

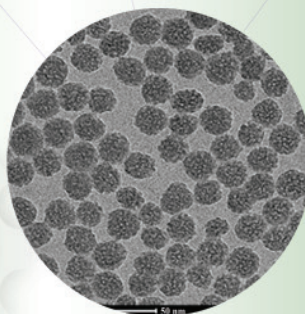
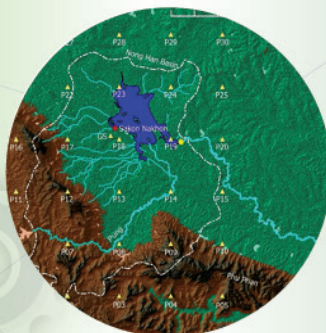
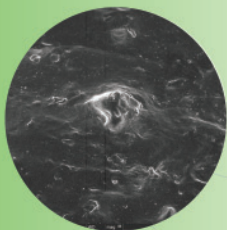


วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2562



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

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. สาขาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาเกษตรศาสตร์
3. สาขาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

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

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุนทรารายณ์ 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 และมิใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสาร มทร.อีสาน RMUTI JOURNAL

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวัตรต ทาสุข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณอ่ำวง	เปรมปรีดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุตินา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมณะเศวต	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	ธาดาทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธำธิบุญ	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.เยวพา
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
สารินุตร	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

High Spectrum Efficiency of MIMO-SC-FDMA for Optical Wireless Communication Systems 1

Kidsanapong Puntsri and Puripong Suttisopapan

Effects of Thai Herb Extracts in Combination with High Pressure Treatment on the Microbial and Physicochemical Quality of Fresh Pork 13

Thananun Yuwang, Kanok-Orn Intarapichet, Kaemwich Jantama, and Ralf Lautenhalager

Adsorption Efficiency, Adsorption Isotherms and Kinetic Study for Methylene Blue Removal in Aqueous Solution of Thiol-Functionalized Mesoporous Silica Nanospheres 34

Romteera Chueachot, Kewalee Khankam, Atcharaphan Lakathok,

Suwatchai Jarussophon, and Ronariddh Nakhawong

ผลของการเปลี่ยนแปลงประชากรต่อความต้องการการดูแลสุขภาพด้วยแบบจำลองมาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน 48

นวลพรรณ บุราณศรี และพงษ์ชัย จิตตะมัย

สมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน 64

ธัมม์โชโต ประจักษ์สูตร, คมกฤษ ปิติฤกษ์ และฉิราวุธ พงศ์ประยูร

การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีแผ่นบางรูปตัวซี 79

สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์, เอกวุฒิ แสนคำวงศ์ และชาญวิทย์ ชัยอมฤต

การออกแบบและสร้างกระเพาะเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำความร้อนและความเย็น 96

เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศร้อนไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนือปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดคาซายสเดนเลส 110

รตินันท์ เหลือมพล, สังวาลย์ บุญจันทร์, คมเพชร อินลา และบัณฑิต กฤตาคม

การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากสูตรการตอกเสาเข็มกับการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ 125

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์, อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และฐิตินันท์ ป้องนาม

การออกแบบและสร้างรหัสรักษาความปลอดภัยสำหรับกระบวนการตรวจสอบและยืนยันตัวตนของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ 138

ปราชญ์ อัครนรากุล และอำนาจ เรืองวาริ

การสำรวจไลเคนบริเวณป่าพรุในพื้นที่ปกปักพันธุ์กรรมพีชะ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี 150

ชวัลรัตน์ สมนึก และพิสุทธิ การบุญ

การเตือนภัยจากระดับน้ำในทะเลสาบล่วงหน้าด้วยข้อมูลการตรวจวัดฝนทั่วโลก: กรณีศึกษาทะเลสาบหนองหาร 160

ประวิทย์ อ่วงอารีย์, ชัยณรงค์ เพียรภาณุ และทรงพล ประโยชน์

Table of Contents

Research Articles

High Spectrum Efficiency of MIMO-SC-FDMA for Optical Wireless Communication Systems	1
Kidsanapong Puntsri and Puripong Suttisopapan	
Effects of Thai Herb Extracts in Combination with High Pressure Treatment on the Microbial and Physicochemical Quality of Fresh Pork	13
Thananun Yuwang, Kanok-Orn Intarapichet, Kaemwich Jantama, and Ralf Lautenhalager	
Adsorption Efficiency, Adsorption Isotherms and Kinetic Study for Methylene Blue Removal in Aqueous Solution of Thiol-Functionalized Mesoporous Silica Nanospheres	34
Romteera Chueachot, Kewalee Khankam, Atcharaphan Lakathok, Suwatchai Jarussophon, and Ronariddh Nakhawong	
The Impact of Population Changes on Healthcare Demands using Nonhomogeneous Markov Model	48
Nuanpan Buransri and Phongchai Jittamai	
Mechanical Properties of Natural Rubber Reinforced with Modified Silica by Admicellar Polymerization	64
Thamchoto Prajaksod, Komkrit Pitiruek and Thirawudh Pongprayoon	
Experimental Study of Enhanced Heat Transfer in a Circular Tube Heat Exchanger with Sinusoidal Baffles	79
Supattarachai Suwannapan, Eakkawut Saenkhamvong and Chanwit Chaiamarit	
Design and Development of a Thermoelectric Pan for Heating and Chilling Application	96
Jensak Ekburanawat	
A Study Effect of Hot Air Recirculating Ratio on Drying Behavior of Tilapia by Using a Hot Air Dryer Installed with Stainless Wire Mesh Porous Material	110
Ratinun Luampon, Sungwan Bunchan, Kompet Inla and Bundit Krittakom	
A Comparision of Bearing Capacity of Pile from Pile Driving Formulas and Dynamic Load Test	125
Worawit Phojan, Anuchat Leeanansaksiri, and Thitinun Pongnam	
Design and Implementation of Security Code for the Identification and Authentication Process of Electronic Toll Collection System	138
Prach Asavanarakul and Amnoiy Ruengwaree	
Survey of Lichen at Swamp Forest in Plant Genetic Protection Area, Rambhai Barni Rajabhat University	150
Chawanrat Somnuek and Phisut Kanboon	
Early Warning of Lake Level Fluctuations using Global Precipitation Measurement Data: a case study Nong Han Lake	160
Prawit Uang-aree, Chainarong Pianpailoo and Songphon Prayochme	

High Spectrum Efficiency of MIMO-SC-FDMA for Optical Wireless Communication Systems

Kidsanapong Puntsri^{1*} and Puripong Suttisopapan²

Received: May 10, 2019; Revised: July 12, 2019; Accepted: July 24, 2019

Abstract

This work aimed to present high spectrum efficiency of single carrier frequency division multiplexing (SC-FDM) together with multiple-input multiple-output (MIMO) for optical wireless communication (OWC) systems. In order to improve signal to noise ratio (SNR), maximum ratio combining (MRC) with frequency diversity was employed. It was compared with the zero forcing detection in higher order MIMO system. Additionally, at the receiver end, due to small diameter size of the avalanche photodetector (APD), the numbers of receiver up to 100 elements were therefore practically applicable. To analyze the proposed systems over OWC channel, the numerical simulation method was used and multi-path indoor environment was assumed. By applying the proposed diversity method, the results clearly showed that the SNR was significantly improved and the high order M-ary QAM (quadrature amplitude modulation) can also be achieved. Furthermore, for 256-QAM, the error free transmission can be achieved with SNR of only 30 dB with 6 number of antennas. In zero forcing detection, the transmission speed was higher than the MRC system when compared with the same bit per symbol. However, it gave higher BER.

Keywords: Multiple-Input Multiple-Output; Single Carrier Frequency Division Multiplexing; Optical Wireless Communication Systems; Intensity Modulation/Direct Detection

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

² Faculty of Engineering, Khon Kaen University

* Corresponding Author E - mail Address: kidsanapong.pu@rmuti.ac.th

Introduction

Optical wireless communication (OWC) is very attractive to study and develop. OWC has many advantages, such as high bandwidth and no interference from radio frequency (RF) signals [1] - [2], and it is very secure in communication systems. Therefore, many applications including both free space [1] - [2] and underwater [3] are investigated for the possibility to implement it. In wireless systems using RF, diversity techniques are usually used to speed up data rate and/or gain the signal to noise ratio (SNR). There are many diversity techniques proposed in literature, e.g., maximal ratio combining (MRC), equal gain combining (EGC), selected combining (SC) or space-time block coding (STBC) [4]. Due to a promising performance, it is worth mentioning that the combination between diversity techniques and advance modulation format together, such as orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) could be an emerging technology in the future [5].

OFDM is a multicarrier communication system which has many advantages when compared to a single carrier. Moreover, the intersymbol interference (ISI) can be solved by adding a cyclic prefix (CP) in the front of each OFDM symbol. Therefore, it can provide very high spectrum efficiency. OFDM also makes communication systems simple to implement in hardware. However, its major disadvantage is a high peak to average power ratio (PAPR) [4], which causes nonlinearity when passing the signal to the amplifier. To reduce the PAPR, the single carrier frequency division multiplexing (SC-FDM) is replaced and at least 3dB lower PAPR can be obtained over conventional OFDM. Therefore, it is very attractive to investigate and it already becomes a standard for Long Term Evolution (LTE) [6]. However, in OWC system, only a few SC-FDM works are investigated.

SC-FDM for OWC has been first experimentally investigated by Puntsri, K. [7]. The experimental results demonstrated that SC-FDM with 128-QAM can be practically implemented to attain a very spectrum efficiency at rate 4.56 b/s/Hz. However, multiple-input multiple-output (MIMO) combined with SC-FDM (MIMO-SC-FDM) for OWC is not yet examined in the literature review. Only MIMO-SC-FDM in wireless systems is shown. MIMO is a multiple transmitter antennas and receiver antennas communication systems and it is one of the best ways to gain up diversity and SNR. Especially, the joint design of large/massive MIMO and advance modulation format will be an emerging technology in the future.

MIMO for OWC has been investigated by only a few researchers. Berenguer, P. W. et al. [8] has presented a field trial of OWC for a robotic manufacturing environment. It has been shown that moderate data rates, high reliability, and low latency can be achieved. The channel measurements and transmission were also done in this work. The MIMO size

of 8×6 was considered and the results showed that the SNR is acceptable if a line-of-sight (LOS) is available. However, when an LOS is obstructed by small movements and rotations, it would lead to sudden fades of 10 - 20 dB power. From the results, it can be concluded that MIMO OWC is suitable for industrial wireless applications.

Ntogari, G. et al. [9] conducted a comparison between STBC systems with two transmitted antennas and single-input single-output (SISO) systems, where the same total optical transmit power was considered, in coherent OWC systems. STBC improves the capacity coverage area and requires less transmitting power. Additionally, MIMO for visible light communication (VLC) application was shown by Chen, C. et al. [10]. The non-Hermitian symmetry (NHS-OFDM) modulation method and an imaging angle diversity receiver were proposed. The results showed that MIMO system is very useful and it has a lot of benefit for high speed communication systems in indoor wireless communications. Navidpour, S. M. et al. [11] has proposed the system design and the performance analysis of MIMO method for coherent OWC. The mitigated atmospheric turbulence effects were considered. The phase noise impairment was compensated in electrical domain. Furthermore, many diversity combining methods were employed and compared, where the gamma-gamma turbulence, K-distributed turbulence, and negative exponential turbulence were adopted for free space channels.

From the literature reviews, in this work, the large MIMO with high spectrum efficiency for SC-FDM is studied and analyzed, where the MRC and frequency diversity for SC-FDM in OWC systems is proposed. In order to conduct numerical simulation, a multi-paths OWC channel is assumed and the number of more than 50 receiver antennas is considered. The system performance is measured in terms of bit error rate (BER) against signal to SNR. Additionally, the Reed-Solomon (RS) code with hard decision is also employed to reduce BER of system performance. The results showed that the system performance is significantly improved and a very large M-ary QAM order can be offered. Moreover, bit error free transmission can be achieved at only a few receiver antennas and SNR for MRC scheme.

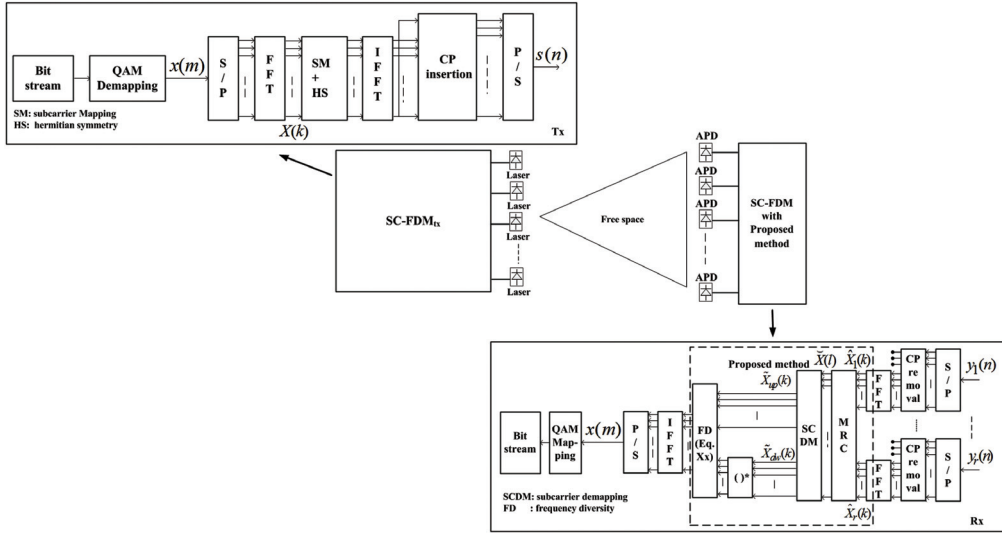


Figure 1 System model used for massive SIMO-SC-FDM in OWC Systems

SC-FDM with MIMO in OWC systems

The detailed of SC-FDM system with MIMO for OWC systems is shown in Figure 1. As can be seen, the SC-FDM system is similar to OFDM, only additional FFT and IFFT computation are required for the transmitter and receiver, respectively. First, the bit streaming is fed into QAM-mapping unit to group the number of bits into a symbol, which is denoted by $x(m)$. The mapped symbol is converted to frequency domain using fast Fourier transform (FFT) processing, defined by $X(k)$, with the size of N_{sb} and $k = 0 \dots N_{SB} - 1$. N_{SB} as the number of sub band. Next, the subcarrier mapping is followed to setup the input to the invert FFT (IFFT) with the size of N_C . In this work, the interleaved FDM was used, where it gave the lowest PAPR, as reported in [7]. Additionally, for OWC, the intensity modulation/direct detection (IM/DD) was needed. Therefore, the Hermitian symmetry was adapted to obtain the SC-FDM, which only had real (or only imaginary) component. The subcarrier mapping established the Hermitian symmetry input for IFFT, where the mapped subcarrier is given by equation (1)

$$\tilde{X} = [\underbrace{0 \ X(0) \dots 0 \ X(N_{sb}-1) \ 0}_{\tilde{X}_{up}} \ \underbrace{0 \ X^*(N_{sb}-1) \ 0 \dots X^*(0)}_{\tilde{X}_{dw}}], \quad (1)$$

hence, $\tilde{X}$ is subcarrier mapped vector with length of $l = 0 \dots N_C - 1$. $\tilde{X}_{up}$ is the vector of the first half and $\tilde{X}_{dw}$ is the vector of the second half of $\tilde{X}$, respectively. As can be seen, $\tilde{X}_{dw} = \tilde{X}_{up}^*$, where the index of $\tilde{X}_{dw}$ is reversed order of $\tilde{X}_{up}$.

Then, a cyclic prefix (CP) is added to prevent the ISI due to the dispersive free space channel. Finally, the transmitted signal, which included CP, is denoted by $s(n)$. For more than one antennas, $s_i(n)$ denoted for the transmitted signal with i element, where $i = 1 \dots nTx$ and nTx is the number transmitted antenna.

At the receiver, the received signal at the r th antennas is denoted by $y_r(n)$, which is expressed by

$$y_r(n) = s_i(n) \otimes h_r(n) + z_r(n), \quad (2)$$

where $r = 1 \dots nRx$ and nRx is the number of received antenna. $h_r(n)$ is free space channel and $z_r(n)$ is the noise component, which is modeled by additive white Gaussian noise (AWGN) with zero mean and the variant is σ_{noise}^2 . $\otimes$ is convolution operator. $r = 1 \dots nRx$ and nRx is the number of receive antennas.

From equation (2), the CP is removed and $y_r(n)$ which are only the useful samples remain and are fed in to the FFT. The signal after taking FFT is given by equation (3):

$$\hat{X}_r(l) = \sum_{i=1}^{nTx} \sum_{r=1}^{nRx} \tilde{X}_i(l) \cdot H_{i,r}(l) + Z_r(l), \quad (3)$$

hence, $H_r(l)$ is the free space channel and $Z_r(l)$ is AWGN noise.

MRC receiver

Now, MRC is detailed, where only one transmitted antenna is employed and the combination receiver of all received branches is expressed by equation (4)

$$\begin{aligned} \tilde{X}(l) &= \frac{\tilde{X}(l) \cdot \sum_{r=1}^{nRx} H_r(l) H_r^*(l) + \sum_{r=1}^{nRx} Z_r(l) H_r^*(l)}{\sum_{r=1}^{nRx} H_r(l) H_r^*(l)} \\ &= \tilde{X}(l) + \frac{\sum_{r=1}^{nRx} Z_r(l) H_r^*(l)}{\sum_{r=1}^{nRx} H_r(l)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Next, subcarrier demapping is done in the following, where it strips out all zeros and only the useful information data symbol remains. Here, because of Hermitian symmetry

input setup likes equation (1), the second half conjugated one of the first half, which are denoted by $\tilde{X}_{up}$ and $\tilde{X}_{dw}$ for the first and the second, respectively. Therefore, if we conjugate $\tilde{X}_{dw}(k)$ the, the frequency diversity can be done easily by equation (5):

$$\tilde{X} = \frac{\tilde{X}_{up} + \tilde{X}_{dw}^*}{2}, \quad (5)$$

where $\hat{X}$ is the signal vector after formulating frequency diversity with the length of N_{sb} and the noise component reduced by divided by two. Next, $\hat{X}$ is fed in to IFFT and QAM demapping to map a QAM symbol in to bit streaming in the finally process.

Zero forcing receiver

In this section, the zero forcing receiver is detailed. In this work, the system consisted of two transmitters with two and four receivers. The zero forcing equalization must satisfy condition that $WH = I$, where W is the weight gain equalization and it is given by $W = (H^H H)^{-1} H^H$. Therefore the zero forcing equalization is expressed by (equation (6)) [4]

$$\begin{aligned} X_{ZF}^{\%} &= WY \\ &= (H^H H)^{-1} H^H HX + Z \end{aligned} \quad (6)$$

$X_{ZF}^{\%}$ is the estimated received signal using zero forcing equalization. $Y = FFT(y(n))$ and $y(n)$ is equation (2). Additionally, this is no diversity but, full rate of communication systems can be achieved.

Simulation model

The system considered for this work is shown in Figure 1. There is one nTx SC-FDM transmitter and nRx receivers. The MIMO free space channel impulse response from the transmitter to the receiver r , where $r = 1 \dots nRx$, is modeled by equation (7) [11] - [12]

$$h_r(n) = \eta_r \cdot \frac{6a_r^6}{(n + a_r)^7}, \quad (7)$$

hence, $h_r(n)$ is the OWC channel response. $a_r = 12\sqrt{11/13} \cdot \tau_{rms,r}$ is the normalized factor of the root mean square channel delay spread which is denoted by $\tau_{rms,r}$. η_r is the ling-of-sight links, which is expressed by equation (8):

$$\eta_r = \frac{(m+1)A}{2\pi d_r^2} \cos^m(\alpha_r) \cos(\beta_r). \quad (8)$$

Hence, $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha_r \leq \frac{\pi}{2}$ and $-\frac{\pi}{2} \leq \beta_r \leq \frac{\pi}{2}$. Unless, h_r will be equaled zeros. A is the active area of the avalanche photo detector (APD) and the order of Lambertian emission, denoted by m , is given by equation (9)

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\varphi_{1/2}))}, \quad (9)$$

where $\varphi_{1/2}$ is the semiangle at half-power of transmit power.

In this work, $N_C = 1024$, $N_b = N_C / 4 = 256$ and the number for CP is 128 ($= N_C / 8$) were assumed. The number of M-QAM and number of receiver antenna were investigated. Additionally, the simulated parameters are as follows: $\varphi_{1/2} = 60^\circ$, then $m = 1$, $A = 15 \text{ mm}^2$, $d_r = 2m$, $\alpha_r = 90^\circ$ and $\beta_r = 90^\circ$.

Simulation Results

The numerical simulations using Matlab are discussed in this section. The system performance was analyzed in terms of BER and the system design parameters were examined.

Firstly, the single input multiple output (SIMO) with diversity schemes including MRC and frequency diversity was investigated. The number of receive antenna of 50 elements was assumed, ($nR_x = 50$). 256-QAM was used and the BER result is shown in Figure 2. As can be seen, the proposed MRC with frequency diversity gave the lowest BER and the SNR gained a lot when compared with the case of no diversity. It can clearly be seen that the system performance was significantly improved.

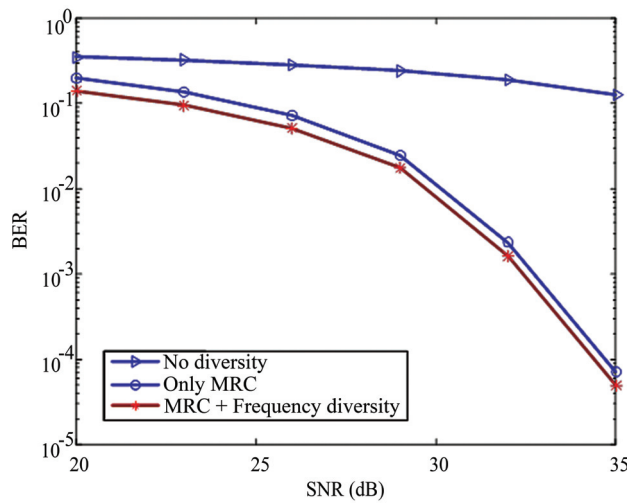


Figure 2 BER performance versus SNR for 256-QAM with various diversity schemes

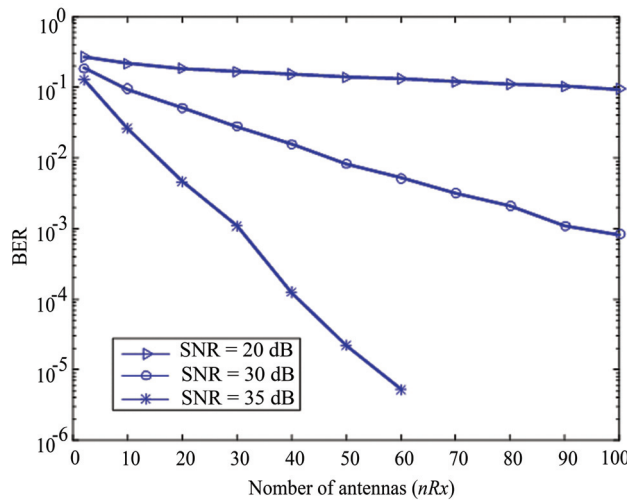


Figure 3 BER performance against the number of antennas (n_{Rx}) for 256-QAM with the SNR of 20 dB 30 dB and 35 dB

Figure 3 plots the BER against the number of antennas in which this value was varied from 2 to 100 elements and 256-QAM was adopted. The BER for the SNR of 20 dB 30 dB and 35 dB were compared. The results showed that when the number of antenna was increased, the BER reduced. This is because the SNR gain was enhanced. Especially, for the SNR of 35 dB at 60 elements of antennas, the BER free can be achieved.

Figure 4 depicts the comparison of BER performance with SNR for various modulation orders of M ary QAM. The number of antennas for 60 elements was assumed. As can be seen, if the SNR increased, the BER reduced for all M-QAM. To achieve error free, the SNR of

more than 21 dB, 27 dB and 33 dB were required for 16-QAM, 64-QAM and 256-QAM, respectively. Additionally, to reduce the number of antennas, a coding method would be required. For this work, the Reed–Solomon (RS) error correction code with hard decision decoding was adopted. In this test, 256-QAM with SNR=30 dB was assumed.

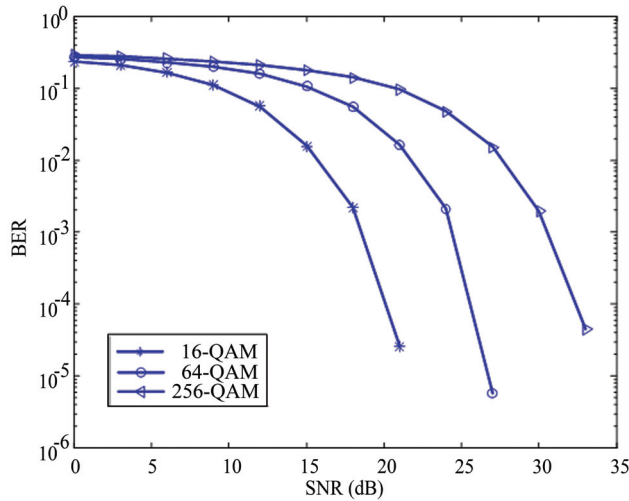


Figure 4 BER performance versus M-QAM with $nR_x = 60$

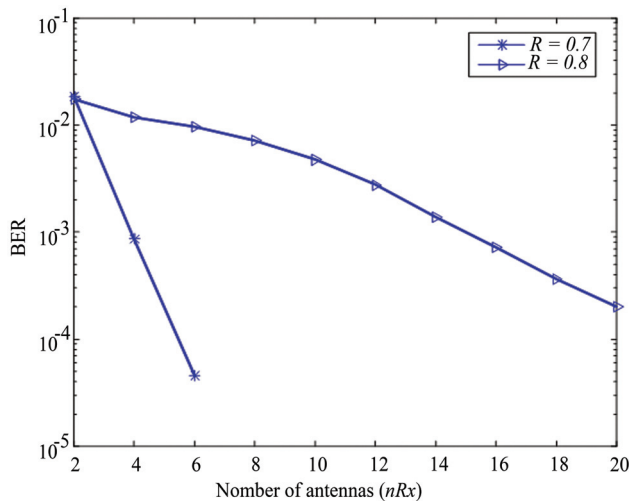
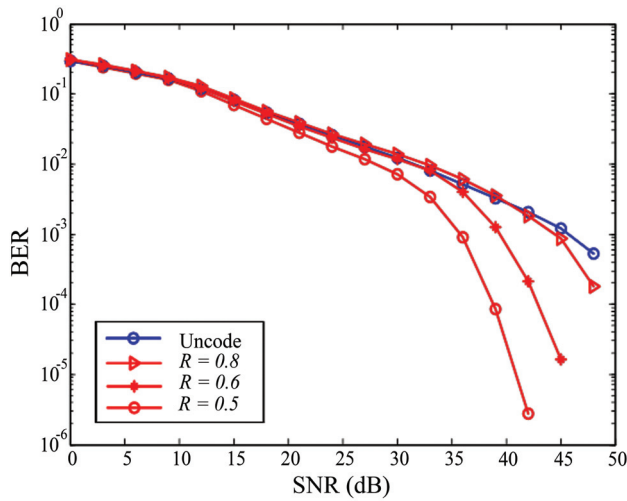


Figure 5 BER performance against SNR for 256-QAM with various coding gain (R)

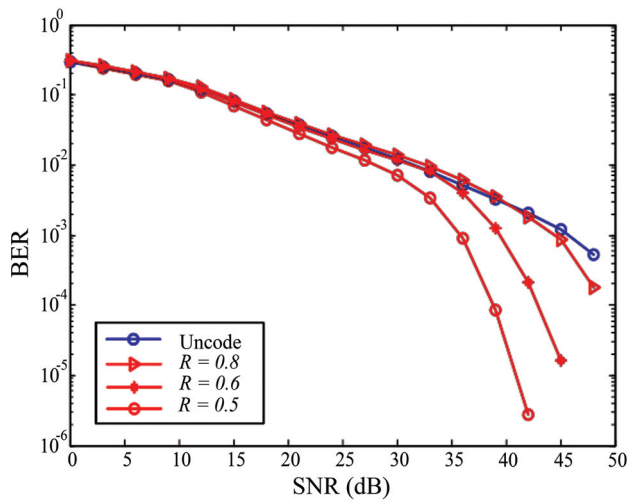
From figure 5, by using the RS code of rate 0.7 and 0.8 and as can be seen, when the coding gain is reduced, the BER decreased. Additionally, by referring to Figure 3, the nR_x could be reduced more by using less coding gain; however, the complexity processing would be high when compared with only the MRC and frequency diversity were used. The other

way around, if the nR_x could be decreased, the receiver size would be more compact. It is a trade-off and it depends on the design needed.

Second, MIMO scenario with zero forcing detection was investigated. The 2×2 MIMO and 4×4 MIMO were presented and the result is shown in Figure 6(a) and 6(b), respectively. 16-QAM was used in this case.



(a) 2×2 MIMO with various coding gain (R)



(b) 4×4 MIMO with coding gain of 0.5

Figure 6 BER performance versus SNR for 16-QAM

From Figure 6, it can be seen that the BER reduced when the SNR increased for both 2×2 and 4×4 MIMO. Additionally, for uncode, the BER was higher than the coded.

Especially, 4×4 MIMO had very strong BER sensitivity. Moreover, the higher code rate, the lower BER. However, when comparison were made between the zero forcing method with the MRC systems from Figure 3, 5 and 6, the BER of zero forcing was higher than MRC. However, the zero forcing receivers gave higher communication speed.

Conclusions

An enhancement of system performance for OWC using MIMO SC-FDM was proposed in this work. MRC together with frequency diversity was employed to recover the information data and can be used to gain up the SNR. A huge M-QAM and large antennas order were also considered. To verify the system performance, the numerical simulation method was used. The results showed that the BER decreased when the number of antenna was increased. Additionally, at a higher SNR, the number of antenna requirement to get error free was reduced. Especially, when the RS-code was applied, the SNR was exponentially gained. For the coding gain of 0.7, the antennas of only 6 elements were required to obtain error free for 256-QAM. For zero forcing detection, it gave higher BER; however, the transmission rate was more than the MRC system, when compared at the same bit per symbol.

Acknowledgements

The authors would like to thank the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions to improve the quality of the paper. Additionally, we gratefully acknowledge everyone from my department for the support provided. This research project is supported by Rajamagala University of Technology Isan, Contract No. ENG 17/62.

References

- [1] Mesleh, R. and AL-Olaimat, A. (2018). Acousto-Optical Modulators for Free Space Optical Wireless Communication Systems. **Journal of Optical Communications and Networking**. Vol. 10, Issue 5, pp. 515-522. DOI: 10.1364/JOCN.10.000515
- [2] Liu, X., Gong, C., and Xu, Z. (2017). Sequential Detection for Optical Wireless Scattering Communication. **Journal of Optical Communications and Networking**. Vol. 9, Issue 9, pp. D86-D95. DOI: 10.1364/JOCN.9.000D86
- [3] Zeng, Z., Fu, S., Zhang, H., Dong, Y., and Cheng, J. (2017). A Survey of Underwater Optical Wireless Communications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**. Vol. 19, No. 1, pp. 204-238

- [4] Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., and Kang, C. G. (2010). **MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®**. John Wiley and Sons. DOI: 10.1002/9780470825631
- [5] Azhar, A. H., Tran, T., and O'Brien, D. (2013). A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications. **IEEE Photonics Technology Letters**. Vol. 25, Issue 2, DOI: 10.1109/lpt.2012.2231857
- [6] Abu-Ali, N., Taha, A. M., Salah, M., and Hassanein, H. (2014). Uplink Scheduling in LTE and LTE-Advanced: Tutorial, Survey and Evaluation Framework. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**. Vol. 16, No. 3, pp. 1239-1265. DOI: 10.1109/SURV.2013.1127.00161
- [7] Puntsri, K. (2018). Experimental Demonstration of Hhigh Spectral Efficiency SC-FDMA with Soft Clipping for Optical Wireless Communication Systems. **IET Optoelectronics**. Vol. 12, Issue 2, pp. 80-85. DOI: 10.1049/iet-opt.2017.0073
- [8] Berenguer, P. W., Schulz, D., Hilt, J., Hellwig, P., Kleinpeter, G., Fischer, J. K., and Jungnickel, V. (2018). Optical Wireless MIMO Experiments in an Industrial Environment. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**. Vol. 36, Issue 1, pp. 185-193. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2774618
- [9] Ntogari, G., Kamalakis, T., and Sphicopoulos, T. (2012). Analysis of Indoor Multiple-Input Multiple-Output Coherent Optical Wireless Systems. **Journal of Lightwave Technology**. Vol. 30, No. 3, pp. 317-324. DOI: 10.1109/JLT.2011.2176553
- [10] Chen, C., Zhong, W., and Wu, D. (2017). On the Coverage of Multiple-Input Multiple-Output Visible Light Communications [Invited]. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**. Vol. 9, Issue 9, pp. D31-D41. DOI: 10.1364/JOCN.9.000D31
- [11] Navidpour, S. M., Uysal, M., and Kavehrad, M. (2007). BER Performance of Free-Space Optical Transmission with Spatial Diversity. **IEEE Transactions on Wireless Communications**. Vol. 6, Issue 8, pp. 2813-2819. DOI: 10.1109/TWC.2007.06109
- [12] Wu, L., Zhang, Z., and Liu, H. (2013). MIMO-OFDM Visible Light Communications System with Low Complexity. **2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. 9-13 June 2013, Budapest, Hungary, pp. 3933-3937. DOI: 10.1109/ICC.2013.6655172

Effects of Thai Herb Extracts in Combination with High Pressure Treatment on the Microbial and Physicochemical Quality of Fresh Pork

Thananun Yuwang^{1*} Kanok-Orn Intarapichet¹ Kaemwich Jantama¹ and Ralf Lautenhalager²

Received: June 11, 2019; Revised: August 8, 2019; Accepted: August 23, 2019

Abstract

The objective of this study was to investigate the antibacterial activity of ethanolic extracts of 15 local Thai herbs against twelve different species of bacteria. The ethanolic extracts of *Schinus terebinthifolius*, *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz and *Garcinia mangostana* Linn had a greater potential as antimicrobial agents against Gram positive and Gram negative bacterias and *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz showed the most effective activity against all dominant floras. This study also evaluated the impact of high hydrostatic pressure processing (HHP at 200 and 300 MPa) in combination with crude bacteriocins (B), *Spondias pinnata* (L.f., Kurz (E1) or *Schinus terebinthifolius* (E3) on the microbial, physicochemical quality and shelf life of vacuum packed pork loins, stored at 4 °C for 9 days. At 200 MPa, total plate count (TPCs) of samples from all treatments in day 0, 6 and 9 were not different. However, the HHP samples had a different count from the others on day 3. At 200 MPa, the TPCs of HHP + E1 sample was higher ($p < 0.05$) than those of HHP + E3 and HHP + B. Increasing pressure for HHP had no impact on the pH, a_w and weight loss (%) of the pork samples for all treatments. L^* and a^* values of all treated samples increased while the b^* value decreased slightly and then remained constant. Pork samples from all treatments became tender ($p < 0.05$)

¹ Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology

² Max Rubner-Institute Kulmbach, E.-C.-Baumann -Straße 20, 95326 Kulmbach, Germany

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

as storage time progressed each day. This finding suggested that HHP in combination with herb extracts could improve the microbiological quality and tenderness of fresh pork during storage and had a minimal effect on the color of the fresh pork.

Keywords: Thai Herb Extracts; High Hydrostatic Pressure (HHP); Microbial and Physicochemical Quality; Fresh Pork

Introduction

Pork is currently the most widely consumed meat in the world followed by poultry, beef, and mutton [1] and the global demand for pork meat continues to rise [2]. Pork meat offers a rich nutrient matrix that provides a suitable environment for the proliferation of pork meat spoilage microorganisms and common foodborne pathogens. Therefore, adequate preservation technologies must be applied in order to preserve its safety and quality. Food safety is the top priority for authorities and consumers worldwide. Consumers demand high quality, convenient, innovative, regular and safe pork meat products with natural flavors and tastes and an extended shelf life.

High pressure processing (HPP), a non - thermal technology, is being increasingly used in the meat industry to extend the shelf life of its products and to improve its quality characteristics [3] - [5]. High hydrostatic pressure (HHP) processing is carried out with intense pressure in the range of 100 - 1000 MPa, with or without heat, allowing most foods to be preserved with minimal effect on taste, texture or nutritional characteristics. The main advantage of HHP processing, compared with thermal sterilization and pasteurization, is the maintenance of the sensory and nutritional characteristics of the treated food products [6]. HHP technology has been successfully applied to the processing of cured meat products - cooked or dried and cooked ready to - eat meats [7]. However, it has been reported that HHP can impact structural, physiochemical, morphological and textural characteristics of the meat, and can cause partial discoloration of fresh red meat [8] - [9]. Thus, the physicochemical properties of HHP treated meat should be evaluated. High pressure processing may be combined with other preservation methods to increase its efficacy and commercial feasibility. Current and potential food additives, such as bacteriocins, have been tested in combination with high pressure processing. Combining phenolic compounds, which are hydrophobic, with high pressure may be useful in controlling pathogens, particularly in fat - rich food such as salad dressings and sausage [10]. To further increase the shelf life and safety of pressurized products, HHP has been investigated in combination with other technologies such as bacteriocins or other natural antimicrobials [11].

For a long time, plants have been an important source of natural products for human health. The antimicrobial properties of plants have been investigated by a number of studies worldwide and many of them have been used as therapeutic alternatives because of their antimicrobial properties [12]. Some herb extracts have been reported as antimicrobial such as *Momordica charantia* L. [13], *Sauropus androgynus* (L.) Merr. [14], *Schinus terebinthifolius* [15], *Anacardium occidentale* [16], *Centella asiatica* [17], *Spondias pinnata* (Linn. F.) kurz [18], *Garcinia mangostana* Linn [19], *Senna siamea* Lam. [20], and *Barringtonia acutangula* (L.) Gaertn [21]. Thai plants have been used as medicines for many centuries because they contain active phytochemicals including phenolic compounds. These components function as antibiotics, help to make cell walls impermeable to gas and water, act as structural materials to give plants stability and provide protection against ultraviolet (UV) light. Hence, plants in the tropical zone including Thailand contain a high concentration of phenolic compounds formed as secondary metabolites in plants [22].

Therefore, the objectives of this study were to evaluate and screen antimicrobial efficiency of 15 local Thai herbs ethanolic extracts with 12 pathogenic and dominant spoilage bacteria isolated from fresh pork by the paper disc diffusion technique. The objectives also included an investigation of the effectiveness of HHP in combination with the most active antibacterial herb extract or bacteriocins on inhibition growth of normal bacterial flora on fresh pork, and to evaluate physicochemical properties of treated pork packed under vacuum conditions and stored at 4 °C.

Materials and Methods

1. Preparation of Herb Extracts

The fifteen indigenous herbs used for this study as shown in Table 1 were purchased from local markets in Sakon Nakhon Province and the Thai herbs collection division of the Sakon Nakhon Campus of Rajamangala University of Technology Isan in July 2010. The herbs were cut into small pieces, freeze dried (Heto FD8 Thermo Electron Corporation, USA) and finely ground (IKA-Werke GmbH & Co., Germany) and stored at -20 °C for further application. For the ethanolic extracts, the dried herbs were mixed at 50 g each of dried herbs with 400 ml of 95 % (v/v) ethanol and constantly shaken at 100 rpm for 12 h (New Brunswick Scientific, UK). The mixture was filtered through a Whatman No. 1. The residue was re-extracted with 200 ml of 95 % ethanol, the filtrates combined and concentrated on a rotary evaporator (Rotary evaporator rotavapor R-114, Buchi, Switzerland) at 40 °C. The extract was freeze dried (Heto FD8, Thermo Electron Corporation, USA), stored in a sealed bottle and kept at -20 °C until use. The dried herb powder was

solubilized with 1 % Dimethyl sulfoxide to prepare a herb solution at concentrations of 20, 60 and 100 ppm for testing antimicrobial activity against the indicator bacteria.

Table 1 List of collected Thai indigenous herbs used for the study

Common name/Thai name	Scientific name	Parts of herbs used
1. Bitter cucumber/ma ra khee nok	<i>Momordica charantia</i>	Leaves / branches
2. Horse tamarind/gra tin	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lamk.) de Wit	Leaves / branches
3. Cassod tree/khee lek	<i>Senna siamea</i> Lam	Leaves / branches
4. Sweet vegetable/phuk-wan	<i>Sauropus androgynus</i>	Leaves / branches
5. Brazillian pepper tree/ma toom khaek	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Leaves / branches
6. Horse radish tree/ma room	<i>Moringa oleifera</i> Lam	Leaves / branches
7. Cashew nut tree/ma maung himmapaan	<i>Anacardium occidentale</i>	Leaves / branches
8. Asiatic pennywort/bua bok	<i>Centella asiatica</i>	Leaves / branches
9. Wood apple/ma sung	<i>Feroniella lucida</i> (Scheff.)	Leaves / branches
10. Hog plum/ma gok paa	<i>Spondias pinnata</i> (L.f.) Kurz	Leaves / branches
11. Mangosteen/mungkoot	<i>Garcinia mangostana</i> Linn	Peel or pericarp
12. Tummy-wood, Patana oak	<i>Careya sphaerica</i> Roxb.	Leaves / branches
13. Sea holly/ngeak pla mhoo	<i>Acanthus ebracteatus</i> Vahl	Leaves / branches
14. Phuk mek	<i>Syzygium gratum</i> (Wight) S.N.Mitra var. gratum	Leaves / branches
15. Sesban/khae baan	<i>Sesban sesbania</i>	Leaves / branches

2. Determination of Antimicrobial Activity: Paper Disk Diffusion Assay

The selected indicator bacteria obtained from the Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) were used for testing antibacterial activity of herb extracts. Twelve bacterial strains, namely *Pseudomonas fluorescens* TISTR 358, *Staphylococcus aureus* TISTR 029, *Escherichia coli* TISTR 887, *Acinetobacter calcoaceticus* TISTR 1264, *Enterobacter aerogenes* TISTR 1540, *Enterococcus faecalis* TISTR 379, *Micrococcus luteus* TISTR745, *Listeria monocytogenes* TISTR17303 and dominant spoilage bacteria isolated from fresh pork; PM20 (96.0 % similar to *Serratia liquefaciens*), MT35 (74 % similar to *Klebsiella oxytoca*), PM23 (99.0 % similar to *Enterobacter* sp.) and MT4 (99.9 % similar to *Hafnia alvei*) were used for antibacterial testing. Stock bacterial cultures were maintained at 4 °C on agar slant. The cultivation/assay medium for *L. monocytogenes* and *S. aureus* was tryptone soy broth or agar (TSB, TSA, Oxoid, Hampshire, UK), for other strains nutrient broth or agar (Muller Hilton) were used. Active culture for the experiment

was prepared by streaking a loop full of bacterial culture on agar petri dishes and then incubating them at 30 or 37 °C for 24 h. The antibacterial action of the extract was tested on different bacterial strains using the paper disk diffusion method [23]. For the cultivation/assay, the medium used was the same as above. The bacterial cultures for antimicrobial testing were prepared by picking a colony from 24-h-old TSA/NA plates and suspended in an appropriate medium. The cultures were grown aerobically for 18 - 20 h and continuously centrifuged at 9,000 rpm at 4 °C. The bacterial suspension was adjusted by diluting the inoculated bacteria with sterile 0.85 % NaCl until it reached the desirable level of about 10^6 - 10^8 CFU/ml. The cultures were subsequently transferred into a flask containing 25 ml of sterile nutrient agar at 43 - 45 °C, and poured into a Petri dish plate (8 cm diameter). Ten sterile paper disks (6 mm in diameter; Becton, Dickinson & Co.) were impregnated with known amounts of the test substances. Then, the disks containing the test materials were placed onto the surface of each plate uniformly seeded with the test microorganisms. The plates were incubated at 37 °C for 24 h. The paper disks impregnated with 1 % DMSO were used as a negative control and a disk with 200 ppm of nisin served as a positive control. Experiments were performed in triplicate. The inhibition zone diameter was measured (including the filter paper disk, 6 mm in diameter) using vernier caliper and expressed a clear zone in millimetres.

3. Preparation of Herb Extracts and Bacteriocins for High Pressure Processing

Two Thai herbs; *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz (E1) and *Schinus terebinthifolius* (E3) were screened and selected from 15 local Thai herbs according to their ability to inhibit growth of indicator bacteria and predominant bacteria obtained from fresh pork samples. The herb extract powder was resolubilized in 1 % DMSO at concentration of 1 % w/v. Then, the extract solution was shaken at 150 rpm, 20 min, 40 °C, centrifuged at 9,000 rpm, at 4 °C for 15 min then filtered through a Whatman No 1 filter paper. The filtrate was again filtered through a sterile cellulose acetate filter (0.45 micron) and the final filtrate was kept at 4 °C before use. The freeze-dried powder of crude bacteriocins (B) was prepared from the fermentation of *Lactococcus lactis* TISTR 1401 according the method of Intarapichet, K. and Gosaarak, S. [24].

4. Sample Preparation and High Pressure Processing

Fresh postmortem pork loins (*Longissimus dorsi*) were obtained from the Max Rubner-Institute, Kulmbach, Germany. Visible fat was trimmed off the loin and then they were transversally cut at about 2.54 cm thick per slice. The pork slices were randomly dipped in 0.2 % crude bacteriocins or 1.0 % of each extract solution, then vacuum packaged in plastic bags (PA/PE:O₂ 30 cm³ per m² and CO₂ 150 cm³) and kept in a freezing room before being pressurized at 200 or 300 MPa at 10 °C for 10 min. The HHP treatment

was carried out in an industrial hydrostatic pressurization unit (EPSI N.V. Belgium). The treated pork samples were stored at 4 ± 1 °C for 9 days and sampled for aerobic plate counts, weight loss, tenderness, pH, a_w and color measurement every 3 days.

4.1 Microbial Enumeration

At each selected time, a piece of meat was extracted aseptically using a sterilized template and placed in a sterile plastic bag with 1 ml of sterile 0.85 % NaCl solution and finally diluted with 9 ml of 0.85 % NaCl solution. After homogenization for 90 s in a Stomacher blender dilutions were made to determine the microbial count using the CFU (colony forming unit) method. All counts were evaluated by pour plate technique with 1 ml of appropriate dilutions. Aerobic mesophilic counts were determined on plate count agar (PCA, Biokar) incubated at 30 °C for 72 h. The plates were prepared in duplicate for each dilution. The detection limit was 5 CFU/g for meat, and the results are expressed in log CFU/cm². Microbial enumeration was performed every 3 days during storage at 4 °C (9 days total).

4.2 Physical Quality

The weight loss percentage was determined by calculating the weight difference of the pork sample before and after cooking to an internal temperature of 72 °C.

The color of sample was measured in terms of CIE L*, a*, b* values using a colorimeter with the Minolta Chromameter CR 300 (Konica Minolta, Munich, Germany).

The texture of the sample was measured in Hardness, the Warner-Bratzler shear force value was determined using a texture analyzer (3369 Instron, Pfungstadt, Germany).

The pH values were determined by Knick Portamess 912 pH; Electrode SE 104 C (Knick Elektronische Messgeräte GmbH & Co. KG, Berlin, Germany).

Water activity was measured using the following device: A Type SE a_w Lab (company: SE-Schulz Electronic, Höhenkirchen, Germany). A high pressure food processor EPSI N.V. (Belgium): Meat temp = 0 °C, Temperature medium = -5 - -10 °C, Pressure medium : H₂O : Glycol 50 : 50, Finish temp = 10 °C

5. Statistical analysis

A statistical analysis was evaluated by a randomized complete block design. The variance was analyzed and a comparison of means was done using Duncan's Multiple Range Test. The significant difference was defined at $p < 0.05$.

Results and Discussion

1. Inhibition of Selected Herbs Extracts against Indicator Bacteria

Preliminary screening of the antimicrobial activity of the fifteen local Thai herbs against 12 pathogens microorganisms using the filter paper disk agar diffusion technique is shown in Table 2. The testing capability of the antimicrobial efficacy for the selected Thai herb extracts tested against indicators are shown in Table 2. The results from the clear zone showed that only *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz extract could inhibit all of 12 indicator bacteria while *Momordica charantia*, *Leucaena leucocephala* (Lamk.) de Wit, *Sauropus androgynus*, *Moringa oleifera* Lam, *Centella asiatica*, *Feroniella lucida* (Scheff.), *Acanthus ebracteatus* Vahl and *Sesban sesbania* showed no inhibition. Four ethanolic extracts from *Senna siamea* Lam, *Schinus terebinthifolius*, *Anacardium occidentale* and *Garcinia mangostana* Linn could inhibit the same species of bacteria both Gram - positive and Gram - negative. At a high concentration of ethanolic extract from *Careya sphaerica* Roxb. and *Syzygium gratum* (Wight) S.N.Mitra var. *gratum*, the extract could inhibit the same species of bacteria and the same gram strain too. The ethanolic extracts of *Schinus terebinthifolius*, *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz and *Garcinia mangostana* Linn had a greater potential as an antimicrobial agent against Gram positive and Gram negative bacteria. The results in antibacterial activity of some Thai local herbs are in agreement with the results of some earlier studies. Bakar, A. et al. reported the ethanolic extract of *Senna siamea* Lam against *Pseudomonas aeruginosa* at high concentration levels of 500 µg/disk and 1,000 µg/disk had zones of inhibition of 10 mm and 16 mm, respectively [20]. Torrungruang, K. et al. reported the antibacterial activity of mangosteen pericarp extract against cariogenic *Streptococcus mutans* [25]. The studies of De Lima, M. R. F. et al. using extracts of *Schinus terebinthifolius* showed activity against *S. aureus* but were not active against *Escherichia coli* [26]. These activities may be attributed to the presence of m-cymene, 1-β-pinene, α-pinene, α-terpinene, γ-terpinene and camphene found in *S. terebinthifolius* essential oil. It has been demonstrated that α-pinene and β-pinene are able to destroy cellular integrity and thereby inhibit the respiration and ion transport processes. They also increase the membrane permeability in yeast cells and in isolated mitochondria [27]. Our results are in agreement with the findings of Mayachiew, P. and Devahastin, S. [28] who reported good antimicrobial activity for local Thai herbs and spices (*Phyllanthus emblica* Linn (Makhnam Pom) and *Alpinia galangal* (Kha)). The main reason for the differences in bacterial susceptibility could be the outer membrane surrounding the cell wall in gram - negative bacteria, which restricts the diffusion of compounds through its lipopolysaccharide covering [29]. In addition, the periplasmic space contains enzymes which are capable of breaking

down foreign molecules introduced from the outside [29]. Our results showed remarkable antimicrobial activity for the ethanol extract of *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz against all microorganisms tested, both Gram positive and Gram negative bacteria, followed by *Schinus terebinthifolius*. Therefore, the ethanol extract of these two Thai herb extracts were selected to study the effectiveness of HHP in combination with these two Thai herb extracts on the growth inhibition for normal bacterial flora on fresh pork.

Table 2 Antimicrobial activity of local Thai herbs extracts by paper disc diffusion test

Local Thai herbs	Ethanolic Extract (ppm)	Zone of inhibitions (mm)											
		<i>E.aerogenes</i>	<i>S.aureus</i>	<i>P.fluorescens</i>	<i>E. faecalis</i>	<i>M. luteus</i>	<i>L.monocytogenes</i>	<i>E. coli</i>	<i>S.liquefaciens</i> (PM20)	<i>K.oxytoca</i> (MT35)	<i>Enterobacter sp.</i> (PM23)	<i>A.calcoaceticus</i>	<i>H. alvei</i> (MT4)
<i>Momordica charantia</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lamk.) de Wit	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Senna siamea</i> Lam	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	+	-	-	+	++	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-

Table 2 Antimicrobial activity of local Thai herbs extracts by paper disc diffusion test (Cont.)

Local Thai herbs	Ethanolic Extract (ppm)	Zone of inhibitions (mm)											
		<i>E.aerogenes</i>	<i>S.aureus</i>	<i>P.fluorescens</i>	<i>E. faecalis</i>	<i>M. luteus</i>	<i>L.monocytogenes</i>	<i>E. coli</i>	<i>S.liquefaciens</i> (PM120)	<i>K.oxytoca</i> (MT35)	<i>Enterobacter sp.</i> (PM23)	<i>A.calcoaceticus</i>	<i>H. alvei</i> (MT4)
<i>Sauropus androgynus</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Schinus terebinthifolius</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	++	++	++	++	+	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Moringa oleifera Lam</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Anacardium occidentale</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Centella asiatica</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++

Table 2 Antimicrobial activity of local Thai herbs extracts by paper disc diffusion test (Cont.)

Local Thai herbs	Ethanolic Extract (ppm)	Zone of inhibitions (mm)											
		<i>E.aerogenes</i>	<i>S.aureus</i>	<i>P.fluorescens</i>	<i>E. faecalis</i>	<i>M. luteus</i>	<i>L.monocytogenes</i>	<i>E. coli</i>	<i>S.liquefaciens</i> (PM20)	<i>K.oxytoca</i> (MT35)	<i>Enterobacter sp.</i> (PM23)	<i>A.calcoaceticus</i>	<i>H. alvei</i> (MT4)
<i>Feroniella lucida</i> (Scheff.)	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Spondias pinnata</i> (L.f.) Kurz	20	-	++	-	+	+++	-	-	-	-	+	-	-
	60	+	++	++	+++	+++	-	++	++	+	++	++	-
	100	++	+++	+++	+++	+++	+	++	++	++	+++	+++	++
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Garcinia mangostana</i> Linn.	20	-	+	-	+	++	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	++	-	++	++	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	++	-	++	+++	+	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Careya sphaerica</i> Roxb.	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	+	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++

Table 2 Antimicrobial activity of local Thai herbs extracts by paper disc diffusion test (Cont.)

Local Thai herbs	Ethanolic Extract (ppm)	Zone of inhibitions (mm)											
		<i>E.aerogenes</i>	<i>S.aureus</i>	<i>P.fluorescens</i>	<i>E. faecalis</i>	<i>M. luteus</i>	<i>L.monocytogenes</i>	<i>E. coli</i>	<i>S.liquifaciens</i> (PM20)	<i>K.oxytoca</i> (MT35)	<i>Enterobacter sp.</i> (PM23)	<i>A.calcoaceticus</i>	<i>H. alvei</i> (MT4)
<i>Acanthus ebracteatus</i> Vahl	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++
<i>Syzygium gratum</i> (Wight) S.N.Mitra var. <i>gratum</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	+++	-	-	-	-	-	-	-
Nisin	200	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	++

Note; -, No inhibition; +, <10 mm.; ++, 10-15 mm.; +++, >15 mm.; Nisin 200 ppm for positive control; DMSO 1 % for negative control

2. Total Plate Counts of Vacuum Packed Pork

Total plate counts of pork chops in vacuum packed treated by HHP at 200 MPa and in combination with herb extracts and crude bacteriocins and control samples (without HHP) are shown in Figure 1. Compared with a control without high pressure at the beginning, it was observed that only HHP could reduce total counts of 0.74 log CFU/cm² which is better than all combined treatments. From day 3 to 6, HHP combined with B and with E1 and E3 gave the same results for a total count reduction (0.37 - 0.95 log CFU/cm²). For the last day of storage, HHP, HHP combined with E1 and E3 gave no difference in TPCs (1.53, 1.39, 1.26 log CFU/cm², respectively) and a better reduction in TPC than the treatment of HHP combined with B (0.5 log CFU/cm²). When compared with the combined treatments at day 0, 6 and 9, there was no significant difference ($p > 0.05$) of TPCs except for day 3 when the treatment of HHP and HHP combined with E1 showed higher TPCs ($p < 0.05$)

than the HHP combined with E3 and HHP combined with B. These results indicate that HHP, HHP in combination with herb extract and bacteriocins can inhibit the growth of normal bacterial flora on fresh pork.

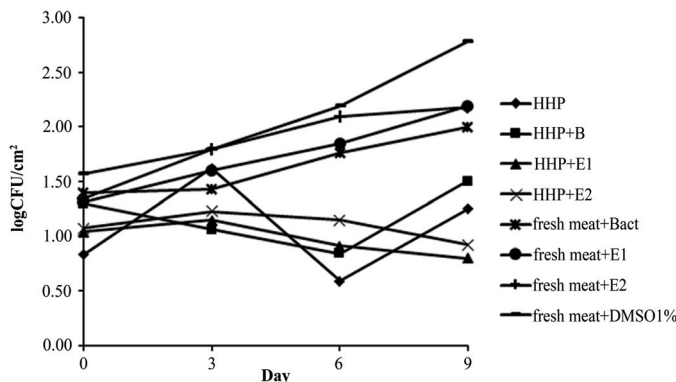


Figure 1 Total plate count of vacuum packed pork chops treated by HHP at 200 MPa and in combination with herb extracts (E1, E3), and crude bacteriocins (B) (n = 4).

3. Physical Quality of Vacuum Packed Pork

3.1 Color

Color is one of the most important factors that can influence consumers' purchase preferences of fresh meat [30] - [31]. Regarding chromatic parameters (Table 3), for samples treated at 200 MPa HHP, it could be seen that L^* increased significantly ($p < 0.05$) in HHP sample compared with other treated samples. On applying pressure at 300 MPa for all samples, it could be seen that L^* increased in comparison with a lower pressure. The increment of the L^* value could be associated with globin denaturation and/or with heme displacement at pressures above 300 MPa [32]. These results are in agreement with those of Cheftel, J. C, and Culioli, J. [33] who reported an increase in L^* values or "whitening/brightening" effect of pressure which can be attributed to globin denaturation, heme displacement or release, and ferrous ion oxidation. The increase in L^* values started from 200 MPa and become stabilized for pressures around 300 - 400 MPa, as shown by Carlez, A. et al. in beef mince [32] and Shigehisa, T. et al. in pork slurries [34]. It was reported that there was an increase in L^* value between treatments at 200 and 300 MPa, but no significant difference between 300 and 400 MPa [35]. In addition, Sun, S. et al. found that 600 MPa HPP treated steaks were lighter than non-HPP treated steaks [31]. Additionally, Ledward reported that protein precipitation that could lead to loss of solubility is the main reason for higher L^* value of meat color [36].

For the pressurization of pork at 200 MPa, the HHP and HHP+B treated samples had a^* value with significantly lower values ($p < 0.05$) than HHP+E1 and HHP+E3 treated ones throughout the storage time (Table 4). When the pressure at 300 MPa was used, a^* values of all treated samples remained almost constant but slightly higher than all samples treated at 200 MPa. An increase in the redness of the pork samples correlated with a lower accumulation of metmyoglobin during pressurized sample storage [37]. At pressures up to 300 MPa, with a liquid pressurization of 10 °C, the production of metmyoglobin was decreased leading to an increase in a^* value [38]. An increase in the a^* value is likely due to mechanism - alteration of the redox chemistry of myoglobin [31].

For modification of b^* parameter (Table 5), pressurized at 200 and 300 MPa of HHP, HHP+E3 and HHP+E1 tended to stay constant while the HHP+B gradually decreased with storage time. It could be seen that the application of higher pressures led to a slight increase in b^* . The increase in b^* values could be due to metmyoglobin formation initiated by HHP [32].

Table 3 The color L^* of pork chops in vacuum packed treated by combined HHP (200 and 300 MPa) with extracts (E1, E3), crude bacteriocins (B) (Mean $\pm$ SD).

Pressure	Day of storage	L^* value			
		HHP	HHP+B	HHP+E1	HHP+E3
200 MPa	0	69.11 $\pm$ 0.7 ^A	68.30 $\pm$ 1.9 ^{bcA}	68.57 $\pm$ 2.0 ^{aA}	66.12 $\pm$ 0.2 ^{aB}
	3	67.39 $\pm$ 1.2 ^B	71.70 $\pm$ 4.0 ^{aA}	67.64 $\pm$ 4.2 ^{aB}	62.34 $\pm$ 6.8 ^{aB}
	6	67.39 $\pm$ 2.7 ^A	69.68 $\pm$ 0.7 ^{bA}	64.87 $\pm$ 1.8 ^{bB}	56.70 $\pm$ 4.1 ^{bC}
	9	70.36 $\pm$ 6.4 ^A	66.68 $\pm$ 2.0 ^{cB}	66.705 $\pm$ 1.8 ^{abB}	67.15 $\pm$ 2.8 ^{aB}
300 MPa	0	71.49 $\pm$ 3.1 ^{aB}	74.76 $\pm$ 2.5 ^{aA}	73.36 $\pm$ 0.3 ^{aAB}	72.01 $\pm$ 4.7 ^{aB}
	3	68.51 $\pm$ 1.2 ^{bB}	69.30 $\pm$ 2.7 ^{bB}	68.94 $\pm$ 5.6 ^{bB}	71.80 $\pm$ 1.2 ^{aA}
	6	68.14 $\pm$ 1.4 ^{bB}	70.43 $\pm$ 2.3 ^{bA}	66.13 $\pm$ 1.0 ^{cC}	64.73 $\pm$ 1.7 ^{cC}
	9	71.61 $\pm$ 5.1 ^{aA}	71.23 $\pm$ 5.4 ^{bA}	63.29 $\pm$ 3.4 ^{cB}	67.79 $\pm$ 2.1 ^{bB}

Upper case letters are significantly different in the same row ($p < 0.05$).

Lower case letters are significantly different in the same column ($p < 0.05$) ($n = 20$).

Table 4 The color a^* of vacuum packed pork chops treated by HHP (200 and 300 MPa) and in combination with herb extracts (E1, E3), and crude bacteriocins (B) (Mean $\pm$ SD).

Pressure	Day of storage	a^* value			
		HHP	HHP+B	HHP+E1	HHP+E3
200 MPa	0	7.80 $\pm$ 0.7 ^C	9.97 $\pm$ 0.9 ^{aA}	8.63 $\pm$ 1.3 ^{cBC}	9.49 $\pm$ 0.3 ^{bAB}
	3	8.48 $\pm$ 0.3 ^B	9.92 $\pm$ 0.9 ^{aA}	9.52 $\pm$ 1.2 ^{bA}	9.23 $\pm$ 1.6 ^{abA}
	6	9.01 $\pm$ 1.5 ^{BC}	9.55 $\pm$ 0.4 ^{aB}	11.60 $\pm$ 0.5 ^{aA}	8.50 $\pm$ 0.8 ^{cC}
	9	7.93 $\pm$ 1.3 ^C	8.08 $\pm$ 0.7 ^{bC}	10.83 $\pm$ 0.1 ^{aA}	9.86 $\pm$ 0.7 ^{aB}
300 MPa	0	10.55 $\pm$ 0.1 ^{bA}	8.35 $\pm$ 0.3 ^{bC}	9.56 $\pm$ 1.1 ^{cB}	9.87 $\pm$ 0.8 ^B
	3	12.62 $\pm$ 1.5 ^{aA}	11.08 $\pm$ 0.5 ^B	11.39 $\pm$ 0.9 ^{bB}	11.10 $\pm$ 0.7 ^B
	6	10.39 $\pm$ 1.4 ^b	11.47 $\pm$ 1.2 ^a	11.51 $\pm$ 0.7 ^b	11.11 $\pm$ 0.7
	9	10.82 $\pm$ 0.2 ^b	10.74 $\pm$ 0.1 ^a	12.55 $\pm$ 0.7 ^a	12.70 $\pm$ 1.7

Upper case letters are significantly different in the same row ($p < 0.05$).

