

# วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ Thaksin University Journal

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1

Vol. 23 No. 1

มกราคม - เมษายน 2563

January - April 2020



ISSN 0859-9807 (print)

ISSN 2651-0693 (online)



# Thaksin University Journal

|                              |                                                                                                                                                                               |                                |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Name</b>                  | Thaksin University Journal                                                                                                                                                    |                                |
| <b>Owner</b>                 | Thaksin University                                                                                                                                                            |                                |
| <b>Advisory Board</b>        | Assoc. Prof. Dr. Wichai Chumni (President of Thaksin University)                                                                                                              |                                |
|                              | Assoc. Prof. Dr. Nathapong Chitniratna                                                                                                                                        |                                |
|                              | (Vice President for Research and Academic Services)                                                                                                                           |                                |
|                              | Dr. Vallop Ditsuwan                                                                                                                                                           |                                |
|                              | (Director of the Research and Development Institute Thaksin University)                                                                                                       |                                |
| <b>Editor</b>                | Assoc. Prof. Dr. Nikom Choosiri                                                                                                                                               | (Thaksin University)           |
|                              | Asst. Prof. Dr. Prasong Kessaratikoon                                                                                                                                         | (Thaksin University)           |
| <b>Editorial Board</b>       | Prof. Dr. Charan Chantalakhana                                                                                                                                                | (Kasetsart University)         |
|                              | Prof. Dr. Visut Baimai                                                                                                                                                        | (Mahidol University)           |
|                              | Prof. Dr. Suthat Yoksan                                                                                                                                                       | (Srinakharinwirot University)  |
|                              | Prof. Dr. Apichart Suksamrarn                                                                                                                                                 | (Ramkhamhaeng University)      |
|                              | Prof. Dr. Surin Setamanit                                                                                                                                                     | (Chulalongkorn University)     |
|                              | Prof. Dr. Somjit Supannatas                                                                                                                                                   | (Mahidol University)           |
|                              | Prof. Dr. Soottawat Benjakul                                                                                                                                                  | (Prince of Songkla University) |
|                              | Prof. Dr. Saowapa Angsupanich                                                                                                                                                 | (Prince of Songkla University) |
|                              | Assoc. Prof. Dr. Kanchit Malaivongs                                                                                                                                           | (Office of the Royal Society)  |
|                              | Assoc. Prof. Dr. Hirihattaya Phetmung                                                                                                                                         | (Thaksin University)           |
|                              | Assoc. Prof. Dr. Sappasith Klomklao                                                                                                                                           | (Thaksin University)           |
|                              | Assoc. Prof. Dr. Punyapat Chaimay                                                                                                                                             | (Thaksin University)           |
|                              | Asst. Prof. Pattarawalai Talungchit                                                                                                                                           | (Mahidol University)           |
|                              | Asst. Prof. Dr. Kornvika Kongkul                                                                                                                                              | (Thaksin University)           |
|                              | Asst. Prof. Dr. Jatuporn Kaew-On                                                                                                                                              | (Thaksin University)           |
|                              | Dr. Sirirat Sinprajakpol                                                                                                                                                      | (Thaksin University)           |
|                              | Dr. Khwanchit Suwannoppharat                                                                                                                                                  | (Thaksin University)           |
| <b>Journal Management</b>    | Miss Ornkamon Kraiwong                                                                                                                                                        | (Thaksin University)           |
|                              | Miss Phimnada Maneewong                                                                                                                                                       | (Thaksin University)           |
|                              | Miss Ranee Sunsang                                                                                                                                                            | (Thaksin University)           |
|                              | Miss Kanyanat Liadrak                                                                                                                                                         | (Thaksin University)           |
| <b>Objectives</b>            | 1. To publicize research work and articles in the field of multidisciplinary of science and technology of staff and researchers of Thaksin University and other organizations |                                |
|                              | 2. To publicize information related to research                                                                                                                               |                                |
|                              | 3. To exchange research knowledge and concepts                                                                                                                                |                                |
| <b>Publication Frequency</b> | Published 3 times a year in January – April, May – August and September – December                                                                                            |                                |

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Book format</b> | <p>B5 size (17.6x25 cm.)</p> <p>Art cover with 250 grams. four-color</p> <p>80-gram paper, 1 color, 94 pages for main content</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Publication</b> | Online                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Membership</b>  | <p>The application for membership can be processed into ways:</p> <p>Journal Authors</p> <p>Researchers, academicians, or students who want to submit the article(s) must pay for reviewers' compensation, 2,000 Baht/ 70 US Dollars per article if the article is accepted. via Krungthai Bank account:</p> <p>Account Name: Thaksin University Journal</p> <p>Account Number: 678-4-59223-9</p> <p>Branch: Tesco Lotus – Talad Papayom</p> <p>After completing the payment, the membership applicant must attach the file of payment slip online at <a href="https://www.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal">https://www.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal</a> or contact the journal coordinators at the following address:</p> <p>Research and Development Institute, Thaksin University, Phatthalung Campus<br/> 222 Moo. 2, Bann Prao Sub-district, Papayom District, Phatthalung, Thailand 93210<br/> Tel. 074-609-600 ext. 7254 or 081-540-7304 Fax No. 074-609-654-5<br/> E-mail address: <a href="mailto:tsujournal@tsu.ac.th">tsujournal@tsu.ac.th</a> or <a href="mailto:research.tsu@gmail.com">research.tsu@gmail.com</a></p> |
| <b>Contact Us</b>  | <p>Thaksin University Journal Office, Research and Development Institute,<br/> Thaksin University, Phatthalung Campus<br/> 222 Moo. 2, Baan Prao Sub-district, Papayom District, Phatthalung, Thailand 93210<br/> Tel. +66-74-609-600 Ext. 7254<br/> E-mail address: <a href="mailto:tsujournal@tsu.ac.th">tsujournal@tsu.ac.th</a> or <a href="mailto:research.tsu@gmail.com">research.tsu@gmail.com</a></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Print Place</b> | <p>Artwork &amp; Media</p> <p>Tel. 089-925-8455, 085-440-5398</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

## Editorial

The present Thaksin University Journal (TSUJ) Vol. 23 No. 1 (January - April 2020) is the first issue out of three issues that will be issued in the year 2020. This issue was also published with 1 academic article and 9 research articles. The fruitful academic article is “Application of Polyhydroxyalkanoates (PHAs)” and 9 multidisciplinary of science and technology of research articles in Mathematics and Statistics (3), biological and environmental science (1), wind energy (1), material physics (1), informatics system and measurement (1), agriculture (1) and applied physics (1). I do expect that some of these articles would be cited and referred in the near future by TSUJ readers and customers.

I would like to inform our readers and customers that the TSUJ was passed through the new and high quality assessment by Thai Journals Online (ThaiJo) and was still accepted in the 1st group of the competition with self-evaluation for another 5 years until 2025. I would also like to thank TSUJ authors and readers who are real friends to help the TSUJ as one of the best journals for publication in the subject of multidisciplinary of science and technology. In addition, I do hope to have many groups of researcher, scientists and science authors in both Thailand and foreign countries come to join with us to elevate of the journal’s standard in the near future.

Not only valuable authors but also reviewers who are exactly excellent contributions during the past 5 years (2015 to 2019), have helped and supported us to maintain the journal’s quality for another 5 years. Reviewers are an important part and therefore the reviewers merit sincere appreciation. For the success of any journals, reviewers are an important part and therefore the reviewers merit sincere appreciation. TSUJ relies on exertion and generosity of the reviewers on assessing suitability of a manuscript for publication in TSUJ. The reviewing of a manuscript is very essential to assure the quality of manuscripts published in any journals. I thank all reviewers for their excellent contributions during the past 5 years (2015-2019) of TSUJ.

TSUJ welcomes the authors and researchers from all parts around the country to provide their latest outstanding developments and modern research work for the publications of high quality papers having research results either experimental or projected application in their related fields. TSUJ publishes original materials concern with the theoretical underpinning, effective application and potential for evolving technology integration in a global range at all edification levels. The journal provides immediate open access to its content on the principle that making research freely available to the public supports a greater global exchange of knowledge.

TSUJ editorial board and I ensure that this journal will be regularly published, widely read and circulated, have highly impact and attract an adequate supply of high-quality papers from an national and ASEAN range of author nationwide. Consequently, we have a plan to improve TSUJ quality up to international level in the next two years. Therefore, we have to work harder and try to accomplish our goal as soon as possible. Thank you very much and see you again in the next issue.

Asst. Prof. Dr. Prasong Kessaratikoon  
Journal Editor

## สารบัญ

### บทความวิชาการ (Academic Article)

1. การประยุกต์ใช้พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน  
**Application of Polyhydroxyalkanoates as Carbon Source for Nitrogen Compound Treatment in Recirculating Aquaculture System (RAS)**  
รุจิราภรณ์ จันทรวดี Ruchiraphon Chandravadee แจ่มจันทร์ เพชรศิริ Jamjun Pechsiri  
กนกพร สังขรักษ์ Kanokphorn Sangkharak.....1

### บทความวิจัย (Research Articles)

2. การกำกับแบบกราฟในบริบทการทำซ้ำองค์ประกอบของกราฟ  
**Graceful Labeling in the Context of Duplication of Graph Elements**  
ศิวพร แสงวัน Siwaporn Saewan ธนาภา ขาวมัน Thanapa Khawman  
วารภรณ์ แดงนภาพรกุล Waraporn Dangnapaponkul สุมิตา แก้วทอง Sumita Kaewthong.....11
3. ตัวแบบปริมาณสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับสินค้าที่เน่าเสียภายใต้การตรวจสอบสินค้าที่ผิดพลาด  
**Economic Order Quantity Model for Perishable Items under Inspection Error**  
วุฒิชัย ศรีโสคาพล Wuttichai Srisodaphol นฤกร สุทธิจิตร Naruporn Suttijit สุทธชญ์ ไชยรัตน์  
Sutthaya Chaiyarat รัตนากาล คำสอน Rattanakarn Khomson.....20
4. ผลของการเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในอาหารต่อการเจริญเติบโตของปลาทอง การสะสมโปรตีนและไขมันในปลาคูกลำพัน (*Clarias nieuhofii*)  
**Effects of Di-calcium Phosphate Supplementation on Growth Performance, Body Compositions, Protein and Lipid Retentions in Nieuhofii's Catfish (*Clarias nieuhofii*)**  
สุกัญญา ศิริรัฐนิคม Suphada Kiratnikom1 พัสราภรณ์ ทะใบสอาด Pasaraporn Labaisaad  
พีรพงศ์ อติทรัพย์ไพศาล Peerapong Atisappisan อานูช ศิริรัฐนิคม Anut Kiratnikom.....30
5. การประเมินศักยภาพของพลังงานลมด้วยระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาค: กรณีศึกษาพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทย  
**Assessment of Wind Energy using Global Wind Atlas Methodology: A Case Study of Central Region of Thailand**  
ลัทธวรรณ นิยมธรรม Lattawan Niyontham จอมภพ แวศักดิ์ Jompob Waewsak  
ชนะ จันทร์น้า Chana Chuncham.....39

6. การเปรียบเทียบและการประเมินแบบจำลองการจับ-จับใหม่สำหรับการประมาณจำนวนผู้ที่มีความผิดปกติของการใช้โอปิออยด์  
**Model Comparison and Assessment for Closed Capture-recapture Models for Estimate Opioid Use Disorders**  
 รัชฎาภรณ์ อึ้งเจริญ Ratchadaporn Ungcharoen ลีลี่ อิงศรีสว่าง Lily Ingsrisawang  
 แมททิว ลอว์ Matthew Law.....49
7. การประดิษฐ์และสมบัติที่เกิดจากรอยสัมผัสข้อที่ระหว่างทองคำและท่อนาโนไททาเนียม  
**The Fabrication and Properties of Schottky Contact between Au/TiO<sub>2</sub> Nanotubes Semiconductors**  
 วัชรวิญา ไชยราช Watchareeya Chaiyarat อุดม ทิพราช Udom Tipparach คี-ชอกอัน Ki-Seok An.....58
8. ระบบการสร้างเส้นทางท่องเที่ยวชุมชนจากข้อมูล Geolocation ตามมาตรฐาน Google Maps  
**Local Tourism Routes from Geolocation Data using Google Maps Platform**  
 อรยา สุขนิษฐ์ Oraya Sooknit สุรสิทธิ์ ศักดา Surasit Sakda.....66
9. สวนยางพาราแบบวนเกษตรในระยะเปิดกรีดในจังหวัดพัทลุง ภาคใต้ของประเทศไทย  
**Rubber Agroforestry Systems in Mature Plantations in Phatthalung Province, Southern Thailand**  
 อุไรวรรณ ทองแกมแก้ว Uraiwan Tongkaemkaew อิริค ฟินอท Eric Penot  
 เบญเนดิกซ์ แซมบูน Benedicte Chambon.....78
10. ระดับกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในดินตะกอนบริเวณอ่าวปัตตานี จังหวัดปัตตานี ประเทศไทย  
**Natural Radioactivity Levels in Sediment Collected in Pattani Bay Pattani Province, Thailand**  
 ไมมูน อินตัน Maimoon Intan ไซน์ับ ดอเลาะ Sainap Doloh  
 โรสเลนา อนันตกุลวงศ์ Roseleena Anantanukulwong.....86



# การประยุกต์ใช้พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อบำบัด สารประกอบไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน Application of Polyhydroxyalkanoates as Carbon Source for Nitrogen Compound Treatment in Recirculating Aquaculture System (RAS)

รุจิราภรณ์ จันทรวดี<sup>1</sup> แจ่มจันทร์ เพชรศิริ<sup>2</sup> และกนกพร สังขภักย์<sup>3\*</sup>

Ruchiraphon Chandravadee<sup>1</sup>, Jamjun Pechsiri<sup>2</sup> and Kanokphorn Sangkharak<sup>3\*</sup>

## บทคัดย่อ

สารประกอบไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากของเสียจากการขับถ่ายอาหาร และซากของสิ่งมีชีวิต การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนนิยมใช้กระบวนการทางชีวภาพโดยตรึงแบคทีเรียบนวัสดุแบคทีเรียจะนำสารประกอบไนโตรเจนเข้าไปในเซลล์และเปลี่ยนเป็นสารอื่นเพื่อสร้างพลังงานไว้ใช้ในการเจริญเติบโต กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นหนึ่งในกระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจน จุลินทรีย์จะใช้นิโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและใช้สารอินทรีย์ (แหล่งคาร์บอน) เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ ซึ่งมีข้อเสียคือ การเติมสารอินทรีย์ในปริมาณน้อยส่งผลให้เกิดการสะสมของไนโตรเจน แต่หากเติมในปริมาณมากส่งผลให้สารอินทรีย์ในน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมโดยผู้เชี่ยวชาญพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว เนื่องจากมีข้อดี คือ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถใช้เป็นตัวกรองชีวภาพและเป็นแหล่งคาร์บอนได้โดยไม่มีผลกระทบต่อปริมาณไนโตรเจนในน้ำ บทความวิจัยนี้จึงกล่าวถึงการประยุกต์ใช้พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน

**คำสำคัญ:** ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ สารประกอบไนโตรเจน พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต ดีไนตริฟิเคชัน พอลิเมอร์ชีวภาพ

## Abstract

Nitrogen compounds in aquaculture systems resulted from excretion waste, feed and aquatic organism remains. The treatment of nitrogen compounds is commonly used biological process by fixing the microorganism on the surface of the material. Afterwards, the bacterial cell uptakes the nitrogen compound, which is changed to other substances to create energy for bacteria growth. Denitrification is

<sup>1</sup> นิสิตระดับบัณฑิตศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93120

<sup>2</sup> ผศ.ดร., สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93120

<sup>3</sup> รศ.ดร., สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93120

<sup>1</sup> Graduate Student, Program in Ph.D. (Biotechnology), Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93120, Thailand

<sup>2</sup> Asst. Prof. Dr., Department of Biological and Environmental Sciences, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93120, Thailand

<sup>3</sup> Assoc. Prof. Dr., Department of Chemistry, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93120, Thailand

\*Corresponding author: skanokphorn@yahoo.com

(Received: January 31, 2020; Revised: March 16, 2020; Accepted: March 30, 2020)

one of the biological processes in nitrogen compound treatment. In this process, microorganisms use nitrate and organic carbon (carbon source) as electron acceptors and electron donors, respectively, in the respiration process. However, the disadvantage of low carbon addition may lead to nitrate accumulation. On the other hand, the excess carbon addition increased the organic content in the system. Therefore, the addition of carbon should be controlled by the specialist. Biodegradable polymers such as polyhydroxyalkanoate (PHA), are considered as an alternative to avoid the problem since there were advantages, which are, for example, biodegradation, using biofilter and being carbon sources, without any effects on quantity of nitrogen in water. In this research, we discussed the application of PHA as a carbon source to eliminate nitrogen compounds in recirculating aquaculture systems.

**Keywords:** Aquaculture Systems, Nitrogen Compound, Polyhydroxyalkanoates, Denitrification, Biopolymer

## Introduction

As an increasing of aquaculture industry also increase the environmental problem. Huge amount of wastewater containing high nitrogen was discharged to environment. The removal of nitrogen and phosphorus from wastewater has become an emerging worldwide concern because these compounds cause eutrophication in natural water. Moreover, nitrate is a risk to human health, especially as a possible cause of infant methaemoglobinaemia. Nitrogen removal technology, a cost effective and advanced wastewater treatment technology, is growing in importance in Thailand. There are many techniques for nitrogen treatment such as rotating biological contactors, trickling filters, bead filters and fluidized sand filters. However, the applicable to extensive system and environmentally friendly process are still required. The nitrogen removal using biopolymer is a novel technology. It has the advantage over the other techniques that it is eco-friendly and relatively inexpensive. This make it an economically viable approach for sustainable aquaculture.

## Nitrogen Compound Treatment in Recirculating Aquaculture System

Fisheries are important to the economics of Thailand. In 2017, The Department of Fisheries reported gross domestic product (GDP) of fisheries sector was 81 billion baht, increased to 9.32 % in the same time on 2016 [1]. At present, aquatic animals in nature have decreased. The Department of Fisheries has promoted aquaculture to solve such problems. Aquaculture is the process of raising aquatic organisms, include plants (both small phytoplankton and large macrophytes such as seaweed), molluscs, crustaceans, amphibians, and reptiles, in an enclosed area (e.g., earthen ponds, raceway, and net-pen) for use in the fishing industry [2, 3]. Traditional aquaculture methods are low labour, easily managed systems, but they can sustain fairly low stocking densities [4]. In order to improve the fish yield and profit, traditional aquaculture has been transformed to intensive aquaculture system. However, intensification demands increased inputs, such as fish and feed per unit culture area and, therefore, increased waste generation from the aquaculture production systems. The impact of waste products from aquaculture has increased public concern and threatens the sustainability of aquaculture practices [5].

Among the many existing aquaculture systems, the recirculating aquaculture system (RAS) seems to overcome these limitations and can provide a form of sustainable farming for both marine and freshwater species [6]. Nevertheless, recirculating water results in decreased water quality, primarily through the accumulation of fish waste and uneaten food. The nitrogen budget of fish culture ponds showed that fish only absorbed 11.6-46.5% of the nitrogen input in the feed [7]. Ammonia can be generated from

protein deamination in residual feeds or via metabolism by fish (e.g., gill and renal excretion). Total ammonia nitrogen is of importance in aquaculture, because ammonia is toxic. To effectively control ammonia concentration in RAS, three processes such as physical, chemical, and biological processes are used. However, biological nitrogen removal is a major process for ammonium removal in the wastewater treatment. The advantages and disadvantages of biological process for the treatment of nitrogen compounds in RAS is shown in Table 1.

**Table 1** Advantages and limitations of conventional biological nitrogen removal processes [8].

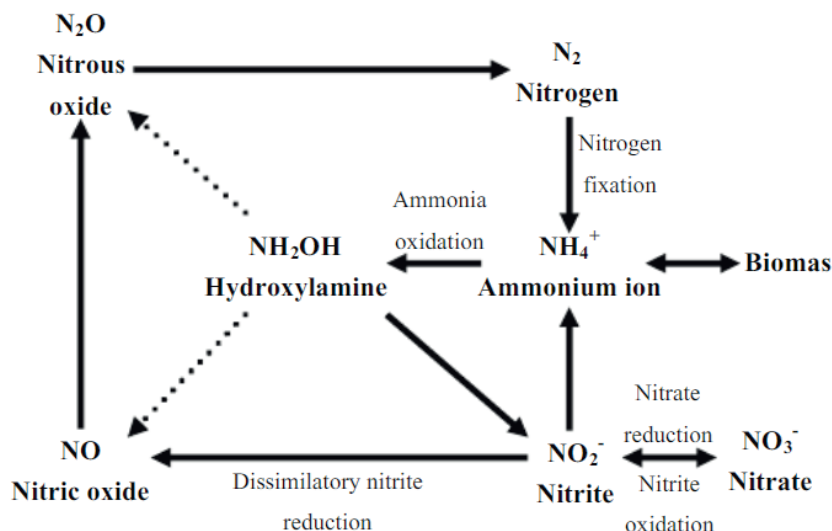
| Process                  | Advantages                                                                                                                                                                                                                   | Limitations                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bardenpho (4-stage)      | Total N concentration less than 3 mg/L possible                                                                                                                                                                              | - Large reactor volume is required<br>- Second anoxic tank has low efficiency                                                                                                                                                                                                                       |
| Predenitrification       | - Very adaptable to existing activated sludge processes 5-8 mg/L total N is achievable<br>- Reparation of alkalinity because of denitrification                                                                              | - N-removal capability is a function of internal cycles<br>- DO control is required before recycle                                                                                                                                                                                                  |
| Postdenitrification      | Capable of achieving total N levels less than 3 mg/L                                                                                                                                                                         | - Higher operating cost due to additional carbon dosage<br>- Carbon dosage control is required                                                                                                                                                                                                      |
| Bio-denitro              | Large reactor volume is resistant to shock load 5-8 mg/L total N is achievable                                                                                                                                               | - More complex to operate<br>- Two reactors are required so as to increase construction cost                                                                                                                                                                                                        |
| Sequencing batch reactor | - Process is flexible and easy to design<br>- Quiescent settling provides low effluent TSS concentration<br>- Mixed liquid/solids cannot be washed out by hydraulic surges<br>- Secondary settling tank is not required      | - More complex to operate<br>- Effluent quality depends on reliable decanting facility<br>- Be not suitable for large plants                                                                                                                                                                        |
| Oxidation ditch          | - Highly reliable process<br>- Simple operation<br>- Capable of treating shock/toxic loads without affecting effluent quality<br>- Economical process for small plants<br>- Well-stabilized sludge: low biosolids production | - Large structure, greater space requirement<br>- Low F/M bulking is possible<br>- Some modifications are proprietary and license fees may be required<br>- Plant capacity expansion is more difficult<br>- Nitrogen removal capability is related to skills of operating staff and control methods |

**Table 1** Advantages and limitations of conventional biological nitrogen removal processes [8]. (continue)

| Process      | Advantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Limitations                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Step feeding | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distributes load to provide more uniform oxygen demand</li> <li>- To minimize high clarifier solids loading in peak wet weather flows</li> <li>- Adaptable to existing activated sludge process</li> <li>- With internal recycle in last stage, total N less than 5 mg/L possible</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- N-removal capability is a function of flow distributions</li> <li>- Flow split is not measured or known accurately</li> <li>- DO control is required before recycle operation</li> <li>- Flow split control is required to optimize operation</li> </ul> |

TSS, total suspended solid; DO, dissolved oxygen

Based on the microbial nitrogen cycle and the metabolism of inorganic nitrogen compounds (Fig. 1), many biological technologies and processes have been developed and implemented for nitrogen removal from wastewater [8].



