไก่	20	23	17
นมสด	25	14	33
น้ำเปล่า	-	14	-
เนยละลาย	6	5	4
เกลือ	-	-	0
กลิ่นวนิลา	-	-	0
ส่วนผสมวิปปิ้งครีม			
วิปปิ้งครีม	33	26	29
น้ำตาลทรายในวิปปิ้งครีม	-	3	2

ที่มา : (สูตรที่ 1) [4], (สูตรที่ 2) [5], (สูตรที่ 3) [6]

สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
1. ตีไข่และน้ำตาลจนเข้ากันดี ใส่แป้งเค้ก ตีต่อไปจนเข้ากัน ค่อย ๆ ใส่ผงอุ่นลงไป ตระลอมจนเข้ากัน ใส่เนยละลายที่อุ่นแล้ว คนจนเข้ากัน กรอง นำเข้าพักในตู้เย็น 1 ชม.	1. ผสมส่วนผสมให้เข้ากันแล้วกรอง แป้งเคปพักในตู้เย็น 1 ชม.	1. ร่อนแป้งเค้ก เกลือ ผสมไข่ไก่ น้ำตาล นมสดเข้าด้วยกัน เติมน้ำมันวานิลลา และเนยละลาย
2. ตั้งกระทะทาน้ำมันจนทั่วใส่แป้งเคปลงบนกระทะ ตะแคงกลิ้งให้แป้งเคปกระจายทั่วกระทะ เมื่อสุกนำไปพักบนตะแกรง ทำซ้ำจนแป้งหมด	2. ตีวิปครีมกับน้ำตาล จนขึ้นฟู พักในตู้เย็น 1 ชม. ทอดแป้งเคปด้วยไฟอ่อนจนสุก แล้วพักแป้งให้เย็น ทำซ้ำจนแป้งหมด	2. เติมน้ำมันใน ช้อน 1 ผสมให้เข้ากัน พักในตู้เย็น 1 ชม. ใส่เนยละลายลงในกระทะบนไฟอ่อนพอร้อนตักแป้งลงไปทอดทำให้แป้งเป็นแผ่นบางทอดให้สุกทำไปเรื่อย ๆ จนแป้งหมด
3. ตีวิปครีมจนขึ้นฟู วางเคปแผ่นแรกลงบนถาดแต่งเค้ก ทาวิปครีมให้ทั่วแผ่นบาง ๆ ปิดทับด้วยเคปอีกแผ่น ทำซ้ำจนครบ	3. ทาวิปครีมบาง ๆ ที่ละชั้นบนแป้งเคป ทำสลับกันจนหมดแช่ตู้เย็น 1 ชม. เพื่อให้วิปครีมเซ็ตตัว	3. ใส่วิปครีมและน้ำตาลตีครีมให้ขึ้นฟู นำแป้งเคปวางบนฐานเค้ก ปาดครีมบาง ๆ และวางแป้งอีกชั้น ต่อด้วยการปาดครีมทำซ้ำไปจนหมด

รูปที่ 1 กรรมวิธีการผลิตเคปเค้กทั้ง 3 สูตร สูตรที่ 1 ดัดแปลงจาก [4] สูตรที่ 2 ดัดแปลงจาก [5] สูตรที่ 3 ดัดแปลงจาก [6]



นำข้าวไรซ์เบอร์รี่แช่น้ำสะอาด 2 ชั่วโมง จนนุ่ม



นำมาไม้แบบเปี๊ยก



รอให้ตกตะกอน



กรองด้วยผ้าขาวบาง



ผึ่งให้แห้ง



อบแห้งด้วยความร้อน

80 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง
แล้วนำมาร้อนผ่านตะแกรง 100 เมช

รูปที่ 2 กระบวนการผลิตแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

2. ขั้นตอนการศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

ในการศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่จะใช้สูตรพื้นฐานที่ผ่านการคัดเลือกแล้วจากข้อ 1 โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา คือปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ทดแทนแป้งสาลี โดยแปรเป็น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 60 80 และ 100 (กระบวนการผลิตแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ตามรูปที่ 2) ตามลำดับ

ชั่ง แป้งเค้ก แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ น้ำตาล นมสด เนยละลาย และเตรียมไข่ไก่



ตอกไข่และน้ำตาลทรายในอ่างผสม ตีไข่และน้ำตาลจนเข้ากันดี



ใส่แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่และแป้งเค้ก ค่อย ๆ ใส่นมอุ่นลงไปตลอดจนหมด



ใส่เนยละลาย กรอง พักในตู้เย็น 1 ชม.



เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการชั่งตวง เปิดเตา Severin Hot Plate ความร้อนที่ระดับ 3 หรือไฟอ่อนในเตาธรรมดา รอนจนกระทะร้อน



ใส่แป้งแต่ละชั้น 25 กรัม กลิ้งแป้งบนกระทะเทพลอนให้กระจายทั่วจนสุก



นำแป้งมาพับรวมกัน ปาดครีมแต่ละชั้นจนเป็นเครปเค้ก 15 ชั้น

รูปที่ 3 กรรมวิธีการผลิตเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

3. การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

ทำการผลิตเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่จากสูตรที่เหมาะสม จากข้อ 2 และผลิตตามกระบวนการผลิตตามรูปที่ 3 แล้วนำเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ได้มาทำการวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังนี้

3.1 การทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่เป็นนิสิตและบุคลากรในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และบุคคลทั่วไป โดยการสุ่มแบบบังเอิญจำนวน 50 คน ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale โดยในการทดสอบจะทดสอบแบบ Central Location Test

3.2 การทดสอบทางกายภาพ โดยทำการวัดค่าสี และเนื้อสัมผัส อีกทั้งคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่า a_w (water activity) คุณค่าทางโภชนาการ วิเคราะห์ความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน และไฟเบอร์ ของตัวอย่างตามวิธีของ AOAC [3] ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดคำนวณจาก 100 % ลบด้วยปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน และไฟเบอร์ และวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ วิธีการทดลอง DDPH-method

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 [7] ด้วยโปรแกรม SPSS for Windows

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครปเค้กโดยใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี โดยทำการคัดเลือกสูตรพื้นฐานที่เหมาะสม การพัฒนาสูตร และการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ผลดังนี้

1. การคัดเลือกสูตรพื้นฐาน

การศึกษาสูตรพื้นฐานโดยนำสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร มาทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน ทดสอบตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง แล้วให้คะแนนความชอบโดยวิธี 9-Point Hedonic Scaling Test (1 = ไม่ชอบมากที่สุด 9 = ชอบมากที่สุด) ในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏโดยรวม สี กลิ่นโดยรวม กลิ่นรสโดยรวม ความนุ่ม และความชอบโดยรวมได้ผลจากการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนความชอบเครปเค้กสูตรพื้นฐาน 3 สูตร

(n = 30)

สูตรที่ทำการทดลอง	คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส					
	ลักษณะปรากฏโดยรวม	สี	กลิ่นโดยรวม	กลิ่นรสโดยรวม	ความนุ่มโดยรวม	ความชอบ
สูตรที่ 1	7.66 ^a ±1.00	6.33 ^a ±0.92	7.70 ^a ±0.74	7.86 ^a ±1.04	7.73 ^a ±0.98	8.20 ^a ±1.21
สูตรที่ 2	7.10 ^b ±1.06	5.87 ^a ±1.00	7.20 ^b ±0.84	7.10 ^b ±1.29	6.80 ^b ±1.06	6.96 ^b ±1.29
สูตรที่ 3	6.56 ^c ±1.04	4.73 ^b ±0.82	6.76 ^c ±0.81	6.46 ^c ±1.30	6.33 ^b ±1.09	6.56 ^b ±1.16

หมายเหตุ : ^a, ^b... หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวดังมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

จากตารางที่ 2 พบว่าคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะสูตรที่ 1 ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด (p ≤ 0.05) ผู้วิจัยจึงได้ทำการคัดเลือกสูตรที่ 1 เพื่อเป็นสูตรพื้นฐานในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เครปเค้กเสริมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ เนื่องจากเครปเค้กสูตรที่ 1 มีการใช้ส่วนผสมของเนยละลายที่มากกว่าส่วนอื่น ๆ ทำให้เครปเค้กมีกลิ่นรสที่ดี อีกทั้งเนื้อสัมผัสของเครปเค้กมีความชุ่มฉ่ำ เพราะไขมันเป็นส่วนป้องกันการจับตัวของโปรตีนกลูเตนในแป้งสาลี ส่งผลต่อความนุ่มฟูของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งไขมันยังเป็นตัวช่วยเก็บอากาศที่เกิดขึ้นจากการตีไขมันกับน้ำตาล [8] รวมถึงมีการใช้น้ำตาลในสูตรสูงกว่าสูตรอื่น ๆ ทำให้ตัวแป้งเครปมีรสชาติที่หวานภายในตัวแป้ง โดยที่วิปครีมในสูตรจะไม่มีเพิ่มเติมน้ำตาลเลย

2. การศึกษาลักษณะทางประสาทสัมผัสและทางกายภาพของเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

ทำการผลิตเครปเค้กตามสูตรทั้ง 3 สูตร แล้วนำเครปเค้กที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด มาทำการวิเคราะห์คุณภาพ ด้านประสาทสัมผัส และคุณภาพด้านกายภาพ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 คะแนนการศึกษาคะแนนความชอบในคุณลักษณะต่าง ๆ ของเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทั้ง 3 สูตร

(n = 50)

ปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ทดแทนแป้งสาลี (ร้อยละ)	คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส					
	ลักษณะปรากฏโดยรวม ^a	สี	กลิ่นโดยรวม	กลิ่นรสโดยรวม	ความนุ่ม	ความชอบโดยรวม
60	7.70±0.92	6.04 ^b ±0.72	7.62 ^a ±1.20	7.60 ^a ±1.02	7.56 ^a ±1.10	7.66 ^a ±0.99
80	7.68±1.06	6.44 ^a ±0.76	7.50 ^{ab} ±1.22	7.40 ^a ±1.21	7.32 ^a ±1.37	7.46 ^a ±1.06
100	7.46±1.22	4.44 ^c ±1.14	7.02 ^b ±1.39	6.60 ^b ±1.61	6.54 ^b ±1.79	6.56 ^b ±1.66

หมายเหตุ : ^{a, b, ...} หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

จากตารางที่ 3 พบว่าเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ทุกคุณลักษณะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05) และเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 60 มีค่าคะแนนความชอบสูงที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p > 0.05) กับเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 80 ยกเว้นด้านลักษณะปรากฏโดยรวมที่ทั้ง 3 สูตรไม่มีความแตกต่างกัน (p > 0.05) ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์เครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีลักษณะปรากฏที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ผู้ทดสอบไม่สามารถให้คะแนนความชอบที่แตกต่างกันได้ ส่งผลต่อค่าสีที่มีความแตกต่างกันคือ ยิ่งมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ทำให้ปริมาณสีของแอนโทไซยานินมีมากขึ้นกับตัวผลิตภัณฑ์ ทำให้ค่าคะแนนความชอบลดลง อีกทั้งเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความนุ่มที่ลดลง เนื่องจากในแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ไม่มีโปรตีนที่พบในแป้งข้าวสาลี คือ กลูเตน ซึ่งเป็นตัวช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นร่างแหและกักเก็บก๊าซไว้ได้ ทำให้เนื้อขนมมีสัมผัสที่นุ่มลดลง [9] ส่งผลต่อความชอบโดยรวมลดลงเป็นลำดับ

จากตารางที่ 4 พบว่าค่าความสว่าง (L*) จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ทั้งนี้เพราะตัวแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่จะมีสารแอนโทไซยานินซึ่งมีความเข้มข้นสูง ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์ในต้นข้าว รงควัตถุกลุ่มนี้จะให้สีบนต้นข้าวแตกต่างกันไป ตั้งแต่สีชมพูจนถึงสีม่วงดำ และมีการกระจายของรงควัตถุไปตามส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว จึงทำให้ค่าความสว่างลดลงตามลำดับ ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้น และค่าความสีเหลือง (b*) ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยด้านลักษณะค่าสีของข้าวโพดข้าวเหนียวสีม่วงที่นำเอาค่าสีเป็นตัวคัดเลือกพันธุ์ข้าวโพดทางอ้อม เพื่อเพิ่มปริมาณแอนโทไซยานินได้โดยคัดเลือกพันธุ์ที่มีค่า L* ต่ำ ค่า a* สูง และค่า b* ต่ำ จะทำให้มีโอกาสได้พันธุ์ข้าวโพดที่มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงด้วยเช่นกัน [10] อีกทั้งงานวิจัยเรื่องผลของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพ

และทางประสาทสัมผัสของบรารวนี้มีลักษณะค่าสี [11] ซึ่งตรงกับเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่มีลักษณะค่าสีเป็นไปในทางเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

ตารางที่ 4 คะแนนการทดสอบสีและกิจกรรมของน้ำเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ทดแทนแป้งสาลี

(สี n = 3), (a_w n = 3)

ปริมาณแป้ง ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (ร้อยละ)	คุณภาพทางกายภาพ			คุณภาพทางเคมี
	L^*	a^*	b^*	a_w^{ns}
0	59.10 ^a ±4.16	4.86 ^b ±0.50	26.63 ^a ±1.37	1.50±0.02
60	31.93 ^b ±1.75	6.46 ^a ±0.40	7.26 ^b ±0.40	1.50±0.02
80	27.86 ^{bc} ±1.90	6.50 ^a ±1.24	5.30 ^c ±0.45	1.53±0.03
100	25.40 ^c ±0.17	6.73 ^a ±0.37	4.90 ^c ±0.69	1.51±0.00

หมายเหตุ : ^a, ^b, ... หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวดิ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันเนื่องจากระยะเวลาและของเหลวที่ใช้ในกระบวนการผลิตไม่มีความแตกต่างกัน คือการใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity) สอดคล้องกับงานวิจัย การพัฒนาสูตรขนมปังแซนวิชโดยใช้รำข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี [12] ที่มีการแทนรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 20 นำมาทดสอบกับสูตรควบคุม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันของค่า a_w ในด้านการเสื่อมเสียและการเก็บรักษาพบว่า ปริมาณน้ำอิสระในตัวผลิตภัณฑ์มีค่าที่สูง ทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียโดยทั่วไปที่ต้องมีปริมาณน้ำอิสระในตัวผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่า 0.9 และการเจริญเติบโตของราที่ต่ำกว่า 0.7 ส่งผลต่อการเสื่อมเสีย [13] ของเครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ จึงต้องทำการเก็บรักษาในอุณหภูมิที่ต่ำหลังจากทำการผลิต

จากตารางที่ 5 พบว่าเครปเค้กแป้งสาลีมีค่าความแข็งที่มากที่สุด และลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ส่งผลต่อความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับผลิตภัณฑ์เครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ลดลง คือ Hardness Springiness Gumminess Chewiness Stiffness แสดงให้เห็นว่าค่าทดสอบทางประสาทสัมผัสมีความสอดคล้องกับค่ากายภาพทางเนื้อสัมผัส คือ การเพิ่มแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่มากขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งที่ลดลง เพราะการยึดเกาะของตัวผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง (Gumminess) ส่งผลต่อแรงการเคี้ยว (Chewiness) ที่ลดลง แป้งเครปเค้กข้าวไรซ์เบอร์รี่มีการฉีกขาดที่ง่ายกว่าการใช้แป้งสาลี ทำให้การคืนตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง (Springiness) สอดคล้องกับงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมจิ้นอบแห้งผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ [14] พบว่าการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ส่งผลต่อค่าความแข็ง Hardness ที่ลดลงตามลำดับเนื่องจากในแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีใยอาหารที่สูง ทำให้การยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ลดลงส่งผลต่อค่าเนื้อสัมผัส

ตารางที่ 5 เนื้อสัมผัสของเคบเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

ปริมาณแป้งข้าว ไรซ์เบอร์รี่ (ร้อยละ)	คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส						(เนื้อสัมผัส n = 3)	
	Hardness	Cohesiveness ^{ns}	Springiness	Gumminess	Chewiness	Fractureforce ^{ns}		Adhesiveforce ^{ns}
0	0.29 ^a ±0.01	0.14±0.02	4.05 ^a ±0.18	0.08 ^a ±0.01	0.36 ^a ±0.06	0.00±0.00	0.00 ^b ±0.00	0.13 ^a ±0.02
60	0.24 ^b ±0.01	0.13±0.01	3.59 ^a ±0.15	0.04 ^b ±0.01	0.19 ^b ±0.04	0.00±0.00	0.00 ^a ±0.00	0.09 ^b ±0.01
80	0.19 ^c ±0.00	0.13±0.02	2.83 ^b ±0.03	0.04 ^b ±0.00	0.19 ^b ±0.06	0.00±0.00	0.00 ^b ±0.00	0.07 ^{bc} ±0.00
100	0.14 ^d ±0.01	0.13±0.03	2.89 ^b ±0.48	0.03 ^b ±0.01	0.09 ^b ±0.04	0.00±0.00	0.00 ^b ±0.00	0.05 ^c ±0.01

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีอักษรกำกับกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. การศึกษาคุณภาพทางเคมีและทางประสาทสัมผัสของเคบเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่
- การศึกษาคุณภาพเคบเค้กเสริมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ทำการศึกษาคูณภาพทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 4
- 3.1 คุณภาพทางเคมี
- จากการศึกษาคูณภาพทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน กราไฮคาร์โบไฮเดรต และสารต้านอนุมูลอิสระ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คะแนนการทดสอบทางเคมีแครปเค้กข้าวสาลีต่อแครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 80

การทดสอบทางเคมี	แครปเค้กข้าวสาลี	แครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 80
ความชื้น	48.30	41.47
โปรตีน	7.12	7.18
เถ้า	0.75	0.92
ไขมัน	8.96	11.10
กากใย	0.94	3.04
คาร์โบไฮเดรต	34.87	39.33
สารต้านอนุมูลอิสระ	<5.00 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม (ตัวอย่าง)	45.85 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม (ตัวอย่าง)

หมายเหตุ : * หมายถึง ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

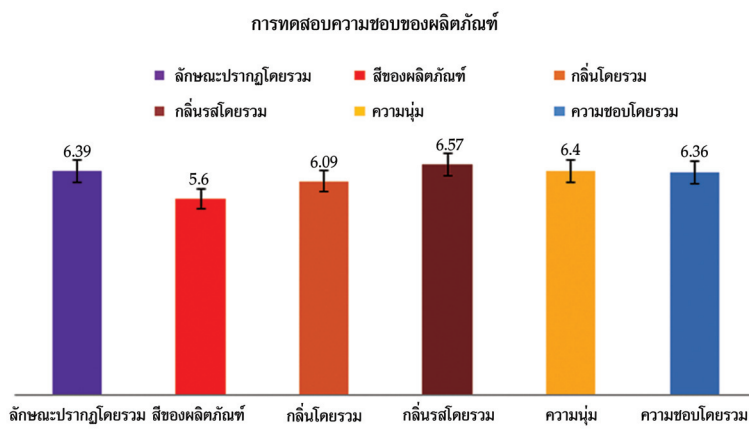
^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 6 พบว่าคุณภาพทางเคมีทุกด้านยกเว้นความชื้น แครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีค่าที่น้อยกว่า แต่ในทางกลับกันสารอาหารทางด้านอื่น ๆ พบว่าแครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีคุณค่าทางโภชนาการที่สูง [15] และใยอาหาร [16] โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระที่มีมากในตัวผลิตภัณฑ์มากกว่าแครปเค้กแป้งสาลีถึง 40 เท่า แต่เมื่อนำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มาทดสอบก่อนกรรมวิธีการผลิตพบว่า มีสารต้านอนุมูลอิสระถึง 115.08 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามวิธี DDPH-method แสดงให้เห็นว่าความร้อนในกรรมวิธีการผลิตแครปเค้กมีผลต่อการสูญเสียของสารต้านอนุมูลอิสระ สอดคล้องกับงานวิจัย การพัฒนาขนมหม้อแกงเสริมข้าวไรซ์เบอร์รี่ออกสู่ตลาด [17] พบว่า เมื่อมีการเสริมข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 6 ส่งผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระที่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับขนมหม้อแกงสูตรพื้นฐาน ($p \leq 0.05$) ไม่ใช่เพียงแค่แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ส่งผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระ การนำข้าวไทยที่มีสีในกลุ่มสารสีม่วง คือแป้งข้าวเหนียวดำมาเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์บราวนี่ [18] เมื่อนำมาทำการทดสอบทางเคมีก็พบว่าการเพิ่มขึ้นของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยเช่นกัน

3.2 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากการศึกษาข้อมูลทางประชากรศาสตร์ของผู้บริโภคจำนวน 100 คน พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงคิดเป็นร้อยละ 55 อายุส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 21 - 25 ปี คิดเป็นร้อยละ 90 อาชีพส่วนใหญ่เป็นนักศึกษาคิดเป็นร้อยละ 93 การศึกษาส่วนใหญ่อยู่ในระดับปริญญาตรีคิดเป็นร้อยละ 96 รายได้ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 7,001 - 9,000 บาท/เดือน คิดเป็นร้อยละ 43 ผู้บริโภคไม่เคยรับประทานแครปเค้กข้าวไรซ์เบอร์รี่มากถึงร้อยละ 90 ผู้บริโภคมีความคิดเห็นว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภค ร้อยละ 34.80 รองลงมามีความแปลกใหม่มากถึงร้อยละ 34.10 และมีความคิดเห็นว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ ร้อยละ 31.10 ผู้บริโภคยอมรับลักษณะปรากฏของแครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 92 โดยซื้อในราคา 35 - 40 บาท ร้อยละ 91 รูปแบบการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคให้ความสนใจมากที่สุด คือ ใส่กล่องพลาสติก มีจำนวนร้อยละ 100

การทดสอบความชอบของผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคจำนวน 100 คน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4
(n = 100)



รูปที่ 4 คะแนนค่าเฉลี่ยความชอบของผลิตภัณฑ์แครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

พบว่าคะแนนความชอบเฉลี่ยอยู่ในระดับชอบปานกลางในทุกคุณลักษณะ ยกเว้น คุณลักษณะสี และกลิ่นโดยรวมที่อยู่ในระดับความชอบเล็กน้อย และถ้ามีผลิตภัณฑ์แครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ออกจำหน่ายผู้บริโภคจะซื้อคิดเป็นร้อยละ 100 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะผลิตแครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ออกสู่ตลาด

สรุปผลการทดลอง

การผลิตแครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่สามารถใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีได้ร้อยละ 80 และมีสารต้านอนุมูลอิสระ คือ 45.85 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม โดยผู้บริโภคให้คะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระที่มากกว่าผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ในท้องตลาด และส่งเสริมการใช้ข้าวไทยในอุตสาหกรรมเบเกอรี่

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แครปเค้กแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ว่าสามารถทำการเก็บรักษาได้นานกี่วัน ในสภาวะปกติ โดยไม่มีการเสื่อมเสีย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2561

References

- [1] Jutamat, O. (2016). **Crepe Flour with Jerusalem Artichoke Supplementation**. Research and Development Institute, Chandrakasem Rajabhat University
- [2] Yodmanee, S., Karrila, T. T., and Pakdeechanuan, P. (2011). Physical, Chemical and Antioxidant Properties of Pigmented Rice Grown in Southern Thailand. **International Food Research Journal**. Vol. 18, No. 3, pp. 901-906
- [3] AOAC. (2005). **Official Method of Analysis**. 18th Edition, Association of Officiating Analytical Chemists, Washington DC, Method 935.14 and 992.24.
- [4] Chef Jadee. (2012). **Crepe Cake**. Food travel.tv. Access (2 June 2017). Available (<http://www.foodtravel.tv/recipe.aspx?viewid=1253>)
- [5] Chef arm and friend. (2016). **Crepe Cake Strawberry Sauce**. Access (2 June 2017) Available (https://www.youtube.com/watch?v=REpXcH8_Uf0)
- [6] Chanakarn, L. (2011). **Mille Crepe Cake, (Pantip)**. Access (2 June 2017) Available (<http://topicstock.pantip.com/food/topicstock/2011/11/D11309105/D11309105.html>)
- [7] Kanlaya, V. (2007). **Data analysis SPSS for Windows**. 10th ed. Bangkok: Thamasan Publishers Ltd.
- [8] Jiranart, B. and NonthiPha, R. (2010). Partial Utilization of Eucia as Fat Replacer in Butter Cake. **Journal of Food Technology, Siam University**. Vol. 5, No. 1. pp. 26-35
- [9] Pornrat, S., Kulrapus, B., Sasapin, D., and Renu, T. (2017). **Influences of Rice Berry Flour as a Wheat Flour Substitute in Brownie: Textural and Quality Attributes**. Institute of Nutrition, Mahidol University, Salaya, Nakhonpathom. Research and Development Institute Suan Dusit University. May-Aug.
- [10] Arunthip, H., Sakunkan, S., Surasak, B., and Sudathip, I. (2012). Relationship Between Color Value and Anthocyanin Content in Purple Waxy Corn Germplasm. **Khon Kaen Agriculture Journal**, 40. SUPPL. 4, pp. 59-64
- [11] Nipada, K., Nisa, Y., Sudarat, P., Songpan, S., and Utaiwan, C. (2017). Effect of Riceberry Flour on Physico-Chemical and Sensory Properties of Brownie. **Innovation and Technology Conference**. Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus. 25-26 December
- [12] Sujitta R., Kanokwan, J., and Obcheuy, W. (2018). Development of Sandwich Bread Formulation Substituted Wheat Flour with Riceberry Rice Bran. **Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)**. Vol. 13, No.1, pp. 123-138
- [13] Postharvest Technology Innovation Center. (2003). **Water Activity**. Access (27 March 2019). Available (<http://www.phtnet.org/2003/09/26/>)
- [14] Jarupun, B., Rattanaporn, W., and Anocha, S. (2015). Development of Dried Rice Noodle (Kanom-geen) from Riceberry. **Agricultural Science Journal**. Vol. 46, No. 3, pp. 361-364

- [15] Watchiraporn, P., Naphatsorn, K., Phanuphong, C., and Tawanun, S. (2015). Development of Riceberry Extract for Antioxidant Activity. In **Traditional and Complementary Medicine (KTCM2016)**. Mae Fah Luang University November 23, 2016 - November 25, 2016
- [16] Chuenjit, P. (2015). **Riceberry are Good and Useful**. Department of Science Service, Bangkok
- [17] Sukhontha S. (2016). Development of Germinated Riceberry Thai Egg Custard with Reduced Sugar. **Srinakharinwirot Science Journal**. Vol. 32, No. 2, pp. 195-210
- [18] Chaiyasit, P., Lerluck, S., and Orawan, O. (2017). Development of Brownie by Using Black Glutinous Rice Flour Instead of Wheat Flour. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 10, No. 1, pp. 106-118

ระบบโลจิสติกส์เชิงคิฟิตัลสำหรับการให้บริการด้านอาหารในธุรกิจบริการด้วย ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ กรณีศึกษา ห้องครัวเปิดของร้านอาหารญี่ปุ่น **Digital Logistics for Food Service in Service Business by Fuzzy Logic: A Case Study of Japanese Teppanyaki Kitchen**

ศราวุธ แรมจันทร์^{1*}

Sarawut Ramjan^{1*}

Received: October 22, 2018; Revised: February 15, 2019; Accepted: February 15, 2019

บทคัดย่อ

เมื่อพนักงานร้านอาหารญี่ปุ่นรับรายการอาหารจากลูกค้า รายการอาหารจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ห้องครัวแบบเปิดด้วยแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ ผู้ช่วยพ่อครัวซึ่งรับรายการอาหารผ่านแอปพลิเคชันภายในห้องครัวแบบเปิดจะทำหน้าที่ในการจัดเตรียมวัตถุดิบพร้อมกันหลายชนิด โดยวัตถุดิบจะถูกจัดเตรียมให้สอดคล้องกับความต้องการรสชาติของลูกค้าหลายรายในเวลาเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้ผู้ช่วยพ่อครัวไม่สามารถจัดการวัตถุดิบได้อย่างทันท่วงที ปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อคุณภาพของอาหารและลำดับในการให้บริการลูกค้าของร้านอาหารญี่ปุ่น บทความวิจัยฉบับนี้จึงทำการพัฒนาระบบการจัดการโลจิสติกส์สำหรับห้องครัวแบบเปิดโดยใช้แนวคิดตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเพื่อการสื่อสารในการลำดับวัตถุดิบในการปรุงอาหารระหว่างผู้ช่วยพ่อครัว และพ่อครัว จากการทดลองพบว่ามีผลลัพธ์จากการวิจัยประกอบไปด้วย 1) ความถี่ที่ลดลงของการทำงานที่ผิดพลาดของผู้ช่วยพ่อครัวอยู่ที่ร้อยละ 0.5 2) ความถี่ที่ลดลงของการถูกขัดจังหวะในการปรุงอาหารอันเนื่องจากความเข้าใจที่ไม่ตรงกันระหว่างพ่อครัวและผู้ช่วยพ่อครัวลดลงร้อยละ 3.3 3) ความถี่ที่ลดลงของปริมาณอาหารที่มีคุณภาพไม่ดีอันเนื่องจากการจัดเตรียมปริมาณวัตถุดิบที่ไม่มีความเหมาะสมร้อยละ 3 4) ความถี่ที่ลดลงจากการที่พ่อครัวประสบปัญหาจากการเรียงลำดับวัตถุดิบที่ผิดพลาดโดยผู้ช่วยพ่อครัวร้อยละ 1.1 5) ความถี่ที่ลดลงของการที่ผู้ช่วยพ่อครัวไม่สามารถจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารได้ในระยะเวลาอันเหมาะสมร้อยละ 4.9 และ 6) ความถี่ที่ลดลงของการถูกขัดจังหวะในการปรุงอาหารอันเนื่องจากการจัดเตรียมวัตถุดิบ ซึ่งไม่สอดคล้องกับลำดับในการลำดับวัตถุดิบที่ต้องร้อยละ 2.8 โดยระบบดังกล่าวจะช่วยให้พนักงานสามารถรับรายการอาหารจากลูกค้าซึ่งมีรายการเพิ่มเติมเล็กน้อยเกี่ยวกับรสชาติอาหารในแต่ละจานและทำการส่งต่อข้อมูลดังกล่าวให้กับผู้ช่วยพ่อครัว

¹ วิทยาลัยนวัตกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

¹ College of Innovation, Thammasat University

* Corresponding Author E - mail Address: sarawut@citu.tu.ac.th

ซึ่งทำการจัดเตรียมวัตถุดิบอาหารที่มีความสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าหลายรายในเวลาเดียวกันกระทั่งพ่อครัวสามารถทำการปรุงอาหารด้วยวัตถุดิบที่มีความยืดหยุ่นต่อความต้องการของลูกค้าได้และนำอาหารดังกล่าวให้บริการแก่ลูกค้าภายใต้ความต้องการที่หลากหลายและทันต่อเวลา

คำสำคัญ : ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ; โลจิสติกส์; ธุรกิจบริการ; ดิจิทัล

Abstract

Once the Japanese teppanyaki kitchen's waiter received an order from the customer, the order will be transferred to teppanyaki kitchen through a mobile application. Sous-chef de cuisine performs various kinds of ingredient arranged. Those ingredients will be prepared according to many kinds of customer's needs at the same time. This issue obstructs to the sous chef de cuisine who could not organize ingredients under suitable time. That problem impacts to food and service quality which line up to a customer of Japanese teppanyaki kitchen. This research developed a logistics management system for teppanyaki kitchen by the fuzzy logic concept in order to communicate the ingredient line up between sous-chef de cuisine and chef de cuisine. From experiment, this research founded that after they employed a system, there is a research result including 1) Sous-chef de cuisine reduces a frequency of arrangement error to 0.5 %. 2) The frequency of cooking was being interrupted by miscommunication between chef de cuisine and sous chef de cuisine that is reduced to 3.3 %. 3) Disqualifying food is prepared from the unsuitable quantity that is reduced to 3 % of frequency. 4) Chef de cuisine finds an arrangement error frequency from sous chef de cuisine performing that is reduced to 1.1 %. 4) Sous chef de cuisine could not prepare a material under a suitable time that is reduced to 4.9 of frequency. And, 5) Chef de cuisine was interrupted from material providing which not according with a corrected arrangement that is reduced to 2.8 % of frequency. This system helps a waiter to receive an order from a customer who adds a little bit requirement to each order, and transfer those order to sous chef de cuisine who prepare a material that according to each customers requirement in one time. Chef de cuisine cooks by material which flexible with customer requirement and serve a portion of food to a customer under many kinds of requirement and just in time.