Lower case letters are significantly different in the same column ($p < 0.05$) ($n = 20$).

Table 5 The color b^* of vacuum packed pork chops treated by HHP (200 and 300 MPa) and in combination with herb extracts (E1, E3), and crude bacteriocins (B) (Mean $\pm$ SD).

Pressure	Day of storage	b^* value			
		HHP	HHP+B	HHP+E1	HHP+E3
200 MPa	0	6.50 $\pm$ 0.5 ^{aB}	7.43 $\pm$ 0.7 ^{aA}	7.22 $\pm$ 1.2 ^A	5.630.7 ^{aC}
	3	5.44 $\pm$ 0.9 ^{bC}	6.65 $\pm$ 0.4 ^{bAB}	7.06 $\pm$ 0.3 ^A	4.50 $\pm$ 2.2 ^{aC}
	6	5.30 $\pm$ 1.2 ^{bB}	5.88 $\pm$ 0.5 ^{cB}	7.28 $\pm$ 0.5 ^A	3.17 $\pm$ 1.1 ^{bC}
	9	6.07 $\pm$ 2.0 ^{abB}	5.36 $\pm$ 0.4 ^{dC}	7.49 $\pm$ 1.0 ^A	6.29 $\pm$ 0.6 ^{aB}
300 MPa	0	7.39 $\pm$ 1.0 ^{aB}	7.15 $\pm$ 0.9 ^{aBC}	8.14 $\pm$ 0.3 ^{aA}	6.55 $\pm$ 1.4 ^{aC}
	3	6.19 $\pm$ 0.9 ^{bB}	6.56 $\pm$ 0.1 ^{bB}	7.48 $\pm$ 2.1 ^{aA}	7.26 $\pm$ 0.3 ^{aA}
	6	4.61 $\pm$ 0.5 ^{cC}	6.22 $\pm$ 0.5 ^{bA}	6.17 $\pm$ 0.9 ^{bA}	5.54 $\pm$ 0.5 ^{bB}
	9	6.53 $\pm$ 1.6 ^{bBC}	6.15 $\pm$ 1.0 ^{bC}	7.44 $\pm$ 2.0 ^{aA}	7.21 $\pm$ 1.7 ^{aAB}

Upper case letters are significantly different in the same row ($p < 0.05$).

Lower case letters are significantly different in the same column ($p < 0.05$) ($n = 20$).

3.2 Hardness, Weight Loss (%), A_w and pH

Consumer perception of hardness is considered the most important texture attribute and dictates the commercial value of meat [39]. The hardness of pork samples for all treatments pressurized at 200 MPa, HHP tended to be reduced except HHP+E1 during storage (Table 6). In addition when compared among treatments on the same day of storage, the hardness of HHP only was much higher than for the other treatments but not different from HHP+B and HHP+E3 for day 0 of storage, and HHP+E1 for day 6 of storage. These results suggest that HHP (at 200 MPa) in combination with two Thai herbs extracts could improve the tenderness of meat. The application of pressure at 300 MPa HHP, HHP+B and HHP+E3 led to an increase in the hardness of the pork samples at 3 days of storage but was not significantly different at the end of storage while the hardness of HHP+E1 was continuously reduced. This indicates that HHP (at 300 MPa) in combination with E1 could improve the tenderness of meat during storage. Normally, for pressures ranging from 100 to 300 MPa, changes are normally reversible, whereas at higher pressures they are normally non-reversible [11]. In addition, hardness increased at a relatively constant rate with a high-pressure processing treatment between 0 and 400 MPa [40]. The hardness increased as a result of high pressure processing at 200 and 400 MPa and during storage only minor changes in the hardness occurred. Even the non-pressurised sample showed only a small increase in the hardness during storage [41].

A combination of treatments of HHP with herb extracts and crude bacteriocins did not make any significant differences ($p > 0.05$) in weight loss (%) except at the pressure at 300 MPa which differed for the last day of storage (Table 7).

High pressure treatment of sliced pork loins at these medium pressure levels of 200 and 300 MPas and with a combination of crude bacteriocins and both herb extracts did not make any significant differences ($p > 0.05$) in a_w (95.9 ± 0.1 - 97.4 ± 0.5 %) and pH (5.6 ± 0.0 - 6.0 ± 0.0) (data not shown).

Table 6 The hardness of vacuum packed pork chops treated by HHP (200 and 300 MPa) and in combination with herb extracts (E1, E3), and crude bacteriocins (B) (Mean $\pm$ SD).

Pressure	Day of storage	Hardness (N)			
		HHP	HHP+B	HHP+E1	HHP+E3
200 MPa	0	53.29 $\pm$ 3.1 ^{aA}	50.12 $\pm$ 3.6 ^{aA}	39.89 $\pm$ 2.8 ^B	50.91 $\pm$ 2.0 ^{aA}
	3	52.68 $\pm$ 5.6 ^{aA}	42.67 $\pm$ 4.2 ^{aB}	37.01 $\pm$ 3.7 ^C	41.93 $\pm$ 4.2 ^{bBC}
	6	40.22 $\pm$ 5.2 ^{bA}	35.25 $\pm$ 3.4 ^{bB}	39.03 $\pm$ 5.5 ^A	32.26 $\pm$ 4.6 ^{cB}
	9	42.27 $\pm$ 4.5 ^{bA}	37.59 $\pm$ 3.8 ^{bB}	36.97 $\pm$ 3.4 ^B	31.86 $\pm$ 4.3 ^{cC}
300 MPa	0	36.88 $\pm$ 1.2 ^{bBC}	34.08 $\pm$ 2.6 ^{bcC}	51.70 $\pm$ 4.2 ^{aA}	38.99 $\pm$ 4.6 ^{bB}
	3	48.81 $\pm$ 5.5 ^a	46.21 $\pm$ 3.7 ^a	45.06 $\pm$ 2.2 ^b	43.17 $\pm$ 3.0 ^a
	6	40.43 $\pm$ 2.3 ^{bA}	31.48 $\pm$ 5.2 ^{cB}	40.25 $\pm$ 3.1 ^{cA}	33.39 $\pm$ 2.9 ^{cB}
	9	41.19 $\pm$ 6.5 ^{bA}	36.25 $\pm$ 2.7 ^{bB}	37.57 $\pm$ 4.2 ^{cAB}	35.35 $\pm$ 3.4 ^{bcB}

Upper case letters are significantly different in the same row ($p < 0.05$).

Lower case letters are significantly different in the same column ($p < 0.05$) ($n = 20$).

Table 7 Weight Loss (%) of vacuum packed pork chops treated by HHP (200 and 300 MPa) in combination with herb extracts (E1, E3), and crude bacteriocins (B) (Mean $\pm$ SD) ($n=4$).

Pressure	Day of storage	Weight loss (%)			
		HHP	HHP+B	HHP+E1	HHP+E3
200 MPa	0	27.1 $\pm$ 1.8	32.1 $\pm$ 3.1	29.3 $\pm$ 2.8	31.1 $\pm$ 0.2
	3	28.7 $\pm$ 2.5	27.3 $\pm$ 4.8	25.1 $\pm$ 4.3	30.8 $\pm$ 0.5
	6	24.9 $\pm$ 4.2	28.2 $\pm$ 0.9	25.4 $\pm$ 8.0	26.2 $\pm$ 1.1
	9	25.9 $\pm$ 2.0	25.2 $\pm$ 0.4	22.7 $\pm$ 3.8	27.7 $\pm$ 1.3
300 MPa	0	30.02 $\pm$ 1.4 ^a	31.09 $\pm$ 1.7	28.35 $\pm$ 4.1	30.65 $\pm$ 3.2
	3	27.92 $\pm$ 0.4 ^a	30.05 $\pm$ 2.1	29.65 $\pm$ 1.6	29.77 $\pm$ 2.9
	6	29.70 $\pm$ 0.2 ^a	29.36 $\pm$ 3.9	25.29 $\pm$ 2.3	25.67 $\pm$ 3.3
	9	22.94 $\pm$ 1.8 ^b	25.25 $\pm$ 0.5	26.84 $\pm$ 4.4	24.18 $\pm$ 4.0

Lower case letters are significantly different in the same column ($p < 0.05$).

Conclusion

The ethanolic extracts of *Schinus terebinthifolius*, *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz and *Garcinia mangostana* Linn had greater potential as antimicrobial agent against Gram positive and Gram negative bacteria and *Spondias pinnata* (L.f.) Kurz had the most effective activity against all dominant floras. The moderate pressure of 200 MPa in combination with herb extracts or bacteriocins did not ensure complete inactivation of bacteria growth. However, it was obvious that it could allow for an improvement in the microbiological quality and extended shelf life of sliced pork in the stage dependent on the level of initial contamination of the raw material. HHP could affect the physicochemical qualities of fresh pork meat, particularly depending on the pressure level applied, and thus the typical characteristics associated with fresh meat, particularly texture and color, could be remarkably modified. The HHP treatment caused a lighter color for pork meat products. In addition, the tenderness of fresh pork was improved. This finding suggests that HHP (200 MPa) in combination with herb extracts might be an effective technology in reducing microbial spoilage and extending shelf-life of fresh pork meat. However, HHP may have a negative impact on sensory characteristics. Further work should be conducted to evaluate sensory properties of fresh pork treated by HHP.

Acknowledgement

This work was supported by Rajamangala University of Technology Isan and Suranaree University of Technology and by the Office of the Higher Education Commission under NRU Project of Thailand. We would like to thank Max Rubner-Institute Kulmbach, Germany, for assistant and support.

References

- [1] Worldwatch Institute (2018). **Globalmeat Production and Consumption Continue Rise**. Access (10 May 2018). Available (<http://www.worldwatch.org/global-meatproduction-and-consumption-continue-rise>)
- [2] Bord Bia Irish Food Board. (2018). **Factsheet on the Irish Agriculture and Food & Drink Sector**. Access (10 May 2018). Available (<https://www.bordbia.ie/industry/buyers/industryinfo/agri/pages/default.aspx>)

- [3] Grossi, A., Bolumar, T., Søltøft-Jensen, J., and Orlien, V. (2014). High Pressure Treatment of Brine Enhanced Pork Semitendinosus: Effect on Microbial Stability, Drip loss, Lipid and Protein Oxidation, and Sensory Properties. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. Vol. 22, pp. 11-21. DOI: 10.1016/j.ifset.2013.09.011
- [4] Marcos, B., Kerry, J. P., and Mullen, A. M. (2010). High Pressure Induced Changes on Sarcoplasmic Protein Fraction and Quality Indicators. **Meat Science**. Vol. 85, Issue 1, pp. 115-120. DOI: 10.1016/j.meatsci.2009.12.014
- [5] Wang, Q., Zhao, X., Ren, Y., Fan, E., Chang, H., and Wu, H. (2013). Effects of High Pressure Treatment and Temperature on Lipid Oxidation and Fatty Acid Composition of Yak (*Poephagus grunniens*) Body Fat. **Meat Science**. Vol. 94, Issue 4, pp. 489-494. DOI: 10.1016/j.meatsci.2013.03.006
- [6] Balasubramaniam, V. M., Farkas, D., and Turek, E. J. (2008). Preserving Foods through High-pressure Processing. **Food Technology**. Vol. 62, No. 11, pp. 32-38
- [7] Campus, M. (2010). High Pressure Processing of Meat, Meat Products and Seafood. **Food Engineering Reviews**. Vol. 2, Issue 4, pp. 256-273. DOI: 10.1007/s12393-010-9028-y
- [8] Cheftel, J. C. (1995). Review: High-pressure Microbial Inactivation and Food Preservation. **Food Science and Technology International**. Vol. 1, Issue 2-3, pp. 75-90. DOI: 10.1177/108201329500100203
- [9] Kim, Y. I., Lee, E. J., Lee, N. H., Kim, Y. H., and Yamamoto, K. (2007). Effects of Hydrostatic Pressure Treatment on the Physicochemical, Morphological, and Textural Properties of Bovine Semitendinosus Muscle. **Food Science and Biotechnology**. Vol. 16, Issue 1, pp. 49-54.
- [10] Vurma, M., Chung, Shellhammer, T. H., Turek, E. J., and Yousef, A. E. (2006). Use of Phenolic Compounds for Sensitizing *Listeria monocytogenes* to High-pressure Processing. **International Journal of Food Microbiology**. Vol. 106, Issue 3, pp. 269-275. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2005.06.025
- [11] Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S., Balasubramaniam, V. M., Niranjan, K., and Knorr, D. (2007). Opportunities and Challenges in High Pressure Processing of Foods. **Critical Review in Food Science and Nutrition**. Vol. 47, Issue 1, pp. 69-112. DOI: 10.1080/10408390600626420
- [12] Bugno, A., Nicoletti, M. A., Almodóvar, A. A. B., Pereira, T. C., and Auricchio, M. T. (2007). Antibacterial Efficacy of *Curcuma zedoaria* Extract as Assessed by Linear Regression Compared with Commercial Mouthrins. **Brazilian Journal of Microbiology**. Vol. 38, No. 3, pp. 440-445. DOI: 10.1590/S1517-83822007000300011
- [13] Costa, J. G. M., Nascimento, E. M. M., Campos, A. R., and Rodrigues, F. F. G. (2011). Antibacterial Activity of *Momordica charantia* (Cucurbitaceae) Extracts and Fractions. **Journal of Basic and Clinical Pharmacy**. Vol. 2, Issue 1, pp. 45-51
- [14] Paul, M. and Beenaanto, K. (2011). Antibacterial Activity of *Sauropus androgynus* (L.) Merr. **International Journal of Plant Sciences**. Vol. 6, Issue 1, pp. 189-192

- [15] Molina-Salinas, G. M., Pérez-López, A., Becerril-Montes, P., Salazar-Aranda, R., Said-Fernández, S., and de Torres, N. W. (2006). Evaluation of the Flora of Northern Mexico for In Vitro Antimicrobial and Antituberculosis Activity. **Journal of Ethnopharmacology**. Vol. 109, Issue 3, pp. 435-441. DOI: 10.1016/j.jep.2006.08.014
- [16] Omojasola, P. F. and Awe, S. (2004). The Antibacterial Activity of the Leaf Extracts of *Anacardium occidentale* and *Gossypium hirsutum* Against Some Selected Microorganisms. **Bioscience Research Communications**. Vol. 60, No. 1, pp. 25-58
- [17] Nasution, M. Y., Restuati, M., Pulungan, A. S. S., Pratiwi, N., and Diningrat, D. S. (2018). Antimicrobial Activities of *Centella asiatica* Leaf and Root Extracts on Selected Pathogenic Micro-organisms. **Journal of Medical Sciences**. Vol. 18, Issue 4, pp. 198-204. DOI: 10.3923/jms.2018.198.204
- [18] Muhammad, A., Shafiur Rahman, M., Hamidul Kabir, A. N. M., and Kabir, S. (2011). Antibacterial and Cytotoxic Activities of *Spondias pinnata* (Linn. F.) Kurz Fruit Extract. **Indian Journal of Natural Products and Resources**. Vol. 2, No. 2, pp. 265-267
- [19] Ragasa, C. Y., Crisostomo, C. J. J., Garcia, K. D. C., and Shen, C. C. (2010). Antimicrobial Xanthones from *Garcinia mangostana* L. **The Philippine Scientist**. Vol. 47, pp. 63-75
- [20] Bukar, A., Mukhtar, M., and Hassan, A. (2009). Phytochemical Screening and Antibacterial Activity of Leaf Extracts of *Senna siamea* (LAM) on *Pseudomonas aeruginosa*. **Bayero Journal of Pure and Applied Sciences**. Vol. 2, No. 1, pp. 139-142. DOI: 10.4314/bajopas.v2i1.58528
- [21] Sahoo, S., Panda, P. K., Mishra, S. R., Parida, R. K., Ellaiah, P., and Dash, S. K. (2008). Antibacterial Activity of *Barringtonia acutangula* Against Selected Urinary Tract Pathogens. **Indian Journal of Pharmaceutical Sciences**. Vol. 70, Issue 5, pp. 677-679. DOI: 10.4103/0250-474X.45417
- [22] Shahidi, F. and Naczk, M. (2003). **Phenolics in Food and Nutraceuticals**. Boca Raton, FL, USA: CRC Pres
- [23] NARMS. (2002). **National Antimicrobial Resistance Monitoring System**. Enteric Bacteria. CDC, USA
- [24] Intarapichet, K. and Gosaarak, S. (2008). The Use of Crude Bacteriocins from *Lactococcus lactis* TISTR 1401 as Biopreservative to Extend Shelf Life of Aerobically Packed Pork Meatballs. In **proceedings 45th International Congress of Meat Science and technology** (General speakers, Session 2,2A.5, CD ROM), 10-15 August 2008, Cape Town, South Africa.
- [25] Torrungruang, K., Vichienroj, P., and Chutimaworapan, S. (2007). Antibacterial Activity of Mangosteen Pericarp Extract against Cariogenic *Streptococcus mutans*. **Chulalongkorn University Dental Journal**. Vol. 30, pp. 1-10 (in Thai)
- [26] Lima, M. R. F. de, Luna, J. de S., Santos, A. F. dos, Andrade, M. C. C. de, Sant'Ana, A. E. G., Genet, J. P., Marquez, B., Neuville, L., and Moreau, N. (2006). Anti-bacterial Activity of some Brazilian Medicinal Plants. **Journal of Ethnopharmacology**. Vol. 105, No. (1-2), pp. 137-147. DOI: 10.1016/j.jep.2005.10.026

- [27] Andrews, R. E., Parks, L. W., and Spence, K. D. (1980). Some Effects of Douglas Fir Terpenes on Certain Microorganisms. **Applied and Environmental Microbiology**. Vol. 40, No. 2, pp. 301-304
- [28] Mayachiew, P. and Devahastin, S. (2008). Antimicrobial and Antioxidant activities of Indian Gooseberry and Galangal Extracts. **LWT- Food Science and Technology**. Vol. 41, Issue 7, pp. 1153-1159. DOI: 10.1016/j.lwt.2007.07.019
- [29] Vaara, M. (1992). Agents that Increase the Permeability of the Outer Membrane. **Microbiological Reviews**. Vol. 56, No. 3, pp. 395-411
- [30] Souza, C. M., Boler, D. D., Clark, D. L., Kutzler, L. W., Holmer, S. F., and Summerfield, J. W. (2011). The Effects of High Pressure Processing on Pork Quality, Palatability, and Further Processed Products. **Meat Science**. Vol. 87, Issue 4, pp. 419-427. DOI: 10.1016/j.meatsci.2010.11.023
- [31] Sun, S., Rasmussen, F. D., Cavender, G. A., and Sullivan, G. A. (2019). Texture, Color and Sensory Evaluation of Sous-vide Cooked Beef Steaks Processed using High Pressure Processing as Method of Microbial Control. **LWT- Food Science and Technology**. Vol. 103, pp. 169-177. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.12.072
- [32] Carlez, A., Veciana-Nogues, T., and Cheftel, J. (1995). Changes in Colour and Myoglobin of Minced Beef Meat due to High Pressure Processing. **LWT- Food Science and Technology**. Vol. 28, Issue 5, pp. 528-538. DOI: 10.1006/fstl.1995.0088
- [33] Cheftel, J. C. and Culioli, J. (1997). Effect of High Pressure on Meat: A Review. **Meat Science**. Vol. 46, Issue 3, pp. 211-234. DOI: 10.1016/s0309-1740(97)00017-x
- [34] Shigehisa, T., Ohmori, T., Saito, A., Taji, S., and Hayashi, R. (1991). Effects of High Hydrostatic Pressure on Characteristics of Pork Slurries and Inactivation of Microorganisms Associated with Meat and Meat Products. **International Journal of Food Microbiology**. Vol. 12, Issue 2-3, pp. 207-216. DOI: 10.1016/0168-1605(91)90071-v
- [35] McArdle, R., Marcos, B., Kerry, J. P., and Mullen, A. (2010). Monitoring the Effects of High Pressure Processing and Temperature on Selected Beef Quality Attributes. **Meat Science**. Vol. 86, Issue 3, pp. 629-634. DOI: 10.1016/j.meatsci.2010.05.001
- [36] Ledward, D. A. (1992). **Colour of Raw and Cooked Meat**. In DA Ledward, DE Johnston, MK Knight, Eds., *The Chemistry of Muscle-Based Foods* Cambridge: Royal Society of Chemistry. pp. 128-144
- [37] Cheah, P. B. and Ledward, D. A. (1996). High Pressure Effects on Lipid Oxidation in Minced Pork. **Meat Science**. Vol. 43, Issue 2, pp. 123-134. DOI: 10.1016/0309-1740(96)84584-0
- [38] Jung, S., Ghoul, M., and de Lamballerie-Anton, M. (2003). Influence of High Pressure on the Color and Microbial Quality of Beef Meat. **LWT- Food Science and Technology**. Vol. 36, Issue 6, pp. 625-631. DOI: 10.1016/S0023-6438(03)00082-3
- [39] Chambers, E., and Bowers, J. R. (1993). Consumer Perception of Sensory Qualities in Muscle Foods. **Food Technology**. Vol. 47, Issue 11, pp. 116-120

- [40] Zhang, H., Pan, J., and Wu, Z. (2018). Investigation of the Effects of High Pressure Processing on the Process of Rigor in Pork. **Meat Science**. Vol. 145, pp. 455-460. DOI: 10.1016/j.meatsci.2018.07.013
- [41] Master, A. M., Stegeman, D., Kals, J., and Bartels, P. V. (2000). Effects of High Pressure on Colour and Texture of Fish. **High Pressure Research**. Vol. 19, Issue 1-6. pp. 109-115. DOI: 10.1080/08957950008202543

Adsorption Efficiency, Adsorption Isotherms and Kinetic Study for Methylene Blue Removal in Aqueous Solution of Thiol-Functionalized Mesoporous Silica Nanospheres

Romteera Chueachot^{1*} Kewalee Khankam¹ Atcharaphan Lakathok¹ Suwatchai Jarussophon² and Ronariddh Nakhong¹

Received: May 25, 2019; Revised: July 10, 2019; Accepted: July 24, 2019

Abstract

Thiol-functionalized mesoporous silica nanospheres material was synthesized by co-condensation method under biphasic system. Structural characterization confirmed the mesoporous structure and the content of adsorbents by transmission electron microscopy, N₂ adsorption-desorption and Fourier transform infrared spectroscopy. The adsorbent were nanosphere with particle diameter lower than 50 nm. A batch adsorption study was carried out with variable pH, adsorption time, adsorbent dose, shaking rate, temperature and adsorbate concentration. Methylene blue could be removed by 0.05 g of MSN and MSN-SH at pH 10 and 30 min of adsorption time. The adsorption process followed pseudo-second-order kinetics. The experimental adsorption isotherm was found to be best fitted with the Langmuir model, which implied that the adsorption of MB as a monolayer.

Keywords: Adsorption; Thiol-Functionalized Mesoporous Silica; Methylene Blue; Adsorption Isotherm; Kinetic Adsorption

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

² National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency
111 Thailand Science Park, Pathum Thani

* Corresponding Author E - mail Address: romteera.c@ubru.ac.th

Introduction

Organic and inorganic substances in wastewater are a main source of environmental pollution. Organic dyes are major pollutants of wastewater [1]. Many dyes and pigments have toxic as well as carcinogenic, mutagenic and teratogenic effects on aquatic life and also on humans. Dyes and pigments are widely used in textile, leather, paper, plastic and other industries [2]. One of the highly consumed materials in the dye industry is methylene blue which is used for cotton and silk painting [3]. Methylene blue has been studied as dye pollution not only because of its toxicity but also because of its color. Methylene blue has very wide applications which makes it one of the most common pollutants or constituent of color effluents [4]. Different methods have been developed to remove colored pollutants from wastewater such as coagulation, adsorption, chemical oxidation, biological treatment and flotation. Adsorption has been found to be superior to other techniques for water treatment in terms of initial cost, simplicity of design, ease of operation and insensitivity of toxic substances. Adsorption technology is rapidly gaining prominence as a technique for removing organic and inorganic micropollutants from aqueous effluent [5]. For analytical purposes, functionalized silica particles with organic functional groups are commonly used since the material silica provides many advantages such as good adsorption, easy to prepare with chemical compound and particular impregnate medium to create several modified silica surfaces, high mechanic and thermal stability [6]. Thiol-functionalized mesoporous silica appears to be particularly promising due to large adsorption capacities and high uptake rates for dyes. In this research, we reported an easy and simple method for fabrication of silica in nanometer range via surfactant template assisted and functionalized with thiol groups. In present study, the synthesis of thiol-functionalized mesoporous silica nanospheres (MSN-SH) is demonstrated by co-condensation of precursor solution in biphasic system. The MSN-SH was applied as a adsorbent for methylene blue removal from aqueous solution under various conditions. The adsorption isotherm and kinetic studies were conducted to evaluate the adsorption behaviors of MSN-SH

Materials and method

1. Materials

All chemicals were analytical grade. Tetraethyl orthosilicate (TEOS), 3-mercaptopropyl trimethoxysilane (MPTES) and l-arginine were supplied by Sigma Aldrich. Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) was purchased from Unilab. Cyclohexane (CHX) and ethanol were provided by Qrec. Methylene blue (MB) and glycerol were purchased from Carlo Erba.

2. Preparation of MSN and MSN-SH

0.25 g of CTAB and 0.18 g of l-arginine were dissolved in 110 mL of deionized water. Subsequently CHX phase was formed afloat on the aqueous phase by adding drop-wise of CHX. The bi-phase layer was then heated to 60 °C for 30 min. A mixture 9.2 mL of TEOS and 4.4 mL MPTES was added drop-wise into CHX phase to start the reaction which was allowed to proceed for 20 h. The reaction was terminated by quenching the reaction vial in cooled water. CHX phase was decanted using a syringe prior to centrifugation of the aqueous phase at 6,000 rpm to collect MSH-SH particles. The MSN-SH particles were washed with water then dried in an oven. Finally, the extracted MSN-SH particles were dried overnight at 60 °C. Mesoporous silica nanosphere (MSN) without functionalization with thiol was also synthesized using the same method described above except MPTES.

3. Characterization

The morphology and particle sizes of the synthesized particles were examined with transmission electron microscopy (TEM) technique from FEI Tecnai G2 operated at an accelerating voltage of 200 kV. Pore characteristic of the synthesized MSN and MSN-SH was examined by Nitrogen adsorption-desorption method performed on Autosorb-1, Quantachrome Instrument. Pore volume and specific surface area were determined according to the standard Brunauer Emmett Teller (BET) method. Functionalization of MSN and MSN-SH was confirmed by Fourier transform inferred spectroscopy (FT-IR) using Bruker FT-IR Spectrometer, Tensor II.

4. Adsorption studies

Batch adsorption experiments were performed in a set of Erlenmeyer flask (125 mL) each one containing 25 mL of different initial concentrations of MB (1 - 40 mgL⁻¹) together with adsorbent (0.01 - 0.2 g). A magnetic stirrer was used at desired temperature (30, 45 and 60 °C) and pH (2 - 11). The different contact times (5 - 120 min) and shaking rate (0 - 200 rpm) were studied. The mixture was centrifuged at 6,000 rpm for 10 min and finally separated into liquid and solid. The solution was measured by the UV-Vis spectrophotometer (T92 + PG instrument) with wavelength 665 nm to determine the concentration of MB. The adsorbed amount of MB at equilibrium was calculated by the following equation (1) [7]:

$$q_e = \frac{C_o - C_e}{W} \times V \quad (1)$$

where q_e is the adsorbed amount of MB at equilibrium (mgg⁻¹), C_o and C_e are the initial and equilibrium MB concentrations (mgL⁻¹) respectively, V is the volume of the used solution containing the MB (L) and W is the weight of the used adsorbent (g).

5. Adsorption isotherm

An adsorption isotherm describes the relationship between the amount of adsorbate taken up by the adsorbent and the adsorbate concentration remaining in solution. Langmuir isotherm determines the adsorption of MB on the surface of the adsorbent on the monolayer and equivalent sites on the surface. The Langmuir adsorption is given below equation (2) [8]:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{(K_L q_m)} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2)$$

where q_m represents the maximum adsorption capacity (mgg^{-1}) and K_L is the Langmuir constant (Lmg^{-1})

Freundlich isotherm is based on the multilayer adsorption with heterogeneous surface and can be define as below equation (3) [9]:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

where n represents the Freundlich exponent which is related to the adsorption intensity and K_F is the Freundlich constant ($((\text{mgg}^{-1})(\text{Lmg}^{-1})^{1/n})$)

6. Adsorption kinetics

Two simplified kinetic models were adopted to examine the mechanism of the adsorption process. First, the kinetics of adsorption were analyzed by the pseudo first order equation given by [10] as equation (4) :

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

On the other hand, the pseudo second order equation based on equilibrium adsorption [10] is expressed as equation (5) :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (5)$$

where q_e is the amount of adsorbate adsorbed at equilibrium (mgg^{-1}), q_t is the amount of adsorbate adsorbed at time (mgg^{-1}), t is the time (min), k_1 is the rate constant of pseudo first order equation (min^{-1}) and k_2 is the rate constant of pseudo second order equation ($\text{g}(\text{mgmin})^{-1}$).

Results and Discussion

1. Characterization of MSN and MSN-SH

The morphologies and structural features of the supported material MSN and MSN-SH can be observed directly through TEM in Figure 1. As can be noticed, both TEM image revealed the porous structure with the pore size in meso range. MSN-SH possessed spherical particles with an average 42.67 nm however some particle showed irregular shapes due to particle agglutinate during the synthesis.

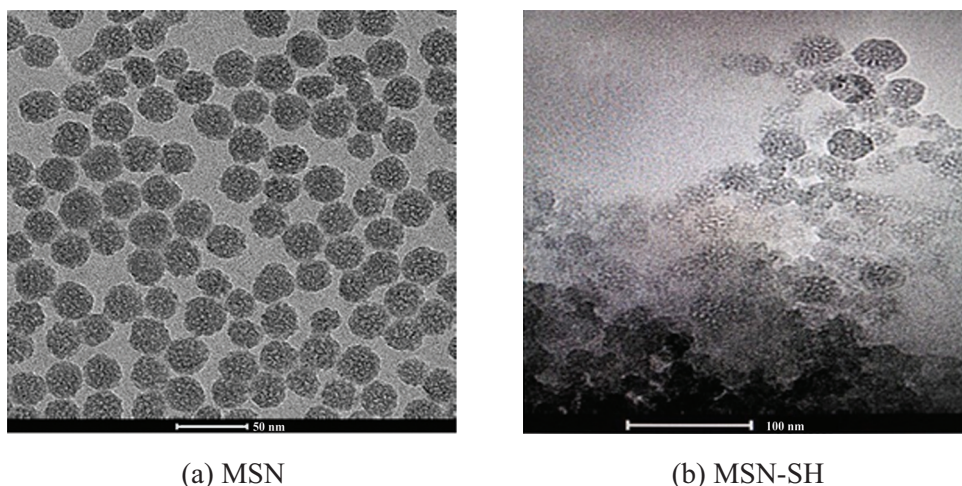


Figure 1 TEM image of MSN and MSN-SH

In order to obtain the structure information about the MSN-SH on a nanoscopic scale, N_2 adsorption-desorption was used to characterize the particles. The MSN-SH had a specific surface area of $404.75 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, pore volume of $0.99 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ and mean pore diameter of 1.69 nm. Calculated results obtained from the adsorption-desorption isotherms are summarized in Table 1.

Table 1 Textural properties of MSN and MSN-SH particles.

Adsorbent	Average particle diameter from TEM (nm)	Specific surface area (m^2g^{-1})	Pore volume (cm^3g^{-1})	Mean pore diameter (nm)
MSN	33.93	509.80	1.40	2.10
MSN-SH	42.67	404.75	0.99	1.69

Figure 2 Shows the FT-IR spectra of the synthesized MSN and MSN-SH samples. Characteristic peaks of silica were observed for MSN at $1,063.35\text{ cm}^{-1}$ and 801.43 cm^{-1} belonging to asymmetric vibrations and symmetric stretching of Si-O-Si. Surface modification was verified by FT-IR spectroscopy as characteristic S-H functional group frequencies were readily detected. The peak at around $2,500\text{ cm}^{-1}$ corresponded to the thiol group. This confirmed the presence of thiol functional group in MSN-SH particles.

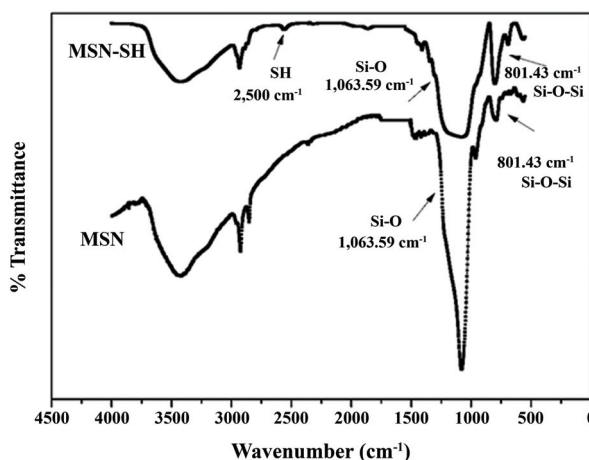


Figure 2 FT-IR spectra of MSN and MSN-SH

2. Effect of variables on MSN and MSN-SH adsorption performance

2.1 Effect of solution pH on MB uptake

The effect of initial pH of the MB solution on the adsorbed amount at equilibrium was studied by varying the initial pH in the range of 2 - 11 under constant parameter (3 mgL^{-1} initial MB concentration, 0.05 g adsorbent dose and 30 min adsorption time). The results are shown in Figure 3. The low adsorption efficient of MB on MSN and MSN-SH observed in acidic solution was due, probably, to the positive charge of the surface, causing ions (H^+) to compete effectively with dye cation causing a decrease in the adsorbed amount. The increasing pH, the positive charge on the interface of the solution decreased and the adsorbing surface appeared to be negatively charged [10] - [11]. Thus, more adsorption site was exposed at higher pH value.

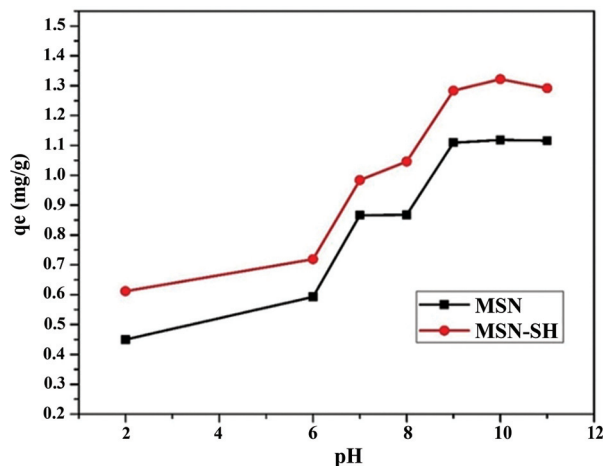


Figure 3 Effect of pH on adsorbed amount of MB at equilibrium for MSN and MSN-SH

2.2 Effect of adsorption time

The equilibrium time is an important factor in an economical adsorption system. Effect of contact time on adsorption of methylene blue by MSN and MSN-SH was investigated by varying contact time from 5 to 120 min. Figure 4 shows the effects of contact time on adsorption efficiency of methylene blue. The adsorption rate was observed increase the adsorption efficiency of MB. The rates of MB removal for both adsorbents were instant initially and became slower with a longer contact time until 9 constants was reached within 30 min. At the early stage of adsorption, the driving force of diffusion is large due to high concentration gradient of MB between the bulk phase and the absorption site on absorbent surface resulting in an initial fast absorption. As longer contact time, adsorption sites are highly occupied from binding with MB thus slowing down the adsorption rate.

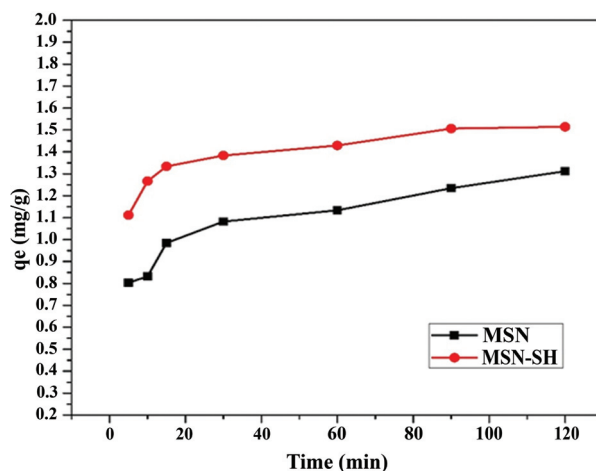


Figure 4 Effect of pH on adsorbed amount of MB at equilibrium for MSN and MSN-SH

2.3 Effect of adsorbent dose

To study the effect of MSN and MSN-SH dose on MB uptake, the amount of adsorbent added was varied. Figure 5 shows the effect of adsorbent dose on the removal efficiency of MB. It was observed that the removal efficiency of MB increased with the increase in adsorbent dose up to 0.05 g then increased slowly with further increase in adsorbent dose up to 0.20 g. Thus, the optimum adsorbent dose was used 0.05 g in the following experiments.

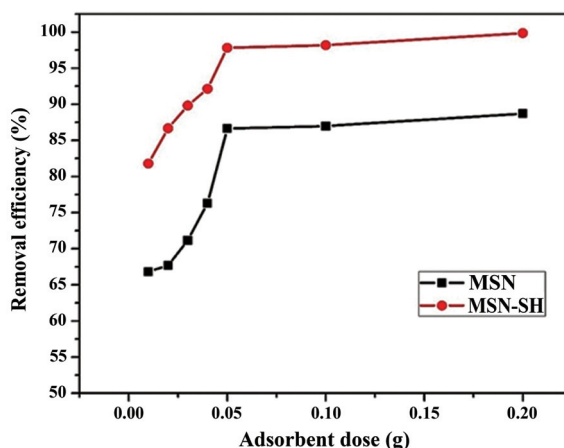


Figure 5 Effect of adsorbent dosage on adsorbed amount of MB at equilibrium for MSN and MSN-SH

2.4 Effect of shaking rate

The increase in adsorption capacity at a higher shaking rate could be explained in terms of the reduction of boundary layer thickness around the adsorbent particles [12]. The effect of shaking rate on MB adsorption is shown in Figure 6. As the shaking rate increased from 0 to 200 rpm, the absorption capacity remained constant.

2.5 Effect of temperature

Temperature had a pronounced effect on the process of adsorption. The adsorption capacity of MB was studied as a function of temperature in the range of 30 to 60 °C. The results obtained are shown in Figure 7. The adsorption of MB by the MSN and MSN-SH decreased with an increase in the temperature. Thus, the sorption reaction of the system was exothermic [10].

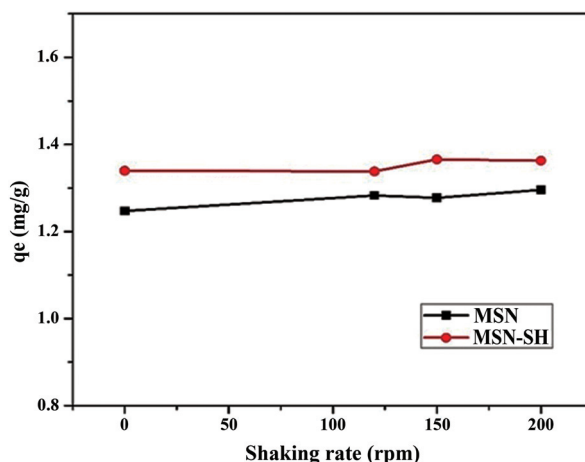


Figure 6 Effect of shaking rate on adsorbed amount of MB at equilibrium for MSN and MSN-SH

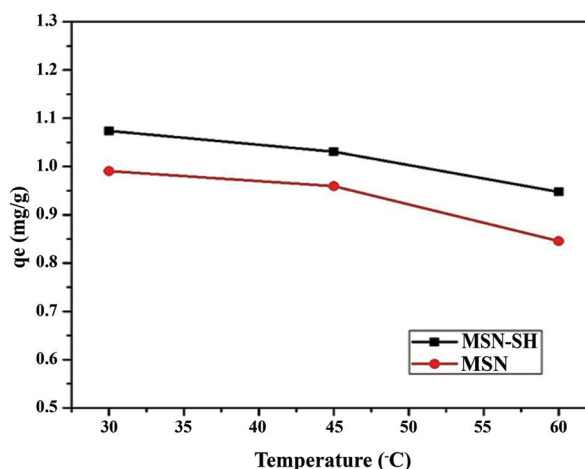


Figure 7 Effect of temperature on adsorbed amount of MB at equilibrium for MSN and MSN-SH

2.6 Effect of initial concentration solution

The rate of adsorption is a function of the initial concentration of the adsorbate, which makes it an important factor to be considered for effective adsorption. Effect of initial MB concentration on adsorption by MSN and MSN-SH was investigated by varying NB concentration from 1 to 40 mgL⁻¹. The results obtained are shown in Figure 8. The adsorption capacity increased with the increase of initial concentration of MB due to the surface of the adsorbent and MB solution increasing.

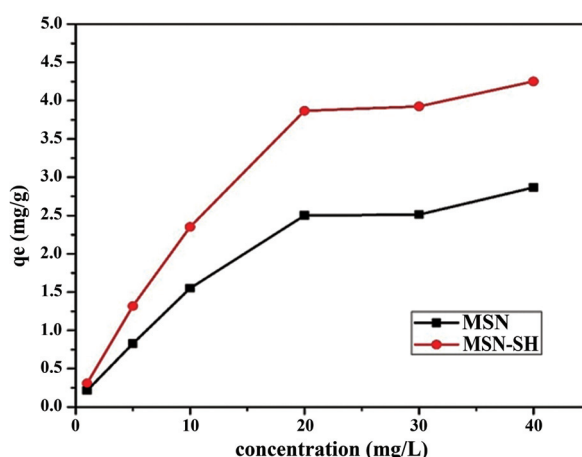
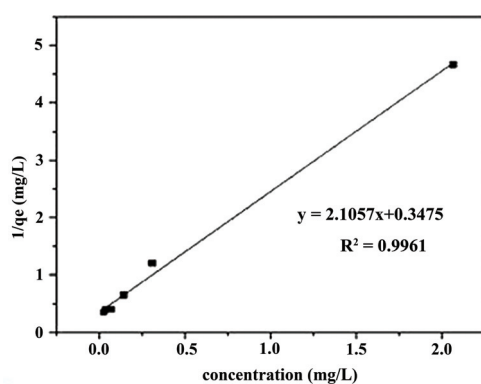


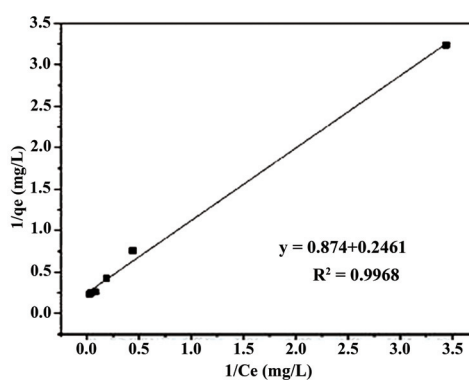
Figure 8 Effect of MB concentration on absorption capacity for MSN and MSN-SH

3. Adsorption isotherms

Adsorption isotherm is important for determining the adsorption behavior of the adsorbent. Therefore, MB was selected as models to determine the adsorption isotherm model of MSN and MSN-SH. Figure 9 shows the adsorption isotherm for MSN and MSN-SH adsorbent.

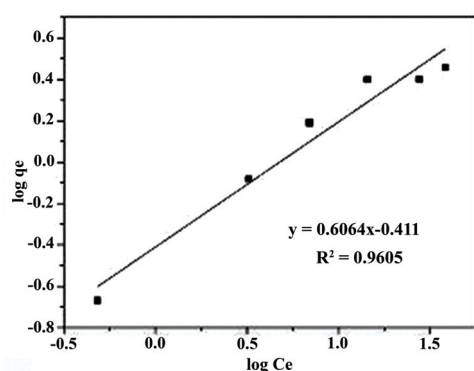


(a) Langmuir model of MSN

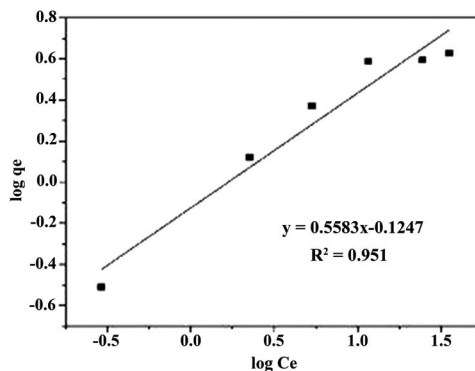


(b) Langmuir model of MSN-SH

Figure 9 Adsorption isotherm model



(c) Freundlich model of MSN



(d) Freundlich model of MSN-SH

Figure 9 Adsorption isotherm model (Cont.)

The isotherm curves demonstrate the adsorption as a function of the equilibrium concentration of MB in solution. Both Langmuir and Freundlich adsorption isotherms were used to normalize the adsorption data. The results are summarized in Table 2.

Table 2 Isotherm parameters for various adsorption isotherms for the adsorption of MB onto MSN and MSN-SH

Adsorbent	Langmuir isotherm model			Freundlich isotherm model		
	q_m (mgg^{-1})	K_L (Lmg^{-1})	R^2	$1/n$	K_F $((\text{mgg}^{-1})(\text{Lmg}^{-1}))^{1/n}$	R^2
MSN	2.878	0.165	0.9961	0.388	1.65	0.9605
MSN-SH	4.063	0.282	0.9968	0.750	1.79	0.9510

The results show that Langmuir model fitted better than the Freundlich model, demonstrating that the adsorption of MB onto MSN and MSN-SH adsorbent can be considered to be a monolayer adsorption process.

4. Adsorption kinetics

The adsorption mechanism depended on the mass transport as well as the physical or chemical characteristics of the adsorbent. The pseudo second order equation assumes the adsorption of one MB molecule onto one active site on the adsorbent surface, while in the pseudo second order model one MB molecule is adsorbed onto two active site [4]. Figure 10 shows the linear regression curves of the pseudo first order model and pseudo second order model for the adsorption of MB onto MSN and MSN-SH. The results are summarized in Table 3. Results showed that the pseudo second order kinetic model fitted better with

adsorption experiment data of the MB adsorption by MSN and MSN-SH than the pseudo first order kinetic model.

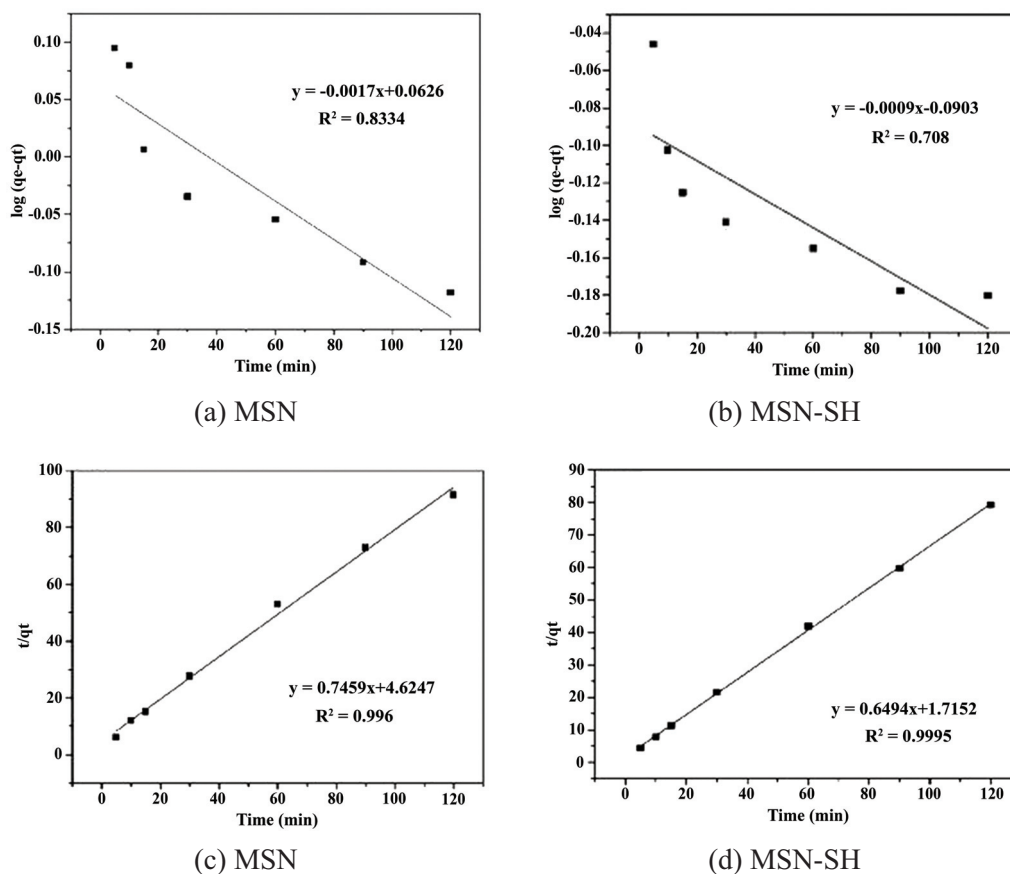


Figure 10 Kinetic model by pseudo first order model and pseudo second order model

Table 3 Comparison of the pseudo first order model and pseudo second order model for the adsorption of MB onto MSN and MSN-SH

Adsorbent	pseudo first order model			pseudo second order model		
	K_1 (min^{-1})	q_e (mgg^{-1})	R^2	K_2 (min^{-1})	q_e (mgg^{-1})	R^2
MSN	-0.00390	1.155	0.8334	0.388	1.341	0.9960
MSN-SH	-0.00207	0.812	0.7080	1.382	1.539	0.9995

Conclusion

Mesoporous silica nanospheres (MSN) and thiol-functionalized MSN (MSN-SH) were synthesized by employing the biphasic system under weak basic condition of l-arginine and using CTAB as a template. Then surface modification was done by thiol functionalization. This approach to synthesize the thiol-functionalized nanostructures is attractive because thiol-functionalized have high dye loading capacity due to the density immobilized thiol groups on the surface of them. The rate of adsorption followed pseudo second order rate equation and Freundlich isotherms were found to be applicable for the adsorption equilibrium data.

Acknowledgement

This work was financially supported by Ubonratchathani Rajabhat University. The partial research was supported by National Science and Technology Development Agency (NSTDA) under Young Scientist and Technologist Program (YSTP) grant no. SP-59-NN-01.

References

- [1] Maradni, H. R., Forouzani, M., Ziari, M., and Biparva, P. (2015). Visible Light Photo-Degradation of Methylene Blue Over Fe and Cu Promoted ZnO Nanoparticles. **Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. Vol. 141, pp. 27-33. DOI: 10.1016/j.saa.2015.01.034
- [2] Bhattacharyya, K. G. and Sharma, A. (2005). Kinetic and Thermodynamics of Methylene Blue Adsorption on Neem (*Azadirachta indica*) Leaf Powder. **Dyes and Pigments**. Vol. 65, Issue 1, pp. 51-59. DOI: 10.1016/j.dyepig.2004.06.016
- [3] Derakhshan, Z., Baghapour, M. A., and Ranjbar, M. M. (2013). Faramarzian, Adsorption of Methylene Blue Dye from Aqueous Solutions by Modified Pumice Stone: Kinetics and Equilibrium Studies. **Health Scope**. Vol. 2, Issue 3, pp. 136-144. DOI: 10.17795/jhealthscope-12492
- [4] Han, X., Chu, L., Liu, S., Chen, T., Ding, C., Yan, J., Cui, L., and Quan, G. (2015). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Porous Biochar Obtained by KOH Activation of Peanut Shell Biochar. **Bio Resources**. Vol. 10, No. 2, pp. 2836-2849. DOI: 10.15376/biores.10.2.2836-2849
- [5] El Qada, E. N., Allen, S. J., and Walker, G. M. (2006). Adsorption of Methylene Blue Onto Activated Carbon Produced from Steam Activated Bituminous Coal: A Study of Equilibrium Adsorption Isotherm. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 124, Issue 1-3, pp. 103-110. DOI: 10.1016/j.cej.2006.08.015

- [6] Rostamian, R., Najafi, M., and Rafati, A. A. (2011). Synthesis and Characterization of Thiol-Functionalized Silica Nano Hollow Sphere as a Novel Adsorbent for Removal of Poisonous Heavy Metal Ions from Water Kinetics, Isotherms and Error Analysis. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 171, Issue 3, pp. 1004-1011.
- [7] Castillo, X., Pizarro, J., Ortiz, C., Cid, H., Flores, M., Canck, E. D., and Voot, P. V. D. (2018). A Cheap Mesoporous Silica from Fly Ash as an Outstanding Adsorbent for Sulfate in Water. **Microporous and Mesoporous Matetials**. Vol. 272, pp. 184-192. DOI: 10.1016/j.micromeso.2018.06.014
- [8] Yang, H., Xu, R., Xue, X., Li, F., and Li, G. (2008). Hybrid Surfactant-Templated Mesoporous Silica Formed in Ethanol and Its Application for Heavy Metal Removal. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 152, Issue 2, pp. 690-698. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.060
- [9] Li, G., Zhao, Z., Liu, J., and Jiang, G. (2011). Effective Heavy Metal Removal from Aqueous Systems by Thiol Functionalized Magnetic Mesoporous Silica. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 192, Issue 1, pp. 277-283. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.015
- [10] Li, G., Zhao, Z., Liu, J., and Jiang, G. (2013). Kinetic Studies on the Adsorption of Methylene Blue Onto Vegetal Fiber Activated Carbons. **Applied Surface Science**. Vol. 282, pp. 52-59. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.05.031
- [11] Dong, C., Zhang, F., Pang, Z., and Yang, G. (2016). Efficient and Selective Adsorption of Multi-Metal Ions Using Sulfonated Cellulose as Adsorbent. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 151, pp. 230-236. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.05.066
- [12] Das, B., Mondal, N. K., Roy, P., and Chattaraj, S. (2013). Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Study on Chromium (VI) Removal from Aqueous Solution Using *Pistia stratiotes* Biomass. **Chemical Science Transactions**. Vol. 2, Issue 1, pp. 85-104. DOI:10.7598/cst2013.318

ผลของการเปลี่ยนแปลงประชากรต่อความต้องการการดูแลสุขภาพด้วยแบบจำลองมาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

The Impact of Population Changes on Healthcare Demands using Nonhomogeneous Markov Model

นวลพรรณ บุราณศรี¹ และพงษ์ชัย จิตตะมัย^{1*}

Nuanpan Buransri¹ and Phongchai Jittamai^{1*}

Received: October 8, 2018; Revised: May 15, 2019; Accepted: May 16, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรมีความสำคัญเนื่องจากผู้สูงอายุมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับประเทศและนานาชาติ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปลี่ยนแปลงประชากรต่อความต้องการการดูแลสุขภาพด้วยแบบจำลองมาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อคาดการณ์จำนวนประชากรและผู้ป่วยใน ในช่วงเวลา 10 ปี โดยพิจารณาตามเพศ และกลุ่มอายุ ผลจากการศึกษาพบว่า ในปี พ.ศ. 2568 ประชากรมีแนวโน้มเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ โดยสัดส่วนผู้สูงอายุอยู่ที่ 22 % ทำให้จำนวนผู้ป่วยในทุกประเภทยามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และผลของจำนวนผู้สูงอายุที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลต่อความต้องการการดูแลสุขภาพระยะยาวจากบุคลากรทางสาธารณสุขที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ข้อมูลความต้องการที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถนำมาใช้ในการเตรียมงบประมาณ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในการจัดหาทรัพยากรทางด้านกำลังคนให้สอดคล้องกับความต้องการที่เปลี่ยนแปลง เพื่อรองรับปัญหาในการดูแลสุขภาพผู้สูงอายุในระยะยาวต่อไป

คำสำคัญ : ตัวแบบมาร์คอฟ; ผู้สูงอายุ; สังคมผู้สูงอายุ; โลจิสติกส์ของการดูแลสุขภาพ; รูปแบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

¹ School of Industrial Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author E - mail Address: jittamai@sut.ac.th

Abstract

The study of the change of population structure is vital because there is continuous growth of number of elderly both in the national and the international. The purpose of this research is to study the effect of population change on the healthcare demand using nonhomogeneous Markov models to estimate the number of population and inpatients in the next ten years based on genders and age groups. The results show that 22 % of the population are likely to become the elderly in 2025 and the number of inpatients are increasing. This leads to the growing demand of long-term care and healthcare staff. This demand data can be used to prepare budgets for managing the change of resource requirement for long-term care management.