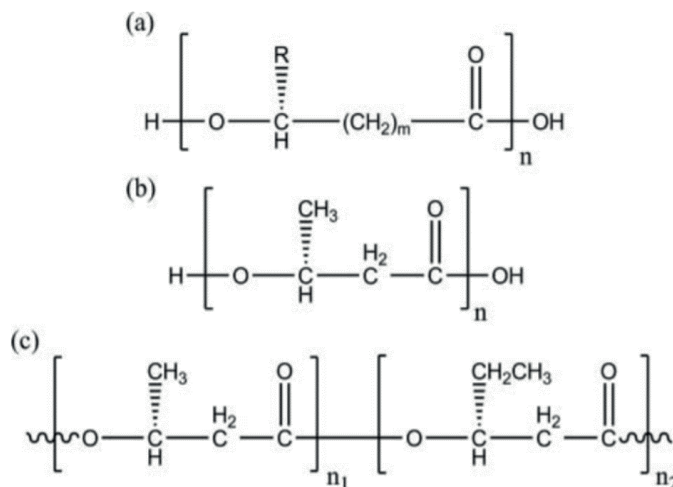
**Figure 1** Microbial nitrogen cycle [8].

As a side effect, nitrate accumulation has been observed in RAS. Though significantly less toxic than ammonia, nitrate is also toxic to aquatic organisms and, specifically, it is a threat to aquaculture fish and shrimp at elevated levels. Therefore, a biofilter is usually installed as an integral part of a RAS to mitigate ammonia accumulation via biological nitrification (nitrifying bacteria oxidizing ammonia to nitrite then nitrate) [9]. The biological denitrification processes can be considered two steps processes, consisting of the reduction of nitrate to nitrite followed by the reduction of nitrite to nitrogen gas. In the absence of oxygen, nitrate becomes the terminal electron acceptor of choice, with a single oxygen atom removed

from each nitrate ion, releasing one nitrite ion. This results in an undesirable release of nitrite, but in the presence of excess organic electron donors (carbon), nitrite is converted first to nitrous oxide, immediately to nitric oxide, and then just as quickly to nitrogen gas [10]. The carbon source used as an electron donor for the denitrification process impacts the conversion rates of nitrate to nitrogen. The most commonly used carbon sources for denitrification culture are methanol, acetate, glucose, and methanol. These sources are water soluble and are readily available to bacteria. The addition of an insufficient carbon source may lead to nitrate accumulation for incomplete denitrification, whereas the addition of an excess carbon source may lead to an increase in the effluent organic matter. The management of liquid or water soluble carbon sources for denitrification increases the cost of the process, and it will sometimes be overlooked in busy aquaculture operations. A passive control system, requiring less supervision, can reduce the management needed for its successful operation. Biodegradable non-water soluble polymers such as polyhydroxyalkanoates (PHA), can be suitable carbon sources for denitrification [11]. For denitrification with PHAs as solid carbon sources, microorganisms use the biopolymer in the form of pellets simultaneously as a biofilm carrier and as a water insoluble carbon source for denitrification, which is accessible only by enzymatic attack [12]. The application of PHA as carbon source to eliminate nitrogen compounds in aquaculture systems has been reviewed. The utilization of PHA for nitrogen treatment has never been reviewed before.

### **Application of Polyhydroxyalkanoate (PHA) for Nitrogen Compound Treatment in Recirculating Aquaculture System (RAS)**

PHA is biopolymers synthesized by microorganisms as lipid inclusions for energy storage in granular forms within the cellular structure. PHAs are natural polyesters of 3-, 4-, 5-, and 6-hydroxyalkanoic acid, which are thermoplastics [13]. PHA has properties similar to petrochemical polymers, such as polypropylene or polystyrene [14], and excellent biodegradability through enzyme activity by microorganisms. Therefore, PHA is used in industry to replace petrochemical plastics [15]. PHA is solid, non-water-soluble biopolymers that can be used as alternate self-regulating carbon sources [11]. In nitrogen compound treatment processes, PHA is often used as solid substrates in denitrification. There are various types, but the most popular PHAs are poly- $\beta$ -hydroxybutyrate (PHB) and poly (3- hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV), and the monomers are poly-3-hydroxybutyrate and poly (3- hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), respectively. Advantages and disadvantages of using PHA in aquaculture systems are shown in Table 2.



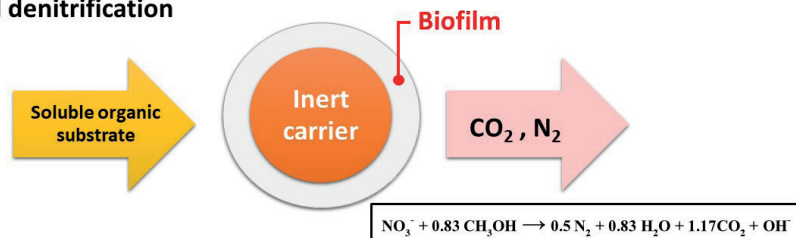
**Figure 2** Chemical structure of polyhydroxyalkanoates (a), poly-β-hydroxybutyrate (b) and poly (3- hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (c) [16].

**Table 2** Advantages and disadvantages of using polyhydroxyalkaniate (PHA) in aquaculture systems.

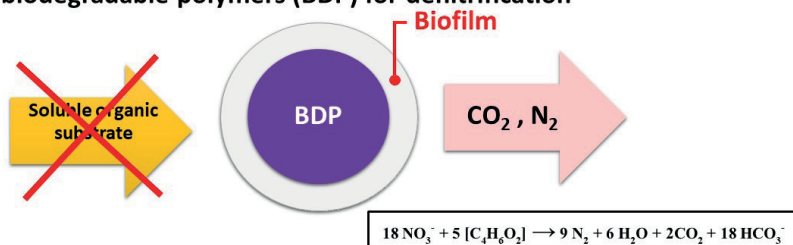
| Advantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Disadvantages                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non-toxic</li> <li>• Biodegradable by naturally occurring bacteria</li> <li>• Safe and easy process</li> <li>• The use of PHA has no potential risk of release of dissolved organic carbon with the resultant deterioration of effluent water quality</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• The polymers are highly expensive</li> <li>• Degradation of PHA is incomplete, methane can result as an end product</li> <li>• Gradually degraded by biological process which may lead to carbon source lacking for denitrification</li> </ul> |

Boley *et al.* (2000) [12] was the first to report the application of biodegradation polymers as solid substrate and biofilm carriers for denitrification. The denitrification process with biodegradable polymers presented here is a simple process. Microorganisms simultaneously use the biopolymer in the form of pellets as a biofilm carrier and as water insoluble carbon source for denitrification, which is accessible only by enzymatic attack (Fig. 3). There are two key steps involved mechanism of biofilm bacteria degrade bioplastic: (i) the polymer cleavage backbone, named depolymerization, where hydrolysis and oxidation are the main responsible, together with the extracellular enzyme, responsible for the cleavage on internal linkage (endo-action) and on the terminal polymer molecules (exo-action); (ii) the mineralization, which occurs inside the cell responsible for microbial degradation. Bioplastic could degrade aerobically in wild nature, anaerobically in sediments and landfills and partially aerobically/anaerobically in compost and soil. During the aerobic biodegradation, carbon dioxide and water are produced, while during anaerobic biodegradation, water and methane is produced [8].

### Conventional denitrification



### Utilization of biodegradable polymers (BDP) for denitrification



**Figure 3** The comparison of different carbon source for nitrogen compound treatment [12].

The study indicated that denitrification using biodegradable biopolymers is a safe and easy process whereas the polymers are highly expensive. In addition, Qiu *et al.* (2016) [17] detected the effects of solid-phase denitrification on nitrate removal. The data showed that nitrate levels decreased and were maintained below 10 mg/L after 100 days of running in a RAS. In contrast, the nitrate concentration of the control increased, reaching 100 mg/L. Thus, PHA is considered a good choice as an organic carbon source for denitrification. The treatment of nitrogen compounds using biodegradable polymers as carbon sources is better than soluble organic carbons because the addition of soluble organic carbon would result in organic carbon loss and water dissolved oxygen (DO) drop, which causes stress for the aquatic organism and it might cause increase in mortality. Meanwhile, less amount of soluble organic cannot achieve acceptable denitrification performance [18]. In RAS, soluble carbon, such as glucose or molasses, was added when ammonium increased. The external carbon sources are added in order to improve the ratio of chemical oxygen demand (COD) to nitrogen and consequently to increase the efficiency of denitrification processes. Pérez-Fuentes *et al.* (2016) [19] found that adding molasses at concentrations of > 0.12 g/L caused a dramatic decrease in oxygen (from 3.2 to 1-1.5 mg/L), but this was recovered after 1 hour. The suddenly and temporarily lowered the DO concentration, leading to stress, and increased oxygen demand to the aquatic organism. On the other hand, denitrification with biodegradable polymers have been used as organic carbon sources and biofilm carriers. The release of organic carbon from biodegradable polymers is the result of enzymatic attack, and the released amount was determined by bacteria demand. In the presence of microorganisms, such as bacterial and fungi, the macromolecular chains are broken, starting the biodegradation process. It is likely that the use of biodegradable polymers carries no potential risk in causing deterioration of the effluent quality by releasing dissolved organic carbon (DOC) [20].

## Future Prospects for the Utilization of PHA for Nitrogen Removal

PHA is a kind of polymer that is receiving attention because it is a material that can be degraded by the action of microorganisms in the environment. However, the application of PHA as carbon sources in the treatment of nitrogen compounds in aquaculture systems has obstacles because PHA is more expensive than other biofilters. At this time, genetic improvement of microorganisms has been made in order to increase the production of PHAs. Bacteria used for PHA production include *Cupriavidus necator*, *Pseudomonas* sp., and *Escherichia coli* [20-21]. The use of PHAs as the solid substrate for denitrification has several advantages over the conventional system supplemented with liquid organic substrate. PHAs serve not only as constant source of reducing power for denitrification but also as solid matrices favorable for development of microbial films. Moreover, the use of PHAs has no potential risk of release of dissolved organic carbon with the resultant deterioration of effluent water quality. If the production cost of PHAs can be brought down, its application to the denitrification process will become economically more promising.

## Conclusion

Biological processes for nitrogen compound treatment include nitrification and denitrification. PHAs can be applied in biological processes as carbon sources and biofilm carriers because they have the advantage that can be biodegradable. However, the high price of PHA is still a major barrier. The reduction of PHA cost by the genetic improvement of microorganisms has been made in order to increase the production of PHAs. In the cooperation with utilize of PHAs combined with other biofilters, such as sponges, to increase the efficiency of the bioreactor and to reduce the cost of building the nitrification reactor. However, research on PHA for nitrogen compound treatment should be studied in greater detail.

## Acknowledgement

The author would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) for their joint support through the Royal Golden Jubilee Ph.D. (RGJ-PHD) Program through grant number PHD/2.B.TK/60/D.1.

## References

- [1] Department of Fisheries. (2018). *Fisheries economic situation in 2017 and 2018* (Online). Retrieved 5 December 2018 from <https://www.fisheries.go.th/strategy/User Files/files/16-2-61.pdf>.
- [2] Naik, J.K., & Ananda Rao, K.G. (2014). *Fish farming and fish products*. India: Roshan Offset Printers.
- [3] Jobling, M., & Kadri, S. (2012). *Aquaculture and behavior*. Malaysia: Vivar Printing Sdn Bhd.
- [4] Mirzoyan, N., Tal, Y., & Gross, A. (2010). Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture system: Review. *Aquaculture*, 306(1-4), 1-6.
- [5] Dauda, A. B., Ajadi, A., Tola-Fabunmi, A. S., & Akinwole, A. O. (2018). Waste production in Aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, 4(3), 81-88.

- [6] Schreier, H. J., Mirzoyan, N., & Saito K. (2010). Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), 318–325.
- [7] Li, F., Feng, J., Zhou, X., Xu, C., Jijakli, M.H., Zhang, W., & Fang, F. (2019). Impact of rice-fish/shrimp co-culture on the N<sub>2</sub>O emission and NH<sub>3</sub> volatilization in intensive aquaculture ponds. *Science of the Total Environment*, 655, 284–291.
- [8] Zhu, G., Peng, Y., Li, B., Guo, J., Yang, Q., & Wang, S. (2008). Biological removal of nitrogen from wastewater. *Reviews of Environmental Combination and Toxicology*, 192, 159–195.
- [9] Zou, S., Guan, L., Taylor, D. P. Kuhn, D., & He, Zhen. (2018). Nitrogen removal from water of recirculating aquaculture system by a microbial fuel cell. *Aquaculture*, 497, 74–81.
- [10] Menasveta, P., Panritdam, T., Sihanonth, P., Powtongsook, S., Chuntapa, B., & Lee, P. (2001). Design and function of a closed, recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. *Aquacultural Engineering*, 25(1), 35–49.
- [11] Gutierrez-Wing M. T., Malone, R. F., & Rusch, K. A. (2012). Evaluation of polyhydro -xybutyrate as a carbon source for recirculating aquaculture water denitrification. *Aquacultural Engineering*, 51, 36–43.
- [12] Boley, A., Müller, W.R., & Haider, G. (2000). Biodegradable polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture system. *Aquacultural Engineering*, 22, 75–85.
- [13] Raza, Z. A., Abid, S., & Banat, I. M. (2018). Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 126, 45–56.
- [14] Mozejko-Ciesielska, J., & Kiewisz, R. (2016). Bacterial polyhydroxyalkanoates: still fabulous? *Microbiological Research*, 192, 271–282.
- [15] Braung, G., Lefebvre, G., & Genser, K. F. (1998). Polyhydroxyalkanoates, biopolyesters from renewable resources: physiological and engineering aspects. *Journal of Biotechnology*, 65(2–3), 127–161.
- [16] Chan, C.M., Vandi, L.J., Pratt, S., Halley, P., Richardson, D., Werker, A., & Laycock, B. (2018). Composites of wood and biodegradable thermoplastics: a review. *Polymer Reviews*, 58(3), 444–494.
- [17] Qiu, T., Liu, L., Gao, M., Zhang, L., Tursun, H., & Wang, X. (2016). Effects of solid-phase denitrification on the nitrate removal and bacterial community structure in recirculating aquaculture system. *Biodegradation*, 27(2–3), 165–178.
- [18] Zhu, S.M., Deng, Y.L., Ruan, Y.J., Guo, X.S., Shi, M.M., & Shen, J.Z. (2015). Biological denitrification using poly( succinate) as carbon source and biofilm carrier for recirculating aquaculture system effluent treatment. *Bioresource Technology*, 192, 603–610.

- [19] Pérez-Fuentes, J.A., Hernández-Vergara, M.P., Pérez-Rostro, C.L., & Foge, I. (2016). C: N ratios affect nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in a biofloc system under high density cultivation. *Aquaculture*, 452, 247–251.
- [20] Sangkharak, K. (2009). The production of polyhydroxyalkanoate by microorganism. *Thaksin University Journal*, 12(2), 75–89.
- [21] Han, F., Ye, W., Wei, D., Xu, W., Du, B., & Wei, Q. (2018). Simultaneous nitrification- denitrification and membrane fouling alleviation in a submerged biofilm membrane bioreactor with coupling of sponge and biodegradable PBS carrier. *Bioresource Technology*, 270, 156–165.

# การกำกับแบบเกรซฟูลในบริบทการทำซ้ำองค์ประกอบของกราฟ

## Graceful Labeling in the Context of Duplication of Graph Elements

ศิวพร แซ่วัน<sup>1\*</sup> ธนาภา ขาวมัน<sup>2</sup> วราภรณ์ แดงนภาพรกุล<sup>2</sup> และสุมิตา แก้วทอง<sup>2</sup>

Siwaporn Saewan<sup>1\*</sup>, Thanapa Khawman<sup>2</sup>, Waraporn Dangnaponkul<sup>2</sup> and Sumita Kaewthong<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

กำหนดให้กราฟเชิงเดียว  $G = ((V(G), E(G)))$  เป็นกราฟเชื่อมโยงและไม่ระบุทิศทาง ซึ่งมีจำนวนจุดยอด  $p$  จุด และมีจำนวนเส้นเชื่อม  $q$  เส้น กำหนดให้  $f$  เป็นฟังก์ชันที่ส่งเซตของจุดยอดของกราฟ  $G$  ไปยังเซตของจำนวนเต็ม  $\{0, 1, 2, 3, \dots, q\}$  และ  $f^*$  เป็นฟังก์ชันที่ส่งเซตของเส้นเชื่อมของกราฟ  $G$  ไปยังเซตของจำนวนเต็มบวก  $\{1, 2, 3, \dots, q\}$  กำหนดโดย

$$f^*(uv) = |f(u) - f(v)|$$

สำหรับทุกจุดยอด  $u, v \in V(G)$  และเส้นเชื่อม  $uv \in E(G)$  ถ้า  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและ  $f^*$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งทั่วถึง แล้วจะเรียก  $f$  ว่า การกำกับแบบเกรซฟูล (Graceful Labeling) ของกราฟ  $G$  และเรียกกราฟ  $G$  พร้อมด้วยการกำกับ  $f$  ว่า กราฟเกรซฟูล (Graceful Graph) ในงานวิจัยนี้ จะหาการกำกับแบบเกรซฟูลในรูปแบบทั่วไปสำหรับกราฟใหม่บางกราฟซึ่งได้จากการทำซ้ำองค์ประกอบของกราฟ และพิสูจน์ว่ากราฟใหม่เป็นกราฟเกรซฟูล

**คำสำคัญ:** การกำกับแบบเกรซฟูล การทำซ้ำของจุดยอด การทำซ้ำของเส้นเชื่อม กราฟวิถี

### Abstract

Let a simple graph  $G = ((V(G), E(G)))$  be connected and undirected graph with  $p$  vertices and  $q$  edges. Let  $f$  be a function from the set of vertices to the set of integer  $\{0, 1, 2, 3, \dots, q\}$  and let  $f^*$  be a function from the set of edge to the set of positive integer  $\{1, 2, 3, \dots, q\}$  defined as

$$f^*(uv) = |f(u) - f(v)|$$

for all  $u, v \in V(G)$  and  $uv \in E(G)$ . A function  $f$  is called graceful labeling of a graph  $G$  if  $f$  is injective and  $f^*$  is bijective. The graph  $G$  which admits graceful labeling  $f$  is called a graceful graph. In this paper, we find graceful labeling for some new graphs results from the duplication of graph elements and then we prove that the new graphs are graceful.

**Keywords:** Graceful Labeling, Duplication of a Vertex, Duplication of an Edge, Path

<sup>1</sup> ผศ.ดร., สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>2</sup> นิสิตระดับปริญญาตรี หลักสูตร วท.บ. (คณิตศาสตร์), สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>1</sup> Asst. Prof. Dr., Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand

<sup>2</sup> Undergraduate Students, B.Sc.in Mathematics, Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand

\*Corresponding author: Tel.: 089-7230444. E-mail address: si\_wa\_pon@hotmail.com

(Received: November 30, 2018; Revised: January 17, 2019; Accepted: February 15, 2019)

## บทนำ

กราฟ  $G = (V(G), E(G))$  ประกอบด้วยเซตจำกัด  $V(G)$  ที่ไม่เป็นเซตว่าง และเซต  $E(G)$  ซึ่งเป็นเซตของคู่อันดับของสมาชิกที่แตกต่างกันใน  $V(G)$  สมาชิกใน  $V(G)$  เรียกว่า จุดยอด หรือ จุด (Vertex) สมาชิกใน  $E(G)$  เรียกว่า เส้นเชื่อม หรือ เส้น (Edge) ในที่นี้เพื่อความสะดวกจะเขียนแทนกราฟ  $G = (V(G), E(G))$  ด้วยกราฟ  $G$  ถ้ากราฟ  $G$  มีจำนวนจุดยอด  $p$  จุด แล้วจะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $|V(G)| = p$  ถ้ากราฟ  $G$  มีจำนวนเส้นเชื่อม  $q$  เส้น แล้วจะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $|E(G)| = q$  ถ้าจุด  $u$  และ  $v$  เป็นจุดยอดในกราฟ  $G$  และ  $e = uv$  เป็นเส้นเชื่อมในกราฟ  $G$  แล้วจะกล่าวว่า 1) จุดยอด  $u$  ประชิด (Adjacent) กับจุดยอด  $v$  2) เส้นเชื่อม  $e$  กระทบ (Incident) กับจุดยอด  $u$  หรือกล่าวว่า จุด  $u$  กระทบกับเส้นเชื่อม  $e$  3) เส้นเชื่อม  $e$  เชื่อม (Join) จุดยอด  $u$  และจุดยอด  $v$  4) ย่านใกล้เคียง (Neighborhood) ของจุดยอด  $v$  ในกราฟ  $G$  คือเซตของจุดยอดทั้งหมดที่ประชิดกับจุดยอด  $v$  ในกราฟ  $G$  เขียนแทนด้วย  $N(v)$  นั่นคือ  $N(v) = \{u \in V(G) | uv \in E(G)\}$  สำหรับจุดยอด  $v$  ในกราฟ  $G$  ดีกรี (Degree) ของจุดยอด  $v$  คือจำนวนเส้นเชื่อมที่กระทบกับจุดยอด  $v$  สำหรับจุดยอดที่มีดีกรี 1 จะเรียกว่า จุดยอดเพ้นเดนท (A Pendent Vertex) เส้นเชื่อมที่กระทบกับจุดยอดเพ้นเดนท เรียกว่า เส้นเชื่อมเพ้นเดนท (A Pendent Edge) สำหรับจุดยอด  $u$  และ  $v$  ในกราฟ  $G$  วิถี  $u-v$  ในกราฟ  $G$  (A Path in the Graph  $G$ ) คือลำดับของจุดยอดและเส้นในกราฟ  $G$  ที่สลับกันโดยเริ่มต้นจากจุดยอด  $u$  และสิ้นสุดที่จุดยอด  $v$  ซึ่งทุกๆ จุดยอดในวิถีต้องแตกต่างกัน ถ้ามีวิถี  $u-v$  ในกราฟ  $G$  แล้วจะกล่าวว่า จุดยอด  $u$  เชื่อมโยง (Connect) กับจุดยอด  $v$  หรือกล่าวว่า จุดยอด  $u$  และ จุดยอด  $v$  เชื่อมโยงกัน ถ้าทุกๆ สองจุดยอดใดๆ ในกราฟ  $G$  เชื่อมโยงกัน แล้วจะเรียกกราฟ  $G$  ว่า กราฟเชื่อมโยง (A Connected Graph) กราฟวิถี (A Path Graph) หมายถึงกราฟเชื่อมโยงที่มีจุดยอดจำนวน  $n$  จุด และเส้นเชื่อมจำนวน  $n-1$  เส้น แต่ละจุดมีดีกรีอย่างมากที่สุดคือ 2 เขียนแทนด้วย  $P_n$