Keywords: Fuzzy Logic; Logistics; Service Business; Digital

บทนำ

หนึ่งในการให้บริการแก่ลูกค้าของธุรกิจบริการคือ บริการด้านอาหาร ไม่ว่าจะเป็นธุรกิจด้านที่พัก อาति โรงแรมหรือธุรกิจการให้บริการด้านการเดินทาง อาติ สายการบิน ส่วนมีการให้บริการแก่ลูกค้าในส่วนของการอาหารทั้งสิ้น ระบบโลจิสติกส์ในการลำเลียงวัตถุดิบสำหรับการผลิตอาหารจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินงานเพื่อการให้บริการแก่ลูกค้าได้สอดคล้องกับความต้องการและทันต่อเวลา ร้านอาหารญี่ปุ่นที่มีลักษณะในการให้บริการลูกค้าด้วยห้องครัวแบบเปิดก็เป็นหนึ่งในธุรกิจบริการ ซึ่งให้มุ่งเน้นการให้บริการแก่ลูกค้าในเรื่องของอาหารเช่นกัน โดยร้านอาหารญี่ปุ่นที่มีครัวแบบเปิดมุ่งเน้นการปรุงอาหารต่อหน้าลูกค้าเพื่อสร้างความประทับใจให้แก่ลูกค้าเกี่ยวกับความสดใหม่และสะท้อนวัฒนธรรมในการปรุงอาหารแบบญี่ปุ่นให้แก่ลูกค้า เมื่อพนักงานให้บริการรับข้อมูลรายการอาหารจากลูกค้า ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำเข้าสู่ห้องครัวแบบเปิดผ่านทางอุปกรณ์เคลื่อนที่ อาทิ Tablet ซึ่งได้รับการติดตั้งแอปพลิเคชันในการรับรายการอาหารไว้แล้ว จากนั้นพ่อครัวและผู้ช่วยพ่อครัวจะทำการปรุงอาหารตามคำสั่งของลูกค้าเพื่อให้บริการอาหารแก่ลูกค้าต่อไป อย่างไรก็ตามพ่อครัวกลับพบปัญหาในการปรุงอาหารจากการที่ผู้ช่วยพ่อครัวไม่สามารถจัดเตรียมวัตถุดิบสำหรับการปรุงอาหารให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าหลายรายในเวลาเดียวกันได้ เช่น ลูกค้าบางรายต้องการอาหารที่ไม่มีผักเป็นส่วนประกอบ หรือลูกค้าบางรายต้องการอาหารรสชาติเผ็ดมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเวลาที่คุณลูกค้าใช้บริการเต็มความสามารถในการให้บริการของร้านอาหาร ปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อคุณภาพในการปรุงอาหารและเวลาในการนำอาหารให้บริการแก่ลูกค้าแต่ละราย ยกตัวอย่างเช่น ลูกค้าสั่งรายการอาหารพิซซ่าญี่ปุ่น ส่วนผสมประกอบด้วย ไข่ไก่ แป้งสาหร่าย น้ำเย็น กระหล่ำปลีสับ เนื้อกุ้ง โดยนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำมาทอดบนกระทะร้อน แล้วโรยหน้าด้วยเนื้อหมูสามชั้นและทำการราดซอสญี่ปุ่นตามด้วยการโรยต้นหอม ปลาคัตซีโอะอบแห้ง สาหร่ายทะเลอบแห้ง และราดซอสด้วยมายองเนส ตามลำดับ [1] ซึ่งส่วนประสมทั้งหมดจำเป็นต้องลำเลียงอย่างเป็นลำดับเพื่อควบคุมประสิทธิภาพของการปรุงอาหาร เมื่อผู้ช่วยพ่อครัวได้รับคำสั่งอาหารจำนวนมากและหลายประเภทในเวลาเดียวกันจะก่อให้เกิดปัญหาในการเรียงลำดับส่วนประสม เช่น ลำเลียงสาหร่ายทะเลอบแห้ง ซึ่งควรอยู่ในขั้นตอนสุดท้ายไปให้กับพ่อครัวในกระบวนการคลุกเครื่องปรุง ส่งผลให้เกิดความขัดแย้งในการสื่อสารระหว่างผู้ช่วยพ่อครัวและพ่อครัว และด้วยลักษณะครัวแบบเปิดส่งผลให้ปรากฏการณ์ทั้งหมดผ่านการรับรู้ของลูกค้าที่มาใช้บริการ ดังนั้นการสื่อสารที่ขาดประสิทธิภาพระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมดได้นำมาสู่ปัญหาด้านสมรรถนะในการทำงานของบุคลากรในองค์กรและยังส่งอิทธิพลต่อความขัดแย้งระหว่างบุคลากรในองค์กรในระหว่างการทำงาน [2]

บทความวิจัยฉบับนี้มุ่งบรรเทาปัญหาดังกล่าวโดยการทบทวนแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic) และโลจิสติกส์เชิงดิจิทัล (Digital Logistics) มาบูรณาการกันเป็นระบบที่ใช้ในการจัดการการลำเลียงวัตถุดิบอาหารภายในห้องครัว โดยเมื่อพนักงานรับรายการอาหารจากลูกค้าพร้อมกับความต้องการเพิ่มเติมของลูกค้าแต่ละราย รายการอาหารดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อการจัดเตรียมวัตถุดิบของผู้ช่วยพ่อครัวที่มีความเหมาะสมกับลูกค้าแต่ละราย ระบบดังกล่าวไม่เพียงแต่แนะนำรายการวัตถุดิบเท่านั้น แต่ยังให้การแนะนำเกี่ยวกับกระบวนการในการจัดเตรียมอาหาร เช่น การละลายวัตถุดิบแช่เย็น ก่อนเข้าสู่กระบวนการปรุงอาหารของพ่อครัว เพื่อลดปัญหาด้านการปรุงอาหารให้ทันต่อระยะเวลาในการให้บริการแก่ลูกค้า แนวคิดเกี่ยวกับตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือและโลจิสติกส์เชิงดิจิทัล

จึงได้ถูกนำมาหลอมรวมกันเป็นกรอบแนวคิดตามทฤษฎีที่ใช้ในการบรรเทาข้อปัญหาในการวิจัยและเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาดังกล่าว บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนาระบบโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลสำหรับการให้บริการด้านอาหารในธุรกิจบริการด้วยตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือโดยทำการทดลองในห้องครัวเปิดของร้านอาหารญี่ปุ่น ผลลัพธ์จากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับธุรกิจบริการซึ่งประสบปัญหาการให้บริการด้านอาหารแก่ลูกค้าจนกระทั่งสามารถเพิ่มสมรรถนะในการทำงานซึ่งส่งผลดีต่อการลดความขัดแย้งด้านการสื่อสารขององค์กรลงในที่สุด

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าแต่ละรายด้วยแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ
2. เพื่อลดระยะเวลาในการปรุงอาหารเพื่อให้บริการแก่ลูกค้าได้ตามเวลาที่คาดหวังด้วยแนวคิดของโลจิสติกส์เชิงดิจิทัล

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาในการวิจัยเริ่มขึ้นจากความผิดพลาดในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารของผู้ช่วยพ่อครัวที่ไม่สอดคล้องต่อความต้องการของลูกค้าแต่ละราย ซึ่งส่งผลกระทบต่อรสชาติอาหารและระยะเวลาในการให้บริการแก่ลูกค้า ดังนั้นแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือและโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลจึงถูกหยิบยกขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังนี้

1. ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ

แนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาการสื่อสารระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักร [3] เช่น คอนข้างเฟ็ดหรือหวานน้อย คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องจักรที่ไม่สามารถเข้าใจข้อความที่มีความคลุมเครือในลักษณะดังกล่าวได้ ดังนั้นตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือจึงตีความความรู้สึกของมนุษย์ให้อยู่ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ (Membership Function) ด้วย Fuzzification Technique โดยมีตัวเลขระหว่าง 0 - 1 เป็นตัวแทนความเข้มข้นของระดับความรู้สึก (Degree of Membership) เพื่อกำหนดขอบเขตของความเข้มข้นของความรู้สึกในแต่ละช่วง เช่น เฟ็ดมีค่าระหว่าง 0.8 - 1 และมากมีค่าระหว่าง 0.8 - 1 เช่นกัน การนิยามช่วงของความเข้มข้นดังกล่าวได้อาศัย Linguistic Variable เป็นตัวบรรจุข้อมูลบนกราฟความสัมพันธ์ จากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปวิเคราะห์ผ่าน Inference Engine ซึ่งทำหน้าที่ในการประมวลผลความต้องการของมนุษย์ที่มีความคลุมเครือให้อยู่ในรูปแบบที่คอมพิวเตอร์สามารถนำไปประมวลผลให้กลายเป็นสารสนเทศที่เหมาะสมต่อการดำเนินงานทางดิจิทัล ในท้ายที่สุดสารสนเทศดังกล่าวจะถูกแปรรูปให้กลับมาสู่รูปแบบที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้ด้วย Defuzzification แนวคิดในการแก้ปัญหาด้วยตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือของบทความวิจัยฉบับนี้มีความสอดคล้องกับบทความวิจัยอื่น ซึ่งกล่าวถึงการเลือกผู้ผลิตภายใต้การตัดสินใจด้วยปัจจัยที่มีความหลากหลาย [4] โดยบทความวิจัยดังกล่าวได้หยิบยกรตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจด้วยตัวชี้วัดหลายตัวพร้อมกันในการประเมินประสิทธิภาพของการลำเลียงวัตถุดิบจากผู้ผลิตตลอดจนห่วงโซ่อุปทาน [5] และยังค้นพบบทความวิจัยอีกฉบับที่มีการดำเนินการคล้ายคลึงกันนี้เกี่ยวกับการหยิบยก

ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือขึ้นมาใช้ในการเลือกศูนย์การกระจายวัตถุดิบในการผลิต [6] ดังนั้นบทความวิจัยฉบับนี้จึงได้รับแนวทางในการบรรเทาข้อปัญหาการวิจัยบนฐานของการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งใช้ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเช่นกัน เพื่อทำการทดสอบว่าตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือสามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์การวิจัยคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าแต่ละรายด้วยแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ บทความวิจัยฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานการวิจัยดังนี้

H_0 : ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือไม่สามารถนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารของผู้ช่วยพ่อครัวได้

H_1 : ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือสามารถนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารของผู้ช่วยพ่อครัวได้

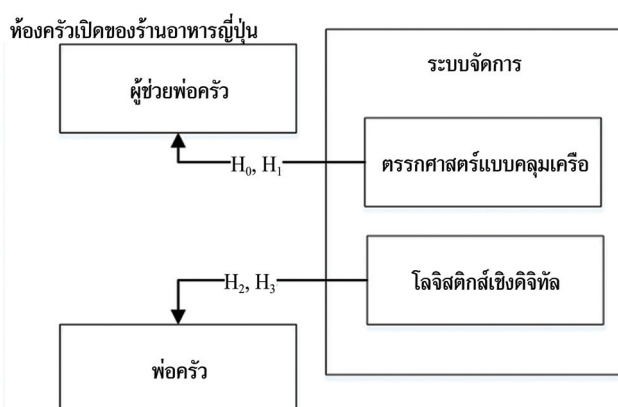
2. โลจิสติกส์เชิงดิจิทัล

ภายในห่วงโซ่อุปทานมีการไหลเวียนของข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการขนย้ายวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต [7] ผู้ผลิตหลายรายสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการขนย้ายวัตถุดิบในการผลิตโดยการพัฒนาระบบสารสนเทศที่ให้บริการข้อมูลร่วมกัน แนวคิดในการผลิตแบบ Just-in-Time: JIT ถูกนำมาพัฒนาเป็นขั้นตอนดิจิทัลในการตัดสินใจเพื่อการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าสำหรับภาคธุรกิจและผู้ผลิตวัตถุดิบ อีกทั้งลูกค้ายังสามารถแนะนำความต้องการของตนเอง ซึ่งผู้มีส่วนได้ส่วนเสียตลอดจนห่วงโซ่อุปทานสามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพของวัตถุดิบในการผลิตจนกระทั่งเหนือความคาดหมายของผู้บริโภคได้ โดยแนวคิดของโลจิสติกส์ได้แบ่งวัตถุดิบภายในคลังสินค้าตามน้ำหนัก ขนาดและวิธีการบำรุงรักษา บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทบทวนงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการนำเอาโลจิสติกส์ไปประยุกต์ใช้ในการพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์โดยทำการออกแบบระบบการกระจายสินค้า ซึ่งมุ่งลดระยะเวลาในการขนส่งสินค้า [8] อีกทั้งยังได้พบงานวิจัยอีกชิ้นซึ่งทำการเปรียบเทียบเส้นทางในการลำเลียงสินค้าเชิงดิจิทัล อาทิ ไฟล์เพลง ซึ่งถูกส่งซื้อผ่านระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยระบบโลจิสติกส์เชิงดิจิทัล [9] งานวิจัยลำดับสุดท้ายนี้ได้ค้นพบขั้นตอนวิธีที่มีความเหมาะสมในค้นหาเส้นทางในการขนส่งเอกสารดิจิทัลผ่านห่วงโซ่อุปทานดิจิทัล ดังนั้นบทความวิจัยฉบับนี้จึงได้นำแนวคิดของโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลมาใช้ในการบรรเทาข้อปัญหาในการวิจัยบนความเป็นไปได้ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำการทดสอบว่าแนวคิดโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลสามารถนำมาใช้ตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือ การลดระยะเวลาในการปรุงอาหารของผู้ช่วยพ่อครัวเพื่อให้บริการแก่ลูกค้าได้ตามเวลาที่คาดหวัง บทความวิจัยฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานเพื่อการวิจัยดังนี้

H_2 : โลจิสติกส์เชิงดิจิทัลไม่สามารถช่วยลดระยะเวลาในการลำเลียงวัตถุดิบในการปรุงอาหารของผู้ช่วยพ่อครัวได้

H_3 : โลจิสติกส์เชิงดิจิทัลสามารถช่วยลดระยะเวลาในการลำเลียงวัตถุดิบในการปรุงอาหารของผู้ช่วยพ่อครัวได้

จากสมมติฐานในการวิจัย บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนารอบแนวคิดในการวิจัยโดยการผสมผสานระหว่างแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือและโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

บทความวิจัยฉบับนี้จะทำการทดลองการวิจัยภายใต้กรอบแนวคิดในการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือและโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลว่าสามารถช่วยจัดการการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารของพ่อครัวและลดระยะเวลาในการนำอาหารให้บริการแก่ลูกค้าได้ โดยการทดลองดังกล่าวจะทำภายใต้สภาพแวดล้อมของห้องครัวเปิดของร้านอาหารญี่ปุ่น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การพัฒนาตัวแบบในการวิจัย

บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพิจารณาปัจจัยที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นเครื่องสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการผลิตของผู้ช่วยพ่อครัวสำหรับอาหารแต่ละจาน โดยอาศัยแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ กระบวนการทางโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลถูกนำมาใช้ในการออกแบบการลำเลียงวัตถุดิบเพื่อจัดเตรียมระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรุงอาหาร

เพื่อทำการพัฒนากฎที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล บทความวิจัยฉบับนี้ได้ใช้การอนุมานกฎแบบถอยหลัง (Backward Chaining) [10] เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญส่งผลให้บทความวิจัยฉบับนี้ทราบคำตอบที่เหมาะสมที่ระบบผู้เชี่ยวชาญควรให้การแนะนำแก่ผู้ใช้ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์กฎที่มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ข้อมูลโดยสอดคล้องกับแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือและโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลตามแนวคิดดังนี้

เป้าหมายคือ

รายงานคำแนะนำการจัดเตรียมวัตถุดิบ

กฎที่ต้องนำมาใช้คือ

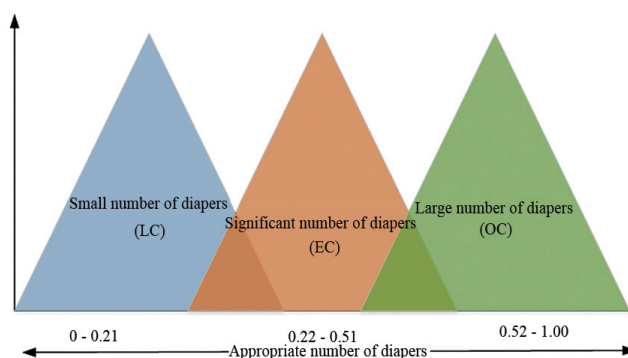
ความคิดเห็นของผู้ช่วยพ่อครัวเป็นฐาน (ปริมาณวัตถุดิบ v ปริมาณอาหาร) $\rightarrow$ วัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหาร
 ความคิดเห็นของพ่อครัวเป็นฐาน (ลำดับของการลำเลียงวัตถุดิบ v ความสามารถในการขนส่งวัตถุดิบ v ความสามารถในการจัดเก็บวัตถุดิบ) $\rightarrow$ ระยะเวลาที่มีความเหมาะสม

วัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหาร $\rightarrow$ ข้อมูลวัตถุดิบ
 ระยะเวลาที่มีความเหมาะสม $\rightarrow$ ข้อมูลระยะเวลา
 ข้อมูลวัตถุดิบ v ข้อมูลระยะเวลา $\rightarrow$ รายงานคำแนะนำการจัดเตรียม
 วัตถุดิบ

จากกฎดังกล่าว หากความคิดเห็นของผู้ช่วยพ่อครัวและพ่อครัวเป็นจริง ระบบผู้เชี่ยวชาญ จะได้รับระยะเวลาที่มีความเหมาะสมต่อการลำเลียงอาหารและวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหาร จากนั้น เมื่อข้อมูลวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหารเป็นจริงจะได้รับข้อมูลวัตถุดิบ และหาระยะเวลาที่มีความเหมาะสมเป็นจริงจะได้รับข้อมูลระยะเวลา และเมื่อข้อมูลวัตถุดิบและข้อมูลระยะเวลาเป็นจริงจะได้รับ รายงานคำแนะนำการจัดเตรียมวัตถุดิบ โดยการอนุมานกฎดังกล่าวมีลักษณะของการพิสูจน์โดยการวินิจฉัยสาเหตุของการเกิดคำตอบที่มีความเหมาะสมกับการแก้ปัญหาการวิจัย

จากกฎที่พัฒนาขึ้นนี้ บทความวิจัยฉบับนี้ได้ตอบสนองต่อการทำงานของกฎโดยใช้แนวคิดการใช้ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญเป็นฐาน (Knowledge-Based Experience) พัฒนาขึ้นโดย Hahil B. Moller ในปี ค.ศ. 2012 [11] โดยนำมาใช้เพื่อระบุ Linguistic Variable ซึ่งเป็นปัจจัยนำมาใช้เป็นกฎในการตัดสินใจแบบอัตโนมัติของระบบผู้เชี่ยวชาญตลอดจนใช้ข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญในสายงานนั้น ๆ ในการกำหนดค่าระดับความเข้มข้นของ Fuzzy Degree ภายใน Linguistic Variable แนวคิดดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการรวบรวมข้อมูลจากผู้ช่วยพ่อครัวและพ่อครัว ซึ่งให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับปัจจัยที่มีความเหมาะสมต่อการตัดสินใจในการจัดเตรียมวัตถุดิบและการปรุงอาหาร โดย Linguistic Variable

บทความวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ Triangular Membership Function ร่วมกับการใช้ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญเป็นฐานมาใช้ในการกำหนดช่วงความเป็นสมาชิกของ Linguistic Variable แต่ละตัวเพื่อให้ระบบผู้เชี่ยวชาญสามารถระบุได้ว่าข้อมูลนำเข้าจากพนักงานรับรายการอาหารสอดคล้องกับความเข้มข้นในระดับใดและสอดคล้องกับ Linguistic Variable ตัวใด ยกตัวอย่างบทความวิจัยที่มีความคล้ายคลึงกันนี้ ในปี พ.ศ. 2561 ศรีวรุฒ แรมจันทร์ ได้พัฒนากรอบแนวคิดในการพยากรณ์ปริมาณการสั่งซื้อผ้าอ้อมเด็กที่มีความเหมาะสมโดยอาศัย Fuzzy Logic เป็นแนวคิดหลัก [12] บทความวิจัยดังกล่าวได้กำหนด Membership Function โดยอาศัยคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับช่วงความเป็นสมาชิก การกำหนด Linguistic Variable และการกำหนดค่าน้ำหนักภายใน Linguistic Variable แต่ละตัวดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกโดยอาศัยแนวคิด Triangular Membership Function [12]

จากรูปที่ 2 Triangular Membership Function ถูกนำมาใช้ในการกำหนดช่วงของปริมาณผ้าอ้อมโดยมีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ 0.1 ปริมาณผ้าอ้อมค่อนข้างน้อยถูกแทนด้วย Linguistic Variable คือ LC มีค่าความเป็นสมาชิก 0 - 0.21 ปริมาณผ้าอ้อมโดยเฉลี่ยถูกแทนด้วย Linguistic Variable คือ EC มีค่าความเป็นสมาชิก 0.22 - 0.51 และปริมาณผ้าอ้อมจำนวนมากถูกแทนด้วย Linguistic Variable คือ OC มีค่าความเป็นสมาชิก 0.52 - 1.00 ข้อมูลทั้งหมดนี้ถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญผ่านการสัมภาษณ์จากผู้วิจัย Triangular Membership Function จะถูกนำมาใช้รองรับข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้งานระบบ โดยระบบจะทำการตัดสินใจว่าข้อมูลนำเข้าสอดคล้องกับช่วงความเป็นสมาชิกในส่วนใดก่อนนำไปทำการประมวลผลผ่าน Inference Engine เพื่อให้ระบบสามารถให้ข้อเสนอแนะต่อผู้ใช้ต่อไป

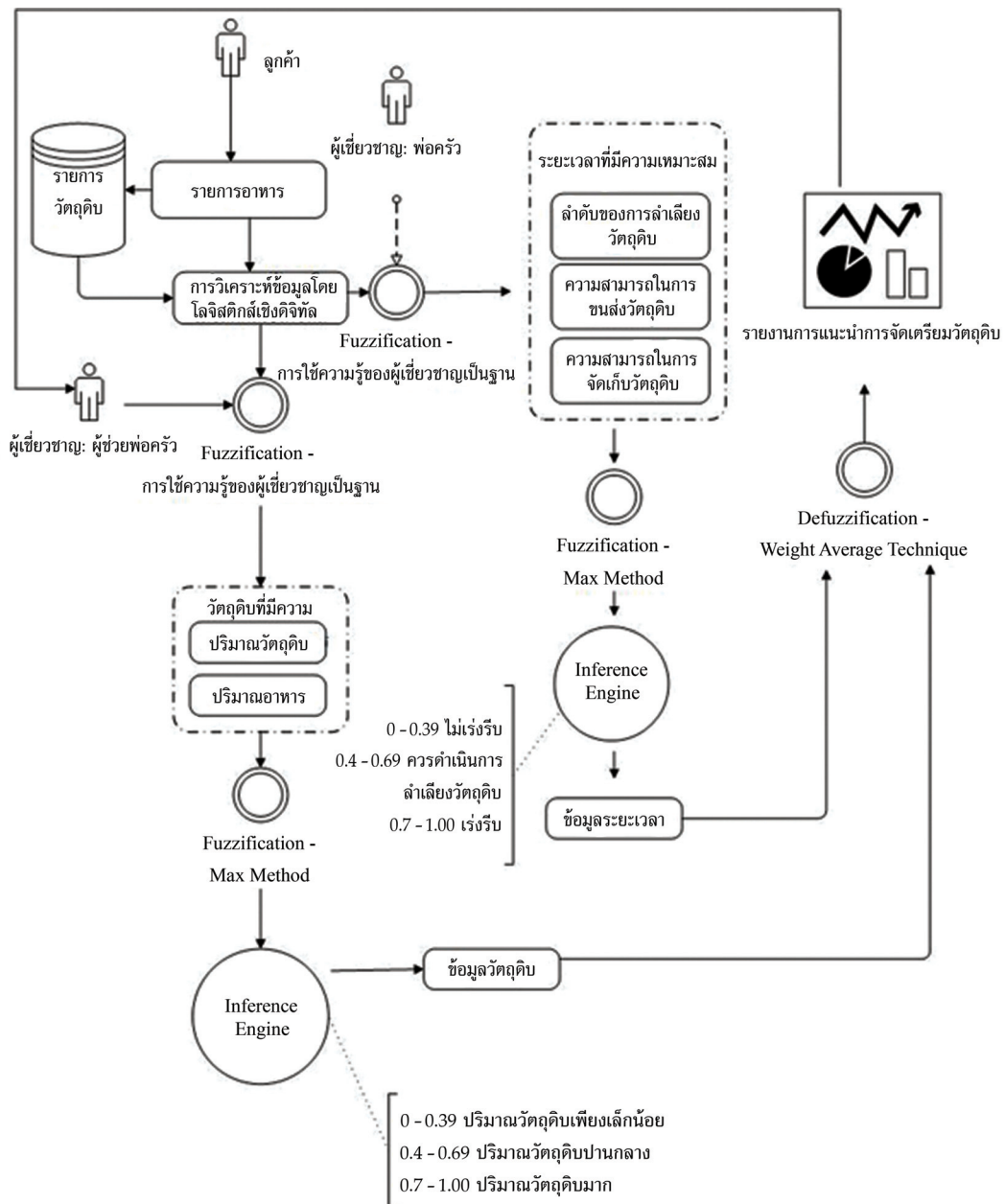
หลังจากบทความวิจัยฉบับนี้ได้ใช้แนวคิด Triangular Membership Function ร่วมกับการกำหนดค่าต่าง ๆ โดยผู้เชี่ยวชาญ จากนั้นข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบชุดคำถามและชุดคำตอบสำหรับการสื่อสารระหว่างมนุษย์และเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านโมบายแอปพลิเคชัน อีกทั้งบทความวิจัยฉบับนี้ยังได้ขอความอนุเคราะห์ผู้เชี่ยวชาญในการกำหนดความเข้มข้นของระดับความคิดเห็นจากลูกค้าเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบขั้นตอนวิธีของ Fuzzification ในการแปรูปข้อมูลจากลูกค้า ซึ่งมีความคลุมเครือให้อยู่ในรูปแบบที่คอมพิวเตอร์สามารถนำไปใช้ประมวลผลได้โดยบรรจุข้อมูลจากแต่ละปัจจัยลงใน Linguistic Variable ในการวิจัยนี้ได้ใช้ Max Method ในการบูรณาการข้อมูลที่มาจาก Linguistic Variable หลายตัว โดยมุ่งไปที่การเลือกค่าสูงสุดที่ได้รับจากการส่งผ่านข้อมูลสอดคล้องกับการที่ลูกค้าต้องการอาหารรสชาติที่สอดคล้องกับความต้องการของตนเองมากที่สุดภายใต้ระยะเวลาที่สั้นที่สุด ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำเข้าสู่กราฟความสัมพันธ์ซึ่งถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง ตามแนวคิดของ Triangular Membership Function ประกอบไปด้วย การจัดเตรียมวัตถุดิบในปริมาณน้อย ปานกลาง และมาก จากนั้น Inference Engine จะถูกออกแบบเพื่อนำข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์มาใช้ในการแนะนำปริมาณวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมต่อความต้องการของลูกค้าภายใต้ระยะเวลาของการปรุงอาหารที่เหมาะสมต่อการให้บริการลูกค้า ในท้ายที่สุดงานวิจัยจะทำการออกแบบ Defuzzification เพื่อทำการหลอมรวมข้อมูลทั้งหมดให้กลับไปยังในรูปแบบที่ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ด้วยการประมวลผลค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average Technique) ซึ่งเหมาะสมกับระบบที่ต้องการประมวลผลข้อมูลจากผู้ใช้หลายคน ที่ป้อนข้อมูลพร้อมกันในคราวเดียวด้วยข้อมูลที่มีความแตกต่างกัน