Keywords: Markov Model; Elderly; Population Aging; Healthcare Logistics; Nonhomogeneous Model

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงประชากรเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความไม่แน่นอน ได้แก่ การเกิด การตาย และการย้ายถิ่น นอกจากนี้ปัจจัยอายุคาดเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น และการเกิดการตายที่ลดลง ทำให้ประชากรวัยเด็กและวัยทำงานมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ประชากรวัยสูงอายุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาวะทางเศรษฐกิจ สังคม สุขภาพ [1] และความต้องการใช้บริการในโรงพยาบาล โดยประชากรในกลุ่มวัยเด็กและวัยสูงอายุเป็นกลุ่มที่มีความต้องการใช้บริการในโรงพยาบาลมากกว่ากลุ่มอื่น ๆ การรักษาในโรงพยาบาลโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 กลุ่มโรคใหญ่ ๆ ได้แก่ โรคเรื้อรังและไม่เรื้อรัง นอกจากนี้ยังมีกลุ่มโรค Ambulatory Care Sensitive Conditions (ACSC) ที่สามารถป้องกันได้ด้วยการดูแลแบบผู้ป่วยนอก ซึ่งจะช่วยลดทรัพยากรและค่าใช้จ่ายหากมีระบบการจัดการที่ดีและมีประสิทธิภาพ ผู้ป่วย ACSC สามารถรักษาได้โดยการดูแลขั้นพื้นฐาน [2] และภาวะ ACSC ยังเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดทางอ้อมด้านคุณภาพและประสิทธิภาพของการบริการสุขภาพปฐมภูมิ [3] การที่ประชากรผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นและประชากรวัยทำงานมีแนวโน้มลดลงยังส่งผลกระทบต่อภาวะพึ่งพิงของผู้สูงอายุ นอกจากนี้รูปแบบการอยู่อาศัยที่เป็นสังคมเดี่ยวมากขึ้น ทำให้ผู้สูงอายุมีแนวโน้มที่จะต้องอยู่อาศัยตามลำพังเพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้องการการดูแลระยะยาว (Long Term Care - LTC) จากครอบครัว ชุมชนและเจ้าหน้าที่ทางสาธารณสุขเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การบริการดูแลที่บ้านเป็นกิจกรรมที่สนับสนุนการดูแลผู้สูงอายุในระยะยาวเพื่อลดจำนวนการดูแลที่สถาบัน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรในแต่ละกลุ่มอายุโดยเฉพาะผู้สูงอายุจึงมีผลต่อความต้องการในการให้บริการของโรงพยาบาล และความต้องการในการดูแลระยะยาวโดยเฉพาะผู้ป่วยโรคเรื้อรังที่ต้องได้รับการดูแลอย่างต่อเนื่อง

การเปลี่ยนแปลงทางด้านประชากรมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ไม่แน่นอน จึงพบการนำวิธีการทางสโตแคสติกส์ (Stochastics) หลาย ๆ วิธีมาใช้ในการแก้ปัญหา และพบว่ามีการนำห่วงโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) ใช้เป็นเครื่องมือในการทำนายการเปลี่ยนแปลงสถานะสุขภาพและความต้องการของทรัพยากรของปัญหาต่าง ๆ ดังเช่น [4] และ [5] ขณะที่ [6] นำเสนอการทบทวนงานวิจัยของวิธีมาร์คอฟ

แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับใช้ในการแก้ปัญหาในการจัดทำทรัพยากร อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูล ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่ในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปแบบข้อมูลรวม (Aggregate Data) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า [7] และ [8] ที่ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบมีเงื่อนไข แก้ปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ของ Time-Homogeneous Markov Model และ [9] - [11] ได้ใช้ข้อมูลรวมเพื่อจัดทำ Time-Homogeneous Markov Models ซึ่งช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงแบบคงที่ ต่างจากวิธีมาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ที่ช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด 3 วิธี ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง หลังจากนั้น [12] ใช้ข้อมูลรวม สร้างแบบจำลองมาร์คอฟและประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดถ่วงน้ำหนัก

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงประชากรที่มีผลกระทบต่อความต้องการด้านสุขภาพไม่มากนัก ในการวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากร และความสัมพันธ์กับความต้องการผู้ป่วยในรายปีในแต่ละกลุ่มอายุและเพศ เนื่องจากประชากรมีการเปลี่ยนแปลงไปหลาย ๆ สถานะ ซึ่งมีความไม่แน่นอนและเป็นแบบไม่คงที่ จึงประยุกต์ใช้แบบจำลองมาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Nonhomogeneous Markov Model) ในการแก้ปัญหา โดยข้อจำกัดของข้อมูลที่เป็นแบบข้อมูลรวม และจากการสำรวจงานวิจัยจึงใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดถ่วงน้ำหนัก (WLS) สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อคาดการณ์จำนวนประชากรและความต้องการใช้บริการแบบผู้ป่วยใน ในโรงพยาบาลทั้งหมดในจังหวัดนครราชสีมาโดยไม่แยกรายโรงพยาบาล โดยกลุ่มประเภทของประชากรและผู้ป่วยในแบ่งตามกลุ่มอายุ เพศ และผู้ป่วยในแบ่งเป็นกลุ่มผู้ป่วยโรคเรื้อรัง โรคไม่เรื้อรัง และกลุ่มผู้ป่วย ACSC ผลจากแบบจำลองประชากรมาร์คอฟประกอบด้วย จำนวนประชากรและความต้องการผู้ป่วยในระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2558 เทียบกับข้อมูลในอดีต และคาดการณ์ในช่วงปี พ.ศ. 2559 - 2568 โดยที่ผู้สูงอายุรายปีทั้งหมดนำมาใช้ในการประเมินความต้องการบุคลากรในการดูแลระยะยาว โดยพิจารณาปัจจัยระดับการพึ่งพิง และรูปแบบการอาศัยของผู้สูงอายุ และศึกษาผลของรูปแบบการอาศัยของผู้สูงอายุ เมื่ออัตราของผู้สูงอายุต้องอยู่ลำพังเพิ่มขึ้น ต่อความต้องการการดูแลที่บ้าน

วิธีดำเนินการ

การพัฒนาแบบจำลองมาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือ Nonhomogeneous Markov Model เพื่อคาดการณ์จำนวนประชากรและจำนวนผู้ป่วยในแยกประเภทรายปีในโรงพยาบาลทั้งหมด ในพื้นที่ที่ศึกษา จังหวัดนครราชสีมา วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อคาดการณ์แนวโน้มจำนวนประชากร และความต้องการของผู้ป่วยใน โดยแบ่งประเภทเป็น i) ผู้ป่วยที่เป็นโรคเรื้อรัง ii) ผู้ป่วยที่ไม่เป็นโรคเรื้อรัง และ iii) กลุ่มผู้ป่วยในที่สามารถดูแลได้ด้วยวิธีการรักษาแบบผู้ป่วยนอกเมื่อระบบการดูแลสุขภาพพื้นฐานมีประสิทธิภาพเพียงพอ (ACSC) เมื่อโครงสร้างประชากรเปลี่ยนแปลงไปสู่ผู้สูงอายุ การศึกษาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของประชากรอายุและเพศ รวมถึงปัจจัยการเกิด ความตายและการย้ายถิ่นสุทธิ ที่มาของข้อมูลและส่วนประกอบของแบบจำลองแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

ข้อมูล

จำนวนการเกิดและจำนวนประชากรรายปี (ที่มา: สำนักบริหารการทะเบียน กระทรวงมหาดไทย)
จำนวนการตายรายปี (ที่มา: สำนักงานสถิติแห่งชาติ) จำนวนการตายแยกกลุ่มอายุ เพศ

(ที่มา: สำนักงานสาธารณสุขนครราชสีมา และสำนักงานพัฒนาระบบข้อมูลข่าวสารสุขภาพ) จำนวนผู้ป่วยในรายปีจากปี พ.ศ. 2547 - 2557 และจำนวนการตายในโรงพยาบาลทั้งหมด รายปี (ที่มา: สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ - กระทรวงสาธารณสุข)

เซต

A - เซตของกลุ่มอายุ; $A = \{1 = [0,15], 2 = [16-59], 3 = [60-69], 4 = [70-79], 5 = [80+]\}$
 T - เซตของปี IP - เซตของกลุ่มผู้ป่วย; $IP = \{1 = \text{Chronic}, 2 = \text{Non-Chronic}, 3 = \text{ACSC}\}$, S - เซตของสถานะประชากร; $S = \{1 = \text{Pop}_{(a)}, 2 = \text{Pop}_{(a+1)}, 3 = [\text{Inp}_{(k,a)}], 4 = \text{Inp}_{(k,a+1)}, 5 = \text{Death}\}$ G - เซตของเพศ; $G = \{1 = \text{Male}, 2 = \text{Female}\}$ เมื่อ $\text{Pop}_{ga}(t)$ แทนประชากรเพศ g ในกลุ่มอายุ a ณ ปีที่ t และ $\text{Inp}_{gak}(t)$ แทนผู้ป่วยในเพศ g, กลุ่มอายุ a, กลุ่มโรค k ปีที่ t

ดัชนี

i, j : สถานะลำดับที่ i และสถานะลำดับที่ j สำหรับ เซต S ; $i, j \in S$, t : ปีที่ t ในเซต T ; $t \in T$, g : เพศ g ในเซต G ; $g \in G$, a : กลุ่มอายุ a จากเซต A ; $a \in A$ และ k : ผู้ป่วยในกลุ่มที่ k จากเซต IP ; $k \in IP$

1. การคำนวณการเปลี่ยนแปลงประชากร

- 1) อัตราการเกิด (Birth Rate) รายปี t เพศ g คำนวณจากจำนวนการเกิดใหม่ ($\text{Newborn}_g(t)$) ต่อประชากรในปีก่อนหน้า $\text{Pop}_g(t-1)$ หลังจากนั้นคำนวณฟังก์ชันของอัตราการเกิดต่อตัวแปรเวลาที่เปลี่ยนไป
- 2) ปริมาณการย้ายถิ่นสุทธิ (Net Migration) คำนวณปริมาณการย้ายถิ่นสุทธิจากข้อมูลในอดีตด้วยวิธีส่วนประกอบตามรุ่น (Cohort Component Method) [13] และวิธีสถิติชีพ (Vital Statistic) [14] ตามกลุ่มอายุและเพศ โดยสมการที่ (1) และ (2) เมื่อ $\text{NM}_{ga}(t)$ แทนปริมาณการย้ายถิ่นสุทธิเพศ g อายุ (a) ในสิ้นปีที่ t, $\text{NB}_g(t)$ แทนจำนวนการเกิดใหม่เพศ g ในปี t และ $\text{Pop}_g(t-1)$ แทนจำนวนประชากรเพศ g ทั้งหมด ณ ปีที่ t-1, นำ $\text{NM}_{ga}(t)$ มาคำนวณอัตราการย้ายถิ่นในแต่ละปีเมื่อตัวแปรจำนวนประชากรเปลี่ยนแปลงไป จะได้อัตราการย้ายถิ่นสุทธิ (Net Migration Rate) ในประชากรแต่ละกลุ่มอายุ, เพศ และคำนวณหาฟังก์ชันของอัตราการย้ายถิ่นสุทธิในรายปี

$$\text{NM}_{ga}(t) = \text{NB}_g(t) + \text{Pop}_{ga}(t-1) - \text{Pop}_{g,a \rightarrow a+1}(t-1, t) - \text{Death}_{ga}(t) - \text{Pop}_{ga}(t); \quad (1)$$

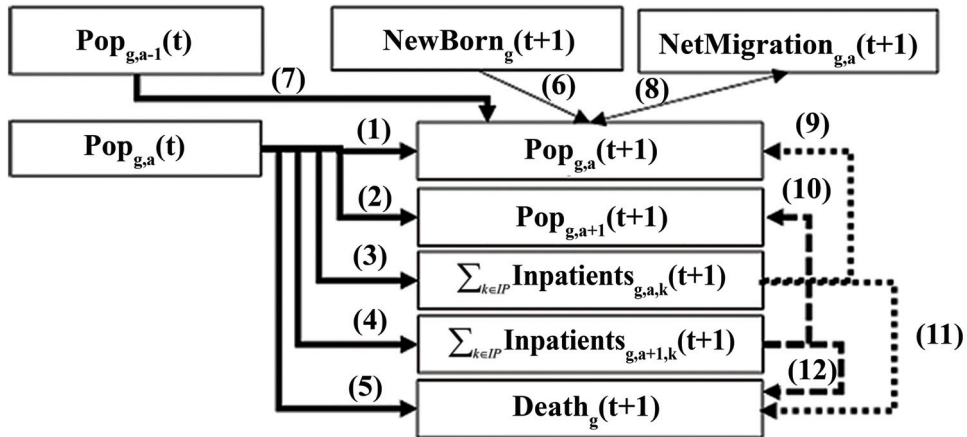
เมื่อ $a = 1$

$$\text{NM}_{ga}(t) = \text{Pop}_{ga}(t-1) - \text{Pop}_{g,a \rightarrow a+1}(t-1, t) + \text{Pop}_{g,a-1 \rightarrow a}(t-1, t) - \text{Death}_{ga}(t) - \text{Pop}_{ga}(t); \quad (2)$$

เมื่อ $a > 1$

การเปลี่ยนแปลงประชากรในแต่ละสถานะ ในแต่ละเพศ g แสดงดังรูปที่ 1 โดยการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มต้นในปีที่ t (1) ประชากรกลุ่มอายุ a ยังคงอยู่ในกลุ่มอายุ a และไม่เป็นผู้ป่วยในในปี t+1; ($a = 1..5$), (2) ประชากรกลุ่มอายุ a เปลี่ยนเป็นกลุ่มอายุ a+1 และไม่ได้เป็น

ผู้ป่วยในปี $t+1$; ($a = 1..4$), (3) ประชากรกลุ่มอายุ a เปลี่ยนเป็นผู้ป่วยในกลุ่มโรค k กลุ่มอายุ a ในปี $t+1$; ($a = 1..5, k = 1..3$), (4) ประชากรกลุ่มอายุ a เปลี่ยนเป็นผู้ป่วยในกลุ่มโรค k กลุ่มอายุ $a+1$ ในปี $t+1$; ($a = 1..4, k = 1..3$), (5) ประชากรกลุ่มอายุ a เข้าสู่สถานะตายนอกโรงพยาบาล ในปี $t+1$; ($a = 1..5$), (6) ประชากรเกิดใหม่ ในปี $t+1$ เพิ่มมาในกลุ่มประชากรกลุ่มอายุ a ในปี $t+1$; ($a = 1$), (7) ประชากรกลุ่มอายุ $a-1$ เปลี่ยนเป็นประชากรกลุ่มอายุ a ในปี $t+1$; ($a = 2,..,5$), (8) ประชากรย้ายถิ่นสุทธิ กลุ่มอายุ a ในปี $t+1$ เพิ่มหรือลดลงในกลุ่มประชากรกลุ่มอายุ a ในปี $t+1$; ($a = 1..5$), (9) ผู้ป่วยในกลุ่มอายุ a และกลุ่มโรค k ในปี $t+1$ ยังมีชีวิตอยู่นับเป็นประชากรกลุ่มอายุ a ในปี $t+1$; ($a = 1..5, k = 1..3$), (10) ผู้ป่วยในกลุ่มอายุ $a+1$ และกลุ่มโรค k ในปี $t+1$ ยังมีชีวิตอยู่นับเป็นประชากรกลุ่ม $a+1$ ในปี $t+1$; ($a = 1..5, a = 1..3$), (11) ผู้ป่วยในกลุ่มอายุ a และกลุ่มโรค a ในปี $t+1$ เข้าสู่สถานะการตายในโรงพยาบาล ในปี $t+1$; ($a = 1..5, k = 1..3$) และ (12) ผู้ป่วยในกลุ่มอายุ $a+1$ และกลุ่มโรค k ในปี $t+1$ เข้าสู่สถานะการตายในโรงพยาบาล ในปี $t+1$; ($a = 1..5, k = 1..3$) โดยสามารถคำนวณ จำนวนประชากรเพศ g กลุ่มอายุ a ในเวลา $t+1$, ดังสมการที่ (3) - (5)



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงประชากรในแต่ละสถานะ

$$pop_{ga}(t+1) = pop_{ga}(t) - pop_{ga \rightarrow a+1}(t, t+1) + NB_g(t+1) \pm NM_{ga}(t+1) - dOH_{ga}(t+1) - (pop_{ga}(t) \rightarrow \sum_{k \in IP} Inp_{gak}(t+1)) - (pop_{ga}(t) \rightarrow \sum_{k \in IP} Inp_{ga+1k}(t+1)) + \sum_{k \in IP} Inp_{gak}(t+1) - dIH_{ga}(t+1) \quad (3)$$

เมื่อ $g, = 1, 2, a = 1$

$$pop_{ga}(t+1) = pop_{ga}(t) - pop_{ga \rightarrow a+1}(t, t+1) + pop_{g(a-1) \rightarrow a}(t, t+1) \pm NM_{ga}(t+1) - dOH_{ga}(t+1) - (pop_{ga}(t) \rightarrow \sum_{k \in IP} Inp_{gak}(t+1)) - (pop_{ga}(t) \rightarrow \sum_{k \in IP} Inp_{ga+1k}(t+1)) + \sum_{k \in IP} Inp_{gak}(t+1) - dIH_{ga}(t+1) \quad (4)$$

เมื่อ $g, = 1, 2, a = 2..4$

$$\begin{aligned} pop_{ga}(t+1) = & pop_{ga}(t) + pop_{g(a-1) \rightarrow a}(t, t+1) \pm NM_{ga}(t+1) - dOH_{ga}(t+1) \\ & - (pop_{ga}(t) \rightarrow \sum_{k \in IP} Inp_{gak}(t+1)) + \sum_{k \in IP} Inp_{gak}(t+1) - dIH_{ga}(t+1) \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ $g, = 1, 2, a = 5$

2. Markov Model

การเปลี่ยนแปลงในแต่ละสถานะในรูปที่ 1 ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลง 2 ขั้นตอน
 ขั้นตอนที่ 1 การเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนกลุ่มอายุประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงสถานะ
 จากประชากรในปีที่ t เป็นประชากรในปีที่ $t+1$ ในแต่ละสถานะต่าง ๆ ได้แก่ ประชากรในกลุ่มอายุเดิม
 ประชากรในกลุ่มอายุใหม่ ประชากรที่เป็นผู้ป่วยในกลุ่มอายุเดิม ประชากรที่เป็นผู้ป่วยในกลุ่มอายุใหม่
 และเข้าสู่ภาวะการตายนอกโรงพยาบาล ขั้นตอนที่ 2 สถานะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยน
 กลุ่มอายุ ได้แก่ ผู้ป่วยในกลุ่มอายุ a ในปีที่ t เข้าสู่สถานะตายในโรงพยาบาลในปีที่ t และเข้าสู่สถานะมีชีวิต
 ในปีที่ t สถานะต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้นนำมาคำนวณการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็น (Transition Probabilities)
 ของแต่ละสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปแบบ Non-Homogeneous Discrete Time Markov
 Model โดยที่การกระจายตัวแต่ละสถานะแสดงได้ในรูปแบบการกำหนดคัมลติโนเมียลลอจิต [15] จากนิยาม
 ของท่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันแสดงได้ดังสมการ $p_{gaj}(t) = P(X_{ga}(t) = j | X_{ga}(t-1) = i)$
 เมื่อ $i, j = 1, 2, \dots, m, a = 1..5, g = 1, 2, t = 0, 1..T$ เมื่อ $p_{gaj}(t)$ แทนความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง
 ประชากรเพศ g กลุ่มอายุ a จากสถานะ i จากเวลา $t-1$ ไปสถานะ j ที่เวลา t จากการศึกษาที่ผ่านมา
 พบว่า [16] ได้นำเสนอตัวแบบมาร์คอฟ จากจำนวนนับที่สามารถถูกประเมินในรูปแบบการกระจาย
 แบบพหุกลุ่ม (Multinomial) โดยที่ $n_{g,a,i}(t-1) = \sum_{j=1}^m n_{g,a,i,j}(t)$ และ $\sum_{j=1}^m p_{g,a,i,j}(t) = 1$ และ
 $n_{gaj}(t)$ แทน จำนวนประชากรเพศ g กลุ่มอายุ a จากสถานะ i จากเวลา $t-1$ ไปสถานะ j ที่เวลา t
 คำนวณตัวประมาณค่าของ $p_{gaj}(t)$ ได้แก่ $\hat{p}_{gaj}(t) = n_{gaj}(t) / n_{gai}(t-1)$

การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับท่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-Homogeneous
 Markov Chains) ในงานวิจัยนี้ทำการแปลงการกระจายแบบพหุกลุ่ม (Multinomial) ไปอยู่ในรูปสมการ
 เส้นตรง (Linear Function) โดยแปลงให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันมัลติโนเมียลลอจิต ซึ่งฟังก์ชันนี้แสดง
 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง (Transition Probability) และตัวแปรต่าง ๆ
 ที่เปลี่ยนไปตามเวลา เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านข้อมูล ตัวแปรต้นที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปีที่
 (Time Calendar) และจำนวนประชากรทั้งหมดในแต่ละเพศและกลุ่มอายุในปีก่อนหน้า ($t-1$)

ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปของ Odds Functions หรือ $\pi_{gaj}(t) = p_{gaj}(t) / p_{gai}(t)$
 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของ $p_{gaj}(t)$ จาก i ไป j โดยมี $p_{gai}(t)$ เป็นสถานะอ้างอิง (Reference State)
 และฟังก์ชันลอจิต (Logit Function) คำนวณได้จาก $\ln(\pi_{gaj}(t)) = \theta_{gaj}(p(t)) = f(\bar{\beta}; \bar{x})$, เมื่อ $i, j = 1,$
 $2, \dots, m, j \neq i, a = 1..5, g = 1, 2, t = 0, 1..T$ เมื่อ $\bar{\beta}$ แทนเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ และ $\bar{x}$ แทน
 เวกเตอร์ของตัวแปรต้น (Covariates or Variable) ของ Logit Function จาก Logit Function เขียน
 ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง (Transition Probability) ได้ใหม่ในรูปของฟังก์ชัน
 ของพารามิเตอร์และตัวแปรต้น ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$p_{gaij}(t) = \exp(\theta_{gaij}(p(t))) / \left(1 + \sum_{j \neq i} \theta_{gaij}(p(t))\right) \quad (6)$$

เมื่อ $i, j = 1, 2, \dots, m, a = 1..5, g = 1, 2, t = 0, 1..T$

$$p_{gaij}(t) = 1 / \left(1 + \sum_{j \neq i} \theta_{gaij}(p(t))\right) \quad (7)$$

เมื่อ $i, j = 1, 2, \dots, m, a = 1..5, g = 1, 2, t = 0, 1..T$

3. วิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ถูกถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least Square Estimation)

เมื่อนำข้อมูลในอดีตมาหาค่า Transition Probability ในแต่ละสถานะ และแสดงในรูป Logit Function ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หลังจากนั้นทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ Logit Function และในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Weighted Least Squares (WLS) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี Ordinary Least Square โดย [17] กล่าวว่าวิธี WLS อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการหาคำตอบ และยังเป็นส่วนหนึ่งของ Maximum Likelihood Estimation Technique by Using Iterative WLS และเมื่อ WLS and ML Estimators เทียบเท่า Asymptotically วิธีประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งสองวิธีจะอยู่ในกลุ่มของตัวประมาณค่าแบบ Best Asymptotically Normal (BAN)

Asymptotic Covariance เมื่อ Logit Response Function เข้าสู่การกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) หรือ cdf ของ $\sqrt{n}(\tilde{\theta}_{gai}(p_n(t)) - \bar{\theta}_{gai}(p(t))) \rightarrow N(0, \phi V_{gai} \phi')$ cdf. เมื่อ $\tilde{\theta}_{gai}(p_n(t))$ เป็นเวกเตอร์ของ Logit Response Function จากตัวอย่างขนาด n จากสถานะ i สำหรับกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่

เมื่อ $n_{gai}(0)$ แทนจำนวนประชากรเพศ g กลุ่มอายุ a ที่สถานะ i ในเวลา $t = 0$ และคำนวณ Mean Variance Covariance สำหรับ Multinomial Distribution โดยคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) จาก $E(n_{gaij}(t)) = n_{gai}(0) \times p_{gaij}(t)$ คำนวณ Variance จาก $Var(n_{gaij}(t)) = n_{gai}(0) \times (p_{gaij}(t) \times (1 - p_{gaij}(t)))$ เมื่อ $i = j$ และคำนวณ Covariance จาก เมื่อ $i \neq j$ ดังนั้นจากสมการ $\hat{p}_{gaij}(t) = n_{gaij}(t) / n_{gai}(t-1)$ จะได้เมทริกซ์ Variance-Covariance ของ $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})$ หรือ $V_{gai}(p(t)) = \frac{1}{n_{gai}(t-1)} \times [Var_{ii} \quad COV_{ij}]_{ga}$ (t) จากวิธี Delta Method ของ [17] เมื่อ Logit Function $\theta_{agij}(p(t)) = \ln(p_{agij}(t)) - \ln(p_{agii}(t))$ คำนวณ Jacobian ϕ_i ของเมทริกซ์ $(m-1) \times m$ จะได้ $\phi_i = 1/p_{ij}(t) - 1/p_{ii}(t)$ เมื่อ $i, j = 1..m$ และ $i \neq j$ ดังนั้นคำนวณ Asymptotic Covariance Matrix ($V_F(t)$) ของ Log Odds จาก $V_F(t) = \phi_i \times V_{gai}(t) \times \phi_i'$ เมื่อ $V_{gai}(t)$ เป็นเมทริกซ์ Variance-Covariance ของ p_i

Minimizes the Quadratic Loss Function ของ WLS ดังสมการที่ (8) คำนวณพารามิเตอร์ของ Logit เมื่อ $\bar{b}_i$ คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ β_{ij} ดังสมการที่ (9)

$$[\bar{\theta}_{gai}(p(t)) - f(\beta; x)(t)]' \times V_F^{-1} \times [\bar{\theta}_{gai}(p(t)) - f(\beta; x)(t)] \quad (8)$$

โดยที่ $f(\beta; x) = \beta x$ เมื่อ β - Set of parameters และ X - Set of covariates

$$\bar{b}_i = (\bar{x}' V_F^{-1} \bar{x})^{-1} \times (\bar{x}' V_F^{-1} f(\beta; x))_i \quad (9)$$

Goodness of Fit Test ทดสอบ Hypothesis ของ Loss Function $\bar{\theta}_{gai}(p(t)) - f(\beta; x)(t) = 0$ เมื่อ Null Hypothesis $H_0: \beta = 0$ ตัวแปร Covariates (X) ในงานวิจัยนี้สนใจจำนวนประชากรและปีที่เปลี่ยนไปใช้การกระจายแบบ F สำหรับทดสอบสมมติฐาน ดังสมการ $F_{q,v} = ((SSR_r - SSR_u / q) / (SSR_u / v))$ มี (q, v) เป็น Degree of Freedom เพื่อระบุปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับแต่ละ Transition Probabilities ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เมื่อ SSR_r แทน Residual of Loss Function สำหรับ Null Hypothesis (H_0) มี q Degree of Freedom และ SSR_u แทน Residual of Loss Function สำหรับ Other Hypothesis มี v Degree of Freedom

การคำนวณหาพารามิเตอร์สำหรับ Logit Function ของแต่ละสถานะโดยใช้โปรแกรม Matlab หลังจากนั้นนำไปคำนวณ Transition Probabilities ของแต่ละสถานะ โดยสมการที่ (6) และ (7) ต่อจากนั้นคำนวณจำนวนประชากร และผู้ป่วยในแต่ละกลุ่ม ตามกลุ่มอายุ เพศ เป็นแบบรายปี ตามสมการที่ (3) - (5)

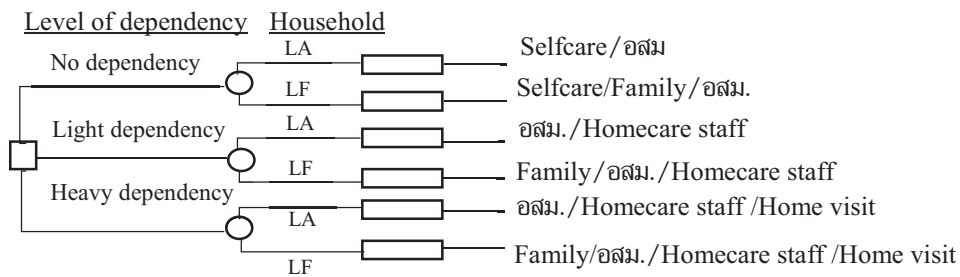
4. รูปแบบการดูแลระยะยาว (Long-Term Care Model) และความต้องการทรัพยากร

เมื่อได้จำนวนประชากรรายปีในแต่ละกลุ่มอายุและเพศ นำมาประเมินการดูแลระยะยาวโดยพิจารณาปัจจัยระดับการพึ่งพิง (Level of Dependency) และปัจจัยสถานการณ์ในครัวเรือน (Household Situation) รายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ปัจจัยระดับการพึ่งพิงของการปฏิบัติกิจวัตรประจำวันด้วยตัวเอง (Activities of Daily Living - ADL) แบ่งตามกลุ่มอายุใน 3 ระดับ ได้แก่ (1) LV1-ไม่ต้องการพึ่งพา (No Dependency) หมายถึงผู้สูงอายุที่สามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ทุกวันโดยไม่ต้องขอความช่วยเหลือ (2) LV2-การพึ่งพิงเล็กน้อย (Light Dependency) หมายถึงผู้สูงอายุที่ต้องการความช่วยเหลือในการทำกิจกรรมในชีวิตประจำวันสำหรับหนึ่งกิจกรรม และ (3) LV3-การพึ่งพิงมาก (Heavy Dependency) หมายถึงผู้สูงอายุที่ต้องการความช่วยเหลือในการทำกิจกรรมในชีวิตประจำวันมากกว่าหนึ่งกิจกรรม

2) ปัจจัยสถานการณ์ในครัวเรือน (Household Situation) เกี่ยวกับผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่ตามลำพัง (Live Alone - LA) หรืออาศัยอยู่กับครอบครัว (Live with Family - LF)

การวิเคราะห์จำนวนความต้องการการดูแลระยะยาวจะใช้การจำลองแบบมอนติคาร์โลตามการกระจายแบบ Uniform เนื่องจากการขาดข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นไปได้ร่วมกันขององค์ประกอบของครัวเรือนและระดับการพึ่งพา จึงใช้ข้อมูลระดับการพึ่งพิงในอดีต จากการสำรวจข้อมูลในอดีตจาก Health Information System ในปี พ.ศ. 2552 เป็นขอบเขตล่าง และข้อมูลในปี พ.ศ. 2557 เป็นขอบเขตบน และข้อมูลองค์ประกอบของครัวเรือนจาก Health Information System ใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2537 เป็นขอบเขตล่าง และข้อมูลปี พ.ศ. 2557 เป็นขอบเขตบน เพื่อหาสัดส่วนของปัจจัยการดูแลระยะยาวระดับของการดูแลระยะยาวจากปัจจัยที่กล่าวมาและความต้องการบุคลากรแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระดับของการดูแลระยะยาวและความต้องการบุคลากร

จากรูปที่ 2 ระดับการดูแลระยะยาวในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากระดับมาตรฐานการดูแลผู้สูงอายุ กำหนดได้จากมาตรฐานสาธารณสุขดังนี้ (1) อัตราการดูแลผู้สูงอายุทั้งหมดต่อเจ้าหน้าที่อาสาสมัครสาธารณสุข (อสม.) คือผู้สูงอายุ 7 คนต่อเจ้าหน้าที่ 1 คน (2) อัตราการดูแลผู้สูงอายุความพึ่งพิงเล็กน้อย ระดับ 2 และพึ่งพิงมากระดับ 3 และอาศัยลำพังต้องการเจ้าหน้าที่ Home Care Staff 1 คน ต่อผู้สูงอายุ 7 คน (3) อัตราการดูแลผู้สูงอายุความพึ่งพิงมากระดับ 3 และอาศัยลำพังต้องการเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์ Home Visit Staff 1 คน ต่อผู้สูงอายุ 200 คน

หลังจากนั้นพิจารณา Sensitivity Analysis ของความต้องการ Home Care หรือการดูแลที่บ้าน เมื่อระดับของสถานการณ์ในครัวเรือนที่ผู้สูงอายุต้องอยู่ลำพังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 1 และ 3 % ต่อปี

ผลการศึกษา

1. ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง (Markov Transition Probability)

สรุปพารามิเตอร์ของ Logit Function ของ Markov Transition Probability ในรูปแบบพหุนามโดยมีตัวแปร ได้แก่ จำนวนประชากรและปีศักราช ทดสอบตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธี F-Distribution Test ของแต่ละกลุ่มอายุและแต่ละสถานะที่เปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 1 และนำมาคำนวณ Transition Probability ด้วยสมการที่ (6) และ (7)

2. การตรวจสอบความน่าเชื่อถือ (Model Validation)

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผลการคาดการณ์จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการคำนวณด้วยการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจริงและการคาดการณ์โดยใช้ Mean Absolute Percent Error (MAPE) ข้อมูลย้อนหลังที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองของมาร์คอฟอยู่ระหว่าง พ.ศ. 2550 - 2557 ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะเปรียบเทียบข้อมูลทั้งหมดระหว่าง พ.ศ. 2550 - 2559 ผลจากการเปรียบเทียบ MAPE พบว่าการคาดการณ์ของประชากรมีความแตกต่างน้อยมากเมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

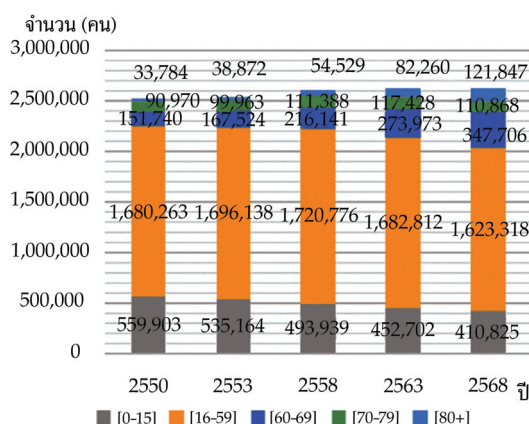
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ Logit Function สำหรับเพศชายในแต่ละสถานะในแต่ละช่วงอายุ

States	Gender	[0-15]			[16-59]			[60-69]			[70-79]			[80-+]		
		Constant	pop	year	Constant	pop	year	Constant	pop	year	Constant	pop	year	Constant	pop	year
$s_1 \rightarrow 2$	Male	-457.58	5E-05	0.220	-15.23	1E-05	0	102.84	0	-0.05	-3.07	0	0	0	0	0
	Female	-443.26	5E-05	0.213	-119.91	0	0.0574	94.41	0	-0.05	-146.64	0	0.071	0	0	0
$s_1 \rightarrow 3$	Male	-203.84	0	0.098	-15.71	1E-05	0	-2.95	-2E-05	0	-0.11	-8E-05	0	580.16	0	-0.290
	Female	-186.79	0	0.089	-7.32	0	0	90.68	0	-0.05	127.12	0	-0.065	0.41	-1E-04	0
$s_1 \rightarrow 33$	Male	-1.38	-1E-05	0	-68.48	0	0.032	-2.81	0	0	-1.82	0	0	307.12	0	-0.153
	Female	-2.51	-1E-05	0	-4.97	0	0	-2.84	0	0	-2.17	0	0	203.91	0	-0.102
$s_1 \rightarrow 31$	Male	-1.77	-1E-05	0	-72.38	0	0.034	-2.72	0	0	-1.79	0	0	266.39	0	-0.133
	Female	-2.49	-1E-05	0	-4.31	0	0	-2.70	0	0	-1.91	0	0	204.98	0	-0.103
$s_1 \rightarrow 32$	Male	1.08	-9E-06	0	-2.82	0	0	-0.79	-1E-05	0	-0.82	0	0	310.55	0	-0.154
	Female	-51.18	0	0.025	-2.32	0	0	-0.36	-1E-05	0	70.67	0	-0.04	251.97	0	-0.125
$s_1 \rightarrow 43$	Male	-268.16	0	0.130	-161.30	0	0.077	-4.53	0	0	-300.03	0	0.15	0	0	0
	Female	-4.96	-1E-05	0	-7.26	0	0	-3.77	-0	0	-4.53	0	0	0	0	0
$s_1 \rightarrow 41$	Male	-3.25	-1E-05	0	-7.26	0	0	-4.55	0	0	-4.12	0	0	0	0	0
	Female	-4.29	-1E-05	0	-7.13	0	0	-3.51	-0	0	-4.10	0	0	0	0	0
$s_1 \rightarrow 42$	Male	-68.75	0	0.032	-6.20	0	0	-2.42	-0	0	-3.03	0	0	0	0	0
	Female	-4.83	0	0	-6.04	0	0	-1.94	-0	0	106.19	0	-0.054	0	0	0

* $S = \{1 = \text{Pop}(a), 2 = \text{Pop}(a+1), 3 = \text{Inp}(k, a), 4 = \text{Inp}(k, a+1), 5 = \text{Death}\}$ $s_i \rightarrow j$ for $S = \{1, 2, 5\}$, $S_i \rightarrow jk$ for $S = \{3, 4\}$, $k \in \text{IP}$

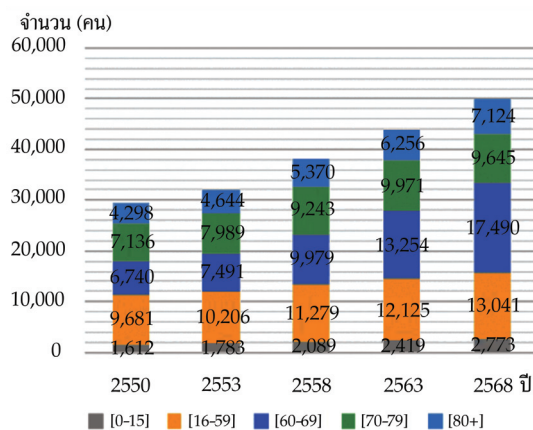
3. จำนวนประชากร (Number of Population)

อัตราการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นของ Markov Population ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาจำนวนประชากรและจำนวนผู้ป่วยในในแต่ละกลุ่มและแต่ละช่วงอายุเป็นรายปีในระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2568 ผลการศึกษาแสดงจำนวนประชากรและจำนวนผู้ป่วยในตาม 5 กลุ่มอายุและแต่ละเพศ โดยสรุปผลประชากรรวมเพศ แยกกลุ่มอายุ ดังรูปที่ 3

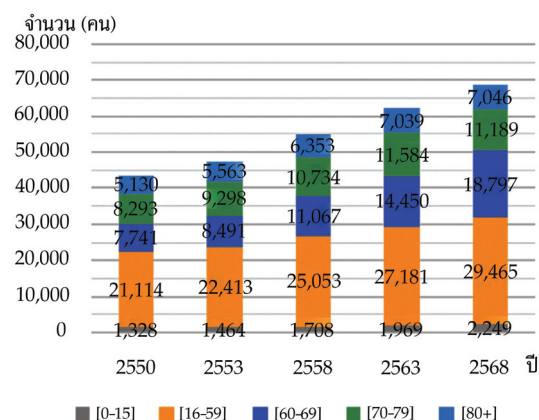


(ก) Total number of population

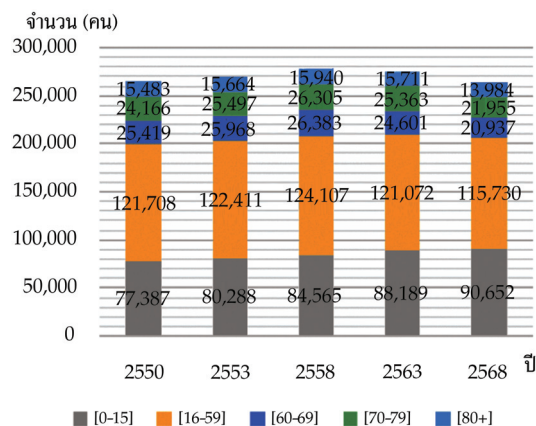
รูปที่ 3 จำนวนประชากรและจำนวนผู้ป่วยในโดยรวมแยกกลุ่มอายุระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2568



(ข) ACSC inpatients



(ค) Chronic inpatients



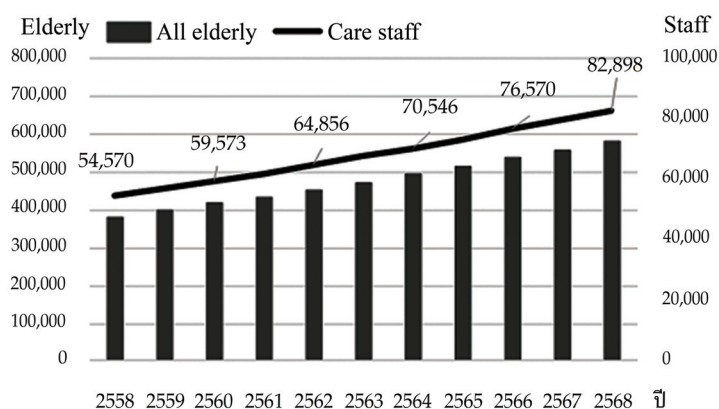
(ง) Non-chronic inpatients

รูปที่ 3 จำนวนประชากรและจำนวนผู้ป่วยในโดยรวมแยกกลุ่มอายุระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2568 (ต่อ)

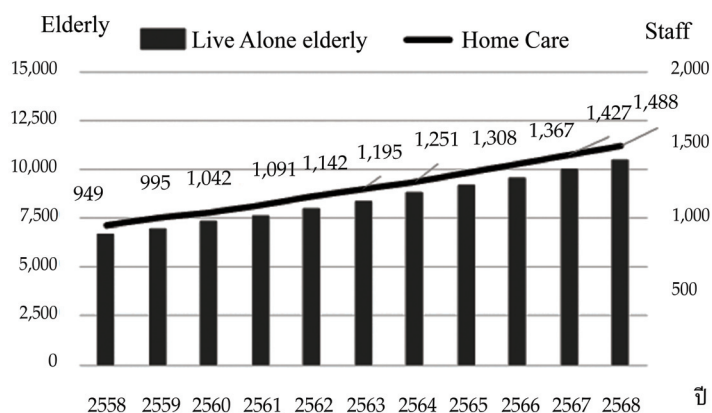
จำนวนประชากรในกลุ่มเด็กลดลงจาก 559,903 คน ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 410,825 คน ในปี พ.ศ. 2568 หรือลดลงร้อยละ 26.6 และจำนวนประชากรในกลุ่มวัยทำงานลดลงจาก 1,680,263 คน ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 1,623,318 คน ในปี พ.ศ. 2568 หรือลดลง 3.39 % อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของประชากรทั้งหมดในกลุ่มผู้สูงอายุทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 276,494 คน ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 580,421 คน ในปี พ.ศ. 2568 หรือเพิ่มขึ้น 52.36 % การลดลงของประชากรในวัยทำงานทำให้อัตราส่วนการพึ่งพิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 49.77 % ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 61.06 % ในปี พ.ศ. 2568 หมายความว่าประชากรที่ต้องการการดูแลมีจำนวนเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนของผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นจาก 10.98 % ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 22.20 % ในปี พ.ศ. 2568 ซึ่งเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุแล้วนั่นเอง ผู้ป่วยทั้งหมดในกลุ่ม ACSC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2550 - 2568 จำนวนผู้ป่วยในกลุ่มผู้สูงอายุกลุ่มโรค ACSC เพิ่มขึ้นจาก 18,174 คน ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 34,259 คน ในปี พ.ศ. 2568 หรือเพิ่มขึ้น 46.95 % จำนวนผู้ป่วยโรคเรื้อรังผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นจาก 21,164 คน ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 37,033 คน ในปี พ.ศ. 2568 หรือเพิ่มขึ้น 42.85 % จำนวนผู้ป่วยสูงอายุประเภทไม่เรื้อรังทุกรายลดลงจาก 65,068 คน ในปี พ.ศ. 2550 เป็น 56,876 คน ในปี พ.ศ. 2568 หรือลดลง 14.40 % เนื่องจากจำนวนผู้ป่วยกลุ่มโรคไม่เรื้อรังหญิงมีแนวโน้มลดลง

4. จำนวนความต้องการบุคลากรการดูแลระยะยาว

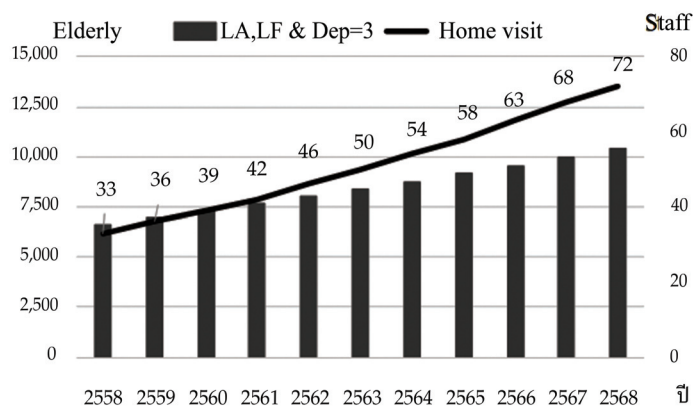
เจ้าหน้าที่ดูแลผู้สูงอายุหรืออาสาสมัครสาธารณสุข (อสม.) คำนวณโดยระดับมาตรฐานของการดูแลชุมชนตามมาตรฐาน อสม. 1 คน ดูแลผู้สูงอายุได้ 7 คน ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) แนวโน้มของผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่ตามลำพังเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558 - 2568 แนวโน้มเช่นเดียวกันสำหรับความต้องการของเจ้าหน้าที่ดูแลชุมชน จำนวนผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่ตามลำพังและต้องการการพึ่งพิงดังรูปที่ 4(ข) กลุ่มนี้เป็นผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่ตามลำพังและต้องการความช่วยเหลือในการทำกิจกรรมในชีวิตประจำวัน (ADL) มากกว่าหนึ่งกิจกรรม มาตรฐานของการดูแลชุมชนตามมาตรฐาน อสม. หรืออาสาสมัครผู้สูงอายุ (อพส.) ในชุด Home Care สักส่วน 1 คน ดูแลผู้สูงอายุ 7 คน การเยี่ยมบ้านโดยเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์หรือ Home Visit ให้การดูแลผู้ป่วยปฐมภูมิแก่ผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่ตามลำพังและต้องการความช่วยเหลือในการทำกิจกรรมในชีวิตประจำวัน (ADL) มากกว่าสองกิจกรรม โดยทั่วไปตามมาตรฐานควรมีเจ้าหน้าที่ Home Visit ที่เป็นเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์อย่างน้อย 1 คนต่อผู้สูงอายุ 200 คน แนวโน้มของความต้องการเข้ารับการตรวจที่บ้านโดยเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์เพิ่มขึ้นดังแสดงรูปที่ 4(ค)



(ก) เจ้าหน้าที่ อพส. หรือ อสม. สำหรับผู้สูงอายุทั้งหมด



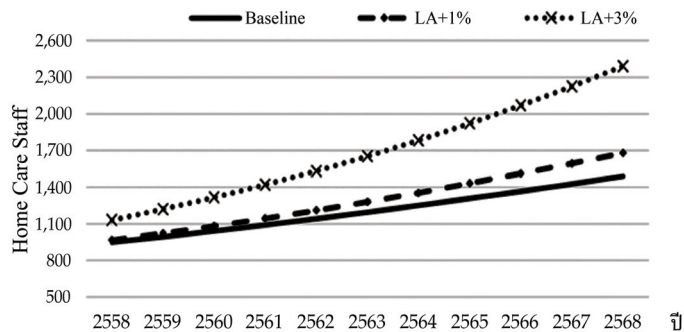
(ข) เจ้าหน้าที่ อพส. สำหรับผู้สูงอายุที่มีภาวะพึ่งพิงและอาศัยอยู่ลำพัง



(ค) บริการการเยี่ยมบ้านโดยแพทย์, พยาบาลสำหรับผู้สูงอายุที่มีภาวะพึ่งพิงระดับสูง

รูปที่ 4 ความต้องการบุคลากรการดูแลระยะยาวสำหรับผู้สูงอายุ

5. Sensitivity Analysis ของความต้องการ Home Care



รูปที่ 5 ความต้องการบุคลากรการดูแลที่บ้าน (Home Care) เมื่ออัตรา Live Alone ของผู้สูงอายุเพิ่มขึ้น 1 และ 3 %

เมื่ออัตราผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่ลำพัง (Live Alone - LA) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อปี 1 และ 3 % จะพบว่า ความต้องการการดูแลที่บ้าน (Home Care) ของอาสาสมัครและเจ้าหน้าที่สาธารณสุขมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 5 โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่ลำพังเพิ่มขึ้นต่อปี 3 %

การอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงประชากรต่อจำนวนผู้ป่วยในในโรงพยาบาลในจังหวัดนครราชสีมา และผลต่อประชากรผู้สูงอายุที่เปลี่ยนไปต่อความต้องการการดูแลระยะยาวในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2568 โดยพิจารณาตามเพศ ตามกลุ่มอายุ 5 กลุ่มอายุ ได้แก่ กลุ่มเด็ก (0 - 15) กลุ่มวัยทำงาน (16 - 59) กลุ่มผู้สูงอายุขั้นต้น (60 - 69) กลุ่มผู้สูงอายุขั้นกลาง (70 - 79) กลุ่มผู้สูงอายุขั้นปลาย (80 หรือมากกว่า) โดยผู้ป่วยในในโรงพยาบาลพิจารณาแยกตามกลุ่มโรค 3 ประเภท ได้แก่ กลุ่มโรคเรื้อรัง กลุ่มโรคไม่เรื้อรัง และกลุ่มโรคที่รักษาได้ด้วยสภาวะการดูแลแบบประคับประคองหรือผู้ป่วยนอก (ACSCs) แนวโน้มประชากรวัยเด็กทั้งเพศชายและหญิงมีจำนวนลดลง แต่จำนวนผู้ป่วยในทุกประเภทยังมีแนวโน้มเพิ่มเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรเพศชายในวัยทำงานมีจำนวนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนประชากรเพศหญิงในวัยทำงานมีแนวโน้มลดลงทำให้ประชากรวัยทำงานโดยรวมมีแนวโน้มลดลง และพบว่าจำนวนผู้ป่วยในประเภทไม่เรื้อรังมีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มที่เกิดขึ้นจากข้อมูลในอดีต แต่ผู้ป่วยในกลุ่มโรคเรื้อรังและ ACSCs ยังเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกลุ่มวัยทำงานอยู่ในช่วงอายุที่กว้างซึ่งแนวโน้มประชากรในกลุ่มอายุนี้นี้เมื่อเปลี่ยนไปมีอายุเฉลี่ยเพิ่มขึ้นส่งผลให้แนวโน้มการป่วยเป็นโรคเรื้อรังเพิ่มขึ้น ในขณะที่ประชากรผู้สูงอายุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งกลุ่มผู้สูงอายุขั้นต้น ขั้นกลาง และขั้นปลาย ทั้งเพศชายและเพศหญิงส่งผลทำให้สัดส่วนประชากรผู้สูงอายุโดยรวมเพิ่มขึ้นมากจากร้อยละ 11 ในปี พ.ศ. 2550 เป็นร้อยละ 22.1 ในปี พ.ศ. 2568 ส่งผลต่อจำนวนผู้ป่วยในทุกประเภทยังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ประชากรวัยทำงานที่ลดลงและประชากรผู้สูงอายุที่สูงขึ้นส่งผลต่ออัตราการพึ่งพิงของผู้สูงอายุที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาความต้องการการดูแลระยะยาวของประชากรผู้สูงอายุจากปัจจัยระดับความสามารถในการพึ่งพิงจากข้อมูลในอดีต และสภาวะการอยู่อาศัย

แบบอยู่ตามลำพังหรืออยู่กับครอบครัว พบว่าแนวโน้มความต้องการอาสาสมัครสาธารณสุขและอาสาสมัครผู้สูงอายุมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น สำหรับผู้สูงอายุทุกกลุ่มและทุกประเภท เมื่อพิจารณากลุ่มผู้สูงอายุประเภทที่ช่วยเหลือตัวเองได้น้อยและช่วยเหลือตัวเองไม่ได้เลยก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความต้องการบริการการดูแลที่บ้านก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อทดสอบความต้องการการดูแลที่บ้านกรณีผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่คนเดียวเพิ่มขึ้นปีละ 1 และ 3 % ก็พบว่าบุคลากร Home Care Staff มีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างมาก

สรุปผล

ข้อมูลความต้องการบุคลากรที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถนำมาใช้ในการเตรียมงบประมาณ เพื่อจัดหาทรัพยากรทางด้านกำลังคนให้สอดคล้องกับความต้องการที่เปลี่ยนแปลงในอนาคตเพื่อรองรับปัญหาในการดูแลผู้สูงอายุในระยะยาวต่อไป นอกจากนี้ข้อมูลผู้ป่วยในที่ได้สามารถนำไปประเมินความต้องการการใช้เตียงในโรงพยาบาลในการศึกษาต่อไป

ในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดทางด้านข้อมูลเนื่องจากในงานวิจัยนี้พิจารณาเพียงปัจจัยการเปลี่ยนแปลงสถานะของประชากรจากข้อมูลจำนวนประชากรในอดีตและช่วงเวลาที่ผ่านมาเท่านั้น ในงานวิจัยต่อไปควรพิจารณาปัจจัยทางด้านสุขภาพที่ส่งผลต่อสุขภาพประชากรในแต่ละกลุ่มอายุด้วย เช่น ระดับ BMI ระดับคอเรสเตอรอล เป็นต้น รวมไปถึงปัจจัยทางด้านสังคมอื่น ๆ เช่น รายได้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดหาหลักประกันสุขภาพของผู้สูงอายุที่เหมาะสม นอกจากนี้การศึกษาต่อไปสามารถนำข้อมูลความต้องการผู้ป่วยในเป็นข้อมูลในการประเมินจำนวนเตียงและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในโรงพยาบาลต่อไปโดยวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนปัจจัยทางประชากรที่ส่งผลต่อจำนวนเตียงและค่าใช้จ่าย รวมถึงวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อผู้ป่วยประเภท ACSC ลดลงหรือเพิ่มขึ้นต่อจำนวนเตียงและค่าใช้จ่ายด้วยเช่นกัน

References

- [1] Vipran Prachuabmoh ed. (2013). **Situation of the Thai elderly 2011**. With support from the Fund of the Elderly, National Commission on the Elderly [Press release]
- [2] Sanmartin, C. and Khan, S. (2011). Hospitalizations for Ambulatory Care Sensitive Conditions (ACSC): The Factors That Matter. **Health Research Working Paper Series** (Catalogue 82-622-X, No. 007) Ottawa: Statistics Canada.
- [3] Lugo-Palacios, D. G., and Cairns, J. (2015). Using Ambulatory Care Sensitive Hospitalisations to Analyse the Effectiveness of Primary Care Services in Mexico. **Social Science & Medicine**. Vol. 144, pp. 59-68. DOI: 10.1016/j.socscimed.2015.09.010
- [4] Craig, B. A. and Newton, M. A. (1997). Modeling the History of Diabetic Retinopathy. **Case Studies in Bayesian Statistics**. Springer. pp. 305-323. DOI: 10.1007/978-1-4612-2290-3_7
- [5] Pérez-Ocón, R., Ruiz-Castro, J. E., and Gámiz-Pérez, M. L. (2000). Markov Models with Lognormal Transition Rates in the Analysis of Survival Times. **Test**. Vol. 9, Issue 2, pp. 353-370. DOI: 10.1007/BF02595740

- [6] Vassiliou, P. C. (1997). The Evolution of the Theory of Non-Homogeneous Markov Systems. **Applied Stochastic Models and Data Analysis**. Vol. 13, Issue 3-4, pp. 159-176
- [7] Kalbfleisch, J. D., Lawless, J. F., and Vollmer, W. M. (1983). Estimation in Markov Models from Aggregate Data. **Biometrics**. Vol. 39, No. 4, pp. 907-919. DOI: 10.2307/2531326
- [8] Van Der Plas, A. P. (1983). On the Estimation of the Parameters of Markov Probability Models Using Macro Data. **The Annals of Statistics**. Vol. 11, No. 1, pp. 78-85
- [9] Kalbfleisch, J. D. and Lawless, J. F. (1984). Least-Squares Estimation of Transition Probabilities from Aggregate Data. **The Canadian Journal of Statistics / La Revue Canadienne de Statistique**. Vol. 12, No. 3, pp. 169-182. DOI: 10.2307/3314745
- [10] Lawless, J. and McLeish, D. (1984). The Information in Aggregate Data from Markov Chains. **Biometrika**. Vol. 71, No. 3, pp. 419-430. DOI: 10.2307/2336552
- [11] McLeish, D. L. (1984). Estimation for Aggregate Models: The Aggregate Markov Chain. **The Canadian Journal of Statistics / La Revue Canadienne de Statistique**. Vol. 12, No. 4, pp. 265-282. DOI: 10.2307/3314810
- [12] Davis, B. A., Heathcote, C. R., and O'Neill, T.J. (2002). Estimating and Interpolating a Markov Chain from Aggregate Data. **Biometrika**. Vol. 89, Issue 1, pp. 95-110. DOI: 10.1093/biomet/89.1.95
- [13] Smith, S. K., Tayman, J., and Swanson, D. A. (2006). **State and Local Population Projections**. Methodology and Analysis. Springer Netherlands. DOI: 10.1007/0-306-47372-0
- [14] VI, M. (1970). **Methods of Measuring Internal Migration**. United Nations Publication, New York.
- [15] MacRae, E. C. (1977). Estimation of Time-Varying Markov Processes with Aggregate Data. **Econometrica**. Vol. 45, No. 1, pp. 183-198. DOI: 10.2307/1913295
- [16] Anderson, T. W. and Goodman, L. A. (1957). Statistical Inference About Markov Chains. **The Annals of Mathematical Statistics**. Vol. 28, Number 1, pp. 89-110.
- [17] Agresti, A. and Kateri, M. (2011). **Categorical Data Analysis**. Springer, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-642-04898-2_161

สมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไรเซชัน

Mechanical Properties of Natural Rubber Reinforced with Modified Silica by Admicellar Polymerization

ธัมมโชโต ประจักษ์สุต^{1*} คมกฤษ ปิติฤกษ์¹ และธิราวุธ พงศ์ประยูร²

Thamchoto Prajaksood^{1*} Komkrit Pitiruek¹ and Thirawudh Pongprayoon²

Received: March 19, 2019; Revised: May 14, 2019; Accepted: May 15, 2019

บทคัดย่อ

ผงเขม่าดำ (Carbon Black) ซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว (Unmodified Silica) และซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไรเซชัน (Modified Silica) จะถูกใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเสริมแรงของยาง หลังจากนั้นจะทำการทดสอบสมบัติทางกลในแต่ละสูตรการผสม ผลการทดสอบพบว่าค่าสมบัติทางกลของยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไรเซชันดีกว่าในทุกค่า เมื่อเทียบกับผงเขม่าดำหรือซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว สำหรับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไรเซชันที่อัตราส่วนผสม 40 phr (Parts Per Hundred of Rubber) โดยผ่านการอัดขึ้นรูปที่ 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที จะให้ประสิทธิภาพทางกลที่ดีและเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้เป็นสูตรเคมีสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ล้อยางใน

คำสำคัญ: ยาง; ซิลิกา; แอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไรเซชัน; ยางใน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen

² Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok

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

Abstract

Carbon Black (CB), Unmodified Silica (Si) and silica modified by admicellar polymerization (MS) were applied as rubber reinforcement. Mechanical properties of these different rubber formulae were subsequently tested. The results revealed that the mechanical properties of rubber reinforced with silica modified by admicellar polymerization were superior to those reinforced with carbon black or unmodified silica. As for the rubber reinforcement with silica modified by admicellar polymerization at the 40 phr (Parts Per Hundred of Rubber) mixture ratio with a compression mold at 160 kg/cm² at a 145 °C cure temperature for 4 minutes proved to be the best mechanical properties effective and the most optimal conditions to be used as a rubber chemical formulae for production of inner rubber tube products.

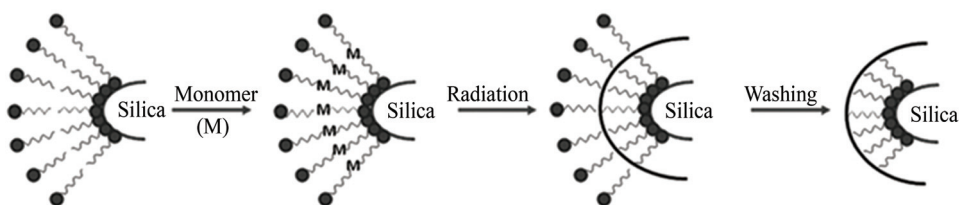
Keywords: Rubber; Silica; Admicellar Polymerization; Inner Rubber Tube

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ประเภทยางมีปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอุตสาหกรรม การผลิตยางล้อรถยนต์และรถจักรยานยนต์ ในปี พ.ศ. 2557 พบว่ายางล้อรถยนต์และรถจักรยานยนต์ มีปริมาณการใช้สูงที่สุด คือ 352,862 ตัน คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณการใช้ ยางธรรมชาติของประเทศไทย [1] ส่งผลให้มีการพัฒนากันอย่างกว้างขวางเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ การใช้งานที่หลากหลายตามความต้องการ โดยนอกเหนือจากการพัฒนาให้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ความต้านทานการฉีกขาด (Tear Strength) ความยืดหยุ่น (Elongation) ความต้านทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance) ค่าการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability) และค่าความทนทานต่อรังสีโอโซน (Ozone Aging Resistance) ของยางที่ดีที่สุดแล้วยังมีเป้าหมายที่ต้องการพัฒนาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยการเติมสารเติมแต่ง (Fillers) ในยางเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของยางให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งในอุตสาหกรรมยางล้อรถยนต์และรถจักรยานยนต์ส่วนใหญ่นิยมใช้สารเติมแต่งผงเขม่าดำ (Carbon Black) เพื่อช่วยเพิ่ม คุณสมบัติในการเสริมแรง แต่ผงเขม่าดำยังไม่สามารถทำให้ได้สมบัติบางประการตามที่ต้องการ เช่น ความยืดหยุ่น และยังถูกจำกัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องเป็นสีดำเท่านั้น ไม่สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีสีอื่น ๆ ได้ การใช้สารตัวเติมอื่น ๆ ที่ไม่มีสีหรือมีสีอ่อน จึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทนี้

ซิลิกา (Silica) ถือเป็นสารเติมแต่งอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง เพราะนอกจาก จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแล้ว ยังมีข้อดีด้านการเพิ่มความยืดหยุ่นและยังสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ ที่มีสีได้อีกด้วย แต่ซิลิกามีข้อด้อยคือความเป็นรูพรุนสูงทำให้เกิดการดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี และที่พื้นผิว ของซิลิกายังประกอบไปด้วยหมู่ของไฮลันอล (Silanol) ซึ่งส่งผลให้ซิลิกาจัดเป็นกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้การสะสมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerate) ในขณะที่พื้นผิวของยางเป็นแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ด้วยเหตุนี้ทำให้การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของซิลิกาและยางค่อนข้างไม่ดี การยึดเกาะ

ที่ไม่ดีนี้ส่งผลให้อนุภาคของซิลิกาและยางแยกออกจากกัน ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ปรับปรุงผิวของซิลิกาโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่าแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เกิดฟิล์มบางบนผิวของซิลิกาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างผิวของซิลิกาและยาง [2] - [5] เทคนิคที่เรียกว่าแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชันนี้ถูกแนะนำครั้งแรกโดย Wu, J. H. et al. [2] ในปี ค.ศ. 1987 เทคนิคนี้ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการดูดซับของแอตโมเซลล์บนผิวซิลิกา ขั้นตอนการละลายของไอโซพรีนมอนอเมอร์ในแอตโมเซลล์ ขั้นตอนการเกิดฟิล์มพอลิไอโซพรีนภายในชั้นแอตโมเซลล์ และการล้างเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวชั้นนอกของแอตโมเซลล์ออก ทำให้ชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ปรากฏขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1

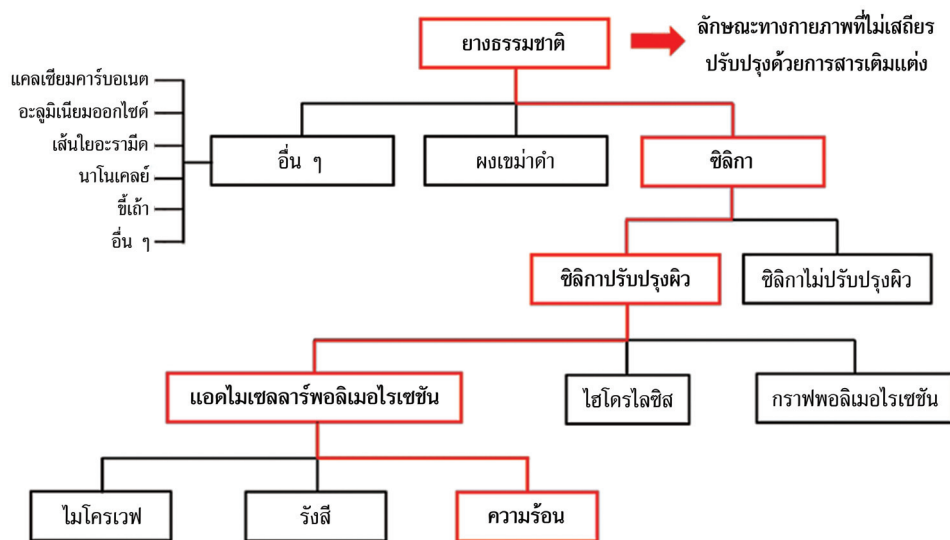


รูปที่ 1 การปรับเปลี่ยนผิวของซิลิกาด้วยกระบวนการแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชัน

ในปี ค.ศ. 1996 Thammathadanukul, V. et al. [3] ได้ใช้เทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อปรับปรุงผิวซิลิกาพร้อมกับวิเคราะห์สมบัติทางกลของยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวโดยการเปรียบเทียบยางเสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่ใช้ Organosilane Coupling Agent ต่างชนิดกัน คือ Styrene-Butadiene และ Styrene-Isoprene Copolymers ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการปรับปรุงผิวของซิลิกาทั้ง 2 ชนิด ให้อัตราการคงรูปของยาง สมบัติการทนต่อแรงดึง ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ค่าความต้านทานการสึกกร่อน และการกอดยึดที่ดีขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 2005 Nontasorn, P. et al. [4] ได้พัฒนาถึงทำปฏิกิริยาแบบกวนต่อเนื่อง Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) สำหรับการปรับปรุง Amorphous Silica ด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชันสำหรับการใช้กับยาง ซึ่งจากการเปรียบเทียบระบบกวนแบบต่อเนื่องนี้ สามารถผลิตซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวและทำให้ยางมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการแบบแบทช์ (Batch) เนื่องจากซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวจากกระบวนการ CSTR มีคุณสมบัติที่เสถียรมากกว่า ในภายหลังได้มีกลุ่มนักวิจัยทำการศึกษาการใช้รังสีเป็นตัวเหนี่ยวนำกระบวนการได้เป็นผลสำเร็จ ซึ่งเป็นทางเลือกที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ความร้อนแบบเดิม โดยการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่ Poly (Diethyl Fumarate) to Poly (Methyl Methacrylate) [6] - [11] ในปี ค.ศ. 2010 Yooprasert, N. et al. [12] ทำการเปรียบเทียบการยึดเกาะไอโซพรีนบนผิวของซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชันที่เหนี่ยวนำด้วยรังสีกับระบบความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชันที่เหนี่ยวนำด้วยรังสีที่ลดส่วนค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบนผิวซิลิกาที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับระบบความร้อน ในปี ค.ศ. 2012 Pongprayoon, T. et al. [11] ทำการศึกษาการใช้ซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชันที่เหนี่ยวนำด้วยรังสีเป็นสารเติมแต่งสำหรับยางธรรมชาติ และเปรียบเทียบผลของสมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิวและซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วย Si69 จากผลการศึกษาพบว่าค่าสมบัติทางกลของยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัลในทุค่า เมื่อเทียบกับซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว หรือซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วย Si69 สำหรับซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัลที่ใช้สารลดแรงตึงผิว Cetyltrimethyl Ammonium Bromide (CTAB) จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อเทียบกับ Dodecyltrimethyl Ammonium Bromide (DTAB) และ Tetradecyltrimethyl Ammonium Bromide (TTAB) ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 Falek, A. [13] ทำการศึกษาและปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัล เพื่อใช้ผสมเป็นตัวเติมเสริมแรงในสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ล้อยางในรถจักรยานและรถจักรยานยนต์ จากผลการทดสอบพบว่า ยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัลที่อัตราส่วน 30 phr ให้ค่าสมบัติเชิงกลของยางดีกว่า เมื่อเทียบกับยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว และผงเขม่าดำ

เทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัลถูกใช้เพื่อปรับปรุงผิวซิลิกาสำหรับใช้เป็นสารเสริมแรง ในยางกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งนับว่าเป็นเทคนิคการปรับปรุงผิวซิลิกาที่มีประสิทธิภาพ โดยพบว่า ค่าสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัลในทุค่า หากพิจารณาวิวัฒนาการของการปรับปรุงคุณภาพยางธรรมชาติและประเด็นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงการจัดแบ่งประเภทปัญหา (Classification Problem Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการจัดแบ่งประเภทปัญหา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อขยายผลจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น โดยการใช้ซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัลโดยใช้ความร้อนเป็นสารเติมแต่งสำหรับยางธรรมชาติ และทำการศึกษาสมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรง โดยผลของสมบัติทางกลในยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอออนไดคัล จะถูกเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยผงเขม่าดำและซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้เป็นสูตรเคมีสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ล้อยางใน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมีและอุปกรณ์