สำหรับกราฟเชื่อมโยง  $G$  ที่มีเส้นเชื่อมจำนวน  $q$  เส้น การกำกับ (Labeling) บนกราฟ  $G$  คือการกำหนดชื่อให้กับจุดยอดหรือเส้นเชื่อม หรือทั้งจุดยอดและเส้นเชื่อมของกราฟ  $G$  ภายใต้งื่อนไขที่กำหนด การกำกับแบบเกรซฟูล (Graceful Labeling) ของกราฟ  $G$  คือการกำหนดชื่อให้กับจุดยอดและเส้นเชื่อมของกราฟ  $G$  ด้วยจำนวนเต็มดังนี้

กำหนดฟังก์ชัน  $f$  และ  $f^*$  ดังนี้

$$f: V(G) \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots, q\} \text{ และ } f^*: E(G) \rightarrow \{1, 2, 3, \dots, q\}$$

โดยที่  $f^*(uv) = |f(u) - f(v)|$  สำหรับทุกจุดยอด  $u, v \in V(G)$  และเส้นเชื่อม  $uv \in E(G)$

ถ้า  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง และ  $f^*$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งทั่วถึง แล้วจะเรียก  $f$  ว่า การกำกับแบบเกรซฟูล (Graceful Labeling) ของกราฟ  $G$  และเรียกกราฟ  $G$  พร้อมด้วยการกำกับชื่อจุดยอดแบบเกรซฟูล  $f$  ว่า กราฟเกรซฟูล (Graceful Graph) เรียกเซต  $\{0, 1, 2, 3, \dots, q\}$  หรือ  $\{1, 2, 3, \dots, q\}$  ว่า เซตกำกับ (Label Set)

การกำกับแบบเกรซฟูลเริ่มต้นศึกษาโดย Rosa [1] ซึ่งโรซาเรียกการกำกับจุดยอดดังกล่าวว่าการกำกับ- $\beta$  ( $\beta$ -labeling) ต่อมา Golomb [2] ได้เรียกการกำกับจุดยอดดังกล่าวว่าการกำกับแบบเกรซฟูล (Graceful Labeling) มีนักวิจัยทางด้านทฤษฎีกราฟหลายคนได้ศึกษาเกี่ยวกับการกำกับแบบเกรซฟูลอาทิเช่น ในปี 2007 Cattell [3] ได้ศึกษาการกำกับแบบเกรซฟูลบนกราฟซึ่งสร้างขึ้นใหม่และหาการกำกับแบบเกรซฟูลในรูปแบบทั่วไปสำหรับกราฟวิถี  $P_n$  ในปี 2014 Kaneria *et al.* [4] ศึกษาการกำกับแบบเกรซฟูลบนกราฟใหม่ที่ได้จากการดำเนินการบนกราฟวงและการดำเนินการบนกราฟสองส่วนบริบูรณ์ (Complete Bipartite Graph) ปี ค.ศ. 2015

Boxwala and Vashishta [5] ศึกษาการกำกับแบบกราฟบน กราฟใหม่ โดยกราฟใหม่สร้างจากการดำเนินการบนกราฟวง Koh *et al.* [6] ศึกษาการกำกับแบบกราฟบนกราฟใหม่ที่ได้จากการเชื่อม (Join) กราฟบริบูรณ์ (Complete Graph) กราฟว่าง (Empty Graph) และกราฟวง (Cycle หรือ Cycle Graph) ในปี 2016 Hegde and Kumudakshi [7] ศึกษาการกำกับแบบกราฟบนกราฟระบุทิศทาง ในปี 2017 Khatun and Nayeem [8] ได้ศึกษาเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอ ที่จะทำให้กราฟตัวหารของศูนย์เป็นกราฟกราฟ ในปี 2018 Ragukumar and Sethuraman [9] ได้แสดงให้เห็นว่ากราฟต้นไม้ทวิภาคเป็นกราฟกราฟ ในปีเดียวกัน Wang and Zhang [10] ศึกษาเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอที่จะทำให้กราฟปกติมีการกำกับแบบกราฟสำหรับจุดมุ่งหมายในงานวิจัยนี้คือ สร้างกราฟใหม่โดย

1. การทำซ้ำเส้นเชื่อมด้วยจุดยอด (Duplication of an Edge by a Vertex) บนกราฟวิถี  $P_n$

2. การทำซ้ำจุดยอดด้วยจุดยอด (Duplication of a Vertex by a Vertex) บนกราฟวิถี  $P_n$

และหาการกำกับแบบกราฟในรูปแบบทั่วไปของกราฟใหม่ พร้อมทั้งพิสูจน์การกำกับแบบกราฟที่ได้เป็นไปตามที่กำหนด

### วิธีดำเนินการ

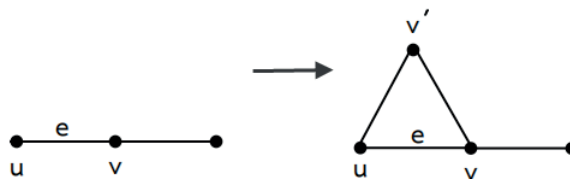
1. ศึกษาการกำกับแบบกราฟ และกราฟกราฟจากหนังสือ เอกสาร และงานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการสร้างกราฟใหม่ จากหนังสือ เอกสาร และ งานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง
3. สร้างกราฟใหม่โดยการดำเนินการบนกราฟวิถี  $P_n$  และหาการกำกับแบบกราฟในรูปแบบทั่วไปของกราฟใหม่
4. พิสูจน์ทฤษฎีบทที่ได้

### ผลการวิจัย

#### บทนิยามที่ 1

กำหนดให้จุดยอด  $u$  และ  $v$  เป็นจุดยอดในกราฟ  $G$  กราฟ  $G'$  เป็นกราฟใหม่ที่สร้างจากการทำซ้ำเส้นเชื่อม  $e = uv$  บนกราฟ  $G$  ด้วยจุดยอดใหม่  $v'$  (Duplication of an Edge  $e = uv$  by a Vertex  $v'$ ) โดยที่  $N(v') = \{u, v\}$

ตัวอย่าง แสดงการสร้างกราฟใหม่จากการทำซ้ำเส้นเชื่อม  $e = uv$  ด้วยจุดยอด  $v'$  บนกราฟ  $G$



ภาพที่ 1 กราฟใหม่จากการทำซ้ำเส้นเชื่อมด้วยจุดยอดใหม่

#### ทฤษฎีบทที่ 1

กำหนดให้  $P_n$  คือกราฟวิถีที่มีจำนวนจุดยอด  $n$  จุด เมื่อ  $n \geq 2$

ถ้า  $P'_n$  คือกราฟที่สร้างโดยการทำซ้ำเส้นเชื่อมเพิ่มเติมด้วยจุดยอดใหม่  $v'$  บนกราฟวิถี  $P_n$  สำหรับ  $n \geq 2$

แล้วจะได้ว่า  $P'_n$  เป็นกราฟเกรซฟูล

### การพิสูจน์

การแสดงว่า  $P'_n$  เป็นกราฟเกรซฟูล จะต้องแสดงว่า มีการกำกับแบบเกรซฟูลสำหรับ  $P'_n$

ให้  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  เป็นจุดยอดของกราฟวิถี  $P_n$

ให้  $P'_n$  คือกราฟที่ได้จากการทำซ้ำเส้นพื้นเด้นบนกราฟวิถี  $P_n$  ด้วย จุดยอดใหม่  $v'$

โดยไม่เสียย่นทั่วไป ให้เส้นเชื่อมพื้นเด้นที่ คือเส้นเชื่อม  $v_1v_2$  และทำซ้ำเส้นเชื่อม  $v_1v_2$  ด้วยจุดยอด  $v'$

พิจารณากราฟ  $P'_n$  จะได้ว่า

$$q = |E(P'_n)| = (n-1) + 2 = n+1 \text{ และ } p = |V(P'_n)| = n+1 = q$$

กำหนดการกำกับ  $f: V(P'_n) \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots, q = n+1\}$

ดังนี้

$$f(v') = 0$$

$$\text{สำหรับ } 1 \leq i \leq n \quad f(v_i) = \begin{cases} n+1 - \frac{i-1}{2}, & i = 1, 3, 5, \dots \\ \frac{i}{2}, & i = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

จะแสดงว่า  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อ  $i$  และ  $j$  เป็นจำนวนคู่เหมือนกัน

$$\text{ให้ } f(v_i) = f(v_j)$$

$$\text{จะได้ว่า } \frac{i}{2} = \frac{j}{2}$$

$$\text{ดังนั้น } i = j$$

นั่นคือ  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

กรณีที่ 2 เมื่อ  $i$  และ  $j$  เป็นจำนวนคี่เหมือนกัน

$$\text{ให้ } f(v_i) = f(v_j)$$

$$\text{จะได้ว่า } (n+1) - \left(\frac{i-1}{2}\right) = (n+1) - \left(\frac{j-1}{2}\right)$$

$$\left(\frac{i-1}{2}\right) = \left(\frac{j-1}{2}\right)$$

$$\text{ดังนั้น } i = j$$

นั่นคือ  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

กรณีที่ 3 เมื่อ  $i$  เป็นจำนวนคี่และ  $j$  เป็นจำนวนคู่ (หรือ  $i$  เป็นจำนวนคู่และ  $j$  เป็นจำนวนคี่)

สมมติให้  $i \neq j$  และ  $f(v_i) = f(v_j)$

$$\text{จะได้ } (n+1) - \left(\frac{i-1}{2}\right) = \frac{j}{2}$$

$$i + j - 3 = 2n$$

แต่เนื่องจาก  $i \leq n$  และ  $j \leq n$

จะได้  $i + j - 3 \leq n + n - 3 = 2n - 3 < 2n$  เกิดข้อขัดแย้ง

ดังนั้น  $f(v_i) \neq f(v_j)$

นั่นคือ  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

จากทั้ง 3 กรณี จะได้ว่านั่นคือ  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

ต่อไปพิจารณา  $f^*$

เนื่องจากเส้นเชื่อมในกราฟ  $P'_n$  ประกอบด้วยเส้น  $v'_1v'_2$  และเส้น  $v_1v_2, v_2v_3, v_3v_4, \dots, v_{n-1}v_n$

ซึ่งกราฟ  $P'_n$  มีจำนวนเส้นเชื่อมทั้งหมด  $n+1$  เส้น

จากการกำหนด  $f$  จะได้  $f^*$  ดังนี้

กรณีที่ 1

$$f^*(v'_1) = |f(v') - f(v_1)| = |0 - f(v_1)| = n+1$$

กรณีที่ 2

$$f^*(v'_2) = |f(v') - f(v_2)| = |0 - f(v_2)| = 1$$

กรณีที่ 3 สำหรับ  $i \in \{1, 2, 3, \dots, n-1\}$  จะได้ว่า

$$f^*(v_i v_{i+1}) = |f(v_i) - f(v_{i+1})| = n+1-i$$

เมื่อแทน  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$  จะได้  $n, n-1, n-2, \dots, 4, 3, 2$  ตามลำดับ

ดังนั้นจากทั้ง 3 กรณีจะได้ว่า  $\{f^*(E(P'_n))\} = \{1, 2, 3, \dots, n+1\}$

จะแสดงว่า  $f^*$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

พิจารณาเฉพาะกรณีที่  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

$$\text{สมมติให้ } f^*(v_i v_{i+1}) = f^*(v_j v_{j+1})$$

$$\text{จะได้ว่า } n+1-i = n+1-j$$

$$\text{ดังนั้น } i = j$$

นั่นคือ  $f^*$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

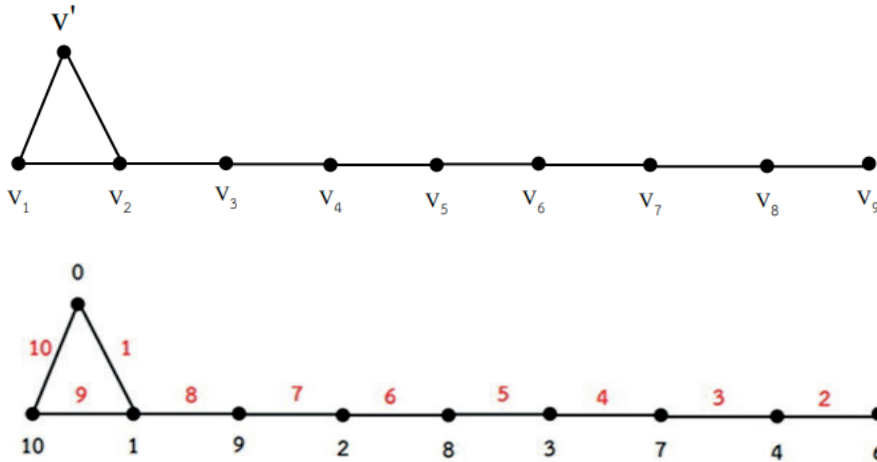
เนื่องจากกราฟ  $P'_n$  มีจำนวนเส้นเชื่อมคือ  $|E(P'_n)| = n+1$  เส้น และ  $\{f^*(E(P'_n))\} = \{1, 2, 3, \dots, n+1\}$

และเนื่องจาก  $f^*$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง ดังนั้น  $f^*$  เป็นฟังก์ชันทั่วถึง

ทำให้ได้ว่า  $f$  เป็นการกำกับแบบกราฟสำหรับ  $P_n'$

นั่นคือ  $P_n'$  พร้อมด้วยการกำกับ  $f$  เป็นกราฟกราฟ

ตัวอย่าง แสดงกราฟกราฟโดยใช้การกำกับแบบกราฟตามทฤษฎีบทที่ 1

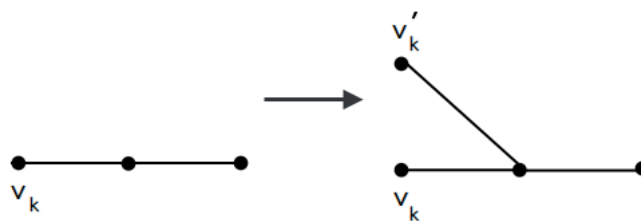


ภาพที่ 2 กราฟกราฟซึ่งเป็นกราฟที่ได้จากการทำซ้ำเส้นเชื่อมด้วยจุดยอดใหม่

## บทนิยามที่ 2

กำหนดให้จุด  $v_k$  เป็นจุดยอดในกราฟ  $G$  กราฟ  $G'$  เป็นกราฟใหม่ที่สร้างจากการทำซ้ำของจุดยอด  $v_k$  บนกราฟ  $G$  ด้วยจุดยอดใหม่  $v_k'$  (Duplication of a Vertex  $v_k$  by a Vertex  $v_k'$ ) โดยที่  $N(v_k) = N(v_k')$

ตัวอย่าง แสดงการสร้างกราฟใหม่จากการทำซ้ำจุดยอด  $v_k$  ด้วยจุดยอดใหม่  $v_k'$  บนกราฟ  $G$



ภาพที่ 3 กราฟใหม่จากการทำซ้ำจุดยอดด้วยจุดยอดใหม่

## ทฤษฎีบทที่ 2

กำหนดให้  $P_n$  คือกราฟวิถีที่มีจำนวนจุดยอด  $n$  จุด เมื่อ  $n \geq 2$

ถ้ากราฟ  $\overline{P}_n$  ได้จากการทำซ้ำด้วยจุดยอดเพิ่มเติมบนกราฟวิถี  $P_n$  ด้วยจุดยอดใหม่  $v'$  แล้ว  $\overline{P}_n$  เป็นกราฟกราฟ

## การพิสูจน์

การแสดงว่า  $\overline{P}_n$  เป็นกราฟเกรซพล จะต้องแสดงว่า มีการกำกับแบบเกรซพลสำหรับ  $\overline{P}_n$  ดังต่อไปนี้  
ให้จุด  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  เป็นของจุดยอดของกราฟวิถี  $P_n$  โดยไม่เปลี่ยนยี่ห้อให้  $v_i$  เป็นจุดยอดพื้นแดนที่  
ให้  $\overline{P}_n$  คือกราฟที่ได้จากการทำซ้ำจุดยอด  $v_i$  ด้วยจุดยอดใหม่  $v'$

พิจารณากราฟ  $\overline{P}_n$

จะได้ว่า  $q = |E(\overline{P}_n)| = (n-1) + 1 = n$  และ  $p = |V(\overline{P}_n)| = n + 1$

กำหนดการกำกับ  $f: V(\overline{P}_n) \rightarrow \{0, 1, 2, \dots, n = q\}$

ดังนี้

$$f(v') = n$$

สำหรับ  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

$$f(v_i) \begin{cases} = (n-1) - \left(\frac{i-1}{2}\right), & i = 1, 3, 5, \dots \\ = i - \left(\frac{i}{2} + 1\right), & i = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

ต่อไปจะแสดงว่า  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง  
กรณีที่ 1 เมื่อ  $i$  และ  $j$  เป็นจำนวนคู่เหมือนกัน

$$\text{ให้ } f(v_i) = f(v_j)$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } i - \left(\frac{i}{2} + 1\right) &= j - \left(\frac{j}{2} + 1\right) \\ \frac{i}{2} &= \frac{j}{2} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } i = j$$

นั่นคือ  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

กรณีที่ 2 เมื่อ  $i$  และ  $j$  เป็นจำนวนคี่เหมือนกัน

$$\text{ให้ } f(v_i) = f(v_j)$$

$$\text{จะได้ว่า } (n-1) - \left(\frac{i-1}{2}\right) = (n-1) - \left(\frac{j-1}{2}\right)$$

$$\text{ดังนั้น } i = j$$

นั่นคือ  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

กรณีที่ 3 เมื่อ  $i$  เป็นจำนวนคู่และ  $j$  เป็นจำนวนคี่ (หรือ  $i$  เป็นจำนวนคี่และ  $j$  เป็นจำนวนคู่)

$$\text{สมมติให้ } i \neq j \text{ และ } f(v_i) = f(v_j)$$

$$\text{จะได้ } i - \left(\frac{i}{2} + 1\right) = (n-1) - \left(\frac{j-1}{2}\right)$$

$$i + j - 1 = 2n$$

แต่เนื่องจาก  $i \leq n$  และ  $j \leq n$

จะได้  $i + j - 1 \leq n + n - 1 = 2n - 1 < 2n$

เกิดข้อขัดแย้ง ดังนั้น  $f(v_i) \neq f(v_j)$

นั่นคือ  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

จากทั้ง 3 กรณี จะได้ว่า  $f$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

ต่อไปพิจารณา  $f^*$

เนื่องจากเส้นเชื่อมในกราฟ  $\overline{P}_n$  คือ  $v'v_2, v_1v_2, v_2v_3, \dots, v_{n-1}v_n$  มีจำนวนเส้นเชื่อมทั้งหมด  $n$  เส้น

จากการกำหนด  $f$  จะได้  $f^*$  คือ

$$f^*(v'v_2) = n$$

$$f^*(v_iv_{i+1}) = n - i \text{ เมื่อ } i \in \{1, 2, 3, \dots, n-1\}$$

เมื่อแทน  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$  จะได้  $n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1$  ตามลำดับ

ดังนั้น  $\{f^*(E(\overline{P}_n))\} = \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\}$  หรือ  $R_{f^*} = \{1, 2, 3, \dots, n-1, n\}$

นั่นคือ  $f^*$  เป็นฟังก์ชันทั่วถึง

ต่อไปจะแสดงว่า  $f^*$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

พิจารณาเฉพาะกรณีที่  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$

$$\text{สมมติให้ } f^*(v_iv_{i+1}) = f^*(v_jv_{j+1})$$

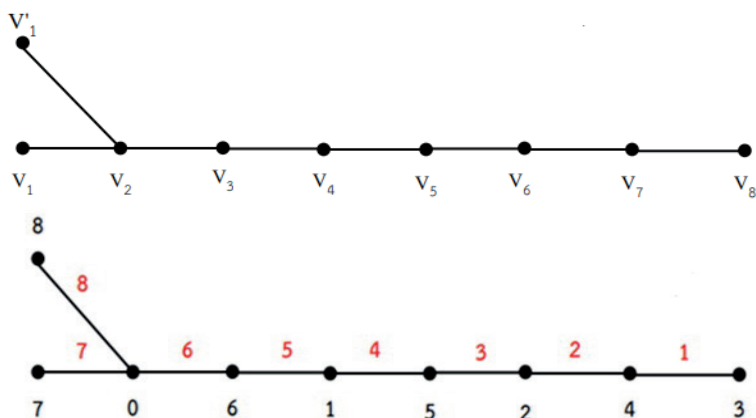
$$\text{จะได้ว่า } n - i = n - j$$

$$\text{ดังนั้น } i = j$$

นั่นคือ  $f^*$  เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่ง

ทำให้ได้ว่า  $f$  เป็นการกำกับแบบเกรซฟูลสำหรับ  $\overline{P}_n$  ดังนั้น  $\overline{P}_n$  พร้อมด้วยการกำกับ  $f$  เป็นกราฟเกรซฟูล

ตัวอย่าง แสดงกราฟเกรซฟูลโดยใช้การกำกับแบบเกรซฟูลตามทฤษฎีบทที่ 2



ภาพที่ 4 กราฟเกรซฟูลซึ่งเป็นกราฟที่ได้จากการทำซ้ำจุดยอดด้วยจุดยอดใหม่

## อภิปรายผลและสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างทฤษฎีบทใหม่จำนวน 2 ทฤษฎีบท แต่ละทฤษฎีบทประกอบด้วย กราฟใหม่ ซึ่งสร้างจากกราฟวิถี โดยการทำซ้ำเส้นเชื่อมเพิ่มเติมด้วยจุดยอดใหม่บนกราฟวิถี  $P_n$  และทำซ้ำจุดยอดเพิ่มเติมด้วยจุดยอดใหม่บนกราฟวิถี  $P_n$  เมื่อได้กราฟใหม่แล้ว ถัดไปคือหาการกำกับแบบเกรซฟูลสำหรับกราฟใหม่ในรูปแบบทั่วไป พร้อมกับพิสูจน์การกำกับที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขของการกำกับแบบเกรซฟูลสำหรับในงานวิจัยนี้ การพิสูจน์  $f^*$  เป็นฟังก์ชันทั่วถึง แต่ละทฤษฎีบทได้แสดงการพิสูจน์ที่แตกต่างกัน

## กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยทักษิณ กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ประเภททุนวิจัยพื้นฐาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rosa, A. (1967). *On certain valuations of the vertices of a graph.* (In Theory of Graphs, International Symposium, Rome, July, 1966), New York: Gordon and Breach.
- [2] Golomb, S. W. (1972). How to number a graph. In R. C. Read (Ed.). *Graph Theory and Computing.* 23–37. New York, U.S.A. Academic Press.
- [3] Cattell, R. (2007). Graceful labellings of paths. *Discrete Mathematics*, 307(24), 3161–3176.
- [4] Kaneria, V. J., Makadia, H. M., & Jariya, M. M. (2014). Graceful labeling for cycle of graph. *International Journal of Mathematics Research*, 6(2), 173–178.
- [5] Boxwala, S. A., & Vashishta, P. (2015). Some new families of graceful graphs. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 48, 127–133.
- [6] Koh, K. M., Phoon, L. Y., & Soh, K. W. (2015). The gracefulness of the join of graphs (II). *AKCE International Journal of Graphs and Combinatorics*, 12(2-3) 180–185.
- [7] Hegde, S. M., & Kumudakshi. (2016). Further results on graceful directed graphs. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 53, 149–154.
- [8] Khatun, S., & Nayeem, A. (2017). Graceful labeling of some zero divisor graphs. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 63, 189–196.
- [9] Ragukumar, P., & Sethuraman, G. (2018). Binomial trees are graceful, *AKCE International Journal of Graphs and Combinatorics*, In Press.
- [10] Wang, T. M., & Zhang, G. H. (2018). On edge-graceful labeling and deficiency for regular graphs. *AKCE International Journal of Graphs and Combinatorics*, 15 (1), 105–111.

# ตัวแบบปริมาณสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับสินค้าที่เน่าเสียง่าย ภายใต้การตรวจสอบสินค้าที่ผิดพลาด

## Economic Order Quantity Model for Perishable Items under Inspection Error

วุฒิชัย ศรีโสคาพล<sup>1</sup> นฤพร สุทธิจิตร<sup>2</sup> สุทธยาณ์ ไชยรัตน์<sup>2</sup> และรัตนากาล คำสอน<sup>3\*</sup>

Wuttichai Srisodaphol<sup>1</sup>, Naruporn Suttijit<sup>2</sup>, Sutthaya Chaiyarat<sup>2</sup> and Rattanakarn Khomson<sup>3\*</sup>

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อเสนอตัวแบบปริมาณสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับสินค้าที่เน่าเสียง่ายภายใต้การตรวจสอบสินค้าเมื่ออัตราความต้องการคงที่ โดยไม่มีช่วงเวลานำ ไม่มีการขาดแคลนสินค้า และมีการตรวจสอบสินค้าทุกหน่วยสินค้าในแต่ละรอบ แต่อาจจะมีผิดพลาดในการตรวจสอบสินค้า ซึ่งตัวแบบที่นำเสนอสามารถหาปริมาณการสั่งซื้อสินค้าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำที่สุด พร้อมทั้งมีการแสดงตัวอย่างเชิงตัวเลขเพื่อทำการสนับสนุนผลของการศึกษาเชิงทฤษฎีและมีการวิเคราะห์ความไวของเศษส่วนสินค้าที่เสียที่มีผลต่อค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา ซึ่งพบว่าเศษส่วนของสินค้าที่เสียเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

**คำสำคัญ:** อัตราการเน่าเสีย เศษส่วนของสินค้าที่เสีย นโยบายสินค้าคงคลัง การวิเคราะห์ความไว

### Abstract

The objective of this study was to propose economic order quantity model for perishable items under inspection with constant demand, without lead time, no shortage, and all screened items in each cycle but the inspection error was occurred. In this proposed model, optimal order quantity with the minimum total cost per time unit was obtained. Furthermore, a numerical example was displayed to the support theoretical study and sensitivity analysis of fraction of perishable items affecting expected total cost per unit time. The results share that a fraction of perishable was increased then the expected total cost per time unit would also be increased.

**Keywords:** Deterioration Rate, Fraction of Defective Items, Inventory Policy, Sensitivity Analysis

<sup>1</sup> ผศ.ดร., สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

<sup>2</sup> นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

<sup>3</sup> อ., แผนกวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

<sup>1</sup> Asst. Prof. Dr., Department of Statistics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

<sup>2</sup> Undergraduate Student, Department of Statistics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Mathematics, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai, 50300

\* Corresponding author: E-mail address: krattanakarn@hotmail.com, Tel.: 084-6126690

(Received: September 2, 2019; Revised: October 28, 2019; Accepted: December 24, 2019)

## บทนำ

สินค้าในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ผักสดและผลไม้ จะมีความแตกต่างจากอุตสาหกรรมทั่วไป คือ สินค้าในอุตสาหกรรมอาหาร มีอายุการเก็บรักษาทำให้คุณภาพของสินค้าลดลงเรื่อยๆ โดยการเสื่อมคุณภาพ หรือการลดลงของคุณภาพอาหารทั้งทางด้านกายภาพเช่น สี กลิ่นรส สรรพชาติ เนื้อสัมผัส และทางโภชนาการ จะทำให้อาหารไม่เป็นที่ต้องการ ไม่ปลอดภัย และไม่ได้รับการยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากสินค้าในอุตสาหกรรมอาหารมีอายุการเก็บรักษาและผู้ขายต้องสรรหาสิ่งที่มีคุณภาพที่ดีที่สุดมาเสนอขายแก่ผู้ซื้อ การตรวจสอบสินค้าจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องทำการตรวจสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง คุณภาพของสินค้า และจำนวนสินค้า ซึ่งหากเกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบสินค้าจะทำให้มีสินค้าที่เสีย หรือสินค้าที่มีตำหนิส่งถึงมือผู้ซื้อ และนอกจากนี้ยังส่งผลเสียทำให้ผู้ขายมีภาพลักษณ์ที่ไม่ดี

ที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับตัวแบบปริมาณสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับสินค้าที่มีการเน่าเสียง่าย เช่น ในปี 1995 Padmanabhan และ Vrat [1] ได้นำเสนอตัวแบบการสั่งซื้อแบบประหยัด สำหรับสินค้าที่เน่าเสียง่าย เมื่อระดับสินค้าคงคลังขึ้นกับอัตราการขาย มีอัตราการเติมเต็มสินค้าแบบไม่จำกัด โดยไม่มีช่วงเวลานำ เวลาการเสื่อมสภาพของสินค้ามีการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง และนโยบายสินค้าคงคลังที่ใช้คือมีการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง ในปี 1998 Giri และ Chaudhuri [2] ได้นำเสนอตัวแบบเชิงกำหนด (Deterministic Model) ของสินค้าคงคลังที่มีการเน่าเสียง่ายเมื่อระดับสินค้าคงคลังขึ้นอยู่กับการความต้องการและค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บรักษาที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยไม่มีช่วงเวลานำ มีการเติมเต็มสินค้าทันที ค่าใช้จ่ายในการเติมเต็มสินค้า ทรานค่าและมีค่าคงที่ ระบบสินค้าคงคลังประกอบด้วยสินค้าชนิดเดียว และมีจุดของการจัดหาสินค้า (Stocking Point) เพียงจุดเดียวในแต่ละรอบการสั่งซื้อ ต่อมาในปี 2005 Dye และ Ouyang [3] ได้นำเสนอตัวแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับสินค้าที่เน่าเสียง่ายซึ่งพัฒนาจากตัวแบบของ Padmanabhan และ Vrat [1] ภายใต้อสมมติเดียวกันยกเว้นมีระยะเวลาภายในการค้างส่งสินค้าบางส่วน ในปี 2010 Hsieh และ Dye [4] ได้นำเสนอ นโยบายการเติมเต็มสินค้าที่เหมาะสมสำหรับสินค้าที่เน่าเสียง่ายเมื่อเวลาการเสื่อมสภาพของสินค้า มีการแจกแจงแบบชี้เลขกำลังและมีข้อจำกัดในการจัดเก็บสินค้า โดยยอมให้มีการขาดแคลนสินค้า ไม่มีช่วงเวลานำ ระยะเวลาในการลงทุนของระบบสินค้าคงคลังเป็นแบบไม่จำกัด และมีพื้นที่ในการจัดเก็บสินค้า ในปี 2011 Sana [5] ได้นำเสนอตัวแบบการสั่งซื้อแบบประหยัดสำหรับสินค้าที่เน่าเสียง่าย ที่มีการกำหนด ระยะเวลาในการลงทุนที่แน่นอน อัตราความต้องการลดลงเป็นกำลังสองของราคาขาย ราคาในช่วงเวลาที่แตกต่างกันเป็นตัวแปรในการตัดสินใจ โดยตัวแบบถูกพัฒนาขึ้นสำหรับสินค้ารายการเดียว มีการพิจารณา การเสื่อมสภาพของสินค้า ระยะเวลาในการลงทุนแน่นอน ความยาวรอบของการสั่งซื้อแต่ละรอบเท่ากัน และไม่ยอมให้มีการขาดแคลนสินค้า ในปี 2013 Avinadav *et al.* [6] ได้เสนอตัวแบบสินค้าคงคลังสำหรับ สินค้าเน่าเสียง่ายกับฟังก์ชันความต้องการเกิดจากต่อราคาขายสินค้าและเวลาหลังจากการเติมเต็มสินค้า อัตราความต้องการลดลงเป็นแบบเชิงเส้นกับราคาขายและลดลงเป็นแบบพหุนามกับเวลาหลังจากการเติมเต็ม สินค้า โดยไม่ยอมให้มีการค้างส่งสินค้า ซึ่งช่วงเวลานำมีค่าคงที่ สินค้ามีอายุการเก็บรักษาคงที่ และสินค้า ทั้งหมดมีระยะเวลาหมดอายุซึ่งผู้บริโภคทราบได้ ในปี 2013 เช่นเดียวกัน Taleizadeh *et al.* [7] ได้เสนอตัวแบบ การสั่งซื้อแบบประหยัดสำหรับสินค้าที่สามารถเน่าเสียง่ายกับการขายแบบลดราคาและยอมให้มีการขาดแคลน สินค้า และในปี 2015 Kouki *et al.* [8] นำเสนอตัวแบบ  $(r,Q)$  ที่มีค่าเสียโอกาสในการขายสินค้า สำหรับสินค้า ที่เน่าเสียง่ายโดยมีความต้องการสินค้าแบบเป็นสุ่ม อายุการใช้งานและช่วงเวลานำคงที่ และไม่มีสินค้าเสีย

1. อัตราความต้องการสินค้าทราบค่าและมีค่าคงที่
2. ไม่มีช่วงเวลานำ
3. ไม่มีการขาดแคลนสินค้า
4. มีการตรวจสอบสินค้าตรวจสอบอย่างต่อเนื่องและทำการตรวจสอบทุกหน่วยสินค้า
5. ไม่มีการคืนสินค้าเนื่องจากข้อผิดพลาดของการตรวจสอบสินค้า

### สัญลักษณ์ที่ใช้ในตัวแบบ

- D แทน อัตราความต้องการสินค้า  
Q แทน ปริมาณการสั่งซื้อสินค้าต่อรอบ  
 $\mu$  แทน อัตราการเน่าเสียของสินค้าต่อหน่วยเวลา  
c แทน ต้นทุนสินค้าต่อหน่วย  
d แทน ต้นทุนการตรวจคัดกรองสินค้าต่อหน่วย  
x แทน อัตราการตรวจคัดกรองสินค้าต่อหน่วยเวลา  
K แทน ต้นทุนคงที่ในการสั่งซื้อสินค้าต่อรอบ  
h แทน ค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้าต่อหน่วย  
T แทน ความยาวของรอบการสั่งซื้อสินค้า  
 $m_1$  แทน ความน่าจะเป็นที่จำแนกสินค้าที่ไม่เสียเป็นสินค้าที่เสีย  
 $m_2$  แทน ความน่าจะเป็นที่จำแนกสินค้าที่เสียเป็นสินค้าที่ไม่เสีย  
p แทน เศษส่วนของสินค้าที่เสีย  
 $t_1$  แทน เวลาการตรวจสอบในหนึ่งรอบ  
 $I(t)$  แทน ปริมาณสินค้าคงคลังที่มีอยู่ ณ เวลา t  
 $f(p)$  แทน ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ p โดยมีการแจกแจงเอกรูปชนิดต่อเนื่อง  $U(0,a)$   
 $c_a$  แทน ค่าใช้จ่ายของการยอมรับสินค้าที่เสีย  
 $c_r$  แทน ค่าใช้จ่ายของการปฏิเสธสินค้าที่ไม่เสีย  
 $Z_1$  แทน ระดับสินค้าที่เวลา  $t_1$   
 $Z_2$  แทน ระดับสินค้าเมื่อนำสินค้าที่เสียออกจากระบบสินค้าคงคลังที่เวลา  $t_1$

จากรูปที่ 1 ระดับสินค้าคงคลังลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากสินค้าที่เน่าเสียและการขายสินค้า ดังนั้นสมการเชิงอนุพันธ์ของระดับสินค้าคงคลังที่เวลา t เขียนได้ดังนี้

$$\frac{dI(t)}{dt} = -[\mu I(t) + D], \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

ภายใต้เงื่อนไข  $I(0) = Q$  และ  $I(T) = 0$  จากสมการ (1) จะได้ระดับสินค้าคงคลัง  $I(t)$  คือ

$$I(t) = \begin{cases} -\frac{D}{\mu} + \left(Q + \frac{D}{\mu}\right)e^{-\mu t} & , 0 \leq t \leq t_1 \\ -\frac{D}{\mu} + \frac{D}{\mu}e^{-\mu(t-T)} & , t_1 < t \leq T \end{cases}$$

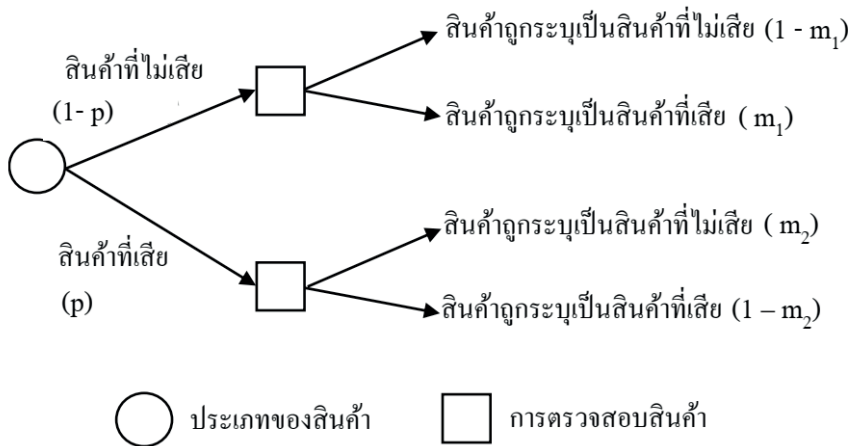
ซึ่งการตรวจสอบคัดแยกสินค้าจะมีเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 กรณี โดยมีเศษส่วนของสินค้าในกรณีต่างๆ ดังนี้  
กรณีที่ 1 สินค้าที่ไม่เสียถูกระบุเป็นสินค้าที่ไม่เสีย โดยมีเศษส่วนของสินค้ากรณีนี้ คือ  $(1-p)(1-m_1)$

กรณีที่ 2 สินค้าที่ไม่เสียถูกระบุเป็นสินค้าที่เสีย โดยมีเศษส่วนของสินค้ากรณีนี้ คือ  $(1-p)m_1$

กรณีที่ 3 สินค้าที่เสียถูกระบุเป็นสินค้าที่ไม่เสีย โดยมีเศษส่วนของสินค้ากรณีนี้ คือ  $pm_2$

กรณีที่ 4 สินค้าที่เสียถูกระบุเป็นสินค้าที่เสีย โดยมีเศษส่วนของสินค้ากรณีนี้ คือ  $p(1-m_1)$

โดยแต่ละกรณีของการคัดแยกสินค้า ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กรณีที่แตกต่างกันของการคัดแยกสินค้า

พิจารณา ความยาวรอบของการสั่งซื้อสินค้า (T) คือ  $T = \frac{Q(1-p)(1-m_1)}{D}$  (2)

และ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อรอบ (TC) โดย

$TC = \text{ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อสินค้าต่อรอบ (PC)} + \text{ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบสินค้าต่อรอบ (IC)} + \text{ค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้าต่อรอบ (HC)}$

ซึ่ง ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อสินค้าต่อรอบ (PC) คือ  $PC = K + cQ$

ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบสินค้าต่อรอบ (IC) คือ  $IC = dQ + c_r(1-p)m_1Q + c_a pm_2Q$

ค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้าต่อรอบ (HC) คือ  $HC = h \left[ -\frac{DT}{\mu} + \frac{Q}{\mu} (1 - e^{-\mu t_1}) + \frac{D}{\mu^2} (e^{-\mu t_1 + \mu T} - e^{-\mu t_1}) \right]$

เมื่อแทนค่า  $t_1 = \frac{D}{x}$  และ  $T = \frac{Q(1-p)(1-m_1)}{D}$  จะได้

$$HC = h \left[ -\frac{Q(1-p)(1-m_1)}{\mu} + \frac{Q}{\mu} \left( 1 - e^{-\mu \frac{D}{x}} \right) + \frac{D}{\mu^2} \left( e^{-\mu \frac{D}{x} + \mu \frac{Q(1-p)(1-m_1)}{D}} - e^{-\mu \frac{D}{x}} \right) \right]$$

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (TC) คือ

$$TC(Q) = K + cQ + dQ + c_r(1-p)m_1Q + c_a pm_2Q + h \left[ -\frac{Q(1-p)(1-m_1)}{\mu} + \frac{Q}{\mu} \left( 1 - e^{-\mu \frac{D}{x}} \right) + \frac{D}{\mu^2} \left( e^{-\mu \frac{D}{x} + \mu \frac{Q(1-p)(1-m_1)}{D}} - e^{-\mu \frac{D}{x}} \right) \right] \quad (3)$$

เนื่องจาก  $p$  คือเศษส่วนสินค้าที่เสียที่มีฟังก์ชันความน่าจะเป็นคือ  $f(p)$  ทำให้การหาค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อหน่วยเวลาจาก  $E[TCU(Q)] = \frac{E[TC(Q)]}{E[T]}$  โดย  $E[TC(Q)]$  คือค่าคาดหวังของค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อรอบ

หรือค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อรอบ และ  $E[T]$  คือค่าคาดหวังของความยาวรอบของการสั่งซื้อสินค้า หรือความยาวรอบของการสั่งซื้อสินค้าเฉลี่ย จากสมการ (3) จะได้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อรอบ คือ

$$E[TC(Q)] = K + cQ + dQ + c_1(1-E(p))m_1Q + c_2E(p)m_2Q + h \left[ -\frac{Q(1-E(p))(1-m_1)}{\mu} + \frac{Q}{\mu} \left( 1 - e^{-\frac{\mu D}{x}} \right) + \frac{D}{\mu^2} E \left( e^{-\frac{\mu D}{x} + \mu \frac{Q(1-p)(1-m_1)}{D}} \right) - e^{-\frac{\mu D}{x}} \right] \quad (4)$$

โดยจากสมการ(2) ความยาวรอบของการสั่งซื้อสินค้าเฉลี่ยคือ  $E[T] = \frac{Q(1-E(p))(1-m_1)}{D}$

นั่นคือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา คือ

$$E[TCU(Q)] = \frac{K + cQ + dQ + c_1 \left( 1 - \frac{a}{2} \right) m_1 Q + c_2 \left( \frac{a}{2} \right) m_2 Q + h \left[ -\frac{Q \left( 1 - \frac{a}{2} \right) (1-m_1)}{\mu} + \frac{Q}{\mu} \left( 1 - e^{-\frac{\mu D}{x}} \right) + \frac{D}{\mu^2} E \left( e^{-\frac{\mu D}{x} + \mu \frac{Q(1-a-m_1+am_1)}{D}} \right) - e^{-\frac{\mu D}{x}} \right]}{Q \left( 1 - \frac{a}{2} \right) (1-m_1)} \quad (5)$$

เพื่อที่จะหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลามีค่าต่ำที่สุดจึงหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ (5) เทียบกับ Q แล้วกำหนดให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นแก้สมการหาค่า Q จะได้อนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ (5) เทียบกับ Q คือ

$$\frac{d}{dQ} E[TCU(Q)] = \frac{D}{Q^2 \left( 1 - \frac{a}{2} \right) (1-m_1)} \left\{ -K - \frac{hD^2 e^{-\frac{\mu D}{x}}}{a\mu^3 (1-m_1)} \left[ \frac{Q \left( \frac{\mu(1-a-m_1+am_1)}{D} e^{-\frac{\mu Q(1-a-m_1+am_1)}{D}} - \frac{\mu(1-m_1)}{D} e^{-\frac{\mu Q(1-m_1)}{D}} \right)}{Q} - \frac{2 \left( e^{-\frac{\mu Q(1-a-m_1+am_1)}{D}} - e^{-\frac{\mu Q(1-m_1)}{D}} \right)}{Q} \right] + \frac{hD e^{-\frac{\mu D}{x}}}{\mu^2} \right\}$$

กำหนดให้อนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ (5) เทียบกับ Q เท่ากับ 0 นั่นคือ

$$\frac{D}{Q^2 \left( 1 - \frac{a}{2} \right) (1-m_1)} \left\{ -K - \frac{hD^2 e^{-\frac{\mu D}{x}}}{a\mu^3 (1-m_1)} \left[ \frac{Q \left( \frac{\mu(1-a-m_1+am_1)}{D} e^{-\frac{\mu Q(1-a-m_1+am_1)}{D}} - \frac{\mu(1-m_1)}{D} e^{-\frac{\mu Q(1-m_1)}{D}} \right)}{Q} - \frac{2 \left( e^{-\frac{\mu Q(1-a-m_1+am_1)}{D}} - e^{-\frac{\mu Q(1-m_1)}{D}} \right)}{Q} \right] + \frac{hD e^{-\frac{\mu D}{x}}}{\mu^2} \right\} = 0$$

หรือ

$$\frac{K\alpha\mu^3(1-m_1)e^{\frac{\mu}{x}}}{hD^2} - \frac{\alpha\mu(1-m_1)}{D} = - \left( \frac{\mu(1-a-m_1+am_1)}{D} e^{\frac{\mu Q(1-a-m_1+am_1)}{D}} - \frac{\mu(1-m_1)}{D} e^{\frac{\mu Q(1-m_1)}{D}} \right) + \frac{2 \left( e^{\frac{\mu Q(1-a-m_1-am_1)}{D}} - e^{\frac{\mu Q(1-m_1)}{D}} \right)}{Q} \quad (6)$$

การหาค่า  $Q^*$  ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา ( $E[TCU(Q)]$ ) มีค่าต่ำที่สุด โดยพิจารณาสมการ (6) ซึ่งกำหนดค่า  $Q$  เท่ากับ 1 เพิ่มค่าของ  $Q$  ทีละ 1 จนถึง  $Q = D$  ซึ่งจะได้  $Q^*$  เมื่อ  $E[TCU(Q)]$  มีค่าต่ำที่สุด โดยสอดคล้องจากสมการ (6)

จากตัวแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับสินค้าที่มีการเน่าเสียง่ายที่นำเสนอได้ ได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมในกรณีของการตรวจสอบสินค้าทุกหน่วยสินค้าระหว่างการขายสินค้าให้ลูกค้าไปพร้อม ๆ กัน และการตรวจสอบสินค้านั้นอาจเกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบสินค้าได้ ซึ่งจะสอดคล้องกับสถานการณ์จริงมากกว่าตัวแบบที่นำเสนอมาก่อนข้างต้นที่ยังไม่มีการตรวจสอบสินค้าก่อนส่งให้ลูกค้า [1-8] แต่ก็ยังมีข้อจำกัดสำหรับตัวแบบที่นำเสนอคือ ความต้องการสินค้าของลูกค้ามีค่าคงที่ ไม่มีช่วงเวลานำและไม่ยอมให้มีการขาดแคลนสินค้า