2. การทดสอบตัวแบบในการวิจัย

จากการพัฒนาตัวแบบในการวิจัย กระบวนการในการทดลองทดลองจนแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือและโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลได้ถูกนำมาออกแบบกรอบแนวคิดตามทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 ในขั้นตอนที่ 1) เมื่อลูกค้าทำการสั่งรายการอาหาร ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำเข้าสู่ชุดคำถามและคำตอบในรูปแบบโมบายแอปพลิเคชันโดยพนักงานให้บริการเพื่อแยกแยะประเด็นที่เกี่ยวข้องกับข้อแนะนำเพิ่มเติมของลูกค้า ในขั้นตอนที่ 2) การวิเคราะห์ข้อมูลโดยโลจิสติกส์เชิงดิจิทัล จะทำการตรวจสอบรายการอาหารที่ได้รับจากลูกค้าว่าตรงกับวัตถุดิบชนิดใดที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลวัตถุดิบรายการวัตถุดิบ ขั้นตอนที่ 3) ข้อมูลจากการตรวจสอบจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Fuzzification โดยระบบได้จัดเตรียม Linguistic Variable ที่เหมาะสม โดยคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญสอดคล้องกับแนวคิดการใช้ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญเป็นฐาน ผู้ช่วยพ่อครัว เป็นผู้เสนอแนะข้อมูลรายการวัตถุดิบ คือ ปริมาณวัตถุดิบ และปริมาณอาหาร รายการอาหารดังกล่าวได้ถูกนำมากำหนดให้เป็น Linguistics

Variable โดยผู้เชี่ยวชาญได้ให้ข้อเสนอแนะทั้งปัจจัยที่ส่งผลต่อการลำเลียงอาหารและการประกอบอาหาร ตลอดจนกำหนดค่าน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับการสนับสนุนให้ระบบสามารถตัดสินใจอย่างเป็นอัตโนมัติ และสอดคล้องกับการให้คำแนะนำที่เหมาะสมในการจัดการวัตถุดิบแก่ผู้ช่วยพ่อครัว ขั้นตอนที่ 4) Max Method จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของปริมาณวัตถุดิบร่วมกับปริมาณอาหาร และนำเข้าสู่ Inference Engine ซึ่งแบ่งช่วงการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วง ประกอบไปด้วย 0 - 0.39 ปริมาณวัตถุดิบเพียงเล็กน้อย 0.4 - 0.69 ปริมาณวัตถุดิบปานกลาง และ 0.7 - 1.00 ปริมาณวัตถุดิบมาก



รูปที่ 3 กรอบแนวคิดตามทฤษฎี

ในอีกทางหนึ่ง ขั้นตอนที่ 5) การวิเคราะห์ข้อมูลโดยโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลจะทำการตรวจสอบรายการอาหารร่วมกับรายการวัตถุดิบในฐานข้อมูล และนำเข้าสู่กระบวนการ Fuzzification โดยระบบได้จัดเตรียม Linguistic Variable ที่เหมาะสมโดยคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ สอดคล้องกับแนวคิดการใช้ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญเป็นฐานโดยมีพ่อครัวเป็นผู้กำหนด Linguistics Variable และกำหนดค่าน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับการสนับสนุนให้ระบบสามารถตัดสินใจอย่างเป็นอัตโนมัติและสอดคล้องกับการให้คำแนะนำที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ข้อมูลระยะเวลาที่มีความเหมาะสมในด้านระยะเวลา อันประกอบไปด้วยลำดับของการล้างวัตถุดิบ ความสามารถในการขนส่งวัตถุดิบ ความสามารถในการจัดเก็บวัตถุดิบ ขั้นตอนที่ 6) Max Method จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของลำดับการล้างวัตถุดิบ ความสามารถในการขนส่งวัตถุดิบ ความสามารถในการจัดเก็บวัตถุดิบ ทั้ง 3 รายการนี้ร่วมกัน และนำเข้าสู่ Inference Engine ซึ่งแบ่งช่วงการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วง ประกอบไปด้วย 0 - 0.39 ไม่เร่งรีบ 0.4 - 0.69 ควรดำเนินการล้างวัตถุดิบ 0.7 - 1.00 เร่งรีบ

ในขั้นตอนสุดท้าย ข้อมูลวัตถุดิบจากขั้นตอนที่ 4 และข้อมูลระยะเวลาจากขั้นตอนที่ 6 จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Defuzzification โดยใช้การประมวลผลค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักในการแปรูปข้อมูลที่มีลักษณะเป็นความถี่ให้กลายเป็นข้อแนะนำสำหรับผู้ช่วยพ่อครัวในการจัดเตรียมวัตถุดิบเพื่อปรุงอาหารในรูปแบบของรายงานที่แสดงผลผ่านโมบายแอปพลิเคชัน

ในการทดลองกรอบแนวคิดตามทฤษฎีจะถูกพัฒนาขึ้นให้อยู่ในรูปแบบของโมบายแอปพลิเคชัน เพื่อใช้เป็นตัวแทนของขั้นตอนวิธีของบทความวิจัยฉบับนี้ โดยทำการทดลอง 3 เดือนก่อนการใช้โมบายแอปพลิเคชันและ 3 เดือนหลังจากใช้โมบายแอปพลิเคชัน โดยควบคุมกรอบการวิเคราะห์ปริมาณที่รายการอาหารจำนวน 1,000 รายการทั้งก่อนและหลังจากที่กลุ่มตัวอย่างทดลองใช้งานระบบ เพื่อรวบรวมความถี่ของการเกิดปัญหาผ่านการสังเกตการณ์ของผู้วิจัยและนำค่าความแตกต่างในรูปแบบของสถิติร้อยละมาทำการเปรียบเทียบเพื่อสะท้อนให้เห็นว่า กรอบแนวคิดตามทฤษฎีสามารถนำมาใช้บรรเทาข้อปัญหาจนกระทั่งสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในการวิจัยได้

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาตัวแบบในการวิจัย

บทความวิจัยฉบับนี้ใช้แบบสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างกับกลุ่มผู้เชี่ยวชาญอันประกอบไปด้วยพ่อครัวจำนวน 3 ราย และผู้ช่วยพ่อครัวจำนวน 3 ราย ซึ่งบทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจากร้านอาหารญี่ปุ่นที่มีรูปแบบเป็นครัวเปิดซึ่งได้รับการจัดอันดับความนิยม 3 รายการแรกจากเว็บไซต์ wongnai.com [13] ซึ่งจัดลำดับร้านอาหารจากปริมาณการรีวิวร้านอาหารของลูกค้าที่เข้าไปใช้บริการอาหารญี่ปุ่นแบบครัวเปิดทั่วประเทศสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณการเข้าไปใช้บริการของลูกค้าในประเทศไทย ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมในร้านอาหารที่มีปริมาณการเข้าถึงใน 3 อันดับแรก บทความวิจัยนี้จึงหยิบยกกลุ่มตัวอย่างดังกล่าวเพื่อเป็นตัวแทนของร้านอาหารญี่ปุ่นแบบครัวเปิดของประเทศไทย ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ประกอบไปด้วย ชุดคำถาม และชุดคำตอบที่ได้รับการแนะนำเกี่ยวกับความถี่ของแต่ละปัจจัย อีกทั้งบทความวิจัยฉบับนี้ยังได้ทำการกำหนดเลขลำดับของชุดคำถามที่ได้จากการสัมภาษณ์ในแต่ละข้อเพื่อการเชื่อมโยงชุดคำถามกับชุดคำตอบ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชุดคำถาม

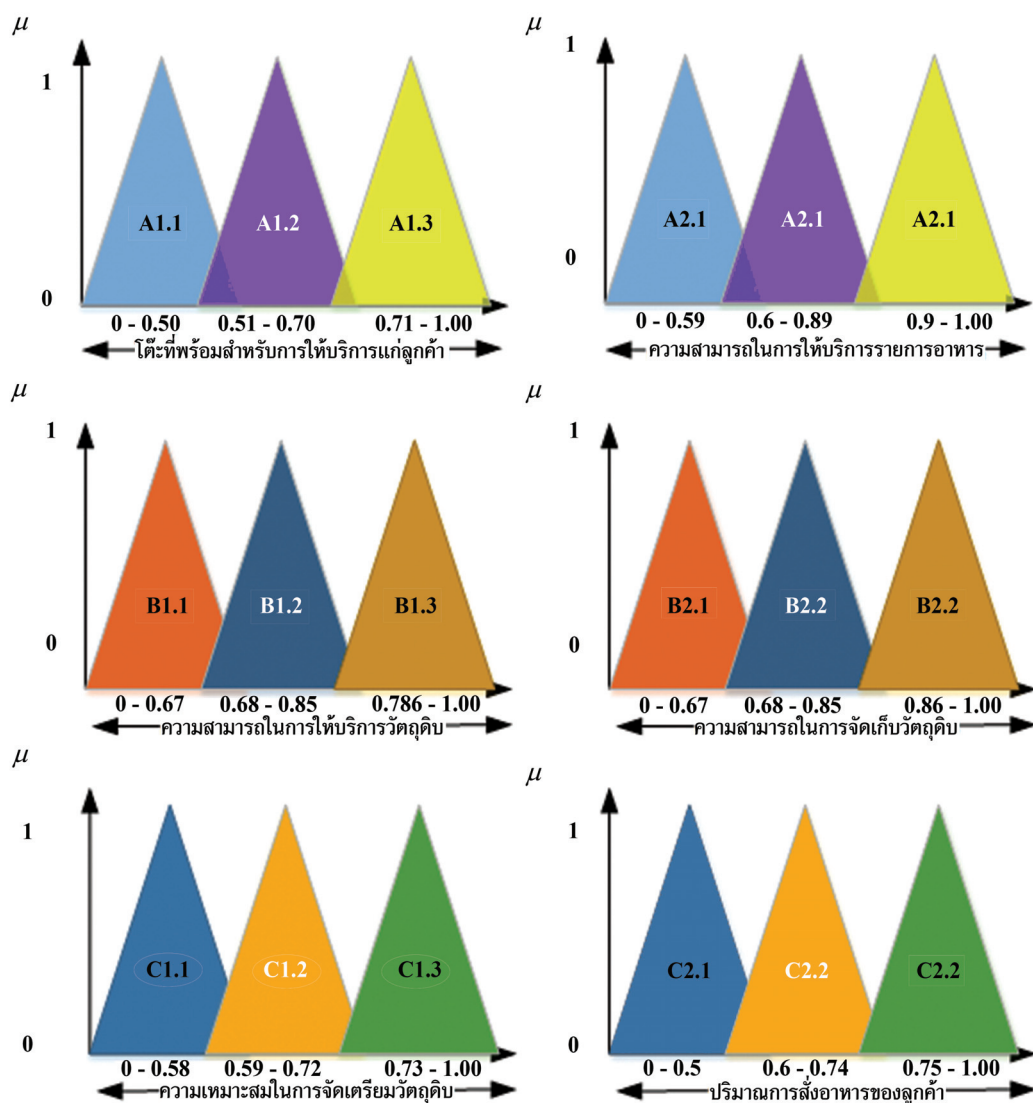
ลำดับ	ข้อมูลการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างเพื่อการจัดเตรียมชุดคำถามบนโมบายแอปพลิเคชัน		
	คำถามในการสัมภาษณ์	หมายเลขของคำถาม	ชุดคำถามที่ปรากฏในโมบายแอปพลิเคชัน
1	คำถามในลักษณะใดบ้างที่ลูกค้าใช้ถามคุณเมื่อพวกเขาต้องการสั่งรายการอาหาร	A1	พอลจะมีโต๊ะสำหรับฉันบ้างไหม
		A2	คุณมีอาหารอะไรบ้าง
2	คำถามในลักษณะใดบ้างที่ผู้ช่วยพ่อครัวใช้สื่อสารกับพ่อครัวเพื่อการจัดเตรียมวัตถุดิบ	B1	วัตถุดิบอะไรบ้างที่คุณต้องการใช้เพื่อปรุงอาหาร
		B2	ฉันควรทำวัตถุดิบให้ร้อนหรือจัดเก็บโดยการแช่แข็งก่อนการปรุงอาหารของคุณอย่างไรบ้าง
3	คำถามในลักษณะใดบ้างที่พ่อครัวใช้สื่อสารกับผู้ช่วยพ่อครัวเพื่อการปรุงอาหาร	C1	วัตถุดิบสำหรับอาหารแต่ละจานมีปริมาณ
		C2	ขนาดไหนตามที่ลูกค้าสั่งเข้ามา ลูกค้าแต่ละรายสั่งอาหารกี่จาน

นอกเหนือไปจากการสัมภาษณ์ชุดคำถามที่ผู้เชี่ยวชาญมักจะใช้สำหรับการสื่อสารในร้านอาหาร ญี่ปุ่นแบบครัวเปิดซึ่งเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพแล้ว บทความวิจัยฉบับนี้ยังได้ขอความอนุเคราะห์ผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดในการกำหนดระดับความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (Degree of Fuzzy) สำหรับชุดคำตอบที่ผู้เชี่ยวชาญมักจะใช้สื่อสารภายในร้านอาหารญี่ปุ่นแบบครัวเปิด โดยการกำหนดค่าข้อมูลของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 6 รายจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย Mean of MAX Method เพื่อให้ได้การกำหนดค่าโดยผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดมีส่วนร่วม อีกทั้งบทความวิจัยฉบับนี้ยังได้กำหนด Linguistic Variable เพื่อรองรับข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือสำหรับชุดคำตอบแต่ละข้อ การกำหนด Linguistic Variable คำนวณของ Linguistic Variable แต่ละตัวตลอดจนค่าความเป็นสมาชิกของ Linguistic Variable นั้นได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญโดยสอดคล้องกับแนวคิด Triangular technique โดยหมายเลขของชุดคำถามในตารางที่ 1 จะถูกเชื่อมโยงเข้ากับชุดคำตอบ ดังตารางที่ 2

ผู้เชี่ยวชาญแต่ละรายได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับการกำหนดความถี่สำหรับชุดคำตอบแต่ละข้อ บทความวิจัยฉบับนี้ได้ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยค่าเฉลี่ยเพื่อนำข้อมูลกำหนดลงในขั้นตอนวิธีและข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญในแต่ละข้อล้วนมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเข้าใกล้ 0 อันหมายถึงข้อมูลมีการกระจายน้อย และผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดมีความคิดเห็นไปในทิศทางเดียวกันแม้ในแต่ละร้านจะมีกระบวนการทำงานแตกต่างกันบ้างในรายละเอียด [14]

จากการแนะนำของผู้เชี่ยวชาญระดับความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือทั้งหมดจะถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของ Membership Function ตามทฤษฎีของ Triangular Weave Form ดังรูปที่ 4

หลังจากการจัดเตรียมชุดคำถามและชุดคำตอบ ระบบจะนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการตัดสินใจ โดยบทความวิจัยฉบับนี้ยังได้ขอความอนุเคราะห์ผู้เชี่ยวชาญในการกำหนดระดับความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือของคำตอบที่ได้จากการตัดสินใจ อันประกอบไปด้วย ระยะเวลาที่มีความเหมาะสมและวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหารโดยคำตอบได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ตามแนวคิดของ Logistic Classification อีกทั้งระดับความถี่ที่ได้รับจากการแนะนำของผู้เชี่ยวชาญยังได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้ Mean of MAX Method เพื่อให้เกิดความสอดคล้องของการวิเคราะห์ข้อมูลตลอดบทความวิจัยฉบับนี้ ดังตารางที่ 3



รูปที่ 4 Membership Function ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 6 ราย เพื่อกำหนดช่วงในการตัดสินใจอย่างเป็นอัตโนมัติให้กับระบบ โดยใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยค่าเฉลี่ยเพื่อนำข้อมูลทั้งหมดกำหนดลงในขั้นตอนวิธี อีกทั้งจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะเห็นได้ว่าข้อมูลทั้งหมดเข้าใกล้ 0 อันแสดงให้เห็นถึงว่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดเป็นไปในทิศทางเดียวกันแม้ว่าในแต่ละร้านจะมีกระบวนการในการดำเนินงานแตกต่างกันเล็กน้อย [14]

ตารางที่ 2 ชุดค่าตอบและข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ

หมายเลขของคำถามจากตารางที่ 1	ข้อมูลการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างเพื่อการจัดเตรียมชุดคำตอบบนโมบายแอปพลิเคชัน									
	ชุดคำตอบที่ปรากฏในโมบายแอปพลิเคชัน	Linguistic Variable	Fuzzy Degree ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ รายที่ 1	Fuzzy Degree ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ รายที่ 2	Fuzzy Degree ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ รายที่ 3	Fuzzy Degree ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ รายที่ 4	Fuzzy Degree ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ รายที่ 5	Fuzzy Degree ตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ รายที่ 6	ข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือจากผู้เชี่ยวชาญ (Average)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
A1	ขอโทษครับคุณลูกค้า โตะเต็มครับ/โต๊ะถูกจองไว้หมดเสียครับ คุณลูกค้าอยกจะนัดโต๊ะใหม่ดีกว่าครับ เรามีโต๊ะว่างครับ เชิญทางนี้	A1.1	0.41	0.39	0.43	0.42	0.44	0.45	0.31	0.07
		A1.2	0.49	0.5	0.48	0.53	0.54	0.51	0.43	0.02
		A1.3	0.72	0.77	0.71	0.69	0.75	0.71	0.81	0.02
A2	คุณลูกค้าจะรับรายการอาหารอะไรครับ เชิญคุณลูกค้ารับเมนูก่อนครับ คุณลูกค้าอยกจะรับอาหารอะไรก่อนไหมครับ	A2.1	0.25	0.26	0.29	0.27	0.24	0.28	0.24	0.03
		A2.2	0.6	0.59	0.62	0.61	0.63	0.6	0.51	0.02
		A2.3	0.91	0.89	0.96	0.88	0.95	0.9	0.73	0.03
B1	ฉันอยากได้อาหารประเภทปลา ฉันอยากได้อาหารประเภทผัก ฉันอยากได้อาหารประเภทเนื้อสัตว์	B1.1	0.31	0.14	0.13	0.15	0.16	0.13	0.27	0.02
		B1.2	0.65	0.68	0.64	0.68	0.66	0.68	0.61	0.01
		B1.3	0.83	0.82	0.85	0.81	0.86	0.86	0.92	0.03
B2	จัดเก็บวัตถุดิบลงไปนึ่งในหม้อต้มรสจัดจืด จัดเก็บวัตถุดิบลงในผู้เข้เย็น จัดเก็บวัตถุดิบลงในช่องแช่แข็ง	B2.2	0.13	0.14	0.13	0.15	0.16	0.13	0.14	0.01
		B2.3	0.65	0.68	0.64	0.68	0.66	0.68	0.67	0.02
		B2.3	0.83	0.82	0.85	0.81	0.86	0.86	0.84	0.02
C1	จัดเตรียมวัตถุดิบแต่ละอย่างเพียงเล็กน้อย จัดเตรียมวัตถุดิบแต่ละอย่างเท่าที่จำเป็นสำหรับอาหารแต่ละจาน จัดเตรียมวัตถุดิบแต่ละอย่างให้เพียงพอสำหรับอาหารหลายจาน	C1.1	0.44	0.5	0.46	0.46	0.5	0.49	0.48	0.03
		C1.2	0.6	0.59	0.59	0.63	0.65	0.59	0.61	0.03
		C1.3	0.73	0.72	0.74	0.75	0.74	0.73	0.74	0.01
C2	ลูกค้าสั่งอาหารเพียง 1 จาน ลูกค้าสั่งอาหารแบบเป็นชุดแบบโต๊ะ ลูกค้าสั่งอาหารแบบ Full Course Set	C2.1	0.29	0.34	0.35	0.31	0.34	0.31	0.32	0.02
		C2.2	0.59	0.6	0.65	0.63	0.59	0.6	0.61	0.02
		C2.3	0.73	0.72	0.76	0.77	0.75	0.75	0.75	0.02

ตารางที่ 3 การกำหนดความถี่ของผลลัพธ์จากการตัดสินใจ

ลำดับ ที่	ระดับความถี่ของผลลัพธ์ที่ได้จากการตัดสินใจ									
	ปัจจัยใน การวิเคราะห์ ผลลัพธ์	ผลลัพธ์	เงื่อนไขในการตัดสินใจตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ						ข้อมูลเชิง ตรรกศาสตร์ แบบคลุมเครือ จากผู้เชี่ยวชาญ (Average)	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			รายที่ 1	รายที่ 2	รายที่ 3	รายที่ 4	รายที่ 5	รายที่ 6		
1	ระยะเวลาที่มี ความเหมาะสม	ไม่เร่งรีบ	0.19	0.25	0.23	0.21	0.18	0.2	0.21	0.03
		ควรดำเนินการ ล่าช้าลงเล็กน้อย	0.56	0.59	0.57	0.56	0.56	0.58	0.57	0.01
		เร่งรีบ	0.89	0.95	0.93	0.91	0.9	0.89	0.91	0.02
2	ปริมาณวัตถุดิบที่ มีความเหมาะสม กับอาหาร	ปริมาณวัตถุดิบ เพียงเล็กน้อย	0.16	0.18	0.15	0.18	0.21	0.16	0.17	0.02
		ปริมาณวัตถุดิบ ปานกลาง	0.63	0.65	0.72	0.66	0.69	0.7	0.68	0.03
		ปริมาณวัตถุดิบมาก	0.91	0.91	0.95	0.95	0.94	0.95	0.94	0.02

จากการกำหนดค่าโดยคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนาขั้นตอนวิธี
เพื่อใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจของระบบเกี่ยวกับระยะเวลาที่เหมาะสมและวัตถุดิบที่เหมาะสมกับอาหาร
โดยอาศัยข้อมูลนำเข้าทั้งหมดที่ได้รับการแนะนำการกำหนดค่าจากผู้เชี่ยวชาญดังอธิบายในตารางที่ 1 - 2
ในรูปของสมการดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned}
 A1(A1.1, A1.2, A1.3) &= Support \max(\mu_{A1.1}(x), \mu_{A1.2}(x), \mu_{A1.3}(x)) \\
 A2(A2.1, A2.2, A2.3) &= Support \max(\mu_{A2.1}(x), \mu_{A2.2}(x), \mu_{A2.3}(x)) \\
 B1(B1.1, B1.2, B1.3) &= Support \max(\mu_{B1.1}(x), \mu_{B1.2}(x), \mu_{B1.3}(x)) \\
 B2(B2.1, B2.2, B2.3) &= Support \max(\mu_{B2.1}(x), \mu_{B2.2}(x), \mu_{B2.3}(x)) \\
 C1(C1.1, C1.2, C1.3) &= Support \max(\mu_{C1.1}(x), \mu_{C1.2}(x), \mu_{C1.3}(x)) \\
 C2(C2.1, C2.2, C2.3) &= Support \max(\mu_{C2.1}(x), \mu_{C2.2}(x), \mu_{C2.3}(x)) \\
 ST(A1, A2, B1, B2) &= Support \max(\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(x), \mu_{B1}(x), \mu_{B2}(x)) \\
 &\quad if (ST \geq 0.7) Then TD = 0.91 \\
 &\quad else if (ST \geq 0.4) Then TD = 0.57 \\
 &\quad else TD = 0.21 \\
 SM(C1, C2) &= Support \max(\mu_{c1}(x), \mu_{c2}(x)) \\
 &\quad if (SM \geq 0.7) Then MD = 0.94 \\
 &\quad else if (SM \geq 0.4) Then MD = 0.68 \\
 &\quad else if MD = 0.17 \\
 SL &= TD \cup MD \\
 SR &= \{x' | \mu_{SR}(x') = Support \mu_{SR}(x)\} \\
 MOM(SL) &= \sum_{x' \in SR} x' / SR
 \end{aligned} \tag{1}$$

A1	คือ โต๊ะที่พร้อมสำหรับการให้บริการลูกค้า โดย A1.1 - 1.3 คือ ค่าความเป็นสมาชิกของ A1
A2	คือ ความสามารถในการให้บริการรายการอาหาร โดย A2.1 - 2.3 คือ ค่าความเป็นสมาชิกของ A2
B1	คือ ความสามารถในการให้บริการวัตถุดิบ โดย B1.1 - 1.3 คือ ค่าความเป็นสมาชิกของ B1
B2	คือ ความสามารถในการจัดเก็บวัตถุดิบ โดย B2.1 - 2.3 คือ ค่าความเป็นสมาชิกของ B2
C1	คือ ความเหมาะสมในการจัดเตรียมวัตถุดิบ โดย C1.1 - 1.3 คือ ค่าความเป็นสมาชิกของ C1
C2	คือ ปริมาณการสั่งอาหารของลูกค้า โดย C2.1 - 2.3 คือ ค่าความเป็นสมาชิกของ C2
ST	คือ ระยะเวลาที่มีความเหมาะสม
SM	คือ วัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหาร
TD	คือ ข้อมูลระยะเวลา
MD	คือ ข้อมูลวัตถุดิบ
SL	คือ ระดับความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือที่วิเคราะห์จากข้อมูลระยะเวลาและข้อมูลวัตถุดิบ
SR	คือ ผลการวิเคราะห์สัดส่วนเพื่อการคำนวณค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างข้อมูลระยะเวลาและข้อมูล วัตถุดิบสอดคล้องกับหลักการ Defuzzification ในการแปรรูปความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือให้กลับมาอยู่ในรูปแบบที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้
MOM	คือ ข้อมูลที่ถูกนำเสนอในรายงานการแนะนำการจัดเตรียมวัตถุดิบ