ยางธรรมชาติ (STR10-CV50) จาก Bangkok Rubber Co., Ltd. ประเทศไทย ผงเขม่าดำ (Carbon Black; N660) จาก Behn Meyer Specialty Chemical ประเทศมาเลเซีย ซิลิกา (Hi-Sil®255) จาก Tokuyama Siam Silica Co., Ltd. ประเทศไทย สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethyl Ammonium Bromide) $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}]$ หรือ CTAB (98 %) จาก Fluka สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

2. แอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชัน

นำสารลดแรงตึงผิวเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethyl Ammonium Bromide; CTAB) ปริมาณ 72.91 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 8 ลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จนสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 กวนสารละลายต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติมซิลิกอนไดออกไซด์ลงในสารละลาย 400 กรัม กวนสารละลายต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมเอทานอล 500.99 มิลลิลิตร โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 10.80 กรัม และไอโซพรีน 40 มิลลิลิตร โดยปริมาณของสารที่ใช้เป็นค่าที่เหมาะสม จากงานวิจัยการศึกษาผลของสัดส่วนในการเหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไรเซชันโดยใช้ความร้อน รายละเอียดของการศึกษาการเกิดฟิล์มอยู่ในงานวิจัยของคณะผู้วิจัย Yooprasert, N. et al. [12] ดังนั้นจะไม่ขออธิบายซ้ำ กวนสารละลายต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อครบกำหนดเวลานำตัวอย่างซิลิกาไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง เพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวที่เหลือและไอโซพรีนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกจนหมด หลังจากนั้นนำตัวอย่างซิลิกาที่ได้ไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ก่อนทำการศึกษาคูณลักษณะ

3. การเตรียมยาง การผสมและการทำให้ยางคงรูป

เตรียมยางธรรมชาติ (Natural Rubber; STR10-CV50) 300 กรัม ทำการนวดโดยใส่เข้าเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) จากบริษัท Yi Tzung Co., Ltd., ประเทศไต้หวัน เป็นเวลา 10 นาที นวดยางจนนุ่มแล้วใส่ส่วนผสมที่จะผสมตามสูตรยางที่กำหนดตามตารางที่ 1 อย่างช้า ๆ โดยเริ่มจากกรดสเตียริก (Stearic Acid) Bemox-L และสารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing Filler) ตามปริมาณที่กำหนดตามการออกแบบการทดลอง ตามลำดับ นวดยางต่อประมาณ 24 นาที จากนั้นเติม PEG4000 Okerrin CaCO_3 และ PVI ตามปริมาณที่กำหนด จากนั้นเติมตัวกระตุ้นการทำปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ ZnO_2 และตัวเร่งปฏิกิริยา Mercapto Benzothiazyl Disulfide (MBTS) ตามลำดับ นวดยางต่อประมาณ 7 นาที จากนั้นเติม Sulfur ซึ่งเป็นสารช่วยเร่งเวลาในการคงรูปของยางแล้วทำการนวดยางต่อให้ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 2 นาที จึงนำไปทดสอบการคงรูปของยางโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานกว้าง Moving Die Rheometer; MDR รุ่น M-3000A จากบริษัท Gotech Testing Machines inc. ประเทศไต้หวัน เพื่อหาระยะเวลาในการขึ้นรูปจากนั้นนำยางไปอัดขึ้นรูปด้วย Compression Molding รุ่น Wabach Genesis Press, Model G30H15GX ประเทศสหรัฐอเมริกาที่ 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส (ผงเขม่าดำ) และที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส (ซิลิกาและซิลิกาปรับปรุงผิว) ทั้งยางให้พักตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบสมบัติทางกล

ตารางที่ 1 สูตรปริมาณสารในการเตรียมผลิตภัณฑ์ยาง

ส่วนประกอบ (phr)	Natural Rubber	Stearic Acid	Bemox-L	Carbon black	Silica	Modified silica	Okerrin	CaCO ₃	PVI	PEG4000	ZnO ₂	MBTS	Sulphur
Carbon Black	100	2	1	20-50	-	-	1	25	0.25	1.5	5	0.75	1.8
Silica	100	2	1	-	20-50	-	1	25	0.25	1.5	5	0.75	1.8
Modified silica	100	2	1	-	-	20-50	1	25	0.25	1.5	5	0.75	1.8

4. ทดสอบสมบัติยาง

ความหนาของตัวอย่างจะถูกวัดโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น HFW960 ประเทศญี่ปุ่น การเตรียมตัวอย่างจะใช้ Cutting Board และ Machine ยี่ห้อ PVI รุ่น PS-01 Flexo Meter ประเทศสหรัฐอเมริกา ทดสอบค่าความหนืดมูนนี่โดยใช้ Mooney Viscometer; MV รุ่น MV-3000 จากบริษัท Gotech Testing Machines inc. ประเทศไต้หวัน การทดสอบสมบัติทางกลของยางจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น AI-7000S จากบริษัท Gotech Testing Machines inc. ประเทศไต้หวัน ที่ความเร็วทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบความแข็งของยางจะใช้เครื่อง Durometer แบบ Shore A จากบริษัท Taclock ประเทศญี่ปุ่น และการศึกษาการยึดเกาะระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติ จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบ Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) และระบบ Focus Ion Beam (Focus Ion Beam: FIB) จาก FEI (Model Helios Nanolab G3 CX)

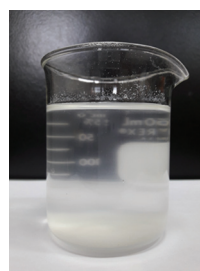
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบความไม่ชอบน้ำของซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิว

ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอตโมเซลล์าร์พอลิเมอไรเซชัน จะแสดงคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) จะทำการทดสอบโดยการนำผงซิลิกาและผงซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิว อย่างละ 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ (Beaker) ที่บรรจุน้ำสะอาด 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 นาที ผลการทดสอบพบว่า ผงซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวจะลอยอยู่บนผิวน้ำตลอดระยะเวลา 5 นาที ส่วนซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวจะจมลงสู่ก้นบีกเกอร์ทั้งหมดทันทีดังแสดงในรูปที่ 3



(ก) ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิว
ด้วยเทคนิค

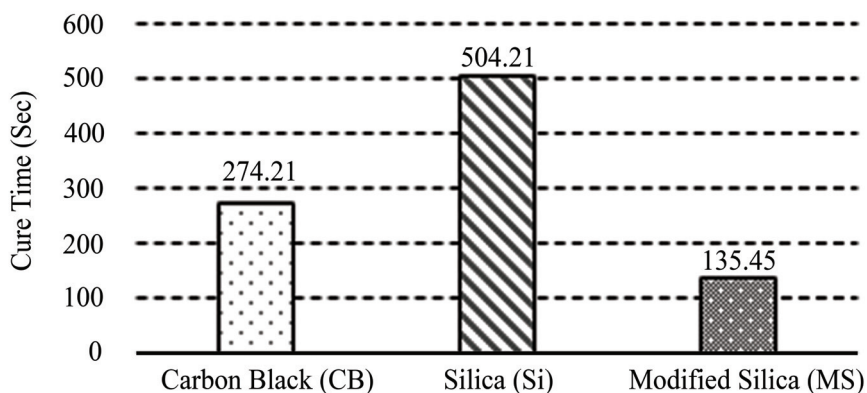


(ข) ซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว
แอตโมเซลล์าร์พอลิเมอไรเซชัน

รูปที่ 3 ผลการทดสอบความไม่ชอบน้ำของซิลิกา

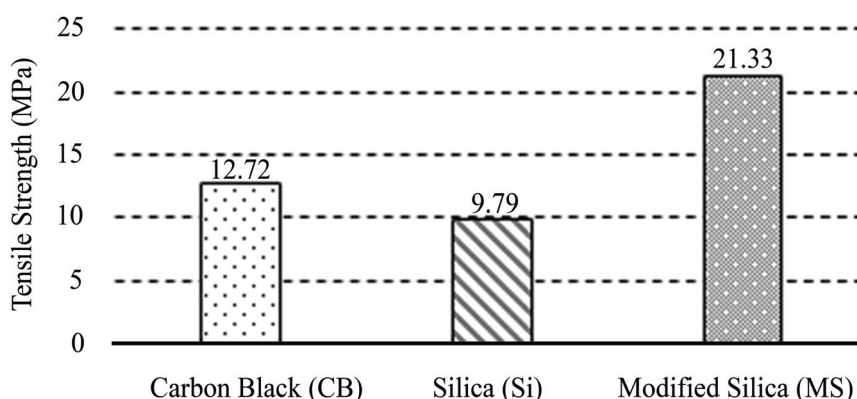
2. ผลทดสอบสมบัติทางกลของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยผงเขม่าดำ ซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว และซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮโดรโฟบิกที่อัตราส่วนผสมสารเสริมแรง 30 phr จะถูกทดสอบสมบัติทางกลจากงานวิจัยที่การศึกษาที่ผ่านมาของ Faklek, A. [13] ในปี ค.ศ. 2016 ที่ทำการศึกษาและปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮโดรโฟบิก เพื่อใช้ผสมเป็นตัวเติมเสริมแรงในสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์ล้อยางในรถจักรยานและรถจักรยานยนต์ จากผลการทดสอบพบว่ายางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮโดรโฟบิกที่อัตราส่วน 30 phr ให้ค่าสมบัติเชิงกลของยางดีกว่าผลการทดสอบสมบัติทางกลดังแสดงในรูปที่ 4 - 8



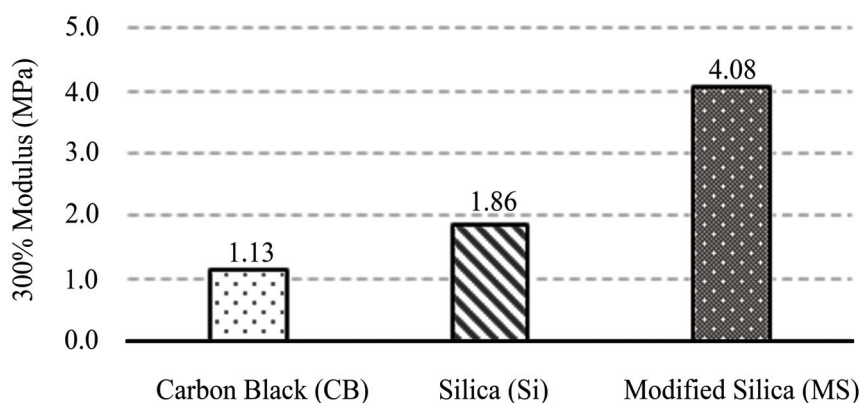
รูปที่ 4 ผลของเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติผสมสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮโดรโฟบิก ผลที่ได้คือ ระยะเวลาการคงรูปของยางที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยผงเขม่าดำ และซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว แสดงดังรูปที่ 4 จากผลนี้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติบางส่วนของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮโดรโฟบิกดีขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงผิวซิลิกาโดยการเคลือบด้วยฟิล์มพอลิไฮโดรโฟบิกซึ่งไปลดความเป็นกรดบนผิวซิลิกาได้ ทำให้เกิดการยับยั้งการวัลคาไนซ์และทำให้ใช้เวลาการคงรูปน้อยลงเช่นกัน จากงานวิจัยที่การศึกษาที่ผ่านมาของ Yooprasert, N. et al. [12] ในปี ค.ศ. 2010 ผลการวิจัยพบว่า ซิลิกาปรับปรุงผิวมีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่าซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว ซึ่งพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำนี้จะทำให้เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างผิวของยางธรรมชาติและซิลิกาปรับปรุงผิวได้ดีกว่าซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว นอกจากนี้การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ผลที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ จากภาพ SEM จะเห็นได้ว่าซิลิกาไม่ปรับปรุงผิวมีการกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติที่ไม่ดี แต่ทว่าซิลิกาปรับปรุงผิวจะมีการกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติได้ดีกว่า



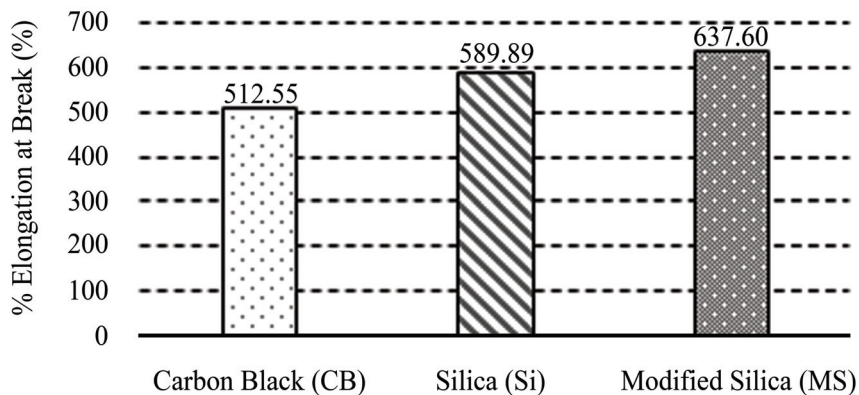
รูปที่ 5 ผลของค่าความต้านทานต่อการดึงของยางธรรมชาติผสมสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ชัดเจนว่ายางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค แอดไมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไฮดรอกซีมีค่าความต้านทานต่อการดึงที่สูงกว่ายางธรรมชาติเสริมแรงด้วยผงเขม่าดำ และซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว เนื่องจากซิลิกาที่ปรับปรุงผิวจะถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มพอลิไฮดรอกซีพรีนส่งผลให้การยึดเกาะกับเนื้อยางธรรมชาติที่ดีกว่า ดังนั้นการเสริมแรงด้วยซิลิกาที่ปรับปรุงผิวจึงสามารถทำให้ค่าความต้านทานต่อการดึงของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นได้



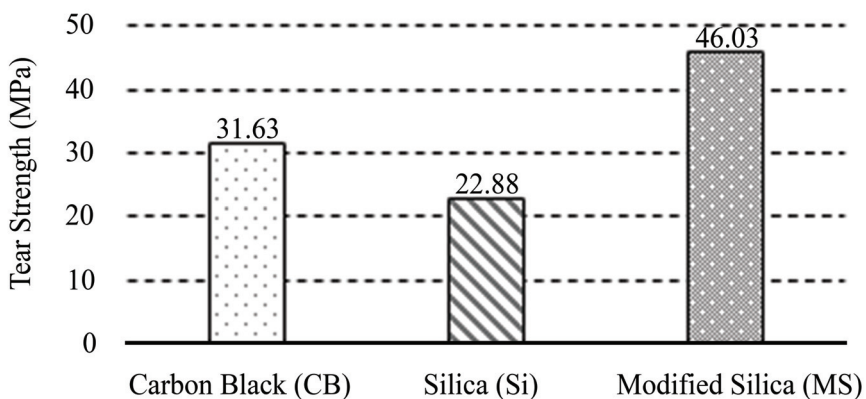
รูปที่ 6 ผลของค่า 300 % Modulus ของยางธรรมชาติผสมสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 6 บ่งชี้ว่าจะต้องใช้แรงดึงยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยผงเขม่าดำและซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว ซึ่งจะต้องใช้แรงที่สูงกว่าเพื่อดึงตัวอย่างให้ยืดมากขึ้นที่ 300 % จากความยาวเดิม ซึ่งเป็นการยืนยันอีกครั้งถึงการปรับปรุงสมบัติทางกลของยางธรรมชาติให้มีความแข็งแรงขึ้นด้วยซิลิกาปรับปรุงพื้นผิว



รูปที่ 7 ผลของค่าระยะยืดจนกระทั่งขาดของยางธรรมชาติผสมสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

ผลของการทดสอบระยะยืดจนกระทั่งขาดแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าระยะยืดจนกระทั่งขาดของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิว ยังมีค่าที่สูงกว่ายางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว ซึ่งมีสาเหตุมาจากการยึดเกาะพื้นผิวระหว่างซิลิกาที่ปรับปรุงผิวและยางธรรมชาติที่ดีกว่า และความสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับยางธรรมชาติค่อนข้างต่ำของซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิวนี้นำมาซึ่งโอกาสที่จะแยกตัวจากเนื้อยางได้ การเกิดช่องว่างระหว่างพื้นผิวของการยึดเกาะนี้เป็นผลให้ระยะยืดจนกระทั่งขาดของยางไม่ดี



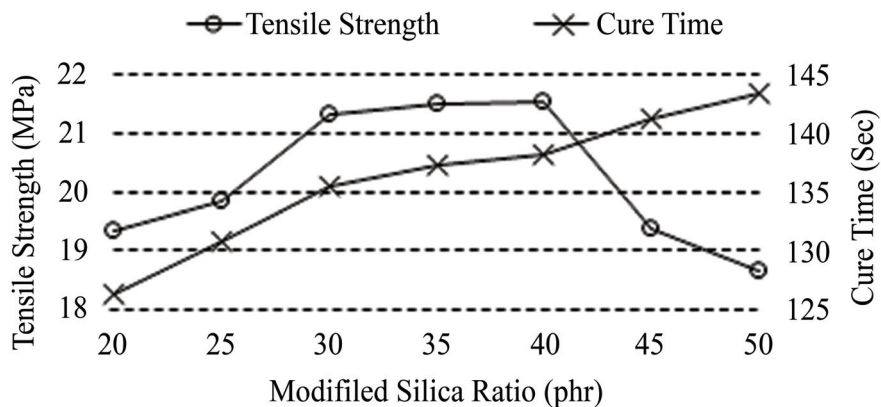
รูปที่ 8 ผลของค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติผสมสารเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

ผลของการทดสอบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด แสดงดังรูปที่ 8 พบว่ายางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่สูงกว่ายางธรรมชาติเสริมแรงด้วยผงเขม่าดำและซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว จากผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเป็นการยืนยันถึงการปรับปรุงสมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่ดีขึ้น

3. ผลทดสอบสมบัติทางกลของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่อัตราส่วนต่าง ๆ

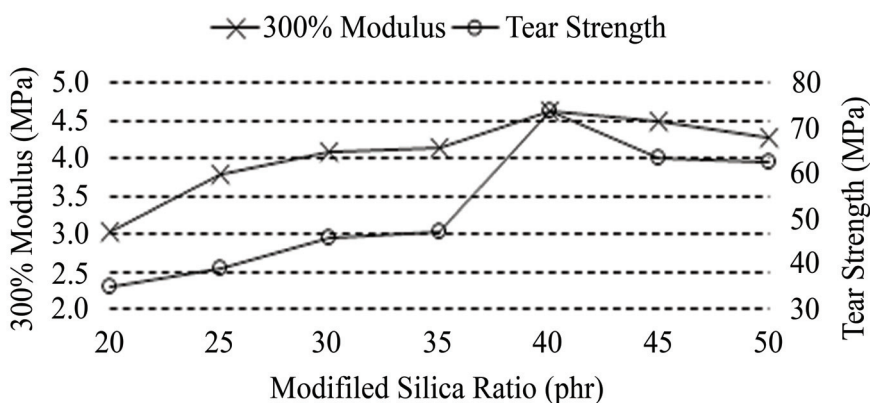
การวิเคราะห์สมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่อัตราส่วนต่าง ๆ (20 - 50 phr) ดังผลที่ได้ในรูปที่ 9 - 11 จากรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการคงรูป

ของยางที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณซิลิกา ค่าจากกราฟนี้มาจากความจริงที่ว่าผิวของซิลิกาประกอบไปด้วย กลุ่มของซิลานอล (Silanol) ซึ่งสามารถดูดซับสารตั้งต้นทำปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้ทำให้การคงรูปของยางธรรมชาติใช้เวลานานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9



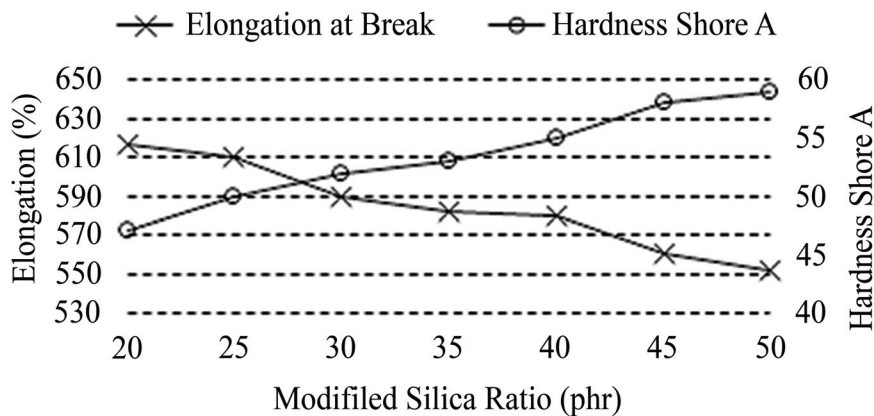
รูปที่ 9 ผลของเวลาการคงรูปของยางและค่าความต้านทานต่อการดึงของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่อัตราส่วนซิลิกาต่าง ๆ

ในช่วงแรกสมบัติการทนต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณซิลิกา เนื่องจากซิลิกาที่ปรับปรุงผิวจะถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มพอลิไอโซพรีนส่งผลให้การยึดเกาะกับเนื้อยางธรรมชาติที่ดีขึ้น แต่หลังจากที่ 40 phr ของสัดส่วนซิลิกาค่าจะค่อย ๆ ลดลง สามารถอธิบายได้ว่าการยึดเกาะระหว่างซิลิกาปรับปรุงผิวกับพื้นผิวของยางไม่ดีเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่ซิลิกาปรับปรุงผิวจะแยกออกจากพื้นผิวของยางได้โดยง่าย



รูปที่ 10 ผลของค่า 300 % Modulus และความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่อัตราส่วนซิลิกาต่าง ๆ

จากรูปที่ 10 แสดงผลของค่า 300 % Modulus และความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นด้วยเหมือนกัน แต่หลังจากที่ 40 phr ของสัดส่วนซิลิกา ค่าจะค่อย ๆ ลดลงซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความต้านทานต่อการดึง



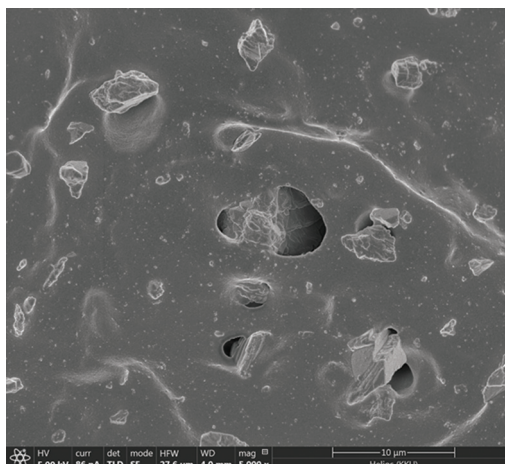
รูปที่ 11 ผลของระยะยืดจนกระทั่งขาดและค่าความแข็ง (Hardness Shore A) ของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวที่สัดส่วนซิลิกาต่าง ๆ

ในทางตรงกันข้ามรูปที่ 11 แสดงให้เห็นผลของระยะยืดจนกระทั่งขาด (Elongation at Break) ที่ลดลงตามอัตราส่วนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างซิลิกาปรับปรุงผิวกับพื้นผิวของยางไม่ดี เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นและค่าความแข็ง (Hardness Shore A) ที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับซิลิกาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลการศึกษานี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Pongprayoon, T. et al. [11] ในปี ค.ศ. 2012 ที่ทำการศึกษาการใช้ซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮเซชันที่เหนียวน่าด้วยรังสีเป็นสารเติมแต่งสำหรับยางธรรมชาติพบว่า ค่าสมบัติทางกลของยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาไม่ปรับปรุงผิวที่อัตราส่วน 40 phr ต่ำกว่าในทุกค่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกำหนดสัดส่วนซิลิกาที่ 40 phr ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว

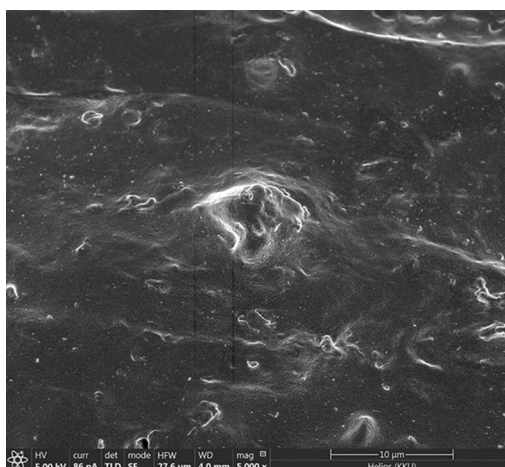
ดังนั้นจากงานวิจัยนี้อัตราส่วนซิลิกาปรับปรุงผิวที่ 40 phr จึงถือว่าเป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดสำหรับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวสำหรับนำไปใช้เป็นสูตรเคมีสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ล้อภายใน

4. การศึกษาการเกาะติดระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของยางธรรมชาติและซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮเซชัน จะวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะแสดงภาพระดับจุลภาคของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว และซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคโมเซลลาร์พอลิเมอร์ไฮเซชัน ก่อนและหลังทดสอบสมบัติทางกลที่อัตราส่วนซิลิกา 40 phr และที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 12 และ 13



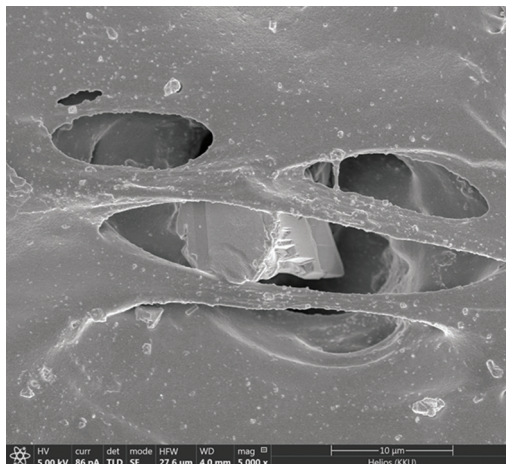
(ก) ซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว



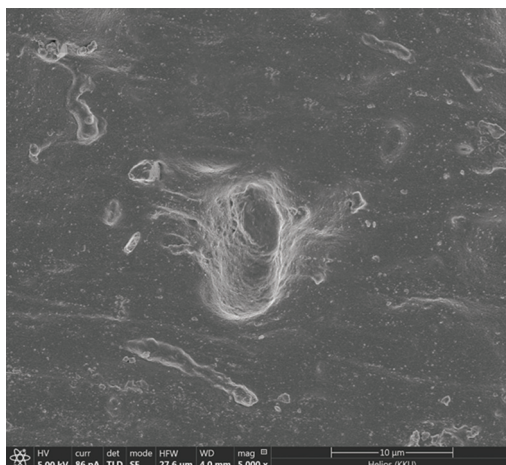
(ข) ซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลล์ลาร์พอลิเมอร์ไฮดรอกไซด์

รูปที่ 12 ภาพระดับจุลภาคของยางธรรมชาติ (ก่อนทดสอบสมบัติทางกล) เสริมแรงด้วย

จากรูปที่ 12(ก) แสดงให้เห็นถึงช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของยางธรรมชาติและซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว สามารถอธิบายได้จากพื้นผิวของซิลิกาไม่ปรับปรุงผิวมีความเป็นขรุขระ หรือเป็นแบบขรุขระ ขณะที่พื้นผิวของยางธรรมชาติไม่มีความเป็นขรุขระหรือเป็นแบบไม่ขรุขระ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างกันไม่ดี ในทางตรงกันข้ามยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลล์ลาร์พอลิเมอร์ไฮดรอกไซด์รูปที่ 12(ข) ไม่ปรากฏช่องว่างระหว่างพื้นผิวของยางธรรมชาติและซิลิกาปรับปรุงผิว อันเนื่องมาจากซิลิกาจะถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มพอลิไฮดรอกไซด์ ดังนั้นการยึดเกาะของซิลิกาปรับปรุงผิวกับยางธรรมชาติจึงเกาะกันได้ดีกว่าซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว



(ก) ซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว



(ข) ซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไอเซน

รูปที่ 13 ภาพระดับจุลภาคของยางธรรมชาติ (หลังทดสอบสมบัติทางกล) เสริมแรงด้วย

หลังการทดสอบสมบัติทางกลจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะแสดงภาพระดับจุลภาคของตัวอย่างทดสอบเพื่อวิเคราะห์พื้นผิวหลังถูกแรงกระทำแสดงดังรูปที่ 13 รูปที่ 13(ก) เห็นได้ชัดเจนว่าเกิดการแยกออกจากกันของซิลิกากับเนื้อยาง แต่ที่รูปที่ 13(ข) ยังคงยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคซิลิกากับเนื้อยางภายหลังการทดสอบสมบัติทางกล จากภาพนี้จึงเป็นการยืนยันผลที่ชัดเจนว่าการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาปรับปรุงผิวถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้จากการปรับปรุงผิวของซิลิกาด้วยเทคนิคแอคไมเซลล์าร์พอลิเมอร์ไอเซน

สรุปผล

ซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอโซพรีนถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ ซึ่งจะวิเคราะห์สมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอโซพรีนและเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยผงเขม่าดำและซิลิกาไม่ปรับปรุงผิว จากผลการทดสอบพบว่าค่าสมบัติทางกลของยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอโซพรีนดีกว่าในทุกค่า เมื่อเทียบกับผงเขม่าดำหรือซิลิกาที่ไม่ปรับปรุงผิว สำหรับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคแอคไมเซลลาร์พอลิเมอร์ไอโซพรีนที่อัตราส่วนผสม 40 phr (Parts Per Hundred of Rubber) โดยผ่านการอัดขึ้นรูปที่ 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที จะให้ประสิทธิภาพทางกลที่ดีและเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้เป็นสูตรเคมีสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ล้อยางใน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณการสนับสนุนทางการเงินจากกลุ่มวิจัยระบบโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย และได้รับความอนุเคราะห์สารเคมี และอุปกรณ์รวมถึงเครื่องทดสอบยางจากบริษัท บางกอกพัฒนามอเตอร์ จำกัด

References

- [1] Rubber Research Institute Department of Agriculture. (2016). **Statistical of the Thai Rubber Association Database**. Access (2 February 2017). Available (<http://www.thainr.com/uploadfile/20160215163746.pdf>)
- [2] Wu, J. H., Harwell, J. H., and O'Rear, E. A. (1987). Two-Dimensional Solvents: Kinetics of Styrene Polymerization in Admicelles at or Near Saturation. **The Journal of Physical Chemical**. Vol. 91, No. 3, pp. 623-634. DOI: 10.1021/j100287a027
- [3] Thammathadanukul, V., O'Haver, J. H., Harwell, J. H., Osuwan, S., Na-Ranong, N., and Waddell, W. H. (1996). Comparison of Rubber Reinforcement Using Various Surface Modified Silica. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 59, No. 11, pp. 1741-1750
- [4] Nontasorn, P., Chavadej, S., Rangsunvigit, P., O'Haver, J. H., Chaisirimahamorakot, S., and Na-Ranong, N. (2005). Admicellar Polymerization Modified Silica Via a Continuous Stirred Tank Reactor System: Comparative Properties of Rubber Compounding. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 108, pp. 213-218. DOI: 10.1016/j.cej.2005.02.016
- [5] Kitiyanan, B., O'Haver, J. H., Harwell, J. H., and Osuwan, S. (1996). Adsolubilization of Styrene and Isoprene Into Cetyltrimethyl Ammonium Bromide Admicelle on Precipitated Silica. **Langmuir**. Vol. 12, pp. 2162-2168

- [6] Alkassiri, H. (2005). Radiation Polymerization of Diethyl Fumarate. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 73, Issue 1, pp. 61-63
- [7] Cataldo, F., Ursini, O., and Lilla, E. J. (2008a). Radiation Induced Polymerization of Isoprene: A Spectroscopic Study. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**. Vol. 275, Issue 1, pp. 9-16. DOI: 10.1007/s10967-006-6981-2
- [8] Cataldo, F., Ursini, O., Lillb, E., and Angelinib, G. (2008b). Radiation Induced Polymerization and Grafting of β (-)pinene on Silica Surface. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 77, Issue 5, pp. 561-570. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2007.09.003
- [9] Hayakawa, K., Kawase, K., and Matsuda, T. (1965). Gamma-Ray-Induced Polymerization of Some Vinyltin Compounds. **Nature**. Vol. 206, pp. 1038-1039. DOI: 10.1038/2061038b0
- [10] Yaodong, L., Guozhong, W., Dewu, L., Mingying, Q., and Zhiyong, Z. (2005). ^{60}Co γ -Irradiation Initiated Polymerization in Ionic Liquids the Effect of Carbon Chain Length of Monomer. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B**. Vol. 236, Issue 1-4, pp. 443-448. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.04.017
- [11] Pongprayoon, T., Yooprasert, N., Suwanmala, P., and Hemvichian, K. (2012). Rubber Products Prepared from Silica Modified by Radiation Induced Admicellar Polymerization. **Radiation Physics and Chemistry Journal**. Vol. 81, pp. 541-546. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2012.01.034
- [12] Yooprasert, N., Pongprayoon, T., Suwanmala, P., Hemvichian, K., and Tumcharern, G. (2010). Radiation Induced Admicellar Polymerization of Isoprene on Silica: Effects of Surfactant's Chain Length. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 156, Issue 1, pp. 193-199. DOI: 10.1016/j.cej.2009.10.022
- [13] Faklek, A. (2016). **Development of Commercial Bicycle and Motorcycle Inner Tube Using Surface-Modified Silica**. Thesis Master Degree of Engineering. Chemical Engineering. Faculty of Engineering. King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีแผ่นบางรูปตัวไชน์

Experimental Study of Enhanced Heat Transfer in a Circular Tube Heat Exchanger with Sinusoidal Baffles

สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์^{1*} เอกวุฒิ แส่นคำวงษ์¹ และชาญวิทย์ ชัยอมฤต¹

Supattarachai Suwannapan^{1*} Eakkawut Saenkhawong¹ and Chanwit Chaiamarit¹

Received: March 19, 2019; Revised: May 14, 2019; Accepted: May 15, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาเชิงทดลองของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการสอดใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบแผ่นบางรูปตัวไชน์ที่สภาวะพลศาสตร์ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยในการทดลองจะมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแผ่นบางรูปตัวไชน์ คือ อัตราส่วนระยะพิช (p/D = PR = 2.3 และ 4) และอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล (e/D = AR = 0.1 0.2 0.3 และ 0.4) ที่มีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน ในการศึกษาจะมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อทดสอบซึ่งจะแสดงในรูปของตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) อยู่ในช่วงระหว่าง 4,500 - 29,200 ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน(f) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไชน์ทุกกรณีจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นจากท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วงระหว่าง 52 - 84 % และ 81 - 99 % ตามลำดับ ในกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า PR = 2 และ AR = 0.4 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงสุดซึ่งจะให้ค่า Nu/Nu₀ และ f/f₀ มีค่าเท่ากับ 6.0 - 6.5 เท่า และ 82.7 - 95.1 เท่า ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่มีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า PR = 2 และ AR = 0.2 จะให้ค่าตัวประกอบ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุด จะให้ค่า η มีค่าเท่ากับ 1.71 ที่ Re = 4,500

คำสำคัญ : แผ่นบางรูปตัวไชน์; อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน; การถ่ายเทความร้อน; ตัวประกอบเสียดทาน; ตัวสร้างการหมุนควง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

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

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

Abstract

This research presents experimental study on heat transfer enhancement in a constant heat flux tube inserted with sinusoidal baffle vortex generator. Several sinusoidal baffle parameters were introduced such as pitch ratio ($p/D = PR = 2, 3, \text{ and } 4$) and blockage ratio ($e/D = AR = 0.1, 0.2, 0.3, \text{ and } 0.4$). Various relative baffle heights and pitches were tested to investigate the effect of the sinusoidal baffles at on heat transfer and pressure loss. The study was conducted by varying the airflow rate through the tested tube for Reynolds number (Re) from 4,500 - 29,200. Heat transfer and pressure loss were presented in terms of Nusselt number (Nu) and friction factor (f) respectively. The results have shown that the tube with sinusoidal baffle provides a considerable increase in heat transfer and pressure loss in comparison with the smooth tube in the range of 52 - 84 % and 81 - 99 % respectively. The highest Nu/Nu_0 and f/f_0 were observed at $PR = 0.2$ and $AR = 0.4$ in the range of 6.0 - 6.5 times and 82.7 - 95.1 times respectively, whereas the maximum thermal enhancement factor (η) was at $PR = 0.2$ and $AR = 0.2$ of about 1.71 at $Re = 4,500$.

Keywords: Sinusoidal Baffle; Heat Exchanger; Heat Transfer; Friction Factor; Vortex Generator

บทนำ

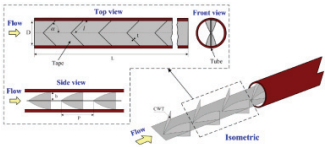
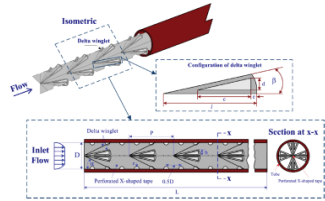
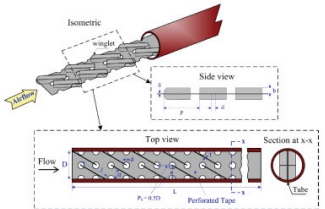
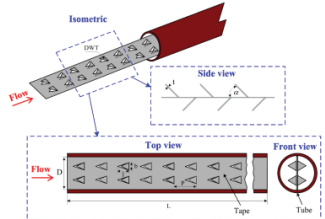
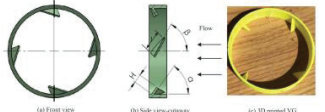
ปัจจุบันอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ รวมทั้งใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป เพราะฉะนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงได้รับการปรับปรุงและพัฒนาให้มีความมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นเรื่อยๆ สำหรับในทางวิศวกรรมแล้วการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้ได้สภาวะสูงสุดตามที่ต้องการยังเป็นเรื่องที่ท้าทาย หนึ่งในเทคนิคที่ใช้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับความนิยมอย่างมาก คือ เทคนิคนี้เรียกว่า passive วิธีการของเทคนิคนี้จะเป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างไปจากผิวเรียบเพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นโดยไม่ใช้พลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่างเช่น การเคลือบผิว การทำให้ผิวขรุขระ การยัดผิว การใส่อุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น วิธีการใส่อุปกรณ์เข้าไปภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอีกหนึ่งวิธีของเทคนิค passive ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางสำหรับนักวิจัยต่าง ๆ วัตถุประสงค์ของการใส่อุปกรณ์ก็เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนวน (Turbulator/Vortex Generator) ขึ้นภายในท่อเพื่อไปขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal Boundary Layer) ที่บริเวณผนังท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ของไหลอุณหภูมิสูงที่บริเวณผนังท่อสามารถถ่ายเทมาผสมกับอุณหภูมิของไหลที่เย็นกว่าภายในท่อได้ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในท่อให้ดีขึ้นตามไปด้วย อุปกรณ์ที่นิยมใส่เข้าไปภายในท่อมีอยู่หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ครีบ แผ่นบาง ปีก (Fin, Rib, Baffle, Winglet) ไบบิด (Twisted Tape) ขดลวด (Wire Coil) เป็นต้น แนวคิดในการนำเอาตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนวน

มาติดตั้งภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีคือช่วยในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ก็มีข้อพิจารณาอยู่เช่นเดียวกันคือทำให้เกิดการสูญเสียความดันและความเสียหายเพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นในการออกแบบตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนควงที่จะใส่เข้าไปภายในท่อจึงต้องพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ หลายตัว เช่น รูปร่าง ขนาด ความสูง มุม และระยะห่าง เป็นต้น เพราะว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนแต่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันทั้งสิ้น

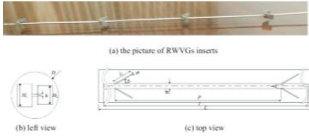
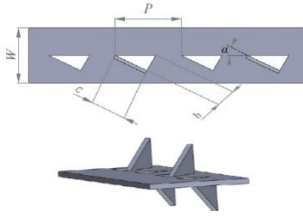
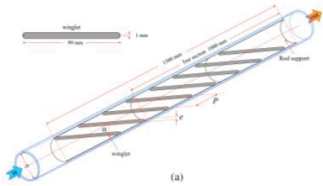
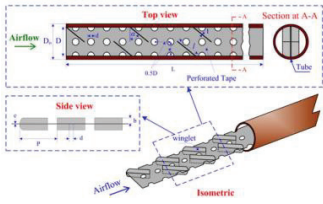
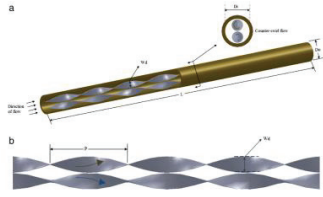
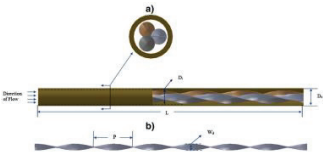
หลายปีที่ผ่านมานี้มีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อด้วยวิธีการใส่อุปกรณ์เข้าไปภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ กล่าวคือ [1] - [4] ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่ปีก (Winglet) ลักษณะรูปร่างต่าง ๆ คือ Curved-Winglet Tape, Quadruple Perforated-Delta-Winglet Pairs, Staggered-Winglet Perforated-Tape และ Delta-Wing Tape เข้าไปภายในท่อเพื่อช่วยสร้างการหมุนควงตามแนวยาว โดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น มุมปะทะการไหล ระยะพิทช์ และความสูง เป็นต้น จากการศึกษพบว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่ปีกแบบต่าง ๆ สามารถช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ [5] ได้นำเสนอผลจากการศึกษาสมรรถนะความร้อนและพฤติกรรมของการไหลภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Delta Winglet โดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น มุมปะทะการไหล ระยะพิทช์ ความสูง และจำนวนแถว เป็นต้น และรายงานว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลและความสูงของปีกเพิ่มขึ้นในขณะที่ระยะพิทช์มีค่าลดลง [6] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขเกี่ยวกับคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Rectangular Winglet และพบว่าการใส่ตัวสร้างการหมุนควงจะช่วยให้ค่าของไหลอุณหภูมิค่าที่แกนกลางของท่อผสมได้ดีกับของไหลอุณหภูมิสูงที่ผนังของท่อส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในท่อได้ดีขึ้น [7] ได้นำเสนอผลการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของการไหลภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Punched Delta Winglet ที่มีการปรับเปลี่ยนมุมปะทะ [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนด้วยการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบปีก และพบว่าท่อที่มีการใส่ปีกจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีว่าท่อที่มีการใส่ใบบิดและขดลวด [9] ได้นำเสนอผลของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Zigzag-Winglet Perforated-Tape และได้รายงานว่าการถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความสูงและระยะพิทช์ของตัวสร้างการหมุนควง [10] - [11] ได้ศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ใบบิดแบบ Double Counter Twisted Tape และ Triple Twisted Tape โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการบิดและได้รายงานว่าการใส่ใบบิดสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อเปล่าผนังเรียบและค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการบิดมีค่าลดลง [12] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อด้วยการใส่ใบบิดหลากหลายรูปแบบและได้รายงานว่าการใส่ใบบิดแบบ Multiple Twisted-Tape จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบ Single Twisted-Tape [13] - [14] ได้นำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ใบบิด โดยใบบิดที่ใส่เข้าไปจะถูกประยุกต์เป็นแบบ Perforated Helical Twisted-Tapes และ Helically Twisted Tapes จากการศึกษาพบว่าใบบิดที่ได้รับการประยุกต์ทั้งสองแบบสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผนังเรียบ นอกจากนี้ [15] ได้นำเสนอศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อโดยการใส่ขดลวดที่ได้รับการ

ปรับปรุงใหม่ รวมไปถึง [16] - [18] ที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อโดยการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Inclined Vortex Ring, Circular-Rings and Twisted Tapes และ Twisted-Ring ตามลำดับ [19] ได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษารูปแบบการไหลและหาค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่แผ่นบางรูปตัวไจ จากการศึกษาพบว่าแผ่นบางรูปตัวไจจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของของไหลภายในท่อทำให้สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ ผลจากการศึกษาของนักวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

ชื่อนักวิจัย	ลักษณะรูปทรง	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Skullong, S. et al. [1]		$Re = 4,150 - 25,400$ $PR = 0.5, 1.0, 2.0$ $BR = 0.1, 0.2, 0.3$ $\alpha = 45^\circ$	$Nu/Nu_0 = 3.4 - 4.8$ $f/f_0 = 2.06 - 35.68$ $\eta = 1.22 - 1.75$
Skullong, S. et al. [2]		$Re = 4,180 - 26,000$ $PR = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ $BR = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ $A_p/A_w = 0.359$ $\alpha = 30^\circ$	$Nu/Nu_0 = 2.0 - 5.06$ $f/f_0 = 2.06 - 35.68$ $\eta = 1.42 - 1.91$
Skullong, S. et al. [3]		$Re = 4,180 - 26,000$ $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ $BR = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ $\alpha = 30^\circ$	$Nu/Nu_0 = 2.4 - 4.77$ $f/f_0 = 5.0 - 42.9$ $\eta = 1.34 - 1.71$
Skullong, S. et al. [4]		$Re = 4,200 - 25,500$ $P/D = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ $b/D = 2$ $l/D = 0.4$ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	$Nu/Nu_0 = 2.4 - 5.1$ $f/f_0 = 7.5 - 79.1$ $\eta = 1.04 - 1.49$
Xu, Y. et al. [5]		$Re = 6,000 - 33,000$ $B = 0.1, 0.2, 0.3$ $PR = 4.8, 2.4, 1.6$ $N = 4, 8, 12$ $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$	$Nu/Nu_{0,max} = 2$ $f/f_{0,max} = 4.8$ $\eta_{max} = 1.45$

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา (ต่อ)

ชื่อนักวิจัย	ลักษณะรูปทรง	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Liu, H. L. et al. [6]		$Re = 5,000 - 17,000$ $H1/D = 0.5$ $H2/D = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ$	$Nu/Nu_0 = 1.16 - 2.49$ $f/f_0 = 2.09 - 12.32$ $\eta = 0.82 - 1.18$
Wijayanta, A. T. et al. [7]		$Re = 5,500 - 14,500$ $R_p = 1.05$ $R_B = 0.42$ $\alpha = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$	$Nu = 40 - 330$ $f = 0.1 - 0.51$ $\eta = 0.88 - 1.22$
Chokphoemphun, S. et al. [8]		$Re = 5,300 - 24,000$ $P/D = 0.5, 1, 1.5, 2$ $e/D = 0.1, 0.15, 0.2$ $\alpha = 30^\circ$	$Nu/Nu_0 = 2.03 - 2.34$ $f/f_0 = 2.07 - 5.63$ $\eta = 1.35 - 1.59$
Suwannapan, S. et al. [9]		$Re = 4,200 - 26,000$ $b/D = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ $P/D = 1.0, 1.5$ $\alpha = 45^\circ$	$Nu/Nu_0 = 3.1 - 5.1$ $f/f_0 = 12.5 - 53.6$ $\eta_{max} = 1.59$
Bhuiya, M. M. K. et al. [10]		$Re = 6,950 - 50,050$ $y = 1.95, 3.85, 5.92, 7.75$	$Nu_p/Nu_s = 1.55 - 3.45$ $f_p/f_s = 1.8 - 3.9$ $\eta_{max} = 1.34$
Bhuiya, M. M. K. et al. [11]		$Re = 7,200 - 50,200$ $y = 1.92, 2.88, 4.81, 6.79$	$Nu_p/Nu_s = 1.75 - 3.85$ $f_p/f_s = 1.8 - 4.2$ $\eta_{max} = 144$

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา (ต่อ)

ชื่อนักวิจัย	ลักษณะรูปทรง	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Chokphoemphun, S. et al. [12]		$Re = 5,300 - 24,000$ $y/w = 4, 5$	$Nu/Nu_0 = 1.15 - 2.12$ $f/f_0 = 1.98 - 4.06$ $\eta = 0.92 - 1.33$
Nanan, K. et al. [13]		$Re = 6,000 - 20,000$ $d/w = 0.2, 0.4, 0.6$ $s/w = 1.0, 1.5, 2.0$ $P/D = 2$ $y/w = 3$	P-TT: $Nu_t/Nu_p = 1.6 - 2.07$ $f_p/f_s = 4.1 - 4.35$ P-HTT: $Nu_p/Nu_s = 1.5 - 2.04$ $f_p/f_s = 3.4 - 4.2$ $\eta_{max} = 1.28$
Nanan, K. et al. [14]		$Re = 6,000 - 20,000$ $w/D = 0.2$ $p/D = 1, 1.5, 2$ $y/w = 3$	C-HTT: $Nu_t/Nu_p = 2.5 - 3.3$ $f_p/f_s = 12 - 37$ Co-HTT: $Nu_p/Nu_s = 1.7 - 2.3$ $f_p/f_s = 4 - 12$ $\eta_{max} = 1.29$
Hong, Y. et al. [15]		$Re = 6,000 - 20,000$ WCS-UP: $p/d = 0.172 - 1.034$ WCS-VP: $p/d = 0.172 - 0.690$ WCS-GVW: $w/d = 0.552 - 0.897 - 0.552$	Nu/Nu_0 : WCS-UP = 1.46 - 2.49 WCS-VP = 1.75 - 2.30 WCS-GVW = 2.2 - 2.3 f/f_0 : WCS-UP = 8.36 - 17.8 WCS-VP = 0.49 - 18.3 WCS-GVW = 16 - 18.6 $\eta = 0.69 - 1.14$
Promvongse, P. et al. [16]		$Re = 5,000 - 26,000$ $b/D = 0.1, 0.15, 0.2$ $P/D = 0.5, 1, 1.5, 2$ $\alpha = 30^\circ$	$Nu/Nu_0 = 1.91 - 4.35$ $f/f_0 = 4.9 - 36.5$ $\eta_{max} = 1.4$

โดยที่

U คือ ความเร็วเฉลี่ย

v คือ ความหนาแน่นเชิงจลน์ของอากาศ

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่อากาศได้รับ (Q_{air}) และการพาความร้อน (Q_{conv})
(สมการที่ (2))

$$Q_{air} = Q_{conv}; \quad \dot{m}C_p(T_o - T_i) = hA(\tilde{T}_s - T_b) \quad (2)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) หาค่าได้จากสมการที่ (3)

$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A(\tilde{T}_s - T_b)} \quad (3)$$

เมื่อ $T_b = (T_o + T_i)/2$ และ $\tilde{T}_s = \sum T_s / 30$

โดยที่

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ

T_o คือ อุณหภูมิทางออก

T_i คือ อุณหภูมิทางเข้า

$\tilde{T}_s$ คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

เลขนัสเซลท์เฉลี่ย (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (f) หาค่าได้ดังนี้

$$Nu = hD / k \quad (4)$$

$$f = \frac{2}{(L/D)} \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (5)$$

โดยที่

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทดสอบ

ΔP คือ ค่าความดันตกคร่อมชุดทดสอบ

L คือ ความยาวท่อทดสอบ

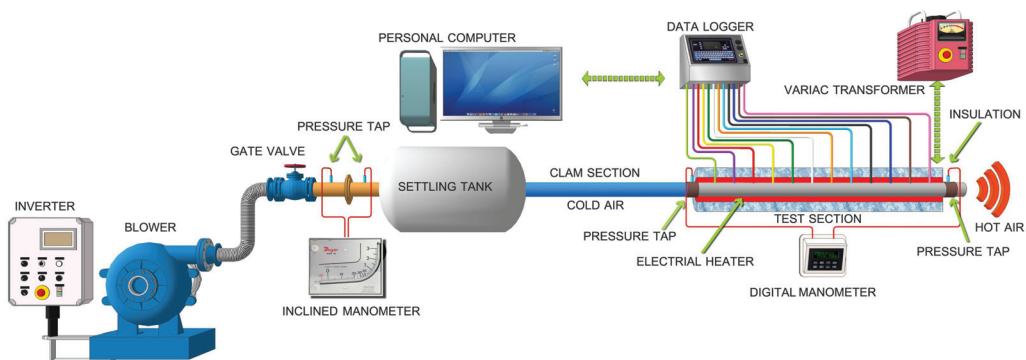
ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

การประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงในเทอมของตัวประกอบ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนความร้อน (Thermal Enhancement Factor, η) ที่นิยามโดยอัตราส่วน ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อที่มีการใส่แผ่นบางรูปตัวไชน์ h กับท่อผิวเรียบ h_0 ที่สภาวะ กำลังของพัดลมที่คงที่ (Constant Blowing Power, bp) [20] โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$\eta = \frac{h}{h_0} \bigg|_{bp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{bp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) / \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3} \quad (6)$$

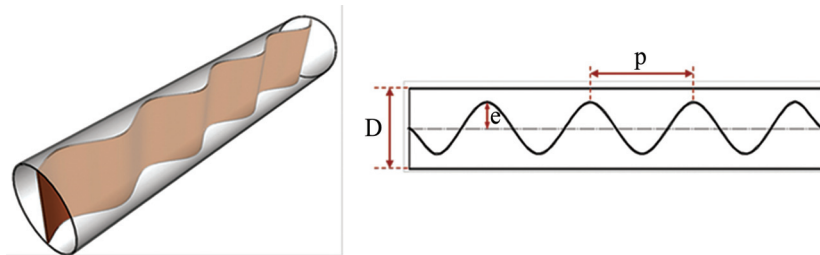
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ พัดลม (Blower) ใช้เป็นแหล่งจ่ายอากาศซึ่งเป็นของไหลทดสอบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นตัวควบคุม ความเร็วรอบของพัดลมแผ่นออริฟิค (Orifice Plate) ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า ชุดทดสอบมานอมิเตอร์ระนาบเอียง (Inclined Manometer) ใช้วัดค่าความดันความดันแตกต่างถึงพักลม (Settling Tank) ทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีความเสถียรก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ สภาพการไหล ของอากาศให้มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ส่วนทดสอบ (Test Section) ในส่วนนี้จะมีมีการให้ความร้อนแก่ท่อและมีการสอดใส่ชิ้นงานทดสอบ โดยจะมีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K จำนวน 30 ตัว ถูกติดตั้งที่ผิวด้านนอกของท่อทดสอบ เพื่อวัดอุณหภูมิผิว ในขณะที่อีกจำนวน 2 ตัว ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบ ท่อทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 mm หนา 3 mm ถูกทำให้ร้อนด้วยฮีตเตอร์ (Heater) แบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ และทำการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน มานอมิเตอร์ แบบดิจิตอล (Digital Manometer) ใช้วัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่งทางเข้าและทางออกของ ส่วนทดสอบ เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger) และคอมพิวเตอร์ใช้เป็นตัวอ่านค่าอุณหภูมิผิว อุณหภูมิทางเข้า-ออกส่วนทดสอบ และบันทึกค่าอุณหภูมิห่อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac Transformer) ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมความร้อนที่จ่ายให้กับระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

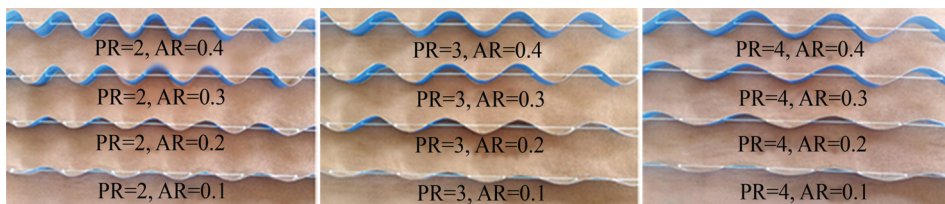


รูปที่ 1 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ลักษณะการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ใช้เป็นตัวสร้างการไหลแบบปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนควงภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 2(ก) แผ่นบางที่ใช้สำหรับสอดใส่ในท่อทดสอบทำจากแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากับ 0.5 mm มีขนาดความกว้างเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $D = 50$ mm และยาวเท่ากับ 1,200 mm จากนั้นแผ่นบางดัดให้เป็นคลื่นรูปตัวไซน์ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ที่มีค่าอัตราส่วนระยะพิชชีที่นิยามโดยอัตราส่วนระหว่างระยะพิชชีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ($p/D = PR = 2, 3$ และ 4) และที่มีค่าอัตราส่วนการปิดกั้นการไหลที่นิยามโดยอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ($e/D = AR = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



(ก) ลักษณะการติดตั้งแผ่นบางรูปตัวไซน์ภายในท่อ



(ข) แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่มีการปรับเปลี่ยนค่า PR และ AR

รูปที่ 2 แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการทดลอง

การทดสอบท่อเปล่าผนังเรียบ

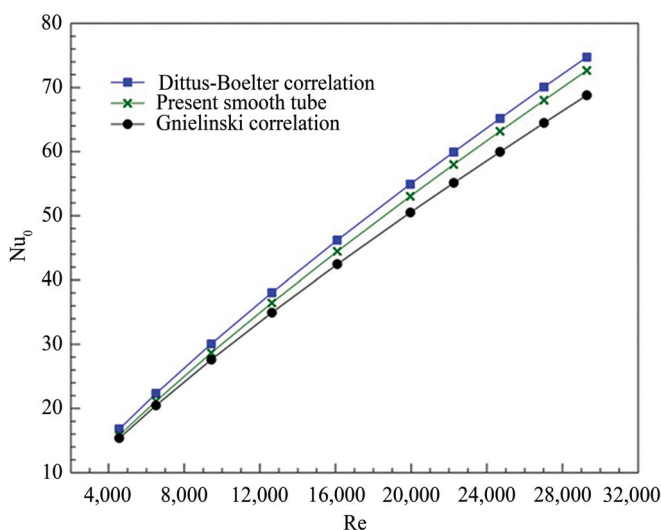
เพื่อความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือของการทดสอบจึงได้ทำการทดสอบท่อเปล่าผนังเรียบเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่แสดงในเทอมของตัวเลขนัสเซิลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันที่แสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน (f) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ในอดีต [21] โดยผลของ Nu ที่ได้จากการทดลองจะนำไปทำการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Gnielinski ดังแสดงในสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ ในขณะที่ผลของ f จะนำไปทำการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius และ Petukhov ดังแสดงในสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

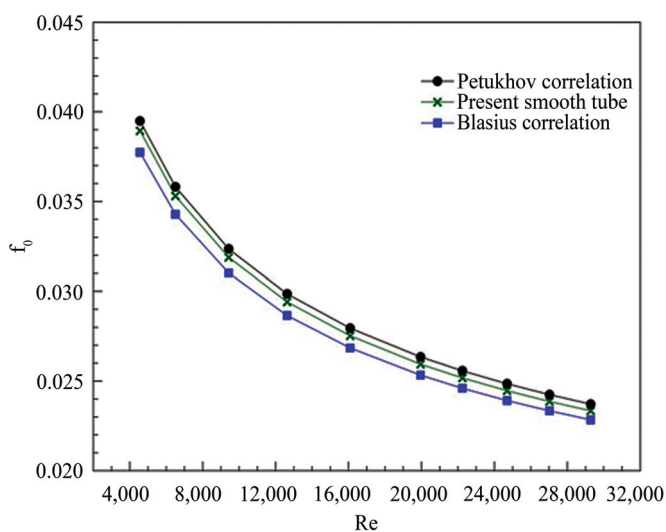
$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (8)$$

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (9)$$

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (10)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_0 กับ Re กรณีท่อเปล่าผนังเรียบ

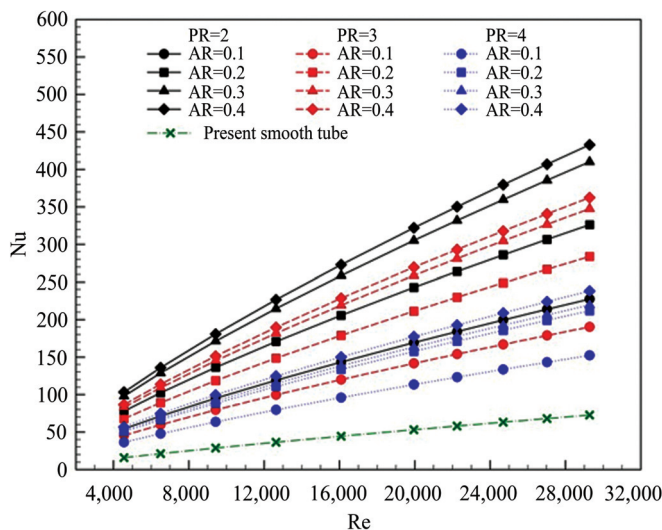


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง f_0 กับ Re กรณีท่อเปล่าผนังเรียบ

การเปรียบเทียบค่า Nu และ f แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า Nu ที่ได้จากการทดลองเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Gnielinski และรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า f ที่ได้จากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Blasius และ Petukhov ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าทั้งค่า Nu และ f มีความผิดพลาดไม่เกิน 5 % จากผลของการเปรียบเทียบดังที่กล่าวมาจึงสามารถยืนยันได้ว่าชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบมีความน่าเชื่อถือของผลการทดลองได้เป็นอย่างดี

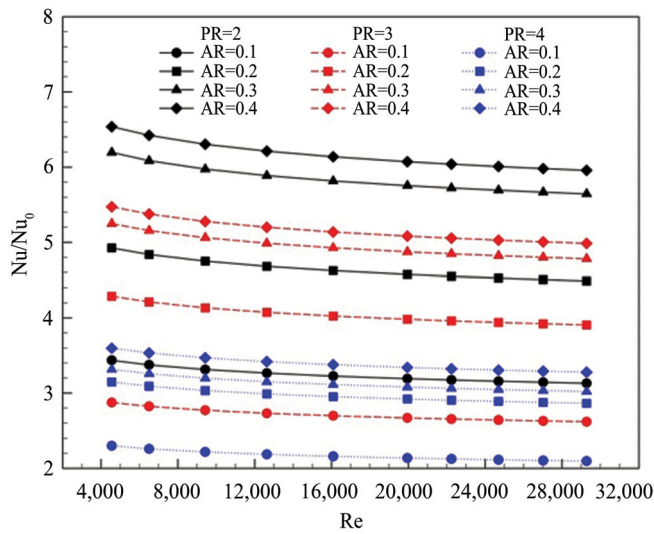
อิทธิพลของ PR และ AR ต่อการถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่ตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบแผ่นบางรูปตัวซี แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนในทอมของตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติกับค่า Re จากการทดลองพบว่าค่า Nu จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re และ AR เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า PR ลดลงที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวซีที่ค่า AR ที่มีค่ามากและค่า PR ที่มีค่าน้อยจะทำให้กระแสน้ำของอากาศเกิดการกระทบกับแผ่นบางรูปตัวซีมากขึ้นและสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนควงที่มีระดับการไหลที่แข็งแกร่งกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสน้ำที่สอดใส่แผ่นบางรูปตัวซีที่ค่า AR ที่มีค่าน้อย และค่า PR ที่มีค่ามาก [19] กระแสของการหมุนควงที่เกิดขึ้นจะไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อนที่บริเวณผนังท่อทำให้ของไหลอุณหภูมิต่ำบริเวณกลางท่อและของไหลอุณหภูมิสูงบริเวณผิวท่อเกิดการผสมผสานกันได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น การสอดใส่แผ่นบางรูปตัวซีทุกกรณีจะให้ค่า Nu สูงกว่าท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วง 52 - 84 % โดยกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวซีที่ค่า $AR = 0.4$ และ $PR = 2$ จะให้ค่า Nu สูงกว่ากรณีอื่น ๆ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re