#### ตัวอย่างเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความไว

เพื่อทำการสนับสนุนผลของการศึกษาเชิงทฤษฎี จึงพิจารณาตัวอย่าง จาก Taleizadeh *et al.* [7] โดย  $D = 8000$  หน่วยต่อปี  $c = 10$  ดอลลาร์ต่อหน่วย  $K = 30$  ดอลลาร์ต่อรอบ  $h = 0.8$  ดอลลาร์ต่อปี  $\mu = 0.005$  ต่อปี และได้กำหนดตัวแปรเพิ่มเติม คือ  $x = 100$  หน่วยต่อปี  $d = 0.5$  ดอลลาร์ต่อปี  $m_1 = 0.05$   $m_2 = 0.05$   $c_u = 80$  ดอลลาร์ต่อหน่วย  $c_r = 16$  ดอลลาร์ต่อหน่วย และ

$$f(p) = \begin{cases} 20 & , 0 < p < 0.05 \\ 0 & \end{cases}$$

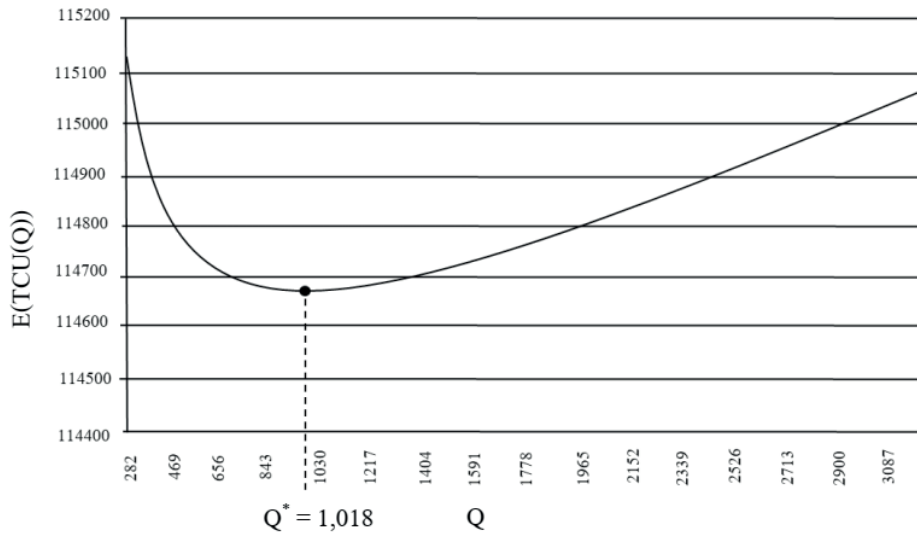
โดย  $E(p) = 0.025$

เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อและค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา โดยกำหนดค่า  $Q$  เท่ากับ 1 เพิ่มค่าของ  $Q$  ทีละ 1 จนถึง  $Q = D = 8,000$  ทำให้ได้ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาที่ต่ำที่สุดคือ  $Q$  เท่ากับ 1,018 หน่วย และ  $E[TCU(Q)]$  เท่ากับ 125,776.2180 ดอลลาร์

ผลลัพธ์ของตัวอย่างเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาที่ต่ำที่สุดของตัวแบบการสั่งซื้อแบบประหยัดสำหรับสินค้าที่เน่าเสียง่ายภายใต้ตรวจสอบสินค้า คือ

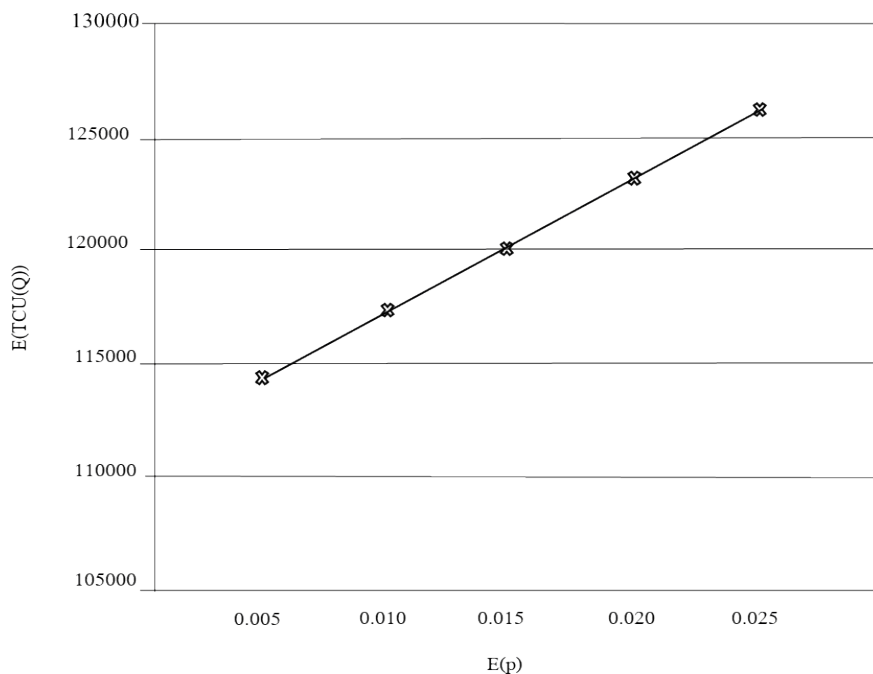
ปริมาณการสั่งซื้อ หรือ  $Q$  เท่ากับ 1,018 หน่วย และค่าใช้จ่ายเฉลี่ยสุทธิ หรือ  $E[TCU(Q)]$  เท่ากับ 125,776.2180 ดอลลาร์ และ  $E(T) = \frac{Q(1-E(p))}{D} = \frac{1018(1-0.025)}{8000} = 0.1241$  ปี หรือ  $45.2965 \approx 46$  วัน โดยจำนวนสินค้า

ที่สั่งซื้อแต่ละครั้งเท่ากับ 1,018 หน่วย ถึงจะเพียงพอกับความต้องการสินค้า ดังภาพที่ 3 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามีจุดต่ำสุดของค่าใช้จ่ายเฉลี่ยสุทธิ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา  $E[TCU(Q)]$  กับ  $Q$

สำหรับการวิเคราะห์ความไวของค่าเฉลี่ยของเศษส่วนของสินค้าที่เสีย ( $E(p)$ ) ว่ามีผลต่อค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา  $E[TCU(Q)]$  อย่างไร สามารถพิจารณาจากการกำหนดให้  $E(p)$  มีค่าเป็น 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 และ 0.025 ที่เกิดจาก  $a$  เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ หา  $Q^*$  ที่ทำให้  $E[TCU(Q)]$  มีค่าต่ำที่สุด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา ( $E[TCU(Q)]$ ) กับค่าเฉลี่ยของเศษส่วนของสินค้าที่เสีย ( $E(p)$ ) แสดงในภาพที่ 4 โดยจากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าเฉลี่ยเศษส่วนของสินค้าที่เสียมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลามีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลากับค่าเฉลี่ยของเศษส่วนของสินค้าที่เสีย

## สรุปผล

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดกรณีสินค้าเน่าเสียง่ายพบว่า ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับกรณีที่มีการตรวจสอบสินค้า เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้น ในบทความนี้ จึงได้นำเสนอตัวแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับสินค้าที่มีการเน่าเสียง่าย ภายใต้การตรวจสอบสินค้า ระหว่างการขายสินค้า ที่สามารถหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อ หน่วยเวลาต่ำที่สุดได้ เมื่ออัตราความต้องการสินค้าทราบค่าและมีค่าคงที่ ไม่มีช่วงเวลานำตรวจสอบสินค้า ทุกหน่วยสินค้า ไม่ยอมให้มีการขาดแคลนสินค้า และสามารถเกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบสินค้าได้ เมื่อทำการหาปริมาณสินค้าที่เหมาะสมที่สุดและค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาที่ต่ำที่สุด ทำให้ทราบว่า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเฉลี่ยของเศษส่วนของสินค้าที่เสียที่เพิ่มขึ้น

## ข้อเสนอแนะ

ในระบบสินค้าคงคลังของสินค้าที่เน่าเสียง่ายอาจจะมีช่วงเวลาที่เกิดการขาดแคลนสินค้า ดังนั้น ในการศึกษาครั้งต่อไปสามารถพิจารณาตัวแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดในกรณีสินค้าที่เน่าเสียง่ายเมื่อมีช่วง เวลาที่เกิดการขาดแคลนสินค้าได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Padmanabhan, G., & Vrat, P. (1995). EOQ models for perishable items under stock dependent selling rate. *European Journal of Operational Research*, 86(2), 281–292.
- [2] Giri, B.C., & Chaudhuri, K.S. (1998). Deterministic models of perishable inventory with stock dependent demand rate and nonlinear holding cost. *European Journal of Operational Research*, 105(3), 467–474.
- [3] Dye, C.Y., & Ouyang, L.Y. (2005). An EOQ model for perishable items under stock-dependent selling rate and time-dependent partial backlogging. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 776–783.
- [4] Hsieh, T.P., & Dye, C.Y., (2010). Optimal replenishment policy for perishable items with stock dependent selling rate and capacity constraint. *Computer & Industrial Engineering*, 59(2), 251–258.
- [5] Sana, S.S., (2011). Price-sensitive demand for perishable items – an EOQ model. *Applied Mathematics and Computation*, 217(13), 6248–6259.
- [6] Avinadav, T., Herbon, A., & Spiegel, U., (2013). Optimal inventory policy for a perishable item with demand function sensitive to price and time. *International Journal of Production Economics*, 144(2), 497–506.
- [7] Taleizadeh, A.A., Nohammadi, B., Cardenas-Barron, L.E., & Samimi, H. (2013). An EOQ model for perishable product with special sale and shortage, *International Journal of Production Economics*, 145(1), 318–338.

- [8] Kouki, C., Jemai, Z., & Minner, S. (2015). A lost sales (r, Q) inventory control model for perishables with fixed lifetime and lead time. *International Journal of Production Economics*, 168, 143–157.
- [9] Salameh, M.K., & Jaber, M.Y. (2000). Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics*, 64(1–3), 59–64.
- [10] Goyal, S.K., & Cardenas-Barron, L.E. (2002). Note on: Economic production quantity model for items with imperfect quality – A practical approach. *International Journal of Production Economics*, 77(1), 85–87.
- [11] Eroglu, A., & Ozdemir, G. (2007). An economic order quantity model with defective items and shortage. *International Journal of Production Economics*, 106(2), 544–549.
- [12] Wee, H.M., Yu, J., & Chen, M.C. (2007). Optimal inventory model for items with imperfect quality and shortage backordering. *Omega*, 35(1), 7–11.
- [13] Maddah, B., & Jaber, M. Y. (2008). Economic order quantity model with imperfect quality: Revisited. *International Journal of Production Economics*, 112(2), 808–815.

# ผลของการเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในอาหารต่อการเจริญเติบโต องค์ประกอบทางเคมี การสะสมโปรตีน และไขมันในปลาดุกลำพัน

(*Clarias nieuhofii*)

## Effects of Di-calcium Phosphate Supplementation on Growth Performance, Body Compositions, Protein and Lipid Retentions in Nieuhofii's Catfish (*Clarias nieuhofii*)

ศุภดา คีรีรัตน์<sup>1\*</sup> พัสราภรณ์ ละใบสอาด<sup>2</sup> พีรพงศ์ อติทรัพย์ไพศาล<sup>2</sup> และอานุช คีรีรัตน์<sup>3</sup>  
Suphada Kiriratnikom<sup>1\*</sup>, Pasaraporn Labaisaad<sup>2</sup>, Peerapong Atisappisan<sup>2</sup> and Anut Kiriratnikom<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

ทดลองเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ (Available Phosphorus, AvP) 0.2-1.3 % ในอาหารปลาดุกลำพัน เลี้ยงปลาทดลองที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 0.55-0.56 กรัมต่อตัว เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าปลาที่ได้รับอาหารเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว และน้ำหนักที่เพิ่มสูงที่สุด ( $p < 0.05$ ) การรอดตาย การแลกเนื้อ ความชื้น ไขมัน และเอ็นในตับปลา ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) ปริมาณโปรตีนในตับปลาที่ได้รับไดแคลเซียมฟอสเฟตทุก ระดับมีค่าสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม ( $p < 0.05$ ) อาหารเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีผลให้ปลาดุกลำพันมีการสะสมโปรตีนในตับสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ยังพบว่า ปลาที่ได้รับไดแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีการสะสมไขมันสูงสุด ( $p < 0.05$ ) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณ 1.3 % AvP มีผลดีต่อการเจริญเติบโต การสะสมโปรตีน และไขมันของปลาดุกลำพันระยะปลานี้

**คำสำคัญ:** ปลาดุกลำพัน ความต้องการฟอสฟอรัส ไดแคลเซียมฟอสเฟต

<sup>1</sup> ผศ.ดร., สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>2</sup> นิสิตระดับปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>3</sup> ผศ., สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>1</sup> Asst. Prof. Dr., Department of Biological and Environmental Science, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand

<sup>2</sup> Undergraduate Student, Department of Biological and Environmental Science, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand

<sup>3</sup> Asst. Prof., Department of Biological and Environmental Science, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand

\* Corresponding author: Tel: +66-847503-986, E-mail address: ksuphada@yahoo.com

(Received: November 7, 2019; Revised: January 2, 2020; Accepted: January 6, 2020)

## Abstract

Test diets for Nieuhofii's catfish were supplemented by di-calcium phosphate at 0.2-1.3% available phosphorus, AvP. Feeding trial was undertaken in 0.55-0.56 g average body weight Nieuhofii's catfish for 8 weeks. It found that the highest average body weight and weight gain was found in the fish fed 1.3% Avp di-calcium phosphate ( $p < 0.05$ ). Survival, feed conversion, moisture, lipid and ash in fish body were not significantly different among treatments ( $p > 0.05$ ). Protein content in the fish fed all di-calcium phosphate supplemented diets were higher than the control ( $p < 0.05$ ). Diet with 1.3% Avp di-calcium phosphate supplementation resulted in higher protein retention compared to the control fish ( $p < 0.05$ ). The highest lipid retention was also found in fish fed 1.3% AvP of di-calcium phosphate diet ( $p < 0.05$ ). It was concluded that supplementation of 1.3% AvP di-calcium phosphate gave beneficial effects on growth, protein and lipid retention in Nieuhofii's catfish.

**Keywords:** Nieuhofii's Catfish (*Clarias nieuhoftii*), Phosphorus Requirement, Di-calcium Phosphate

## บทนำ

ในปัจจุบันสามารถเพาะขยายพันธุ์ปลาดุกลำพัน (*Clarias nieuhoftii*) ซึ่งเป็นปลาน้ำจืดใกล้สูญพันธุ์ ในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาได้เป็นผลสำเร็จซึ่งช่วยให้เกิดการพัฒนากิจการเลี้ยงปลาชนิดนี้ให้เป็นปลาเศรษฐกิจ ในอนาคต อย่างไรก็ตามการเลี้ยงปลาดุกลำพันทั้งเพื่อการอนุรักษ์พันธุ์ปลา และการเลี้ยงเพื่อผลตอบแทน ทางเศรษฐกิจยังประสบปัญหาเกี่ยวกับความรู้ในด้านสูตรอาหารที่เหมาะสมเพื่อให้ปลามีการเจริญเติบโต และสุขภาพที่ดีเนื่องจากปัจจุบันยังมีข้อมูลด้านความต้องการสารอาหารสำหรับปลาชนิดนี้ไม่มากนัก ด้วย เหตุผลดังกล่าวจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความต้องการสารอาหารพื้นฐานของปลา ซึ่งจะเป็ข้อมูลสำคัญ ในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลาชนิดนี้ จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการศึกษาความต้องการ สารอาหารของปลาดุกลำพันในด้านของความต้องการโปรตีน รูปแบบและระดับของไขมันในอาหาร และการศึกษาเกี่ยวกับความต้องการวิตามินซี [1] แต่ยังคงขาดข้อมูลในด้านความต้องการแร่ธาตุ โดยเฉพาะ การศึกษาเกี่ยวกับระดับความต้องการฟอสฟอรัสซึ่งเป็นแร่ธาตุที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา รวมทั้งมี ผลต่อการใช้สารอาหารอื่นๆ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในกรณีที่ปลาได้รับฟอสฟอรัสจากอาหารไม่เพียงพอ จะเจริญเติบโตช้าและมีประสิทธิภาพการใช้อาหาร โดยเฉพาะการสะสมโปรตีน และไขมันลดลง [2] แต่ในกรณีที่มีการเสริมฟอสฟอรัสในอาหารในปริมาณมากเกินไป ทำให้ปลาไม่สามารถนำฟอสฟอรัสไป ใช้ประโยชน์ได้หมดก็จะถูกขับออกมา เกิดการสะสมฟอสฟอรัสในน้ำ และก่อให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำ ในภายหลัง [3] จากการศึกษาของ Asgard and Shearer [4] ซึ่งใช้แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นแหล่ง ของฟอสฟอรัสในอาหารปลาแซลมอนขนาด 1.4 กรัม พบว่า ปลามีความต้องการฟอสฟอรัสในอาหารในช่วง 1 - 1.1 % อย่างไรก็ตามเมื่อปลาขนาดใหญ่นั้นจะมีความต้องการฟอสฟอรัสในอาหารลดลง [5 - 6] ทั้งนี้ การเสริมฟอสฟอรัสในปริมาณที่เหมาะสมตรงตามความต้องการของปลา นอกจากจะมีผลให้ปลาเจริญเติบโต และมีสุขภาพดีแล้ว ยังช่วยลดมลสารที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมให้น้อยลงด้วย การวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อ ทราบถึงผลของการใช้ไดแคลเซียมฟอสเฟตเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสในระดับต่างๆ ในอาหารสำเร็จรูป สำหรับปลาดุกลำพัน ทั้งเพื่อการเลี้ยงเพื่อการอนุรักษ์พันธุ์ และการเพาะเลี้ยงปลาดุกลำพันในเชิงเศรษฐกิจต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (CRD) ทดสอบระดับของไดแคลเซียมฟอสเฟต (Di-calcium Phosphate,  $\text{CaH}_2\text{PO}_4$ ) ในรูปผลิตภัณฑ์วัตถุดิบอาหารสัตว์เชิงการค้าผลิตจากอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์ มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมด 18% โดยจัดซื้อจากตัวแทนจำหน่ายวัตถุดิบอาหารสัตว์ในจังหวัดพัทลุง 5 ชุดการทดลอง ได้แก่

T1 ชุดควบคุมไม่เสริมไดแคลเซียมในอาหารทดลอง

T2 ชุดการทดลองเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณที่มีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 0.2 % (0.2 % AvP)

T3 ชุดการทดลองเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณที่มีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 0.5 % (0.5 % AvP)

T4 ชุดการทดลองเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณที่มีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 0.9 % (0.9 % AvP)

T5 ชุดการทดลองเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณที่มีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 1.3 % (1.3 % AvP)

ทำการทดลองโดยเลี้ยงปลาอุกลำพันธ์ขนาด 2-3 เซนติเมตรที่มาจากโรงเพาะฟัก ในตู้ทดลองขนาด 110 ลิตร ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร ตู้ละ 15 ตัว ชุดการทดลองละ 4 ตู้

### อาหารทดลอง

เตรียมอาหารทดลองที่มีโปรตีน 38-40% และไขมัน 12-14% อาหารแต่ละสูตรเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟต ในระดับที่มีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ (Available Phosphorus) 0.2-1.3 % โดยคำนวณตามรายงานของ Robinson and Li [7] และ Wilson, Robinson, Gatlin and Poe [8] ผลิตอาหารทดลองตามสูตรในตารางที่ 1 ตามวิธีการของ Kiriratnikom and Kiriratnikom [1] โดยอัดเม็ดให้มีขนาดเม็ดอาหารประมาณ 3 มิลลิเมตร อบแห้ง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาใช้

### สัตว์ทดลอง

เตรียมลูกปลาลำพันธ์ขนาดประมาณ 2-3 เซนติเมตร ที่เพาะพันธุ์จากโรงเพาะฟักจำนวน 500 ตัว มาเลี้ยงในบ่อคอนกรีตปริมาตรน้ำ 1,500 ลิตร มีระบบให้อากาศเป็นเวลา 1 สัปดาห์ให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปโปรตีน 40-42% วันละ 2 ครั้ง เมื่อพบว่าปลามีสุขภาพดีจึงสุ่มปลาทดลองลงเลี้ยงในตู้ทดลอง ปริมาตรน้ำ 100 ลิตร ตู้ละ 15 ตัว พักปลาให้ปรับตัวเข้ากับตู้ทดลองเป็นเวลา 5-7 วันก่อนเริ่มการทดลอง

### ระบบการทดลอง และการเลี้ยงปลาทดลอง

ชั่งน้ำหนักปลาก่อนการทดลองให้อาหารทดลองในแต่ละชุดการทดลองทุกวัน วันละ 2 ครั้ง ในเวลา 9.30 น. และ 17.30 น. คัดตะกอนที่พื้นตู้ทุกวัน เปลี่ยนถ่ายน้ำในอัตราการใช้ 200-400% ต่อวันด้วยระบบน้ำไหลผ่านตลอด (Flow Through System) ตรวจสอบการเจริญเติบโต และการกินอาหารของปลาโดยชั่งน้ำหนักปลาทั้งตู้ทดลอง และบันทึกน้ำหนักอาหารที่ใช้ทุกช่วง 2 สัปดาห์ของการทดลอง ทำการเลี้ยงปลาทดลองเป็นเวลา 10 สัปดาห์ จึงชั่งน้ำหนัก นับจำนวนปลา และเก็บข้อมูล เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง

## การเก็บข้อมูล

### ผลของไคแคลเซียมฟอสเฟตระดับต่างๆ ต่อการเจริญเติบโต

ตรวจวัดการเจริญเติบโตของปลาทุก 2 สัปดาห์ เป็นเวลา 10 สัปดาห์ คำนวณน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว น้ำหนักที่เพิ่ม และอัตราการรอดตาย ตรวจสอบปริมาณอาหารที่ใช้คำนวณอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed Conversion Ratio, FCR) อัตราการรอดตาย (Survival Rate, %) การเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate, %/day) และน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Weight Gain, %) ตามวิธีการของ Halver and Hardy [9]

### ผลของไคแคลเซียมฟอสเฟตระดับต่างๆ ต่อองค์ประกอบตัวปลา

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทำการสุ่มปลา 12 ตัว จากแต่ละชุดทดลอง สลบล้างสารละลายน้ำมันกานพลู เพื่อวิเคราะห์ความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้าตามวิธีการของ AOAC [10] นำข้อมูลมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การสะสมโปรตีน (% Protein Retention) ไขมัน (% Lipid Retention) ตามวิธีการของ Halver and Hardy [9]

## การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยด้วย One Way Analysis of Variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS Version 17.0