ระบบจะทำการตัดสินใจสอดคล้องกับสมการด้านบน โดยอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 1 - 2 ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ดังกล่าวในตารางที่ 3 โดยระยะเวลาที่เหมาะสมและปริมาณวัตถุดิบที่เหมาะสมกับอาหารจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย Mean of Maximum Method เพื่อให้ได้ข้อแนะนำจากระบบ บทความวิจัยฉบับนี้ได้เลือกค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weight Average Technique) สำหรับ Defuzzification [15] เพื่อแปรรูปความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือให้กลับมาอยู่ในรูปแบบที่รองรับต่อการอ่านข้อมูลของผู้ช่วยพ่อครัวในการจัดเตรียมวัตถุดิบ โดยประกอบไปด้วย ผลลัพธ์ทั้งหมด 3 รูปแบบ 1) ค่าเฉลี่ยผลลัพธ์สูง หมายถึง ผู้ช่วยพ่อครัวควรเร่งทำการล้างวัตถุดิบปริมาณมากไปสู่กระบวนการปรุงอาหารโดยพ่อครัว ในขณะเดียวกันต้องทำการแช่แข็งวัตถุดิบที่เหลือในตู้แช่แข็ง 2) ค่าเฉลี่ยปานกลาง หมายถึง ผู้ช่วยพ่อครัวควรทำการล้างวัตถุดิบปริมาณปานกลางไปสู่กระบวนการปรุงอาหารโดยพ่อครัว และจัดเก็บวัตถุดิบที่เหลือในตู้แช่เย็น 3) ค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ต่ำ หมายถึง ผู้ช่วยพ่อครัวควรจัดลำดับความสำคัญของการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหาร จากนั้นทำการจัดเก็บวัตถุดิบที่เหลือในกล่องจัดเตรียมวัตถุดิบเพื่อรอเข้าสู่กระบวนการปรุงอาหารโดยพ่อครัว โดยบทความวิจัยฉบับนี้จะทำการสาธิตการประมวลผล

ของระบบภายใต้ขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. ในกรณีที่ร้านอาหารมีโต๊ะพร้อมให้บริการ พนักงานจะเลือกรายการ A1.3 ซึ่งมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.81 บน Triangular Weave Form โดยการเลือกดังกล่าวเป็นการเลือกบนฐานของ Maximum Method คือค่าสูงสุดที่เหมาะสมกับระดับความรู้สึกของพนักงาน

2. ในกรณีที่ในครัวแบบเปิดมีรายการอาหารที่รอปิ้งอยู่จำนวนมาก พนักงานจะเลือกรายการ A2.1 ซึ่งมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.24 บน Triangular Weave Form โดยการเลือกดังกล่าวเป็นการเลือกบนฐานของ Maximum Method คือค่าสูงสุดที่เหมาะสมกับระดับความรู้สึกของพนักงาน

3. ในกรณีที่ลูกค้าสั่งอาหารที่เน้นวัตถุดิบที่เป็นเนื้อสัตว์ พนักงานจะเลือกรายการ B3.1 ซึ่งมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.92 บน Triangular Weave Form โดยการเลือกดังกล่าวเป็นการเลือกบนฐานของ Maximum Method คือค่าสูงสุดที่เหมาะสมกับระดับความรู้สึกของพนักงาน

4. ในกรณีที่ลูกค้าสั่งอาหารที่เน้นวัตถุดิบที่เป็นเนื้อสัตว์ผู้ช่วยพ่อครัวจะเลือกรายการ B2.3 ซึ่งมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.84 บน Triangular Weave Form โดยการเลือกดังกล่าวเป็นการเลือกบนฐานของ Maximum Method คือค่าสูงสุดที่เหมาะสมกับระดับความรู้สึกของผู้ช่วยพ่อครัว

5. ในกรณีที่ลูกค้าสั่งรายการอาหารรสชาติค่อนข้างจัด ผู้ช่วยพ่อครัวจะเลือกรายการ C1.1 ซึ่งมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.48 บน Triangular Weave Form โดยการเลือกดังกล่าวเป็นการเลือกบนฐานของ Maximum Method คือค่าสูงสุดที่เหมาะสมกับระดับความรู้สึกของผู้ช่วยพ่อครัว

6. ในกรณีที่ลูกค้าสั่งรายการอาหารเพียงจานเดียว ผู้ช่วยพ่อครัวจะเลือกรายการ C2.1 ซึ่งมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.32 บน Triangular Weave Form โดยการเลือกดังกล่าวเป็นการเลือกบนฐานของ Maximum Method คือค่าสูงสุดที่เหมาะสมกับระดับความรู้สึกของผู้ช่วยพ่อครัว

ระบบจะใช้ Maximum Method ในการคำนวณค่าสูงสุดของระยะเวลาที่มีความเหมาะสมเพื่อทำการ Fuzzification ดังนี้ $0.92 = \max(0.81, 0.24, 0.92, 0.84)$

ถ้าระยะเวลาที่มีความเหมาะสม (0.92) มากกว่า 0.7 แล้วให้ข้อมูลระยะเวลามีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.91

ถ้าระยะเวลาที่มีความเหมาะสม (0.92) มากกว่า 0.4 แล้วให้ข้อมูลระยะเวลามีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.57

ถ้าไม่เข้าเงื่อนไขใด ๆ เลย ให้ข้อมูลระยะเวลามีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.21

ดังนั้นข้อมูลระยะเวลามีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.91

ระบบจะใช้ Maximum Method ในการคำนวณค่าสูงสุดของวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหารเพื่อทำการ Fuzzification ดังนี้ $0.48 = \max(0.48, 0.32)$

ถ้าวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหาร (0.48) มากกว่า 0.7 แล้วให้ข้อมูลวัตถุดิบมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.94

ถ้าวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมกับอาหาร (0.48) มากกว่า 0.4 แล้วให้ข้อมูลวัตถุดิบมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.68

ถ้าไม่เข้าเงื่อนไขใด ๆ เลย ให้วัตถุดิบมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.17

ดังนั้นข้อมูลวัตถุดิบจะมีความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.4

$$\begin{aligned} & \text{ระดับความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ} = \\ & \frac{\text{ข้อมูลระยะเวลา (จำนวนผู้เชี่ยวชาญด้านข้อมูลระยะเวลา) + ข้อมูลวัตถุดิบที่มีความเหมาะสม}}{(\text{จำนวนผู้เชี่ยวชาญด้านวัตถุดิบที่มีความเหมาะสม})} \quad (2) \\ & \frac{(\text{จำนวนผู้เชี่ยวชาญด้านข้อมูลระยะเวลา} + \text{จำนวนผู้เชี่ยวชาญด้านวัตถุดิบที่มีความเหมาะสม})}{(\text{จำนวนผู้เชี่ยวชาญด้านวัตถุดิบที่มีความเหมาะสม})} \end{aligned}$$

จากการประมวลผลด้วยสมการที่ (2) ระดับความถี่ของข้อมูลเชิงตรรกศาสตร์แบบคลุมเครืออยู่ที่ 0.65 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางโดยผู้ตัดสินใจในการใช้สารสนเทศคือ ผู้ช่วยพ่อครัว ซึ่งควรทำการลำเลียงวัตถุดิบปริมาณปานกลางไปสู่กระบวนการปรุงอาหารโดยพ่อครัว และจัดเก็บวัตถุดิบที่เหลือในตู้แช่เย็น

ผลการทดสอบตัวแบบในการวิจัย

เมื่อขั้นตอนวิธีได้ถูกพัฒนาขึ้นและข้อมูลได้ถูกกำหนดตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญแล้ว บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันเพื่อจำลองขั้นตอนวิธีการสนับสนุนการตัดสินใจบนข้อมูลที่ได้ถูกกำหนดไว้ตามแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเพื่อเป็นเครื่องมือในการวิจัย โดยชุดคำถามและชุดคำตอบได้ถูกพัฒนาเป็นตัวต้นแบบสำหรับแสดงบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ดังรูปที่ 5

ระบบแนะนำผู้ช่วยพ่อครัว

1. พอจะมีโต๊ะสำหรับนั่งใหม่
 - ☐ ขอโทษด้วยครับคุณลูกค้า ได้ะครับ/ได้ถูกจองไว้หมดเลยครับ
 - ☐ คุณลูกค้าอาจจะไม่ได้โหนดครับ
 - ☐ เรายังได้ว่างครับ เชิญทางนี้
2. คุณมีอาหารอะไรบ้าง
 - ☐ คุณลูกค้าจะรับรายการอาหารอะไรครับ
 - ☐ เชิญคุณลูกค้ารับเมนูก่อนครับ
 - ☐ คุณลูกค้าจะรับอาหารอะไรก่อนไหมครับ
3. วัตถุดิบอะไรบ้างที่คุณต้องการใช้เพื่อปรุงอาหาร
 - ☐ ฉันอยากได้อาหารประเภทหมู
 - ☐ ฉันอยากได้อาหารประเภทไก่
 - ☐ ฉันอยากได้อาหารประเภทเนื้อสัตว์

รูปที่ 5 ตัวต้นแบบสำหรับการพัฒนาเครื่องมือในการวิจัย

จากรูปที่ 5 ตัวต้นแบบได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นโมบายแอปพลิเคชันซึ่งถูกใช้ในร้านอาหารญี่ปุ่นแบบครัวเปิดเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของโมบายแอปพลิเคชันอันสะท้อนถึงประสิทธิภาพของกรอบแนวคิดในที่สุด โดยระบบจะถูกนำไปทำการทดลองกับผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำในการกำหนดข้อมูลคือ พ่อครัวจำนวน 3 ราย และผู้ช่วยพ่อครัวจำนวน 3 ราย ผลลัพธ์ของการทดลองจะถูกรวบรวม 3 เดือนก่อนหน้าที่จะใช้งานระบบ และหลังจาก 3 เดือนที่ใช้งานระบบ ซึ่งได้รับผลลัพธ์จากการทดลองดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ผลการทดลองก่อนการใช้งานระบบใน 3 เดือนแรกโดยกำหนดกรอบความถี่ที่การสั่งอาหารจำนวน 1,000 รายการ

ลำดับที่	คำถามการทดลอง	เดือนที่ 1			เดือนที่ 2			เดือนที่ 3			ค่าเฉลี่ยจาก สัดส่วนรายการ อาหาร 1,000 รายการ
		วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	
1	ระดับความถี่ของข้อผิดพลาดจากผู้ช่วยพ่อครัวที่พ่อครัวไม่อาจยอมรับได้	7	11	9	7	8	6	7	4	13	7.2
2	ระดับความถี่ของการที่กระบวนการปรุงอาหารถูกขัดจังหวะจากการที่ผู้ช่วยพ่อครัวมีความเข้าใจไม่ตรงกับที่พ่อครัวต้องการ	17	14	16	15	12	14	8	12	11	12.4
3	ปริมาณอาหารที่มีคุณภาพไม่ดีจากความผิดพลาดในการใช้ปริมาณวัตถุดิบที่ไม่เหมาะสมกับอาหาร	6	7	4	6	9	4	4	6	8	5.4
4	ความถี่จากการที่พ่อครัวประสบกับปัญหาการเรียงลำดับของการล้างสิ่งวัตถุดิบที่ผิดพลาดโดยผู้ช่วยพ่อครัว	9	7	8	9	9	8	6	9	9	7.4
5	ความถี่ของการที่ผู้ช่วยพ่อครัวไม่สามารถจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารได้ในระยะเวลาอันเหมาะสม	14	13	14	21	14	14	13	12	21	13.6
6	ความถี่ในการถูกขัดจังหวะในการปรุงอาหารอันเนื่องจากการจัดเตรียมวัตถุดิบซึ่งไม่สอดคล้องกับลำดับในการล้างสิ่งวัตถุดิบที่ถูกต้อง	10	11	8	7	9	9	15	7	5	8.1

จากตารางที่ 4 บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลความผิดพลาดอันเกิดจากปัญหาในการสื่อสาร ผ่านการสังเกตการณ์ก่อนหน้าที่กลุ่มตัวอย่างจะใช้งานระบบที่ทำการพัฒนาขึ้น โดยมีกรอบการวิเคราะห์ข้อมูลอาหารจำนวน 1,000 รายการในรอบ 3 เดือน โดยข้อมูลความถี่ทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปแบบค่าเฉลี่ย หลังจากนั้นบทความวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการรวบรวมข้อมูลผ่านการสังเกตการณ์หลังจากที่กลุ่มตัวอย่างใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้นในรอบ 3 เดือนหลัง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดลองหลังการใช้งานระบบใน 3 เดือนหลังโดยกำหนดกรอบความถี่ที่การสั่งอาหาร จำนวน 1,000 รายการ

ลำดับที่	คำถามการทดลอง	เดือนที่ 4			เดือนที่ 5			เดือนที่ 6			ค่าเฉลี่ยจาก สัดส่วน รายการ อาหาร 1,000 รายการ
		ร้านที่ 1	ร้านที่ 2	ร้านที่ 3	ร้านที่ 1	ร้านที่ 2	ร้านที่ 3	ร้านที่ 1	ร้านที่ 2	ร้านที่ 3	
1	ระดับความถี่ของข้อผิดพลาดจากผู้ช่วยพ่อครัวที่พ่อครัวไม่อาจยอมรับได้	9	6	6	8	7	5	6	9	11	6.7
2	ระดับความถี่ของการที่กระบวนการปรุงอาหารถูกขัดจังหวะจากการที่ผู้ช่วยพ่อครัวมีความเข้าใจไม่ตรงกับพ่อครัวต้องการ	9	12	13	11	8	8	14	11	5	9.1
3	ปริมาณอาหารที่มีคุณภาพไม่ดีจากความผิดพลาดในการใช้ปริมาณวัตถุดิบที่ไม่เหมาะสมกับอาหาร	4	2	4	1	2	4	2	2	3	2.4
4	ความถี่จากการที่พ่อครัวประสบกับปัญหาการเรียงลำดับของการล้างวัตถุดิบที่ผิดพลาดโดยผู้ช่วยพ่อครัว	5	8	9	4	7	6	7	8	9	1.1
5	ความถี่ของการที่ผู้ช่วยพ่อครัวไม่สามารถจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารได้ในระยะเวลาอันเหมาะสม	10	8	11	9	7	10	8	11	13	4.9
6	ความถี่ในการถูกขัดจังหวะในการปรุงอาหารอันเนื่องจากการจัดเตรียมวัตถุดิบซึ่งไม่สอดคล้องกับลำดับในการล้างวัตถุดิบที่ถูกต้อง	7	7	3	6	8	4	4	6	8	2.8

จากตารางที่ 4 และ 5 บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการสรุปผลการสังเกตการณ์ก่อนและหลังจากการใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้นของกลุ่มตัวอย่างและได้รับผลการทดลองดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปผลการทดลอง

ลำดับ ที่	ผลการทดลอง			
	คำถามการทดลอง	ร้อยละของเวลาที่ปัญหา ก่อนการใช้งานระบบต่อรายการ อาหาร จำนวน 1,000 รายการ ในระยะเวลา 3 เดือน	ร้อยละของเวลาที่ปัญหา หลังการใช้งานระบบต่อรายการ อาหาร จำนวน 1,000 รายการ ในระยะเวลา 3 เดือน	ร้อยละของความแตกต่าง ของเวลาที่ในการเกิด ปัญหาก่อนและหลังการ ใช้งานระบบ
1. วัตถุประสงค์ในการวิจัย : เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าแต่ละรายด้วยแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ				
1	ระดับความถี่ของข้อผิดพลาดจากผู้ช่วยพ่อครัวที่พ่อครัวไม่อาจยอมรับได้	7.2	6.7	0.5
2	ระดับความถี่ของการที่กระบวนการปรุงอาหารถูกขัดจังหวะจากการที่ผู้ช่วยพ่อครัวมีความเข้าใจไม่ตรงกับที่พ่อครัวต้องการ	12.4	9.1	3.3
3	ปริมาณอาหารที่มีคุณภาพไม่ดีจากความผิดพลาดในการใช้ปริมาณวัตถุดิบที่ไม่มีความเหมาะสมกับอาหาร	5.4	2.4	3
2. วัตถุประสงค์ในการวิจัย : เพื่อลดระยะเวลาในการปรุงอาหารเพื่อให้บริการแก่ลูกค้าได้ตามเวลาที่คาดหวังด้วยแนวคิดของโลจิสติกส์เชิงดิจิทัล				
4	ความถี่จากการที่พ่อครัวประสบกับปัญหาการเรียงลำดับของการใส่ลงวัตถุดิบที่ผิดพลาดโดยผู้ช่วยพ่อครัว	7.4	6.3	1.1
5	ความถี่ของการที่ผู้ช่วยพ่อครัวไม่สามารถจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารได้ในระยะเวลาอันเหมาะสม	13.6	8.7	4.9
6	ความถี่ในการถูกขัดจังหวะในการปรุงอาหารอันเนื่องจากการจัดเตรียมวัตถุดิบซึ่งไม่สอดคล้องกับลำดับในการใส่ลงวัตถุดิบที่ถูกต้อง	8.1	5.3	2.8

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดลองลำดับที่ 1 หลังจากการใช้งานระบบพบความถี่ที่ลดลงของการทำงานที่ผิดพลาดของผู้ช่วยพ่อครัวจากร้อยละ 7.2 เหลือเพียงร้อยละ 6.7 โดยพบความแตกต่างที่ร้อยละ 0.5 ลำดับที่ 2 หลังการใช้งานระบบพบความถี่ที่ลดลงของการถูกขัดจังหวะในการปรุงอาหารอันเนื่องมาจากความเข้าใจที่ไม่ตรงกันระหว่างพ่อครัวและผู้ช่วยพ่อครัวจากร้อยละ 12.4 เหลือเพียงร้อยละ 9.1 โดยพบความแตกต่างที่ร้อยละ 3.3 ลำดับที่ 3 หลังจากการใช้งานระบบพบความถี่ที่ลดลงของปริมาณอาหารที่มีคุณภาพไม่ดีอันเนื่องจากการจัดเตรียมปริมาณวัตถุดิบที่ไม่เหมาะสมจากร้อยละ 5.4 เหลือเพียงร้อยละ 2.4 โดยพบความแตกต่างที่ร้อยละ 3 ดังนั้นบทความวิจัยฉบับนี้จึง ยอมรับ H_1 ปฏิเสธ H_0 โดยตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือสามารถนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารของผู้ช่วยพ่อครัวได้อันสะท้อนให้เห็นว่า บทความวิจัยฉบับนี้ได้บรรลุต่อวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าแต่ละรายด้วยแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ

จากผลการทดลองลำดับที่ 4 หลังจากการใช้งานระบบพบความถี่ที่ลดลงจากการที่พ่อครัวประสบปัญหาจากการเรียงลำดับวัตถุดิบที่ผิดพลาดโดยผู้ช่วยพ่อครัวจากร้อยละ 7.4 เหลือเพียงร้อยละ 6.3 โดยพบความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 1.1 ลำดับที่ 5 หลังการใช้งานระบบพบความถี่ที่ลดลงของการที่ผู้ช่วยพ่อครัวไม่สามารถจัดเตรียมวัตถุดิบในการปรุงอาหารได้ในระยะเวลาอันเหมาะสมจากร้อยละ 13.6 เหลือเพียงร้อยละ 8.7 โดยพบความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 4.9 และลำดับที่ 6 หลังจากการใช้งานระบบพบความถี่ที่ลดลงของการถูกขัดจังหวะในการปรุงอาหารอันเนื่องจากการจัดเตรียมวัตถุดิบ ซึ่งไม่สอดคล้องกับลำดับในการลำดับวัตถุดิบที่ถูกต้องจากร้อยละ 8.1 เหลือเพียงร้อยละ 5.3 โดยพบความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 2.8 ดังนั้นบทความวิจัยฉบับนี้จึงยอมรับ H_3 ปฏิเสธ H_2 โดยโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลสามารถช่วยลดระยะเวลาในการลำดับวัตถุดิบในการปรุงอาหารของพ่อครัวได้ อันสะท้อนให้เห็นว่า บทความวิจัยฉบับนี้ได้บรรลุต่อวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือ การลดระยะเวลาในการปรุงอาหารของพ่อครัวเพื่อให้บริการแก่ลูกค้าได้ตามเวลาที่คาดหวังด้วยแนวคิดของโลจิสติกส์เชิงดิจิทัล สอดคล้องกับผลลัพธ์จากงานวิจัยเรื่อง Determination of Material Handling Equipment for Lean In-Plant Logistics Using Fuzzy Analytical Network Process Considering Risk Attitudes of the Experts [16] ซึ่งได้พัฒนาและทดสอบการนำเอาตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเข้าไปวิเคราะห์อุปสรรคที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตแบบสิ้นเชิงเดียวกับบทความวิจัยฉบับนี้ ซึ่งมุ่งวิเคราะห์วัตถุดิบที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการวิจัยเรื่อง Supplier Selection Group Decision Making in Logistics Service Value Cocreation Based on Intuitionistic Fuzzy Sets [17] ซึ่งได้ทำการแปรูปข้อมูลเชิงนามธรรมให้กลายเป็นระดับความถี่ของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเช่นเดียวกับบทความวิจัยฉบับนี้เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการเพิ่มมูลค่าของการให้บริการของกระบวนการทางโลจิสติกส์ ตลอดจนสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการวิจัยเรื่อง The Future of Logistics in Emerging Markets-Fuzzy Clustering Scenarios Grounded in Institutional and Factor-Market Rivalry Theory [18] ซึ่งมีกระบวนการในการรวบรวมข้อมูลผ่านการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญจนกระทั่งได้ปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับการวางแผนด้านโลจิสติกส์เช่นเดียวกับบทความวิจัยนี้

ดังนั้นผลการทดลองได้พิสูจน์ประสิทธิภาพของกรอบแนวคิดตามทฤษฎีที่ได้เรียงร้อยเอาแนวคิดของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเข้ากับแนวคิดของโลจิสติกส์เชิงดิจิทัลเพื่อทำการบรรเทาข้อปัญหาในการวิจัย

ข้อสรุป

กรอบแนวคิดตามทฤษฎีสามารถถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการบริการด้านอาหารสำหรับธุรกิจบริการในการลดปัญหาในการจัดเตรียมวัตถุดิบและระยะเวลาอันเหมาะสมสำหรับการจัดเตรียมอาหารให้ตรงกับความต้องการอันหลากหลายของลูกค้า อย่างไรก็ตามการนำไปประยุกต์ใช้ยังสามารถนำกรอบแนวคิดตามทฤษฎีไปพัฒนาด้วยโปรแกรมประยุกต์อื่น ๆ เช่น โมบายแอปพลิเคชัน หรือซอฟต์แวร์ที่ถูกติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ และยังสามารถให้ผู้วิจัยรายอื่น ๆ ที่มีความสนใจในข้อปัญหาวิจัยที่คล้ายคลึงกันนี้ นำไปพัฒนาให้ได้มาซึ่งกรอบแนวคิดตามทฤษฎีที่ซับซ้อนและแก้ไขปัญหาได้ดียิ่งขึ้นต่อไป

References

- [1] Piensub, M. (2012.) **Okonomiyaki Japanese Pizza**. Access (7 July, 2017). Available (<https://www.youtube.com/watch?v=uM8MpQcgq6U>)
- [2] Turkalj, Fasic and Dujak. (2008). Conflict Management in Organization. **Interdisciplinary Management Research**. Vol. 4, pp. 505-515
- [3] Zadeh. (1892). **Fuzzy Sets**. Oxford: Clarendon
- [4] Wang, Y. J., Han, T. C., and Kao, C. S. (2012). A Fuzzy Decision-Making Model for Supplier Selection of Logistics. In **Proceedings of the 2012 Third International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications**. pp. 168-171. DOI: 10.1109/IBICA.2012.12
- [5] Alaoui, M. E. and Ben-Azza, H. (2017). Aggregation of Performance Indicators for Supply Chain and Fuzzy Logic Extensions Applied to Green Supply Chain. In **2017 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)**. Morocco: IEEE. pp. 36-41. DOI: 10.1109/logistiqua.2017.7962870
- [6] Kaya, I., Surmeli, G., and Erdogan, M. (2015). A Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Approach for Choosing a Logistics Center Location in Turkey. In **2015 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO 2015)**. Istanbul, Turkey 27 - 29 May 2015, pp. 1-6
- [7] Ajerame, M. (2017). Impact of Inter-Organizational Collaboration on Logistics Information Systems Adoption Case of Moroccan Agribusiness Companies. In **Proceeding of the International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)**. Morocco: IEEE, pp. 171-176.
- [8] Yi, G. (2013). Research on Electronic Commerce Logistic System Platform Based on System Dynamics. In **Proceeding of sixth International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII)**. China: IEEE, pp. 181-84
- [9] Sadok, T. and Nidhal, R. (2017). Study of the E-Maintenance SService in E-Logistic Supply Chain. In **Proceeding of the Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE)**. USA: IEEE, pp. 132-137
- [10] Siminski, R. and Xieski, T. (2017). Backward Chaining Inference as a Database Stored Procedure - the Experiments on Real-World Knowledge Bases. In **Proceeding of International Conference on Innovations in Intelligent System and Application (INISTA)**. Poland: IEEE, pp. 253-258
- [11] Moller, B. and Beer, M. (2005). **Fuzzy Randomness**. Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics.
- [12] Ramjan, S. (2018). Conceptual Framework of a Fuzzy Logic Forecasting Decision-Support System for Diaper Purchase to be Used in an Internet of Things Environment. In **Proceeding of the Sixth International Conference on Information Technology: Internet of Things and Smart City**, Hong Kong: ACM, p. 17

- [13] Wongnai. (2017). **Top 3 Japanese Hot Kitchen in Thailand**. Access (13 July, 2017). Available (<https://www.wongnai.com>)
- [14] Kaiwan. (2014). **Principle of Statistic and Application**. Bangkok: Chulalongkorn Press
- [15] Lee, S. H. and Lime, J. S. (2008). Forecasting Exchange Rate by Weighted Average Defuzzification Base NEWFM. In **Proceeding of the International Conference on Industrial Informatics**. South Korea: IEEE, pp. 1306-1041
- [16] Yilmaz, O. F., Durmusoglu, M. B., and Öztayşi, B. (2017). Determination of Material Handling Equipment for Lean In-Plant Logistics Using Fuzzy Analytical Network Process Considering Risk Attitudes of the Experts. **The International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice**. Vol. 24, No. 1, pp. 81-122
- [17] Wang, Q. and Lv, H. (2015). Supplier Selection Group Decision Making in Logistics Service Value Cocreation Based on Intuitionistic Fuzzy Sets. **Discrete Dynamics in Nature and Society**. Vol. 2015, pp. 1-10. DOI: 10.1155/2015/719240
- [18] Hirschinger, M., Spickermann, A., Hartmann, E., Gracht, H., and Darkow, I-. L. (2015). The Future of Logistics in Emerging Markets-Fuzzy Clustering Scenarios Grounded in Institutional and Factor-Market Rivalry Theory. **Journal of Supply Chain Management**. Vol. 51, Issue 4, pp. 73-93. DOI: 10.1111/jscm.12074

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเหงือกช้าง ช้างไทย มะเดื่ออินเดีย และผลด้านความเป็นพิษต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์

Antioxidant Activity of *Markhamia stipulata*, *Caryota maxima*, *Amphineurion marginatum* Extracts and Cytotoxicity Effect on Human Dermal Fibroblast Cells

นวลไย ยารักษา^{1*}

Nualyai Yaraksa^{1*}

Received: December 6, 2018; Revised: February 1, 2019; Accepted: February 6, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากพืชสมุนไพรไทย 3 ชนิด ได้แก่ เหงือกช้าง (*Markhamia stipulata*) ช้างไทย (*Caryota maxima*) และมะเดื่ออินเดีย (*Amphineurion marginatum*) และศึกษาผลด้านความเป็นพิษของสารสกัดต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ โดยสกัดสารด้วยตัวทำละลายเมทานอลหาปริมาณฟีนอลรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu วิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay และวัดความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนอิสระด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) Assay ผลการศึกษาพบว่า สารสกัดจากมะเดื่ออินเดียมีปริมาณฟีนอลรวมมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 106.34 ± 2.40 mgGAE/g extract และยังมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด เมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 11.15 ± 0.01 mg/L และความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระของสารสกัดเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP พบว่าสารสกัดทั้งหมดมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระ และมีฤทธิ์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่ใช้ โดยพบว่าสารสกัดจากมะเดื่ออินเดีย มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระได้ดีที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดจากช้างไทย และสารสกัดจากเหงือกช้าง ตามลำดับ ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ของสารสกัดสมุนไพร พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 62.5 ถึง 1,000 mg/L สารสกัดช้างไทย ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ ส่วนสารสกัดจากเหงือกช้าง และสารสกัดมะเดื่ออินเดียแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากช้างไทยและ

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี อุบลราชธานี

¹ Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University, Ubon Ratchathani

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

มะเดื่อดินที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลมีสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี แต่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ต่ำ

คำสำคัญ : ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ; สารสกัดสมุนไพร; แคหางค่าง; เชื้อใหญ่; มะเดื่อดิน

Abstract

The aims of this study were to investigate antioxidant activity of crude extracts from three Thai medicinal plants (*Markhamia stipulata*, *Caryota maxima* and *Amphineurion marginatum*) and examine the cytotoxicity effect on human dermal fibroblast cells. The solvent used for extraction was methanol. The Folin-Ciocalteu analysis was used for the standard method of phenolic determination and the antioxidant was evaluated by 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging capacity (DPPH) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays. The results showed that the extract of *Amphineurion marginatum* had the highest total phenolic content of 106.34 ± 2.40 mgGAE/g extract and the highest antioxidant capacity against DPPH with IC_{50} value of 11.15 ± 0.01 mg/L. For the reducing capability of all extracts with FRAP method, they showed the reducing antioxidant activities and possessed concentration dependence by which *Amphineurion marginatum* extract revealed highest reducing ferric ability followed by *Caryota maxima* and *Markhamia stipulata* extracts, respectively. The cytotoxic assay of the extracts on human dermal fibroblast cells revealed that *Caryota maxima* extract showed did not have cytotoxic effects at concentrations of 62.5 - 1,000 mg/L. The extracts of *Markhamia stipulata* and *Amphineurion marginatum* were cytotoxic at concentration of 1,000 mg/L. The results suggested that *Caryota maxima* and *Amphineurion marginatum* extracts showed promising antioxidant effect but low cytotoxicity effect on human dermal fibroblast cells.