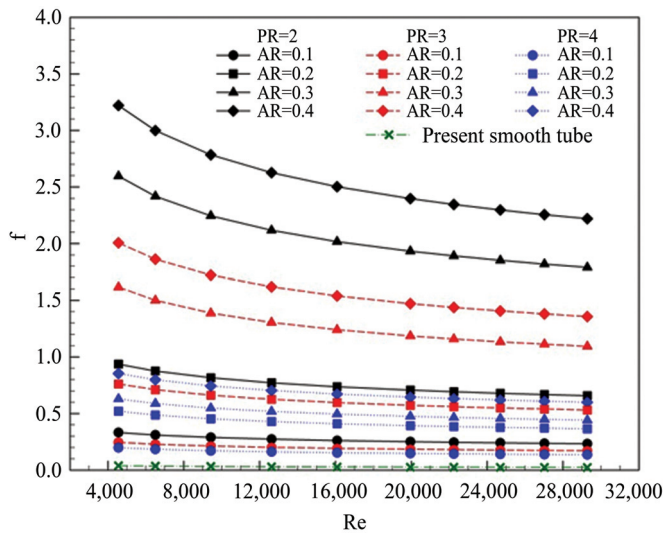
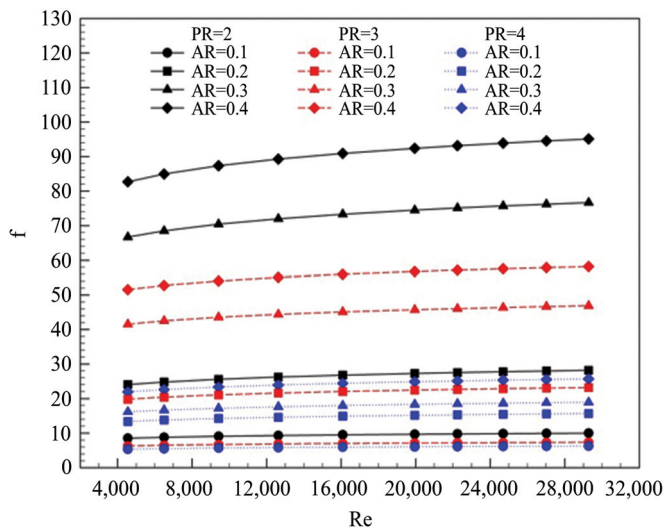
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลที่กรณีสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ต่อตัวเลขนัสเซลที่ของท่อเปล่าผนังเรียบ (Nu/Nu_0) กับ Re จากการทดลองพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง โดยการสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $PR = 2$ $AR = 0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 ; $PR = 3$ $AR = 0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 ; $PR = 4$ $AR = 0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 จะให้ค่า Nu/Nu_0 เท่ากับ 3.1 - 6.5 2.6 - 5.5 และ 2.1 - 3.6 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re

อิทธิพลของ PR และ AR ต่อการสูญเสียความดัน

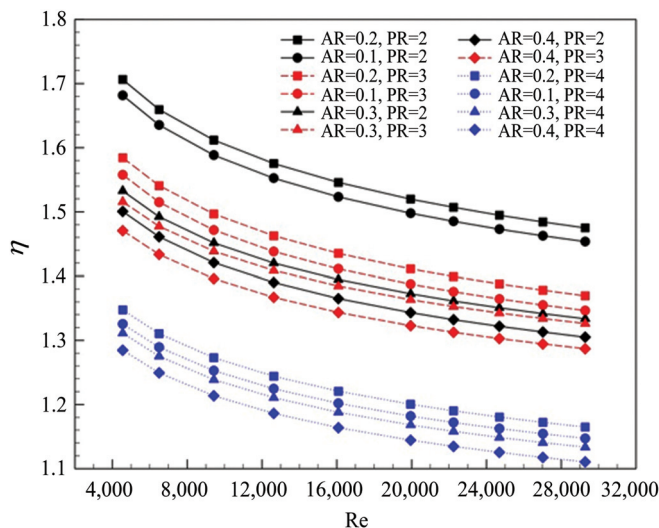
ค่าการสูญเสียความดันเนื่องจากการผลักดันของไหลผ่านท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์แสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อผนังเรียบ (f/f_0) แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จากการทดลองพบว่าค่า f จะลดลงเมื่อค่า Re และ AR ลดลงในขณะที่ค่า PR เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า AR ที่มีค่ามาก และค่า PR ที่มีค่าน้อย จะทำให้เกิดการปิดกั้นการไหลของอากาศภายในท่อที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า AR ที่มีค่าน้อย และค่า PR ที่มีค่ามาก จึงทำให้เกิดการสูญเสียความดันที่สูงขึ้น การสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ทุกกรณีจะให้ค่า f สูงกว่าท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วง 81 - 99 % โดยกรณีการสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $AR = 0.4$ และ $PR = 2$ จะให้ค่า f สูงกว่ากรณีอื่น ๆ รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผนังเรียบ (f/f_0) กับ Re จากการทดลองพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่า f/f_0 เพิ่มขึ้น โดยการสอได้แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $PR = 2$ $AR = 0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 ; $PR = 3$ $AR = 0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 ; $PR = 4$ $AR = 0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 จะให้ค่า f/f_0 เท่ากับ 8.5 - 95.1 6.3 - 58.2 และ 5.3 - 25.7 เท่า ตามลำดับ

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re

ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไชน์ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นแต่สิ่งที่ตามมาคือ ค่าการสูญเสียความดันที่เพิ่มสูงขึ้นตามมาด้วยเช่นกัน จึงเป็นการยากที่จะบอกการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไชน์เข้าไปภายในท่อได้ว่าดีหรือไม่ดี ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการประเมินถึงสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการไหลหมุนวน ที่เรียกว่า ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Thermal Enhancement Factor, η) โดยมีนิยาม คือ อัตราส่วนของการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนต่ออัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียความดัน ซึ่งพิจารณาภายใต้สภาวะ

ที่กำลังขับพัลลคมเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่(6) รูปที่9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re จากการทดลองพบว่า ค่า η มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าการสอไล่แผ่นบางรูปตัวไชน์ทุกกรณีจะให้ค่า η สูงกว่ากรณีของท่อเปล่าผนังเรียบ และมีค่าอยู่ระหว่าง 1.11 - 1.71 ในกรณีการสอไล่แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $PR = 4$ สำหรับทุก ๆ ค่า AR จะให้ค่า η ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่า $PR = 2$ และ 3 ในกรณีการสอไล่แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $PR = 2$ และ $AR = 0.2$ จะให้ค่า η สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.71 ที่ $Re = 4,500$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเชิงทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมด้วยการสอไล่ตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบแผ่นบางรูปตัวไชน์ที่มีอากาศเป็นของไหลทดสอบในช่วงระหว่าง $Re = 4,500 - 29,200$ โดยมีมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ คือ อัตราส่วนระยะพิชชี ($p/D = PR = 2, 3$ และ 4) และอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล ($e/D = AR = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) สามารถสรุปได้ดังนี้ การสอไล่แผ่นบางรูปตัวไชน์ทุกกรณีสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจากท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วงระหว่าง 52 - 84 % ในขณะที่ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 81 - 99 % ในกรณีการสอไล่แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $PR = 2$ และ $AR = 0.4$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ซึ่งจะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีค่าเท่ากับ 6.0 - 6.5 เท่า และ 82.7 - 95.1 เท่า ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่มีการสอไล่แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $PR = 2$ และ $AR = 0.2$ จะให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ให้ค่า η มีค่าเท่ากับ 1.71 ที่ $Re = 4,500$ และในกรณีการสอไล่แผ่นบางรูปตัวไชน์ที่ค่า $PR = 4$ สำหรับทุก ๆ ค่า AR จะให้ค่า η ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่า $PR = 2$ และ 3 จึงไม่แนะนำให้ทำการออกแบบแผ่นบางรูปตัวไชน์ที่มีค่า PR มากกว่า 3

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้

References

- [1] Skullong, S., Promvong, P., Thianpong, C., and Pimsarn, M. (2018). Thermal Performance of Heat Exchanger Tube Inserted with Curved-Winglet Tapes. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 129, pp. 1197-1211. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.110
- [2] Skullong, S., Promvong, P., Thianpong, C., and Jayranaiwachira, N. (2017). Thermal Behaviors in a Round Tube Equipped with Quadruple Perforated-Delta-Winglet Pairs. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 115, pp. 229-243. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.082
- [3] Skullong, S., Promvong, P., Thianpong, C., and Pimsarn, M. (2016). Heat Transfer and Turbulent Flow Friction in a Round Tube with Staggered-Winglet Perforated-Tapes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Vol. 95, pp. 230-242. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.007
- [4] Skullong, S., Promvong, P., Jayranaiwachira, N., and Thianpong, C. (2016). Experimental and Numerical Heat Transfer Investigation in a Tubular Heat Exchanger with Delta-Wing Tape Inserts. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. Vol. 109, pp. 164-177. DOI: 10.1016/j.cep.2016.09.005
- [5] Xu, Y., Islam, M. D., and Kharoua, N. (2018). Experimental Study of Thermal Performance and Flow Behaviour with Winglet Vortex Generators in a Circular Tube. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 135, pp. 257-268. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.112
- [6] Liu, H. L., Li, H., He, Y. L., and Chen, Z. T. (2018). Heat Transfer and Flow Characteristics in a Circular Tube Fitted with Rectangular Winglet Vortex Generators. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Vol. 126, Part A, pp. 989-1006. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.038
- [7] Wijayanta, A. T., Istanto, T., Kariya, K., and Miyara, A. (2017). Heat Transfer Enhancement of Internal Flow by Inserting Punched Delta Winglet Vortex Generators with Various Attack Angles. **Experimental Thermal and Fluid Science**. Vol. 87, pp. 141-148. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.05.002
- [8] Chokphoemphun, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., and Promvong, P. (2015). Heat Transfer Augmentation in a Circular Tube with Winglet Vortex Generators. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. Vol. 23, Issue 4, pp. 605-614. DOI: 10.1016/j.cjche.2014.04.002
- [9] Suwannapan, S., Skullong, S., and Promvong, P. (2015). Thermal Characteristics in a Heat Exchanger Tube Fitted with Zigzag-Winglet Perforated-Tapes. **Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering**. Vol. 3, No. 1, pp. 29-36. DOI: 10.14456/jrame.2015.3

- [10] Bhuiya, M. M. K., Sayema, A. S. M., Islam, M., Chowdhur, M. S. U., and Shahabuddin, M. (2014). Performance Assessment in a Heat Exchanger Tube Fitted with Double Counter Twisted Tape Inserts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 50, pp. 25-33. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.005
- [11] Bhuiya, M. M. K., Chowdhur, M. S. U., Shahabuddin, M., Saha, M., and Memon, L. A. (2013). Thermal Characteristics in a Heat Exchanger Tube Fitted with Triple Twisted Tape Inserts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 48, pp. 124-132. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.024
- [12] Chokphoemphun, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., and Promvonge, P. (2015). Thermal Performance of Tubular Heat Exchanger with Multiple Twisted-Tape Inserts. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. Vol. 23, Issue 5, pp. 755-762. DOI: 10.1016/j.cjche.2015.01.003
- [13] Nanan, K., Thianpong, C., Promvonge, P., and Eiamsa-ard, S. (2014). Investigation of Heat Transfer Enhancement by Perforated Helical Twisted-Tapes. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 52, pp. 106-112. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.018
- [14] Nanan, K., Yongsiri, K., Wongcharee, K., Thianpong, C., and Eiamsa-ard, S. (2013). Heat Transfer Enhancement by Helically Twisted Tapes Inducing Co- and Counter-Swirl Flows. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 46, pp. 67-73. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.015
- [15] Hong, Y., Dua, J., Wang, S., Huang, S. M., and Ye, W. B. (2018). Heat Transfer and Fluid Flow Behaviors in a Tube with Modified Wire Coils. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 124, pp. 1347-1360.
- [16] Promvonge, P., Koolnapadol, N., Pimsarn, M., and Thianpong, C. (2014). Thermal Performance Enhancement in a Heat Exchanger Tube Fitted with Inclined Vortex Rings. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 62, Issue 1, pp. 285-292. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.031
- [17] Eiamsa-ard, S., Kongkaitpaiboon, V., and Nanan, K. (2013). Thermohydraulics of Turbulent Flow Through Heat Exchanger Tubes Fitted with Circular-Rings and Twisted Tapes. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. Vol. 21, Issue 6, pp. 585-593. DOI: 10.1016/S1004-9541(13)60504-2
- [18] Thianpong, C., Yongsiri, K., Nanan, K., and Eiamsa-ard, S. (2012). Thermal Performance Evaluation of Heat Exchangers Fitted with Twisted-Ring Turbulators. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 39, Issue 6, pp. 861-868. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.04.004
- [19] Promthaisong, P. and Suwannapan, S. (2018). Turbulent Flow Behaviors on Thermal Enhancement in a Circular Tube Heat Exchanger Equipped with Sinusoidal Baffles. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*. Vol. 6, No. 2, pp. 95-112. DOI: 10.14456/jrame.2018.10
- [20] Webb, R. L. (1992). **Principles of Enhanced Heat Transfer**. New York. John-Wiley & Sons.
- [21] Incropera, F. P., DeWitt, P. D., Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2006). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John-Wiley & Sons.

การออกแบบและสร้างกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำความร้อนและความเย็น

Design and Development of a Thermoelectric Pan for Heating and Chilling Application

เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์^{1*}

Jensak Ekburanawat^{1*}

Received: March 11, 2019; Revised: June 6, 2019; Accepted: June 6, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระทะเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งเป็นกระทะที่สามารถทำได้ทั้งทำความร้อนและความเย็นในเครื่องเดียวกัน กระทะเทอร์โมอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น ประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 6 โมดูลทำหน้าที่สร้างความร้อนและความเย็น ด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งอยู่กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอีกด้านหนึ่งติดตั้งอยู่กับแผ่นกระทะที่ใช้ทำความร้อนและความเย็น แผ่นกระทะมีขนาด $30 \times 40 \times 0.8$ เซนติเมตร เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่รับความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแล้วส่งถ่ายความร้อนให้กับน้ำที่ในระบบน้ำจะหมุนเวียนผ่านหม้อน้ำแล้วส่งผ่านความร้อนสู่บรรยากาศภายนอก โดยมีพัดลมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อน ระบบควบคุมการทำงานหลักของกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม สั่งงานรีเลย์เพื่อทำการตัด - ต่อ หรือสลับขั้วแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายไฟ กระทะเทอร์โมอิเล็กทริกแบ่งการทำงานออกเป็น 3 โหมด 1) โหมดร้อนสามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุด 107 องศาเซลเซียส กินกำลังไฟฟ้าสูงสุด 360 วัตต์ 2) โหมดอุ่น สามารถทำอุณหภูมิได้ 79 องศาเซลเซียส กินกำลังไฟฟ้าสูงสุด 250 วัตต์ และ 3) โหมดเย็น สามารถทำอุณหภูมิได้ต่ำสุด 14 องศาเซลเซียส กินกำลังไฟฟ้าสูงสุด 300 วัตต์

คำสำคัญ : เทอร์โมอิเล็กทริก; เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; หม้อน้ำ; ไมโครคอนโทรลเลอร์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom

* Corresponding Author E - mail Address: jensak.eak@rmutr.ac.th

Abstract

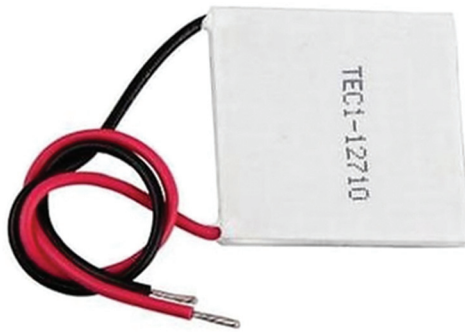
This research is a development of the thermoelectric pan which is capable of both heating and chilling on a single pan. This thermoelectric pan is composed of six thermoelectric modules as a source of hot and cold temperature. A heat exchanger is installed on one side of each thermoelectric module, whereas a steel plate attaches to the other side working as a heat/cold pan. The dimension of the pan is 30 x 40 x 0.8 cm approximately. The heat exchanger receives heat from thermoelectric modules and transfers it to water in the system, then the water circulates through a radiator passing heat to surroundings with a fan in order to increase its efficiency. The main control system consists of microcontroller circuits to manage relays to turn on/off or to switch the terminals of power supplies. The thermoelectric pan have three modes of operation; 1) Hot mode, the thermoelectric pan can reach maximum temperature at 107 °C by consuming 360 W maximum power, 2) Warm mode, the thermoelectric pan can generate temperature at 79 °C for 250 W power consumption and 3) Cold mode, the thermoelectric pan can lower temperature to minimum at 14 °C taking 300 W operating power.

Keywords: Thermoelectric; Heat Exchanger; Radiator; Microcontroller

บทนำ

ปัจจุบันอัตราการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพลังงานมีความจำเป็นต่อมนุษย์ ตั้งแต่การใช้งานภายในครัวเรือนจนถึงระดับอุตสาหกรรม เมื่อมีการใช้พลังงานจำนวนมากทำให้ส่งผลกระทบต่อธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ทำให้มนุษย์ตระหนักถึงผลกระทบที่จะตามมามากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากการรณรงค์ต่าง ๆ เกี่ยวกับการใช้พลังงานให้คุ้มค่าที่สุด เช่น การสร้างเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมที่นำพลังงานสูญเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ หรือแม้กระทั่งการประหยัดพลังงานก็สามารถลดปัญหาพลังงานได้ในชีวิตประจำวันมนุษย์ใช้พลังงานส่วนหนึ่งไปกับการปรุงอาหารและถนอมอาหาร ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า แก๊สหุงต้ม ถ่านไม้ หรือชีวมวล ซึ่งทั้งหมดนี้อาจเป็นการใช้พลังงานที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็นสำหรับการประกอบอาหาร

เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรูปพลังงานที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ สามารถสร้างความเย็นและความร้อนได้จากปรากฏการณ์เพลเทียร์ (รูปที่ 1) หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก คือ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำสองชนิด (ชนิด P และ N) ที่อยู่ภายในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ด้านหนึ่งของโมดูลจะเย็น (Cold Side) และอีกด้านหนึ่งของโมดูลจะร้อน (Hot Side) ถ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะกลายเป็นด้านร้อนส่วนด้านร้อนจะกลายเป็นด้านเย็น ความสามารถในการทำความเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทำความร้อน เนื่องจากความเย็นที่ผลิตได้ถูกลดทอนจากความร้อนที่ไหลย้อนกลับที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น และความร้อนที่เกิดจากความต้านทานทางไฟฟ้า

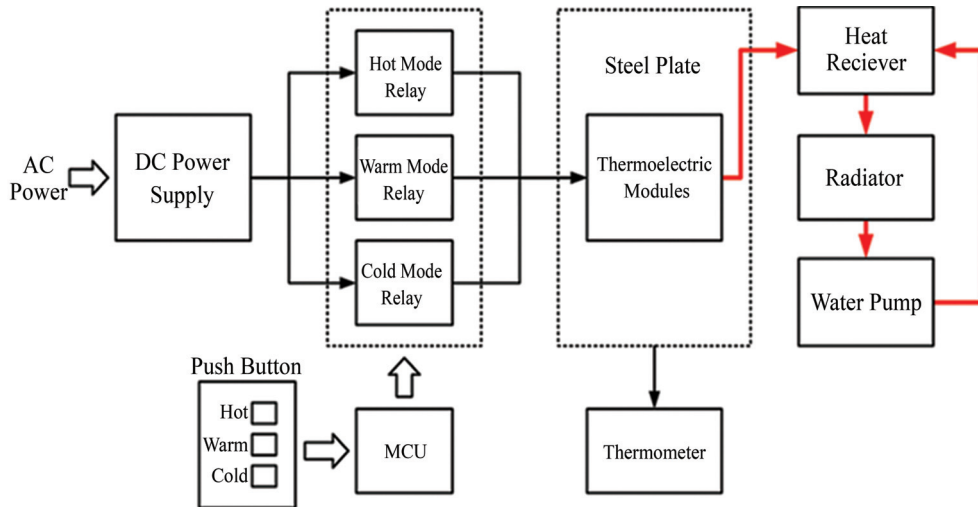


รูปที่ 1 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีแนวคิดในการนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้งาน โดยการสร้างกระทะที่สามารถทำความร้อนและความเย็นได้ในเครื่องเดียวกัน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของกระทะให้สามารถทำอาหารได้หลากหลายชั้นและประหยัดพลังงานกว่ากระทะไฟฟ้าทั่วไป มีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานจากก๊าซหุงต้ม จึงเหมาะสำหรับใช้งานภายในอาคารบ้านพักอาศัยหรือการประกอบอาหารในที่ชุมชน เช่น ทางสรรพสินค้า นอกจากนี้ยังสามารถปรับเป็นโหมดอุ่นเพื่อใช้ละลายอาหารแช่แข็งจำพวกเนื้อสัตว์ต่าง ๆ และปรับเป็นโหมดทำความเย็นเพื่อถนอมอาหารไม่ให้เน่าเสียได้อีกด้วย จากคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้กล่าวมาข้างต้น ขณะที่ผลิตความเย็นนั้นอีกด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกจะเกิดความร้อนสูงจึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนโดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ การระบายความร้อนที่ดีจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำ ความเย็นเพิ่มมากขึ้น ข้อดีของเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นคือ มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวจึงไม่เกิดการสึกหรอ [1] งานวิจัยนี้ยังได้ออกแบบโครงสร้างของกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีรูปร่างที่เหมาะสมกับการใช้งานในชีวิตประจำวันอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบสร้างและทดสอบกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ คือ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEC1-12710 จำนวน 6 โมดูล ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างความร้อนและความเย็น แผ่นเหล็กที่ใช้ทำเป็นกระทะ ขนาด $30 \times 40 \times 0.8$ เซนติเมตร เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับรับความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ปั้มน้ำสำหรับหมุนเวียนน้ำในระบบระบายความร้อน หม้อน้ำแบบรังผึ้งสำหรับใช้ระบายความร้อนจากน้ำสู่บรรยากาศ ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานของกระทะ ชุดวงจรรีเลย์สำหรับตัด - ต่อ และสลับขั้วของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลสำหรับแสดงอุณหภูมิของแผ่นกระทะ โดยอุปกรณ์ที่กล่าวมามีการเชื่อมโยงเพื่อทำงานร่วมกันดังแสดงในแผนภาพระบบการทำงานของกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพระบบการทำงานของกระเทอริโมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริกและการถ่ายเทความร้อน

ในปี ค.ศ. 1834 ฌอง ซี. เอ. เพลเทียร์ (Jean C. A. Peltier) [2] นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส พบว่าเมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสตรงให้กับรอยต่อสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสองด้านจะกลายเป็นผิวร้อน (Hot Surface) และผิวเย็น (Cold Surface) ขึ้นกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ในทางกลับกัน ถ้าถ่ายเทความร้อนให้กับผิวด้านหนึ่งจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรียกว่า ซีเบ็คโวลเตจ (Seebeck Voltage) สารกึ่งตัวนำดังกล่าวเรียกว่า p-n junctions โดยที่การผลิตกระแสไฟฟ้าจะต่อแบบอนุกรม การทำความเย็นจะต่อแบบขนานเป็นแบบแซนวิช ระหว่างแผ่นฉนวนเซรามิก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เพลเทียร์ซึ่งจัดเป็นปั๊มความร้อน (Heat Pump) เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริก” [3] ได้เสนอสมการอนุพันธ์แสดงการกระจายอุณหภูมิหนึ่งมิติ สำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกตามแนวแกน x ตามสมการที่ (1) และ (2) สามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$e_{T_{MAX}} = \frac{E}{2} + \frac{\Delta T}{E} \cdot \frac{\lambda}{\rho I^2} \quad (1)$$

อุณหภูมิสูงสุดที่ผิวร้อน คือ

$$T_{MAX} = T_c + \left(\frac{E}{2} + \frac{\Delta T}{E} \cdot \frac{\lambda}{\rho I^2} \right) \cdot \left(\frac{\Delta T}{2E} + \frac{\rho I^2}{2\lambda} \cdot E \right) \quad (2)$$

เมื่อ

I เป็นกระแสไฟฟ้า

T_c เป็นอุณหภูมิที่ผิวเย็น

ΔT เป็นผลต่างของอุณหภูมิ

ρ, λ และ E เป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ

Gao, M., Rowe, D. M. [4] ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient Of Performance; COP) ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งพิจารณาถึงความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนเนื่องจากจุดสัมผัสตามสมการที่ (3) - (5) คือ

$$\eta = \frac{l}{1 + 2rl_c} \cdot \left(\frac{T_c}{T_h - T_c} \cdot \frac{\beta - T_h/T_c}{1 + \beta} - \frac{2l_c}{l} \right) \quad (3)$$

เมื่อ

$$\beta = \left(1 + \frac{lzT_M}{n+1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

โดยที่

$r = \lambda / \lambda_c$ เป็นอัตราส่วนของสภาพนำความร้อนที่ผิวสัมผัส

l เป็นความยาวของเทอร์โมอิเล็กทริค $n = 2\rho_c / \rho$

เมื่อ

ρ_c เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริคและ Copper Strips โดยที่

$$z = \frac{\alpha^2}{\rho\lambda} \quad (5)$$

เมื่อ

α เป็นสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) สำหรับ Thermoelectric Material

ρ และ λ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนของสารเทอร์โมอิเล็กทริค

$T_M = (T_h + T_c) / 2$ เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเทอร์โมอิเล็กทริค

l_c เป็นความหนาของ Contact Layers

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกระเพาะ

ถ้าความร้อนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุชนิดใดได้อย่างรวดเร็วแสดงว่าวัสดุนั้นมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ดี วัสดุที่มีระดับในการนำความร้อนที่สูง ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวมันอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีข้อดีก็คือ วัสดุนั้นสามารถนำไปใช้ในการระบายความร้อนได้ดี แต่ถ้าหากต้องการกักเก็บความร้อนเอาไว้ในวัสดุก็ให้เลือกวัสดุที่มีการนำความร้อนที่น้อย ค่าการนำความร้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ ดูได้จากตารางที่ 1

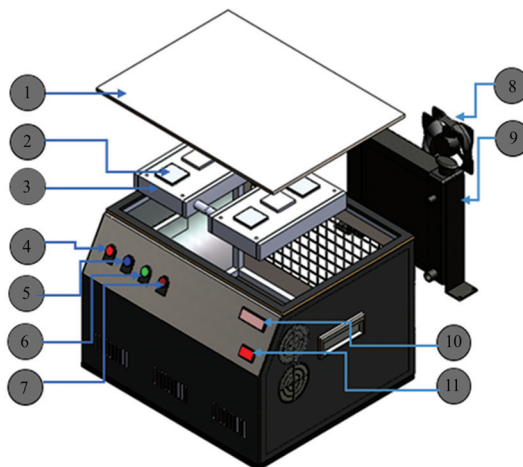
ตารางที่ 1 ค่าการนำความร้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	การนำความร้อน $W/(m.K)$
เงิน (Silver)	427
ทอง (Gold)	315
ทองแดง (Copper)	398
สังกะสี (Zinc)	121
เหล็ก (Iron)	80.3
อลูมิเนียม (Aluminum)	237

หากเราเลือกโลหะที่มีค่าการนำความร้อนมากมาทำแผ่นกระทะ กระทะก็จะร้อนเร็วแต่ในทางกลับกัน หากเราเลือกโลหะที่มีค่าการนำความร้อนน้อยมาทำแผ่นกระทะ กระทะก็จะร้อนช้ากว่าแต่จะสามารถกักเก็บความร้อนเอาไว้ได้นานกว่า แต่เมื่อพิจารณาถึงความปลอดภัยในการใช้งานแล้ว จึงเลือกวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกระทะเป็นเหล็ก เนื่องจากมีความเสี่ยงในการปนเปื้อนลงสู่อาหารน้อยกว่าโลหะอื่น และเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงคงทนและมีราคาถูก [5]

ส่วนประกอบของกระทะเทอร์โมอิเล็กทริก

การออกแบบกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นตั้งใจออกแบบให้เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและมีลักษณะคล้ายกับกระทะที่ใช้งานโดยทั่วไป โดยออกแบบให้มีหน้ากระทะเป็นแผ่นเหล็กขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร และหนา 0.8 เซนติเมตร ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 6 โมดูล ใต้แผ่นกระทะ อีกด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็กทริกติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ระบายความร้อนออกจากเทอร์โมอิเล็กทริก ผ่านทางระบบระบายความร้อนแบบหมอน้ำ

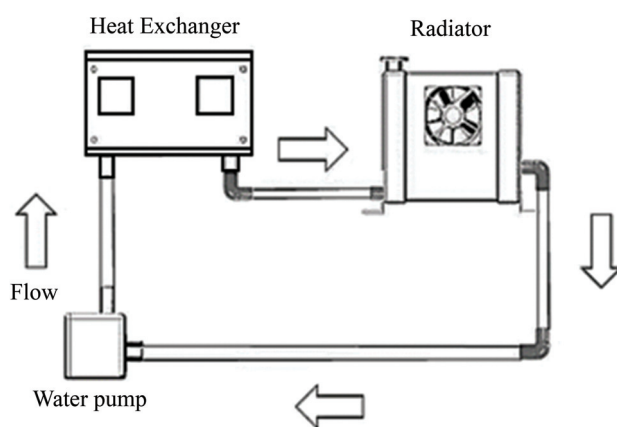


รูปที่ 3 ส่วนประกอบของกระทะเทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 3 ส่วนประกอบของกระเพาะเทอร์โมอิเล็กทริก มีดังต่อไปนี้ 1) แผ่นกระเพาะทำจากเหล็ก 2) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จำนวน 6 แผ่น 3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จำนวน 2 ชุด 4) สวิตช์โหมคร้อน 5) สวิตช์โหมคอุ่น 6) สวิตช์โหมคเย็น 7) สวิตช์รีเซ็ตเครื่อง 8) พัดลมระบายความร้อนจากหม้อน้ำ 9) หม้อน้ำ 10) จอแสดงผลอุณหภูมิ และ 11) สวิตช์ ปิด-เปิด เครื่อง

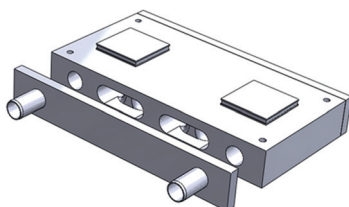
ระบบระบายความร้อน

ระบบระบายความร้อนของกระเพาะที่สร้างขึ้นนั้นใช้สำหรับระบายความร้อนออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในกรณีที่กระเพาะทำงานในโหมดทำความเย็น และในทางกลับกันจะใช้ระบายความเย็นออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในกรณีที่กระเพาะทำงานในโหมดทำความร้อน และจะต้องออกแบบให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยชุดระบายความร้อนจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ปั้มน้ำ หม้อน้ำ และพัดลมระบายอากาศ การต่อวงจรของอุปกรณ์ในระบบระบายความร้อน และทิศทางการไหลของน้ำในระบบแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ทิศทางการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนหรือความเย็นระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลกับสารทำงานที่อยู่ในระบบสารทำงานที่ใช้ในระบบนี้ก็คือ น้ำผสมกับน้ำยาระบายความร้อนหม้อน้ำรถยนต์ สารทำงานจะทำหน้าที่พาความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลไประบายสู่บรรยากาศผ่านทางหม้อน้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ทำจากอลูมิเนียมซึ่งมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี มีน้ำหนักเบา ออกแบบทิศทางการไหลของสารทำงานภายในให้มีลักษณะสลับไปมา เพื่อให้ น้ำสารทำงานสามารถพาความร้อนไปได้มากที่สุด ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

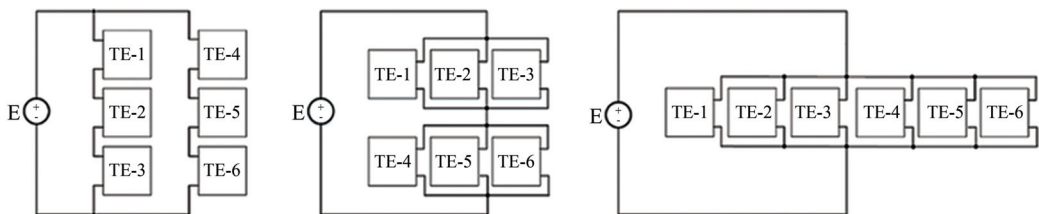
การต่อวงจรเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ระบบทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้นจะทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดหรือทำอุณหภูมิต่ำสุดได้หรือไม่ ขึ้นอยู่กับระบบระบายความร้อน เพราะหากไม่สามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกจากตัวเทอร์โมอิเล็กทริกได้ทัน ความร้อนที่เกิดขึ้นทางด้านร้อนของโมดูลจะสะท้อนกลับมาทางด้านเย็นของโมดูลทำให้โมดูลไม่สามารถทำความเย็นต่ำสุดได้ เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ในทางปฏิบัติจึงต้องทำการทดสอบหารูปแบบการต่อวงจรของโมดูลและหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะจ่ายให้กับโมดูล ทั้งนี้เพื่อจะหาจุดที่ระบบทำงานเข้ากันได้เหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด กระทั่งเทอร์โมอิเล็กทริกออกแบบให้เลือกการทำงานได้ 3 โหมด ได้แก่ โหมดครีออน โหมดอุ่น และโหมดเย็น การทดลองหารูปแบบการต่อวงจรและหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละโหมดการทำงานสามารถทำได้ดังนี้

1. การทดลองหาค่าแรงดันที่เหมาะสมสำหรับโหมดทำความเย็น

กระเบื้องเทอร์โมอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นใช้เทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 6 โมดูล ติดตั้งในตำแหน่งกระจายทั้งแผ่นกระเบื้องเพื่อสามารถให้ความร้อน/ความเย็น ครอบคลุมพื้นที่ของกระเบื้องได้ การทดลองหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในโหมดทำความเย็นของกระเบื้องนั้น ทำการทดลอง 3 รูปแบบ ดังนี้

- แบบที่ 1 ต่อโมดูลอนุกรมกัน 3 โมดูล/ชุด แล้วนำมาต่อขนานกันดังรูปที่ 6(ก)
- แบบที่ 2 ต่อโมดูลขนานกัน 3 โมดูล/ชุด แล้วนำมาต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 6(ข)
- แบบที่ 3 ต่อขนานกันทั้ง 6 โมดูล ดังรูปที่ 6(ค)



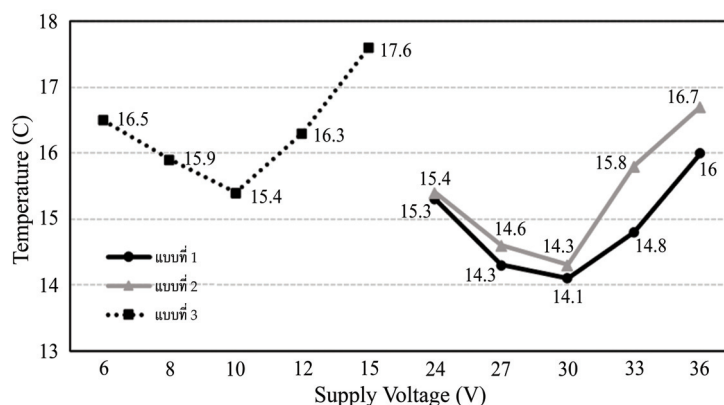
(ก) วงจรแบบที่ 1

(ข) วงจรแบบที่ 2

(ค) วงจรแบบที่ 3

รูปที่ 6 รูปแบบการต่อวงจรทดลองหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

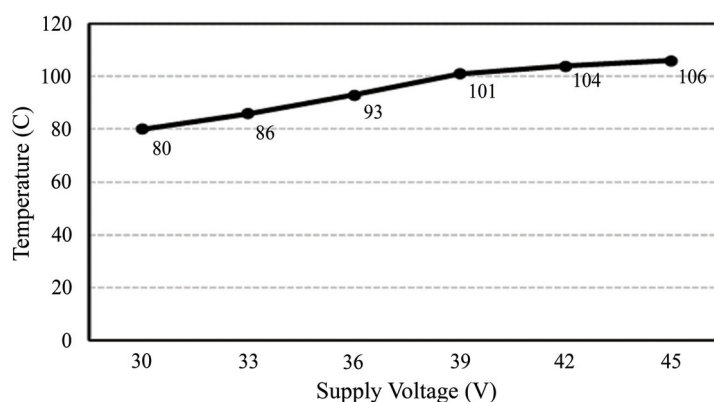
การทดลองหาระดับแรงดันที่เหมาะสมในโหมดทำความเย็น จะทำการต่อวงจรตามรูปแบบที่กำหนดไว้ (รูปที่ 6) แล้วปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรเป็นลำดับขั้นจากน้อยไปหามาก ทำการอ่านค่าอุณหภูมิที่กระเบื้องสามารถทำได้ที่ระดับแรงดันค่าต่าง ๆ ทำซ้ำให้จนครบทุกรูปแบบวงจร แล้วนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 รูปแบบ มาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบกัน จากรูปที่ 7 เห็นได้ว่าการต่อวงจรแบบที่ 1 จะสามารถทำอุณหภูมิได้ต่ำสุดที่ 14.1 องศาเซลเซียส ที่ระดับแรงดัน 30 โวลต์คงที่



รูปที่ 7 ผลการทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์โมดูลโหมดทำความเย็น

2. การทดลองหาค่าแรงดันที่เหมาะสมสำหรับโหมดทำความร้อน

ในส่วนของโหมดทำความร้อนนั้นเลือกใช้วิธีการต่อแบบเดียวกับโหมดทำความเย็น โดยหาระดับแรงดันที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่สูงที่สุด จากการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น อุณหภูมิก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย เป็นลักษณะกราฟแบบเส้นตรงดังรูปที่ 8 ดังนั้นจึงเลือกใช้แรงดันที่ 45 โวลต์ เพื่อให้แรงดันที่ตกคร่อมต่อโมดูลเท่ากับ 15 โวลต์ ซึ่งได้อุณหภูมิที่สูงที่สุด 107 องศาเซลเซียส



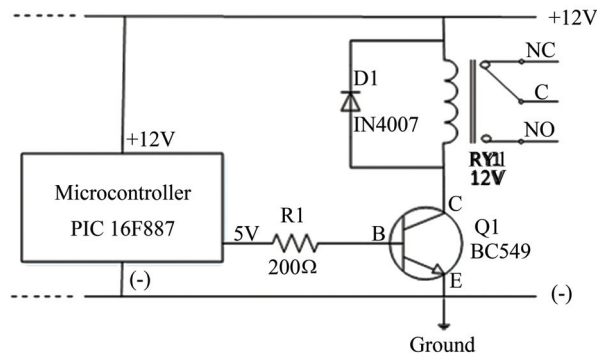
รูปที่ 8 ผลการทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์โมดูลโหมดทำความร้อน

ตารางที่ 2 สรุประดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานแต่ละโหมด

โหมด	ระดับแรงดัน (โวลต์)
โหมดทำความเย็น	30
โหมดอุ่น	30
โหมดทำความร้อน	45

วงจรจ่ายไฟและวงจรควบคุม

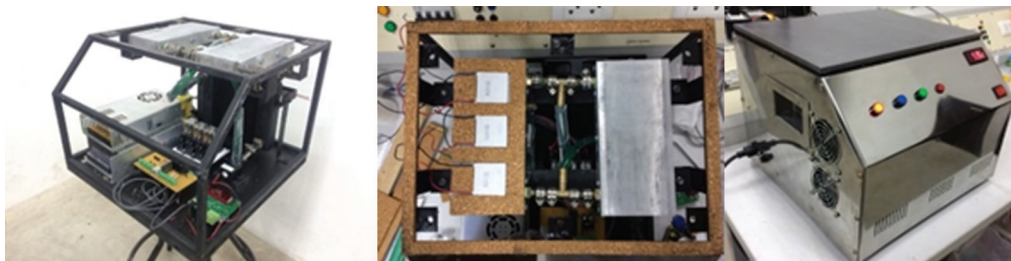
จากตารางที่ 2 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จะจ่ายให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีอยู่ 2 ระดับ คือ 30 โวลต์ และ 45 โวลต์ อีกทั้งการทำงานในโหมดทำความเย็นจำเป็นต้องสลับขั้วของเทอร์โมอิเล็กทริกอีกด้วย เพื่อควบคุมการจ่ายไฟให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและการใช้งานที่คล่องตัว จึงใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F887 มาควบคุมการทำงาน (รูปที่ 2) โดยทำหน้าที่รับคำสั่งจากปุ่มกดที่หน้าเครื่องเพื่อควบคุมให้รีเลย์จ่ายไฟให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกตามโหมดการทำงานของกระเพาะ แต่เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถขับขดลวดรีเลย์ให้ทำงานได้โดยตรง จึงต้องเพิ่มวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อช่วยขยายกระแสให้สูงขึ้น โดยต่อทรานซิสเตอร์ Q1 เข้ากับพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์และมีตัวต้านทาน R1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าเบสของทรานซิสเตอร์ Q1 ซึ่งจะทำงานก็ต่อเมื่อพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีสถานะเป็น "1" เมื่อ Q1 ทำงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขดลวดของรีเลย์ซึ่งต่ออยู่กับขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ลงกราวด์ (รูปที่ 9) รีเลย์ก็จะสามารถเปลี่ยนสภาวะการทำงานได้ และจะกลับสู่สภาวะเดิมเมื่อพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีสถานะเป็น "0"



รูปที่ 9 วงจรขับรีเลย์

โครงสร้างของกระเพาะเทอร์โมอิเล็กทริก

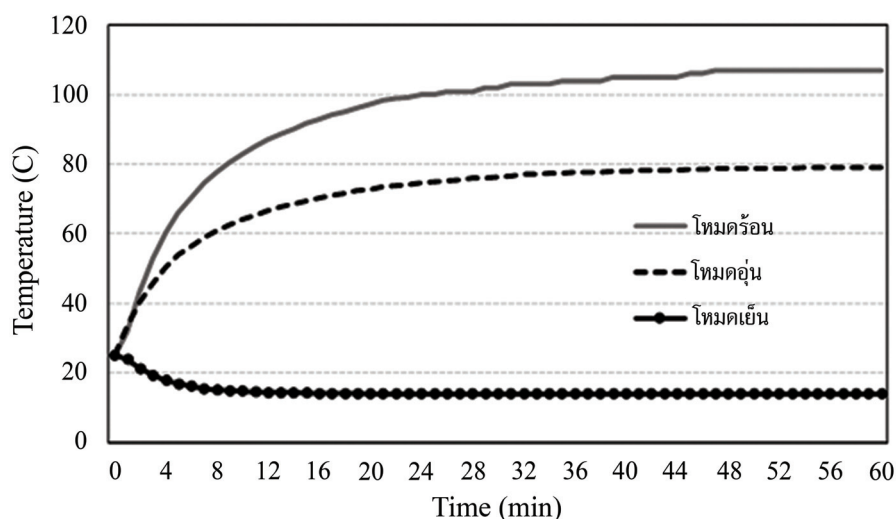
หลังจากหาค่าแรงดันที่เหมาะสมในแต่ละโหมดการทำงานพร้อมออกแบบวงจรควบคุมและจ่ายไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการแล้ว จึงเริ่มประกอบงานจริง โดยใช้เหล็กทำเป็นโครงสร้างของเครื่องและใช้แผ่นสแตนเลสทำเป็นเปลือกด้านนอก รูปที่ 10 แสดงขั้นตอนการประกอบกระเพาะเทอร์โมอิเล็กทริกและชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว



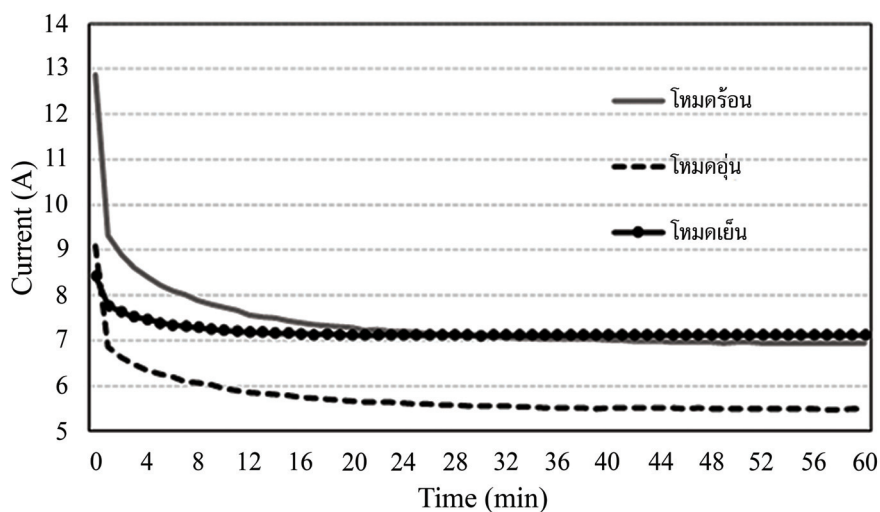
รูปที่ 10 ขั้นตอนการประกอบกระเพาะเทอร์โมอิเล็กทริกและกระเพาะที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว

ผลการวิจัย

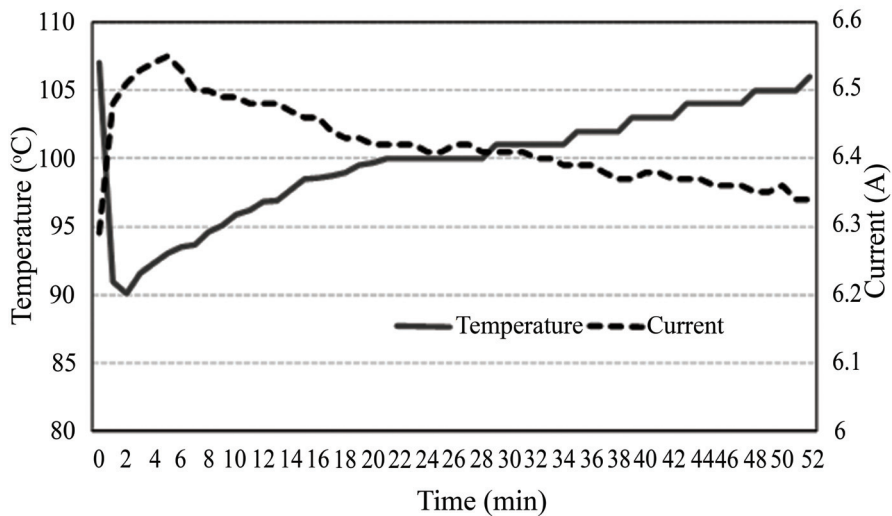
ทำการทดลองวัดค่าอุณหภูมิที่กระเพาะโม่ทำได้ในแต่ละโหมดการทำงานเทียบกับเวลาโดยให้กระเพาะโม่เริ่มการทำงานที่อุณหภูมิห้อง วัดและบันทึกผลอุณหภูมิที่หน้ากระเพาะ และกระแสไฟฟ้าที่กระเพาะใช้ในทุก ๆ 1 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 หลังจากนั้นจึงทำการทดลองใช้กระเพาะโม่อิเล็กทรอนิกส์ประกอบอาหารจริง เช่น ทอดไข่ดาว ทอดแพนเค้ก และละลายอาหารแช่แข็ง โดยกระแสและอุณหภูมิขณะทอดไข่ดาว 2 ฟอง แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 11 อุณหภูมิที่กระเพาะโม่อิเล็กทรอนิกส์ทำได้ในแต่ละโหมดเทียบกับเวลาในการทำงาน



รูปที่ 12 กระแสไฟฟ้าที่กระเพาะโม่อิเล็กทรอนิกส์ใช้ในแต่ละโหมดเทียบกับเวลาในการทำงาน



รูปที่ 13 อุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่กระทะเทอร์โมอิเล็กทริกใช้ในโหมดร้อนขณะมีโหลดเป็นไข่ดาว 2 ฟอง

อภิปรายผลการวิจัย

การทดลองใช้งานกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

- ขณะไม่มีโหลดในโหมดทำความร้อน กระทะทำอุณหภูมิสูงสุดได้ที่ 107 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 50 นาที โดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้อง ในโหมดอุ่น กระทะทำอุณหภูมิสูงสุดได้ที่ 79 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 50 นาที โดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้อง และในโหมดเย็นกระทะทำอุณหภูมิได้ต่ำสุดที่ 14 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 30 นาที โดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องเช่นกัน
- ขณะมีโหลด ในโหมดทำความร้อน กระทะสามารถทำให้ไข่ไก่สุกที่เวลาประมาณ 7 นาที และแบ่งแพนเค้กสุกที่เวลาประมาณ 10 นาที ในโหมดอุ่น กระทะสามารถละลายน่องไก่แช่แข็ง 2 กิโลกรัม ได้ที่เวลาประมาณ 25 นาที และในโหมดเย็น สามารถทำให้ไส้สดอุณหภูมิห้องมีอุณหภูมิลดลงเหลือ 15.3 องศาเซลเซียสได้ (รูปที่ 14)



รูปที่ 14 การใช้งานกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกทอดไข่ดาวและละลายน่องไก่แช่แข็ง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกกับกระทะไฟฟ้าแบบอื่น ในการต้มน้ำ 300 มิลลิลิตร ให้ได้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ประเภทของกระทะ	เวลา (นาทีก)	พลังงาน (วัตต์)	ค่าไฟฟ้า (บาท)
กระทะเทอร์โมอิเล็กทริก	12	375	0.3316
กระทะแบบขดลวดความร้อน	4	1,000	0.2948
เตาแม่เหล็กไฟฟ้า	8	1,500	0.8843

หมายเหตุ อัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณ สืบค้นเมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2562

จากการทดลองพบว่าโหมคทำความร้อนของกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกเหมาะที่จะใช้ประกอบอาหารชนิดที่ไม่ต้องการความร้อนสูงมาก เช่น การทอดไข่ดาว ไส้กรอก เบคอน หรือแพนเค้ก ในเมนูอาหารเช้า โหมคอุ่นเหมาะสำหรับใช้ในการละลายเนื้อสัตว์แช่แข็ง และโหมคทำความเย็น เหมาะสำหรับเตรียมเนื้อสัตว์ก่อนการปรุงสุก เช่น การหมักเนื้อสัตว์กับเครื่องเทศต่าง ๆ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของกระทะเทอร์โมอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานของเครื่องไฟฟ้าชนิดใกล้เคียงกัน ในการต้มน้ำที่อุณหภูมิห้องให้มีความร้อน 80 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 3

บทสรุป

กระทะเทอร์โมอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ประกอบอาหารได้จริง จากการทดลองพบว่าในโหมคทำความเย็น ระบบระบายความร้อนที่สร้างขึ้นยังไม่สามารถระบายความร้อนได้ดีเท่าที่ควร จึงทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกทำงานในโหมคทำความเย็นได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงควรจัดวางให้การระบายอากาศสามารถระบายความร้อนออกจากหม้อน้ำได้มากขึ้น เช่น การเจาะช่องด้านข้างทั้ง 2 ข้าง เพื่อให้อากาศไหลเวียนได้ดีขึ้น การติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นต้องติดตั้งให้พื้นผิวของชิ้นงานทั้งสองแนบสนิทกันและต้องทาซิลิโคนระบายความร้อนเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อน ความสามารถในการทำความเย็นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสามารถระบายความร้อนออกจากด้านร้อนของโมดูลได้มากยิ่งขึ้น แนวทางการพัฒนากระทะเทอร์โมอิเล็กทริกก็คือ การเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อให้ทำความร้อนและความเย็นได้มากยิ่งขึ้น จากงานวิจัยนี้เราสามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างชิ้นงานแบบอื่น ๆ ที่ต้องการสร้างความร้อนหรือความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยเรื่องนี้จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2562 ทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- [1] Jensak, E. and Smit, I. (2005). Thermoelectric Water Cooler. **The 1st Conference On Energy Network of Thailand, Pattaya, Chonburi**. Thailand, Pages AE02-1 - AE02-4 (in Thai)
- [2] Rowe D. M. (1995). **CRC Handbook of Thermoelectrics**. CRC Press, USA, pp. 489-501
- [3] Arenas A, Vázquez J., Palacios R., (2002), Performance Analysis of Thermoelectric Pellets with Non-Constant Cross Sections. In **7th European Workshop on Thermoelectrics**. Pamplona, Spain.
- [4] Gao, M., Rowe, D. M. (1999). Cooling Performance of Integrated Thermoelectric Microcooler. **Solid-State Electronics**. Vol. 43, Issue 5, pp. 923-929. DOI: 10.1016/S0038-1101(99)00045-3
- [5] Office of the Consumer Protection Board. (2016). **Silent Harm from Aluminum Containers**. Access (13 December 2018). Available (http://www.ocpb.go.th/download/article/article_20171215140715.pdf) (in Thai)

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศร้อนไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรม
การอบแห้งเนื้อปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่าย
สแตนเลส

A Study Effect of Hot Air Recirculating Ratio on Drying Behavior of Tilapia by Using a Hot Air Dryer Installed with Stainless Wire Mesh Porous Material

รตินันท์ เหลืออมพล^{1*} สังวาลย์ บุญจันทร์¹ คมเพ็ชร อินลา² และบัณฑิต กฤตาคม¹
Ratinun Luampon^{1*} Sungwan Bunchan¹ Kompet Inla² Bundit Krittakom¹

Received: February 28, 2019; Revised: June 10, 2019; Accepted: June 11, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศร้อนไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรม
การอบแห้งเนื้อปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส เครื่องอบแห้งนี้
จะเป็นการพัฒนาการอบแห้งโดยการทำงานร่วมกันระหว่างลมร้อนไหลเวียนกลับและวัสดุพรุนก่อนเข้า
ห้องอบแห้ง เงื่อนไขในการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ และความเร็วลมร้อนคงที่ 70 °C และ 2 m/s ตามลำดับ
สัดส่วนของอากาศที่ไหลเวียนกลับ (C_{air}) เข้ามายังห้องอบแห้งเท่ากับ 0 40 60 และ 80 % ใช้เนื้อปลานิล
เป็นวัสดุอบแห้ง และทำการเก็บข้อมูลระหว่างการทดลองทุก ๆ 20 นาที จนกว่ามวลของเนื้อปลานิลคงที่
ในการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งจะพิจารณาตัวแปรดังนี้ คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d)
อัตราส่วนความชื้น (MR) อัตราการอบแห้ง (DR) และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) และสมการ
อบแห้งแบบชั้นบางได้ถูกนำเสนอเพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้ง จากการทดลองพบว่า DR และ M_d
จะลดลงเมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น และ DR จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า C_{air} เพิ่มขึ้นและค่า M_d สูง
โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ระหว่าง 420 - 440 นาที และมีค่า DR สูงที่สุดเท่ากับ 0.22 kg_{water}/min

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

² คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

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

² Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus

* Corresponding Author E - mail Address: ratinun.lu@rmuti.ac.th

ค่า SEC จะลดลงเมื่อ C_{air} เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า C_{air} เท่ากับ 80 % จะสามารถลดค่า SEC ได้มากที่สุดถึง 49.60 % โดยมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 3.14 MJ/kg_{water evaporated} ที่ $C_{air} = 80$ % สำหรับการศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดคือ สมการ Modified Midilli ซึ่งมีค่า R^2 มากกว่า 0.9964

คำสำคัญ : พฤติกรรมการอบแห้ง; อากาศไหลเวียนกลับ; สมการอบแห้งแบบชั้นบาง; วัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลส; ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Abstract

This research aimed to study the effect of hot air recirculating ratio on behavior of tilapia drying by using a hot air dryer by installed with stainless wire mesh porous material. A present dryer was modified by co-operation of recirculating hot air and porous material at the inlet of drying chamber. In experiment, hot air temperature and velocity were maintained at 70 °C and 2 m/s respectively. Hot air recirculating ratio (C_{air}) was varied by 0, 40, 60, and 80 %. Tilapia sliced was used as a drying product and mass of tilapia was recorded at interval 20 min during drying process until saturated mass condition. In this study, parameters considered of investigate the drying behavior were: dry basis moisture content (M_d), moisture ratio (MR), drying rate (DR) and specific energy consumption (SEC). Thin layer drying models were also discussed in order to predict the drying behavior. From experimental result it was found that DR and M_d were decreased as increasing drying time. DR was increased with C_{air} and M_d . Drying time was varied between 420 - 440 min and the highest DR become 0.22 kg_{water}/min. SEC was decreased as C_{air} increased. The maximum reduction of SEC being 49.60 % was obtained at $C_{air} = 80$ %. The minimum SEC gave 3.14 MJ/kg_{water evaporated} at $C_{air} = 80$ %. For a study on thin layer drying models, the Modified Midilli model was most agreement with experimental result which R^2 was more than 0.9964.