### ตารางที่ 1 สูตรอาหาร และองค์ประกอบทางเคมีของอาหารเสริมไคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับต่างๆ

|                                                        | T1         | T2         | T3         | T4         | T5         |
|--------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| ปลาป่น                                                 | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         |
| กากถั่วเหลือง                                          | 15         | 15         | 15         | 15         | 15         |
| เศษไก่ป่น                                              | 17.5       | 17.5       | 17.5       | 17.5       | 17.5       |
| แป้งสาลี                                               | 15         | 15         | 15         | 15         | 15         |
| แป้งข้าวโพด                                            | 8.5        | 7.39       | 5.72       | 3.5        | 1.27       |
| วิตามิน                                                | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        |
| แร่ธาตุรวม                                             | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        |
| น้ำมันถั่วเหลือง                                       | 3          | 3          | 3          | 3          | 3          |
| CaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (P 18%)               | -          | 1.11       | 2.78       | 5.00       | 7.23       |
| <b>รวม</b>                                             | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> |
| องค์ประกอบทางเคมีของอาหารที่เตรียมเสร็จแล้ว (% as fed) |            |            |            |            |            |
| ความชื้น (%)                                           | 2.51       | 3.61       | 3.15       | 3.57       | 3.45       |
| โปรตีน (%)                                             | 40.25      | 39.92      | 40.23      | 40.36      | 39.87      |
| ไขมัน (%)                                              | 13.04      | 13.58      | 13.17      | 14.21      | 14.32      |
| เถ้า (%)                                               | 15.60      | 16.38      | 17.83      | 19.52      | 21.64      |
| ฟอสฟอรัส (%)                                           | 2.12       | 2.29       | 2.40       | 3.05       | 3.28       |
| แคลเซียม (%)                                           | 1.64       | 1.94       | 2.34       | 2.87       | 3.40       |
| AvP (%)                                                | 1.13       | 1.33       | 1.63       | 2.03       | 2.43       |

## ผลการทดลอง

### การเจริญเติบโตของปลา

ปลาดุกลำพันที่ได้รับอาหารทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น  $0.55 \pm 0.02$  -  $0.56 \pm 0.02$  กรัมต่อตัว และเพิ่มขึ้นเป็น  $4.68 \pm 0.49$  -  $6.27 \pm 0.51$  กรัมต่อตัวในสัปดาห์ที่ 10 ของการทดลอง (ตารางที่ 2) เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม และอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับ 0.2 ถึง 0.9 % AvP มีน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่ปลาดุกลำพันที่ได้รับอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวสูงที่สุด ( $6.27 \pm 0.51$  กรัมต่อตัว) แตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 2) เช่นเดียวกันกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของปลาดุกลำพัน ซึ่งพบว่า ปลาที่ได้รับอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูง และแตกต่างทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ( $p < 0.05$ ) ปลาที่ได้รับอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟต 0.2 % AvP แต่อย่างไรก็ตาม ปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม และปลาที่ได้รับอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟต 0.5-1.3 % AvP ก็มีการเจริญเติบโตจำเพาะไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) ขณะที่การรอดตายและการแลกเนื้อของปลาดุกลำพันที่ได้รับอาหารทุกสูตรมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 3)

**ตารางที่ 2** น้ำหนักเฉลี่ยของปลาดุกลำพันที่ได้รับอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับต่างๆ เป็นเวลา 10 สัปดาห์

|                  | Initial Body Weight (g) | Final Body Weight (g) |
|------------------|-------------------------|-----------------------|
| T1 Control       | $0.55 \pm 0.02^a$       | $5.13 \pm 0.31^a$     |
| T2 DCP 0.2 % avp | $0.56 \pm 0.02^a$       | $4.68 \pm 0.49^a$     |
| T3 DCP 0.5 % avp | $0.55 \pm 0.02^a$       | $5.16 \pm 0.75^a$     |
| T4 DCP 0.9 % avp | $0.56 \pm 0.02^a$       | $5.31 \pm 0.36^a$     |
| T5 DCP 1.3 % avp | $0.55 \pm 0.02^a$       | $6.27 \pm 0.51^b$     |
| p-value          | 1.000                   | 0.007                 |

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p > 0.05$ )

**ตารางที่ 3** น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเติบโตต่อวัน การรอดตาย และการแลกเนื้อของปลาดุกลำพันที่ได้รับอาหารเสริมโคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับต่างๆ เป็นเวลา 10 สัปดาห์

|                  | Weight gain (%)       | SGR (%/day)          | Survival (%)        | FCR               |
|------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| T1 Control       | $825.18 \pm 61.70^a$  | $3.18 \pm 0.10^{ab}$ | $96.67 \pm 6.67^a$  | $1.12 \pm 0.01^a$ |
| T2 DCP 0.2 % avp | $744.19 \pm 94.48^a$  | $3.04 \pm 0.16^a$    | $100.00 \pm 0.00^a$ | $1.13 \pm 0.01^a$ |
| T3 DCP 0.5 % avp | $829.00 \pm 123.72^a$ | $3.17 \pm 0.20^{ab}$ | $96.67 \pm 6.67^a$  | $1.13 \pm 0.01^a$ |
| T4 DCP 0.9 % avp | $859.13 \pm 96.14^a$  | $3.22 \pm 0.14^{ab}$ | $86.67 \pm 16.33^a$ | $1.13 \pm 0.01^a$ |
| T5 DCP 1.3 % avp | $031.47 \pm 51.42^b$  | $3.46 \pm 0.06^b$    | $96.67 \pm 6.38^a$  | $1.03 \pm 0.01^a$ |
| p-value          | 0.006                 | 0.010                | 0.328               | 1.000             |

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p > 0.05$ )

## องค์ประกอบทางเคมีของตัวปลา

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าปริมาณความชื้น ปริมาณไขมัน และปริมาณเถ้าในตัวปลาคูกลำพันที่ได้รับอาหารทดลองทุกสูตรมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณโปรตีนในตัวปลาคูกลำพันที่ได้รับอาหารทดลองชุดควบคุมมีค่าต่ำที่สุด และแตกต่างทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับปลาที่ได้รับอาหารทดลองที่เสริมไคแอลเซียมฟอสเฟตทุกสูตร (ตารางที่ 4)

**ตารางที่ 4** องค์ประกอบทางเคมีของตัวปลาคูกลำพันที่ได้รับอาหารเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟตในระดับต่างๆ เป็นเวลา 10 สัปดาห์

|                  | Moisture (%)              | Protein (%)               | Lipid (%)                 | Ash (%)                   |
|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| T1 Control       | 76.08 ± 1.49 <sup>a</sup> | 56.47 ± 2.54 <sup>a</sup> | 26.98 ± 2.44 <sup>a</sup> | 10.77 ± 1.93 <sup>a</sup> |
| T2 DCP 0.2 % avp | 76.09 ± 0.48 <sup>a</sup> | 65.36 ± 1.46 <sup>b</sup> | 23.47 ± 2.10 <sup>a</sup> | 9.43 ± 1.29 <sup>a</sup>  |
| T3 DCP 0.5 % avp | 76.64 ± 1.58 <sup>a</sup> | 65.13 ± 5.66 <sup>b</sup> | 23.79 ± 2.48 <sup>a</sup> | 11.01 ± 0.90 <sup>a</sup> |
| T4 DCP 0.9 % avp | 76.50 ± 0.46 <sup>a</sup> | 66.97 ± 3.01 <sup>b</sup> | 25.28 ± 1.72 <sup>a</sup> | 7.47 ± 3.21 <sup>a</sup>  |
| T5 DCP 1.3 % avp | 75.95 ± 0.56 <sup>a</sup> | 62.89 ± 1.28 <sup>b</sup> | 25.41 ± 2.84 <sup>a</sup> | 11.40 ± 3.03 <sup>a</sup> |
| p-value          | 0.856                     | 0.003                     | 0.267                     | 0.145                     |

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p > 0.05$ )

## การสะสมโปรตีน และไขมันในตัวปลา

ปลาที่ได้รับอาหารเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีอัตราการสะสมโปรตีนในตัวสูง และแตกต่างทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม และปลาที่ได้รับอาหารเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟต 0.9 % AvP (ตารางที่ 5) ปลาที่ได้รับอาหารเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟต 0.2, 0.5 และ 1.3 % AvP มีเปอร์เซ็นต์การสะสมโปรตีนในตัวไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) เปอร์เซ็นต์การสะสมไขมันในตัวปลาคูกลำพันมีค่าสูงในปลาที่ได้รับอาหารเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม ( $p > 0.05$ ) ในขณะที่ปลาที่ได้รับอาหารทดลองเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟต 0.2 - 0.9 % AvP มีเปอร์เซ็นต์การสะสมไขมันในตัวต่ำ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับปลาที่ได้รับอาหารเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 5)

**ตารางที่ 5** เปอร์เซ็นต์การสะสมโปรตีน ไขมัน และฟอสฟอรัสในตัวปลาคูกลำพันที่ได้รับอาหารเสริมไคแอลเซียมฟอสเฟตในระดับต่างๆ เป็นเวลา 10 สัปดาห์

|                  | Protein Retention (%)      | Lipid Retention (%)        |
|------------------|----------------------------|----------------------------|
| T1 Control       | 30.07 ± 1.83 <sup>a</sup>  | 41.31 ± 2.56 <sup>ab</sup> |
| T2 DCP 0.2 % avp | 36.06 ± 4.38 <sup>ab</sup> | 33.90 ± 4.61 <sup>a</sup>  |
| T3 DCP 0.5 % avp | 36.18 ± 5.02 <sup>ab</sup> | 36.23 ± 5.76 <sup>a</sup>  |
| T4 DCP 0.9 % avp | 34.32 ± 4.55 <sup>a</sup>  | 33.03 ± 4.76 <sup>a</sup>  |
| T5 DCP 1.3 % avp | 43.60 ± 2.26 <sup>b</sup>  | 45.57 ± 2.32 <sup>b</sup>  |
| p-value          | 0.003                      | 0.003                      |

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p > 0.05$ )

## วิจารณ์ และสรุปผลการทดลอง

ฟอสฟอรัสทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบในร่างกาย เช่น นิวคลีโอไทด์ ฟอสโฟลิพิด โคเอนไซม์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ในเซลล์ การขาดฟอสฟอรัสทำให้การเจริญเติบโตและการแลกเปลี่ยนเนื้อลดลง โครงสร้างของกระดูกผิดปกติ [11] ในการทดลองนี้พบว่าปลาที่ได้รับอาหารไม่เสริมไคแคลเซียมฟอสเฟตมีการเจริญเติบโตไม่ต่างจากปลาที่ได้รับอาหารเสริมไคแคลเซียมฟอสเฟต เนื่องจากปลาคูกลำพันเป็นปลากินเนื้อที่มีความต้องการโปรตีน 40 % โดยที่ใช้แหล่งโปรตีนทดแทนจากกากถั่วเหลืองได้น้อย [1] จึงต้องใช้อาหารทดลองสูตรพื้นฐานที่มีปลาป่นในปริมาณมาก แต่ปลาป่นเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสที่ปลาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ปลาในชุดควบคุมจึงได้รับฟอสฟอรัสจากปลาป่นไปใช้ประโยชน์ได้ในบางส่วน [3] แต่การเสริมไคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับ 1.3 % AvP มีผลให้ปลามีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและการเจริญเติบโตจำเพาะสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าปลาคูกลำพันมีความต้องการฟอสฟอรัสในอาหารค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับรายงานการศึกษาในปลาอื่นๆ เช่น Zhang *et al.* [5] ศึกษาความต้องการฟอสฟอรัสในปลากะพงญี่ปุ่น (*Lateolabrax japonicus*) โดยใช้อาหารที่มีปลาป่นในปริมาณมากและเสริมโมโนโซเดียมฟอสเฟตเป็นแหล่งของฟอสฟอรัส 0.31 ถึง 1.17 % AvP เลี้ยงปลาขนาด 6.28 กรัมเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าการเสริมฟอสฟอรัส 0.68 % AvP มีผลให้ปลาเจริญเติบโตได้ดีที่สุด Asgard and Shearer [4] ศึกษาในปลาแอตแลนติกแซลมอนขนาด 1.4 กรัมโดยใช้แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสในอาหารที่ระดับ 0.4 ถึง 2.5 % เป็นระยะเวลา 9 สัปดาห์ พบว่าปลาแซลมอนขนาดเล็กมีความต้องการฟอสฟอรัสในอาหาร 1 ถึง 1.1 % ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าในปลาที่มีขนาดเล็กจะมีความต้องการฟอสฟอรัสที่มากกว่าปลาขนาดใหญ่ นอกจากนี้อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสในอาหารก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซึมฟอสฟอรัสไปประโยชน์ในตัวปลา Lall [3] ได้ให้ความเห็นว่าอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมในอาหารสำหรับปลาแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน และในกรณีที่อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่าสูงกว่าระดับที่เหมาะสมจะส่งผลให้ปลาดูดซึมฟอสฟอรัสในอาหารได้น้อยลง ขณะเดียวกันถ้าอัตราส่วนของฟอสฟอรัสต่อแคลเซียมมีค่าสูงก็จะส่งผลเสียต่อการดูดซึมแคลเซียมของปลา [9] ในการทดลองนี้สังเกตเห็นว่าในกรณีที่เสริมไคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับต่ำ (0.2 % AvP) จะมีอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสในอาหาร 1:1.2 ในขณะที่อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสในอาหารมีค่า 1:1 เมื่อเสริมไคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับสูง (1.3 % AvP) มีความเป็นไปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสในอาหารปลาคูกลำพันมีค่าประมาณ 1:1 และอาจเป็นเหตุผลให้ปลาคูกลำพันที่ได้รับอาหารเสริมไคแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP สามารถดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ

ปลาที่ได้รับอาหารเสริมไคแคลเซียมฟอสเฟตในระดับที่สูงขึ้นจะมีปริมาณโปรตีนในตัวสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารทดลองชุดควบคุม ซึ่งการทดลองในปลา Yellow Crocker (*Pseudosciaena crocea*) ของ Mai *et al.* [2] พบว่า การเสริมฟอสฟอรัสมีผลให้โปรตีนในตัวปลาเพิ่มขึ้น และไขมันลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการขาดฟอสฟอรัสมีผลให้กระบวนการ Oxidative Phosphorylation เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ไม่สามารถนำสารอาหารเข้าสู่วิถี TCA และเกิดการสะสม Acetyl-CoA นำไปสู่การสะสมไขมันในตัวปลา [2] อย่างไรก็ตามในการศึกษาในปลา Yellow Catfish ของ Luo, Tan, Liu & Wang [12] กลับพบว่าปลาที่ได้รับฟอสฟอรัสในอาหารเพิ่มขึ้นมีปริมาณโปรตีนและไขมันในตัวปลาเพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณไขมันในตัวปลา สาเหตุที่โปรตีนลดต่ำลงในปลาที่ขาดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นเนื่องจากภาวะขาดฟอสฟอรัสมีผลยับยั้ง

กระบวนการ  $\beta$ -oxidation ในการเผาผลาญกรดไขมัน ทำให้ปลาไม่สามารถนำไขมันไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน และต้องเผาผลาญโปรตีนที่สะสมไว้เป็นแหล่งพลังงานแทน [6] จากการทดลองในปลาไน (*Cyprinus carpio*) ของ Onishi, Suzuki & Takeuchi [13] พบว่าการขาดฟอสฟอรัสทำให้การทำงานของเอนไซม์ Gluconeogenesis ในตับเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการสะสมไขมันในตับปลาเพิ่มมากขึ้น [6] แต่ในการทดลองในปลาคูกล่าพัน ครั้งนี้ไม่พบการสะสมไขมันในตับปลาเพิ่มมากขึ้นในปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม อีกทั้งความชื้น และเถ้า ในตับปลาก็ไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับการทดลองในปลา Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*) [14] รายงานว่าปลาที่ได้รับอาหารเสริมฟอสฟอรัส และอาหารชุดควบคุม มีปริมาณไขมันและฟอสฟอรัสในตัวไม่แตกต่างกัน สาเหตุที่ผลการทดลองมีความแตกต่างกัน เกิดขึ้นเนื่องจากปลาแต่ละชนิดมีอัตราการเผาผลาญไขมันแตกต่างกัน Luo *et al.* [12] รายงานว่าแม้ปลาที่ได้รับอาหารที่เสริมฟอสฟอรัสในระดับต่าง ๆ มีไขมันในตัวไม่แตกต่างกัน แต่พบการสะสมไขมันในตับของปลาที่ได้รับฟอสฟอรัสในปริมาณน้อย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปลาไม่สามารถเผาผลาญไขมันได้ สอดคล้องกับการทดลองครั้งนี้ ซึ่งเมื่อพิจารณาการสะสมโปรตีนและไขมันในตับปลาพบว่า การเสริมไคแคลเซียมฟอสเฟต 1.3 % AvP มีผลให้เปอร์เซ็นต์การสะสมโปรตีนสูงกว่าอาหารชุดควบคุม นอกจากนี้ยังทำให้ปลามีการสะสมไขมันสูงที่สุดและแตกต่างจากการทดลองอื่น ๆ

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากเงินอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยทักษิณ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Kiriratnikom, S., & Kiriratnikom, A. (2012). Growth, feed utilization, survival and body composition of fingerlings of slender walking catfish, *Clarias nieuhofii*, fed diets containing different protein levels. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 34(1), 37–43.
- [2] Mai, K., Zhang, C., Ai, Q., Duan, Q., Xu, W., Zhang, L., Liufu, Z., & Tan, B. (2006). Dietary phosphorus requirement of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R. *Aquaculture*, 251(2–4), 346–353.
- [3] Lall, S.P. (2002). The Mineral. In J.E., Halver, R.W., Hardy, (Eds), *Fish nutrition*. 3<sup>rd</sup> ed. San Diego: Academic Press.
- [4] Asgard, T., & Shearer, K. D. (1997). Dietary phosphorus requirement of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Aquaculture Nutrition*, 3(1), 17–23.
- [5] Zhang, C., Mai, K., Ai, Q., Zhang, W., Duan, Q., Tan, B., Ma, H., Xu, W., Liufu, Z., & Wang, X. (2006). Dietary phosphorus requirement of juvenile Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus*. *Aquaculture*, 255(1–4), 201–209.
- [6] Roy, P. K., & Lall, S.P. (2003). Dietary phosphorus requirement of juvenile haddock (*Melanogrammus aeglefinus* L.). *Aquaculture*, 221(1–4), 451–468.
- [7] Robinson, E. H., & Li, M.H. (1996). *A practical guide to nutrition, feeds, and feeding of catfish* (revised). Miss. Agric. For. Exp. St. Bull. No. 1041. Mississippi: Mississippi State University.

- [8] Wilson, R.P., Robinson, E.H., Gatlin, D., & Poe, W.E. (1982) Dietary phosphorus requirement of channel catfish. *The Journal of Nutrition*, 112(6), 1197–1202.
- [9] Halver, J. E., & Hardy, R. W. (2002). *Fish nutrition*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Academic Press.
- [10] AOAC. (1990). *Official methods of analysis*. 15<sup>th</sup> ed. Washington, DC.; The Association of Official Analytical Chemists.
- [11] NRC, National Research Council. (2011). *Nutrient requirements of fish and shrimp*. Washington, DC: The National Academies Press.
- [12] Luo, Z., Tan, X. –Y., Liu, X., & Wang, W. –M. (2010). Dietary total phosphorus requirement of juvenile yellow catfish *Pelteobarrus fulvidraco*. *Aquaculture International*, 18(5), 897–908.
- [13] Onishi, T., Suzuki, M., & Takeuchi, M. (1981). Changes in carp hepatopancreatic enzyme activities with dietary phosphorus levels. *Bulletin of the Japanese Society for the Science of Fish*, 47(3), 353–357.
- [14] Pimentel–Rodrigues, A. M. & Oliva–Teles, A. (2001) Phosphorus requirements of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) juveniles. *Aquaculture Research*, 32 (s1), 157-161.

# การประเมินศักยภาพของพลังงานลมด้วยระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาค: กรณีศึกษาพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทย

## Assessment of Wind Energy using Global Wind Atlas Methodology: A Case Study of Central Region of Thailand

ลัทธวรรณ นิยมธรรม<sup>1\*</sup> จอมภพ แวศักดิ์<sup>2</sup> และชนะ จันทร์จำ<sup>3</sup>  
Lattawan Niyontham<sup>1\*</sup>, Jompob Waewsak<sup>2</sup> and Chana Chunham<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประเมินศักยภาพพลังงานลมในบริเวณพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทย เพื่อตอบสนองนโยบายแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในการเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ผลการประเมินศักยภาพพลังงานลมจะแสดงอยู่ในรูปของแผนที่อัตราเร็วลม ซึ่งอาศัยระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาคที่ได้รับการพัฒนาโดย DTU Wind Energy ร่วมกับ Vortex ซึ่งสนับสนุนโดยธนาคารแห่งชาติ (World Bank Group) ในการวิเคราะห์และประมาณค่าอัตราเร็วลม พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของผลการประเมินโดยอาศัยแผนที่อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 100 m เหนือพื้นดิน ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำจากข้อมูลตรวจวัดจากเสาวัดลมที่จำนวน 6 ต้นภายในพื้นที่ศึกษา ระเบียบวิธีแผนที่ลมอาศัยฐานข้อมูลภูมิอากาศ ERA5 ย้อนหลัง 10 ปี (ค.ศ. 2008-2017) จาก European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ที่ความแยกชัด 30 km เป็นข้อมูลนำเข้าให้กับแบบจำลองบรรยากาศระดับปานกลาง WRF เพื่อทำการย่อยส่วนให้มีความแยกชัดของกริดเท่ากับ 3 km ผลลัพธ์จากแบบจำลองดังกล่าวจะเป็นข้อมูลนำเข้าให้กับแบบจำลองการไหลของลมระดับจุลภาค WAsP ร่วมกับฐานข้อมูลภูมิประเทศความแยกชัดสูงระดับ 30 m ผลการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำพบว่า แผนที่อัตราเร็วลมจากระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาคมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 16.31 เมื่ออาศัยแผนที่ดังกล่าวในการประเมินศักยภาพของพลังงานลมในพื้นที่ศึกษาพบว่า บริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงกว่า 6.0 m/s อยู่ในพื้นที่ภาคตะวันตก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ของพื้นที่ศึกษา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการติดตั้งเสาวัดลมและประเมินศักยภาพในระดับ Micro-siting สำหรับการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานลมได้ต่อไป

**คำสำคัญ:** แบบจำลองบรรยากาศ แบบจำลองการไหลของลม พลังงานลม กระบวนการย่อยส่วน ฐานข้อมูลภูมิอากาศ

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาการพัฒนายั่งยืน วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยทักษิณ สงขลา 90000

<sup>2</sup> รศ.ดร., สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>3</sup> นักวิจัย, ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานลม-แสงอาทิตย์ ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม พัทลุง 93210

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate, Division of Sustainable Development, International College, Thaksin University, Songkhla 90000

<sup>2</sup> Assoc. Prof. Dr., Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

<sup>3</sup> Researcher, Solar-Wind Energy Laboratory, Research Center in Energy and Environment, Thaksin University, Phatthalung 93210

\* Corresponding author: E-mail address: lattawan.n@gmail.com

(Received: January 31, 2020; Revised: March 23, 2020; Accepted: March 23, 2020)

## Abstract

This research presents wind energy assessment in the central region of Thailand in order to response the national policy Power Development Plan (PDP2018) that helps to increase the proportion of electricity generation from wind energy. Wind speeds are represented in the wind atlas by using the global wind atlas methodology that developed by DTU Wind Energy and Vortex under the support by World Bank Group. Wind atlas at the level of above 100 m was validated using measured wind speed data obtained by 6 masts in the central region of Thailand. The Global Wind Atlas (GWA) methodology applied the wind climate of ERA5 in the period of 10 years (2008 – 2017) provided by European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) at resolution of 30 km forced with mesoscale WRF atmospheric modeling under 3 km resolution. Results from mesoscale were input for microscale wind flow WAsP modeling along with digital 30 m high-resolution topography. Results showed that the mean error of wind at 100 m obtained from GWA methodology was 16.31%. Based on wind atlas by GWA methodology, it was found that were potential areas with mean wind speed more than 6.0 m/s in the western, northeastern and southern of the study area. Wind atlas by GWA methodology could be used for met mast installation for further micro-siting in a wind power plant development.