Keywords: Antioxidant Activity; Medicinal Plant Extracts; *Markhamia stipulata*; *Caryota maxima*; *Amphineurion marginatum*

บทนำ

อนุมูลอิสระในร่างกาย มีปัจจัยที่เกิดขึ้นมากมายทั้งภายนอกและภายในร่างกาย สารที่นำมาใช้ต่อต้านหรือยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระ เรียกว่า สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) โดยสารต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้มีกลไกการทำงานต้าน อนุมูลอิสระด้วยกันหลายแบบ เช่น ดักจับอนุมูลอิสระ (Radical Scavenging) การยับยั้งการทำงานของออกซิเจนที่ขาดอิเล็กตรอน (Singlet Oxygen Quenching) จับกับโลหะที่สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Metal Chelation) หยุดปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ (Chain-Breaking)

เสริมฤทธิ์ (Synergism) และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Inhibition) ที่เร่งปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ เป็นต้น [1] จึงช่วยยับยั้งอนุมูลอิสระไม่ให้ทำลายองค์ประกอบของเซลล์ วิถีชีวิตในปัจจุบันที่เปลี่ยนแปลงไป การไม่ใส่ใจสุขภาพ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการคัดเลือกคุณค่า และปริมาณของอาหารที่รับประทานที่ไม่เหมาะสม การพักผ่อนไม่เพียงพอ ไม่มีเวลาสำหรับการออกกำลังกายและมลภาวะรอบตัว ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่เพิ่มอนุมูลอิสระในตัวเรา ซึ่งในทางการแพทย์พบว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เซลล์เสื่อมนำไปสู่การแก่ชราหรือความเสียหายต่อการเกิดโรคต่าง ๆ เช่น โรคหัวใจ โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น [2] ทำให้พบปัญหาสุขภาพจากโรคเรื้อรังมากขึ้นในช่วงอายุที่น้อยลงด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลที่ทำให้ต้องใช้ยาในการรักษา แต่การใช้ยารักษาในปริมาณมากเป็นเวลานาน ๆ อาจจะส่งผลเสียต่อร่างกายได้เช่นเดียวกัน แต่ในปัจจุบันมีอีกหนทางเลือกในการรักษาโรคคือ การใช้พืชสมุนไพร การบริโภคผักและผลไม้ ซึ่งมีส่วนประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด โดยพืชเป็นแหล่งของสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น cucurminoids จาก *Curcumaca cassumunar* และ catechin derivatives จากชา *Thea sianensis* เป็นต้น [3] โดยกลุ่มของสารต้านอนุมูลอิสระส่วนใหญ่ที่พบในสมุนไพรได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก แคโรทีนอยด์ ฟลาโวนอยด์และวิตามินต่าง ๆ [4]

กระแสนิยมด้านสมุนไพรกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว เป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้สมุนไพรเพื่อเป็นยารักษาโรค เป็นองค์ประกอบสำคัญหรือเป็นสารออกฤทธิ์ในเวชสำอาง และเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่อุดมไปด้วยทรัพยากรสมุนไพรที่หลากหลายทางผู้วิจัยมีความสนใจเกี่ยวกับสมบัติของพืชสมุนไพรไทยที่มีฤทธิ์ในการรักษาบาดแผล และรักษาโรคผิวหนัง พืชสมุนไพรที่ช่วยในการรักษาบาดแผล ส่วนใหญ่จะมีสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณสูง สารสกัดสมุนไพรจะทำหน้าที่ดักจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอักเสบในขณะที่เกิดบาดแผล และนอกจากนี้ยังส่งเสริมการกระตุ้นเซลล์ไฟโบรบลาสต์ เอ็นโดเธลิอัล และเคราติโนไซต์ ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการหายของบาดแผล [5] จากภูมิปัญญาท้องถิ่นพบว่าพืชสมุนไพรแคหางค่าง (*Markhamia stipulata*) เชือกใหญ่ (*Caryota maxima*) และมะเดื่อดิน (*Amphineurion marginatum*) มีสมบัติช่วยในการหายของบาดแผล โดยเฉพาะแผลที่พุพอง เป็นตุ่มหนอง โดยจะพบได้มากตามป่าเบญจพรรณ ป่าเต็งรัง ป่าหญ้า ทางภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ และทางภาคตะวันออกเฉียงใต้ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [6] พบว่า สารสกัดหยาบที่สกัดด้วยเมทานอลและเอทานอลของพืชสมุนไพรทั้ง 3 ชนิดนี้ มีความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *Vibrio cholerae* (clinical), *Staphylococcus aureus* ATCC25923, *Staphylococcus epidermidis* ATCC12228 และ *Escherichia coli* ATCC25922 และสารสกัดมะเดื่อดินสามารถยับยั้งการสร้างสารไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide, NO) ในเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) ซึ่งเป็น inflammatory mediator ที่สำคัญในกระบวนการอักเสบ แต่พบว่าสารสกัดหยาบที่สกัดด้วยเอทานอลมีความเป็นพิษต่อเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) เป็นไปได้ว่าสารสกัดจากพืชสมุนไพรทั้ง 3 ชนิดนี้น่าจะมีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาสารประกอบฟีนอลิก ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากพืชสมุนไพรไทย 3 ชนิด ได้แก่ แคหางค่าง เชือกใหญ่ และมะเดื่อดิน ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [6] พบว่าสารสกัดที่ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) จากนั้นศึกษาผลด้านความเป็นพิษต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ ซึ่งเป็น

ด่านแรกในการสัมผัสกับสารเคมีโดยตรงเป็นตัวทดสอบ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำพืชสมุนไพรนี้ไปประยุกต์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ผลัดกันที่บำรุงผิวพรรณหรือเครื่องสำอางที่ได้จากธรรมชาติแทนสารสังเคราะห์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แหล่งที่มาของตัวอย่างพืช

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย คือ พืชสมุนไพร 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย แคหางค่าง เขืองใหญ่ และมะเดื่อดิน จากพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้วัดป่าดงไทรทอง อำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี เก็บตัวอย่างช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 ขอความอนุเคราะห์ศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อระบุชื่อวิทยาศาสตร์

2. การสกัดสมุนไพรด้วยเมทานอล

นำส่วนเปลือกไม้ของสมุนไพรที่ใช้ทดสอบมาอบแห้งแล้วบดหยาบ ซึ่งตัวอย่างพืชอบแห้งที่บดแล้ว 500 กรัม แช่ด้วยเมทานอลด้วยอัตราส่วนสมุนไพรต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 วัน กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman filter paper เบอร์ 1 และนำไประเหยแห้งด้วยเครื่อง Rotary evaporator (BÜCHI Rotavapor R-124, Marshall Scientific) ทำการหมักซ้ำ 3 รอบ นำสารสกัดที่ได้ไประเหยแยกตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบลดความดันโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 50 - 60 องศาเซลเซียส (°C) จนได้ของเหลวเหนียว จากนั้นชั่งน้ำหนักสารและคำนวณหาปริมาณเนื้อสารที่สกัดได้ (% yield) และนำสารสกัดไปเก็บที่อุณหภูมิ -20 °C เพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

3. การหาปริมาณฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent

ดัดแปลงวิธีการทดลองจาก Singleton, V. L. and Rossi, J. A. [7] ซึ่งสารสกัดหยาบสมุนไพร 0.1 g ละลายในเมทานอล 10 mL จากนั้นปิเปตสารสกัด 100 μ L ใส่ในหลอดทดลองเติมน้ำกลั่น 4.5 mL เติม Folin-ciocalteu's reagent 100 μ L และเติม 7 % Na_2CO_3 300 μ L ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Lambda 12, Perkin Elmer) นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิกที่ระดับความเข้มข้น 50 100 150 200 และ 250 mg/L

4. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging assay

ดัดแปลงวิธีการทดลองจาก Kriengsak, T., et al. [8] เตรียมสารละลายของสารสกัดหยาบและสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกให้มีความเข้มข้น 6.25 12.5 25 และ 50 mg/L ปิเปตสารละลายของสารสกัดแต่ละความเข้มข้นใส่ในขวดสีชาจำนวน 3 ขวด ขวดละ 400 μ L จากนั้นเติม 6 μ M DPPH 3.8 mL นำไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Lambda 12, Perkin Elmer) นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเกิดออกซิเดชันเป็น % Inhibition (% Inhibition = $[(\text{Abs}_{\text{DPPH}} - \text{Abs}_{\text{DPPH+test}}) \times 100] / \text{Abs}_{\text{DPPH}}$ เขียนกราฟระหว่าง % Inhibition และความเข้มข้น รายงานเป็นค่า IC_{50} (50 % Inhibition concentration) และเทียบกับสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก

5. การวัดความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนอิสระ ด้วยวิธี **Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) assay**

ดัดแปลงวิธีการทดลองจาก สุชาติา มานอก และปวีณา ลิ้มเจริญ [9] วิธีเตรียมสารละลาย **FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)** ทำได้โดยการเตรียมสารละลาย acetate buffer pH 3.6, 10 mM TPTZ (2,4,6-tripyridyl-s-triazine) ในสารละลาย 40 mM ของ HCl และ 20 mM ของ ferric chloride แล้วนำมาผสมกันในสัดส่วน 10 : 1 : 1 (V/V) ตามลำดับ จะได้สารละลายที่เรียกว่า สารละลาย FRAP [10] จากนั้นเตรียมสารละลายของสารสกัดหยาบ 3 ความเข้มข้น คือ 1,000 500 และ 250 ppm

วิธีวิเคราะห์ ปิเปตสารละลายของสารสกัดแต่ละความเข้มข้นมา 300 μL ใส่ในขวดสีชาสามขวดต่อหนึ่งความเข้มข้น เติม 3 mL ของสารละลาย FRAP นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 60 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร โดยใช้ FRAP reagent เป็นกลุ่มควบคุม คำนวณความสามารถในการให้อิเล็กตรอน (FRAP value) โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐานของ Ferrous sulfate (FeSO_4) แสดงค่าในรูปมิลลิกรัมสมมูลของ Fe^{2+} /กรัมสารสกัด (mg Fe^{2+} equivalent/g sample extract)

6. ทดสอบความเป็นพิษของสารสกัดสมุนไพรต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ ด้วยวิธี **MTT assay**

เพาะเลี้ยงเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ (Normal Human Dermal Fibroblast; NHDF) ในอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิด Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM) ที่มีส่วนประกอบของ 10 % (v/v) fetal bovine serum, 100 U/mL penicillin, 100 mg/L streptomycin และ 25 mg/L amphotericin B จากนั้นนำไปเลี้ยงใน CO_2 incubator ที่มีปริมาณ CO_2 อยู่ 5 % อุณหภูมิ 37 $^{\circ}\text{C}$ และทำการ sub-cultured ทุก ๆ 3 วัน นำเซลล์ไฟโบรบลาสต์มาเลี้ยงในงานเพาะเลี้ยงเซลล์ 96 หลุม ที่มีอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิด DMEM เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยให้มีปริมาณเซลล์เท่ากับ 1×10^5 เซลล์ต่อ 1 well จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใน CO_2 incubator ที่มีปริมาณ CO_2 อยู่ 5 % อุณหภูมิ 37 $^{\circ}\text{C}$ หลังจากครบ 24 ชั่วโมง เปลี่ยนอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิดเดิมออก และเปลี่ยนเป็นอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีสารสกัดสมุนไพรอยู่ในความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (62.5 - 1,000 mg/L) ส่วนกลุ่มควบคุม (control) คือ เซลล์ไฟโบรบลาสต์ที่ไม่ได้รับสารสกัดสมุนไพร จากนั้นนำไปเลี้ยงใน 5 % CO_2 incubator ที่มีอุณหภูมิ 37 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดูอาหารเลี้ยงเซลล์ออกจากงานเพาะเลี้ยงเซลล์ 96 หลุม เปลี่ยนเป็นอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีสาร MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide) ละลายอยู่ในความเข้มข้น 0.5 mg/ml จากนั้นนำไปเลี้ยงใน CO_2 incubator ที่มีปริมาณ CO_2 อยู่ 5 % อุณหภูมิ 37 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที เปลี่ยนถ่ายอาหารเลี้ยงเซลล์ออกจากงานเพาะเลี้ยงเซลล์ 96 หลุม จากนั้นเติม 100 % DMSO ปริมาณ 150 μL /well เพื่อละลายผลึก formazan salt ผสมสารละลายให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวแล้วจึงนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 nm โดยใช้เครื่อง Microplate reader (Model 680, BioRad) โดยสาร MTT จะถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบสีม่วง formazan โดยเอนไซม์ mitochondrial dehydrogenase ในเซลล์ที่มีชีวิต ค่าความเข้มของสีที่ได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเซลล์ที่ยังมีชีวิตอยู่ คำนวณค่าร้อยละความมีชีวิต (Cell Viability) ของเซลล์ไฟโบรบลาสต์ที่ได้รับสารสกัดสมุนไพรในความเข้มข้นต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสารสกัดสมุนไพร โดยแสดง

ค่าร้อยละความมีชีวิตในรูปของ % of control โดยให้กลุ่มที่ไม่ได้รับสารสกัดสมุนไพรมีค่าร้อยละความมีชีวิตเท่ากับ 100 %

7. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D. (n = 3) (P < 0.05) ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) โดยวิธี Dunnett's test

ผลการวิจัย

1. การสกัดสารจากสมุนไพร

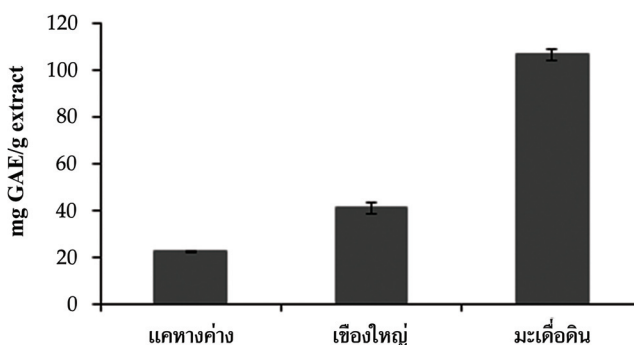
สมุนไพรไทยจำนวน 3 ชนิด เมื่อนำมาสกัดด้วยเมทานอลได้สารสกัดที่ได้มีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งสารสกัดแคะทางค่างได้ผลผลิต (%yield) สูงสุดคือร้อยละ 8.19

ตารางที่ 1 ลักษณะของสารสกัดสมุนไพรและร้อยละของสารสกัดค่อน้ำหนักแห้ง (%Yield)

ชนิดของสารสกัดหยาบ	ลักษณะของสารสกัด	%Yield
แคะทางค่าง	เหนียว สีแดงอมส้ม	8.19
เชียงใหญ่	เหนียวข้น สีเขียวเข้ม	5.70
มะเดื่อดิน	เหนียวข้น สีแดงอมสีน้ำตาล	4.45

2. การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

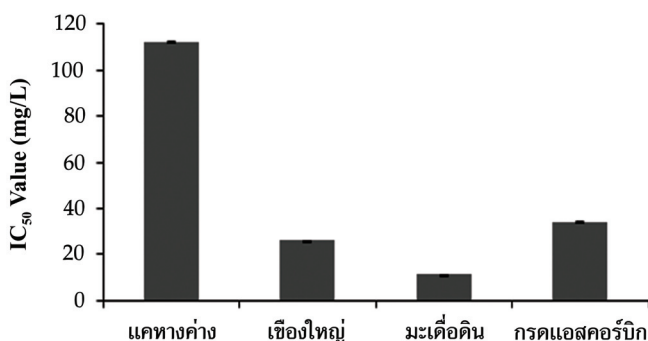
ในการทดสอบสารสกัดพืชสมุนไพรไทย 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย แคะทางค่าง เชียงใหญ่ และมะเดื่อดิน ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลพบว่า สารสกัดจากมะเดื่อดินมีปริมาณฟีนอลิกรวมมากที่สุด คือ 106.34 ± 2.40 mgGAE/g extract รองลงมาคือ สารสกัดเชียงใหญ่ มีปริมาณฟีนอลิกรวมเท่ากับ 40.78 ± 2.72 mgGAE/g extract และสารสกัดแคะทางค่างมีปริมาณฟีนอลิกรวมน้อยที่สุด คือ 22.15 ± 0.58 mgGAE/g extract ผลแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดหยาบจากแคะทางค่าง เชียงใหญ่ และมะเดื่อดิน

3. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay

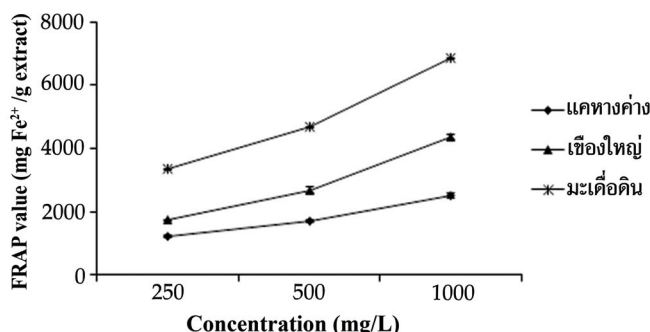
จากการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในหลอดทดลองเมื่อทดสอบความสามารถในการจับอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่า สารสกัดจากมะเดื่อดินมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้มากที่สุด โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 11.15 ± 0.01 mg/L รองลงมาคือ สารสกัดจากเชื้องใหญ่ กรดแอสคอร์บิก และสารสกัดจากแห้วหางค่าง โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 26.07 ± 0.02 , 34.22 ± 0.01 และ 112 ± 0.27 mg/L ตามลำดับ ผลแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตามวิธี DPPH assay ของสารสกัดหยาบจากแห้วหางค่าง เชื้องใหญ่ มะเดื่อดิน และกรดแอสคอร์บิก

4. การวัดความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนอิสระ ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) assay

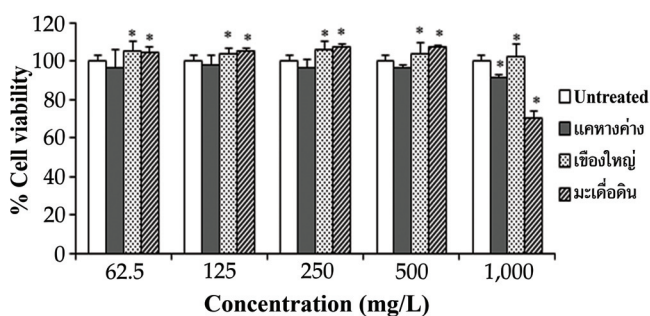
ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP assay ของสารสกัดสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด พบว่าสารสกัดหยาบจากพืชสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระ และมีฤทธิ์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่ใช้ แต่มี FRAP value (mg Fe^{2+} equivalent/g sample extract) ที่แตกต่างกัน เช่น เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L จะเห็นลำดับของความสามารถในการให้อิเล็กตรอนจากสูงไปต่ำดังนี้ คือ สารสกัดจากมะเดื่อดิน สารสกัดจากเชื้องใหญ่ และสารสกัดจากแห้วหางค่าง ตามลำดับ โดยค่า FRAP value (mg Fe^{2+} equivalent/g sample extract) ของสารสกัดสมุนไพรทั้ง 3 ชนิดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตามวิธี FRAP assay ของสารสกัดหยาบจากแควทางค่าง เชียงใหญ่ และมะเดื่อดิน

5. การทดสอบความเป็นพิษของสารสกัดสมุนไพรต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ด้วยวิธี MTT assay

ผลการทดสอบความเป็นพิษของสารสกัดสมุนไพรไทย 3 ชนิดต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของมนุษย์ พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 62.5 ถึง 1,000 mg/L สารสกัดจากเชียงใหญ่ ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ ส่วนสารสกัดจากแควทางค่าง และสารสกัดจากมะเดื่อดิน ที่ความเข้มข้น 62.5 - 500 mg/L ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นถึง 1,000 mg/L จะแสดงความเป็นพิษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเป็นที่น่าสนใจว่า สารสกัดจากเชียงใหญ่และสารสกัดจากมะเดื่อดินสามารถกระตุ้นให้เซลล์แบ่งตัวเพิ่มจำนวน (Cell Proliferation) ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (เซลล์ที่เลี้ยงในอาหารที่มีเฉพาะ 0.5 % DMSO) ผลแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ร้อยละความมีชีวิต (% Cell Viability) ของเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ เมื่อทดสอบด้วยสารสกัดหยาบจากแควทางค่าง เชียงใหญ่ และมะเดื่อดิน

* แสดงถึงความแตกต่างของชุดข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Untreated control)

การอภิปรายผล

สำหรับการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดพืชสมุนไพรไทย 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย แคทางค่าง เชื้อใหญ่ และมะเดื่อดิน ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลในครั้งนี้ เลือกการทดสอบคุณสมบัติในการเป็น ตัวขจัดอนุมูลอิสระ (Free radical scavenger) ด้วยวิธี DPPH ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย สะดวก และรวดเร็ว เนื่องจาก DPPH เป็นอนุมูลอิสระที่ค่อนข้างเสถียร โดยอนุมูล DPPH[•] เป็นอนุมูลไนโตรเจนคงตัว มีสีม่วง อยู่ในรูปอนุมูลอยู่แล้ว ไม่ต้องทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลเหมือนกับกรณีอนุมูล ABTS^{•+} โดยเป็นการวัด ความสามารถของสารทดสอบในการกำจัดอนุมูลอิสระโดยวิธีไฮโดรเจนอะตอม ซึ่งเป็นวิธีเบื้องต้นที่นิยมใช้ ในการทดสอบการต้านอนุมูลอิสระโดยทั่วไป [9] โดยผลที่ได้จากการทดลองวิธีนี้ แสดงให้เห็นว่าสารสกัด จากพืชสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ดี โดยสารสกัดจากมะเดื่อดินมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูล อิสระได้ดีที่สุด อีกทั้งยังมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่า กรดแอสคอร์บิก และยังสอดคล้องกับ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม โดยพบว่าสารสกัดจากมะเดื่อดินมีปริมาณฟีนอลิกรวมมากที่สุด (106.34±2.40 mgGAE/g extract) ซึ่งปริมาณฟีนอลิกที่สูงจะส่งผลให้มีความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระสูง เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีโครงสร้างหลักประกอบด้วย วงอะโรมาติกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนมากเป็นสารที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายจำพวกแอลกอฮอล์ได้ดี กลไกของสารจำพวกฟีนอลที่แสดง ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ คือ เมื่อมีอนุมูลอิสระมาติดอิเล็กตรอนไปแต่โครงสร้างมีอิเล็กตรอนหนาแน่น จึงสามารถเกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนไปทั่วโครงสร้าง (Delocalization) ทำให้โครงสร้างเสถียร ไม่เกิดเป็นอนุมูลอิสระต่อไป ปฏิกิริยาลูกโซ่จึงสิ้นสุดลง [9] นอกจากนี้ยังได้ศึกษาสมบัติในการเป็นตัวให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างแก่อนุมูลอิสระที่สังเคราะห์ขึ้นภายในระบบ โดยอาศัยการวัดปฏิกิริยา Reduction ของ Fe³⁺-TPTZ ไปเป็น Fe²⁺-TPTZ ด้วยวิธี FRAP assay ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับวิธี DPPH โดยสารสกัดจากมะเดื่อดินมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สามารถให้อิเล็กตรอนในการรีดิวซ์ Fe³⁺ เป็น Fe²⁺ ได้ดีที่สุด จากงานวิจัยครั้งนี้พบว่า สารสกัดที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันได้ดี มีความสามารถในการช่วยลด การอักเสบได้ กล่าวคือ สารสกัดจากมะเดื่อดินซึ่งมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้ดีที่สุด สามารถยับยั้งการสร้างสารไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide, NO) ในเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) ซึ่งเป็น inflammatory mediator ที่สำคัญในกระบวนการอักเสบ [6] โดยสารสกัดสมุนไพรที่มีฤทธิ์ต้าน ออกซิเดชันจะทำหน้าที่ดักจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอักเสบในขณะที่เกิดบาดแผล และนอกจากนี้ ยังส่งเสริมการกระตุ้นเซลล์ไฟโบรเบลสต์ เอ็นโดทีเลียล และเคราติโนไซต์ ซึ่งเป็นเซลล์ที่บทบาทสำคัญ ในกระบวนการหายของบาดแผล [5] เนื่องจากสารสกัดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นสารสกัดหยาบ ซึ่งประกอบด้วยสารพฤษเคมีหลายชนิด ซึ่งต้องมีการศึกษาโครงสร้างเพื่อระบุชนิดของสารที่เป็นตัวออก ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่อไป

เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำสารสกัดจากพืชสมุนไพร 3 ชนิดไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ยา หรือครีมบำรุงผิวที่ช่วยต้านอนุมูลอิสระได้อย่างปลอดภัย ผู้วิจัยได้ศึกษาผลด้านความเป็นพิษต่อเซลล์ ชนิดไฟโบรเบลสต์ของผิวหนังมนุษย์ พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 62.5 - 1,000 mg/L สารสกัดเชื้อใหญ่ ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรเบลสต์ของผิวหนังมนุษย์ ส่วนสารสกัดแคทางค่างและสารสกัด มะเดื่อดินที่ความเข้มข้น 62.5 - 500 mg/L ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ และเป็นที่น่าสนใจว่า

สารสกัดจากเชียงใหญ่และสารสกัดจากมะเดื่อดินสามารถกระตุ้นให้เซลล์แบ่งตัวเพิ่มจำนวน (Cell Proliferation) ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (เซลล์ที่เลี้ยงในอาหารที่มีเฉพาะ 0.5 % DMSO) ซึ่งคาดว่าสารสกัดจากพืชสมุนไพรสองชนิดนี้มีผลต่อการกระตุ้นการสร้างเซลล์ไฟโบรบลาสต์ในชั้นผิวหนัง ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการหายของบาดแผล แต่สารสกัดจากแคหางค่างและสารสกัดจากมะเดื่อดินเมื่อเพิ่มความเข้มข้นถึง 1,000 mg/L จะแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ ซึ่งให้ผลคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Satsue, S. et al. [11] ที่ศึกษาฤทธิ์ต้านออกซิเดชันและฤทธิ์กระตุ้นการสร้างคอลลาเจนในเซลล์เพาะเลี้ยงของสารสกัดด้วยน้ำ และเอทานอลของพืช 2 ชนิดคือ บัวบก และแกนสับปะรด พบว่าที่ความเข้มข้น 500 mg/L มีฤทธิ์กระตุ้นการเพิ่มจำนวนของเซลล์ซึ่งที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L ของสารสกัดใบบัวบกด้วย 95 % เอทานอล อาจมีความเป็นพิษต่อเซลล์ได้

บทสรุป

จากผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากพืชสมุนไพรไทย 3 ชนิด ได้แก่ แคหางค่าง เชียงใหญ่ และมะเดื่อดิน พบว่าสารสกัดจากมะเดื่อดินมีปริมาณฟีนอลิกรวมมากที่สุด และยังมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าสารสกัดจากเชียงใหญ่ กรดแอสคอร์บิก และสารสกัดแคหางค่าง เมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH assay และความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระของสารสกัดเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP assay โดยพบว่าสารสกัดจากมะเดื่อดินสามารถให้อิเล็กตรอนอิสระได้ดีที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดจากเชียงใหญ่ และสารสกัดแคหางค่าง ตามลำดับ และมีฤทธิ์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่ใช้ ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ชนิดไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ของสารสกัดสมุนไพรพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 62.5 - 1,000 mg/L สารสกัดจากเชียงใหญ่ ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ ส่วนสารสกัดจากแคหางค่าง และสารสกัดจากมะเดื่อดินแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากเชียงใหญ่และมะเดื่อดินที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลมีสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี และยังแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์ต่ำ จึงควรศึกษากลไกการออกฤทธิ์เพื่อนำไปพัฒนาเป็นยาหรือผลิตภัณฑ์บำรุงผิวต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้วัดป่าดงไทรทอง อำเภอทุ่งฝน จังหวัดอุดรธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่เก็บตัวอย่างพืชสมุนไพร และขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยโปรตีนและโปรตีโอมิกส์เพื่อการพาณิชย์และอุตสาหกรรม (ศปพ.) มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างเซลล์ไฟโบรบลาสต์ของผิวหนังมนุษย์และอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง และสถานที่ทำการทดลอง