Keywords: Drying Behavior; Hot Air Recirculating; Thin Layer Drying Model; Stainless Wire Mesh Porous Material; Specific Energy Consumption;

บทนำ

ปลานิลเป็นปลาที่อาศัยอยู่ในน้ำจัดพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อาศัยอยู่ตามแม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ หนองและบึงทั่วทุกภาคของประเทศ นอกจากนี้ปลานิลยังพบในประเทศจีน อินเดีย ศรีลังกา อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์อีกด้วย ปลานิลมีส่วนตัวแบนมีเกล็ดตามแนวเส้นข้างตัว ปลานิลถือเป็นปลาเศรษฐกิจที่หาง่ายในท้องถิ่นและคนไทยนิยมบริโภค 1 ใน 5 อันดับแรก คือ ปลานิล

ปลาช่อน ปลาดุก ปลาตะเพียน และปลาสวาย [1] ปลานิลนั้นมีลักษณะเด่นคือ สามารถเพาะเลี้ยงได้ในเกือบทุกภูมิภาคของโลก เจริญเติบโตเร็วและมีปัญหาเรื่องโรคน้อย ปัจจุบันความต้องการบริโภคปลานิลในตลาดโลก โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้วมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่วนหนึ่งนั้นเนื่องมาจากปลานิลเป็นปลาเนื้อขาว จึงเป็นที่ต้องการในกลุ่มของผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ ประกอบกับเนื้อปลานิลมีรสชาติดี สามารถดัดแปลงไปเป็นวัตถุดิบที่ใช้ประกอบอาหารของหลาย ๆ ชาติ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับปลาเนื้อขาวชนิดอื่น ๆ จึงเหมาะต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบและนำมาแปรรูปเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม ด้วยเหตุนี้จึงมีการแปรรูปปลานิลในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น สะดวกต่อการบริโภค โดยการทำแห้งปลานิลเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการแปรรูปปลานิลเช่นกัน สำหรับการทำให้แห้งผลิตผลทางการเกษตรนั้น วิธีที่ประชาชนส่วนใหญ่นิยมใช้คือการตากแห้งโดยใช้แสงแดด เพราะลงทุนน้อยแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการตากแห้งนานเนื่องจากมีอัตราการทำให้แห้งช้า ผลิตภัณฑ์ตากแห้งไม่สะอาด มีสัตว์หรือแมลงมารบกวน เมื่อสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย จะไม่สามารถทำการตากแห้งได้ และในปัจจุบันนี้ได้มีการใช้ห้องอบแห้งแบบลมร้อนมากขึ้น เพื่อให้มีอัตราการอบแห้งคงที่ สามารถอบแห้งได้ตลอดเวลา และยังสามารถป้องกันการปนเปื้อนได้ โดยในปี ค.ศ. 2012 Toomthong, P. et al. [2] ได้ศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนและหาสมการการอบแห้งขึ้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้งปลานิล โดยการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ความเร็วลมร้อน 1.0 1.5 และ 2.0 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 °C พบว่า อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมหรืออุณหภูมิอบแห้ง โดยอัตราการอบแห้งจะสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s

สำหรับประเทศไทยในระดับอุตสาหกรรมการอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งให้ความร้อนกับขดลวดความร้อนและการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงแก๊สหรือชีวมวลเป็นหลัก ซึ่งมีการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก โดยงานวิจัยของ Kesai, S. et al. [3] ได้ทำการอบแห้งมันฝรั่งแผ่นด้วยการใช้เตาแก๊สแบบอินฟราเรด สามารถอบแห้งมันฝรั่งแผ่นได้ครั้งละ 50 kg มีเงื่อนไขความชื้นเริ่มต้น 650 %dry basis อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 12.7 %dry basis ความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง 0.5 m/s ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง 5 4.5 และ 4 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 7.75 8.50 และ 9.47 kg_{water}/hr และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น คือ 3.46 3.81 และ 6.67 MJ/kg_{water, evap} ตามลำดับ โดยปัจจุบันการลดการสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการอบแห้งกำลังเป็นที่นิยมศึกษาเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานให้คุ้มค่ามากที่สุด เช่นในงานวิจัยของ Duangjun, W. et al. [4] และ Luampon, R. and Krittacom, B. [5] ได้ศึกษาการอบแห้ง ปลานิลด้วยการใช้วัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสมาวางขวางการไหลของลมร้อนเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่า วัสดุพูนที่ใช้สามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานลงได้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) น้อยกว่าการอบแห้งที่ไม่ติดตั้งวัสดุพูน เนื่องจากวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนและช่วยส่งเสริมการแผ่รังสีความร้อนไปในสองทิศทาง [6] ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ทิศทางแรกเป็นการแผ่รังสีความร้อนกลับไปทำการอุ่นอากาศที่ไหลเข้ามาให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น และอีกทิศทางหนึ่งวัสดุพูนจะมีการแผ่รังสีความร้อนไปยังห้องอบแห้งจึงส่งผลให้กลไกการอบแห้งจะไม่มีเพียงแต่การพาความร้อนเท่านั้น [5] แต่เครื่องอบแห้งแบบนี้ยังมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการนำความร้อนของอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery) จึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก [7]

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ Tipayawong, N. et al. [8] พบว่า การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแบบลมร้อนด้วยการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการใช้อากาศร้อนไหลเวียนกลับ ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น 29 % สามารถลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายได้ 45 % และ 27 % ตามลำดับ แต่งานวิจัยดังกล่าว [8] ยังไม่มีการนำวัสดุพูนมาใช้งานร่วมกับการอบแห้ง ด้วยเหตุนี้คณะผู้ทำวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยการติดตั้งท่อลมร้อนให้มีการใช้อากาศร้อนไหลเวียนกลับเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพดังงานวิจัยของ Tipayawong, N. et al. มาร่วมกับการใช้ข้อดีของวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยของ Luampon, R. and Krittacom, B. นอกจากนี้ การศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางจะถูกนำเสนอเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งด้วย ดังนั้น เครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสจะถูกศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นของคณะผู้ประพันธ์เอง [5] โดยในบทความนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนลมร้อนไหลเวียนกลับที่ไหลผ่านวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนื้อปลานิลเป็นหลัก

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การวิเคราะห์การอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งใช้ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis Moisture Content, M_d) อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) และอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังแสดงในสมการที่ (1) - (3) [9]

$$M_d = \frac{w_t - d}{d} \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

$$DR = \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{w_t - w_{t-1}}{\Delta t} \quad (3)$$

โดยที่

M_d = ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg/kg_{dry basis})

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (kg/kg_{dry basis})

M_e = ความชื้นสมดุล (kg/kg_{dry basis})

MR = อัตราส่วนความชื้น

DR = อัตราการอบแห้ง (kg_{water}/min)

w_t = มวลของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่เวลา t ใด ๆ (kg)

d = มวลแห้งของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg)

Δt = ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล (min)

2. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คำนวณได้ดังสมการที่ (4) และ (5) [10]

$$SEC = \frac{E_{fan} + E_{gas}}{m_{water, evap}} \quad (4)$$

$$E_{gas} = (LHV)(\dot{m}_{gas})(t) \quad (5)$$

โดยที่

SEC	= ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg _{water evaporated})
$m_{water, evap}$	= ปริมาณน้ำที่ออกจากผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg _{water evaporated})
E_{fan}	= ความสิ้นเปลืองพลังงานของพัดลม (MJ)
E_{gas}	= ความสิ้นเปลืองพลังงานแก๊ส (MJ)
LHV	= ค่าความร้อนด้านต่ำของแก๊ส = 46.607 MJ/kg
$\dot{m}_{gas}$	= อัตราการไหลของแก๊ส (kg/s)
t	= เวลาอบแห้ง (s)

3. สมการอบแห้งแบบชั้นบาง

ในการอบแห้งแบบชั้นบางมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาการอบแห้งในหลายรูปด้วยกัน เช่น สมการ Two-Term Model สมการของ Henderson และ Pabis model หรือสมการของ Lewis Model เป็นต้น โดยอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการที่ (2) ดังนั้นกราฟแสดงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง

Name	Models	References
1. Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, D. M. [11]
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page, G. E. [12]
3. Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	White, G. M. et al. [13]
4. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson, S. M. and Pabis, S. [14]
5. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul, I. T. and Pehlivan, D. [15]

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง (ต่อ)

Name	Models	References
6. Two-Term Model	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson, S. M. [16]
7. Approximation of Diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-k a t)$	Yaldiz, O. et al. [17]
8. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang, C. Y. and Singh, R. P. [18]
9. Simplified Fick's Diffusion	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	Diamante, L. M. and Munro, P. A. [19]
10. Modified Page Equation-II	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$	Diamante, L. M. and Munro, P. A. [19]
11. Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli, A. et al. [20]
12. Modified Midilli	$MR = a \exp(-kt) + bt + c$	Charmongkolpradit, S. and Luampon, R. [21]

สำหรับการหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางนั้น ในขั้นตอนการทดลองจะทำการอบแห้งจนกว่ามวลของวัสดุอบแห้งคงที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ [22] การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Non-linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้ง สมการที่มีค่า Correlation Coefficient (R^2) มากที่สุด ค่า Reduced chi-square (χ^2) และ Root Mean Square Error (RMSE) น้อยที่สุด ดังสมการที่ (6) - (8) จะเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปทำนายการอบแห้งนี้ ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

1. Correlation Coefficient (R^2)

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N [(MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{avg,exp}})(MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{avg,pre}})] \right]^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{avg,exp}})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{avg,pre}})^2} \quad (6)$$

2. Reduced Chi-Square (χ^2)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - z} \quad (7)$$

3. Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (8)$$

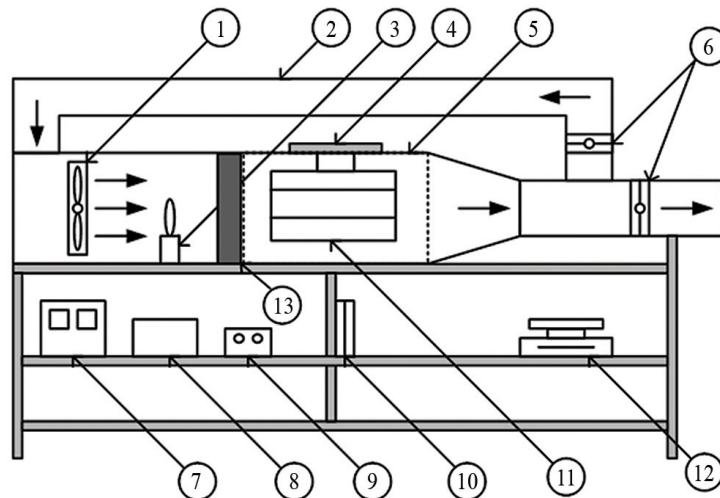
โดยที่

i	= ลำดับของค่า MR ที่พิจารณา
N	= จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
z	= จำนวนของค่าคงที่ของแต่ละสมการ
MR_{exp}	= อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง
MR_{pre}	= อัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนาย
$MR_{avg,exp}$	= อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากผลการทดลอง
$MR_{avg,pre}$	= อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากผลการทำนาย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองได้สร้างเครื่องอบแห้งที่ทำมาจากแผ่นสังกะสีหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน มีขนาดกว้าง 25 cm ยาว 150 cm และสูง 25 cm ความร้อนที่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สทุ้งคัม ด้วยหัวพ่นไฟและใช้พัดลมเป็นอุปกรณ์ในการเป่าอากาศร้อนให้ไหลผ่านวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลส เกรด 304 ที่มีขนาดความพูน 8 PPI (Pore Per Inch) จำนวน 6 แผ่น (รูปที่ 1 หมายเลข 13) เพื่อให้เกิด การดูดซับความร้อนและเปล่งรังสีก่อนที่จะไหลเข้าไปยังห้องอบแห้งที่ทางออกของเครื่องอบแห้งมีท่อลมร้อน ให้อากาศไหลเวียนกลับไปยังทางเข้า (รูปที่ 1 หมายเลข 2) เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศที่ไหล เข้ามาใหม่ โดยใช้พัดลมช่วยในการดูดอากาศกลับและใช้วาล์วปีกผีเสื้อควบคุมปริมาณการไหลของอากาศ (รูปที่ 1 หมายเลข 6) สำหรับการกำหนดสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับจะใช้การวัดจากอุปกรณ์วัดความเร็วลมชนิด Hot Wire แล้วทำการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลเพื่อนำไปใช้แบ่งสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับระหว่าง ตำแหน่งท่อลมร้อนไหลเวียนกลับเทียบกับตำแหน่งทางออกของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะควบคุมสัดส่วน การไหลกลับโดยการเปิดปิดวาล์วปีกผีเสื้อให้ได้สัดส่วนตามที่คำนวณไว้ ภายในห้องอบแห้งจะประกอบไปด้วย ภาดอบแห้งที่ทำมาจากตาข่ายสแตนเลส และต่อเข้ากับโหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อทำการวัดมวลของ ผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยจะทำการบันทึกมวลที่วัดได้ทุก 20 นาทีเข้าไปยัง Data Logger และนำข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป อุปกรณ์ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย 1) พัดลม 2) ท่อลมร้อนไหลกลับ 3) หัวพ่นไฟ 4) โหลดเซลล์ 5) ห้องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด กว้าง 25 cm ยาว 150 cm สูง 25 cm 6) วาล์วเปิดปิดอากาศ 7) Data Logger 8) ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้า 9) ชุดปรับความเร็วลม 10) ชุดปรับอัตราการไหลของแก๊ส 11) ภาครองผลิตภัณฑ์ 12) เครื่องชั่งน้ำหนัก และ 13) วัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสเกรด 304



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง

2. วิธีการทดลอง

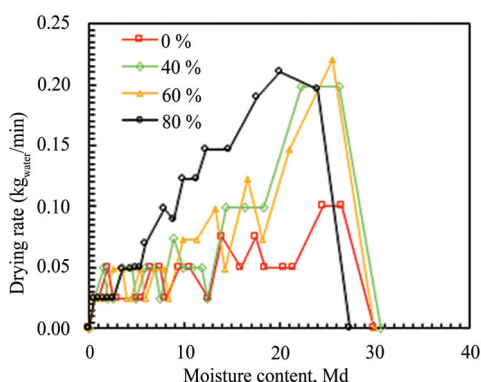
การทดลองนี้จะควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วลมให้คงที่ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง คือ อุณหภูมิ 70 °C และความเร็ว 2 m/s [2] สัดส่วนของอากาศที่ไหลเวียนกลับ (C_{air}) เข้ามายังห้องอบแห้งผ่านท่อหมายเลข 2 ควบคุมปริมาณการไหลอากาศด้วยวาล์วควบคุมหมายเลข 6 ในสัดส่วน 0 % (ไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ) 40 60 และ 80 % ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งคือ เนื้อปลานิล โดยนำเนื้อปลานิลมาหั่นให้ได้ขนาดกว้าง 3 cm ยาว 3 cm และหนา 1 cm เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมร้อนได้ตามสภาวะที่ต้องการจะนำเนื้อปลานิลที่หั่นเตรียมไว้วางบนถาดอบแห้ง โดยไม่ให้เนื้อปลานิลซ้อนทับกัน เมื่อเริ่มกระบวนการอบแห้งมวลของเนื้อปลานิลจะถูกบันทึกเข้าไปใน Data Logger ในช่วงเวลาทุก 20 นาที จนกว่ามวลจะคงที่ถึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ข้อมูลที่บันทึกได้จะนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

ผลการทดลอง

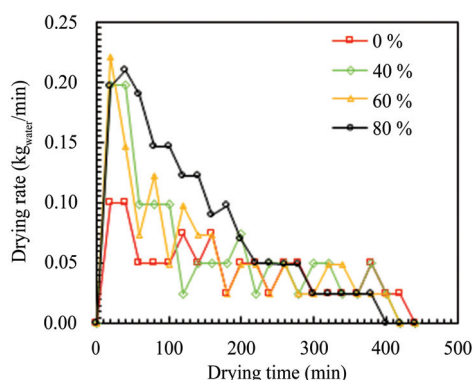
1. อิทธิพลของสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง

ผลการทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งที่ไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ ($C_{air} = 0\%$) และมีอากาศไหลเวียนกลับ (C_{air}) ที่สัดส่วน 40 60 และ 80 % อุณหภูมิลมร้อนคงที่ 70 °C ความเร็วลมร้อนคงที่ 2 m/s จากการทดลองพบว่า การอบแห้งโดยมีอากาศไหลเวียนกลับอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ โดยค่า C_{air} เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) สูงขึ้นและอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) จะลดลง DR อัตราการอบแห้งจะสูงที่สุดเมื่อ C_{air} เท่ากับ 80 % และ DR จะสูงเมื่อปริมาณความชื้น (M_d) ภายในผลิตภัณฑ์อบแห้งสูง เนื่องจากน้ำสามารถระเหยออกมาได้ปริมาณที่มากและรวดเร็ว และอากาศที่ไหลเวียนกลับมาได้สูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งไประหว่างการอบแห้งแต่ยังมีปริมาณความร้อนหลงเหลือสะสมอยู่ และเมื่อไหลเวียนกลับมายังห้องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์อบแห้งจึงได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์อบแห้งจึงระเหยออกมาได้มากขึ้นอัตรา

การอบแห้งจึงสูงขึ้น ทำให้ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์สามารถลดลงได้อย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นได้ชัดในช่วง 150 นาทีแรกของการอบแห้งแสดงได้ดังรูปที่ 2 และอากาศที่ไหลเวียนกลับมายังพาปริมาณความชื้นกลับมาด้วยส่วนหนึ่งแต่ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้งเนื่องจากความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งสูงและเป็นการอบแห้งแบบระบบเปิดที่มีอากาศจากภายนอกมาผสมก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง จึงทำให้ปริมาณความชื้นสามารถถ่ายเทออกจากห้องอบแห้งได้สะดวก



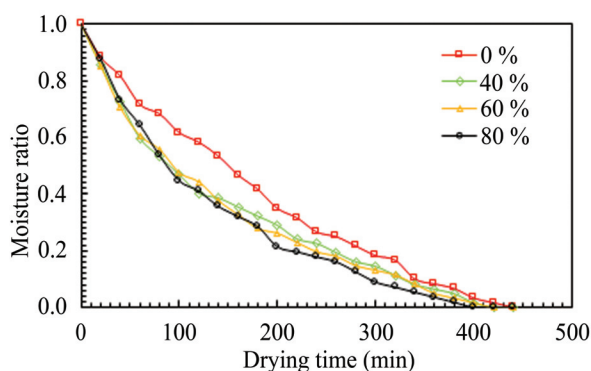
(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้น



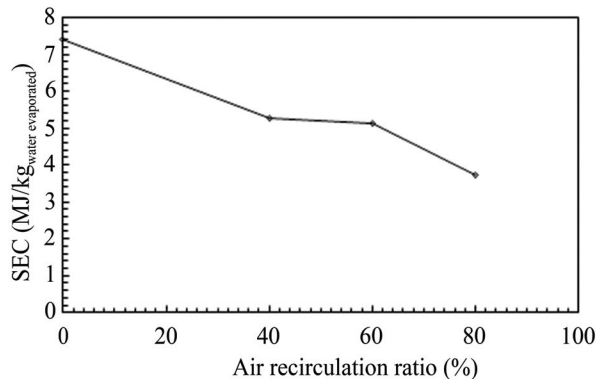
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาอบแห้ง

รูปที่ 2 อิทธิพลของสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง ปริมาณความชื้น และเวลาอบแห้ง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3 แสดงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง พบว่าสัดส่วนของอากาศไหลเวียนกลับ C_{air} เท่ากับ 0 % ใช้เวลาอบแห้ง 440 นาที และ C_{air} เท่ากับ 80 % ใช้เวลาอบแห้ง 420 นาที ซึ่งจากข้อมูลอบแห้งแล้วระยะเวลาจะแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้งมากที่สุดคือ อุณหภูมิและความเร็วอากาศ ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดให้อุณหภูมิและความเร็วอากาศคงที่เท่ากันทุกการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในการทดลองนี้สัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับจะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าระยะเวลาการอบแห้ง (Drying Time)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งของเนื้อปลานิล



รูปที่ 4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้ง

การศึกษาค่า SEC ผลการทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งที่ไม่มีอากาศไหลเวียนกลับและมีอากาศไหลเวียนกลับ จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งแบบมีอากาศไหลเวียนกลับมีค่า SEC ต่ำกว่าแบบไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ โดยสัดส่วนของอากาศไหลเวียนกลับเพิ่มขึ้นทำให้ค่า SEC ลดต่ำลง มีผลการทดลองดังนี้ การอบแห้งที่ C_{air} เท่ากับ 0 40 60 และ 80 % มีค่า SEC เท่ากับ 7.42 5.26 5.12 และ 3.14 MJ/kg_{water evaporated} ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้อากาศไหลเวียนกลับ C_{air} เท่ากับ 80 % จะสามารถประหยัดพลังงานลงได้สูงถึง 49.60 % เนื่องจากเมื่ออากาศร้อนไหลเข้ามายังห้องอบแห้งอีกครั้ง อากาศยังหลงเหลือพลังงานความร้อนอยู่ จึงเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนกับอากาศที่ไหลเข้ามาใหม่ทำให้อากาศใหม่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (Pre-Heat) จึงทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานลดลงได้

2. การวิเคราะห์สมการอบแห้งแบบชั้นบาง

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยใช้สมการในตารางที่ 1 มาวิเคราะห์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาการอบแห้ง (t) โดยใช้วิธี Non-Linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้งนี้ จากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดยสมการที่มีค่า Correlation Coefficient (R^2) มากที่สุด ค่า Reduced Chi-Square (χ^2) และ Root Mean Square Error (RMSE) น้อยที่สุดจะเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปทำนายพฤติกรรมการอบแห้งนี้ [6] ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2 พบว่าสมการ Modified Midilli เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งนี้มากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 χ^2 และ RMSE ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99780-0.99860 χ^2 เท่ากับ 0.00002-0.00014 และ RMSE เท่ากับ 0.00370-0.01075

ตารางที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติของสมการอบแห้งแบบชั้นบาง

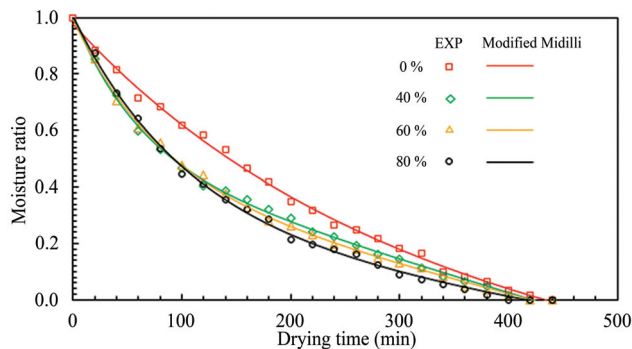
Models	Correlations	Air Recirculation Ratios (C_{air})			
		0 %	40 %	60 %	80 %
Lewis	R^2	0.98240	0.98640	0.99160	0.99480
	χ^2	0.00219	0.00111	0.00070	0.00055
	RMSE	0.04577	0.03252	0.02581	0.02288
Page	R^2	0.98800	0.98760	0.99190	0.99460
	χ^2	0.00112	0.00012	0.00003	0.00005
	RMSE	0.03204	0.01036	0.00482	0.00685
Modified Page	R^2	0.98240	0.98640	0.99160	0.99480
	χ^2	0.00112	0.00012	0.00003	0.00005
	RMSE	0.03204	0.01036	0.00482	0.00685
Henderson and Pabis	R^2	0.97990	0.98730	0.99230	0.99450
	χ^2	0.00015	0.00011	0.00005	0.00001
	RMSE	0.01182	0.00996	0.00681	0.00298
Logarithmic	R^2	0.99780	0.98900	0.99430	0.99700
	χ^2	0.00204	0.00019	0.00023	0.00033
	RMSE	0.04208	0.01286	0.01425	0.01682
Two-term model	R^2	0.99020	0.98920	0.99300	0.99450
	χ^2	0.00073	0.00051	0.00040	0.00031
	RMSE	0.02455	0.02059	0.01815	0.01600
Approximation of diffusion	R^2	0.98240	0.98910	0.99300	0.99480
	χ^2	0.00102	0.00001	0.00000	0.00002
	RMSE	0.03048	0.00296	0.00108	0.00403
Wang and Singh	R^2	0.99640	0.97050	0.97820	0.98360
	χ^2	0.00251	0.00280	0.00242	0.00219
	RMSE	0.04784	0.05059	0.04697	0.04471
Simplified Fick's diffusion	R^2	0.97990	0.98730	0.99230	0.99450
	χ^2	0.00213	0.00227	0.00222	0.00216
	RMSE	0.04307	0.04443	0.04393	0.04338
Modified Page equation-II	R^2	0.98800	0.98760	0.99190	0.99460
	χ^2	0.00075	0.00048	0.00013	0.00033
	RMSE	0.02554	0.03820	0.00908	0.00541
Midilli	R^2	0.99790	0.99640	0.99840	0.99810
	χ^2	0.00114	0.00079	0.00063	0.00037
	RMSE	0.03066	0.02549	0.02274	0.01759
Modified Midilli	R^2	0.99780	0.99830	0.99860	0.99830
	χ^2	0.00002	0.00014	0.00007	0.00002
	RMSE	0.00370	0.01075	0.00782	0.00434

เมื่อนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของสมการ Modified Midilli ไปเขียนเส้นโค้งการอบแห้งเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง ($MR_{\text{experiment}}$) กับค่าที่ทำนายได้จากสมการของ Modified Midilli ($MR_{\text{Modified Midilli}}$) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 จากนั้นจะนำรูปแบบของสมการ Modified Midilli ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a b c และ k ดังแสดงในตารางที่ 3 มาสร้าง

สมการเพื่อใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่อยู่ในรูปของตัวแปร C_{air} และ t โดยใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอยพหุ (Multiple Regression) ผลที่ได้จากการคำนวณจะเป็นสมการออบแท้งแบบชั้นบางสำหรับใช้คำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งเนื้อปลานิลที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 2 m/s และค่า C_{air} เท่ากับ 0 - 80 % โดยรูปแบบของสมการและค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้สร้างขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (9) - (13)

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การอบแห้งของสมการ Modified Midilli

C_{air} (%)	a	k	b	c
0	0.96140	0.00415	-0.00044	0.01809
40	0.52540	0.01571	-0.00113	0.46736
60	0.54740	0.01549	-0.00102	0.43613
80	0.72940	0.01127	-0.00061	0.23432



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง ($MR_{\text{experiment}}$) กับค่าที่ทำนายได้จากสมการของ Modified Midilli ($MR_{\text{Modified Midilli}}$)

$$MR = a \exp(-kt) + bt + c \quad (9)$$

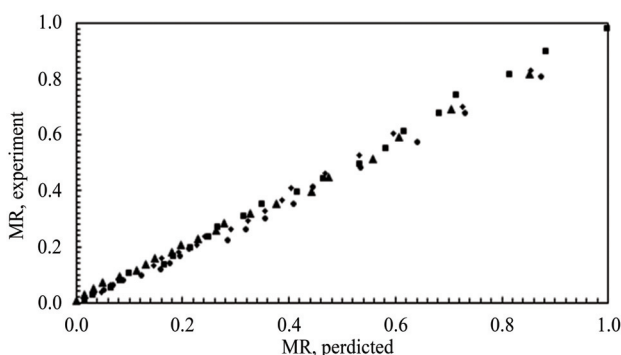
$$a = 2 \times 10^{-3} C_{air}^2 - 1.89 \times 10^{-2} C_{air} + 0.9614 \quad (10)$$

$$b = 3.77 \times 10^{-7} C_{air}^2 - 3.22 \times 10^{-5} C_{air} - 4.42 \times 10^{-4} \quad (11)$$

$$c = 2.13 \times 10^{-4} C_{air}^2 - 1.97 \times 10^{-2} C_{air} - 1.81 \times 10^{-2} \quad (12)$$

$$k = 5 \times 10^{-6} C_{air}^2 - 4.89 \times 10^{-4} C_{air} - 1.46 \times 10^{-3} \quad (13)$$

เมื่อนำสมการ Modified Midilli ที่อยู่ในรูปของ C_{air} และ t จากสมการที่ (9) - (13) มาแทนด้วยค่า C_{air} ที่ใช้ในการทดลองจริง คือ C_{air} เท่ากับ 0 40 60 และ 80 % เพื่อแสดงความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่สมการสามารถคำนวณได้ โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงและแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายและผลการทดลองจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6 โดยรูปแบบของสมการ Modified Midilli ที่สร้างขึ้นมีค่า R^2 มากกว่า 0.9964 เมื่อเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากสมการ Modified Midilli (สมการที่ (9) - (13)) และผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศไอลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนือปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายสเตนเลสพบว่า การอบแห้งแบบมีอากาศไอลเวียนกลับทำให้อัตราส่วนความชื้น (MR) จะลดลงเร็วกว่าแบบไม่มีอากาศไอลเวียนกลับ โดยสัดส่วนอากาศไอลเวียนกลับ (C_{air}) เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้ง (DR) สูงขึ้นและ MR จะลดลง และ DR จะสูงที่สุดเมื่อใช้ C_{air} เท่ากับ 80 % โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ระหว่าง 420 - 440 นาที และมี DR สูงที่สุดเท่ากับ 0.22 $\text{kg}_{\text{water}}/\text{min}$ ในการวิเคราะห์ด้านการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่า การอบแห้งแบบใช้อากาศไอลเวียนกลับจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ต่ำกว่าแบบไม่ใช้อากาศไอลเวียนกลับ และเมื่อค่า C_{air} เพิ่มขึ้นทำให้ค่า SEC มีค่าต่ำลง โดยมีผลการทดลองดังนี้ C_{air} เท่ากับ 0 40 60 และ 80 % มีค่า SEC เท่ากับ 7.42 5.26 5.12 และ 3.14 $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water evaporated}}$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่า C_{air} เท่ากับ 80 % จะสามารถประหยัดพลังงานได้สูงที่สุดเท่ากับ 49.60 % เมื่อเทียบกับไม่ใช้อากาศไอลเวียนกลับ ($C_{air} = 0 \%$) สำหรับการวิเคราะห์สมการอบแห้งแบบชั้นบาง พบว่าสมการ Modified Midilli เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งนี้มากที่สุด โดยรูปแบบของสมการ Modified Midilli ที่สร้างขึ้นมีค่า R^2 มากกว่า 0.9964 เมื่อเทียบกับผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ที่ให้เงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2562 โดยโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตามสัญญาเลขที่ NKR2562REV006 และขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ช่วยสนับสนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Thaloengrach, N., Anupong, E., Supawan, T., and Yutthana, T. (2012). Drying of Air Dried Sheet Rubber Using Hot Air Dryer and Solar Dryer for Small Entrepreneurs and Small Rubber Cooperatives. **Burapha Science Journal**. Vol. 17, No. 2, pp. 50-59 (in Thai)
- [2] Toomthong, P., Teeboonma, U., Somsila, P., and Homchampa, T. (2012). Study on Drying Behavior of *Tilapia nilotica* Using Hot Air. **Agricultural Science Journal**. Vol. 43, 3 (Suppl.) pp. 115-118 (in Thai)
- [3] Kesai, S., Kumwan, R., and Chotivisarut, N. (2012). **A Potato Chips Dryer Using Infrared Gas Stove**. A Thesis for The Degree of Master. Mechanical Engineering. Rajamangala University of Technology Lanna (in Thai)
- [4] Duangjun, W., Tunme, S., Cheangsanoi, J., Krittacom, B., and Pongkun, J. (2012). A Study on Tilapia Drying with Hot Air Combine Porous Media. In **7th Engineering Science Technology and Architecture Conference 2012**. Dusit Princess Korat, Nakhon Ratchasima, Thailand. pp. 475-479 (in Thai)
- [5] Luampon, R. and Krittacom, B. (2016). Study Drying Kinetic of Tilapia using Hot Air Flowing through the Porous Media. In **13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium**. Udonthani, Thailand. pp. 325-327.
- [6] Jugjai, S. and Polmart, N. (2003). Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels Through Porous Media. **Experimental Thermal and Fluid Science**. Vol. 27, pp. 901-909. DOI: 10.1016/S0894-1777(03)00062-1
- [7] Luampon, R. (2018). Thin Layer Drying Model of Carrot Using a Heat Pump Vacuum Dryer. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok**. Vol. 28, No. 1, pp. 147-155 (in Thai)
- [8] Tippayawong, N., Tantakitti, C., Thavornun, S., and Peerawanitkul, V. (2009). Energy Conservation in Drying of Peeled Longan by Forced Convection and Hot Air Recirculation. **Biosystems Engineering**. Vol. 104, Issue 2, pp. 199-204. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.018
- [9] Paengkanya, S., Soponronnarit, S. and Nathakaranakule, A. (2015). Application of Microwaves for Drying of Durian Chips. **Food and Bioproducts Processing**. Vol. 96, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.fbp.2015.06.001
- [10] Baker, C. G. J. (2005). Energy Efficient Dryer Operation-an Update on Developments. **Drying Technology**. Vol. 23, Issue 9-11, pp. 2071-2087. DOI: 10.1080/07373930500210556

- [11] Bruce, D. M. (1985). Exposed-Layer Barley Drying, Three Models Fitted to New Data Up to 150 C. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Vol. 32, pp. 337-347
- [12] Page, G. E. (1949). **Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers**. M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering. Purdue University, Purdue, USA
- [13] White, G. M., Ross, I. J., and Ponekert, R. (1981). Fully Exposed Drying of Popcorn. **Transactions of the ASAE**. Vol. 24, pp. 466-468
- [14] Henderson, S. M. and Pabis, S. (1961). Grain Drying Theory II Temperature Effects on Drying Coefficients. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Vol. 6, pp. 169-174
- [15] Togrul, I. T. and Pehlivan, D. (2002). Mathematical Modeling of Solar Drying of Apricots in thin Layers. **Journal of Food Engineering**. Vol. 55, pp. 209-216. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00065-1
- [16] Henderson, S. M. (1974). Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. **Transactions of ASAC**. Vol. 17, pp. 1167-1172
- [17] Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H. I. (2001). Mathematical Modeling of Thin Layer Solar Drying of Sultana Grapes. **Energy**. Vol. 26, Issue 5, pp. 457-465. DOI: 10.1016/S0360-5442(01)00018-4
- [18] Wang, C. Y. and Singh, R. P. (1978). Use of Variable Equilibrium Moisture Content in Modeling Rice Drying. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. Vol. 11, pp. 668-672
- [19] Diamante, L. M. and Munro, P. A. (1991). Mathematical Modeling of Hot Air Drying of Sweet Potato Slices. **International Journal of Food Science and Technology**. Vol. 26, Issue 1, pp. 99-108. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1991.tb01145.x
- [20] Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. (2002). A New Model for Single Layer Drying. **Drying Technology**. Vol. 20, Issue 7, pp. 1503-1513. DOI: 10.1081/DRT-120005864
- [21] Charmongkolpradit, S. and Luampon, R. (2017). Study of Thin Layer Drying Model for Cassava Pulp. **Energy Procedia**. Vol. 138, pp. 354-359. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.138
- [22] Akgun, N. A. and Doymaz, I. (2005). Modeling of Olive Cake Thin-Layer Drying Process. **Journal of Food Engineering**. Vol. 68, Issue 4, pp. 455-461. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.06.023

การเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากสูตรการตอกเสาเข็มกับการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์

A Comparision of Bearing Capacity of Pile from Pile Driving Formulas and Dynamic Load Test

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์^{1*} อนุชาติ ลื่อนนันทศักดิ์ศิริ¹ และฐิตินันท์ ป้องนาม²

Worawit Phojan^{1*} Anuchat Leeanansaksiri¹ and Thitinun Pongnam²

Received: June 6, 2019; Revised: August 20, 2019; Accepted: August 26, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุก โดยใช้สูตรการตอกเสาเข็ม 4 สูตร ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มาเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์กับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม รวมถึงพิจารณาถึงอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมโดยวิธีพลศาสตร์ ซึ่งวิเคราะห์ผลโดยกระบวนการ Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) ผลการศึกษาพบว่าสูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกประลัยโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุดได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula ตามลำดับ โดยที่ Hiley's Formula ให้ผลทดสอบใกล้เคียงและน่าเชื่อถือมากที่สุด ($R^2 = 0.831$) ส่วน Danish Formula และ Janbu's Formula มีโอกาสวิตถาคนำไปใช้งาน การใช้อัตราส่วนปลอดภัยที่แนะนำโดย ว.ส.ท. เพื่อลดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้แต่ละสูตรพบว่าทุกสูตรมีความปลอดภัย สูตรของ Hiley's Formula, Engineering News Formula ให้ค่าที่ต่ำ ทำให้ปลอดภัยมากแต่ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจะเพิ่มสูงขึ้น และผู้วิจัยได้หาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมของแต่ละสูตรซึ่งได้ผลดังนี้ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มีค่าเท่ากับ 2.5499 2.2555 3.7095 และ 4.2525 ตามลำดับ

คำสำคัญ : วิธีพลศาสตร์; อัตราส่วนปลอดภัย; เสาเข็ม

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, North Eastern University, Khonkaen

² Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

* Corresponding Author E - mail Address: Worawit.Pho@neu.ac.th

Abstract

The objective of this research is to evaluate the bearing capacity of pile by using pile driving formulas such as Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula, and Janbu's Formula to compare, relationship between and the optimum factor of safety with Dynamic Load Test results. The ultimate load of a pile was calculated process by Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP). The Results showed that the pile driving formulas that was similar of ultimate bearing capacity by Dynamic Load Test was Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula and Janbu's Formula, respectively. Whereas the Hiley's Formula provides the most reliable and close test results ($R^2 = 0.831$), Danish Formula and Janbu's Formula have a chance to fail if used.

Furthermore, by using the factor of safety recommended by E.I.T. to reduce load carrying capacity from each all of pile driving formulas are safe, Hiley's Formula and Engineering New Formula is lower load, making it very safe but the construction costs will increase. The researcher found the appropriate safety factor of each formulas as follows Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula, and Janbu's Formula are equal to 2.5499, 2.2555, 3.7095, and 4.2525 respectively.

Keywords: Dynamic Load Test; Factor of Safety; Pile

บทนำ

ฐานรากนับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งปลูกสร้าง เพื่อใช้รับน้ำหนักขององค์อาคาร ซึ่งในปัจจุบันอาคารมีความสูงและน้ำหนักโครงสร้างที่มากขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ ราคาที่ดิน และความแออัดของชุมชนเมือง กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากดินจึงไม่เพียงพอสำหรับการก่อสร้าง ฐานรากลึกหรือฐานรากเสาเข็มจึงจำเป็นสำหรับการถ่ายน้ำหนักของตัวอาคารลงสู่ชั้นดินลึก

ในปัจจุบันวิศวกรผู้ควบคุมงานนิยมใช้สมการการตอกเสาเข็มเพื่อควบคุมคุณภาพและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในเบื้องต้น เนื่องจากสะดวกสามารถสังเกตพฤติกรรมของเสาเข็มที่เกิดขึ้นในระหว่างการตอกได้ อย่างไรก็ตามกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสมการการตอกเสาเข็มมีความน่าเชื่อถือต่ำ เพราะมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องในการประเมินกำลังรับน้ำหนัก เช่น พลังงานที่ใช้ในการตอก ชนิดและขนาดของเสาเข็ม คุณสมบัติของวัสดุของหัวเสาเข็ม จึงต้องมีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักโดยวิธีอื่นเพื่อตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักที่เสาเข็มรับได้จริงประกอบด้วย

โดยทั่วไปการทดสอบเสาเข็มในสนามวิธีที่ให้ผลที่แม่นยำที่สุดในการยืนยันกำลังของเสาเข็มคือการทำ Static Pile Load Test แต่วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและต้องใช้เวลาทดสอบนาน ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้การทดสอบแบบ Dynamic Pile Load Test เป็นทางเลือกที่ประหยัด รวดเร็ว และใช้พื้นที่น้อยกว่า [1] และผลการทดสอบเปรียบเทียบของวิธีทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic

Load Test) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ทดสอบนอกเหนือจากวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Load Test) เนื่องจากใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายได้สะดวก ทดสอบได้รวดเร็ว ราคาไม่แพง และทดสอบได้ทั้งกับเสาเข็มตอก เสาเข็มเจาะ ซึ่งการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์นี้ได้มีการทดสอบเปรียบเทียบกับทดสอบโดยวิธีสถิตยศาสตร์ พบว่ามีผลใกล้เคียงกันมาก [2] การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบพลศาสตร์ เป็นวิธีประเมินผลการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ดีวิธีหนึ่ง โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบพลศาสตร์กับวิธีทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ในดินกรุงเทพมหานครมีความน่าเชื่อถือ [3] และวิธีพลศาสตร์สามารถตรวจสอบหาความสมบูรณ์ของเสาเข็มเบื้องต้น หากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม การกระจายหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็ม กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเข็ม ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว ค่าหน่วยแรงเค้นอัดและแรงเค้นดึงที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ และทราบถึงประสิทธิภาพของป็นจั่นตอกเสาเข็ม

งานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาเปรียบเทียบสูตรการตอกเสาเข็มกับวิธีสถิตยศาสตร์ [4] - [7] และเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์กับพลศาสตร์ [2] - [3] ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าผลการคำนวณที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มไปใช้เปรียบเทียบกับทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยจะทดสอบแบบ Restrike Drive Test (RDT) เป็นการทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็มไปแล้ว 7 - 10 วัน เพื่อให้ดินรอบ ๆ เสาเข็มเกิดการอัดตัวคายน้ำทำให้กำลังของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น [8] - [9] สามารถนำไปประเมินความแม่นยำของสมการการตอกเสาเข็มทั้ง 4 สมการ ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula เพื่อประเมินหาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อปรับปรุงสมการการตอกเสาเข็มได้ในอนาคต

ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

1. สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formulas)

สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formulas) ได้จากนำหลักการพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน หลักงาน (Work) และพลังงาน (Energy) มาประยุกต์ใช้เป็นการประมาณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในขณะทำการตอก โดยใช้ข้อมูลจากการตอกเสาเข็ม ได้แก่ น้ำหนักของตุ้ม ความสูงที่ยก และระยะที่เสาเข็มจมลงเมื่อตอก วัสดุรองหัวเสาเข็ม ในการทำงานจะวัดระยะที่เสาเข็มจมลงเมื่อตอกสิบครั้ง แล้วนำค่ามาเฉลี่ยเพื่อหาค่าที่จมตัวต่อการตอกหนึ่งครั้ง การใช้สมการการตอกเสาเข็มจะใช้ในการควบคุมการตอกเสาเข็ม เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมการตอกเสาเข็ม และใช้ควบคุมการตอกไม่ให้หน่วยแรงในเสาเข็มสูงจนกระทั่งเสาเข็มชำรุด [4]

ตัวแปรทั่วไปของสูตรการตอกเสาเข็ม

Q_u = น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Bearing Capacity) (ตัน)

W = น้ำหนักของลูกตุ้ม (ตัน)

h = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็ม (เซนติเมตร)

P = น้ำหนักของเสาเข็ม (ตัน)

e = ประสิทธิภาพการตอก = $(W+Pr^2)/W+P$

S = ระยะที่เสาเข็มจม โดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย (เซนติเมตร)

- L = ความยาวเสาเข็ม (เมตร)
 A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (ตารางเซนติเมตร)
 E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม = 282.84 ตันต่อตารางเซนติเมตร

1) Engineering News Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) ดังสมการที่ (1)

$$Q_u = \frac{Wh.Y}{s + 2.54C} \quad (1)$$

โดยที่

$C = 0.9$ สำหรับลูกตุ้มปล่อย (Drop Hammer)

$C = 1.0$ สำหรับลูกตุ้มแบบอื่น

2) Hiley's Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) ดังสมการที่ (2)

$$Q_u = \frac{eWh.Z}{s + \frac{C}{2}} \quad (2)$$

โดยที่ $C = C_1 + C_2 + C_3$

$$C_1 = \frac{1.8Q_u L_2}{A}$$

$$C_2 = \frac{0.72Q_u L}{A}$$

$$C_3 = \frac{3.6Q_u}{A}$$

L_2 = ความหนาของกระสอบรองหัวเสาเข็ม (เมตร)

r = Coefficient of Restitution = 0.25 ในกรณีที่เสาเข็มคอนกรีตถูกคอกด้วยลูกตุ้มปล่อยรองด้วยกระสอบ

3) Janbu's Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 4) ดังสมการที่ (3)

$$Q_u = \frac{Wh.}{K_u S} \quad (3)$$

โดยที่ $\lambda = \frac{Wh.L}{AES^2}$

$$C_d = 0.75 + 0.15 \frac{P}{W}$$

$$K_u = C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right)$$

4) Danish Formula (ว.ส.ท. [10] แนะนำให้ใช้ F.S. = 3 - 6) ดังสมการที่ (4)

$$Q_u = \frac{eWh.}{S + \sqrt{\frac{eWhL}{2AE}}} \quad (4)$$

โดยที่

$$e = \text{ประสิทธิภาพของป็นจัน} = 0.7$$

2. การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)

Seubsai, S. [11] กล่าวว่า การทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (High-Strain Dynamic Load Test: DLT) เป็นวิธีการทดสอบเสาเข็มอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้กับเสาเข็มคอนกรีต (เสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ) เสาเข็มเหล็ก และเสาเข็มไม้ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Bearing Capacity) ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Displacement) ค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) และความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบ และทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของป็นจัน (Hammer Performance) ที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม รวมทั้งตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (Pile Integrity) ที่ทดสอบว่ามีความเสียหายหรือข้อบกพร่องหรือไม่ และใช้ข้อมูลในการกำหนดมาตรฐานสำหรับการตอกเสาเข็ม (Driving Criteria) สำหรับโครงการได้ สำหรับการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ มี 2 ลักษณะ คือ

1) การทดสอบขณะทำการตอกเสาเข็ม Initial Driving Test (IDT) เป็นการทดสอบขณะทำการตอกเสาเข็ม โดยทั่วไปเป็นการทดสอบเพื่อหาความยาวของเสาเข็ม (Minimum Pile Tip Elevation) สำหรับโครงการและตรวจสอบประสิทธิภาพของป็นจันที่ใช้ในการตอก (Hammer Efficiency) รวมทั้งการกำหนดมาตรฐานการตอกเสาเข็ม (Driving Criteria) สำหรับโครงการนั้น ๆ

2) การทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็ม Restrike Drive Test (RDT) เป็นการทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็มไปแล้วในระยะเวลาหนึ่ง โดยทั่วไปเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม (Pile Bearing Capacity) ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ออกแบบหรือไม่ รวมทั้งสภาพความสมบูรณ์ของเสาเข็ม โดยสามารถทำการทดสอบได้ทั้งเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ

ลักษณะการทดสอบเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ จะใช้ลูกค้อนน้ำหนักปล้อยกระแทกที่หัวเสาเข็ม เพื่อให้เสาเข็มมีการเคลื่อนตัว จากแรงกระแทกของลูกค้อนบนหัวเสาเข็มนั้นจะทำให้เกิดคลื่นความเค้น (Stress Wave) ลงไปตลอดความยาวของตัวเสาเข็ม และคลื่นความเค้นดังกล่าวจะสะท้อนกลับขึ้นมา ทำให้ทราบถึงแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มและด้านข้างของเสาเข็ม คุณสมบัติทางกายภาพของเสาเข็ม รวมทั้งทราบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติของพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มที่ทดสอบ ซึ่งคลื่นความเค้นดังกล่าวจะถูกบันทึกโดยใช้ตัวแปรสัญญาณ (Transducers) ซึ่งประกอบด้วยมาตรความเครียด (Strain Gauge) และมาตรความเร่ง (Accelerometers) ที่ติดตั้งบริเวณใกล้กับหัวเสาเข็ม สัญญาณที่ได้ขณะการทดสอบ

จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของหน่วยแรง (Force) และความเร็ว (Velocity) ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์กำลัง
 บรรทุกของเสาเข็มขณะทดสอบต่อไป ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะแสดงในเครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม (Pile
 Driving Analyzer: PDA) [11] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องวิเคราะห์และการติดตั้งมาตรการความเครียดกับมาตรการแรง

การทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ และการติดตั้งมาตรการความแรงและมาตรการความเครียด
 ที่เสาเข็มทดสอบตามลำดับ ในการทดสอบทุกครั้งที่ป้อนจั่นตกลงบนหัวเสาเข็ม เครื่องทดสอบเสาเข็ม
 จะเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อก (Analog) จากมาตรการความแรงและมาตรการความเครียด ไปเป็นแรงและความเร็ว
 ในระบบดิจิทัล (Digital) เทียบกับคลื่นเวลา และปรากฏบนจอเครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม ขณะที่
 กำลังตอกเสาเข็มหรือทดสอบเสาเข็ม ทำให้วิศวกรทราบข้อมูลการทดสอบตลอดเวลา สามารถใช้ในการทำนาย
 น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ควบคุมประสิทธิภาพของป้อนจั่น (Hammer Performance) ในการส่งถ่าย
 พลังงาน (Energy Transfer) และสามารถวัดแรงเค้นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม (Driving Stress) และ
 วิเคราะห์ประเมินความเสียหายของเสาเข็ม (Pile Integrity) รวมทั้งเป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณสมการ
 ทางคลื่นสำหรับการตอกเสาเข็ม [11]

การวิเคราะห์ด้วย CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) เป็นวิธีการวิเคราะห์
 ที่รวบรวมเอาข้อมูลทางพลศาสตร์ที่วัดได้ในการทดสอบทำการเปรียบเทียบกับแรงหรือความเร็วที่ได้จากการ
 วิเคราะห์โดยใช้สมการทางคลื่นในการทำนายกำลังบรรทุกทางสถิตยศาสตร์ของเสาเข็ม (Pile Static Bearing
 Capacity) วิธีการของ CAPWAP ทำให้วิศวกรสามารถตรวจสอบหลักการของ Case Method ได้
 ซึ่งกำลังบรรทุกประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Pile Bearing Capacity) ที่ได้จาก CAPWAP จะมี
 ความใกล้เคียงกับกำลังบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มทางสถิตยศาสตร์ (Static Failure Load) [11]

การทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม และ CAPWAP
 มีความสะดวกและคล่องตัวทำให้วิศวกรสามารถนำไปใช้ในโครงการก่อสร้างต่าง ๆ โดยประโยชน์
 จากการใช้การทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ คือ ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบทราบข้อมูลต่าง ๆ ได้มากยิ่งขึ้น
 ช่วยในการออกแบบและควบคุมการตอกเสาเข็ม เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาพิจารณาประกอบกับค่าอัตราส่วน
 ความปลอดภัยและน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ทำให้ลดปัญหาในการก่อสร้างและค่าก่อสร้างฐานราก ทำให้
 ประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้น ลดเวลาและประหยัดค่าใช้จ่าย [11]

วิธีดำเนินการศึกษา

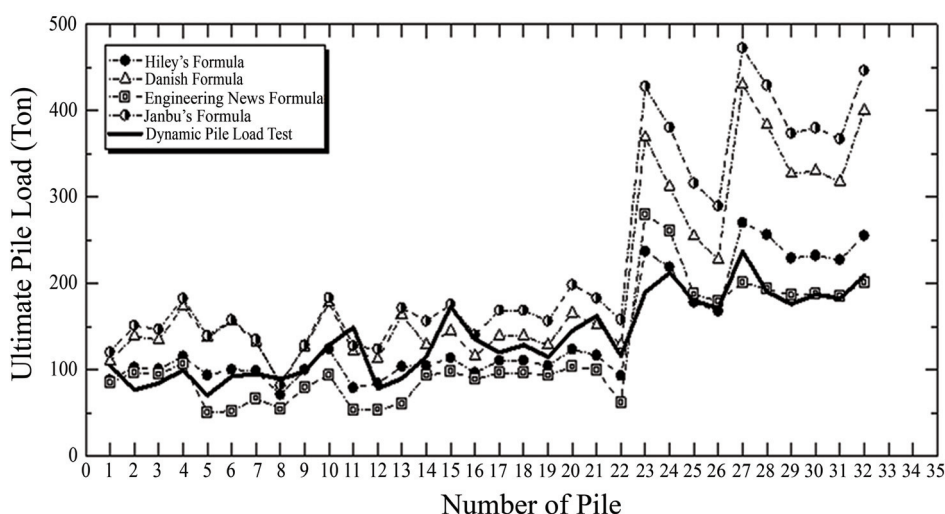
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษา อธิบายเปรียบเทียบ ท่อตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม และสมการความสัมพันธ์จากผลของการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทำนายโดยสูตรการตอกเสาเข็ม 4 สูตรคือ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula เปรียบเทียบกับผลทดสอบ Dynamic Load Test ที่ประมวลผลการทดสอบโดยโปรแกรม Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเสาเข็มตอกในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประเทศไทย เสาเข็มที่ทดสอบขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้งแต่ 0.26 0.30 0.35 และ 0.40 m. ความยาวเสาเข็ม 6 - 14 m. จำนวน 32 ต้น การทดสอบ Dynamic Pile Load Test เป็นการทดสอบหลังการติดตั้งเสาเข็ม Restrike Drive Test (RDT) ที่ระยะเวลา 7 - 10 วัน หลังจากตอกเสาเข็มเสร็จเพื่อให้พฤติกรรมด้านกำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษา

จากข้อมูลเสาเข็ม 32 ต้น ได้นำมาทำการวิเคราะห์ข้อมูล คำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากสูตรการตอกต่าง ๆ โดยใช้ผลของค่าทุติยเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย (Last 10 Blows) เปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ที่ประมวลผลโดยโปรแกรม CAPWAP

1. ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

รูปที่ 2 พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่คำนวณได้จาก Hiley's Formula มีค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุด ส่วนผลการคำนวณโดย Engineering News Formula จะมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยน้อยกว่าที่ทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์เกือบทั้งหมด ส่วน Janbu's Formula และ Danish Formula จะให้ผลการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าผลที่ได้จากโปรแกรม CAPWAP ซึ่งจากผลการทดสอบค่ากำลังจาก Hiley's Formula และ Engineering News Formula มีค่าความปลอดภัย ส่วนค่าที่ได้จาก Janbu's Formula และ Danish Formula มีโอกาสเกิดการวิบัติมากที่สุด ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มต้นที่ 23 - 32 ที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มให้ค่าที่สูงมากเนื่องจากเป็นเสาเข็มขนาดหน้าตัด 0.40×0.40 m. ผู้ออกแบบได้กำหนดค่ากำลังน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยไว้ที่ 60 - 80 ตันต่อต้น ทำให้ผู้ควบคุมงานพยายามควบคุมการตอกเสาเข็มให้ได้ระยะ Last 10 Blows โดยกำหนดระยะยกของค้อนตอกขนาด 5.0 - 5.5 ตัน ที่ระยะ 100 - 130 cm. เป็นผลให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าสูง



รูปที่ 2 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

รูปที่ 3 แสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ เมื่อนำผลการคำนวณมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจากสมการการตอกเสาเข็มแต่ละสมการกับค่าที่ได้จากผลทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ทั้งนี้ได้กำหนดให้เส้นกราฟผ่านจุด (0, 0)

ถ้าให้ $Q_{u_Predict}$ คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ และ Q_{u_DLT} คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คำนวณโดยวิธี CAPWAP จะได้ความสัมพันธ์ของแต่ละสมการดังสมการที่ (5) - (8)

Hiley's Formula :

$$Q_{u_Predict} = 1.0377 Q_{u_DLT}; \quad R^2 = 0.831 \quad (5)$$

Engineering News Formula :

$$Q_{u_Predict} = 0.90222 Q_{u_DLT}; \quad R^2 = 0.751 \quad (6)$$

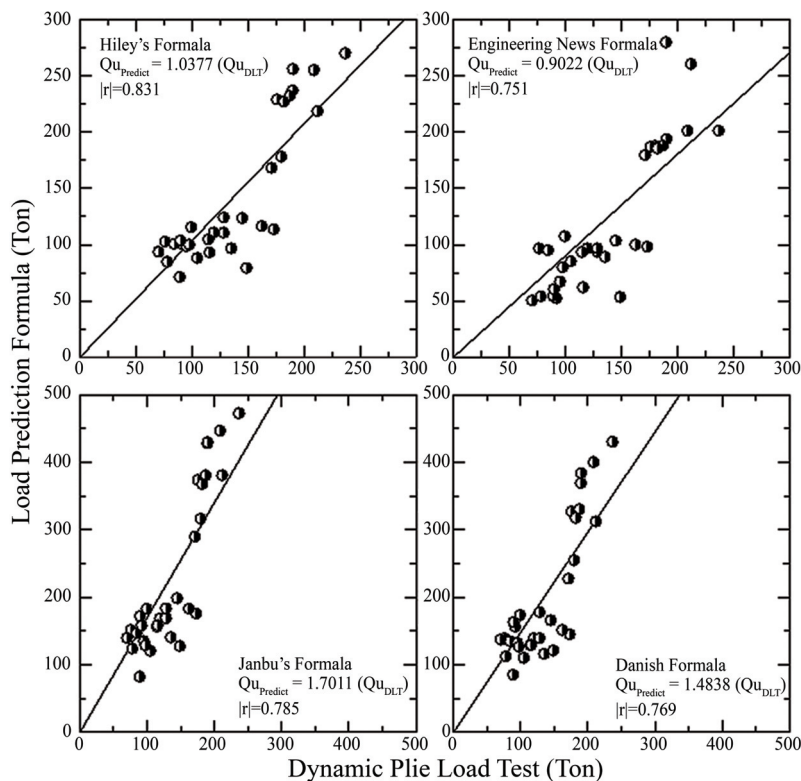
Janbu's Formula :

$$Q_{u_Predict} = 1.7011 Q_{u_DLT}; \quad R^2 = 0.785 \quad (7)$$

Danish Formula :

$$Q_{u_Predict} = 1.4838 Q_{u_DLT}; \quad R^2 = 0.769 \quad (8)$$

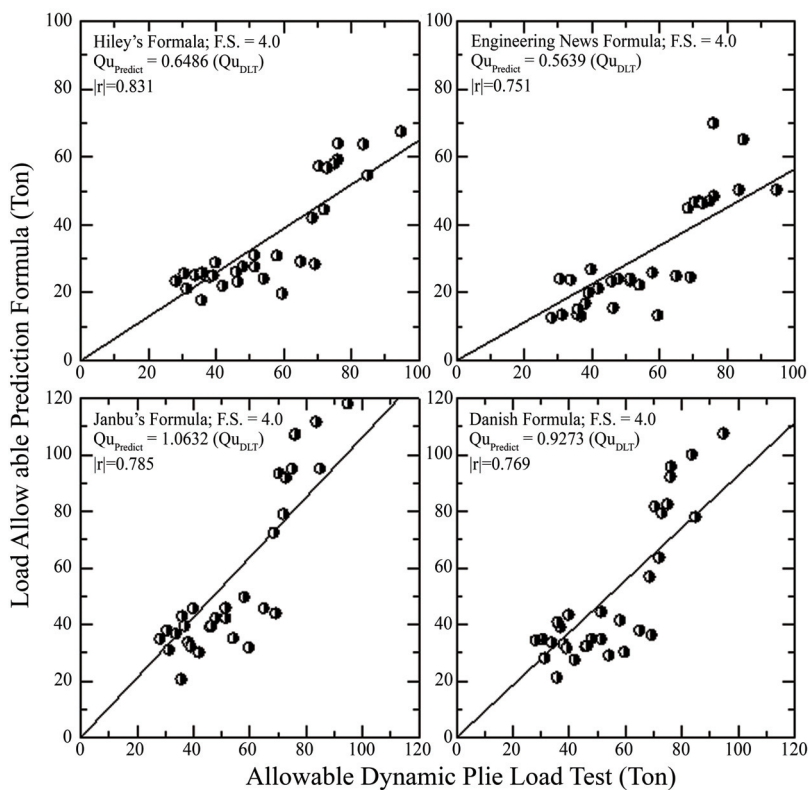
จากผลความสัมพันธ์ที่ได้นี้พบว่า Hiley's Formula และ Engineering News Formula ให้แนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าประมาณเข้าใกล้หนึ่ง นั่นหมายความว่าค่าที่ได้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้ ส่วน Janbu's Formula กับ Danish Formula ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งเป็นผลให้การคำนวณที่ได้จากสมการดังกล่าวมีโอกาสจะเกิดการวิบัติมากกว่าสมการอื่น และพบว่าสมการที่ให้ค่าความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิธีพลศาสตร์มากที่สุด และให้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟที่ดีที่สุด คือ Hiley's Formula ($R^2 = 0.831$) อย่างไรก็ตามทุกสมการถือว่าให้ค่าความสัมพันธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ($R^2 = 0.751 - 0.831$)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักประลัยที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มและการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

2. ผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยจากสูตรการตอกเสาเข็มกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

รูปที่ 4 เมื่อนำอัตราส่วนปลอดภัยที่ ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้มาทำการคำนวณหาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น โดยได้กำหนดให้เส้นกราฟผ่านจุด (0, 0) ถ้าให้ $Q_{a_Predict}$ คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ และ Q_{a_DLT} คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยที่คำนวณโดยโปรแกรม CAPWAP ที่กำหนดอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5 จะได้ความสัมพันธ์ของแต่ละสมการ ดังสมการที่ (9) - (12)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกพลอดภัยที่ได้จากสูตรการดักเสาะเชื่อมและการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

Hiley's Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4.0)

$$Qa_{Predict} = 0.6486 Qa_{DLT}; \quad R^2 = 0.831 \quad (9)$$

Engineering News Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4.0)

$$Qa_{Predict} = 0.5639 Qa_{DLT}; \quad R^2 = 0.751 \quad (10)$$

Janbu's Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 4.0)

$$Qa_{Predict} = 1.0632 Qa_{DLT}; \quad R^2 = 0.785 \quad (11)$$

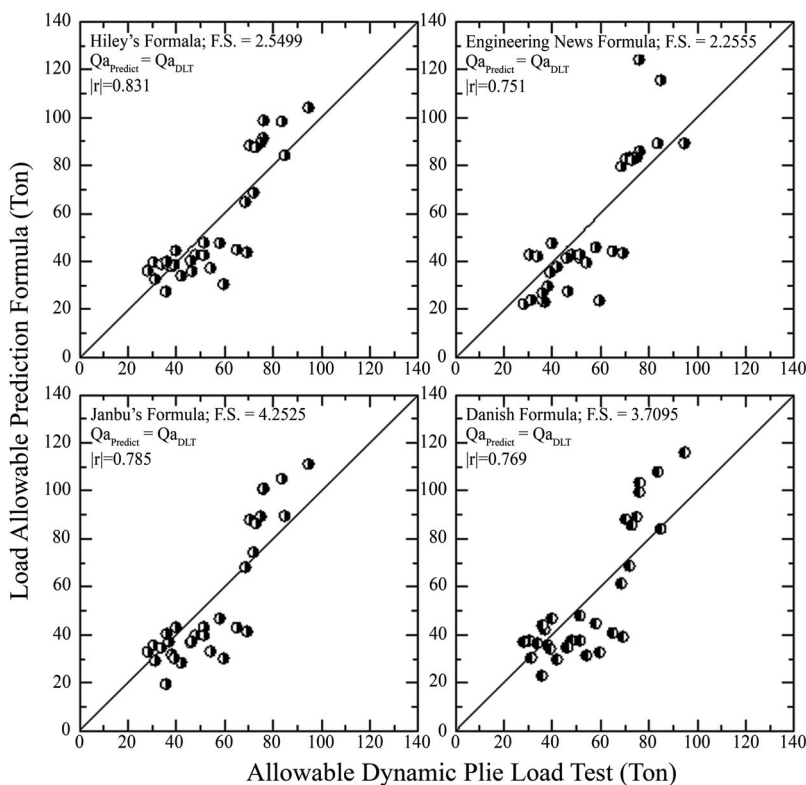
Danish Formula (ว.ส.ท. แนะนำให้ใช้ F.S. = 3 - 6 เลือกใช้ที่ 4)

$$Qa_{Predict} = 0.9273 Qa_{DLT}; \quad R^2 = 0.769 \quad (12)$$

จากผลความสัมพันธ์ที่ได้นี้ พบว่าอัตราส่วนปลอดภัยที่แต่ละสูตรถูกแนะนำให้ใช้นั้นพบว่า Janbu's Formula และ Danish Formula มีค่าใกล้เคียงกับผลการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุด ให้แนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากที่สุด แสดงว่าค่าที่ได้จากการทำนายโดย 2 สมการนี้แม่นยำที่สุดสำหรับการคำนวณโดยใช้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย

ส่วน Hiley's Formula กับ Engineering News Formula ค่าความชันของเส้นกราฟมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมาก ซึ่งเป็นผลให้การคำนวณที่ได้จากสมการดังกล่าวมีความปลอดภัยมากกว่าสมการอื่น แต่จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น

3. อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมจากสูตรการตอกเสาเข็มแต่ละสูตรกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมกับผลการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์

รูปที่ 5 เมื่อนำผลการทดสอบมาทำการคำนวณมาปรับค่าหาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม โดยให้ผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น โดยให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ และที่คำนวณโดยโปรแกรม CAPWAP มีค่าเท่ากัน ($Q_{a_Predict} = Q_{a_DLT}$) จะได้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมของแต่ละสูตรดังนี้

Hiley's Formula

$$F.S. = 2.5499 ; \quad R^2 = 0.831$$

Engineering News Formula

$$F.S. = 2.2555 ; \quad R^2 = 0.751$$

Janbu's Formula

$$F.S. = 4.2525 ; \quad R^2 = 0.785$$

Danish Formula

$$F.S. = 3.7095 ; \quad R^2 = 0.769$$

จากผลความสัมพันธ์ที่ได้นี้ พบว่าอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมนั้นมีค่าแตกต่างจากที่ ว.ส.ท. แนะนำโดยที่สูตรของ Hiley's Formula, Engineering News Formula และ Danish Formula มีค่าต่ำกว่าที่ ว.ส.ท. แนะนำอยู่ที่ 36.3 43.6 และ 7.3 % ตามลำดับ ส่วนของ Janbu's Formula มีค่าแตกต่างอยู่ 6.3 %

สรุปผลการศึกษา

สรุปผลการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่อัตราส่วนปลอดภัยต่าง ๆ ของแต่ละสูตรการตอกเสาเข็ม และการทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ ซึ่งวิเคราะห์ผลโดยกระบวนการ Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) สูตรการตอกเสาเข็ม 4 สูตร ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มาเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์กับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม รวมถึงพิจารณาถึงอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม พบว่าสูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบห้าน้ำหนักบรรทุกประลัยโดยวิธีพลศาสตร์มากที่สุด ได้แก่ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula ตามลำดับ โดยที่ Hiley's Formula ให้ผลทดสอบใกล้เคียงและน่าเชื่อถือมากที่สุด ($R^2 = 0.831$) ส่วน Danish Formula และ Janbu's Formula มีโอกาสวิตกนำไปใช้งาน

การใช้อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ที่แนะนำโดย ว.ส.ท. เพื่อลดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้แต่ละสูตรพบว่าทุกสูตรมีความปลอดภัย สูตรของ Hiley's Formula และ Engineering News Formula ให้ค่าที่ต่ำ ทำให้ปลอดภัยมากแต่ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจะเพิ่มสูงขึ้น และผู้วิจัยได้หาอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมของแต่ละสูตรซึ่งได้ผลดังนี้ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มีค่าเท่ากับ 2.5499 2.2555 3.7095 และ 4.2525 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากอัตราส่วนปลอดภัยที่ ว.ส.ท. แนะนำ โดยที่สูตรของ Hiley's Formula, Engineering News Formula, Danish Formula และ Janbu's Formula มีค่าต่ำกว่าที่ ว.ส.ท. แนะนำอยู่ที่ 36.3 43.6 และ 7.3 % ตามลำดับ ส่วนของ Janbu's Formula มีค่าแตกต่างอยู่ 6.3 %

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณปรัชญา มาคำ คุณไกรวิทย์ วงศ์บุตร และ คุณวราภรณ์ มีตา บริษัท ขอนแก่น ซอยล์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและรวบรวมผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

References

- [1] Kibria, S., Ahmad, J., Masud-, A., and Ali, M. (2017). Dynamic Pile Test and Its Correlation with Static Load Test. In **Proceeding of the 19th International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, (ISSMGE)**. Republic of Korea, Seoul 2017.
- [2] Thasnanipan, N., Submanee Wong, C., and Chanchad, C. (2007). A Comparison Between Static and Dynamic Pile Load Tests for Bored Pile Capacity Prediction. In **12th National Convention on Civil Engineering**. Phitsanulok. Vol. 3, (GTE). pp. 253-258.
- [3] Thaveelert, P. (1996). **Evaluation of Dynamic Pile Load Test Performance in Bangkok and Rayong Subsoils**. Master Thesis. Department of Civil Engineering. Chulalongkorn University. Bangkok
- [4] Patanasakpinyo, T. (2015) Quality Control of Pile Driving by Danish Formula in Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage. **VRU Research and Development Journal Science and Technology**. Vol. 10, No. 2, May - August 2018, pp. 43-53 (in Thai)
- [5] Yuyongwattana, W. (2016). A Comparison of Pile Driving Formulas. **Rangsit University Journal of Engineering and Technology, RSUJET**. Rangsit University. Bangkok, Vol. 19, No. 2, pp. 21-31
- [6] Fragaszy, J. R., Argo, D., and Higgins, J. D. (1988). Comparison of Formula Predictions with Pile Load Tests. **Transportation Research Record 1219**. pp. 1-12
- [7] Rajagopal, C., Solanki, C. H., and Tandel, Y. K. (2012). Comparison of Static and Dynamic Load Test of Pile. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)**. Vol. 17, pp. 1905-1914
- [8] Kuntiwattanakul, P. (2017). Pile Set-up in Bangkok Subsoil. The **2nd National RMUTR Conference**. Building Innovation 2017 : Sustainable Smart Building. pp. 32-39
- [9] Komurka, V. E., Wagner, A. B., and Edil, T. B. (2003). **Estimating Soil/Pile Set-Up**. Final Report Submitted to the Wisconsin Department of Transportation, September, Wisconsin Highway Research Program#0092-00-14, pp. 55
- [10] Engineering Institute of Thailand. (1978). **Pile Bearing Capacity**. The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage. Bangkok
- [11] Seubsai, S. (2006). **Geographic Information System Application for Database of Pile Dynamic Load Test in Bangkok and its Vicinity Areas**. Master Thesis. Faculty of Engineering. Thammasat University. Bangkok

การออกแบบและสร้างรหัสรักษาความปลอดภัยสำหรับกระบวนการตรวจสอบ
และยืนยันตัวตนของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ

Design and Implementation of Security Code for the Identification and Authentication Process of Electronic Toll Collection System

ปราชญ์ อัสวนารกุล¹ และอำนวยการ เรืองวารีย์^{1*}

Prach Asavanarakul¹ and Amnoi Ruengwaree^{1*}

Received: June 20, 2019; Revised: August 26, 2019; Accepted: September 3, 2019

บทคัดย่อ

การขับเคลื่อนวิสัยทัศน์ประเทศไทย 4.0 ด้านอุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ไปสู่ความสำเร็จจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่รวดเร็ว ปลอดภัย และน่าเชื่อถือสูง อาร์เอฟไอดีเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้ในระบบคมนาคมขนส่งเพื่อตรวจสอบและยืนยันตัวตนของผู้โดยสาร ยานพาหนะ และสินค้า อย่างไรก็ตาม การนำอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้ยังพบปัญหาด้านการรักษาความลับหรือความปลอดภัยของข้อมูลรหัสที่ใช้ตรวจสอบและยืนยันตัวตน บทความวิจัยนี้นำเสนอวิธีการเพิ่มความปลอดภัยในการนำอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้ในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ โดยการออกแบบและสร้างรหัสรักษาความปลอดภัยที่เรียกว่า Meta_ID และโปรโตคอลยืนยันตัวตนของเครื่องอ่านและป้ายอาร์เอฟไอดี จำลองสถานการณ์ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัส Meta_ID และโปรโตคอลที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิมที่โปรแกรมรหัสลงบนป้ายของผู้ใช้งานแบบตายตัว กรณีมีจำนวนผู้ใช้ป้ายในระบบ 10,000 100,000 และ 1,000,000 ป้าย ผลการจำลองพบว่าระบบที่นำเสนอมีความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการลวงรหัสต่ำกว่าระบบดั้งเดิมทั้ง 3 กรณี จึงสรุปได้ว่าระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะด้านการรักษาความลับหรือความปลอดภัยดีกว่าระบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: อาร์เอฟไอดี; เลขสุ่มเทียม; ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ; อีทีซี; โลจิสติกส์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

* Corresponding Author E - mail Address: amnoi.r@en.rmutt.ac.th

Abstract

To drive aviation and logistics in Thailand 4.0, it is necessary to use a fast, safe and reliable technology. Radio Frequency Identification (RFID) has adopted into the transportation system in order to identify and authenticate the passengers, vehicles and goods. However, The RFID in transport application still has some problem about the security of ID data. This article presents a method for increasing security in applying RFID to be used in electronic toll collection system. By design and create a security code called Meta_ID and authentication protocol of the RFID reader and tag. Simulate an electronic toll collection system that uses the Meta_ID code and proposed protocol, compared with the original system that uses the fix security code, in the case of 10,000, 100,000 and 1,000,000 user's tags. The simulation results show that the proposed system has a lower probability of hacking success than the original system in all 3 cases. Therefore, concluded that the proposed system has the security performance better than original system.