**Keywords:** Atmospheric Model, Wind Flow Model, Wind Energy, Downscaling Process, Wind Climate Database

## บทนำ

พลังงานลมเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เติบโตเร็วที่สุดในโลก เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถแข่งขันกับเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ทั้งทางด้านศักยภาพและราคา แต่การลงทุนในพลังงานลมมีความเสี่ยงสูง เนื่องจากความเร็วและกำลังลมมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตามฤดูกาล การหาสมดุลการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลร่วมกับพลังงานลมให้มีสัดส่วนที่เหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อให้ได้แหล่งพลังงานที่น่าเชื่อถือมีราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างความมั่นคงและยั่งยืนทางด้านพลังงาน

การนำพลังงานลมมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า สิ่งสำคัญอันดับแรกคือ การประเมินอัตราเร็วลมที่มีในพื้นที่ ซึ่งสามารถทำได้โดยการจัดทำแผนที่อัตราเร็วลมโดยอาศัยแบบจำลองจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองบรรยากาศ และหลักการทางสถิติ ร่วมกับอาศัยข้อมูลลมที่ได้จากการตรวจวัดหรือจากฐานข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลลักษณะภูมิประเทศและการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นข้อมูลเข้าของแบบจำลองมาเพื่อประมาณค่าอัตราเร็วลม การวิเคราะห์พลังงานที่ผลิตได้จากกังหันลมเป็นสิ่งสำคัญอันดับที่สองของการประเมินศักยภาพพลังงานลม เพื่อใช้ในการระบุพื้นที่ที่สามารถพัฒนาเป็นทุกกังหันลมได้ในอนาคตและใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจการลงทุน โดยการใช้พลังงานลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า อัตราเร็วลมหรือกำลังลมจะต้องสม่ำเสมอ เฉลี่ยทั้งปีควรมากกว่า 6.4 – 7.0 m/s ที่ระดับความสูง 50 เมตร จึงจะสามารถผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมได้ดี แต่เนื่องด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน กังหันลมผลิตไฟฟ้า

ได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างมากให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถเริ่มผลิตพลังงานได้ที่อัตราเร็วลมต่ำ (2.5–3 m/s) และมีความสูงของหอคอยเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 150 เมตร เหมาะสำหรับประเทศที่มีศักยภาพอัตราเร็วลมไม่สูงมากนัก

ณ ปัจจุบัน ประเทศไทยสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้ 1,506.82 MW (ข้อมูล ณ วันที่ 24 กรกฎาคม 2562) [1] โดยมาจากโรงไฟฟ้าพลังงานลมประเภทผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็ก (SPP) จำนวน 22 โรง กำลังการผลิตติดตั้งรวม 1,455.35 MW และประเภทผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กมาก (VSPP) จำนวน 8 โรง กำลังการผลิตติดตั้งรวม 39.42 MW [2] และในปี พ.ศ. 2561 รัฐบาลได้ทำการทบทวนและปรับปรุงแผน PDP2018 (ปี พ.ศ. 2561 – 2580) โดยกำหนดให้มีการเพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจำนวน 1,485 MW เพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายในแผน PDP 2015 ที่มีเป้าหมายผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมจำนวน 3,002 MW ภายในปี พ.ศ. 2579 [3-4] ทั้งนี้ ที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการศึกษาจัดทำแผนที่อัตราเร็วลมและประเมินศักยภาพพลังงานลมในหลายๆพื้นที่ของประเทศทั้งในและนอกชายฝั่งทะเล เพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานลมที่มีศักยภาพดีพอที่สามารถติดตั้งฟาร์มกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าได้ ยกตัวอย่างเช่น บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้ทำการพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมที่ความละเอียด 1 km ครอบคลุมประเทศไทยโดยอาศัยเทคนิคการจำลองแบบสเกลปานกลาง-สเกลจุลภาคร่วมกัน [5] และในปี พ.ศ. 2554 เสริม จันทร์ฉาย และคณะ ทำการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมระดับสเกลปานกลางความละเอียด 3 km สำหรับประเทศไทยฉบับใหม่ โดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง KAMM [6] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะพื้นที่ โดยจอมภพ และคณะ ได้จัดทำแผนที่พลังงานลมความละเอียดแยกชัดสูง 200 m ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชและสงขลาด้วยแบบจำลองบรรยากาศร่วมกับข้อมูลภูมิอากาศระยะยาว NCEP/NCAR [7] และศึกษาแหล่งพลังงานลมบริเวณอำเภอปากพะนึ่งและอำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราชด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [8] อีกทั้งประเมินศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลอ่าวไทยพร้อมกับประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งฟาร์มกังหันลม [9, 10] ซึ่งจากการศึกษาดังที่กล่าวมาพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ประเทศไทยมีอัตราเร็วลมต่ำถึงปานกลาง (3–5 m/s) แต่ในบางพื้นที่ อาทิเช่น ภาคใต้และพื้นที่นอกชายฝั่งอ่าวไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นบริเวณที่มีศักยภาพพลังงานลมเพียงพอ (มากกว่า 6 m/s) ที่อาจจะสามารถพัฒนาเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานลมได้ ดังนั้น การศึกษาและประเมินศักยภาพเฉพาะแหล่งที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นสำหรับการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของพลังงานลมบริเวณพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทยที่แสดงในรูปแบบของแผนที่อัตราเร็วลมโดยอาศัยระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาค ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการติดตั้งเสาวัดลมและประเมินศักยภาพในระดับ Micro-siting สำหรับการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานลมได้ในลำดับต่อไป

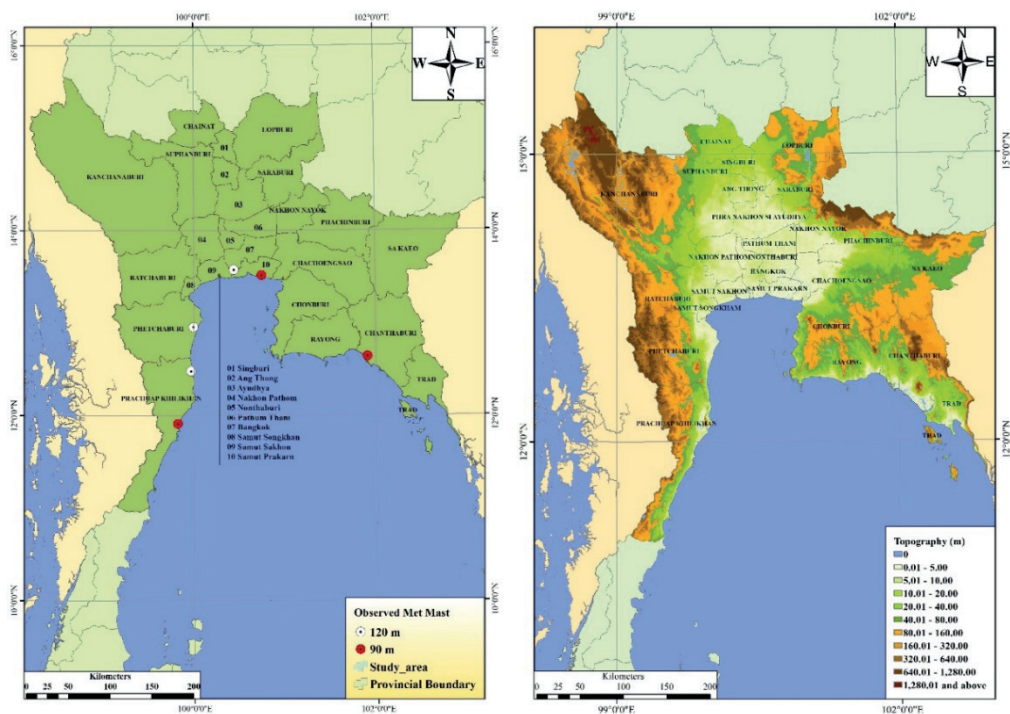
## ระเบียบวิธีวิจัย

### 1. พื้นที่ศึกษา

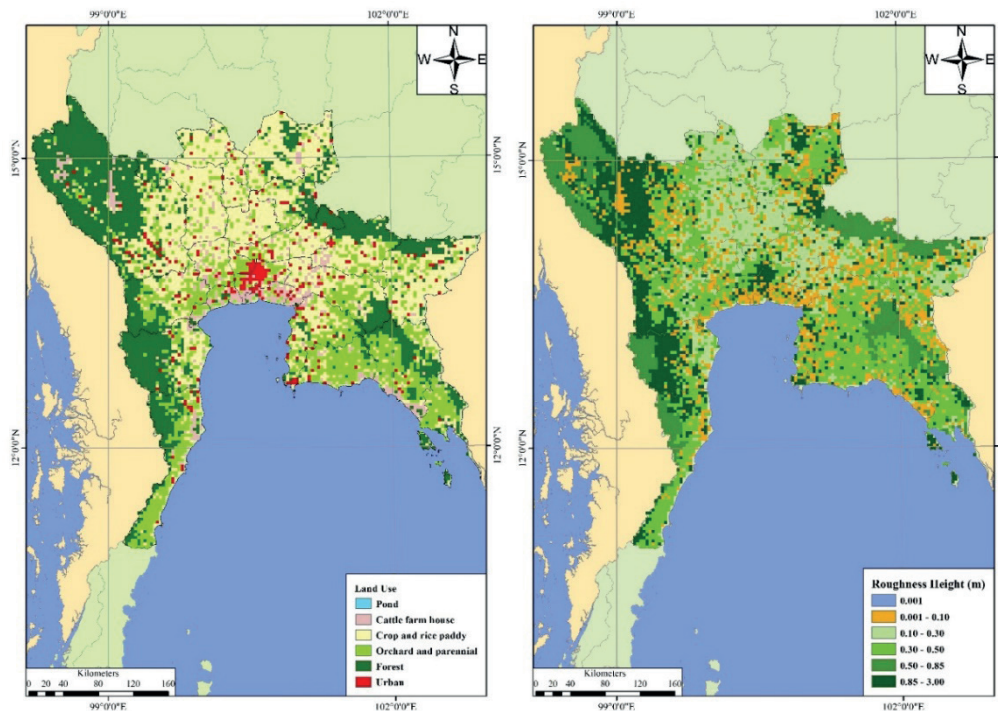
พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้เป็นพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทยครอบคลุมพื้นที่ 26 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง อุทัยธานี สุพรรณบุรี นครปฐม นนทบุรี ปทุมธานี กรุงเทพมหานคร สมุทรสงคราม สมุทรสาครสมุทรปราการ ลพบุรี สระบุรี นครนายก ปราจีนบุรี สระแก้ว ฉะเชิงเทรา ชลบุรี

ระยอง จันทบุรี ตราด กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ครอบคลุมพื้นที่ 104,124.8 km<sup>2</sup> แสดงดังภาพที่ 1 ซ้ายมือ โดยในพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำตอนกลางและเทือกเขาสูงตามแนวตะวันตก ได้แก่เทือกเขาถนนธงชัยและเทือกเขาตะนาวศรี และตะวันออกเฉียงเหนือได้แก่เทือกเขาใหญ่ ทิวเขาแดงพญาเย็น เขาเขียว และเทือกเขาสูงในพื้นที่ตะวันออกของพื้นที่ศึกษาได้แก่ เทือกเขาบรรทัด โดยมีระดับความสูงสูงสุดประมาณ 1,280 m แสดงดังภาพที่ 1 ขวามือ

การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษาประกอบอาศัยข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินปี พ.ศ. 2551 ด้วยสิ่งปกคลุมดินต่างๆ ดังนี้ พื้นน้ำ พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่นาข้าว พื้นที่ปลูกข้าวโพด พื้นที่ปลูกพืชผสม พื้นที่ป่าและเขตเมืองแสดงดังภาพที่ 2 ซ้ายมือ โดยข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินจะถูกนำไปแปลงเป็นระยะความสูงของความขรุขระซึ่งมีอิทธิพลต่อโปรไฟล์ของลมทางดิ่ง ค่าความสูงความขรุขระเชิงพื้นที่ของพื้นที่ศึกษาแสดงดังภาพที่ 2 ขวามือ



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยและตำแหน่งของเสาวัดลม (ซ้าย)  
 และระดับความสูงของพื้นที่ศึกษา (ขวา)



ภาพที่ 2 การใช้ประโยชน์ที่ดินและความสูงความขรุขระของพื้นที่ศึกษา

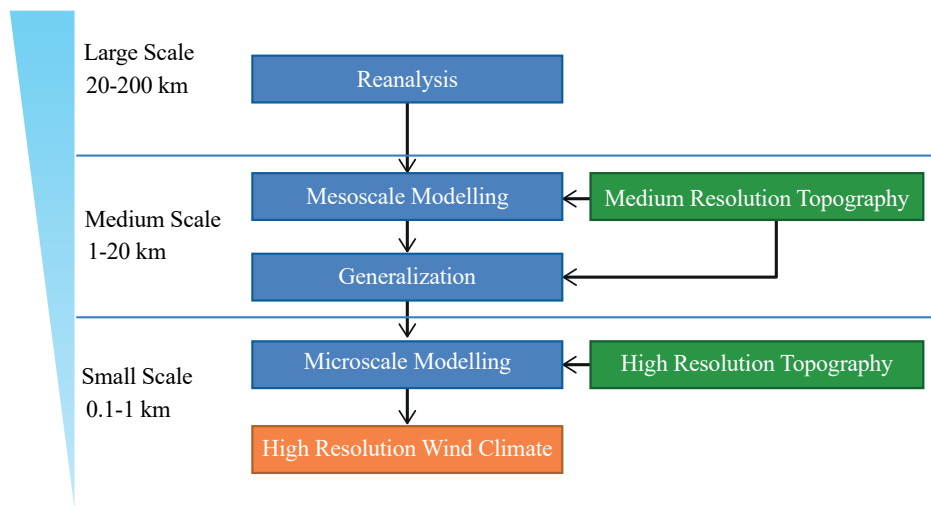
## 2. ระเบียบวิธีแผนที่ลมระดับมหภาค

ระเบียบวิธีแผนที่ลมระดับมหภาค (GWA) เวอร์ชัน 3.0 แสดงดังภาพที่ 3 เป็นการพัฒนาแผนที่ลมร่วมกันระหว่าง Department of Energy ณ Technical University of Denmark (DTU Wind Energy) และ World Bank Group (World Bank และ International Finance Corporation (IFC)) ต่อมา World Bank Group ได้คัดเลือก Vortex ซึ่งเป็นผู้นำทางด้านการจัดการวิเคราะห์แหล่งข้อมูลทรัพยากรลมเชิงพาณิชย์สำหรับการปรับปรุงข้อมูลลมระดับมหภาคโดยการรันแบบจำลองระดับปานกลาง (Mesoscale Model) ที่ความแยกชัด 9 km ร่วมกับฐานข้อมูลภูมิอากาศ ERA-interim Re-analysis ในระเบียบวิธีแผนที่ลมระดับมหภาคเวอร์ชัน 2.0

สำหรับระเบียบวิธีแผนที่ลมระดับมหภาคเวอร์ชัน 3.0 นี้ แหล่งทรัพยากรลมได้ถูกคำนวณให้มีความแม่นยำเพิ่มสูงขึ้นโดยอาศัยระเบียบวิธีและฐานข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดย Vortex ได้เลือกใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาระยะเวลา 10 ปีจากแบบจำลองระดับปานกลางแทนที่จะทำการจำลองแบบโดยการ Ensemble ที่ความแยกชัด 3 km ร่วมกับฐานข้อมูล ERA5 Re-analysis และนอกจากเป็นการปรับปรุงข้อมูลจากแบบจำลองบรรยากาศแล้ว ใน GWA 3.0 ยังเป็นการปรับปรุงระดับความสูงและข้อมูลสิ่งปกคลุมดินในการจำลองแบบระดับจุลภาคอีกด้วย

ระเบียบวิธีแผนที่ลมระดับมหภาค (Global Wind Atlas (GWA) Methodology) อาศัยกระบวนการย่อส่วน (Downscaling Process) โดยเริ่มจากข้อมูลภูมิอากาศขนาดใหญ่ (Large-scale Wind Climate Data) ซึ่งอาศัยข้อมูลการวิเคราะห์จากแบบจำลองบรรยากาศ (Atmospheric Re-analysis Data) ได้แก่ชุดข้อมูล

ERA-5 จาก European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ในช่วงระยะเวลาปี ค.ศ. 2008-2017 ที่ความละเอียด 30 km เพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าให้กับแบบจำลองระดับปานกลาง WRF ที่ความละเอียดของกริด 3 km จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของชุดภูมิอากาศลมทั่วไป (Generalized Wind Climate) ที่มีระยะกริดเท่ากับชุดข้อมูลระดับปานกลาง หลังจากนั้นจะเป็นการนำเข้าชุดข้อมูลดังกล่าวกับแบบจำลองการไหลของลมระดับจุลภาค WASP และสิ้นสุดที่ข้อมูลลมภูมิอากาศระดับจุลภาค (Microscale Wind Climate Data) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลลมที่ระดับความสูง 10 m 50 m 100 m 150 m และ 200 m สำหรับบทความวิจัยนี้จะนำเสนอแผนที่ลมจากระเบียบวิธี GWA ที่ระดับความสูง 50 m 100 m 150 m และ 200 m เหนือพื้นดินเท่านั้น ซึ่งเป็นระดับความสูงของศูนย์กลางส่วนหมุนของกังหันลมขนาดใหญ่เชิงพาณิชย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานลมในปัจจุบัน



ภาพที่ 3 ระเบียบวิธีแผนที่ลมระดับมหภาค (GWA)

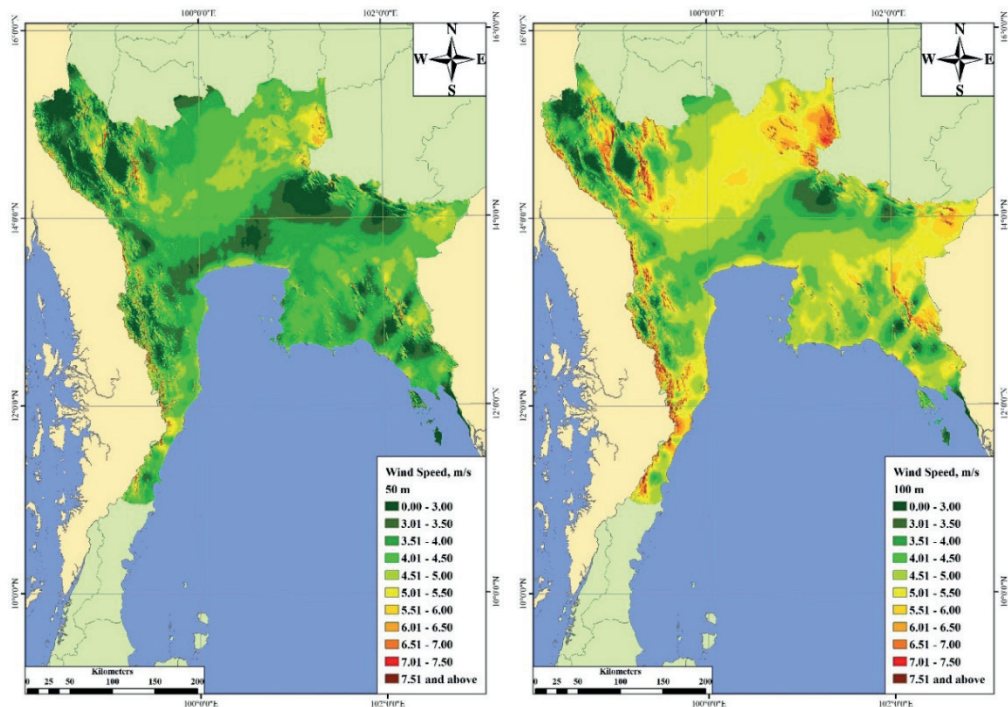
ที่มาข้อมูล <https://globalwindatlas.info/about/method>

### 3. การตรวจสอบความถูกต้อง

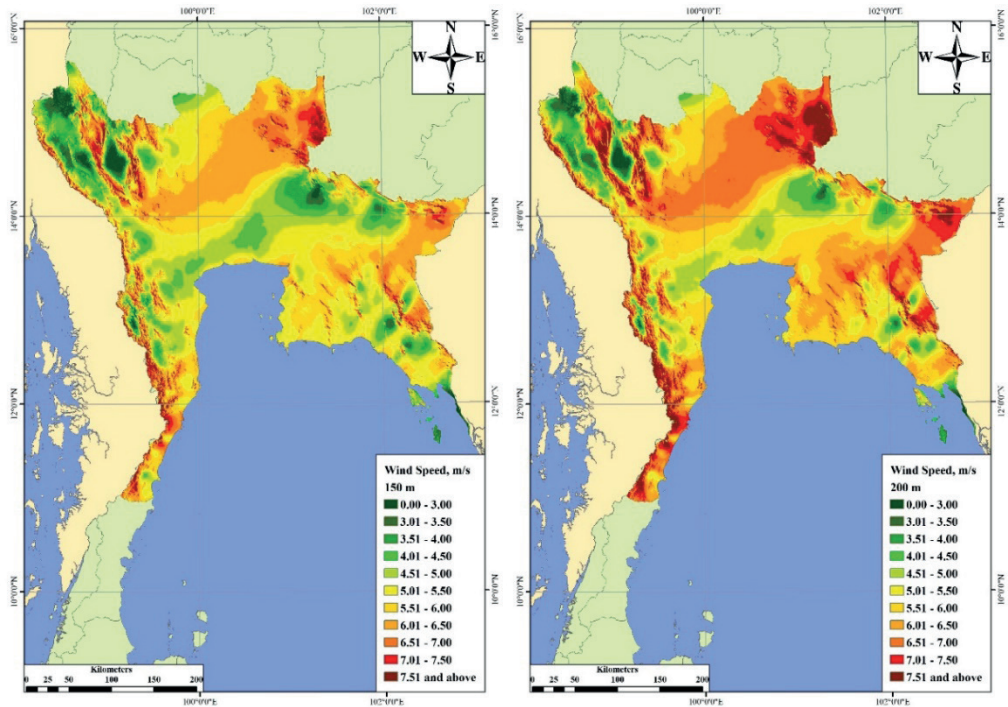
เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแผนที่ลมจากระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาค (GWA) ข้อมูลลมตรวจวัดจากเสาวัดลมในช่วงปี ค.ศ. 2014-2016 แสดงตำแหน่งติดตั้งในพื้นที่ศึกษาแสดงดังภาพที่ 1 ซ้ายมือ ที่ระดับความสูง 90 m และ 120 m ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยการประมาณค่านอกช่วงและการประมาณค่าในช่วงโดยใช้กฎ Log Law ที่ค่า Exponent เท่ากับ 1/7 เพื่อประมาณค่าที่ระดับความสูง 100 m สำหรับการนำไปวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดกับข้อมูลลมอัตราเร็วลมที่ระดับความสูงเดียวกันจากระเบียบวิธี GWA ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Percent Mean Relative Error)