References

- [1] Phansawan, B. (2013). Free radicals, Antioxidants and Antioxidant Activity Determination. **Journal Science and Technology**. Vol. 21, No. 3, pp. 275-286 (in Thai)
- [2] Papus, M. A. (1998). **Antioxidants Status, Diet, Nutrition and Health**. U.S.A: CRC Press
- [3] Kaewamatawong, R. and Jounmunkong, Z. (2006). DPPH Free Radical Scavenging Activity and Total Phenol Compounds Content of Some Thai Medicinal Plant Extracts. **Journal of Ubon Ratchathani university**. Vol. 8, No. 2, pp. 76-88 (in Thai)
- [4] Halee, A. and Rattanapun, B. (2017). Study of Antioxidant Efficacies of 15 Local Herbs. **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 40, No. 2, pp. 283-293 (in Thai)
- [5] Ipek, S., Esra, K. A., Lutfun, N., and Satyajit, D. S. (2012). Wound Healing and Antioxidant Properties: Do They Coexist in Plants?. **Free Radicals and Antioxidants**. Vol. 2, Issue 2, pp. 1-7
- [6] Yaraksa, N. (2019). Antibacterial Activity Against four Human Pathogenic Bacteria and Anti-inflammatory Activity Evaluated from Five Thai Medicinal Plants. **SNRU Journal of Science and Technology**. Vol. 11, No. 1, pp. 1-10
- [7] Singleton, V. L. and Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**. Vol. 16, pp. 144-158
- [8] Kriengsak, T., Unaroj, B., Kevin, C., Luis, C.-Z., and David, H. B. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC Assays Forestimating Antioxidant Activity from Guava Fruit Extracts. **Journal of Food Composition and Analysis**. Vol. 19, pp. 669-675. DOI: 10.1016/j.jfca.2006.01.003
- [9] Manok, S. and Limcharoen, P. (2015). Investigating Antioxidant Activity by DPPH, ABTS and FRAP Assay and Total Phenolic Compounds of Herbal Extracts in Ya-Hom Thepphachit. **Advanced Science**. Vol. 15, No. 1, pp. 106-117
- [10] Sharma, N. K., Dey, S., and Prasad, R. (2007). In Vitro Antioxidant Potential Evaluation of *Euphorbia hirta* L. **Pharmacologyonline**. Vol. 1, pp. 91-98
- [11] Satsue, S., Thapphasaraphong, S., and Damrongrungruang, T. (2014). Antioxidant and Collagen Stimulating Activities in Human Gingival Fibroblast Cell Culture of Plant Extracts. **Isan Journal of Pharmaceutical Sciences**. Vol. 9, (Supplement), pp. 38-43 (in Thai)

เครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับสถานการณ์ภัยพิบัติ Ad Hoc Network for Disaster Scenario

ณัฐกานต์ ชุติมารังสรรค์^{1*} และวีรยุทธ ชุติมารังสรรค์²

Nattakarn Shutimarrungson^{1*} and Werayut Shutimarrungson²

Received: August 7, 2018; Revised: November 19, 2018; Accepted: November 20, 2018

บทคัดย่อ

บทความนำเสนอการศึกษารูปแบบเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ โดยศึกษาถึงรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่าย รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนด โพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเฉพาะกิจ การวัดประสิทธิภาพของเครือข่ายที่ออกแบบรวมถึงศึกษาประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง การศึกษาถึงรูปแบบเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัตินั้นเพื่อใช้ในการปรับปรุงเครือข่ายเฉพาะกิจในการเกิดเหตุฉุกเฉินหรือสถานการณ์ภัยพิบัติเพื่อให้อุปกรณ์สื่อสารหรือโหนดที่อยู่ในเครือข่ายสามารถติดต่อสื่อสาร ส่งข้อมูล ค้นหา และกู้ภัย ให้มีความรวดเร็ว มีประสิทธิภาพและมีผู้รอดชีวิตจากเหตุการณ์ภัยพิบัติมากที่สุด

คำสำคัญ : เครือข่ายเฉพาะกิจ; เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย; เครือข่ายแบบผสม; สถานการณ์ภัยพิบัติ; ภัยพิบัติ

¹ คณะการบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Mahasarakham Business School, Mahasarakham University

² คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

² Faculty of Education, Roi-Et Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: nattakarn.b@acc.msu.ac.th

Abstract

This paper presents a survey on ad hoc network for disaster scenario. This research surveyed the five areas of research fields, connection models, communication techniques, mobility models, routing protocols and efficient routing protocol which these fields are relevant to each other. A study of the Ad hoc network in disaster scenario was used to improve an ad hoc network in disaster situation so that communication devices or nodes in the network could communicate, transmit information search and rescue for more effectiveness and better chance of survivors in disasters.

Keywords: Ad Hoc Network; Wireless Sensor Network; Hybrid Network; Disaster Scenario; Disaster

บทนำ

ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Network) สามารถแบ่งได้ตามรูปแบบทอพอโลยี (Topology) ได้เป็น 2 ประเภท คือระบบเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้าง (Infrastructure Wireless Network) และระบบเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้าง (Infrastructureless Wireless Network) ตัวอย่างการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายแบบมีโครงสร้าง เช่น ระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ หากผู้ใช้โทรศัพท์มือถือต้องการติดต่อสื่อสารไปยังผู้รับจะต้องทำการสื่อสารผ่านสถานีฐานเพื่อใช้ในการค้นหาเส้นทางที่จะสื่อสารไปยังปลายทาง แต่ในระบบเครือข่ายไร้สายแบบไม่มีโครงสร้างนั้น จะไม่มีสถานีฐานที่ใช้ในการค้นหาเส้นทาง เช่น เครือข่ายเฉพาะกิจ (Ad Hoc Network) ซึ่งเป็นชนิดของเครือข่ายไร้สายที่อุปกรณ์สื่อสาร (Smart Phones/Tablets) หรือโหนด (Node) มีการเชื่อมต่อกันได้โดยตรงโดยแต่ละอุปกรณ์สื่อสารหรือโหนด (Node) จะเคลื่อนที่และอยู่บนพื้นฐานของการกำหนดค่าเครือข่ายของตนเองโดยไม่มีโครงสร้างพื้นฐาน ไม่ต้องอาศัยเสาโทรศัพท์มือถือหรือสถานีฐาน เครือข่ายเฉพาะกิจจะใช้อุปกรณ์สื่อสารหรือโหนดทำหน้าที่ค้นหาเส้นทางและทำหน้าที่เป็นโหนดระหว่างทางในการส่งต่อข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง [1] เครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจนี้สามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะปรับการทำงานได้มากขึ้นกว่าเครือข่ายชนิดไร้สายหรือชนิดมีสาย สามารถรองรับเหตุการณ์ที่คาดไม่ถึงได้ดี [2] และโหนดใด ๆ ในเครือข่ายสามารถเข้าหรือออกจากเครือข่ายได้อย่างอิสระโดยไม่ต้องได้รับอนุญาตจากอุปกรณ์หรือระบบเครือข่ายใด ๆ

ปัจจุบันได้มีการนำเครือข่ายเฉพาะกิจไปประยุกต์ใช้ในหลายสถานการณ์ เช่น สถานการณ์การติดต่อสื่อสารภายในอาคารและภายนอกอาคารกรณีที่ไม่มีโครงข่าย สถานการณ์การตรวจสอบงานด้านการเกษตร สถานการณ์ระบบขนส่งอัจฉริยะ หรือใช้สำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ เป็นต้น สำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติหรือสิ่งที่ไม่คาดคิดที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะเกิดจากภัยธรรมชาติหรืออาจเกิดจากมนุษย์ เช่น น้ำท่วม แผ่นดินไหว หรือตึกถล่ม เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันมีสถานการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นบ่อยครั้งและในขณะที่เกิดภัยพิบัติหรือหลังจากการเกิดภัยพิบัติโครงสร้างเกี่ยวกับการสื่อสารอาจจะไม่สามารถใช้การได้ดีหรือใช้การไม่ได้ [1] ดังนั้นจึงควรมีการนำเครือข่ายเฉพาะกิจไปใช้จัดการการติดต่อสื่อสาร เช่น การค้นหาผู้สูญหายหรือการกู้ภัย เป็นต้น บทความนี้นำเสนอรูปแบบเครือข่าย

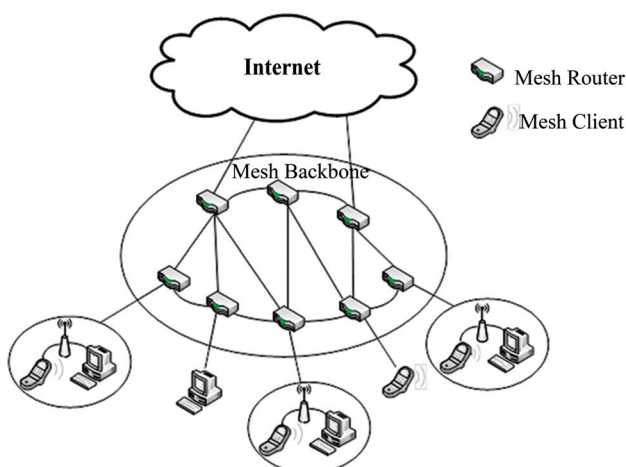
เฉพาะกิจในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบเครือข่ายเฉพาะกิจ รูปแบบการเคลื่อนที่ โปรโตคอลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทาง ประสิทธิภาพของเครือข่ายเฉพาะกิจและประสิทธิภาพของโปรโตคอลค้นหาเส้นทางในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ

การนำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วย บทนำ รูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายเฉพาะกิจ โปรโตคอลค้นหาเส้นทางของเครือข่ายเฉพาะกิจ รูปแบบการเคลื่อนที่ของเครือข่ายเฉพาะกิจ การวัดประสิทธิภาพของเครือข่ายเฉพาะกิจ รูปแบบการกู้ภัยพิบัติด้วยเครือข่ายเฉพาะกิจ ประสิทธิภาพของโปรโตคอลค้นหาเส้นทาง และสรุปผลจากการศึกษา

รูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายสำหรับสถานการณ์ภัยพิบัติ

1. Wireless Mesh Network (WMN)

เป็นเครือข่ายไร้สายซึ่งโหนดที่เชื่อมต่อในทอพอโลยีแบบตาข่ายนี้จะมีการใช้ข้อมูลร่วมกัน โหนดในเครือข่ายนอกจากจะทำการรับส่งข้อมูลระหว่างกันแล้วยังทำหน้าที่เป็นรีเลย์ (Relay) สำหรับโหนดอื่น ๆ และแต่ละโหนดจะช่วยกันแพร่กระจายข้อมูลในเครือข่ายด้วย Wireless Mesh Network ประกอบด้วย Mesh Routers และ Mesh Clients ซึ่งทำการเชื่อมต่อผ่าน Mesh Topology ดังรูปที่ 1

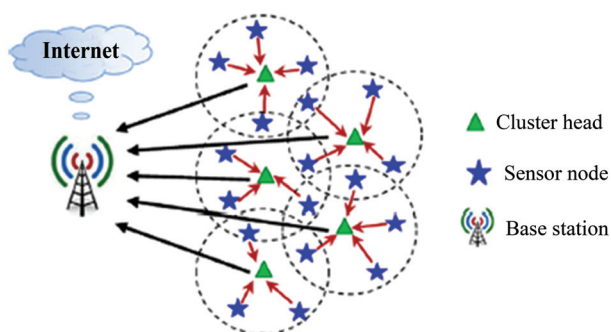


รูปที่ 1 โครงสร้างของ Wireless Mesh Network [3]

จากรูปที่ 1 Mesh Router เป็นอุปกรณ์สำหรับการใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลในเครือข่าย โดยการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด [3] ในส่วนของโหนดที่เป็น Client หรือ Mesh Clients ในเครือข่ายไร้สายแบบตาข่ายนั้นเมื่อโหนดต้องการส่งข้อมูลไปยังปลายทางจะทำการสื่อสารผ่านโหนดจำนวนมากเพื่อส่งข้อมูลไปถึงปลายทางที่ต้องการ หากมีการใช้งาน Wireless Mesh Network สำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัตินั้นจะสามารถใช้ได้ในกรณีที่โครงสร้างของเครือข่ายที่เป็น Mesh Backbone ไม่ได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติเนื่องจากต้องอาศัยการเชื่อมต่อสัญญาณผ่านอุปกรณ์ Mesh Router จึงจะสามารถใช้งานเครือข่ายได้

2. Wireless Sensor Network (WSN)

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายนั้นโหนดจะมีการติดตั้งเซ็นเซอร์ (Sensor) เรียกว่า Sensor Node สำหรับเครือข่ายจะมีการจัดลำดับชั้นโดยใช้วิธีการจัดกลุ่ม (Clustering Technique) มักถูกแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม สำหรับแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วย Cluster Head และจำนวนสมาชิกภายในกลุ่ม แต่ละ Cluster Head จะรวบรวมข้อมูลจากโหนดที่เป็นสมาชิกภายในกลุ่มของตนและหลังจากนั้นจะส่งข้อมูลที่ได้รวบรวมไปยัง Base Station [4] - [5] ดังแสดงในรูปที่ 2 การจัดกลุ่มของโหนดจะทำการจัดกลุ่มโดยใช้โปรโตคอลค้นหาเส้นทางซึ่งมีจุดมุ่งหมายที่จะเลือก Cluster Head ที่ดีที่สุดและการจัดกลุ่มโหนดจะต้องเป็นกลุ่มที่เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงานของโหนด ในการจัดกลุ่มอาจจะทำการจัดกลุ่มใหม่และเลือก Cluster Head ใหม่ เป็นระยะ ๆ เพื่อที่จะกระจายโหลดอย่างสม่ำเสมอท่ามกลางเครือข่ายทั้งหมด [6] โปรโตคอล ค้นหาเส้นทางที่ใช้ในเครือข่าย WSN ได้กลายเป็นสิ่งสำคัญของเทคโนโลยีค้นหาเส้นทางด้วยประโยชน์ของการจัดการทอพอโลยีที่สะดวก (Convenient Topology Management) และมีการจัดการการใช้พลังงานของโหนดที่มีประสิทธิภาพสูง (High-Efficiency Energy)

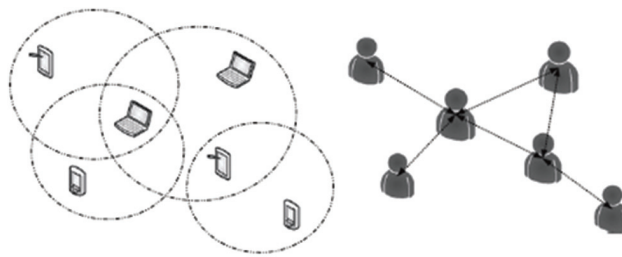


รูปที่ 2 รูปแบบของ Wireless Sensor Network [7]

ในปัจจุบันมีการใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับระบบการเตือนภัยพิบัติ (Disaster Warning System) ซึ่งมีการดำเนินงานสองส่วนคือ ส่วนของการบรรเทาภัยพิบัติและส่วนการกู้ภัย ในการออกแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการปรับขนาดของเครือข่าย (Scalability) การทนต่อความผิดพลาด (Fault Tolerance) ทอพอโลยี (Topology) การใช้พลังงาน (Power Consumption) และกำลังส่ง (Transmission Power) [8] ในการค้นหาเส้นทางของโหนดในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายส่วนใหญ่ถูกกำหนดแบบอัตโนมัติซึ่งอาจมีความล้มเหลวในการหาเส้นทางเกิดขึ้นได้ ดังนั้นการเลือกโปรโตคอลค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะต้องสามารถช่วยแก้ปัญหาความล้มเหลวที่เกิดขึ้นได้

3. Mobile Ad Hoc Network (MANET)

เครือข่ายเฉพาะกิจแบบ MANET เป็นชนิดของเครือข่ายไร้สายที่มีการเชื่อมต่อกันแบบไม่มีโครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 3 โดยแต่ละโหนดจะเคลื่อนที่และอยู่บนพื้นฐานของการกำหนดค่าเครือข่ายของตนเอง โหนดใด ๆ ในเครือข่ายสามารถเข้าหรือออกจากเครือข่ายได้อย่างอิสระโดยไม่ต้องได้รับการอนุญาตจากอุปกรณ์หรือระบบเครือข่ายใด ๆ

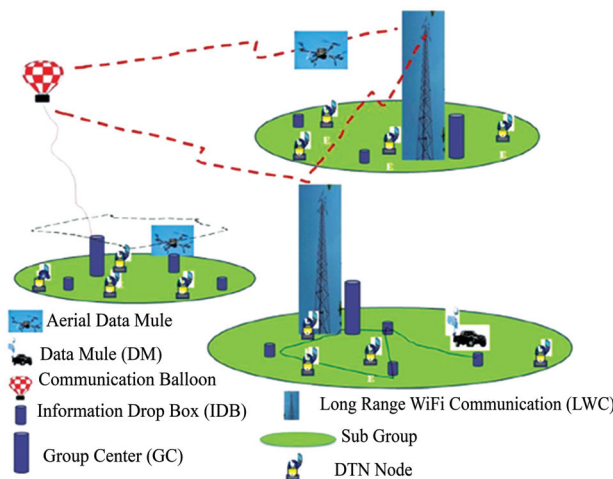


รูปที่ 3 การเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ [9]

การใช้เครือข่ายแบบ MANET เป็นที่นิยมมากที่สุดสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่ไม่มีการติดตั้งเครือข่ายประเภทอื่น ๆ เครือข่ายแบบ MANET ถูกนำมาใช้ในงานที่เฉพาะเจาะจง เช่น ถูกใช้ในการจัดการภัยพิบัติ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากสาเหตุทางธรรมชาติหรืออาจเกิดจากสาเหตุอื่น ๆ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคนจำนวนมากก่อให้เกิดการสูญเสียทรัพยากร [10]

4. Hybrid Network

เป็นเครือข่ายที่ใช้ระบบเครือข่ายที่แตกต่างกันโดยใช้งานเครือข่ายร่วมกัน เช่น ใช้ระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ และเครือข่ายไร้สาย โดยที่ระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือจะต้องมีโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ จึงจะทำการกู้ภัยที่เกิดขึ้นจากภัยพิบัติได้ หรือการใช้เครือข่ายเฉพาะกิจแบบ MANET ร่วมกับ Wireless Sensor Network และระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ [11] เป็นต้น



รูปที่ 4 รูปแบบการสื่อสารของ Hybrid Network [12]

ดังนั้นหากสถานการณ์ของเครือข่ายโทรศัพท์มือถือได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติ เครือข่าย Hybrid Network จะต้องมีการใช้สถานะการทำงานไปใช้สถานการณ์อื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบและให้ครอบคลุมพื้นที่เกิดภัยพิบัติอย่างรวดเร็วหรือทำการปรับใช้เครือข่ายเฉพาะกิจซึ่งจะทำหน้าที่เป็นรีเลย์ (Relay) เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ [8]

ในการติดต่อสื่อสารในสถานการณ์ที่เกิดภัยพิบัตินั้นจะต้องมีการกำหนดรูปแบบของการติดต่อสื่อสารให้ทีมค้นหาและทีมกู้ภัยสามารถส่งข้อมูลและรับข้อมูลด้วยโทรศัพท์มือถือผ่านเครือข่ายเฉพาะกิจให้ตรงเป้าหมายและมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยรูปแบบการติดต่อสื่อสารด้วยเครือข่ายเฉพาะกิจนั้นจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ Unicast Broadcast และ Multicast [13] - [14]

โพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์เกิดภัยพิบัติ

โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง (Routing Protocol) เป็นวิธีการค้นหาเส้นทางเพื่อใช้สำหรับการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง แต่เนื่องจากทอพอโลยี (Topology) ของเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์เกิดภัยพิบัติอาจมีความแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับทอพอโลยีจะช่วยให้การส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการจัดการสถานการณ์ภัยพิบัติมากที่สุด [1] โพรโทคอลค้นหาเส้นทางส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้ในเครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับสถานการณ์เกิดภัยพิบัติ [1], [15] - [17] คือ Proactive Routing Protocol และ Reactive Routing Protocol

Proactive Routing Protocol (Table-Driven Routing Protocol)

เป็นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางตลอดเวลา โดยจะทำการอัปเดตเส้นทางทุกช่วงเวลา โดยข้อมูลเส้นทางต่าง ๆ จะถูกเก็บไว้ในตารางเส้นทาง (Routing Table) หากโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจะใช้เส้นทางที่มีในตารางเส้นทาง แต่หากไม่มีเส้นทางไปยังโหนดปลายทาง โพรโทคอลค้นหาเส้นทางจะทำการค้นหาเส้นทางเพื่อไปยังโหนดปลายทางทันที โพรโทคอลค้นหาเส้นทางประเภทนี้จะไม่มีความล่าช้า (Delay) ในการค้นหาเส้นทาง เนื่องจากเมื่อโหนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจะทำการค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูล [3] จากตารางเส้นทางที่มีโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบโพรแอกทีฟจะเหมาะสมกับระบบเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจขนาดเล็ก ตัวอย่างโพรโทคอลประเภทนี้ เช่น DSDV และ OLSR เป็นต้น

ในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติหรือเหตุฉุกเฉินที่เกิดขึ้นการค้นหาเส้นทางระหว่างโหนดนั้นจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับทีมค้นหาและกู้ภัยที่จะช่วยเหลือผู้ที่ได้รับผลกระทบที่อยู่ในพื้นที่ประสบภัย [15] แต่อย่างไรก็ตามการอัปเดตข้อมูลเส้นทางที่มีการอัปเดตบ่อยครั้งและมากเกินไปอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานแบนด์วิดท์และพลังงานจากแบตเตอรี่ของโทรศัพท์มือถือโดยไม่มีประสิทธิภาพ หากทอพอโลยี (Topology) ของเครือข่ายเฉพาะกิจมีรูปแบบคงที่ (Static) การค้นหาเส้นทางด้วย Proactive Routing Protocol จะสามารถทำงานได้ดีแต่ในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่และมีการเคลื่อนที่สูง โพรโทคอลประเภทนี้จะไม่สามารถจัดการกับการขยายขนาดของเครือข่ายได้

1. **Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)** เป็นโพรโทคอลที่พัฒนาจากอัลกอริทึมการค้นหาเส้นทางแบบ Bellman-Ford [18] แต่ละโหนดในเครือข่ายจะมีตารางเส้นทาง (Routing Table) เก็บหมายเลขเส้นทางของโหนดถัดไปเพื่อทราบถึงโหนดข้างเคียงทั้งหมดที่สามารถจะติดต่อได้ ซึ่งตารางเส้นทางประกอบด้วย หมายเลขโหนดปลายทาง (Destination Address) โหนดถัดไป (Next Hop) จำนวนฮอปที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง (Number of Hops) และหมายเลข

ลำดับของการอัปเดตเส้นทาง (Sequence Number) การใช้หมายเลขลำดับนี้เพื่อแยกเส้นทางเก่าจากเส้นทางใหม่และหลีกเลี่ยงการเกิดลูปเส้นทาง [19] โหนดทุกโหนดในเครือข่ายจะต้องส่งข้อมูลอัปเดตเส้นทางต่อไปยังโหนดอื่น ๆ เพื่อให้กระจายไปทั่วเครือข่าย การอัปเดตเส้นทางของโปรโตคอล DSDV โหนดจะทำการอัปเดตเส้นทางทุกช่วงเวลาด้วยการแพร่สัญญาณ (Broadcast) และจะส่งการอัปเดตเส้นทางทันทีเมื่อมีการตรวจสอบพบว่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นทางเกิดขึ้น การที่อัปเดตข้อมูลเส้นทางบ่อยครั้งจะทำให้ได้มาซึ่งเส้นทางที่ใกล้เคียงต่อการเปลี่ยนแปลงของทอพอโลยี (Topology) มากที่สุด ดังนั้นหากเส้นทางถูกใช้ในการส่งข้อมูลไปยังปลายทางจะทำให้การส่งข้อมูลมีโอกาสเกิดความสำเร็จสูง และในการอัปเดตตารางเส้นทางตามปกตินั้นจะมีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และแบนด์วิดท์แม้ในขณะที่เครือข่ายไม่ได้ถูกใช้งาน [20] ดังนั้นหากเครือข่ายมีการใช้งานการส่งข้อมูลน้อยจะทำให้เกิดการใช้งานแบนด์วิดท์โดยไม่เกิดประโยชน์

2. Optimized Link State Routing (OLSR) เป็นโปรโตคอลค้นหาเส้นทางที่จะทำการหาเส้นทางล่วงหน้าโดยจัดเก็บในตารางเส้นทาง (Routing Table) การอัปเดตเส้นทางจะอัปเดตเป็นช่วงเวลาโดยไม่คำนึงถึงว่าโหนดจะมีการเคลื่อนที่หรือไม่ หากโหนดค้นหาทางมีความต้องการส่งข้อมูลโหนดจะได้ข้อมูลเส้นทางทันทีจากตารางเส้นทาง ในการค้นหาเส้นทางของโปรโตคอล OLSR นั้นจะใช้ Message สอง Message คือ Hello Message และ Topology Control (TC) Message ซึ่งใช้ในการค้นหาเส้นทางและแพร่สัญญาณข้อมูลสถานะการเชื่อมโยงไปทั่วเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจ (Ad Hoc Network) แต่ละโหนดจะใช้ข้อมูลทอพอโลยีเพื่อคำนวณหาฮอปปลายทางสำหรับทุกโหนดในเครือข่ายโดยใช้เส้นทางการส่งต่อที่มีฮอปที่สั้นที่สุด โปรโตคอล OLSR จะส่ง Hello Message เป็นระยะ ๆ ไปยังโหนดเพื่อนบ้านทุกโหนดในระยะหนึ่งฮอปเพื่อใช้หาข้อมูลของโหนดเพื่อนบ้านในระยะสองฮอป [21] โหนดผู้ส่งสามารถเลือก Multipoint Relay (MPR) บนพื้นฐานของโหนดระยะหนึ่งฮอปที่มีเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดในระยะสองฮอปในแต่ละโหนดจะมีชุดตัวเลือก Multipoint Relay (MPR) ซึ่งระบุโหนดที่ได้รับเลือกเป็นโหนด Multipoint Relay (MPR) [22] ในการเลือกโหนด Multipoint Relay (MPR) เพื่อลดจำนวนโหนดที่ใช้ในการส่งต่อแพ็กเก็ตซึ่งโปรโตคอล OLSR สามารถหาเส้นทางที่เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยเมื่อพิจารณาจากจำนวน ฮอปที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตไปยังปลายทาง การส่งข้อมูลจะเป็นการส่งแบบฮอปต่อฮอป โปรโตคอล OLSR จะส่ง Topology Control (TC) Message พร้อมกับการส่งต่อ Multipoint Relay (MPR) เพื่อแพร่สัญญาณข้อมูลโหนดเพื่อนบ้านไปทั่วเครือข่าย

Reactive Routing Protocol (Source-Initiated On-Demand Routing Protocol)

โปรโตคอลค้นหาเส้นทางแบบรีแอคทีฟ (Reactive Routing Protocol) เป็นโปรโตคอลที่ค้นหาเส้นทางเมื่อโหนดค้นหาทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางเท่านั้น [19] ในการอัปเดตเส้นทางนั้นจะกระทำเฉพาะโหนดที่อยู่ในเส้นทางของการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง ซึ่งหากโหนดที่ติดต่อกับโหนดนั้นเคลื่อนที่ออกนอกกรณีการรับ - ส่งข้อมูลจะทำให้การเชื่อมต่อถูกตัดขาด โปรโตคอลค้นหาเส้นทางแบบรีแอคทีฟ จะทำการค้นหาเส้นทางใหม่อีกครั้งหนึ่งด้วยความรวดเร็ว โปรโตคอลค้นหาเส้นทางประเภทนี้จะมีดีเลย์ (Delay) ของการค้นหาเส้นทางเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีข้อมูลเส้นทางในตารางเส้นทางเก็บไว้ หากจะส่งข้อมูลต้องทำการค้นหาเส้นทางก่อนจึงทำให้มีดีเลย์เกิดขึ้น ตัวอย่างโปรโตคอลประเภทนี้ เช่น AODV DSR AOMDV และ CBRP เป็นต้น

ในการนำโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบรีแอคทีฟไปใช้ในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติหรือสถานการณ์ฉุกเฉินในระหว่างการติดต่อสื่อสารนั้นจะเป็นการประหยัดพลังงานจากแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ การใช้แบนด์วิดท์ที่เกิดประโยชน์จะทำให้เกิดการใช้งานเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพ

1. **Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)** เป็นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบ Reactive Routing Protocol [23] เครือข่ายไร้สายแบบเฉพาะกิจ มีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยี (Topology) ตลอดเวลา ดังนั้น AODV จึงถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองกับเครือข่ายที่มีทอพอโลยีเปลี่ยนแปลงบ่อย การค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV จะทำงานได้ในทันทีเมื่อโหนดต้องการส่งข้อมูลระหว่างกันโดยโพรโทคอล AODV สามารถค้นหาเส้นทางจากโหนดต้นทางไปยังปลายทางได้โดยส่งแพ็กเก็ต RREQ (Route Request) ออกไปค้นหาเส้นทางผ่านโหนดข้างเคียงต่อไปเรื่อย ๆ เมื่อโหนดปลายทางได้รับ RREQ จะส่ง RREP (Route Reply) กลับไปยังโหนดต้นทางโดยเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด ในการอัปเดตเส้นทางนั้นจะกระทำเฉพาะโหนดที่อยู่ในเส้นทางของการส่งข้อมูลไปยังปลายทางเท่านั้น โพรโทคอล AODV จะใช้หมายเลขลำดับปลายทาง (Destination Sequence Number) เพื่อให้ขจัดปัญหาการเกิดลูป (Loop Problem) โพรโทคอลจะสามารถจัดการอัตราการเคลื่อนที่ (Mobility Rate) ในระดับต่ำ ปานกลางและค่อนข้างสูงได้ ซึ่งจะช่วยลด Overhead ของข้อมูล ควบคุม Traffic และลดความจำเป็นที่จะ Broadcast เพื่อให้ได้ข้อมูลในตารางเส้นทาง [20]

2. **Dynamic Source Routing (DSR)** เป็นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางแบบ Reactive Routing Protocol มีกระบวนการทำงานคล้ายคลึงกับโพรโทคอล AODV ซึ่งเป็นการกำหนดแนวคิดของโพรโทคอลแบบ Proactive Routing Protocol เส้นทางจะถูกสร้างเมื่อมีความต้องการส่งข้อมูล โหนดต้นทางสามารถค้นหาเส้นทางไปยังโหนดปลายทางในเครือข่ายได้โดยการสร้างแพ็กเก็ต RREQ (Route Request) ไปยังทุกโหนดบนเครือข่าย ซึ่งแพ็กเก็ต RREQ เป็น Broadcast Packet หลังจากที่ได้รับแพ็กเก็ต RREQ จะทำการ Broadcast ไปยังโหนดเพื่อนบ้านของตนเองจนกว่าจะถึงโหนดปลายทางแพ็กเก็ต RREQ ประกอบด้วย หมายเลขลำดับ (Sequence Number) และเส้นทาง (Path) ซึ่งอยู่บนส่วน Header ของแพ็กเก็ต [24] เมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ต RREQ จะทำการสร้างแพ็กเก็ต RREP (Route Reply) ส่งกลับไปยังโหนดต้นทาง เส้นทางที่ส่งแพ็กเก็ต RREP กลับจะถูกเก็บ Cache บนโหนดต้นทางสำหรับไว้ใช้งานครั้งต่อไป

3. **Ad Hoc On Demand Multipath Distance Vector Routing (AOMDV)** เป็นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ถูกพัฒนามาจากโพรโทคอล AODV มีแนวความคิดหลักคือ ทำการคำนวณเส้นทางหลายเส้นทางระหว่างการค้นหาเส้นทางโพรโทคอล AOMDV ถูกออกแบบมาสำหรับเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงที่เส้นเชื่อมโยงเกิดความล้มเหลวและเส้นทางถูกตัดขาดเป็นจำนวนบ่อยครั้ง หลักการทำงานของโพรโทคอล AOMDV เป็นการตรวจสอบว่าในการค้นหาเส้นทางแบบหลายเส้นทางจะไม่มีลูป (Loop-Free) และไม่ใช่เส้นทางที่ซ้ำกัน (Disjoint) ในการค้นหาเส้นทางแบบหลายเส้นทางจะพิจารณาจาก Disjoint Path ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ Node-Disjoint Path และ Link-Disjoint Path โดยที่ Node-Disjoint Path จะไม่ได้ใช้โหนดใด ๆ ร่วมกันยกเว้นโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง ในทางตรงกันข้าม Link-Disjoint Path จะไม่ใช่ Link ใด ๆ ร่วมกันแต่อาจจะมีการใช้โหนดร่วมกัน [25] สำหรับโพรโทคอล AOMDV เมื่อโหนดต้นทางต้องการค้นหาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทาง โหนดต้นทางจะทำการ Broadcast แพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนด

เพื่อนบ้านของตนโดยการ Broadcast จะใช้วิธีเช่นเดียวกันโพรโทคอล AODV เมื่อโหนดเพื่อนบ้านที่ได้รับแพ็กเก็ต RREQ จะทำการค้นหาเส้นทางเพื่อส่งต่อแพ็กเก็ต RREQ ยังโหนดปลายทาง เมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ต RREQ จะทำการส่งแพ็กเก็ต RREP ไปยังโหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต RREQ มาหาโหนดตนเอง

4. Cluster Based Routing Protocol (CBRP) ในรูปแบบการทำงานทั่วไปโพรโทคอล ค้นหาเส้นทาง CBRP เป็นโพรโทคอลประเภท Reactive Routing Protocol แต่หากพิจารณาในประเด็นการแบ่งเป็นลำดับชั้นและมี Cluster Head นั้น โพรโทคอล CBRP จะเป็นโพรโทคอลประเภท Hierarchical Routing Protocol [15] หลักการทำงานของโพรโทคอล CBRP จะทำการแบ่งออกเป็นกลุ่ม แต่ละกลุ่มจะมี Cluster Head ซึ่งจะทำการประสานการทำงานภายในกลุ่มและภายนอกกลุ่มอื่น ๆ Cluster Head จะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลเส้นทาง ดังนั้นจำนวนของ Control Overhead จะน้อยกว่าวิธีการ Flooding [26]

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางในเครือข่ายเฉพาะกิจ

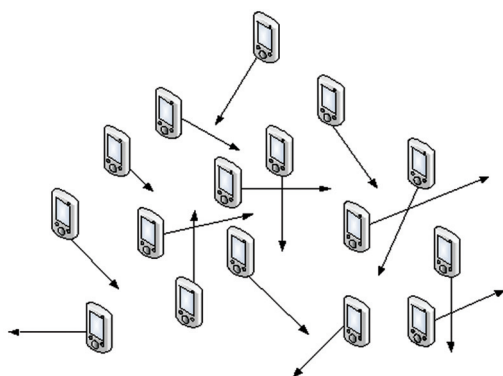
Properties of Ad Hoc Routing Protocol	Routing Protocol					
	DSDV	OLSR	AODV	DSR	AOMDV	CBRP
Distributed	√	√	√	√	√	√
Loop-Free	√	√	√	√	√	√
Reactive	×	×	√	√	√	√
Unidirectional Link Support	×	×	×	√	×	√
Periodic Broadcast	√	√	×	×	×	×

รูปแบบการเคลื่อนที่สำหรับเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ

รูปแบบการเคลื่อนที่จะเป็นการกำหนดสถานการณ์การเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่าย โดยทั่วไปรูปแบบการเคลื่อนที่ในเครือข่ายไร้สายแบบเฉพาะกิจจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท โดยการเคลื่อนที่ประเภทแรกคือการเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดขึ้นจากสมการหรือกฎบางอย่าง ซึ่งการเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดขึ้นมานี้มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ Non-Realistic Mobility เช่นรูปแบบการเคลื่อนที่แบบ Random Waypoint Mobility Model [20] เป็นต้น สำหรับการเคลื่อนที่ประเภทสองนั้นเป็นการเคลื่อนที่ในรูปแบบสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง เรียกรูปแบบการเคลื่อนที่ประเภทดังกล่าวนี้ว่า Realistic Mobility Model ซึ่งมีงานวิจัยที่ทำการกำหนดการเคลื่อนที่ตามสถานการณ์จริงตามรูปแบบการเกิดสถานการณ์ภัยพิบัติที่น่าจะเกิดขึ้น [27]

1. Non-Realistic Mobility Model

Random Waypoint Mobility Model โหนดจะมีการเคลื่อนที่แบบอิสระ (Independent Mobility Model) ไปสู่จุดหมายปลายทางแบบสุ่มและด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน [28] โดยจะเลือกความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่โดยใช้วิธีการสุ่ม (Random) ในการเคลื่อนที่แต่ละครั้งของโหนดจะสุ่มเลือกความเร็วและทิศทางโดยมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ Uniform Distribution ด้วยความน่าจะเป็นเท่า ๆ กัน



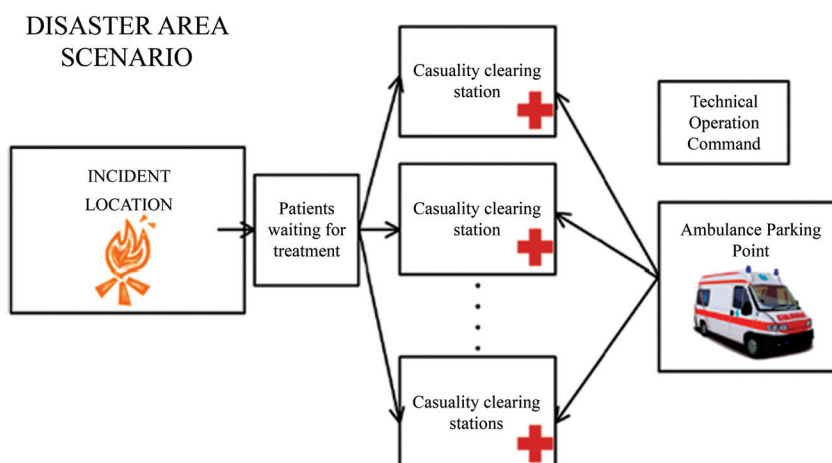
รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของโหนดแบบ Random Waypoint Mobility Model

รูปแบบการเคลื่อนที่ Random Waypoint Mobility Model ไม่ได้เป็นการเคลื่อนที่ที่เกิดในสถานการณ์จริงแต่ได้มีการนำไปจำลองการเคลื่อนที่ของเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์ที่เกิดภัยพิบัติ [15] ซึ่งมีลักษณะคล้ายการเคลื่อนที่ของมนุษย์ในสถานการณ์เกิดภัยพิบัติ

2. Realistic Mobility Model

เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้เหมือนการเคลื่อนที่ในสถานการณ์จริงและขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมจริง ในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติจึงได้มีการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่จริงสำหรับพื้นที่การเกิดภัยพิบัติ (Realistic Disaster Area Mobility Model) [27]

Modeling Mobility in Disaster Scenario การเคลื่อนที่ของโหนดในพื้นที่ภัยพิบัติไม่สามารถคาดการณ์ความสมบูรณ์แบบของการเคลื่อนที่ได้เนื่องจากสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติในแต่ละสถานการณ์มีความแตกต่างกัน [29] อย่างไรก็ตามได้มีการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่บนพื้นที่ภัยพิบัติโดยจะขึ้นอยู่กับวิธีที่เรียกว่า Separation of The Room [27] โดยแบ่งพื้นที่ของสถานการณ์ที่เกิดภัยพิบัติแตกต่างกันดังนี้



รูปที่ 6 รูปแบบพื้นที่ของสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ [1]

จากรูปที่ 6 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่เมื่อเกิดภัยพิบัติ ซึ่งกระบวนการกู้คืนภัยพิบัติจะมีกระบวนการหลัก ๆ คือการปฐมพยาบาลผู้ป่วยและการทำให้สถานการณ์อยู่ในสภาวะปกติและการลำเลียงผู้ประสบภัยออกจากพื้นที่เร็วที่สุด ผู้ประสบภัยที่อยู่ในพื้นที่เกิดภัยพิบัติจะรอทีมกู้ภัยเข้ามาดำเนินการช่วยเหลือโดยจะเคลื่อนย้ายผู้ประสบภัยไปยังโรงพยาบาลสนาม เมื่อผู้ประสบภัยถูกเคลื่อนย้ายมาถึงโรงพยาบาลสนาม แพทย์และพยาบาลจะทำการคัดแยกประเภทผู้บาดเจ็บและทำการปฐมพยาบาลเบื้องต้นและรักษาขั้นต้นสำหรับกรณีเป็นผู้บาดเจ็บฉุกเฉินและเตรียมเคลื่อนย้ายผู้บาดเจ็บไปยังโรงพยาบาลในการดำเนินการกู้ภัยและรักษาพยาบาลผู้บาดเจ็บจะต้องมีทีมประสานงานทางด้านเทคนิคเพื่อดำเนินการประสานทีมงานทั้งหมดที่เข้าปฏิบัติการกู้ภัยให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นผู้ประสบภัยที่ใช้โทรศัพท์มือถือในเครือข่ายเฉพาะกิจจะเป็นโหนดที่เคลื่อนที่จากสถานที่เกิดเหตุการณ์ไปยังพื้นที่การรักษาผู้บาดเจ็บหรือโรงพยาบาลสนาม โดยโหนดจะทำการเคลื่อนที่จากสถานที่หนึ่งไปอีกสถานที่หนึ่ง [1], [8], [29]

การวัดประสิทธิภาพของเครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ

ในการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติให้สามารถใช้งานเครือข่ายเพื่อการกู้คืนภัยพิบัติ การค้นหาและการกู้ภัยโดยมีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้นจำเป็นที่จะต้องมิดัชนีวัดความสามารถของเครือข่ายกู้คืนภัยพิบัติและมีดัชนีวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมกับเครือข่ายที่ถูกออกแบบดังตัวอย่างต่อไปนี้

ดัชนีวัดความสามารถของเครือข่ายเฉพาะกิจ

1. การใช้พลังงาน (Power Consumption) การใช้พลังงานของโหนดในเครือข่ายเฉพาะกิจควรมีการกินพลังงานต่ำเพื่อยืดอายุการใช้งานของโหนด
2. ความสามารถในการเชื่อมต่อ (Reachability) อัตราส่วนของโหนดที่ได้รับการกระจายแพ็กเก็ตต่อจำนวนของโหนดในเครือข่ายทั้งหมดซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าที่มากที่สุด (Maximum Reachability) และการเชื่อมต่อของจำนวนคนโดยเฉลี่ย (Average Population's Reachability) หากมีค่า Reachability สูงแสดงให้เห็นถึงเครือข่ายเฉพาะกิจสามารถให้บริการในสถานการณ์เกิดภัยพิบัติได้ดี

ดัชนีวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง

ในการใช้งานเครือข่ายเฉพาะกิจโดยการนำโพรโทคอลมาใช้ในการค้นหาเส้นทางเพื่อให้โหนดต้นทางสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นควรพิจารณาการเลือกใช้โพรโทคอลโดยการพิจารณาจากดัชนีวัดประสิทธิภาพ (Performance Metrics) ของโพรโทคอล โดยดัชนีวัดที่นิยมใช้ในการวัดประสิทธิภาพ เช่น

1. อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet Delivery Ratio: PDR) เป็นอัตราส่วนของแพ็กเก็ตข้อมูล (Data Packet) ที่สามารถถูกจัดส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางได้สำเร็จและ

จำนวนของแพ็กเก็ตข้อมูลทั้งหมดที่โหนดต้นทางทำการจัดส่งไปยังโหนดปลายทาง [30] ค่า Packet Delivery Ratio (PDR) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 - 1 หรือ 0 - 100 % หากค่า Packet Delivery Ratio (PDR) เป็น 1 หรือ 100 % นั้นจะแสดงว่า Packet Delivery Ratio (PDR) มีค่าสูงหรือ โพรโทคอลค้นหาเส้นทางที่ทำการทดสอบมีประสิทธิภาพสูงด้วยการวัดจาก Packet Delivery Ratio (PDR)

2. ค่าเฉลี่ยความหน่วงตลอดเส้นทาง (Average End-to-End Delay) เป็นค่าเฉลี่ยเวลาของแต่ละแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกส่งจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง [30] หาก Average End-to-End Delay มีค่าต่ำแสดงให้เห็นว่า โพรโทคอลสามารถทำการค้นหาเส้นทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางใช้เวลา น้อย นั่นคือโพรโทคอลค้นหาเส้นทางมีประสิทธิภาพสูงจากการวัด Average End-to-End Delay

3. ปริมาณงาน (Throughput) เป็นจำนวนของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ส่งผ่านสำเร็จในช่วงเวลาหนึ่ง หากโพรโทคอลค้นหาเส้นทางมีค่า Throughput สูง จะแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสามารถทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสำเร็จได้ในปริมาณมากนั่นคือ โพรโทคอลนั้นมีประสิทธิภาพสูง

4. โอเวอร์เฮดควบคุม (Control Overhead) เป็นอัตราส่วนของข้อมูลควบคุมที่ส่งไปยังข้อมูลจริงที่ถูกได้รับในแต่ละโหนด [30] หากโพรโทคอลค้นหาเส้นทางมีค่า Control Overhead ต่ำจะเป็นการแสดงให้เห็นว่าแพ็กเก็ตข้อมูลที่ใช้ในการส่งมีข้อมูลที่ใช้ควบคุมน้อยนั่นคือ โพรโทคอลค้นหาเส้นทางมีประสิทธิภาพที่ดี

รูปแบบการกู้ภัยพิบัติด้วยเครือข่ายเฉพาะกิจ

ในการกู้ภัยพิบัติด้วยเครือข่ายเฉพาะกิจมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัยให้ปลอดภัยจากสถานการณ์ฉุกเฉินให้รวดเร็วมากที่สุดและมีจำนวนผู้รอดชีวิตมากที่สุด ดังนั้นกระบวนการกู้ภัยพิบัติ กระบวนการค้นหาและกู้ภัย การปฐมพยาบาลผู้บาดเจ็บ การลำเลียงผู้ประสบภัยไปยังสถานที่ปลอดภัย การติดต่อประสานงานภายในทีมกู้ภัยและหน่วยแพทย์ การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ประสบภัยและทีมกู้ภัย จึงเป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้การกู้ภัยและการดำเนินการช่วยเหลือนั้นให้มีจำนวนผู้ประสบภัยที่ปลอดภัยมากที่สุดจึงเป็นวัตถุประสงค์หลักของการกู้ภัยพิบัติ สำหรับการติดต่อสื่อสารในสถานการณ์ การเกิดภัยพิบัติมีความจำเป็นอย่างมากที่จะทำให้การดำเนินการช่วยเหลือบรรลุดุประสงค์หลักได้ แต่เนื่องจากในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัตินั้นบ่อยครั้งที่โครงสร้างพื้นฐานของการสื่อสารไม่สามารถใช้งานได้หรืออาจจะใช้งานได้บางส่วน ดังนั้นการออกแบบเครือข่ายที่ใช้ในการสื่อสารในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสิ่งสำคัญที่ควรศึกษา

มิงงานวิจัย [1], [4], [8], [10], [12], [31] - [33] ได้ศึกษารูปแบบการกู้ภัยพิบัติด้วยเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจโดยนำหลักการในการเชื่อมต่อเครือข่าย การติดต่อสื่อสาร การเคลื่อนที่ มาใช้ในการออกแบบรูปแบบการกู้ภัยพิบัติด้วยเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจจากการศึกษางานวิจัยการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจ มีรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายที่นำมาใช้เพื่อการสื่อสารในสถานการณ์ภัยพิบัติดังต่อไปนี้

1. Mobile Ad Hoc Network (MANET)

มิงงานวิจัย [10] ได้เสนอการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับระบบการจัดการภัยพิบัติ โดยพิจารณาจาก Message Reliability และ Energy Efficiency ซึ่งในการออกแบบเครือข่ายนั้นใช้เครือข่ายประเภท MANET โดยพิจารณาจากสองพารามิเตอร์คือ Hop-Count และ Energy Efficiency

ในการสื่อสารด้วยอุปกรณ์สื่อสารหรือโหนดนั้นจะใช้อัลกอริทึม MSGFW ซึ่งจะดำเนินการโดยโหนดผู้รับ จะดำเนินการตรวจสอบสิทธิ์ในการส่งต่อข้อความ และใช้อัลกอริทึม Scenario Selection ในการเลือก สถานการณ์ที่เหมาะสมจะขึ้นกับระดับการเกิดภัยพิบัติโดยปรับค่า Transmission Power และได้มี งานวิจัย [1] ได้ปรับปรุงการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ MANET สำหรับสถานการณ์ภัยพิบัติ โดยการใช้ Evolutionary Computation Approach ด้วยเทคนิค Genetic Algorithm เพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการเชื่อมต่อของเครือข่ายในขณะเกิดภัยพิบัติ

และมิงงานวิจัย [31] ได้นำเสนอเครือข่ายเฉพาะกิจด้วยการติดตั้ง Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ โดยแนวคิดแรกที่ใช้คือ การติดตั้ง UAV แบบเดี่ยว สำหรับการค้นหาและการติดตามผลในสถานการณ์เกิดภัยพิบัติ และได้นำแนวคิดการใช้ความสามารถของ UAV ในการร่วมมือกันของ UAV หลาย UAV เป็นรูปแบบของฝูงบิน (Swarm) ซึ่งรูปแบบการร่วมมือกัน ของ UAV นี้ สามารถสร้างการสื่อสารแบบ Mesh Networks ที่ให้บริการการสื่อสารแก่ประชาชนบน พื้นดินได้ ดังนั้น UAV สามารถทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อให้ผู้ใช้งานโทรศัพท์หรือเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้

2. Wireless Sensor Network

ได้มีการศึกษางานวิจัย [32] โดยได้ออกแบบ Autonomous Wireless Sensor Network โดยใช้ Mobile robot ในการตรวจตราผู้ประสบภัยจากภัยพิบัติด้วยเทคนิค Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) ซึ่งมี 2 วิธีคือ Centralized Map Building Approach และ Distributed Map Building Approach

3. Hybrid Network

จากที่ได้ศึกษางานวิจัย [4] ได้เสนอการออกแบบระบบการตรวจหาผู้รอดชีวิตจากการเกิด ภัยพิบัติโดยได้วัดประสิทธิภาพจาก Energy Efficient ซึ่งระบบนี้จะสามารถตรวจหาติดตามตำแหน่งของ ผู้ประสบภัยในพื้นที่เกิดภัยพิบัติได้ โดยทำการออกแบบระบบเครือข่ายที่ใช้ในการสื่อสารเพื่อตรวจหา ผู้รอดชีวิตโดยใช้การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Hybrid Network คือ เป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง Wireless Sensor Network และเครือข่ายอื่น ๆ โดยที่หากเกิดภัยพิบัติเกิดขึ้นและโครงสร้างการสื่อสาร พื้นฐานทั่วไปไม่สามารถใช้ได้ ในกรณีนี้จะใช้ Ad Hoc Relay Station ในการส่งข้อมูลที่สื่อสารไปยัง Sink Node ซึ่ง Sink Node จะทำการส่งต่อข้อมูลไปยัง Base Station ด้วยเครือข่าย GSM Cellular Network หรือ Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax) ขึ้นอยู่กับว่า เครือข่ายใดจะสามารถใช้ได้ ดังนั้นระบบต้องสามารถใช้งานร่วมกันได้ และยังมีการนำรูปแบบเครือข่ายนี้ไป Integrate กับ Telemedicine Based System นอกจากการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจในรูปแบบดังกล่าว แล้วยังมีงานวิจัย [8] ที่ได้มีการออกแบบระบบเครือข่ายแบบ Hybrid Network ด้วยระบบเครือข่ายแบบ Wireless Network, Wireless Mesh Network และ Cellular Network ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า Portable Disaster Recovery Network ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง Disaster Recovery Network (DRN) และ Search and Rescue Network (SRN) โดยการใช้ DRN ในการสื่อสารระหว่างผู้ประสบภัยกับ ทีมกู้ภัยเพื่อระบุตำแหน่งของผู้ประสบภัย และ SRN จะใช้เทคนิค Optimal Path สำหรับการดำเนินการกู้ภัย และสำหรับการเคลื่อนที่ของโหนดในเครือข่ายได้ทำการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่แบบ Random Walk ที่แบ่งเป็น Symmetric Random Walk, Alternating Random Walk และ Non-Reversing Random Walk

มิงงานวิจัย [12] ที่ได้ออกแบบสถาปัตยกรรม Hybrid Ad Hoc Network แบบ 4 ระดับชั้น เพื่อใช้ในการรวบรวมข้อมูลความช่วยเหลือและข้อมูลการบรรเทาสาธารณภัยหลังจากสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติโดยได้ทำการออกแบบสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเป็นทั้งหมดสี่ระดับคือ ระดับชั้นที่หนึ่งเป็นการสื่อสารระหว่าง Delay Tolerant Network (DTN) Node และ Delay Tolerant Network (DTN) Node (เป็นการสื่อสารระหว่าง Smart Phones กับ Smart Phones) ในระดับที่สองเป็นการสื่อสารด้วยการส่งข้อมูลจาก DTN Node ไปยัง Information Drop Box (IDB) ระดับที่สามเป็นการสื่อสารด้วยการส่งข้อมูลจาก Information Drop Box (IDB) ไปยัง Master Control Station (MCS) โดยใช้ Data Mules (DMs) และระดับที่สี่เป็นการสื่อสารด้วยการส่งข้อมูลจาก GC to IDB ในการสื่อสารในแต่ละระดับได้มีการใช้อัลกอริทึมหลายอัลกอริทึม เช่น DM Count and Trajectory Computation, Group Formation และ Calculating Maximum Latency for Tier-4 เป็นต้น และงานวิจัยดังกล่าวนี้ได้ทำการวัดประสิทธิภาพของเครือข่ายด้วย Packet Delivery Delay และ Mean Latency

และมิงงานวิจัย [33] ตรวจสอบวิธีการสร้างเครือข่ายสมาร์ตโฟนเพื่อการสื่อสารในการกู้คืนภัยพิบัติ ด้วยการเชื่อมต่อช่องว่างระหว่างเครือข่ายไร้สายประเภทต่าง ๆ โดยการออกแบบและดำเนินการระบบเรียกว่า Team Phone ซึ่งทำให้สมาร์ตโฟนมีความสามารถในการสื่อสารในการกู้คืนภัยพิบัติ ในการออกแบบเครือข่ายได้ทำการรวมระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ เครือข่ายเฉพาะกิจและเครือข่ายฉวยโอกาส (Opportunistic Network) เข้าด้วยกันและช่วยให้การสื่อสารระหว่างพนักงานกู้ภัยสามารถสื่อสารได้ กลุ่มของสมาร์ตโฟนดังกล่าวสามารถร่วมกันทำงานและส่งข้อความฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยตำแหน่งที่ตั้งและตำแหน่งข้อมูลเพื่อช่วยเหลือในกระบวนการกู้ภัย

จากการศึกษาของงานวิจัยและแนวคิดการออกแบบระบบเครือข่ายเฉพาะกิจเพื่อการสื่อสารในสถานการณ์ภัยพิบัติพบว่ามิ่งสิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบเครือข่ายในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ระบบเครือข่ายที่ได้รับการออกแบบเพื่อนำไปใช้สำหรับการสื่อสารระหว่าง ทีมกู้ภัยและ ผู้ได้รับผลกระทบในพื้นที่ภัยพิบัตินั้นเครือข่ายที่ออกแบบจะต้องใช้เวลาในการเรียนรู้ด้วยระยะเวลารวดเร็ว มีความสะดวกในการใช้งาน เนื่องจากผู้ประสบภัยต้องได้รับการช่วยเหลืออย่างเร่งด่วน ดังนั้นการออกแบบเครือข่ายให้สามารถใช้งานได้ง่ายเรียนรู้เร็วจึงเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการช่วยเหลือผู้ประสบภัย
2. ระบบเครือข่ายที่ได้รับการพัฒนา ต้องมีความง่ายในการปรับใช้กับเครือข่ายที่มีอยู่และต้องสามารถทำงานร่วมกันกับเครือข่ายอื่น ๆ ได้ เช่น เครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐาน เครือข่ายโทรศัพท์มือถือหรืออินเทอร์เน็ต เป็นต้น
3. ระบบเครือข่ายต้องสามารถตอบสนองอย่างรวดเร็วในกรณีการเกิดภัยพิบัติอย่างฉุกเฉิน ซึ่งจะสามารถเข้าช่วยเหลือผู้ประสบภัยได้ทันทั่วถึง
4. อายุการใช้งานของเครือข่ายนั้นเครือข่ายต้องสามารถใช้งานได้เกินกว่าที่ทีมกู้ภัยจะดำเนินการเสร็จหรือเครือข่ายสามารถใช้งานได้นานกว่าโครงสร้างพื้นฐานของการสื่อสารจะใช้งานได้ตามปกติ
5. ในกรณีที่ภัยพิบัติเกิดขึ้นโครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารที่มีอยู่ในพื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติ หากไม่สามารถใช้งานได้ระบบต้องสามารถปรับใช้การทำงานไปยังโครงสร้างพื้นฐานของการสื่อสารที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงหรือห่างออกไปด้วยความรวดเร็วให้มีความครอบคลุมพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดภัยพิบัติ [8]