Keywords: RFID; Pseudo Random Number; Electronic Toll Collection System: ETC; Logistics

บทนำ

ในปี พ.ศ. 2558 รัฐบาลไทยได้กำหนดวิสัยทัศน์เชิงนโยบายที่เรียกว่า ประเทศไทย 4.0 (Thailand 4.0) เพื่อพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไปสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน ด้วยการพัฒนาอุตสาหกรรม 10 กลุ่ม หนึ่งในนั้นซึ่งถือว่ามีความสำคัญคืออุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ (Aviation and Logistics) กลไกสำคัญในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมกลุ่มนี้คือ การขนส่งและบริการด้านโลจิสติกส์ที่ต้องการความรวดเร็ว ปลอดภัย และมีความน่าเชื่อถือสูง ทั้งการคมนาคมทางอากาศ และภาคพื้นดิน การนำเทคโนโลยีเข้ามาพัฒนา ปรับใช้ในกระบวนการตรวจสอบและยืนยันตัวตนในการผ่านทาง การผ่านด่าน และการขนส่งสินค้า จึงถือว่าจำเป็นอย่างยิ่ง ปัจจุบันประเทศไทยพัฒนาการคมนาคมขนส่งไปสู่ระบบอัตโนมัติ เพื่อรองรับ ปริมาณประชากร ยานพาหนะ และการขนส่งสินค้าที่เพิ่มขึ้น การบ่งชี้หรือระบุเอกลักษณ์วัตถุด้วยคลื่น ความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification) เรียกสั้น ๆ ว่า อาร์เอฟไอดี (RFID) เป็นเทคโนโลยี สำหรับการบ่งชี้เอกลักษณ์วัตถุหรือสิ่งของด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อยืนยันตัวตนของวัตถุหรือสิ่งของนั้น (Identification and Authentication) ปัจจุบันได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในกิจการคมนาคม ขนส่งและโลจิสติกส์ [1] - [2]

การประยุกต์ใช้อาร์เอฟไอดีในกิจการคมนาคมขนส่งและโลจิสติกส์ อย่างเช่น ระบบผ่านทางและ ตัวโดยสารอิเล็กทรอนิกส์ (E-ticket) ยังมีปัญหาด้านการชนกันของข้อมูล (Collision) รวมถึงการรักษา ความปลอดภัยของข้อมูล (Security) ในกระบวนการยืนยันตัวตน เช่น การถอดแบบหรือโคลนนิ่งรหัส หรือบัตรป้ายเพื่อใช้ซ้ำ (Cloning Problem) การดักจับรหัสและข้อมูลระหว่างการรับส่งในกระบวนการ ตรวจสอบรหัส (Tracking Problem) เป็นต้น มีบทความวิจัยหลายบทความได้เสนอการพัฒนาราร์เอฟไอดี

ให้มีความปลอดภัยของข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น [3] ได้เสนอการวิเคราะห์โพรโทคอล (Protocol) ป้องกันการชนกันของข้อมูลสำหรับการชี้เฉพาะสินค้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุในระบบการจัดการโลจิสติกส์ โดยสรุปได้ว่า ระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้โพรโทคอล ABS หรือ AQS มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการคมนาคมขนส่งและโลจิสติกส์ [4] ได้เสนอการออกแบบระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้งานร่วมระหว่างอาร์เอฟไอดีกับการประมวลผลภาพ [5] ได้เสนอโพรโทคอลอาร์เอฟไอดีที่ป้องกันการถอดแบบ [6] ได้เสนอการสร้างกฎเกณฑ์ที่มีความปลอดภัยในการส่งผ่านข้อมูล [7] ได้เสนอการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบอาร์เอฟไอดีโดยใช้การสื่อสารแบบ Frame ALOHA [8] ได้เสนอโพรโทคอลน้ำหนักเบาสำหรับการสื่อสารด้วยอาร์เอฟไอดีที่มีคุณสมบัติการยืนยันตัวตนแบบสองทาง รวมถึงงานวิจัย [9] - [11] ที่เสนอโพรโทคอลที่มีความปลอดภัยในการตรวจสอบและยืนยันตัวตนของระบบอาร์เอฟไอดี

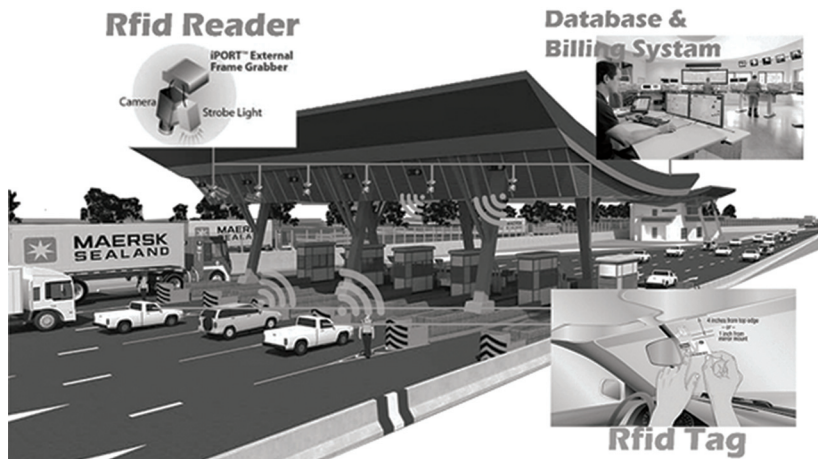
อย่างไรก็ตาม โพรโทคอลที่มีความปลอดภัยสูงย่อมมีความสลับซับซ้อนและต้องการทรัพยากรสูงตามไปด้วย อาทิเช่น ความสามารถประมวลผลของไมโครชิพ หน่วยความจำ และแหล่งพลังงานของอาร์เอฟไอดี ทำให้เกิดอุปสรรคในการนำไปใช้งานจริงในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ ด้วยสารและโลจิสติกส์ ซึ่งใช้อาร์เอฟไอดีชนิดต้นทุนต่ำ (Low-Cost RFID) เป็นทรัพยากรหลัก ดังนั้นจึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์การวิจัยนี้คือ (1) ออกแบบและสร้างรหัส Meta_ID สำหรับการรักษาความปลอดภัยที่ยากต่อการลอกเลียนแบบหรือทำซ้ำ (2) ทดสอบใช้งานในสถานการณ์จำลองกระบวนการตรวจสอบรหัสลับและยืนยันตัวตนของเครื่องอ่านและป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดต้นทุนต่ำที่ใช้ในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ (3) ประเมินผลด้านการรักษาความปลอดภัยของระบบที่นำเสนอเปรียบเทียบกับระบบเดิม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาการประยุกต์ใช้งานอาร์เอฟไอดีในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ

การบ่งชี้หรือระบุเอกลักษณ์วัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุหรืออาร์เอฟไอดีเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาต่อเนื่องมาจากรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด (Barcode) ที่ใช้อย่างแพร่หลายในระบบขนส่งสินค้า ระบบจัดเก็บและตรวจสอบสินค้าคงคลัง การตรวจสอบสินค้าในห้างสรรพสินค้าและร้านสะดวกซื้อ รวมถึงในรถตู้โดยสาร เช่น ตู้รถไฟ ตู้เครื่องบิน เป็นต้น ระบบบาร์โค้ดใช้วิธีประมวลผลภาพรหัสแท่งในการยืนยันตัวตน การใช้งานบาร์โค้ดจึงต้องระมัดระวังไม่ให้แผ่นป้ายรหัสแท่งเกิดความเสียหาย อีกทั้งยังต้องระมัดระวังเรื่องการลอกเลียนหรือทำซ้ำซึ่งสามารถทำได้โดยง่าย เช่น การถ่ายภาพรหัสแท่งด้วยโทรศัพท์มือถือและนำไปใช้ซ้ำ เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอาร์เอฟไอดีมาใช้งานที่ต้องการความปลอดภัยสูงกว่าบาร์โค้ด เนื่องจากมีข้อดีกว่าหลายประการ เช่น (1) ประสิทธิภาพการระบุสินค้าหรือสิ่งของที่ดีกว่าเดิมจากการส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุโต้ตอบกันของเครื่องอ่าน (Reader) กับป้าย (Tag) ที่บรรจุรหัสลับ (Code) ที่ใช้ในการตรวจสอบและยืนยันตัวตนของสินค้าหรือสิ่งของ (2) ป้ายอาร์เอฟไอดีฝังอยู่ในตัวสินค้าหรือหีบห่อไม่มีการสัมผัสกับเครื่องอ่าน ไม่ต้องมองเห็น อาศัยการส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุระยะไกลพอประมาณ ทำให้มีความทนทานและคล่องตัวกว่าระบบเดิม สามารถอ่านรายการสินค้าในโกดังหรือตู้ขนส่งสินค้าได้โดยไม่ต้องมองเห็นสิ่งของหรือสินค้านั้น ๆ ด้วยเหตุนี้ อาร์เอฟไอดีจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในกิจการต่าง ๆ ที่ต้องการความมั่นคงปลอดภัย ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection System: ETC) ดังแสดงในรูปที่ 1 ปัจจุบันการทางพิเศษแห่ง

ประเทศไทยได้นำระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติมาใช้ในหลายเส้นทางในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล อาทิเช่น เส้นทางพิเศษฉลองรัช เส้นทางพิเศษบางพลี-สุขสวัสดิ์ เส้นทางบูรพาวิถี เส้นทางมอเตอร์เวย์บางนา-บางปะอิน และอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บค่าผ่านทาง และลดเวลาในแถวหรือคิว (Queue) รอจ่ายค่าผ่านทาง



รูปที่ 1 ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ

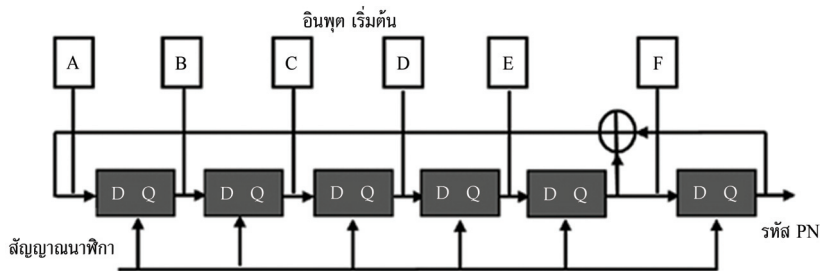
องค์ประกอบของอาร์เอฟไอดีในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติมี 3 ส่วนที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 1 คือ (1) ป้ายอาร์เอฟไอดี (RFID Tag) เป็นตัวเก็บรหัสหรือหมายเลข ID ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและยืนยันตัวตน โดยทั่วไปแล้วป้ายอาร์เอฟไอดีแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ป้ายพาสซีฟ (Passive Tag) เป็นป้ายที่ไม่มีแบตเตอรี่ในตัวเอง ทำงานโดยอาศัยพลังงานจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน มีวิธีการรับส่งข้อมูลระยะสั้น ๆ ใช้กับช่องทางจ่ายเงินสด และป้ายแอคทีฟ (Active Tag) เป็นป้ายที่มีแบตเตอรี่ในตัวเอง ทำงานโดยอาศัยพลังงานแบตเตอรี่และพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องอ่านข้อมูล วิธีการรับส่งข้อมูลมีระยะไกล สามารถติดตั้งบริเวณกระจกหน้ายานพาหนะได้ (2) เครื่องอ่านข้อมูล (RFID Reader) ประกอบด้วย วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรรับส่งข้อมูลและอ่านรหัสหรือหมายเลข ID จากป้ายที่เข้ามาในวิสัยทำการ เครื่องอ่านข้อมูลจะติดตั้งบริเวณทางเข้าช่องผ่านทางอัตโนมัติ และ (3) ระบบฐานข้อมูลและการเรียกเก็บเงิน (Database and Billing System) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของผู้ใช้งานทั้งเลขรหัสสำหรับการยืนยันตัวตน ยอดเงินในบัญชี การคำนวณค่าผ่านทางและการตัดยอดบัญชีอัตโนมัติ ระบบฐานข้อมูลจะติดตั้งในอาคารสำนักงานควบคุมด่านผ่านทาง และเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายสื่อสารไปยังฐานข้อมูลกลางเพื่อให้บริการครอบคลุมได้หลายเส้นทาง

2. ออกแบบและสร้างรหัสรักษาความปลอดภัย

กฎเกณฑ์สำหรับการรักษาความปลอดภัย คือ รหัสลับข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะต้องมีหนึ่งเดียวในระบบ (Uniqueness) รหัสนี้จะถูกกำหนดขึ้นเพื่อบ่งบอกข้อมูลเฉพาะตัวในกระบวนการตรวจเอกลักษณ์และการยืนยันตน (Identification and Authentication) เครื่องอ่านจะทำการติดต่อกับป้ายอาร์เอฟไอดี เมื่อเครื่องอ่านสามารถอ่านข้อมูลรหัสจากป้ายและเปรียบเทียบ

ตรงกับฐานข้อมูลรหัสได้ เครื่องอ่านจะยืนยันตัวตนของป้ายหรืออีกนัยหนึ่งคือยืนยันผู้ใช้นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลรหัสนี้จะต้องเป็นความลับระหว่างเครื่องอ่านและป้ายนี้เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแทรกแซง หรือ การล้วงข้อมูล หรือการโจมตีเพื่อล้วงรหัส (Hacking) จากผู้ไม่ประสงค์ดี

บทความนี้นำเสนอวิธีการสร้างรหัสลับจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Maximum Length Sequence Pseudo-Random Noise Generation เรียกสั้น ๆ ว่ารหัส PN [12] แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสร้างรหัสเลขสุ่มเทียมแบบ Maximum Length Sequence Pseudorandom Noise [12]

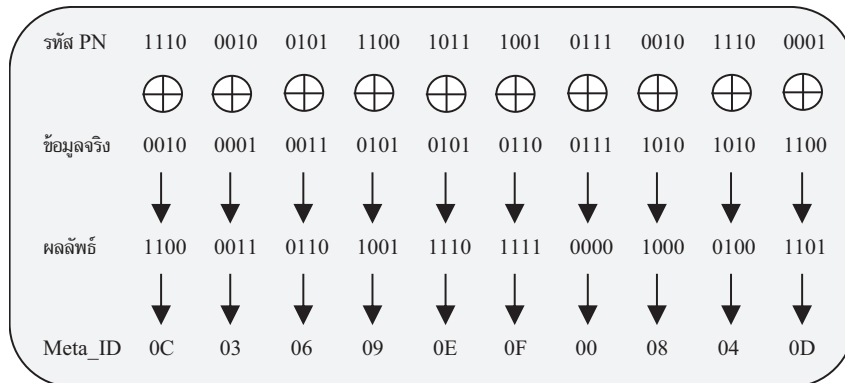
รหัส PN เป็นรหัสที่สร้างขึ้นจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วย ชิฟต์รีจิสเตอร์ (Shift Register) จำนวนหนึ่งที่ต้องเชื่อมกันแบบอนุกรมเพื่อทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบการประวิง (Delay Element) และมีการป้อนกลับของสัญญาณจากชิฟต์รีจิสเตอร์ (Feedback Loop) อย่างน้อย 2 ตำแหน่งกลับไปยังทางด้านขาเข้าของชิฟต์รีจิสเตอร์ตัวแรก ชุดวงจรนี้สามารถสร้างลำดับความยาวสูงสุด (Maximum-Sequence หรือ M-Sequence) ได้เท่ากับ $2^n - 1$ เมื่อ n คือ จำนวนของชิฟต์รีจิสเตอร์ที่ใช้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม การให้ได้ว่ารหัสที่มีความแตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของ Delay Element และตำแหน่งแท็ป (Taps) ของ Feedback Loop ดังรูปที่ 2 ซึ่งเขียนอยู่ในรูปโพลิโนเมียลได้ดังสมการที่ (1)

$$X^n + \dots + X^4 + X^3 + X^2 + X + 1 \quad (1)$$

เมื่อ

X^n คือ ตำแหน่งของชิฟต์รีจิสเตอร์ที่ทำการแท็ปสัญญาณทางด้านขาออก อย่างน้อย 2 ตำแหน่งที่นำมารวมกันตามกฎมอดูโล 2 (Modulo 2) แทนด้วยเครื่องหมาย $\oplus$ ในรูปที่ 2

เมื่อนำรหัส PN ที่ออกแบบและสร้างขึ้นไปรวมแบบมอดูโล 2 กับข้อมูลจริง จะได้รหัสลับที่เรียกว่า Meta_ID ซึ่งเป็นรหัสที่จะนำไปเขียนลงหน่วยความจำในไมโครชิพของป้ายอาร์เอฟไอดี ความลับซับซ้อนหรือความยากในการแก้รหัสจะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ Feedback Loop รวมถึงข้อมูลค่าเริ่มต้นใน Delay Element ที่กำหนดโดยผู้สร้าง ตัวอย่างเช่น ข้อมูลจริงที่ต้องการบันทึกในป้ายคือ 2135567AAC แปลงเป็นเลขฐานสองแล้วนำไปรวมกับรหัส PN ที่สร้างขึ้น จากนั้นแปลงผลลัพธ์เลขฐานสองเป็นฐานสิบหก จะได้รหัส Meta_ID ที่จะเขียนลงหน่วยความจำในไมโครชิพของป้ายดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลรวมแบบมอดูโล 2 ของรหัส PN กับข้อมูลจริง

3. ออกแบบโปรโตคอลอาร์เอฟไอดี

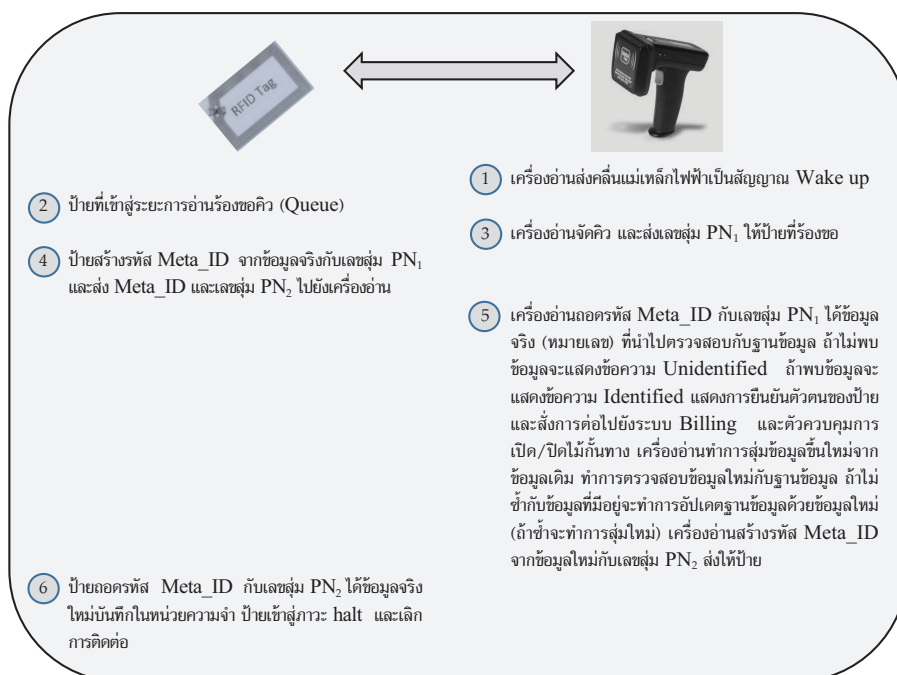
ลำดับขั้นตอนและข้อกำหนดในกระบวนการติดต่อสื่อสารกันระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล (รวมทั้งฐานข้อมูล) กับป้ายเรียกว่า โปรโตคอล (Protocol) มีกระบวนการโดยรวมคือ เมื่อป้ายเข้ามาในวิสัยทำการของเครื่องอ่าน เครื่องอ่านจะทำการจัดคิวอ่านป้ายเพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูล กรณีมีป้ายปริมาณมาก ๆ อยู่ในวิสัยทำการของเครื่องอ่าน ซึ่งจะส่งผลให้การยืนยันตนเกิดความผิดพลาด โดยเฉพาะการยืนยันตนของป้ายบัตรโดยสาร หรือกรณีการประยุกต์ใช้กับสินค้าที่อยู่บนสายพานลำเลียงหรือสินค้าที่บรรจุในตู้คอนเทนเนอร์เคลื่อนที่ บทความวิจัยนี้ได้นำโปรโตคอลป้องกันการชนกันของข้อมูลมาประยุกต์ใช้เพื่อทดสอบกับป้ายอาร์เอฟไอดีชนิด 13.56 MHz ISM Band Class 1 Radio Frequency Identification Tag Interface Standard [13] จากนั้นทำการออกแบบโปรโตคอลการสื่อสารและการยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดีสำหรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัสรักษาความปลอดภัยที่นำเสนอ ขั้นตอนต่าง ๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 กระบวนการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและป้ายอาร์เอฟไอดีจะผ่านการเข้ารหัสลับเพื่อรักษาความปลอดภัยสำหรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติทั้งขาไปและขากลับ รหัสลับที่ใช้ติดต่อสื่อสารจะสร้างจากเลขสุ่มด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Maximum Length Sequence Pseudo-Random Noise Generator ดังแสดงในหัวข้อ 2. รหัสลับดังกล่าวมีเฉพาะเครื่องอ่านกับป้ายที่กำลังติดต่อสื่อสารเท่านั้นที่รู้จัก อีกทั้งรหัสลับที่ใช้ติดต่อสื่อสารในแต่ละครั้งถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เพียงครั้งเดียว จึงเป็นการยากที่จะติดตามแกะรอยข้อมูลจริงได้ในเวลาอันสั้น ซึ่งในการติดต่อสื่อสารแต่ละครั้งจะใช้เวลาเพียงไม่กี่มิลลิวินาทีเท่านั้น [3]

4. จำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ ในส่วนของการออกแบบและสร้างรหัส Meta_ID ตั้งแต่การสร้างรหัส PN การรวมแบบมอดูโล 2 การแปลงเลขฐาน และการยืนยันตัวตนของป้าย (การเข้ารหัส ถอดรหัส และตรวจสอบรหัสข้อมูล) จะดำเนินการอยู่บนเฟิร์มแวร์ (Firmware) ที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio ส่วนการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่าน/เขียนข้อมูลกับป้ายอาร์เอฟไอดี จะทำการเชื่อมต่อผ่าน RFID 13.56 MHz Read/Write Mifare Module ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน 13.56 MHz ISM Band Class 1 Radio Frequency Identification Tag

Interface Standard สำหรับการจำลองการทดสอบการทำงานของอาร์เอฟไอดีชนิดต้นทุนต่ำที่ใช้ในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติสามารถแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือ โปรแกรมที่ใช้สร้าง ตรวจสอบ และยืนยันตัวตนจะทำงานอยู่บนระบบคอมพิวเตอร์ ส่วนที่สองคือ เครื่องอ่าน/เขียนรหัสเลือกใช้ตัวเทียบเท่ากับเครื่องอ่านบัตรผ่านเข้า/ออกของด่านผ่านทางพิเศษ และส่วนสุดท้ายคือ ป้ายอาร์เอฟไอดีเลือกใช้แบบเดียวกับบัตรผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์กำหนดไว้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 โพรโทคอลการสื่อสารและยืนยันตัวตนระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับป้ายอาร์เอฟไอดี



รูปที่ 5 การจำลองสถานการณ์รหัส Meta_ID สำหรับอาร์เอฟไอดีชนิดต้นทุนต่ำในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์

พารามิเตอร์	รายละเอียด
Standard	ISO/IEC 14443 Type A
Device	RFID 13.56 MHz Read/Write Mifare Module
Meta_ID length (HEX)	10 บิต
Delay element	64
PN maximum length	18446744073709551615

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ทำการทดสอบโปรแกรมรหัส (เลข ID) ตัวอย่าง 7D 74 DB 66 9A ลงในป้ายอาร์เอฟไอดีของผู้ใช้งานด้วยโปรแกรมที่ใช้สร้างรหัส Meta_ID และโปรโตคอลที่นำเสนอแล้วนำไปอ่านและยืนยันตัวตนตามสถานการณ์จำลองในรูปที่ 5 จำนวน 5 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 2 พบว่าข้อมูลที่อ่านได้มีค่าตรงกับฐานข้อมูลแต่มีค่าเปลี่ยนไปทุกรอบการอ่าน เนื่องจากการอัปเดตรหัสใหม่ทุกครั้งที่ประสบผลสำเร็จ สถานะของการยืนยันตัวตนคือ Identified แสดงถึงการยืนยันตัวตนสำเร็จ จากนั้นนำป้ายอาร์เอฟไอดีเดียวกันนี้มาโปรแกรมรหัสตัวอย่าง 7D 74 DB 66 9A อีกครั้ง แล้วนำไปอ่านด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิมได้ผลดังตารางที่ 3 พบว่า เครื่องอ่านทำการอ่านข้อมูลซ้ำหลายครั้ง แต่ข้อมูลที่อ่านได้ไม่ตรงกับรหัส (หมายเลข) ในฐานข้อมูล สถานะของการยืนยันตัวตนคือ Unidentified แสดงถึงการยืนยันตัวตนไม่สำเร็จ

ตารางที่ 2 ผลการยืนยันตัวตนของป้ายด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ใช้โปรโตคอลที่นำเสนอ

ครั้งที่	ข้อมูลรหัส (เลข ID) ที่เขียนลงป้ายและฐานข้อมูล	ข้อมูลที่อ่านได้จากตัวอ่านอาร์เอฟไอดีที่นำเสนอ	สถานะ (Status)
1	7D 74 DB 66 9A	7D 74 DB 66 9A	Identified
2	1A 26 12 C1 70	1A 26 12 C1 70	Identified
3	D8 40 E9 91 26	D8 40 E9 91 26	Identified
4	08 7A 52 64 f2	08 7A 52 64 f2	Identified
5	87 36 3C DA 60	87 36 3C DA 60	Identified

ผลการทดสอบในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การเขียน/อ่านข้อมูลในป้ายอาร์เอฟไอดีด้วยเครื่องอ่านที่ใช้รหัส Meta_ID ตามโปรโตคอลที่นำเสนอสามารถยืนยันตัวตนของป้ายได้ร้อยละ 100 ส่วนตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิมไม่สามารถอ่านและยืนยันตัวตนป้ายอาร์เอฟไอดีที่ใช้รหัส Meta_ID ตามโปรโตคอลแบบใหม่ที่นำเสนอได้

ตารางที่ 3 ผลการยืนยันตัวตนของป้ายด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิม

ครั้งที่	ข้อมูลรหัส (เลข ID) ที่เขียนลงป้ายและฐานข้อมูล	ข้อมูลที่อ่านได้โดยตัวอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิม	สถานะ (Status)
1	7D 74 DB 66 9A	FF FF E8 13 9E 26 AF C5 72 44 BC 6D 78 50 66 2F 66 8F 95 67 45 40 35 DF 54 56 7D 1D A0 10 8F BE 40 0B FF FF	Unidentified
2	7D 74 DB 66 9A	FF FF 8E 4F A0 34 03 7C 72 20 46 12 BD 7B 74 BE F7 38 F3 3B 7B 52 99 66 54 32 87 62 65 3B 9D 2F D1 BC FF FF	Unidentified
3	7D 74 DB 66 9A	FF FF 11 9D E6 03 8B 4F CC 42 16 A7 D0 8D 9B 7D 9E 10 6C E9 3D 65 11 55 EA 50 D7 D7 08 CD 72 EC B8 94 FF FF	Unidentified
4	7D 74 DB 66 9A	FF FF 36 9D 38 35 76 31 A3 23 54 74 1E C1 16 D3 18 59 4B E9 E3 53 EC 2B 85 31 95 04 C6 81 FF 42 3E DD FF FF	Unidentified
5	7D 74 DB 66 9A	FF FF FB DF 2A 7B E4 2B 0D D3 A0 B2 0F 9A E9 7E C8 0E 86 AB F1 1D 7E 31 2B C1 61 C2 D7 DA 00 EF EE	Unidentified

การวิเคราะห์ความปลอดภัยของระบบที่นำเสนอจากค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในตารางที่ 1 ป้ายอาร์เอฟไอดีที่ใช้เป็นแบบ Mifare Classic 1K สามารถบันทึกข้อมูลซ้ำได้ 100,000 ครั้ง บนมาตรฐาน ISO/IEC 14443 Type A เป็นป้ายอาร์เอฟไอดีที่มีต้นทุนต่ำมีความยาวของรหัสเท่ากับ 10 บิต (HEX) โดยในหนึ่งระบบสามารถกำหนดรหัส (เลข ID) ที่ไม่ซ้ำกันได้ทั้งหมด $16^{10} = 1,099,511,627,776$ หรือประมาณ 1 ล้านล้านรหัส ข้อแตกต่างของระบบที่นำเสนอกับระบบดั้งเดิมคือ ระบบดั้งเดิมเมื่อทำการโปรแกรมรหัส (เลข ID) ลงในป้ายของผู้ใช้งานใด ๆ แล้วจะไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก รหัส (เลข ID) ได้จากการสุ่มเลือกและเขียนลงในหน่วยความจำของป้ายเมื่อเปิดใช้งาน ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัส (Probability of Hacking Success: $p(N_A)$) จะขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้ในระบบ และจำนวนครั้งของความพยายามโจมตีเพื่อล้วงรหัส (Number of Attraction) ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสกำหนดดังสมการที่ (2)

$$p(N_A) = \frac{N_A \cdot N_L}{16^{10}} \quad (2)$$

โดยที่

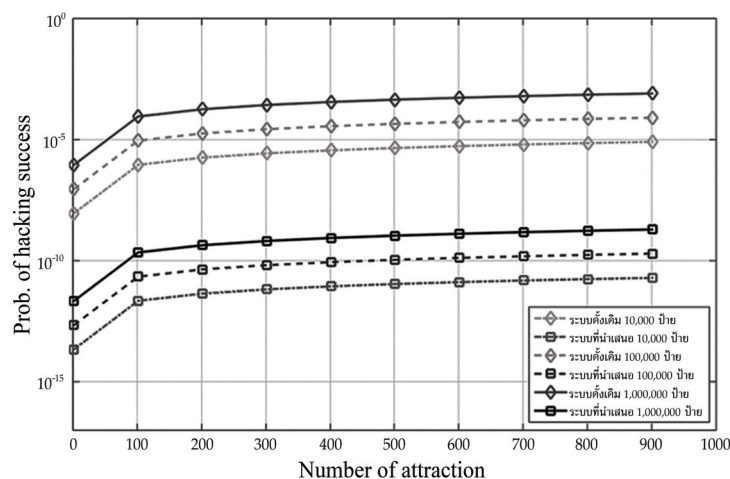
N_A คือ จำนวนครั้งที่พยายามโจมตี
 N_L คือ จำนวนผู้ใช้หรือป้าย

ในบทความนี้กำหนดองค์ประกอบการประวิง (Delay Element) จำนวน 64 ตัว สามารถสร้างรหัสที่มีความยาวรอบเท่ากับ $2^{64} - 1 = 18,446,744,073,709,551,615$ หรือประมาณ 18×10^{18} ชิป ระบบจะทำการสุ่มตัวรหัสครั้งละ 40 ชิปจากทั้งหมดเพื่อรวมกับข้อมูลจริง (เลข ID ของป้าย) 10 หลักแบบมอดูโล 2 การรวมเป็นแบบบิตต่อบิต นอกจากนี้ระบบมีการดำเนินการอัปเดตรหัสใหม่ทุกครั้งที่มีการยืนยันตัวตนสำเร็จ รหัสลับที่ใช้ติดต่อสื่อสารเป็นเลขสุ่มขึ้นมา และเปลี่ยนทุกครั้งที่ทำกาสื่อสารทั้งขาไปและขากลับตามโพรโทคอลที่นำเสนอในหัวข้อ 3. ทำให้ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสยากขึ้นไปอีก ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสดังกล่าวสามารถกำหนดดังสมการที่ (3)

$$p(N_A) = \frac{N_A \cdot N_L}{(2^{64} - 1) / 40} \quad (3)$$

ทำการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสระหว่างระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติแบบดั้งเดิมที่ใช้อาร์เอฟไอดีที่โปรแกรมรหัส (เลข ID) ลงในป้ายของผู้ใช้งานแบบตายตัวเมื่อเปิดใช้งานกับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัส Meta_ID และอัปเดตรหัสทุกครั้งที่ใช้งานและมีการยืนยันตัวตนสำเร็จตามโพรโทคอลที่นำเสนอดังรูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 ผลการจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้ RFID แบบดั้งเดิมที่ใช้อาร์เอฟไอดีที่โปรแกรมรหัสลงบนป้ายของผู้ใช้งานแบบตายตัว (แทนด้วยสัญลักษณ์ ◇) เทียบกับแบบใหม่ที่ใช้รหัส Meta_ID และอัปเดตรหัสทุกครั้งที่ใช้งานและมีการยืนยันตัวตนสำเร็จตามโพรโทคอลที่นำเสนอ (แทนด้วยสัญลักษณ์ □) ในสถานการณ์ที่มีจำนวนป้ายหรือผู้ใช้ป้ายในระบบ 3 กรณี คือ 10,000 100,000 และ 1,000,000 ป้าย/ผู้ใช้ และใช้ความพยายามโจมตีเพื่อล้วงรหัสจำนวน 1 100 200 300 400 500 600 700 800 900 ครั้ง จะพบว่ากราฟความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสของแบบที่นำเสนอมีค่าต่ำกว่าแบบดั้งเดิมทุกกรณี



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสระหว่างระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้อาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิมกับแบบที่นำเสนอ

สรุป

บทความวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาการรักษาความปลอดภัยในการนำอาร์เอฟไอดีมาใช้ในการเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ โดยการออกแบบรหัสรักษาความปลอดภัยที่เรียกว่า Meta_ID เพื่อประยุกต์เข้ากับโปรโทคอลยืนยันตัวตนของเครื่องอ่านและป้ายอาร์เอฟไอดีของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ การจำลองสถานการณ์ของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่มีจำนวนป้ายหรือผู้ใช้ป้ายในระบบ 3 กรณีคือ 10,000 100,000 และ 1,000,000 ป้าย/ผู้ใช้ พบว่าระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัส Meta_ID และอัปเดตรหัสทุกครั้งที่ใช้งานตามโปรโทคอลที่นำเสนอมีค่าความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสต่ำกว่าระบบดั้งเดิมที่ใช้อาร์เอฟไอดีที่โปรแกรมรหัสลงบนป้ายของผู้ใช้งานแบบตายตัวทั้ง 3 กรณี จากข้อมูลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะด้านการรักษาความลับหรือความปลอดภัยดีกว่าระบบดั้งเดิม รหัส Meta_ID ที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถโปรแกรมลงในไมโครชิพของป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดต้นทุนต่ำที่ใช้เป็นบัตรผ่านทางพิเศษได้ อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้งานในสถานการณ์จริงต้องปรับปรุงเฟิร์มแวร์ของเครื่องอ่านและเขียนข้อมูลของระบบเดิมเป็นระบบที่นำเสนอในบทความนี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความวิจารณ์ทรงคุณค่าสำหรับบทความวิจัยนี้ และขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- [1] Syed Ahson and Mohammed Ilyas. (2008). **RFID Handbook: Applications, Technology, Security and Privacy**, N.Y.: CRC Press.
- [2] Kovinhawewattana, P., Cheunta, W., Kuankid, S., Baongam, W., and Dinsakul, H. (2009). **Radio Frequency Identification (RFID) System**. National Science and Technology Development Agency (NSTDA.). (in Thai)
- [3] Vaodee, S., Dabbang, P., and Oncheanjit, J. (2010). Anti-Collision Protocol Analysis for Radio Frequency Identification in Logistics Management System. In **Proceedings of the Industrial Engineering Network 2010**. Ubonratchathani. (in Thai)
- [4] Tang Z. (2016). The Design of ETC System Based on RFID and Image Identification. In **Proceedings of the 2016 International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering**. pp. 236-240. Shenzhen, China. DOI: 10.2991/epce-16.2016.53
- [5] Dimitriou, T. (2005). A lightweight RFID Protocol to Protect Against Traceability and Cloning Attacks. In **First International Conference on Security and Privacy for Emerging Areas in Communications Networks (SECURECOMM'05)**. Athens, Greece. pp.59-66. DOI: 10.1109/SECURECOMM.2005.4

- [6] Kungpisdan, S. and Metheekul, S. (2009). A Secure Offline Key Generation with Protection Against Key Compromise. In **WMSCI 2009: 13th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics**. 10-13 July 2009, Orlando, Florida. pp. 63-67
- [7] Mungmee, S. and Sittichivapak, S. (2009). Development Efficiency of RFID System in Frame ALOHA Communication. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 26, No. 2, pp. 7-12 (in Thai)
- [8] Pechto, S. and Kungpisadan, S. (2010). Design and Development of a Lightweight RFID Security Protocol Offering Mutual Authentication. In **Proceedings of the 3rd National Conference on Information Technology (NCIT2010)**. Bangkok. (in Thai)
- [9] Lee, Y. K. and Verbaudhede, I. (2005). **Secure and Low-Cost RFID Authentication Protocols**. Access (4 June 2019). Available (https://www.researchgate.net/publication/250139714_Secure_and_Low-cost_RFID_Authentication_Protocols)
- [10] Khan, G. N. and Moessner, M. B. (2011). Secure Authentication Protocol for RFID Systems. In **Proceedings of the 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)**. Maui, Hawaii. pp. 379-384
- [11] Peng, P. and Zhao, Y. (2012). Anti-Cloning and Secure RFID Mutual Authentication Protocols. In **Proceedings of the 4th IEEE Conference on Broadband Network and Multimedia Technology**. Shenzhen, China. pp. 379-384
- [12] Dabbang, P. (2003). **Performance Analysis of Hybrid DS/SFH SSMA in Multi-user and Multi-rate Environment**. M. Eng. Dissertation King Mongkut's University of Technology Ladkrabang.
- [13] GS1 EPC global. (2011). **Specification for EPC HF RFID Air Interface**. Access (4 June 2019). Available (https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/epcglobal_hf_2_0_3-standard-20110905r3.pdf)

การสำรวจไลเคนบริเวณป่าพรุในพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Survey of Lichen at Swamp Forest in Plant Genetic Protection Area, Rambhai Barni Rajabhat University

ชวัลรัตน์ สมนึก^{1*} และพิสุทธิ การบุญ²

Chawanrat Somnuek^{1*} and Phisut Kanboon²

Received: March 8, 2019; Revised: June 6, 2019; Accepted: June 6, 2019

บทคัดย่อ

การสำรวจไลเคนบริเวณป่าพรุในพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชฯ ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีในช่วงเดือนมกราคม - ตุลาคม พ.ศ. 2561 ทำการเก็บตัวอย่างไลเคนจากเปลือกต้นไม้ทุกต้นตลอดเส้นทางเดินสำรวจป่าพรุรวมระยะทาง 220 เมตร ร่วมกับการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อม พบตัวอย่างไลเคนทั้งหมด 53 ตัวอย่าง ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา อนุกรมวิธาน และทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีทดสอบสีในห้องปฏิบัติการ พบว่าไลเคนส่วนใหญ่มีรูปแบบการเจริญเติบโตเป็นแบบครัสโตไลเคนคิดเป็นร้อยละ 96.23 มีเพียง 2 ตัวอย่าง ที่มีรูปแบบการเจริญเติบโตแบบสแควมูโลส (Squamulose) คิดเป็นร้อยละ 3.77 โดยไลเคนที่พบสามารถจำแนกได้ 10 วงศ์ 16 สกุล 27 ชนิด ซึ่งวงศ์ที่มีความหลากหลายมากที่สุด 3 อันดับแรก จำแนกตามจำนวนสกุลและชนิดที่ระบุได้ ได้แก่ วงศ์ Graphidaceae (7 สกุล 11 ชนิด และระบุชนิดไม่ได้ 1 ชนิด รวม 26 ตัวอย่าง) วงศ์ Pyrenulaceae (1 สกุล 3 ชนิด และระบุชนิดไม่ได้ 1 ชนิด รวม 8 ตัวอย่าง) และวงศ์ Malmideaceae (1 สกุล 1 ชนิด และระบุชนิดไม่ได้ 1 ชนิด รวม 6 ตัวอย่าง) คิดเป็นร้อยละ 49.06 15.09 และ 11.32 ตามลำดับ ซึ่งไลเคนทั้ง 3 วงศ์นี้มักพบเจริญในสภาพแวดล้อมทั่วไปที่มีความชื้นและมีร่มเงา

คำสำคัญ : ไลเคน; ป่าพรุ; มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี

² คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี

¹ Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

² Faculty of Humanities and Social Science, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

* Corresponding Author E - mail Address: chawanrat.s@rbru.ac.th

Abstract

Lichen at swamp forest in Plant Genetic Conservation Project under the Royal Initiative of Her Royal Highness Maha Chakri Sirindhorn, Rambhai Barni Rajabhat University were surveyed in January - October 2018. The lichens were collected on both sides of the nature trail of swamp forest (about 220 meters), together with environmental data collection. Total of 53 samples were examined the morphology, taxonomy and chemical composition by spot test in laboratory. The predominance of taxa belonging to the crustose lichen (96.23 %) and only 2 samples were foliose lichen (3.77 %). The lichen samples were identified into 10 family, 16 genus and 27 species. The third largest family of lichen were Graphidaceae (7 genus, 11 species and non-identify 1 species, 26 samples), followed by Pyrenulaceae (1 genus, 3 species and non-identify 1 species, 8 samples) and Malmideaceae (1 genus, 1 species and non-identify 1 species, 6 samples), representing 49.06, 15.09 and 11.32, respectively. In which, these three lichens are usually grow in humid and shady environments.

Keywords: Lichen; Swamp Forest; Rambhai Barni Rajabhat University

บทนำ

ไลเคนเป็นสิ่งมีชีวิตที่เกิดจากการอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยระหว่างราและสาหร่าย ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตหนึ่งที่มีความหลากหลายทางพันธุกรรมค่อนข้างมาก เนื่องจากสาหร่ายชนิดหนึ่งสามารถเจริญคู่กับราได้หลายชนิดและเกิดเป็นไลเคนชนิดใหม่ [1] ไลเคนมีรูปแบบการเจริญเติบโตที่แตกต่างจากราและสาหร่ายที่เจริญแบบเป็นอิสระ โดยราทำหน้าที่รักษาความชื้นและป้องกันอันตรายจากแสงอาทิตย์ให้กับสาหร่าย ส่วนสาหร่ายมีคลอโรฟิลล์สร้างอาหารจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและแบ่งอาหารให้กับเชื้อรา [2]

ไลเคนมีประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ใช้เป็นอาหาร น้ำหอม ยารักษาโรค ใช้ย้อมสี การตรวจสอบอายุของวัตถุโบราณ รวมถึงใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพอากาศได้ เป็นต้น [3] การศึกษาความหลากหลายของไลเคนในประเทศไทยยังมีค่อนข้างน้อย โดยทีมวิจัยของกัญจกรและเวชศาสตร์ [1] มีการสำรวจแล้วประมาณ 1,700 ชนิด และยังมีการสำรวจอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคาดว่าจะพบความหลากหลายของไลเคนเพิ่มขึ้นเนื่องจากสภาพแวดล้อมของประเทศไทยเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไลเคน ซึ่งบทบาทของไลเคนสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเรียนรู้ทางทรัพยากรและนำไลเคนมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ป่าปกปักษ์พันธุกรรมพีชา ในมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี เป็นป่าดั้งเดิมมีมาตั้งแต่ครั้งสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีเสด็จมาซื้อที่ดินบริเวณบ้านเขาไร่ยา ตำบลท่าช้าง จังหวัดจันทบุรี ในปี พ.ศ. 2492 เพื่อสร้างพระตำหนักและทำการเกษตร รวมทั้งการพัฒนาอาชีพทอเสื่อของชาวจันทบุรี ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี มีพื้นที่ประมาณ 50 ไร่ สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 20 เมตร ลักษณะพื้นที่เป็นแอ่งลุ่มกว่าพื้นที่โดยรอบ บริเวณตอนกลางเป็นที่ดอน พื้นที่

ด้านทิศเหนือลุ่มต่ำเป็นดินพรุมีน้ำขังตลอดปี ในป่ามีพันธุ์ไม้หลากหลายชนิดขึ้นปกคลุมอย่างหนาแน่นมีสัตว์หลากหลายชนิด รวมทั้งเห็ด รา และจุลินทรีย์ต่าง ๆ เหมาะสมต่อการศึกษาด้านอนุกรมวิธาน คุณประโยชน์ทางสมุนไพรและอื่น ๆ รวมถึงสามารถใช้เป็นแหล่งเรียนรู้ที่สำคัญให้กับนักเรียน นักศึกษาและประชาชนทั่วไปได้เข้ามามีส่วนร่วมในการเรียนรู้ สามารถใช้ประโยชน์จากป่าอนุรักษ์อย่างคุ้มค่า และสร้างจิตสำนึกที่ดีต่อการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ทำการสำรวจความหลากหลายของไลเคนในพื้นที่ป่าที่ติดต่อกับเส้นทางจราจรและเส้นทางศึกษาธรรมชาติในพื้นที่ป่าปกปักพันธุกรรมพืชฯ พบว่าชนิดและจำนวนของไลเคนระหว่างสองพื้นที่มีความแตกต่างกัน โดยคุณภาพสิ่งแวดล้อมทางกายภาพในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน เช่น ด้านของอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณความเข้มแสง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้อาจส่งผลต่อการเจริญของไลเคน ดังนั้นการสำรวจไลเคนในพื้นที่การวิจัยบริเวณป่าพรุครั้งนี้จึงเป็นอีกบริเวณหนึ่งในพื้นที่ป่าปกปักพันธุกรรมพืชฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีที่น่าจะมีผลของความชื้น อุณหภูมิ และปริมาณแสง ซึ่งเป็นปัจจัยต่อการเจริญของไลเคนที่แตกต่างกันได้ และอาจใช้เป็นข้อมูลในการสำรวจสภาพพื้นที่ต่าง ๆ ต่อการเจริญของไลเคนต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชฯ ประกอบด้วยพื้นที่ป่าและมีเส้นทางเดินศึกษาธรรมชาติทั้งทางบกและทางน้ำ (รูปที่ 1) พื้นที่บริเวณป่าพรุตั้งอยู่ที่ละติจูด $12^{\circ}39'N$ ลองจิจูด $102^{\circ}6'E$ ที่ระดับความสูงเหนือน้ำทะเลประมาณ 20 เมตร ซึ่งการสำรวจไลเคนตามเส้นทางเดินศึกษาธรรมชาติป่าพรุประกอบด้วย ทางเดิน 2 รูปแบบคือ ทางเดินแผ่นคอนกรีตที่สร้างยกสูงขึ้นจากพื้นดิน เนื่องจากพื้นดินด้านล่างมีน้ำท่วมขังไม่สามารถเดินสำรวจได้โดยสร้างสูงจากพื้นดินประมาณ 1 - 1.5 เมตร มีระยะทาง 100 เมตร และเมื่อสิ้นสุดเส้นทางแผ่นคอนกรีตจะเป็นเส้นทางเดินพื้นดินที่ติดต่อกับแหล่งน้ำธรรมชาติอีกประมาณ 120 เมตร (รูปที่ 2) รวมระยะทางประมาณ 220 เมตร



รูปที่ 1 ลักษณะพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



(ก) เส้นทางเดินแผ่นคอนกรีต



(ข) เส้นทางพื้นดินติดแหล่งน้ำ

รูปที่ 2 ลักษณะเส้นทางศึกษาธรรมชาติ

การเก็บตัวอย่างไลเคนเก็บจากเปลือกไม้ทุกต้นที่ขึ้นทั้งทางด้านซ้ายและขวาตลอดเส้นทางเดินในช่วงเดือนมกราคม - ตุลาคม 2561 โดยแบ่งการเก็บออกเป็น 3 ช่วง คือ เดือนมกราคม พฤษภาคม และ ตุลาคม เดือนละ 1 ครั้ง เพื่อให้ครอบคลุมทุกช่วงฤดูกาล ซึ่งเก็บตัวอย่างจากพื้นทางเดินจนถึงความสูงในระดับ 2 เมตร ตามรูปแบบของเส้นทางศึกษาธรรมชาติ ทำการวัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ GPS ยี่ห้อ Garmin รุ่น Etrex วัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศยี่ห้อ STANDARD รุ่น ST-8820 เครื่องวัดความเข้มแสงยี่ห้อ Delta OHM รุ่น HD 9021 วัดเส้นรอบวงของต้นไม้ และเส้นผ่านศูนย์กลางของไลเคน บันทึกภาพ พร้อมบันทึกจำนวน ตัวอย่างไลเคน ถูกนำออกจากพื้นที่โดยใช้มีดเฉือนออกมาพร้อมกับเปลือกไม้ที่ไลเคนเจริญติดอยู่ ห่อด้วยกระดาษทิชชู จากนั้นเก็บใส่ซองกระดาษแล้วนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องสเตอริโอและกล้องจุลทรรศน์ เพื่อสังเกตลักษณะโครงสร้างของแทลลัสภายนอก และตรวจสอบลักษณะทางกายวิภาควิทยา (Anatomy) โดยการตัดตามขวางของแทลลัสและโครงสร้างสืบพันธุ์เพื่อศึกษาโครงสร้างภายใน และลักษณะของสปอร์ พร้อมกับการทดสอบหยดสี (Spot Test) บนแทลลัส จากนั้นจำแนกชนิดของไลเคนตามหลักอนุกรมวิธาน

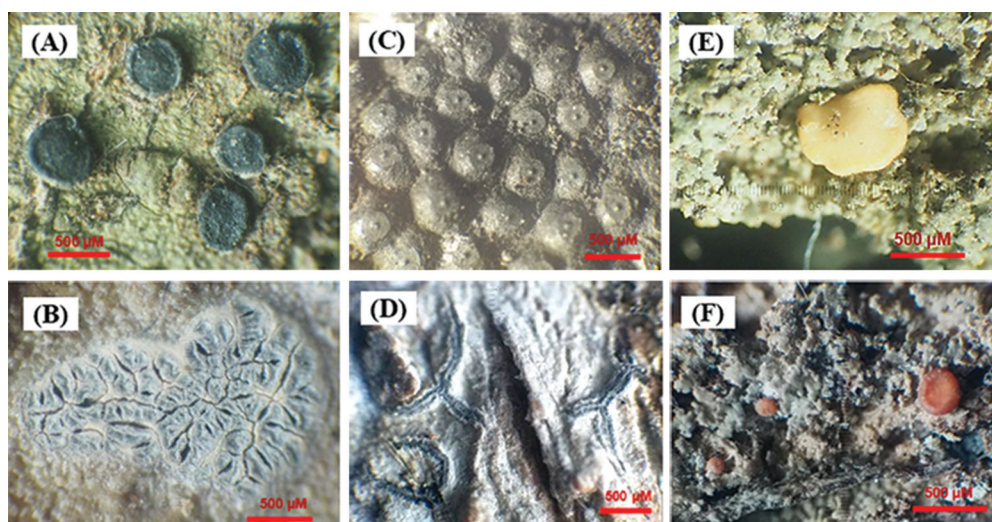
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากการสำรวจไลเคนในพื้นที่ปกปักพันธุ์กรรมพีชอันเนื่องมาจากพระราชดำริฯ ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีบริเวณพื้นที่ป่าพรุตามเส้นทางเดินทั้งสองประเภทมีแสงส่องลงมาในพื้นที่ค่อนข้างน้อย ยกเว้นบริเวณที่มีรอยต่อกับถนนด้านข้างของป่าที่มีแสงส่องเต็มที่และอาจได้รับผลกระทบจากควันรถยนต์ และรถจักรยานยนต์ที่วิ่งผ่านไปผ่านมาได้ ต้นไม้ส่วนใหญ่เป็นไม้ขนาดเล็กถึงขนาดกลางและมีเถาวัลย์ขึ้นปกคลุมโดยทั่วพื้นที่ (รูปที่ 2) มีเส้นรอบวงของต้นไม้ตั้งแต่ 2.9 - 22.8 นิ้ว ส่งผลให้ขนาดของไลเคนมีความแตกต่างกันตามขนาดของต้นไม้ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.7 - 5.8 นิ้ว และมีข้อมูลการตรวจวัดสภาพแวดล้อมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลสภาพแวดล้อมในพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชฯ

พารามิเตอร์	ช่วงการวัดที่ได้
ความชื้น	31.5 - 91.5 %RH
อุณหภูมิ	30.6 - 32.5 องศาเซลเซียส
ความเข้มแสง	235 - 5,701 ลักซ์

จากการสำรวจพื้นที่พบตัวอย่างไลเคนจำนวน 53 ตัวอย่าง ส่วนใหญ่มีรูปแบบการเจริญเติบโตเป็นแบบครัสโตส (Crustose) จำนวน 51 ตัวอย่าง และพบแบบสแควมูโลส (Squamulose) จำนวนเพียง 2 ตัวอย่าง (รูปที่ 3) ซึ่งไลเคนที่สำรวจพบทั้งหมด สามารถจำแนกได้ 10 วงศ์ 16 สกุล 27 ชนิด แบ่งเป็นไลเคนที่ระบุสกุลและชนิดได้ 12 สกุล 17 ชนิด และไลเคนที่สามารถระบุสกุลแต่ไม่สามารถระบุชนิดได้ 10 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 ตัวอย่างครัสโตสไลเคน (A - D) และสแควมูโลสไลเคน (E - F) ที่พบในพื้นที่ป่าพรุ

ไลเคนที่สำรวจในพื้นที่ป่าพรุมีจำนวนวงศ์เด่นของไลเคนที่พบ 3 อันดับแรก ได้แก่ วงศ์ Graphidaceae วงศ์ Pyrenulaceae และวงศ์ Malmideaceae เช่นเดียวกับการศึกษาในบริเวณเส้นทางศึกษาธรรมชาติของพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี [4] ซึ่งจากรูปแบบการเจริญของไลเคนทั้ง 3 วงศ์ มักพบเจริญในพื้นที่ที่มีความชื้นและมีร่มเงา สามารถเจริญได้ทั้งเปลือกไม้ พืชยืนต้นและพืชล้มลุก รวมถึงมีความทนทานต่อมลพิษ [5] - [6] แต่วงศ์ Graphidaceae มีความสามารถในการเจริญในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายในพื้นที่เขตร้อนชื้น เจริญบนวัตถุอาศัยได้หลายรูปแบบ เช่น เปลือกไม้ ก้อนหิน ใบไม้ เป็นต้น จึงสามารถสำรวจพบไลเคนวงศ์นี้ได้มากกว่าวงศ์อื่น เช่นเดียวกับการศึกษาของ [7] ที่สำรวจไลเคนในพื้นที่ป่าชายเลนของเกาะกูด จังหวัดตราด พบไลเคนวงศ์ Graphidaceae เจริญมากที่สุด

ตารางที่ 2 ชนิดของไลเคนที่พบบริเวณเส้นทางศึกษาธรรมชาติในพื้นที่ปกปักรักษาธรรมพิชา

วงศ์ (Family)	สกุล (Genus)	ชนิด (Species)	จำนวนตัวอย่าง	
Arthopyreniaceae	<i>Arthopyrenia</i>	<i>alboatra</i> (Krempelh.) Mull. Arg.	3	
Coenogoniaceae	<i>Coenogonium</i>	<i>luteum</i> (Dicks.) Kalb & Lücking	1	
Graphidaceae	<i>Chapsa</i>	sp.	1	
		<i>Glyphis</i>	<i>scyphulifera</i> (Ach.) Staiger	1
			<i>caesiocarpa</i> Redinger	1
	<i>Graphis</i>		<i>dracena</i> e Vain.	1
			sp.	3
		<i>Hemithecium</i>	<i>implicatum</i> (Fée) Staiger	4
	<i>Ocellularia</i>		<i>diacida</i> Hale.	2
			<i>papillata</i> (Leight.) Zahlbr.	4
			<i>brasiliensis</i> (A.Massal.) Kalb & Matthes-Leicht	3
	<i>Phaeographis</i>		<i>intricans</i> (Nyl.) Staiger	2
			sp.	1
		<i>Sarcographa</i>	<i>labyrinthica</i> (Ach.) Müll. Arg.	3
Malmideaceae	<i>Malmidea</i>	<i>inflata</i> Kalb.	2	
		sp.	4	
Monoblastiaceae	<i>Anthracotheicum</i>	<i>polycarpum</i> (Müll. Arg.) R. C. Harris	1	
Porinaceae	<i>Porina</i>	sp.1	1	
		sp.2	1	
Pyrenulaceae	<i>Pyrenula</i>	<i>anomala</i> (Ach.) A. Massal.	2	
		<i>aspistea</i> (Afzel. ex Ach.) Ach	4	
		<i>kurzii</i> A. Sing & Upreti	1	
		sp.	1	
		Monoblastiaceae	<i>Anisomeridium</i>	<i>polycarpum</i> (Müll. Arg.) R. C. Harris
Ramalinaceae	<i>Phyllopsora</i>	sp.1	1	
		sp.2	1	
Xylariaceae	<i>Annulohypoxylon</i>	sp.	2	
10 วงศ์	16 สกุล	27 ชนิด	53 ตัวอย่าง	

หมายเหตุ sp. คือ สปีชีส์ของไลเคนที่ยังไม่สามารถระบุชนิดได้แน่นอน

บริเวณพื้นที่ป่าพญานกยูงที่ทำการสำรวจไลเคนนั้นเป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งในป่าปกปักพันธุกรรมพืชฯ ที่อยู่ติดกับอาณาเขตของบริเวณเส้นทางศึกษาธรรมชาติ มีค่าความชื้น อุณหภูมิ และความเข้มแสงที่ตรวจวัดในพื้นที่ป่าพญานกยูง (ตารางที่ 1) สูงกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่เส้นทางศึกษาธรรมชาติ (ค่าความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 53.3 อุณหภูมิเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส และความเข้มแสงเฉลี่ย 240.8 ลักซ์) แต่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จึงอาจส่งผลให้ชนิดของไลเคนที่เจริญเติบโตได้มีลักษณะใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจำนวนและชนิดของไลเคนที่พบในพื้นที่ป่าพญานกยูงมีจำนวนน้อยกว่าที่พบในเส้นทางศึกษาธรรมชาติอาจเนื่องมาจากขนาดของพื้นที่และสภาพแวดล้อมในบางส่วนของพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน เช่น พื้นที่ชุ่มน้ำ หรือปริมาณต้นไม้ที่เจริญ เป็นต้น โดยพื้นที่ป่าพญานกยูงพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำซึ่งอาจส่งผลถึงความชื้นในพื้นที่และปริมาณต้นไม้ที่เจริญขึ้นบนพื้นดินที่มีน้ำท่วมขัง ส่วนใหญ่เป็นไม้ขนาดเล็กและเถาวัลย์จึงทำให้ขนาดแหล่งอาศัยของไลเคนที่พบมีขนาดเล็กและมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่มากตามขนาดของต้นไม้ตามไปด้วย