6. ระบบเครือข่ายต้องสามารถรองรับข้อมูลหลายประเภท เช่น ในการเกิดภัยพิบัติทางผู้ประสบภัยที่ภัยพิบัติของการส่งข้อมูลประเภทเสียง วิดีโอ หรือข้อมูลประเภทอื่น ๆ ระบบเครือข่ายต้องสามารถรองรับข้อมูลเหล่านั้นได้ [8]
7. การสื่อสารจากกรณีการเกิดภัยพิบัติส่วนใหญ่จะมีปริมาณข้อมูลที่ส่งผ่านเครือข่ายในปริมาณมากดังนั้นระบบเครือข่ายต้องสามารถรองรับปริมาณของข้อมูลจำนวนมากได้ [8]

ตารางที่ 2 สรุปงานวิจัยด้านการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจ

Authors	Proposes	Techniques	Network Connection	Mobility Model	Routing Protocol	Performance of Metric
Ray, N. K., and Turuk, A. K. [10]	ออกแบบเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจสำหรับระบบการจัดการภัยพิบัติโดยพิจารณาจาก Message Reliability และ Energy Efficiency	MSGFW Algorithm และ Scenario Algorithm	MANET	-	-	วัดประสิทธิภาพเครือข่ายโดยพิจารณาจาก End-to-End Message Delivery Reliability และ Energy Consumption
Ahmad, N., et al. [4]	ออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับการตรวจหาผู้รอดชีวิตจากการเกิดภัยพิบัติ	Ad Hoc Relay Station สำหรับการส่งข้อมูลไปยัง Sink Node	Wireless Sensor Network + GSM Cellular/ Wimax	-	-	วัดประสิทธิภาพเครือข่ายด้วย Energy Consumption
Narayanan, R. G. L., and Ibe, O. C. [8]	พัฒนา Portable Disaster Recovery Network เพื่อใช้ในการค้นหาและกู้ภัยโดยใช้เวลารวดเร็วที่สุด	Disaster Recovery System และ Search and Rescue System	Hybrid Network (Cellular Network+ Wireless Network+ Wireless Mesh Network)	Random Walk	-	วัดประสิทธิภาพของเครือข่ายด้วย Battery Time, Reachability, จำนวนผู้รอดชีวิต, จำนวนโทรศัพท์
Reina, D. G. [1]	ปรับปรุงการเชื่อมต่อเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์ภัยพิบัติ	Evolutionary Computation Approach	MANET	Disaster Mobility	AODV	วัดประสิทธิภาพของเครือข่ายด้วย Reachability
Tuna, G. [32]	ออกแบบระบบการสื่อสาร Wireless Sensor Network โดยใช้ Mobile Robot สำหรับการตรวจตราผู้ประสบภัยจากเหตุการณ์ภัยพิบัติ	Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) -Centralized Map Building Approach -Distributed Map Building Approach	Wireless Sensor Network	-	-	วัดประสิทธิภาพจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, Battery Lifetime

ตารางที่ 2 สรุปงานวิจัยด้านการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจ (ต่อ)

Authors	Proposes	Techniques	Network Connection	Mobility Model	Routing Protocol	Performance of Metric
Saha, S., et al., [12]	ออกแบบสถาปัตยกรรม Hybrid Ad Hoc Network แบบ 4 ระดับขึ้นเพื่อใช้ในการรวบรวมข้อมูลความชื้นเหลือและข้อมูลการบรรเทาสาธารณภัย หลังจากเกิดภัยพิบัติ	Algorithm -DM Count and Trajectory Computation -FindNearest Neighbor Unvisited - FindNearest Neighbor VisitedIn Previous-Trails - FindNearest Neighbor VisitedIn CurrentTrail -Group Formation -Calculating Maximum Latency for Tier-4	Hybrid Network (Cellular Technology/Public Network+ Satellite Phone/WiMax/Long Range WiFi)	DTN (Delay Tolerant Network) Mobility Model และ DM(Data Mule) Mobility Model	-	วัดประสิทธิภาพของเครือข่ายจาก Packet Delivery Delay และ Mean Latency
Reina, D. G., et al., [31]	พัฒนาเทคนิคในการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของ UVAs ในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติเพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัย	Genetic Algorithm และ Hill Climbing Algorithm	MANET	Static, Group Movement และ Single Movement	-	ประเมินค่าความเหมาะสมของตำแหน่งด้วยการใช้ Fitness Function
Lu, Z., et al., [33]	ศึกษาวิธีการสร้างเครือข่ายของ Smartphone สำหรับการสื่อสารในสถานการณ์การกู้คืนภัยพิบัติ	Team Phone	Hybrid Network	Random Walk	AODV และ Opportunistic Routing (DTN2)	วัดประสิทธิภาพของเครือข่ายจาก Throughput, Delay Message Overhead และ Power Consumption

ประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง

สำหรับการสื่อสารบนเครือข่ายเฉพาะกิจนั้นโพรโทคอลค้นหาเส้นทางเป็นสิ่งที่สำคัญในการค้นหาเส้นทางเพื่อให้โหนดผู้ส่งสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่โพรโทคอลค้นหาเส้นทางมีจำนวนหลายโพรโทคอลทั้งที่พัฒนามานานแต่ยังเป็นที่ยอมรับมาใช้และโพรโทคอลที่ปรับการทำงานมาจากโพรโทคอลเดิมหรือโพรโทคอลที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ดังนั้นการเลือกใช้โพรโทคอลค้นหาเส้นทางให้มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญที่จะต้องได้รับการประเมิน โดยการวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาที่ได้ศึกษาโดยแบ่งตามรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายมีดังนี้

1. Mobile Ad Hoc Network (MANET)

ในการประเมินประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง [17] สำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติด้วยโพรโทคอล AODV, DSR และ AOMDV โดยกำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ Disaster Mobility ใช้ตัวชี้วัด Throughput, Packet Delivery Ratio, Normalised Routing Load, Average End-to-End Delay พบว่าโพรโทคอล AODV มีประสิทธิภาพในการค้นหาเส้นทางมากที่สุด ส่วนโพรโทคอล DSR และ AOMDV จะเหมาะสมในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่ช้าและมีงานวิจัย [16] ที่ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโพรโทคอล AODV, BATMAN, DYMO และ OLSR โดยกำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ Disaster Mobility และมีการกำหนดสิ่งกีดขวางในการใช้งานเครือข่าย MANET วัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลด้วย Packet Delivery Ratio ผลที่ได้พบว่า โพรโทคอล AODV มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากมีค่า Packet Delivery Ratio สูงสุด และ [15] ได้มีการเปรียบเทียบโพรโทคอลที่เป็น New Routing Protocol มาใช้เปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่มีการพัฒนามานาน โดยได้เปรียบเทียบโพรโทคอล CBRP, DSDV, AODV ด้วยการเคลื่อนที่แบบ Random Waypoint ใช้ตัวชี้วัด Average Delay, Packet Delay Variation, Packet Dropped และ Packet Sent Rate พบว่าโพรโทคอล CBRP มีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลอื่น ๆ

2. Hybrid Network

ในการศึกษางานวิจัย [29] ได้ทำการประเมินผล Opportunistic Network ที่พัฒนาโดยใช้ Forwarding Algorithm สำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติที่โหนดมีการเคลื่อนที่แบบ Disaster Mobility โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพของ Opportunistic Routing Protocol ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางด้วย Throughput, Delivery Ratio, Overhead และ Energy Cost Performance ผลการประเมินพบว่า MaxProp Forwarding มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยด้านการวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง

Authors	Proposes	Techniques	Network Connection	Mobility Model	Routing Protocol	Performance of Metric
Reina, D. G., et al., [17]	ประเมินประสิทธิภาพเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจสำหรับการภัยพิบัติด้วยโพรโทคอลค้นหาเส้นทาง	-	MANET	Disaster Mobility	AODV, DSR, AOMDV	วัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางด้วย Throughput, Packet Delivery Ratio, Normalised Routing Load, Average End-to-End Delay
Raffelsberger, C., and Hellwagner, H. [16]	ประเมินประสิทธิภาพโพรโทคอลค้นหาเส้นทางสำหรับการเกิดเหตุฉุกเฉิน	Obstacle Model	MANET	Disaster Mobility	AODV, BATMAN, DYMO, OLSR	วัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางด้วย Packet Delivery Ratio
MartíN-Campillo, A., et al., [29]	ประเมินผล Opportunistic Network ในรูปแบบการเกิดภัยพิบัติโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพของ Opportunistic Routing Protocol	Forwarding Algorithm	Hybrid Network (MANET+ Opportunistic Delay and Disruption Tolerant Networks)	Disaster Mobility	Routing Protocol (Epidemic, MaxProp, PROPHET และ TTR)	วัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางด้วย Throughput, Delivery Ratio, Overhead, Energy Cost Performance
Quispe, L. E., and Galan, L. M. [15]	วัดประสิทธิภาพของโพรโทคอล ค้นหาเส้นทางที่มีประสิทธิภาพดีในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินและการดำเนินการกู้ภัย	New Routing Algorithm	MANET	Random Waypoint	CBRP, DSDV, AODV	วัดประสิทธิภาพของโพรโทคอลค้นหาเส้นทางด้วย Average Delay, Packet Delay Variation, Packet Dropped, Packet Sent Rate

สรุปผลจากการศึกษา

จากการศึกษาเครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติ ในการออกแบบเครือข่ายจะมีการกำหนดรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่าย เช่น เป็นเครือข่ายประเภท Mobile Ad Hoc Network, Wireless Mesh Network, Wireless Sensor Network หรือเป็นประเภท Hybrid Network เป็นต้น ซึ่ง Hybrid Network เป็นเครือข่ายที่การทำงานร่วมกันมากกว่าหนึ่งเครือข่าย เช่น การใช้เครือข่าย MANET ร่วมกับเครือข่ายระบบโทรศัพท์มือถือหรือ Cellular Network เป็นต้น การออกแบบเครือข่ายจะมีวัตถุประสงค์หลักที่สำคัญ คือ การสื่อสารในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติที่มีเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดเกิดขึ้นเครือข่ายจะต้องสนับสนุนการกู้คืนภัยพิบัติ การค้นหาและการกู้ภัย การสื่อสารระหว่างผู้ประสบภัยและทีมกู้ภัยให้สามารถใช้เครือข่ายได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อให้เกิดการสื่อสารที่สมบูรณ์ที่สุดโดยอาจจะมีการวัดความสามารถของเครือข่าย เช่น Life Time ของเครือข่ายที่นานที่สุด จำนวนโหนดหรืออุปกรณ์ที่อยู่ในพื้นที่ประสบภัยสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้ในปริมาณมาก ความสามารถของโหนดในการเชื่อมต่อกับเครือข่าย หรืออัตราการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่ได้ศึกษาในช่วงแรกนั้นจะเป็นการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจแบบ MANET แต่หลังจากนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการออกแบบเครือข่ายประเภท Hybrid Network ซึ่งเป็นได้ว่าหากมีสถานการณ์ภัยพิบัติเกิดขึ้นโครงสร้างการสื่อสารพื้นฐานไม่สามารถใช้งานได้ เครือข่ายเฉพาะกิจที่ผู้ประสบภัยและทีมกู้ภัยจะสามารถติดต่อสื่อสารกันอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดภายใต้โครงสร้างการสื่อสารที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้จะต้องเป็นเครือข่ายหลายเครือข่ายที่แตกต่างกันที่สามารถปรับการทำงานให้สามารถใช้งานร่วมกันได้จึงเป็นเหตุผลสำคัญในการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจแบบ Hybrid Network เพื่อใช้ในการสื่อสารในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติมากที่สุด และจากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันหากเกิดภัยพิบัติที่มีความรุนแรงและเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนนั้น หากมีการนำเครือข่ายเฉพาะกิจไปใช้ในการกู้ภัยพิบัติจะพบว่าเครือข่ายเฉพาะกิจแบบ Hybrid Network มีความเหมาะสมสำหรับการจัดการการกู้ภัยมากที่สุด

นอกจากการออกแบบเครือข่ายที่ต้องสามารถสนับสนุนวัตถุประสงค์ดังกล่าวแล้วการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สื่อสารหรือโหนดที่ผู้ประสบภัยหรือทีมกู้ภัยใช้ในการสื่อสารจะเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้การสื่อสารเพื่อค้นหาและกู้ภัยระหว่างผู้ประสบภัยและทีมกู้ภัยมีประสิทธิภาพ เช่น ขณะที่ทีมกู้ภัยค้นหาผู้ประสบภัยจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความรวดเร็วผ่านสิ่งกีดขวาง โหนดหรืออุปกรณ์การสื่อสารจะต้องสามารถติดต่อสื่อสาร เชื่อมต่อและอยู่ในเครือข่ายได้ หรือในขณะที่ผู้ประสบภัยถูกเคลื่อนย้ายจากสถานที่เกิดภัยพิบัติไปยังสถานที่ปลอดภัยด้วยการเคลื่อนไหวที่แตกต่างกัน อุปกรณ์สื่อสารหรือโหนดต้องสามารถสื่อสารได้ เป็นต้น

นอกจากการออกแบบเครือข่ายและการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สื่อสารหรือโหนดแล้วสิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มคือ โพรโทคอลที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางเพื่อให้อุปกรณ์สื่อสารหรือโหนดต้นทางสามารถสื่อสารและส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์หรือโหนดปลายทางได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ เช่น ต้องการสื่อสารด้วยจำนวนฮอปที่น้อยที่สุด, สื่อสารด้วย Overhead ที่ต่ำที่สุด, สื่อสารด้วยการใช้พลังงานของโหนดต่ำที่สุด หรือ สื่อสารด้วย Throughput ที่สูงที่สุด เป็นต้น และจากการศึกษาของงานวิจัยเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์ภัยพิบัติโพรโทคอลค้นหาเส้นทางส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในการค้นหาเส้นทางจะเป็นโพรโทคอล ประเภท Reactive Routing Protocol เหตุผลเนื่องจากโพรโทคอลประเภท Reactive นั้น

จะมี Overhead ของข้อมูลต่ำมีการอัปเดตตารางเส้นทางเป็นช่วง ๆ จึงลดความจำเป็นที่จะ Broadcast เพื่อให้ได้ข้อมูลในตารางเส้นทาง ดังนั้นจึงมีการเลือก Reactive Routing Protocol มาใช้ในเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์ภัยพิบัติ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ได้ศึกษาส่วนใหญ่พยายามมุ่งเน้นที่จะแก้ปัญหาการสื่อสารในกรณีการเกิดภัยพิบัติให้ผู้ประสบภัย ทีมกู้ภัยค้นหาและทีมรักษาพยาบาล สามารถที่จะสื่อสารกันภายใต้เงื่อนไขของโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐานที่อาจจะไม่สามารถใช้งานได้เมื่อมีภัยพิบัติเกิดขึ้น โดยทำการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจสำหรับการสื่อสารในสถานการณ์ภัยพิบัติด้วยวิธีการ อัลกอริทึม รูปแบบการเคลื่อนที่โพรโทคอลค้นหาเส้นทางหรือตัวชี้วัดประสิทธิภาพของเครือข่ายที่แตกต่างกัน

แนวโน้มงานวิจัยการออกแบบเครือข่ายเฉพาะกิจในสถานการณ์การเกิดภัยพิบัติในอนาคตเป็นไปได้ว่าจะมีการออกแบบเครือข่ายแบบ Hybrid Network ที่มีการปรับการทำงานให้เครือข่ายที่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ภัยพิบัตินั้นสามารถปรับการทำงานร่วมกันได้ด้วยความรวดเร็วและโพรโทคอลค้นหาเส้นทางจะมีการนำคุณสมบัติคุณภาพของการบริการ (Quality of Service) มาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกใช้โพรโทคอลด้วย

References

- [1] Reina, D. G., Marin, S. T., Bessis, N., Barrero, F., and Asimakopoulou, E. (2013). An Evolutionary Computation Approach for Optimizing Connectivity in Disaster Response Scenarios. **Applied Soft Computing**. Vol. 13, Issue 2, pp. 833-845. DOI: 10.1016/j.asoc.2012.10.024
- [2] Manfredi, V., Crovella, M., and Kurose, J. (2011). Understanding Stateful vs Stateless Communication Strategies for Ad Hoc Networks. In **Proceeding MobiCom '11 Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**. Las Vegas, Nevada, USA-September 19 - 23, 2011. pp. 313-324. DOI: 10.1145/2030613.2030649
- [3] Garnepudi, P., Damarla, T., Gaddipati, J., and Veeraiah, D. (2013). Proactive, Reactive and Hybrid Multicast Routing Protocols for Wireless Mesh Networks. In **2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)**. pp. 1-7. DOI: 10.1109/ICCIC.2013.6724255
- [4] Ahmad, N., Riaz, N., and Hussain, M. (2011). Ad Hoc Wireless Sensor Network Architecture for Disaster Survivor Detection. **International Journal of Advanced Science and Technology**. Vol. 34, No. 9, pp. 9-16
- [5] Xu, D. and Gao, J. (2011). Comparison Study to Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. **Procedia Environmental Sciences**. Vol. 10, Part A, pp. 595-600. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.096
- [6] Dehnavi, M., Mazaheri, M. R., Homayounfar, B., and Mazinani, S. M. (2012). Energy Efficient and QoS Based Multi-Path Hierarchical Routing Protocol in WSNs. In **Proceeding IS3C '12 Proceedings of the 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control**. June 04 - 06, 2012. pp. 414-418. DOI: 10.1109/IS3C.2012.111

- [7] Kuila, P. and Jana, P. K. (2014). A Novel Differential Evolution Based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. **Applied Soft Computing**. Vol. 25, pp. 414-425. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.08.064
- [8] Narayanan, R. G. L. and Ibe, O. C. (2012). A Joint Network for Disaster Recovery and Search and Rescue Operations. **Journal Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking**. Vol. 56, Issue 14, pp. 3347-3373. DOI: 10.1016/j.comnet.2012.05.012
- [9] Rodríguez-Covili, J., Ochoa, S. F., and Pino, J. A. (2012). High Level MANET Protocol: Enhancing the Communication Support for Mobile Collaborative Work. **Journal of Network and Computer Applications**. Vol 35, Issue 1, pp. 145-155. DOI: 10.1016/j.jnca.2011.02.006
- [10] Ray, N. K. and Turuk, A. K. (2011). A Framework for Disaster Management Using Wireless Ad Hoc Networks. In **Proceeding ICCCS '11 Proceedings of the 2011 International Conference on Communication, Computing & Security**. Rourkela, Odisha, India - February 12 - 14, 2011. pp. 138-141. DOI: 10.1145/1947940.1947970
- [11] Qiu, T., Chen, N., Li, K., Qiao, D., and Fu, Z. (2017). **Heterogeneous Ad Hoc Networks: Architectures, Advances and Challenges**. Ad Hoc Networks. Vol. 55, Issue C, pp. 143-152. DOI: 10.1016/j.adhoc.2016.11.001
- [12] Saha, S., Nandi, S., Paul, P. S., Shah, V. K., Roy, A., and Das, S. K. (2015). Designing Delay Constrained Hybrid Ad Hoc Network Infrastructure for Post-Disaster Communication. **Ad Hoc Networks**. Vol. 25, pp. 406-429
- [13] Jayakumar, G. and Gopinath, G. (2007). Ad Hoc Mobile Wireless Networks Routing Protocols-A Review. **Journal of Computer Science**. Vol. 3, Issue 8, pp. 574-582. DOI: 10.3844/jcssp.2007.574.582
- [14] Xiang, M. (2012). Analysis on Multicast Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks. **Physics Procedia**. Vol. 25, pp. 1787-1793. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.312
- [15] Quispe, L. E. and Galan, L. M. (2014). Behavior of Ad Hoc Routing Protocols, Analyzed for Emergency and Rescue Scenarios, on a Real Urban Area. **Expert Systems with Applications**. Vol. 41, Issue 5, pp. 2565-2573. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.10.004
- [16] Raffelsberger, C. and Hellwagner, H. (2012). Evaluation of MANET Routing Protocols in a Realistic Emergency Response Scenario. **10th International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, 2012**. pp. 88-92
- [17] Reina, D. G., Toral, S. L., Barrero, F., Bessis, N., and Asimakopoulou, E. (2011). Evaluation of Ad Hoc Networks in Disaster Scenarios. **2011 Third International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems**. pp. 759-764. DOI:10.1109/incos.2011.86
- [18] Perkins, C. E. and Bhagwat, P. (1994). Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. In **SIGCOMM '94 Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications**. Vol. 24, Issue 4, pp. 234-244. DOI: 10.1145/190314.190336

- [19] Baraković, S. and Baraković, J. (2010). Comparative Performance Evaluation of Mobile Ad Hoc Routing Protocols. In **MIPRO, 2010 Proceedings of the 33rd International Convention**. pp. 518-523
- [20] Vijayavani, G. R. and Prema, G. (2012). Performance Comparison of MANET Routing Protocols with Mobility Model Derived Based on Realistic Mobility Pattern of Mobile Nodes. **IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), 2012**. pp. 32-36
- [21] Kuperman, G., Veytser, L., Cheng, B. N., Moore, S., and Narula-Tam, A. (2014). A Comparison of OLSR and OSPF-MDR for Large-Scale Airborne Mobile Ad-Hoc Networks. In **Proceedings of the third ACM Workshop on Airborne Networks and Communications**. pp. 17-22
- [22] Mohapatra, S. and Kanungo, P. (2012). Performance Analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV Routing Protocols Using NS2 Simulator. **Procedia Engineering**. Vol. 30, pp. 69-76. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.835
- [23] Perkins, C. E. and E. M. Royer. (1999). Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. **Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications**. DOI: DOI: 10.1109/MCSA.1999.749281
- [24] Kasirama, R., RajKumar, G., Asokan, J., and Parthiban, D. (2012). Performance Analysis of DSR and DSDV in Motion and Motionless State. **Procedia Engineering**. Vol. 38, pp. 1518-1523. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.187
- [25] Marina, M. K. and Das, S. R. (2001). On-demand Multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks. **Proceedings Ninth International Conference on Network Protocols**. ICNP 2001. pp. 14-23. DOI:10.1109/ICNP.2001.992756
- [26] Chaba, Y., Singh, Y., and Joon, M. (2009). Performance Evaluation and Analysis of Cluster Based Routing Protocols in MANETs. In **2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies**. pp. 64-66. DOI:10.1109/act.2009.26
- [27] Aschenbruck, N., Gerhards-Padilla, E., and Martini, P. (2009). Modeling Mobility in Disaster Area Scenarios. **Performance Evaluation**. Vol. 66, Issue 12, pp. 773-790. DOI: 10.1016/j.peva.2009.07.009
- [28] Akhtar Khan, N., Ahmad, F., and Khan, S. A. (2014). Formal and Executable Specification of Random Waypoint Mobility Model Using Timed Coloured Petri Nets for WMN. **Abstract and Applied Analysis**. Vol. 2014, Hindawi Publishing Corporation. DOI: 10.1155/2014/798927
- [29] MartíN-Campillo, A., Crowcroft, J., Yoneki, E., and Martí, R. (2013). Evaluating Opportunistic Networks in Disaster Scenarios. **Journal of Network and Computer Applications**. Vol. 36, Issue 2, pp. 870-880. DOI: 10.1016/j.jnca.2012.11.001
- [30] Meghanathan, N. (2011). A Location Prediction Based Routing Protocol and Its Extensions for Multicast and Multi-path Routing in Mobile Ad Hoc Networks. **Ad Hoc Networks**. Vol. 9, Issue 7, pp. 1104-1126. DOI: 10.1016/j.adhoc.2010.12.005

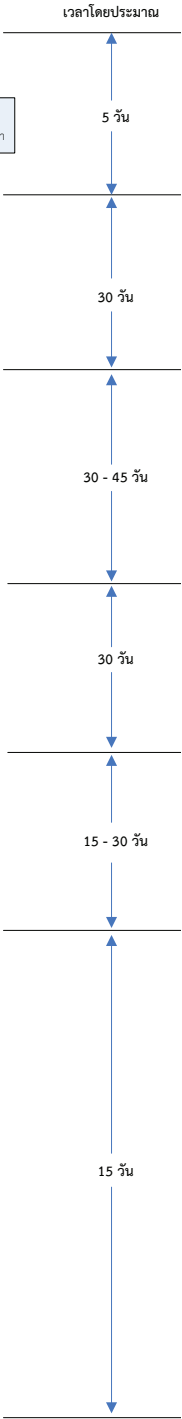
- [31] Reina, D. G., Toral, S. L., and Tawfik, H. (2016). UAVs Deployment in Disaster Scenarios Based on Global and Local Search Optimization Algorithms. In **9th International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE 2016**. pp. 197-202
- [32] Tuna, G., Gungor, V. C., and Gulez, K. (2014). An Autonomous Wireless Sensor Network Deployment System Using Mobile Robots for Human Existence Detection in Case of Disasters. **Ad Hoc Networks**. Vol. 13, pp. 54-68. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.06.006
- [33] Lu, Z., Cao, G., and La Porta, T. (2017). TeamPhone: Networking Smartphones for Disaster Recovery. **IEEE Transactions on Mobile Computing**. Vol. 16, Issue 12, pp. 3554-3567. DOI: 10.1109/TMC.2017.2695452



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ฝ่ายการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทย่อยของความถี่ที่ตีพิมพ์

- 1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

- ## 1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมถึงไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ

3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน

4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าน้ำกระดาษ

- ระยะเวลาขอบ

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

- ภาษาไทย และภาษาอังกฤษ 11

- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย”

“สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดขีดซ้ายหน้ากระดาษ

- 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 จากนั้นน้อยไปหามาก 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 ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด้านฉบับที่ข้าพเจ้า (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 (สำหรับส่งวารสาร).....

รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

โทรสาร.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ.....

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

☐ วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี 3 ฉบับ)

โดย ☐ สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

☐ ต่ออายุสมาชิก จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน.....บาท

(ตัวอักษร).....

ซึ่งได้โอนเงินผ่านทางบัญชี 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
(.....)

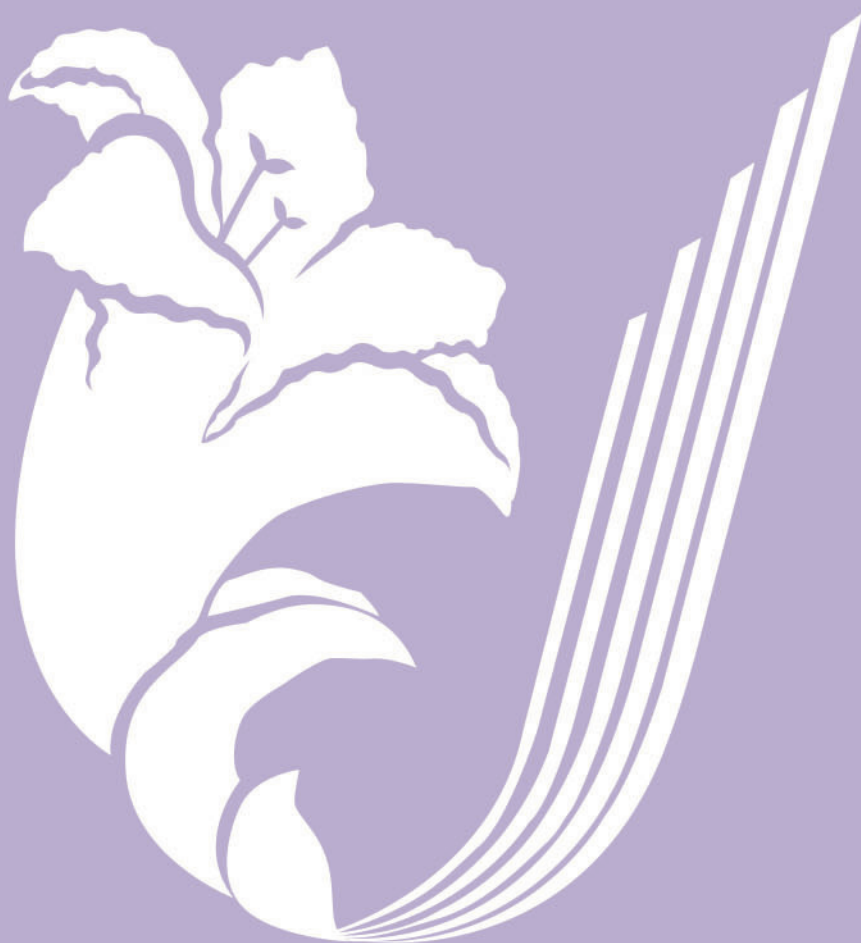


หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
สังกัดหน่วยงาน
มีความประสงค์ขออนการพิจารณาบทความเรื่อง
.....
.....
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

ราชมนฑลอีสาน



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol. 12 No. 2 May - August 2019



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>