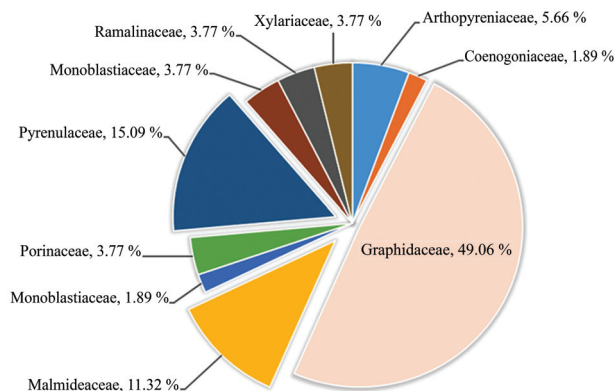
ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ไลเคนมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ [8] - [9] ได้แก่ แสง ความชื้น อุณหภูมิ ชนิดของเปลือกไม้ รวมถึงปริมาณมลพิษในพื้นที่ ซึ่งไลเคนแต่ละชนิดมีความทนทานต่อมลพิษในอากาศได้แตกต่างกัน และทนต่อชนิดของสารพิษในอากาศได้แตกต่างกันด้วย [10] โดยพื้นที่ป่าพญานกยูงมีรอยต่อติดกับถนนที่มีโอกาสสัมผัสกับมลพิษ จึงอาจส่งผลให้ไลเคนที่พบเป็นกลุ่มที่ทนทานต่อมลพิษได้ระดับหนึ่ง นอกจากนี้พื้นที่ป่าพญานกยูงมีพื้นที่โล่งที่เป็นจุดตัดระหว่างทางเดินคอนกรีตกับพื้นดินที่แสงส่องได้ทั่วบริเวณ โดยพบว่าไลเคน *Sarcographa labyrinthica* (Ach.) Müll. Arg. พบเจริญได้ในพื้นที่ลักษณะที่มีความเข้มแสงสูง (5,701 ลักซ์) อยู่ในกลุ่มของวงศ์ Graphidaceae ที่มีชนิดของไลเคนเจริญเติบโตในช่วงแสงที่ค่อนข้างกว้าง (942 - 5,701 ลักซ์) รองลงมาเป็นไลเคนในวงศ์ Pyrenulaceae (235 - 1,441 ลักซ์) และวงศ์ Malmideaceae (316 - 802 ลักซ์) ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Lücking, R. et al. [11] พบว่าไลเคนวงศ์ Graphidaceae เป็นวงศ์ที่ใหญ่ที่สุดของไลเคนในพื้นที่ป่าเขตร้อน รวมไปถึงป่าดิบเขากระจายไปถึงป่าดิบแล้งและป่าพุ่ม ส่วนใหญ่พบตามเปลือกไม้ที่มีร่มเงาไปจนถึงพื้นที่ขนาดเล็กที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน ซึ่งการศึกษาของ Lange, O. T. et al. [12] กล่าวว่าแสงมีอิทธิพลต่อการอยู่รอดและการเติบโตของไลเคนมาก โดยส่งผลถึงอุณหภูมิ ความชื้นในบรรยากาศ และการระเหยของน้ำจากแหล่งอาศัย ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจ จึงทำให้พบไลเคนเจริญในพื้นที่ที่มีแสงได้แตกต่างกัน

การกระจายของไลเคนวงศ์ Pyrenulaceae ขึ้นอยู่กับสภาพป่า [13] พบว่าสภาพป่าที่มีลักษณะโปร่งหรือตามชายป่าที่มีแสงส่องถึงจะเป็นแหล่งอาศัยที่ดีของไลเคนกลุ่มนี้ โดยพบไลเคนชนิดเด่น *Pyrenula kurzii* มีการกระจายได้ทั้งบนเกาะในฝั่งอ่าวไทยและอันดามันเจริญได้ดีบนต้นไม้ที่เปลือกมีผิวเรียบในป่าที่มียอดโปร่งจนถึงป่าดิบแล้ง แต่ไม่พบในป่าชายเลน และพบไลเคนชนิดเด่น *P. aspistae* และ *P. microcarpa* รองลงมา โดยพบตามเปลือกไม้ที่มีความแข็งและคงทนในป่าที่มีความเข้มแสงน้อย เช่น ป่าดิบชื้นและป่าดิบแล้ง เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบ *P. aspistae* มากกว่า *P. kurzii* อาจเป็นไปได้ว่าสภาพพื้นที่ของป่าพญานกยูงในป่าปกปักพันธุกรรมพืชฯ มีความเข้มแสงน้อยจึงมีลักษณะที่เอื้อต่อการเจริญของ *P. aspistae* มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ [13] ที่พบว่าไลเคนกลุ่มนี้เติบโตได้ดีบนผิวเปลือกไม้ที่เรียบไม่หยาบกร้าน เนื่องจากไลเคนกลุ่มนี้เติบโตขึ้นจึงต้องอาศัยเปลือกไม้ที่มีความคงทนเป็นแหล่งอาศัย เช่น ต้นเงาะป่า มะกอก หรือเถาวัลย์บางชนิด เป็นต้น

ส่วนไลเคนวงศ์ Malmideaceae เป็นไลเคนอีกกลุ่มที่มีความหลากหลายของชนิดจำนวนมาก และมีการแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง ซึ่งจากการศึกษา [14] พบว่าไลเคนแบบแผ่นจานพบได้เกือบทุกสภาพป่าที่ระดับความสูงตั้งแต่ 400 - 1,500 เมตรขึ้นไป จึงเป็นไปได้ว่าไลเคนในกลุ่มนี้สามารถเจริญเติบโตกระจายไปได้ในหลายพื้นที่ทำให้พบเป็นกลุ่มเด่นในบริเวณป่าพรุของป่าปกปักษ์พันธุ์กรรมพิชา ได้ ส่วนไลเคนที่สำรวจพบในพื้นที่ป่าพรุบริเวณที่มีความชื้นสูงที่สุด ได้แก่ *Porina* sp.2 (วงศ์ Porinaceae) มีร้อยละความชื้นเท่ากับ 91.5 รองลงมาคือ *Malmidea inflata* Kalb. (วงศ์ Malmideaceae) มีความชื้นเท่ากับร้อยละ 84.2 *Malmidea* sp. (วงศ์ Malmideaceae) และ *Ocelluria* sp. (วงศ์ Graphidaceae) มีความชื้นเท่ากับร้อยละ 81.6 และ *Pyrenula* sp. (วงศ์ Pyrenulaceae) มีความชื้นเท่ากับร้อยละ 79.9 ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

ไลเคนที่พบจำนวน 10 วงศ์ ได้แก่ วงศ์ Arthopyreniaceae, Coenogoniaceae, Graphidaceae, Malmideaceae, Monoblastiaceae, Porinaceae, Pyrenulaceae, Monoblastiaceae, Ramalinaceae และ Xylariaceae พบความหลากหลายมากที่สุด 3 อันดับแรก โดยจำแนกตามจำนวนสกุลและชนิด ได้แก่ วงศ์ Graphidaceae (7 สกุล 11 ชนิด และระบุชนิดไม่ได้ 1 ชนิด จำนวนรวม 26 ตัวอย่าง) วงศ์ Pyrenulaceae (1 สกุล 3 ชนิด และระบุชนิดไม่ได้ 1 ชนิด จำนวนรวม 8 ตัวอย่าง) และวงศ์ Malmideaceae (1 สกุล 1 ชนิด และระบุชนิดไม่ได้ 1 ชนิด จำนวนรวม 6 ตัวอย่าง) คิดเป็นร้อยละ 49.06 15.09 และ 11.32 ตามลำดับ (รูปที่ 4) ซึ่งความหลากหลายของไลเคนที่พบขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสภาพแวดล้อมและสภาพของพื้นที่ปกปักษ์พันธุ์กรรมพิชา ที่มีลักษณะร้อนชื้น มีแสงส่องถึงบ้างเล็กน้อย ไม่ค่อยมีลมพัด มีความสูงจากระดับน้ำทะเลเพียงแค่ 20 เมตร ทำให้พบไลเคนส่วนใหญ่เป็นแบบครัสโตไลเคน และวงศ์ที่พบเป็นชนิดเด่น ได้แก่ วงศ์ Graphidaceae วงศ์ Pyrenulaceae และวงศ์ Malmideaceae ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความหลากหลายของไลเคนค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลที่มากกว่า 600 เมตร ที่จะพบโพลิโอไลเคนเด่นกว่ากลุ่มครัสโตไลเคน [15] ทำให้มีความหลากหลายของรูปแบบการเจริญของไลเคนมากกว่าพื้นที่ปกปักษ์พันธุ์กรรมพิชาที่มีความสูงกวาระดับน้ำทะเลเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4 สัดส่วนไลเคนที่พบในพื้นที่ป่าปกปักษ์พันธุ์กรรมพิชา บริเวณป่าพรุ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยภายใต้โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

References

- [1] Boonpragob, K. and Polyiam, W. (2010). Lichen: Harmony that is the Model of Survival. (Lichen, Chapter 1). **Ramkhamhaeng News**. Vol. 40, No. 20, (August 30 - September 5, 2010). p. 7 (in Thai)
- [2] Ahmadjian, V. and Hale, M. E. (1993). **The Lichens**. Academic Press. New York
- [3] Gilbert, O. (2000). **Lichens**. London. HarperCollins
- [4] Somnuek, C., Poengsungnoen, V., KhamChatra, N., and Nongnutch, K. (2017). Lichens on Nature Trail in Plant Genetic Conservation Project, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi Province. **KKU Science Journal**. Vol. 45, No. 1, pp. 193-199 (in Thai)
- [5] Upreti, D. K. (1998). **Diversity of Lichen in India**. In: Perspective in Environment (Eds.: S. K. Aggarwal; J. P. Kaushik; K. K. Kaul and A. K. Jain), New Delhi, A.P.H. Publishing Corporation. pp. 71-79
- [6] Tiwari, S. C. and Prajapati, A. (2015). Lichen as Indicator of Forest Health Status in Achanakmar Amarkantak Biosphere Reserve. **International Journal of Research Studies in Biosciences (IJRSB)**. Vol. 3, Issue 4, (April 2015). pp. 70-79
- [7] Sodamuk, M. and Mongkolsuk, P. (2014). Lichen in Mangrove Forest at Koh Rua Sri, Trat Province in the Eastern, Thailand. In **Proceeding of the 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40)**. pp. 826-830
- [8] Boonpragob, K. and Buaruang, K. (2007). **Lichen of Samaesan Island from hilltop to the Sea**. Bangkok: Ramkhamhaeng University Press. (in Thai)
- [9] Saipunkaew, W. (2008). **Lichen and Environmental Quality Inspection. Workshop Document**. Department of Biology, Faculty of Science, Changmai University. Changmai. (in Thai)
- [10] Zedda, L. (2009). **Report on Lichen Sensitivity to Air Pollution with Special Reference to Sulphur Dioxide (SO₂)**. Access (5 February 2019). Available (<https://www.researchgate.net/publication/242270865>)
- [11] Lücking, R., Plata, E. R., Parnmen, S., Kalb, K., Mangold, A., and Lumbsch, H. T. (2011). **Tropical Lichen Guides: Graphidaceae Lichens of the World**. Access (11 February 2019). Available (<https://fieldguides.fieldmuseum.org/guides/guide/355>)
- [12] Lange, O. T., Green, T. G. A., and Heber, U. (2001). Hydration-Dependent Photosynthetic Production of Lichen: What Do Laboratory Studies Tell us About Field Performance?. **Journal of Experimental Botany**. Vol. 52, Issue 363, pp. 2033-2042. DOI: 10.1093/jexbot/52.363.2033

- [13] Phokaeo, S., Polyiam, W., Buaruang, K., Vongshewarat, K., and Boonpragob, K. (2013). Preliminary Study on the Pyrenolichens from the Islands of Thailand. **Thai Journal of Botany**. Vol. 5, (Special Issue). pp. 62-73 (in Thai)
- [14] Sriprang, V. and Mongkolsuk, P. (2010). Discolichens at Phu Luang Wildlife Sanctuary, Loei province. **Thai Journal of Botany**. Vol. 2, (Special Issue). pp. 47-53 (in Thai)
- [15] Saipunkaew, W., Wolseley, P., and Chimonides, P. J. (2005). Epiphytic Lichens as Indicators of Environmental Health in the Vicinity of Chiang Mai City, Thailand. **Lichenologist**. Vol. 37, No. 4, pp. 345-365

การเตือนภัยจากระดับน้ำในทะเลสาบล่งหน้ด้วยข้อมูลการตรวจวัดฝนทั่วโลก:
กรณีศึกษาทะเลสาบหนองหาร

Early Warning of Lake Level Fluctuations using Global Precipitation Measurement Data: A Case Study Nong Han Lake

ประวิทย์ อ่วงอารีย์^{1*} ชัยณรงค์ เพียรภาณุ¹ และทรงพล ประโยชน์¹

Prawit Ung-aree^{1*} Chainarong Pianpailoo¹ and Songphon Prayochme¹

Received: April 30, 2019; Revised: July 12, 2019; Accepted: July 24, 2019

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ข้อมูลการตรวจวัดฝนทั่วโลก (จีพีเอ็ม) ในการเตือนภัยล่งหน้จากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในทะเลสาบหนองหาร โดยทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างตัวแปรนำเข้า ได้แก่ ระดับน้ำในวันปัจจุบัน อัตราการระบายน้ำ อัตราการระเหย ปริมาณฝน และข้อมูลจีพีเอ็มกับตัวแปรเป้าหมาย คือ ดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้น อีกทั้งยังสร้างตัวแบบการทำนายด้วยการจัดการข้อมูลวิธีกลุ่มแบบเครือข่ายประสาท (GMDH-Type Neural Networks) ผลการศึกษาพบว่าการขึ้นลงของน้ำในทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นมีความสัมพันธ์ในระดับสูงกับระดับน้ำในวันปัจจุบันและอัตราการระบายน้ำ มีความสัมพันธ์ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำกับอัตราการระเหย ปริมาณฝนและข้อมูลจีพีเอ็ม นอกจากนี้การประเมินผลลัพธ์การทำนายของตัวแบบที่ได้ด้วยข้อมูลที่ตัวแบบไม่เคยพบมาก่อน พบว่าตัวแบบนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายค่อนข้างสูง โดยมีความเที่ยงตรงของการทำนายเท่ากับร้อยละ 90.5 แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มมีศักยภาพในการนำมาใช้งานเตือนภัยจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในทะเลสาบ

คำสำคัญ : การสำรวจระยะไกล; ทรัพยากรธรรมชาติ; การเปลี่ยนแปลงโลก; ภัยพิบัติ; จีเอ็มดีเอช

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

¹ Faculty of Science and Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: prawit@snru.ac.th

Abstract

This research investigated the possibility of using Global Precipitation Measurement Data (GPM) for early warning of Nong Han level fluctuations. The simple correlations between the input variables (such as the current lake level, the outflow rate, the evaporation rate, the daily precipitation, and the GPM data) and a target variable (the early-warning index of Nong Han lake level-fluctuations) were examined. Moreover, the early-warning model of level fluctuations hazard was developed, using GMDH-type neural networks. The results indicated that the correlations between of Nong Han level fluctuations with the current lake level and the outflow rate are high; and, the interrelationship between evaporation rate, the daily precipitation, and the GPM data is medium-low. The model evaluation, which uses blind data show the high ability of model with 90.5 % accuracy. The GPM data, thus, represents a helpful tool for early warning of lake level fluctuations.

Keywords: Remote Sensing; Natural Resources; Global Change; Disaster; GMDH

บทนำ

ภัยพิบัติทางธรรมชาติอย่างสุดซึ้งเป็นสภาวะการณ์ที่ทุกภูมิภาคของโลกกำลังเผชิญหน้า ทุกประเทศในทุกทวีป ต่างได้รับหรือเคยได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติทางธรรมชาติที่มีความรุนแรงทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยมีความถี่และรุนแรงมากขึ้นกว่าครั้งอดีต ภัยพิบัติทางธรรมชาติเหล่านี้ไม่ว่าจะเป็นอุทกภัย วาตภัย แผ่นดินไหว แผ่นดินถล่มหรือภัยแล้ง ต่างก็ส่งผลกระทบต่อมนุษย์อย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งภัยจากน้ำ ซึ่งสามารถทำลายทั้งชีวิต ทรัพย์สิน เศรษฐกิจและสังคมอย่างเป็นวงกว้าง เนื่องจากทุกอารยธรรม ต่างมีน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงอยู่ทั้งสิ้น ยิ่งกว่านั้นประเทศด้อยพัฒนาและกำลังพัฒนามีแนวโน้มที่ได้รับผลกระทบที่สูงกว่าประเทศพัฒนาแล้ว เนื่องจากไม่สามารถปรับตัวหรือจัดการบริหารความเสี่ยง เพื่อรับมือกับภัยเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

การบริหารความเสี่ยงจากน้ำเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดผลกระทบจากภัยของน้ำที่มีต่อพื้นที่เสี่ยง แม้มนุษย์ไม่สามารถควบคุมปริมาณน้ำฝนที่ตกได้แต่สามารถบริหารจัดการความเสี่ยง โดยการเตรียมตัวรับมือกับภัยพิบัติเพื่อบรรเทาภัยจากหนักสู่เบา การบริหารจัดการความเสี่ยงจากน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เกิดปัจจัยสองปัจจัย คือ ข้อมูลที่เชื่อถือ เช่น ข้อมูลฝน ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น และเครื่องมือในการบริหารจัดการ เช่น แบบจำลองการไหลของน้ำในพื้นที่รับน้ำ และการทำนายการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ เป็นต้น สองสิ่งนี้เป็นปัจจัยสำคัญยิ่งยวดที่ส่งผลต่อการตัดสินใจของผู้บริหารจัดการน้ำหรือผู้บริหารความเสี่ยงจากน้ำ ดังนั้นการบริหารความเสี่ยงจากน้ำจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญต่อการเตรียมรับมือจากภัยพิบัติต่าง ๆ จากน้ำ ซึ่งไม่ว่าจะคาดเดาได้ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อใด ความเสี่ยงนี้มีความเสี่ยงด้านปริมาณ เช่น ภัยแล้ง หรืออุทกภัย และความเสี่ยงด้านคุณภาพ เช่น คุณภาพน้ำดื่ม หรือน้ำประปา เป็นต้น นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในภัยพิบัติอื่นเนื่องจากน้ำ เช่น ภัยแผ่นดินถล่ม อีกด้วย การบริหารความเสี่ยง

จากน้ำได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในยุคแห่งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก เช่น การใช้รับมือผลกระทบของภัยแล้งและอุทกภัยในยุโรป [2] การบริหารความเสี่ยงน้ำท่วมในเนเธอร์แลนด์ [3] การประเมินความเสี่ยงของภัยแล้งในจีน [4] การจัดความเสี่ยงจากอุทกภัยในอังกฤษ [5] เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยเริ่มมีการให้ความสำคัญกับการบริหารความเสี่ยงมากขึ้นจากน้ำหลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่เมื่อปี พ.ศ. 2554 เนื่องจากพบว่าการบริหารความเสี่ยงจากน้ำของประเทศไทยไม่มีประสิทธิภาพและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลกระทบให้ความเสียหายรุนแรงและเป็นวงกว้าง [6]

การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในแหล่งน้ำเป็นข้อมูลสำคัญในการบริหารแหล่งน้ำและการบริหารความเสี่ยงจากน้ำ โดยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจก่อให้เกิดเหตุการณ์น้ำท่วม [7] เป็นสาเหตุของการพังทลายของดิน [8] ส่งเสริมให้การเสื่อมสภาพของดินโดยรอบแหล่งน้ำ [9] และยังสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิเวศทางน้ำ [10] เช่น เป็นปัจจัยของการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชหรือพืชใต้น้ำ [11] - [12] หรือส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในระบบนิเวศ [13] เป็นต้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำยังส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำประมงอีกด้วย [14] ดังนั้นข้อมูลและการทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในแหล่งน้ำจึงมีความจำเป็นต่อการบริหารความเสี่ยงจากน้ำอย่างยิ่งเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องในหลายมิติที่เป็นปัจจัยเสี่ยงจากน้ำทั้งทางด้านภัยพิบัติ สิ่งแวดล้อม และการเกษตร ปัจจุบันการประมาณค่าหรือการทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในแหล่งน้ำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้แบบจำลองอุทกวิทยาหรือการใช้แบบจำลองทางเหมืองข้อมูลจากข้อมูลอุทกวิทยา [15]

การวัดฝนทั่วโลก (Global Precipitation Measurement) หรือจีพีเอ็ม (GPM) เป็นข้อมูลการตรวจวัดหยาดน้ำฟ้า (Precipitation) ด้วยดาวเทียมจีพีเอ็มหลัก (GPM Core Satellite) ที่พัฒนาขึ้นจากความสำเร็จของโครงการตรวจวัดฝนในภูมิภาคเขตร้อน (Tropical Rainfall Measuring Mission) หรือทีอาร์เอ็มเอ็ม (TRMM) ดาวเทียมจีพีเอ็มหลักนี้ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรระดับต่ำเมื่อปี พ.ศ. 2557 ซึ่งดำเนินการและบริหารจัดการโดยร่วมมือระหว่างองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) และองค์การวิจัยและพัฒนาการสำรวจอวกาศญี่ปุ่น (JAXA) ดาวเทียมนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับฝน 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องจับภาพด้วยไมโครเวฟจีพีเอ็ม (GPM Microwave Imager) และเรดาร์ตรวจจับฝนแบบสองความถี่ (Dual-Frequency Precipitation Radar) โดยทำการตรวจจับฝนที่ความละเอียดสูงสุด 0.1° ในช่วงละติจูด $60^\circ\text{N} - 60^\circ\text{S}$ นอกจากข้อมูลจากดาวเทียมจีพีเอ็มหลักแล้วโครงการจีพีเอ็มยังประสานข้อมูลจากดาวเทียมชาติพันธมิตรอื่น ได้แก่ ฝรั่งเศส อินเดีย และยุโรป เพื่อประมวลผลและทวนสอบข้อมูลฝน (Precipitation Processing and Validation) ก่อนเผยแพร่เป็นข้อมูลฝนสำหรับการใช้งานเร็วที่สุดคือประมาณ 4 ชั่วโมง และจะเผยแพร่ข้อมูลฝนที่ผ่านการปรับแก้ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลจากมาตรวัดฝนภาคพื้นดินจากจีพีซีซี (Global Precipitation Climatology Center: GPCC) ภายในระยะเวลา 2 เดือน [16]

ข้อมูลจีพีเอ็มได้ถูกนำไปใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยาอย่างกว้างขวาง เช่น การนำไปใช้ปรับแก้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ [17] การนำไปใช้ในแบบจำลองทางอุทกวิทยาเพื่อพยากรณ์น้ำท่วม [18] การตรวจจับปริมาณหิมะตก [19] การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับฝนตกหนักในอินเดีย [20] การนำไปใช้วิเคราะห์ปัจจัยน้ำท่วมในจาการ์ตา [21] และการนำไปใช้วิเคราะห์ปริมาณฝนจากพายุเฮอริเคนที่ทำให้เกิดน้ำท่วมในรัฐเซาท์แคโรไลนา [22] เป็นต้น

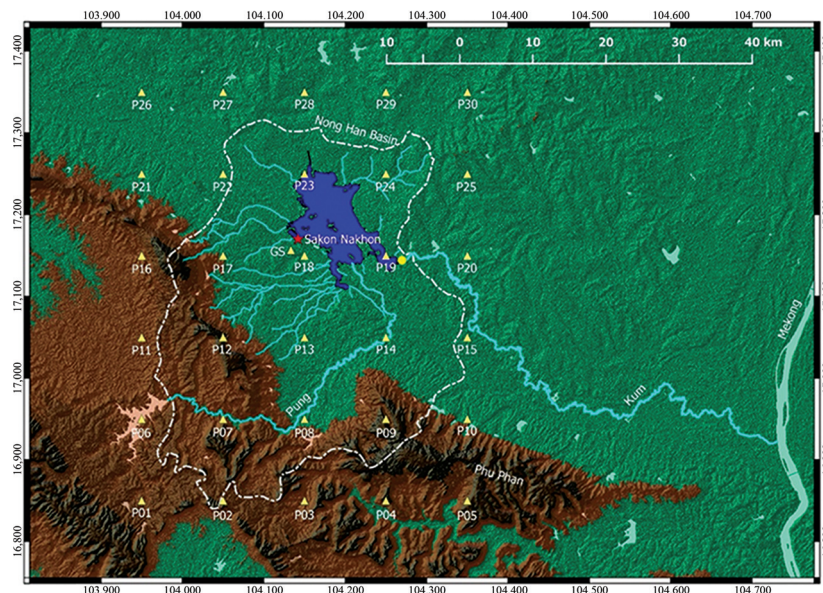
การบริหารความเสี่ยงจากน้ำเป็นเครื่องมือที่จำเป็นต่อการบรรเทาความเสียหายจากภัยพิบัติอันเกิดจากน้ำทั้งภัยแล้งและอุทกภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตพื้นที่ชุมชนที่ตั้งอยู่ใกล้กับทะเลสาบ

ซึ่งหากเกิดอุทกภัยหรือภัยแล้งก็อาจส่งผลกระทบต่อรุนแรงได้ เนื่องจากทะเลสาบอาจเป็นทั้งแหล่งรองรับน้ำหลากและแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคเดียวของชุมชน กรณีศึกษานี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มในการเตือนภัยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในทะเลสาบหนองหารด้วยการจัดการข้อมูลวิธีกลุ่ม (Group Method of Data Handling) หรือจีเอ็มดีเอช (GMDH) โดยใช้ข้อมูลจีพีเอ็มรวมกับข้อมูลอุทก-อุตุนิยมวิทยาพื้นฐานเพื่อเตือนภัยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในทะเลสาบซึ่งมีชุมชนขนาดใหญ่ตั้งอยู่ริมน้ำล่งหน้าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

วิธีการดำเนินวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

กรณีศึกษานี้เป็นการทดสอบความเป็นไปได้ของการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มเพื่อเตือนภัยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำของทะเลสาบหนองหารซึ่งเป็นทะเลสาบน้ำจืดขนาดใหญ่เป็นอันดับ 2 ของประเทศไทย ตั้งอยู่จังหวัดสกลนคร ณ ตำแหน่งละติจูด 17.20°N ลองจิจูด 104.18°E บนราบระหว่างเทือกเขาภูพานและแม่น้ำโขงที่รู้จักกันดีในชื่อแอ่งสกลนคร (Sakon Nakhon Basin) ทะเลสาบนี้มีความลึกเฉลี่ย 2 ม. โดยมีระดับตื้นน้ำอยู่ที่ 151 - 153 ม. จากระดับน้ำทะเลปานกลางและมีระดับน้ำเปลี่ยนแปลงขึ้นลง 2 ม. โดยมีระดับน้ำที่ 157 ม. จากระดับน้ำทะเลปานกลางเป็นระดับน้ำเก็บกักสูงสุด ทะเลสาบมีพื้นผิวน้ำที่ประมาณ 134×10^6 ตร.ม. และเก็บกักน้ำได้ 267×10^6 ลบ.ม. น้ำในทะเลสาบเป็นน้ำที่เกิดจากการไหลรวมตัวกันของลำน้ำขนาดน้อยใหญ่กว่า 21 สายที่ทอดตัวรับน้ำจากพื้นที่รับน้ำบนเทือกเขาภูพานและพื้นที่รับน้ำรอบข้าง เช่น ลำน้ำพุง ห้วยเคียก ห้วยทราย ห้วยลอง และห้วยลาก เป็นต้น มีจุดระบายน้ำออกเพียงตำแหน่งเดียวบริเวณทิศตะวันออกผ่านประตูน้ำและทางน้ำสันจุกเงิน (จุควงกลม •) ไหลลงสู่ลำน้ำก่ำก่อนจะไหลรวมตัวกับแม่น้ำโขง โดยมีพายุดีเปรสชันประจำฤดูกาลและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ช่วงกลางเดือนพฤษภาคมถึงต้นเดือนตุลาคมเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำไหลลงทะเลสาบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา ตำแหน่งข้อมูลจีพีเอ็ม (P01 - P30) และตำแหน่งสถานีอุตุนิยมวิทยาภาคพื้น (GS)

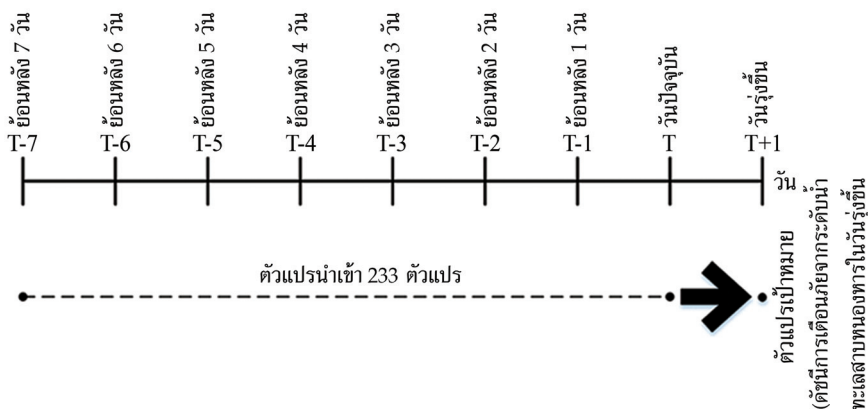
2. ขั้นตอนการศึกษา

การวิจัยนี้มีขอบเขตพื้นที่ในการดำเนินการวิจัยในพื้นที่ลุ่มน้ำพุ่ง (ท้ายเขื่อนน้ำพุ่ง) และลุ่มน้ำหนองหารซึ่งเป็นพื้นที่รับน้ำของหนองหารซึ่งครอบคลุมอำเภอภูพาน อำเภอเต่างอย และอำเภอเมืองสกลนคร จังหวัดสกลนคร ดังแสดงในรูปที่ 1 มีขั้นตอนการศึกษา 4 ขั้นตอนคือ 1) การเตรียมข้อมูล 2) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล 3) การสร้างตัวแบบการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ และ 4) การทดสอบตัวแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การเตรียมข้อมูล ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการเตรียมและจัดหาข้อมูลต่าง ๆ สำหรับการสร้างตัวแบบประกอบด้วย ตัวแปรนำเข้าจำนวน 233 ตัวแปร ได้แก่ ข้อมูลฝนจีพีเอ็มรายวันทั้ง 30 สถานี (P01 - P30) ข้อมูลฝนจีพีเอ็มเฉลี่ยรายวัน ข้อมูลระดับน้ำรายวัน ข้อมูลอัตราการระบายน้ำรายวัน ข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยาภาคพื้น (GS) และข้อมูลการระเหยรายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยาภาคพื้น โดยข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลย้อนหลัง 1 - 7 วัน (T-1 ถึง T-7) ยกเว้นข้อมูลระดับน้ำรายวัน และข้อมูลอัตราการระบายน้ำที่เป็นข้อมูลในวันปัจจุบัน (T) และเตรียมข้อมูลสำหรับใช้เป็นตัวแปรเป้าหมายจำนวน 1 ตัวแปร คือ ค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำหนองหารในวันรุ่งขึ้น (T+1) ดังตารางที่ 1 ซึ่งสามารถแสดงเส้นเวลาการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 2 โดยข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัยนี้ครอบคลุมระยะเวลาดังแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2558 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 รวมทั้งสิ้น 1,365 ชุดข้อมูล ข้อมูลทุกชุดถูกตรวจสอบความครบถ้วนสมบูรณ์และสุ่มเลือกแบบไร้รูปแบบ (Uniformly) เพื่อแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นข้อมูลสำหรับตัวแบบเรียนรู้ (Model Learning) จำนวนร้อยละ 70 และกลุ่มที่ 2 เป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบตัวแบบ (Model Test) จำนวนร้อยละ 30

ตารางที่ 1 ดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้น

ระดับน้ำ (ม. รทก.)	ดัชนีการเตือนภัย	คำอธิบาย
< 155.499	1	ในวันรุ่งขึ้นมีความเสี่ยงสูงสุดที่ส่งผลกระทบต่อการใช้น้ำ
155.500 - 155.999	2	ในวันรุ่งขึ้นมีความเสี่ยงสูงที่ส่งผลกระทบต่อการใช้น้ำ
156.000 - 156.499	3	ในวันรุ่งขึ้นมีความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อการใช้น้ำ
156.500 - 156.749	4	ในวันรุ่งขึ้นต้องเฝ้าระวังผลกระทบต่อการใช้น้ำ
156.750 - 156.999	5	ในวันรุ่งขึ้นมีระดับน้ำในสภาวะปกติ
157.000 - 157.499	6	ในวันรุ่งขึ้นต้องเฝ้าอันตรายระวังภัยน้ำท่วม
157.500 - 157.999	7	ในวันรุ่งขึ้นมีความเสี่ยงอันตรายต่อภัยน้ำท่วม
158.000 - 158.299	8	ในวันรุ่งขึ้นมีความเสี่ยงอันตรายสูงต่อภัยน้ำท่วม
> 158.300	9	ในวันรุ่งขึ้นมีความเสี่ยงอันตรายสูงสุดต่อภัยน้ำท่วม



รูปที่ 2 เส้นเวลาของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรเป้าหมาย

2) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล ขั้นตอนนี้จะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลนำเข้า กับข้อมูลเป้าหมายด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation Analysis) เพื่อตรวจสอบ และแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเบื้องต้น นอกจากนี้จะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลฝนจื๋อเอ็ม รายวันกับข้อมูลฝนรายวัน ณ สถานีตรวจวัดน้ำฝนที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งข้อมูลฝนจื๋อเอ็มมากที่สุด เพื่อแสดงค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลฝนจากการสำรวจระยะไกลและข้อมูลจากสถานภาคพื้น

3) การสร้างตัวแบบการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ โดยข้อมูลนำเข้าจำนวนร้อยละ 70 ที่สุ่มเลือกไว้จะถูกนำเข้าเพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการทำนายดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหาร ในวันรุ่งขึ้น ด้วยวิธีการจัดการข้อมูลแบบวิธีกลุ่ม (Group Method of Data Handling: GMDH) ด้วยโปรแกรม GMDH Shell DS เวอร์ชัน 3.8 โดยข้อมูลนำเข้าจะถูกเรียงลำดับใหม่แบบคู่ - คี่ และ ใช้ขั้นตอนวิธีหลัก (Core Algorithm) แบบเครือข่ายประสาท (GMDH-Type Neural Networks) ที่มีฟังก์ชันแบบควอดราติกพหุนาม (Quadratic Polynomial) เป็นฟังก์ชันของเครือข่ายประสาท ขั้นตอนวิธีนี้เป็นที่นิยมและสามารถสร้างตัวแบบการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ได้มีประสิทธิภาพ แม้ว่าตัวแปรนำเข้าจะมีความสัมพันธ์เชิงสถิติต่ำ

4) การทดสอบตัวแบบ ขั้นตอนนี้อัลกอริทึมที่เหลือน้อยลง 30 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ตัวแบบ ไม่เคยพบมาก่อนถูกใช้ทดสอบความเที่ยงตรงและความแม่นยำของตัวแบบที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว การทดสอบประสิทธิภาพจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัวแบบด้วยค่าความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และร้อยละความถูกต้องของการทำนาย

ผลการวิจัย

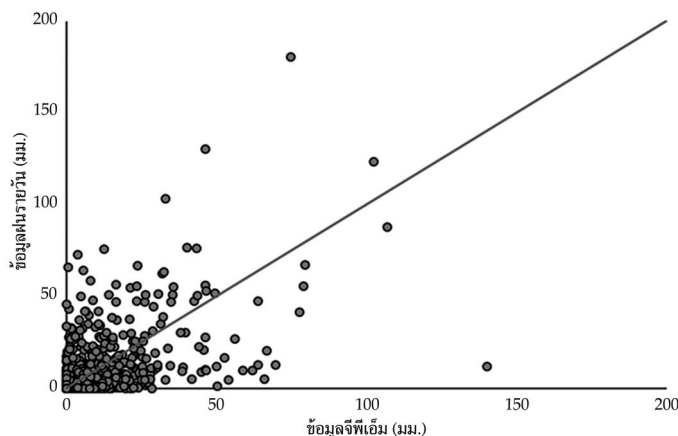
1. ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นกับข้อมูลนำเข้า จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation) ระหว่างตัวแปรนำเข้าจำนวน 233 ตัวแปร ที่ใช้ในการสร้างตัวแบบกับตัวแปรเป้าหมายคือ ดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหาร ในวันรุ่งขึ้น พบว่าข้อมูลระดับน้ำรายวันและข้อมูลอัตราการระบายน้ำรายวันมีความสัมพันธ์กับดัชนี

การเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นสูงที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.95 และ 0.67 สำหรับกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ รองลงมาได้แก่ ข้อมูลการระเหยรายวันจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นที่ย้อนหลัง 1 - 7 วัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ระหว่าง -0.30 ถึง -0.33 สำหรับตัวแปรข้อมูลจีพีเอ็มและข้อมูลปริมาณฝนรายวัน ณ สถานีต่าง ๆ ย้อนหลัง 1 - 7 วันนั้น มีความสัมพันธ์กับดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นค่อนข้างต่ำคือ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ระหว่าง 0.17 ถึง 0.28 ดังนั้นข้อมูลจีพีเอ็มและข้อมูลปริมาณฝนรายวันในบางวันและบางสถานีอาจไม่ถูกเลือกโดยเครือข่ายประสาทเทียมเนื่องจากมีตัวแปรมีความสัมพันธ์กันต่ำ อย่างไรก็ตามในขั้นนี้จะไม่ตัดตัวแปรนำเข้าที่ความสัมพันธ์ต่ำทิ้งเนื่องจากเครือข่ายประสาทจะทำการคัดเลือกตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักสูงสุดในแต่ละชั้นของชั้นซ่อนตัว (Hidden Layer) โดยอัตโนมัติ

นอกจากนี้หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรนำและตัวแปรเป้าหมายจะสังเกตได้ว่าข้อมูลระดับน้ำรายวัน ข้อมูลอัตราการระบายน้ำรายวัน ข้อมูลปริมาณฝนและข้อมูลจีพีเอ็มมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับตัวแปรเป้าหมาย กล่าวคือเมื่อตัวแปรเหล่านี้เพิ่มขึ้นค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นจะสูงขึ้น (ระดับน้ำสูงขึ้น) ในทางตรงข้ามตัวแปรข้อมูลการระเหยรายวันที่มีทิศทางความสัมพันธ์ในลักษณะตรงข้ามกับตัวแปรเป้าหมาย แสดงให้เห็นว่าเมื่อการระเหยรายวันสูงขึ้นดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นจะลดลง (ระดับน้ำลดลง) ทั้งนี้การพบว่ามีข้อมูลอัตราการระบายน้ำรายวันมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับตัวแปรเป้าหมาย ทั้งที่การระบายน้ำออกควรจะส่งผลในระดับน้ำลดลงและให้ลักษณะความสัมพันธ์แบบตรงกันข้ามนั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากการระบายน้ำออกในการพยายามควบคุมให้ระดับน้ำอยู่ในโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) หรืออาจเกิดการไหลล้นออกทางระบายน้ำฉุกเฉิน ปริมาณน้ำที่ระบายออกจึงเป็นไปตามระดับความสูงของน้ำในทะเลสาบหนองหาร ตัวแปรทั้งสองจึงมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน

2. ความสัมพันธ์ระหว่างฝนรายวันและข้อมูลจีพีเอ็มรายวัน

ข้อมูลจีพีเอ็มเป็นข้อมูลฝนที่ได้จากการตรวจวัดด้วยการสำรวจระยะไกลผ่านดาวเทียม จึงเหมาะในการนำมาใช้งานเชิงพื้นที่ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างฝนรายวันและข้อมูลจีพีเอ็มในหัวข้อนี้จึงเป็นการยืนยันระดับและทิศทางความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระยะไกลกับข้อมูลฝนของสถานีภาคพื้น โดยทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ข้อมูลจีพีเอ็มสถานี P18 กับข้อมูลฝนสถานีอุคณิยมหาวิทยาลัยสกลนคร (GS) ด้วยสหสัมพันธ์เพียร์สันโปรดักส์โมเมนต์ พบว่าข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบมีทิศทางเดียวกันในระดับปานกลางโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.60 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ดังรูปที่ 3 แม้สถานีอุคณิยมหาวิทยาลัยสกลนครจะเป็นสถานีภาคพื้นที่อยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งข้อมูลจีพีเอ็มสถานี P18 มากที่สุดแต่ก็มีระยะทางที่ห่างกันถึง 2 กิโลเมตร ดังนั้นด้วยระยะทางที่ห่างกันนี้ข้อมูลฝนรายวันและข้อมูลจีพีเอ็มรายวันจึงอาจมีแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามข้อมูลฝนสถานีอุคณิยมหาวิทยาลัยสกลนครเป็นข้อมูลแบบจุดที่แสดงปริมาณฝน ณ ตำแหน่งการตรวจวัดเท่านั้น และไม่อาจบ่งบอกถึงปริมาณฝนที่ตกทั่วทั้งพื้นที่รับน้ำได้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงนำเสนอการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มซึ่งเป็นข้อมูลฝนเชิงพื้นที่ที่สามารถพิจารณาฝนได้ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำมาใช้ในการสร้างตัวแบบการทำนายการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ

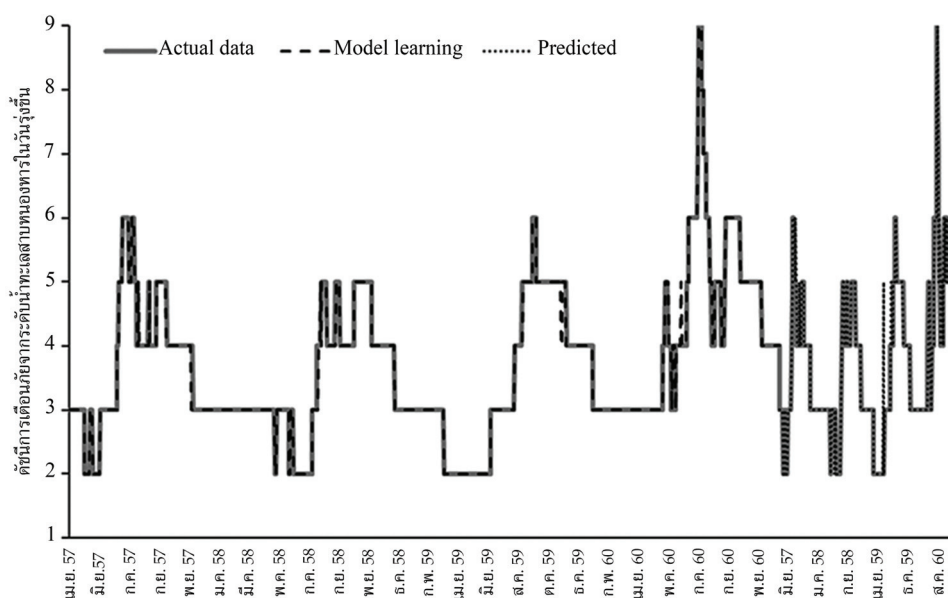


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลฝนรายวันกับข้อมูลจีพีเอ็ม

3. ตัวแบบทำนายดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้น

จากการนำเข้าข้อมูลตัวแปรนำเข้าทั้ง 233 ตัวแปรเพื่อสร้างตัวแบบทำนายดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้น พบว่าในขั้นตอนตัวแบบเรียนรู้ (Model Learning) มีการสุ่มชุดข้อมูลเพื่อใช้สร้างตัวแบบทั้งสิ้น 1,092 ชุดข้อมูลคิดเป็นร้อยละ 70 ของชุดข้อมูลทั้งหมด ตัวแบบเรียนรู้ที่ได้จากการจัดการข้อมูลแบบวิธีกลุ่มชนิดเครือข่ายประสาท (เส้นประในรูปที่ 4) มีความเที่ยงตรงร้อยละ 97.3 ซึ่งอยู่ในระดับที่สูงมาก โดยสามารถเรียนรู้ค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นที่ระดับ 2 - 9 (เส้นทึบสีเทาในรูปที่ 4) ได้แม่นยำร้อยละ 100 98.4 95.1 95.2 100 100 100 และ 100 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวแบบเรียนรู้ที่ได้จากข้อมูลนำเข้านี้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงเหมาะสำหรับการใช้ในการทำนายค่าตัวแปรเป้าหมาย

นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบตัวแบบเรียนรู้ด้วยชุดข้อมูลที่ตัวแบบไม่เคยพบมาก่อน (จุดไข่วปลาในรูปที่ 4) พบว่าตัวแบบนี้มีความเที่ยงตรงในการทำนายค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นสูงถึงร้อยละ 90.5 กล่าวคือสามารถทำนายค่าได้ถูกต้องเที่ยงตรงเป็นจำนวน 247 ครั้ง จาก 273 ครั้ง ซึ่งอยู่ในระดับเที่ยงตรงที่สูงโดยมีความแม่นยำในการทำนายค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นที่ระดับ 2 - 9 เท่ากับร้อยละ 96.7 95.5 92.1 81.1 78.6 - 0.0 และ 0.0 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 และสังเกตได้ว่าจำนวนครั้งที่ตัวแบบทำนายผิดไปจากค่าจริงเกินกว่า ± 1 ระดับ มีจำนวนเพียง 2 ครั้งหรือคิดเป็นร้อยละ 0.73 ของการทำนายทั้งหมด ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลระดับภาคสนามสามารถสร้างตัวแบบในการทำนายค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นระบบเตือนภัยจากระดับน้ำในทะเลสาบหนองหารได้ล่วงหน้า 24 ชั่วโมง ด้วยความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามเพื่อให้ตัวแบบมีความเที่ยงตรงสูงขึ้นและลดความคลาดเคลื่อนในการทำนายให้ต่ำลงควรมีการเก็บข้อมูลและปรับปรุงตัวแบบอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ตัวแบบมีการปรับตัวต่อสถานการณ์สิ่งแวดล้อมที่อาจเปลี่ยนไป อีกทั้งควรศึกษาความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นเพิ่มเติม เช่น อัตราการใช้ไฟฟ้า อัตราการขึ้น และอัตราน้ำไหลเข้า เป็นต้น



รูปที่ 4 ตัวแบบเรียนรู้และการทดสอบตัวแบบ

ตารางที่ 2 การประเมินผลลัพธ์การทำนายจากตัวแบบ

		Predicted class								Total	Recall
		2	3	4	5	6	7	8	9		
Actual class	2	29	1	0	1	0	0	0	0	31	0.935
	3	1	106	1	0	0	0	0	0	108	0.981
	4	0	4	58	5	0	0	0	0	67	0.866
	5	0	0	4	43	3	0	0	0	50	0.860
	6	0	0	0	3	11	0	0	0	14	0.786
	7	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.000
	8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.000
	9	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0.000
Total		30	111	63	53	14	0	1	1	273	
Precision		0.967	0.955	0.921	0.811	0.786	-	0.000	0.000		
Accuracy		0.989	0.974	0.949	0.938	0.978	0.996	0.993	0.993	0.905	

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวแบบที่มีการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มกับตัวแบบที่ไม่มีการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มด้วยขั้นตอนแล้ววิธีการเดียวกัน พบว่าตัวแบบที่ไม่มีการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มมีความเที่ยงตรงในการทำนายค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นเท่ากับร้อยละ 76.9 หรือทำนายได้ถูกต้องเพียง 210 ครั้งจาก 273 ครั้งเท่านั้น ซึ่งให้ผลที่แตกต่างกับตัวแบบที่มีการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มที่ให้ผลความเที่ยงตรงของการทดสอบสูงถึงร้อยละ 90.5

ข้อมูลจีพีเอ็มจึงเป็นข้อมูลการสำรวจระยะไกลหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นข้อมูลเปิดที่ผู้ใช้งานสามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่ค่าใช้จ่าย และยังมีค่าความละเอียดของข้อมูลเชิงพื้นที่ถึง 0.1 องศา จึงเหมาะต่อการนำมาใช้งานทั้งในระดับภูมิภาคและในระดับท้องถิ่น

สรุป

ระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นมีการขึ้นลงตามระดับน้ำในวันปัจจุบัน ปริมาณน้ำฝน อัตราการระเหย และอัตราการระบายน้ำ โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในวันรุ่งขึ้นมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำในวันปัจจุบัน อัตราการระบายน้ำ และปริมาณฝนในระดับสูง ปานกลางและต่ำในทิศทางเดียวกัน ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์กับอัตราการระเหยในระดับปานกลางในทิศทางตรงกันข้าม

ข้อมูลจีพีเอ็มรายวันมีความสัมพันธ์กับข้อมูลฝนรายวันที่ตรวจวัด ณ สถานีภาคพื้นในระดับปานกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.60 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ทั้งนี้การที่ข้อมูลจีพีเอ็มรายวันมีความแตกต่างกับข้อมูลฝนรายวันที่ตรวจวัด ณ สถานีภาคพื้นนั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากสถานีภาคพื้นและตำแหน่งข้อมูลฝนจีพีเอ็มในพื้นที่ศึกษาที่ตั้งอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันมากที่สุดมีระยะทางห่างกันถึง 2 กิโลเมตร ดังนั้นจึงเป็นผลให้ข้อมูลฝนซึ่งเป็นข้อมูลแบบจุดมีความแตกต่างกับข้อมูลจีพีเอ็มซึ่งเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ อย่างไรก็ตามข้อมูลทั้งสองมีทิศทางความสัมพันธ์ในทางเดียวกัน

การใช้งานข้อมูลจีพีเอ็มซึ่งเป็นการสำรวจระยะไกลร่วมกับข้อมูลอุทก-อุตุนิยมวิทยาสามารถสร้างตัวแบบในการทำนายค่าดัชนีการเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหารในวันรุ่งขึ้นมีประสิทธิภาพสูง โดยตัวแบบที่ได้มีความเที่ยงตรงในขั้นการประเมินผลลัพธ์จากการทำนายสูงถึงร้อยละ 90.5 และมีการทำนายค่าผิดพลาดเกินกว่า ± 1 ระดับ เพียงร้อยละ 0.73 ของการทดสอบทั้งหมด อีกทั้งการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มในการสร้างตัวแบบยังให้ผลความเที่ยงตรงของตัวแบบสูงกว่าการไม่ใช้ แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงในการใช้ข้อมูลจีพีเอ็มเพื่อเตือนภัยจากระดับน้ำทะเลสาบหนองหาร อย่างไรก็ตามเพื่อให้ตัวแบบมีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงขึ้นควรเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ตัวแบบเรียนรู้และปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าข้อมูลจีพีเอ็มมีศักยภาพในการนำมาใช้งานในการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในระดับท้องถิ่นได้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากทุนสนับสนุนการวิจัยสำหรับบุคลากรมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 นอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนข้อมูลทุติยภูมิที่การตรวจวัด ณ สถานีภาคพื้นจากสถานีอุตุนิยมวิทยาสกลนคร กรมอุตุนิยมวิทยา และศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดสกลนคร กรมประมง

References

- [1] Mal, S., Singh, R.B., Huggel, C. and Grover, A. (2018). **Introducing Linkages Between Climate Change, Extreme Events, and Disaster Risk Reduction**. Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction : Springer International Publishing
- [2] Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., and Kaspar, F. (2006). Estimating the Impact of Global Change on Flood and Drought Risks in Europe: A Continental, Integrated Analysis. **Climatic Change**. Vol. 75, Issue 3, pp. 273-299. DOI: 10.1007/s10584-006-6338-4
- [3] Wiering, M. and Winnubst, M. (2017). The Conception of Public Interest in Dutch Flood Risk Management: Untouchable or Transforming?. **Environmental Science & Policy**. Vol. 73, pp. 12-19. DOI: 10.1016/j.envsci.2017.03.002
- [4] Zhang, Q., Zhang, J., and Wang, C. (2017). Risk Assessment of Drought Disaster in Typical Area of Corn Cultivation in China. **Theoretical and Applied Climatology**. Vol. 128, Issue 3-4, pp. 533-540. DOI: 10.1007/s00704-015-1723-4
- [5] Reynard, N. S., Kay, A. L., Anderson, M., Donovan, B., and Duckworth, C. (2017). The Evolution of Climate Change Guidance for Fluvial Flood Risk Management in England. **Physical Geography**. Vol. 41, Issue 2, pp. 222-237. DOI: 10.1177/0309133317702566
- [6] Singkran, N. (2017). Flood Risk Management in Thailand: Shifting from a Passive to a Progressive Paradigm. **International Journal of Disaster Risk Reduction**. Vol. 25, pp. 92-100. DOI: 10.1016/j.ijdr.2017.08.003
- [7] Stratford, C., Brewin, P., Acreman, M., and Mountford, O. (2015). A Simple Model to Quantify the Potential Trade-Off Between Water Level Management for Ecological Benefit and Flood Risk. **Ecohydrology & Hydrobiology**. Vol. 15, Issue 3, pp. 150-159. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2015.06.002
- [8] Sun, G., Zheng, H., Huang, Y., and Li, C. (2016). Parameter Inversion and Deformation Mechanism of Sanmendong Landslide in the Three Gorges Reservoir Region Under the Combined Effect of Reservoir Water Level Fluctuation and Rainfall. **Engineering Geology**. Vol. 205, pp. 133-145. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.10.014
- [9] Zhao, Q., Liu, S., Deng, L., Dong, S., and Wang, C. (2014). Soil Degradation Associated with Water-Level Fluctuations in the Manwan Reservoir, Lancang River Basin. **CATENA**. Vol. 113, pp. 226-235. DOI: 10.1016/j.catena.2013.08.007
- [10] Mettrop, I. S., Rutte, M. D., Kooijman, A. M., and Lamers, L. P. M. (2015). The Ecological Effects of Water Level Fluctuation and Phosphate Enrichment in Mesotrophic Peatlands are Strongly Mediated by Soil Chemistry. **Ecological Engineering**. Vol. 85, pp. 226-236. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.077
- [11] Qian, K., Liu, X., and Chen, Y. (2016). Effects of Water Level Fluctuation on Phytoplankton Succession in Poyang Lake, China - A Five Year Study. **Ecohydrology & Hydrobiology**. Vol. 16, pp. 175-184. DOI: DOI: 10.1016/j.ecohyd.2016.08.001

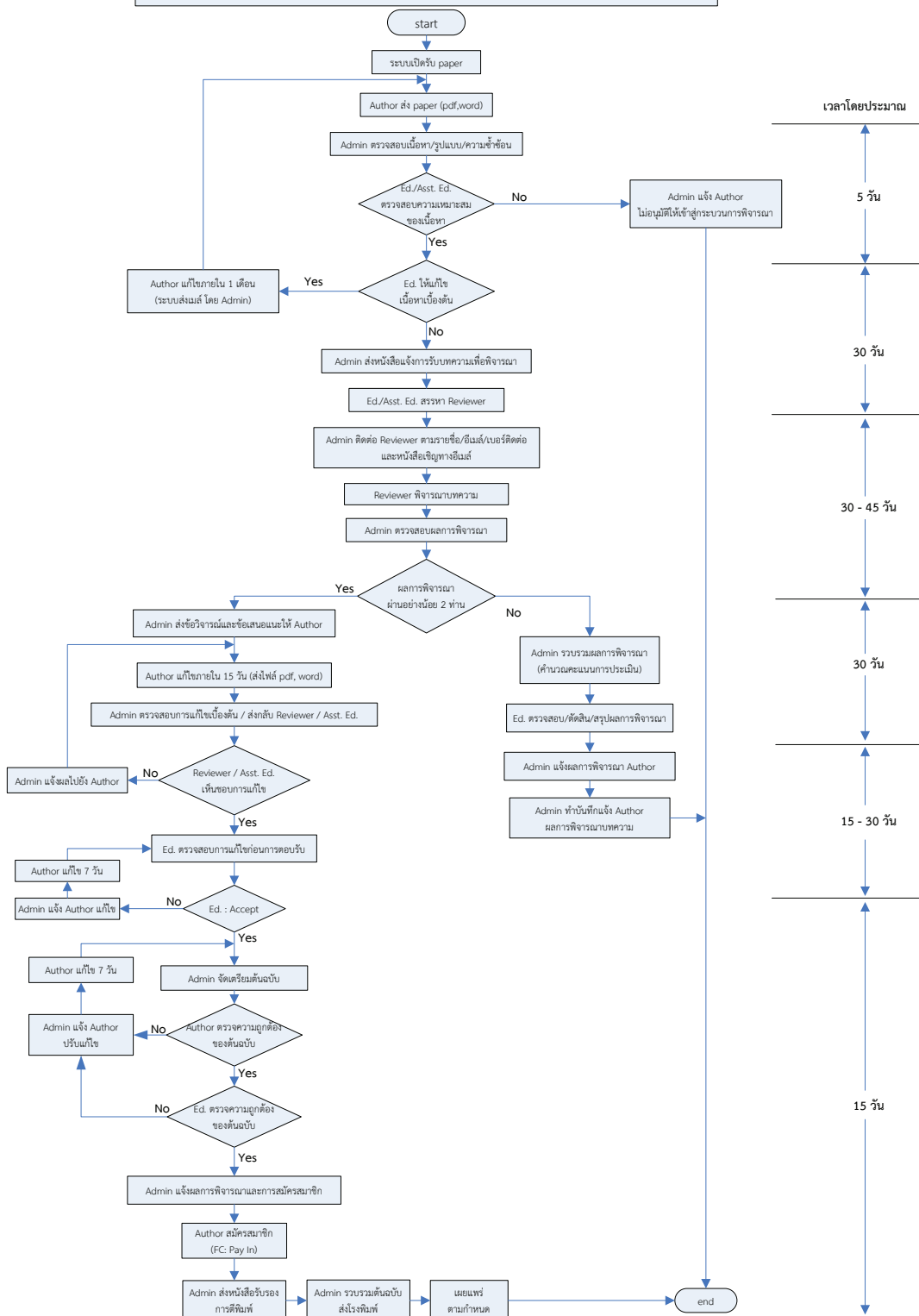
- [12] Wang, P., Zhang, Q., Xu, Y.-S., and Yu, F. H. (2016). Effects of Water Level Fluctuation on the Growth of Submerged Macrophyte Communities. **Flora**. Vol. 223, pp. 83-89. DOI: 10.1016/j.flora.2016.05.005
- [13] Grabas, G. P. and Rokitnicki-Wojcik, D. (2015). Characterizing Daily Water-Level Fluctuation Intensity and Water Quality Relationships with Plant Communities in Lake Ontario Coastal wetlands. **Journal of Great Lakes Research**. Vol. 41, Issue 1, pp. 136-144. DOI: 10.1016/j.jglr.2014.12.019
- [14] Menouer, M. A. and Moussaoui, A. (2016). Effects of Consecutive Water Level Fluctuations and Harvesting on Predator-Prey Interactions. **Chaos, Solitons & Fractals**. Vol. 91, pp. 434-442. DOI: 10.1016/j.chaos.2016.07.001
- [15] Yadav, B. and Eliza, K. (2017). A Hybrid Wavelet-Support Vector Machine Model for Prediction of Lake Water Level Fluctuations Using Hydro-Meteorological Data. **Measurement**. Vol. 103, pp. 294-301. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.03.003
- [16] Tapiador, F. J., Turk, F. J., Petersen, W., Hou, A. Y., García-Ortega, E., Machado, L. A. T., Angelis, C. F., Salio, P., Kidd, C., Huffman, G. J., and de Castro, M. (2012). Global Precipitation Measurement: Methods, Datasets and Applications. **Atmospheric Research**. Vol. 104, pp. 70-97
- [17] Tapiador, F. J., Navarro, A., Levizzani, V., García-Ortega, E., Huffman, G. J., Kidd, C., Kucera, P. A., Kummerow, C. D., Masunaga, H., Petersen, W.A., Roca, R., Sánchez, J.-L., Tao, W. -K., and Turk, F. J. (2017). Global Precipitation Measurements for Validating Climate Models. **Atmospheric Research**. Vol. 197, pp. 1-20. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.06.021
- [18] Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., and Chen, J. (2017). Evaluation of the GPM IMERG Satellite-based Precipitation Products and the Hydrological Utility. **Atmospheric Research**. Vol. 196, pp. 151-163. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.06.018
- [19] Casella, D., Panegrossi, G., Sanò, P., Marra, A. C., Dietrich, S., Johnson, B. T., and Kulie, M. S. (2017). Evaluation of the GPM-DPR Snowfall Detection Capability: Comparison with CloudSat-CPR. **Atmospheric Research**. Vol. 197, pp. 64-75. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.06.018
- [20] Prakash, S., Mitra, A. K., Pai, D. S., and AghaKouchak, A. (2016). From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space?. **Advances in Water Resources**. Vol. 88, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.11.008
- [21] Siswanto, van der Schrier, G., Jan van Oldenborgh, G., van den Hurk, B., Aldrian, E., Swarinoto, Y., Sulistya, W., and Eka Sakya, A. (2017). A Very Unusual Precipitation Event Associated with the 2015 Floods in Jakarta: An Analysis of the Meteorological Factors. **Weather and Climate Extremes**. Vol. 16, pp. 23-28. DOI: 10.1016/j.wace.2017.03.003
- [22] Case, J. L. (2016). From Drought to Flooding in Less Than a Week Over South Carolina. **Results in Physics**. Vol. 6, pp. 1183-1184. DOI: 10.1016/j.rinp.2016.11.012



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทของบทความที่ดีพิมพ์

- 1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

- 1.2 บทความวิชาการ (**Academic article**) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ

3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน

4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่านำกระดาษ

- **ระยะขอบ**

ขอบบน (Top Margin)	2.54 ซม.	ขอบล่าง (Bottom Margin)	2.54 ซม.
ขอบขวา (Right Margin)	2.54 ซม.	ขอบซ้าย (Left Margin)	3.17 ซม.

- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า

- | | | |
|------------------|---------------------|-----------------|
| - รูปแบบตัวอักษร | บทความภาษาไทยใช้ | TH SarabunPSK |
| | บทความภาษาอังกฤษใช้ | Times New Roman |

- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8

- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า

- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา

- ชื่อผู้เขียน ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 และจัดชิดซ้าย
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย

- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 14

- | | | |
|-----------|------------|------------------|
| - ที่อยู่ | ภาษาไทย | ขนาดตัวอักษร 13 |
| | ภาษาอังกฤษ | และภาษาอังกฤษ 11 |

- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย	ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา
กรณีบทความภาษาอังกฤษ	ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดขีดซ้ายหน้ากระดาษ

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 ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภษย่อย ควรจัดให้รูปภษย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อยที่ 1



(ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

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

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

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

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

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

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

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

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

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

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

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



หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก.....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ ☐ บทความจากวิทยานิพนธ์/สารนิพนธ์

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม

1.

2.

3.

4.

สาขาหลักของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ วิศวกรรมศาสตร์ ENG ☐ เกษตรศาสตร์ AGR ☐ สหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถิติ IG

สาขารองของบทความ (สามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)

☐ ไฟฟ้า ☐ อิเล็กทรอนิกส์ ☐ คอมพิวเตอร์

☐ สื่อสาร-โทรคมนาคม ☐ ลัทธิศาสตร์ ☐ ศิลปะและการออกแบบ

☐ วัสดุและโลหะ ☐ โยธา-สำรวจ ☐ สิ่งแวดล้อม

☐ พลังงาน ☐ สถาปัตยกรรม ☐ พืชไร่

☐ พืชสวน ☐ วิทยาศาสตร์การอาหาร ☐ ICT

☐ อุตสาหการ ☐ เคมี ☐ คณิตศาสตร์

☐ สถิติประยุกต์ ☐ เครื่องกล ☐ โภชนศาสตร์

☐ ฟิสิกส์ ☐ อื่น ๆ

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

2. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

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

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง
.....
โดย
.....

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

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



ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ที่อยู่ (สำหรับส่งวารสาร).....

รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

โทรสาร.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ.....

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

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

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

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

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ
(.....)



RMUTI

ราชมงคลอีสาน



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol. 12 No. 3 September - December 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>