## ผลและอภิปรายผล

แผนที่อัตราเร็วลมจากระเบียบวิธี GWA ที่ระดับความสูง 50 m 100 m 150 m และ 200 m เหนือพื้นดิน แสดงดังภาพที่ 4-5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า บริเวณพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทยที่มีความสูงมากกว่า 100 m เหนือพื้นดินมีศักยภาพพลังงานลมระดับปานกลาง อัตราเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 4.5 m/s และมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลจากแรงเสียดทานของลมลดลง ความต้านทานของแรงเสียดทานที่เกิดจากความขรุขระของพื้นผิวจากสิ่งปกคลุมพื้นดินลดลง ทำให้การไหลของลมเปลี่ยนแปลงทั้งทิศทางและความเร็วในเวลาอันสั้น แต่ในบางส่วนของพื้นที่มีอัตราเร็วลมสูงกว่า 6.0 m/s ซึ่งอยู่ในพื้นที่ภาคตะวันตก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ของพื้นที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากอัตราเร็วลมในพื้นที่แล้ว พื้นที่ดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมที่จะสามารถพัฒนาเป็นทุ่งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าให้แก่ประเทศได้ โดยที่อัตราเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 6 m/s จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 30 GWh/y สำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 10 MW และมีค่าคาร์ปาสิตีแฟกเตอร์ประมาณ 35% แต่การตัดสินใจติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้ายังต้องมีปัจจัยอีกหลายด้านนอกเหนือจากศักยภาพพลังงานลมเข้ามาเกี่ยวข้อง อาทิเช่น ลักษณะพื้นที่บริเวณที่จะติดตั้ง การใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ดังกล่าว รวมถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน ดังนั้นการพัฒนาติดตั้งทุ่งกังหันลมสำหรับประเทศไทยจึงควรทำการศึกษาให้ครอบคลุมและละเอียดในทุกๆด้านเพื่อหาพื้นที่ที่มีศักยภาพที่เหมาะสมที่สุดเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม

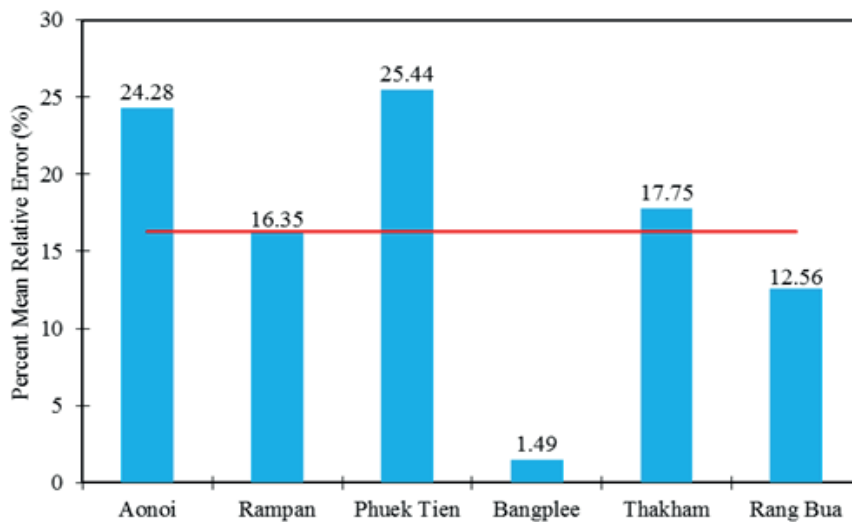


ภาพที่ 4 แผนที่ลมจากระเบียบวิธี GWA ที่ระดับความสูง 50 m เหนือพื้นดิน (ซ้าย) และ 100 m เหนือพื้นดิน (ขวา)



ภาพที่ 5 แผนที่ลมจากระเบียบวิธี GWA ที่ระดับความสูง 150 m เหนือพื้นดิน (ซ้าย) และ 200 m เหนือพื้นดิน (ขวา)

สำหรับการตรวจสอบแผนที่ลมระดับมหภาคอาศัยข้อมูลอัตราเร็วลมจากการตรวจวัดที่ระดับความสูง 90 m และ 120 m จำนวน 6 สถานี ในการประเมินค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Percent Mean Relative Error) พบว่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของแต่ละสถานีในช่วงร้อยละ 1.49–25.44 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 6 โดยเส้นสีแดงแสดงค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย ซึ่งมีค่าร้อยละ 16.31



ภาพที่ 6 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ลมจากระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาค

## สรุป

การประเมินศักยภาพของพลังงานลมด้วยระเบียบวิธีแผนที่ลมมาภาคที่ได้รับการพัฒนาโดยDTU Wind Energy ร่วมกับ Vortex โดยการสนับสนุนงบประมาณจาก World Bank Group พบว่าบริเวณพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทยที่มีความสูงมากกว่า 100 mเหนือพื้นดิน มีศักยภาพของพลังงานลมสูงกว่า 6.0 m/s อยู่ในพื้นที่ภาคตะวันตก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ของพื้นที่ศึกษา และผลการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำพบว่าแผนที่ลมจากระเบียบวิธีแผนที่ลมมาภาคมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 16.31

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สำหรับข้อมูลลมตรวจวัดสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ลม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2019). *Calendar Year of Renewable Energy: July 2019* (Online). Retrieved 13 November 2019, from <https://www.dede.go.th>.
- [2] Energy Regulatory Commission. (2019). *The database system of SPP/VSPP* (Online). Retrieved 13 November 2019, from <http://www.erc.or.th/ERCSP>.
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2018). *Thailand Power Development Plan 2018-2037 (PDP2018)*(Online). Retrieved 13 September 2019, from <http://www.eppo.go.th/power/PDP2018/PDP2018.pdf>.
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2015). *Thailand Power Development Plan 2015-2036 (PDP2015)*(Online). Retrieved 15 December 2015, from <http://www.eppo.go.th/power/PDP2015/PDP2015.pdf>.
- [5] Manomaiphiboon, K., Prabamroong, A., Chanaprasert, W., Rajpreeda, N., & Tung, P.T. (2010). *Wind resource assessment using advanced atmospheric modeling and GIS analysis: final report*. Bangkok: Thailand Research Fund.
- [6] Janjai, S., Masiri, I., Promsen, W., Pattarapanitchai, S., Pankaew, P., Laksanaboonsong, J., Bischoff-Gauss, I., & Kalthoff, N. (2014). Evaluation of wind energy potential over Thailand by using an atmospheric mesoscale model and a GIS approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, 1–10.
- [7] Waewsak, J., Landry, M., & Gagnon, Y. (2013). High resolution wind atlas for Nakhon Si Thammarat and Songkhla provinces, Thailand. *Renewable Energy*, 53, 101–110.
- [8] Chiwamongkhonkarn, S., Waewsak, J., & Chaichana, T. (2014). Wind Resource Potential at Pak Panang and Chian Yai Districts of Nakhon Si Thammarat Province. *Thaksin University Journal*, 17(1), 13–20.

- [9] Waewsak, J., Landry, M., & Gagnon, Y. (2015). Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand. *Renewable Energy*, 81, 609–626.
- [10] Chancham, C., Waewsak, J., & Gagnon, Y. (2017). Offshore wind resource assessment and wind power plant optimization in the Gulf of Thailand. *Energy*, 139, 706–731.

# การเปรียบเทียบและการประเมินแบบจำลองการจับ-จับใหม่ สำหรับการประมาณจำนวนผู้ที่มีความผิดปกติของการใช้โอปิออยด์ Model Comparison and Assessment for Closed Capture-recapture Models for Estimate Opioid Use Disorders

รัชฎาภรณ์ อึ้งเจริญ<sup>1</sup> ลีลี่ อิงศรีสว่าง<sup>1\*</sup> แมทธิว ลอว์<sup>2</sup>

Ratchadaporn Ungcharoen<sup>1</sup>, Lily Ingsrisawang<sup>1\*</sup> and Matthew Law<sup>2</sup>

## บทคัดย่อ

วิธีการจับ-จับใหม่ (Capture-recapture Methods: CRC) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการประมาณขนาดของประชากรที่ไม่ทราบขนาดซึ่งวิธีนี้ได้มีการประยุกต์ใช้ในการปรับข้อมูลทางระบาดวิทยา การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบตัวประมาณค่าของการจับ-จับใหม่ สำหรับการประมาณจำนวนผู้ที่มีความผิดปกติในการใช้โอปิออยด์ (OUD) โดยใช้ข้อมูล OUD ในปี 2014 ในรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย วิธี CRC ใช้ในการประมาณจำนวนผู้ที่มีความผิดปกติ OUD โดยใช้ข้อมูลจาก 3 แหล่ง ประกอบด้วย หอผู้ป่วย ห้องฉุกเฉิน และทะเบียนการตาย วิเคราะห์ข้อมูลด้วย Rcapture โมเดลที่นำมาใช้สำหรับการเปรียบเทียบสำหรับการประมาณค่าจำนวนผู้ป่วย OUD ได้แก่  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_h$  และ  $M_\phi$  และใช้เกณฑ์ AIC สำหรับการคัดเลือกโมเดลที่ดีที่สุด โดยใช้ข้อมูลจาก 3 แหล่ง ได้แก่ หอผู้ป่วย จำนวน 87 คน, ห้องฉุกเฉิน จำนวน 407 คน และ ทะเบียนการตาย จำนวน 15 คน และเมื่อจับคู่ข้อมูลที่ซ้ำกันทั้ง 3 แหล่งข้อมูลพบว่าจำนวน 54 คน ผลจากการประมาณค่าโดยใช้โมเดล ดังนี้ โมเดล  $M_0$  และ  $M_h$  Chao (LB) จำนวน 666 คน โมเดล  $M_1$  จำนวน 465 คน โมเดล  $M_h$  Poisson 2 จำนวน 433 คน โมเดล  $M_h$  Gamma 3.5 จำนวน 351 คน และโมเดล  $M_\phi$  จำนวน 503 คน โดยพบว่าโมเดล  $M_1$  มีค่า AIC น้อยที่สุด ( $AIC = 51.962$ ) ด้วยโมเดล  $M_1$  มีความเหมาะสม ในการประมาณจำนวนผู้ที่มีความผิดปกติในการใช้โอปิออยด์ โมเดลนี้ควรที่จะนำไปใช้กับการประมาณค่าอื่นที่มีบริบทที่คล้ายคลึงกันนี้ วิธีการประมาณนี้เป็นวิธีการที่ง่าย รวดเร็วสำหรับการประมาณค่าจำนวนผู้ที่มีความผิดปกติในการใช้โอปิออยด์

**คำสำคัญ:** วิธีการจับ-จับใหม่ การประมาณค่า ระบาดวิทยา โอปิออยด์

<sup>1</sup> นิสิตบัณฑิตศึกษา ปร.ค.(สถิติ) ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10903 ประเทศไทย

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10903 ประเทศไทย

<sup>2</sup> ศาสตราจารย์ และหัวหน้าหน่วยชีวสถิติ และฐานข้อมูล มหาวิทยาลัยนิวเซาท์เวลส์ 2052 ประเทศออสเตรเลีย

<sup>1</sup> Graduate Student, Ph.D.(Statistics), Department of Statistics, Department of Statistics, Faculty of Sciences, Kasetsart University, Bangkok, 10903, Thailand

<sup>1</sup> Asst. Prof., Department of Statistics, Faculty of Sciences, Kasetsart University, Bangkok, 10903, Thailand

<sup>2</sup> Prof., Head of Biostatistics and Databases Program, University of New South Wales, New South Wales, 2052, Australia

\* Corresponding author: E-mail address: ingsri.lily@gmail.com

(Received: January 31, 2020; Revised: March 16, 2020; Accepted: March 30, 2020)

## Abstract

A popular method for dealing with an unknown population size is the capture-recapture method (CRC). Then capture-recapture models were applied in the adjustment of epidemiology data. The aim of study was to compare the estimator of capture-recapture models in the closed population for estimation the number of opioid use disorders (OUD). The data of opioid use disorders in 2014, in New South Wales, Australia. The CRC was use to estimate the number of OUD cases based on three data sources, including patient department, emergency department, and national death index. The data were analyzed using the Rcapture package. The model used  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_h$ , and  $M_b$  to compare the assessment of OUD data. The minimum Akaike's Information Criterion (AIC) value was used to select the best model. The three data sources were: 87 patients at the Patient Department, 407 cases from Emergency Department, and 15 cases from the National Death Index. The overlapping of the three data sources involved 54 cases. The results showed that the estimates obtained were 666 cases from  $M_0$  model and  $M_h$  Chao (LB), 465 cases from  $M_1$  model, 433 cases from  $M_h$  Poisson 2, 351 cases from  $M_h$  Gamma 3.5 and 503 cases from  $M_b$  model. The smallest AIC was obtained for the  $M_1$  model (AIC = 51.962). With the  $M_1$  model more suitable for OUD were estimated. This model should be able to apply to any setting with similar context. The method provided a simple, quick method to estimate the numbers of OUD.

**Keywords:** Capture-recapture, Estimation, Epidemiology, Opioid

## Introduction

A popular method for dealing with an unknown population size is the capture-recapture method, which was developed to estimate the number of wild animals in a population [1]. The method was then extended to other fields including software testing [2], epidemiology and public health [3-4]. This method is being increasingly used to estimate the number of people with a given disease including the completeness of cancer registries [5], homeless people [6], human immunodeficiency virus-positive population [7-8], HIV-infected injection drug users in Bangkok [9], and the number of drug users in Bangkok in 2001 [10-11]. The closed capture-recapture method is one variety of this model that includes dependence among samples and can take the form of an ecological model, a log-linear model, and a sample-coverage model [12].

Log-linear models are popular for the estimation of unknown populations size in epidemiology and public health data. The most general log-linear model was presented by Fienberg [13]. Generally, epidemiological and health data apply a log-linear model for the estimation of the unknown population [14-16]. The interaction between sources reduces the dependence between sources. These are not considered to be sources of variation but do reduce the dependence between sources when using interaction terms. In an ecological model this allows relaxation of the assumption of equal probability of capture [17-18].

Log-linear ecological models can be in the form  $M_{tbh}$  (time varying, behavioral response and heterogeneity model) or one of its sub-forms depending on interpretation and context [19]. The approach may specify various forms of capture probabilities based on empirical investigations of animal ecology. These models relax the equal catchability assumptions [12,17].

The current study estimated the total number of opioid use disorders based on sources of variation models using data from the National Drug and Alcohol Research Centre (NDARC), University of New South Wales, Australia. The model combined up to three sources of variation among capture probabilities:  $M_t$  (time varying),  $M_b$  (behavioral response), and  $M_h$  (heterogeneity)[17, 20-21]. A useful structure for models has been introduced by Otis et al. [21].

The current study used ecological models for comparison among models of sources of variation for the assessment of the number of unknown Opioid Use Disorders (OUD) who had not registered using any of the three incomplete registries. The data of opioid use disorders in 2014, in New South Wales, Australia is retrieved from NDARC. The aim of study was to compare the estimator of capture-recapture models in the closed population for estimation the number of OUD.

## Methods

### Data for Analysis

The number of OUD was estimated using capture-recapture methodology based on three data sources (patient department, emergency department and the national death index in New South Wales, Australia 2014). The data were matched using the NDARC then arranged as shown in Table 1.

**Table 1** Distribution of cases by combination of three data sources in 2014, New South Wales, Australia.

| Sources            |                      |                      | Number of Observations |
|--------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Patient Department | Emergency Department | National Death Index |                        |
| 0                  | 0                    | 0                    | Unknown Cases          |
| 1                  | 0                    | 0                    | 87                     |
| 0                  | 1                    | 0                    | 407                    |
| 0                  | 0                    | 1                    | 15                     |
| 1                  | 1                    | 0                    | 657                    |
| 1                  | 0                    | 1                    | 0                      |
| 0                  | 1                    | 1                    | 11                     |
| 1                  | 1                    | 1                    | 54                     |

**Sources:** The National Drug and Alcohol Research Centre (NDARC), University of New South Wales, Australia

### Statistical Analysis

Capture-recapture models for closed populations were developed as useful classifications based on an observation model. The basic models of no heterogeneity were  $M_0$  (no variation),  $M_t$ ,  $M_b$ , and  $M_h$ . The classification models are a useful way of structuring capture-recapture models for closed populations in which the assumption of equal probability of capture is released [17-18]. These models were generalized by Otis *et al.* [21] to accommodate three types of heterogeneity in capture probability. Table 2 shows the

model of variation among the capture probabilities: a temporal effect, heterogeneity between units and a behavioral effect. A temporal effect causes the capture probabilities to vary among capture occasions; heterogeneity causes the capture probabilities to vary among units. A behavioral effect means that the first capture changes the behavior of a unit, so the capture probability differs before and after the first capture.

**Table 2** Summary of capture-recapture models for inspections.

| Model | Assumptions on Detectability                  | Estimators                                                        |
|-------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $M_0$ | No variation exists.                          | $M_0$                                                             |
| $M_t$ | Allows capture probabilities to vary by time. | $M_t$                                                             |
| $M_h$ | Allows heterogeneous capture probabilities.   | $M_h$ Chao<br>$M_h$ Poisson 2<br>$M_h$ Darroch<br>$M_h$ Gamma 3.5 |
| $M_b$ | Allows behavioral responses to capture.       | $M_b$                                                             |

The models were: 1)  $M_0$  which had one capture probability that was constant across individual and time; 2)  $M_t$  where the capture probability varied by sampling occasion only and all individuals in the population were equally catchable on any occasion and this model had a different capture probability for each sample occasion which was constant across individuals; and 3)  $M_b$  which had two capture probabilities:  $p$  if an individual has never been caught and  $c$  if an individual has been caught before, where this model allowed for the study to affect the behavior for the subjects and that if the capture process was a bad experience for the subject, we get a trap-shy response with  $p > c$ . Note that these responses can also be induced by the study design used. For example, if our sampling targets areas where subjects were previously caught, we are likely to observe a trap-happy response. Model  $M_h$  had a different capture probability for each individual in the population which was constant through time. The historically popular approach to estimate  $N$  for model  $M_h$  has been to use the non-parametric jackknife [22]. Model  $M_h$  assumed that each individual had its own unique probability that remained constant over samples. Chao's (or LB) models estimate a lower bound for the abundance ( $M_h$  Chao). The estimate obtained under  $M_h$  Chao is Chao's moment estimator [23]. Chao's lower bound models contain  $t-2$  parameters, called eta parameters, for the heterogeneity. These parameters should theoretically be greater or equal to zero. The degrees of freedom of Chao's model increase when eta parameters are set to zero. Models for heterogeneity were defined as: Poisson  $2(2^k-1)$ , Darroch:  $k^2/2$ , and Gamma  $3.5(-\log(3.5+k)+\log(3.5))$  [24], where  $k$  is the number of captures, Poisson and Gamma models with alternatives to the parameter defaults values of 2 and 3.5 can be fitted using the "colsedp" functions. Darroch's models for  $M_h$  was considered by Darroch [24-25].

The analyzed by capture-recapture methods to finding the best fitting model and estimating the OUD cases. The R program was used to find the number of OUD cases. The Rcapture package [26] was used to fit

a model to a closed population dataset. The smallest Akaike Information Criteria (AIC) and degrees of freedom are useful tools to compare models and to assess the goodness of their fit.

## Results

Table 1 shows the numbers of participants enrolled in 2014 for the dataset: Patient Department ( $n = 87$ ), Emergency Department ( $n = 407$ ), and National Death Index ( $n = 15$ ). The overlapping of the three data sources was 54 cases.

The results of the capture-recapture method are shown in Table 3. The smallest AIC model was  $M_t$ . The estimates of the total number of OUDs from the 465 cases based on the AIC value were in ascending order:  $M_h$  Poisson 2, 433 (SE = 53.0);  $M_h$  Gamma 3.5, 351 (SE = 16.8); and  $M_b$  model, 503 (SE = 51.4);  $M_h$  Chao(LB) model, 666 (SE = 52.8); and  $M_0$  model, 666 (SE = 52.8), respectively. The  $M_t$  model was the best estimated the number of OUD cases by using AIC.

**Table 3** Estimates of population size OUD cases in New South Wales, Australia 2014.

| Model           | $\hat{N}$ | SE   | Deviance | df | AIC     |
|-----------------|-----------|------|----------|----|---------|
| $M_0$           | 666       | 52.8 | 391.991  | 5  | 425.454 |
| $M_t$           | 465       | 26.8 | 14.500   | 3  | 51.962  |
| $M_h$ Chao (LB) | 666       | 52.8 | 391.991  | 5  | 425.454 |
| $M_h$ Poisson 2 | 433       | 53.0 | 383.205  | 4  | 418.668 |
| $M_h$ Darroch   | 372       | 33.8 | 383.205  | 4  | 418.668 |
| $M_h$ Gamma 3.5 | 351       | 16.8 | 383.205  | 4  | 418.668 |
| $M_b$           | 503       | 51.4 | 387.242  | 4  | 422.704 |

$\hat{N}$ : Number Estimates of OUD Cases, SE: Standard Error,

df: Degree of Freedom, AIC: Akaike Information Criterion

## Discussion and Conclusion

In the present study, we used three sources (patient department, emergency department, and the national death index in 2014), to compare the sources of variation in closed population models which used data form 2014 sourced from New South Wales, Australia. To the best of our knowledge, this has been the first study to apply capture-recapture analysis to estimate the number of OUD cases based on the sources of variation in closed population models. Moreover, the sources of variation were compared and the results from the best fitting model were determined based on the smallest AIC value.

The closed capture-recapture method is generally used to estimate hidden populations and commonly uses a log-linear regression model for estimation. In this study, we used an ecological model approach on the OUD data. Two commonly used forms have been proposed: the multiplicative (or log-linear) form and the logistic form [12]. The package Rcapture was used with Poisson regressions to estimate parameters in our capture-recapture models. A temporal effect causes the capture probabilities to vary among capture occasions, while heterogeneity causes the capture probabilities to vary among units. A behavioral effect indicates that the first capture changes the behavior of a unit, so the capture probability differs before and after the first capture. There are sources of variation in closed population models ( $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ). The AIC value was used for model selection with the smallest AIC being for the  $M_1$ ,  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ , and  $M_0$  models, respectively. The  $M_1$  model was estimated the population size OUD of 465 cases. The best fit the model was considered based on the smallest of AIC and the  $M_1$  model had the smallest of AIC [27]. With the  $M_1$  model more suitable OUD were estimated. This model should be able to apply to any setting with similar context. The method provided a simple, quick method to estimate the numbers of OUD.

Capture-recapture is a simple method to estimate the size of an unknown population size and is a useful and practical approach to estimate hard-to-reach populations, due to the assumptions and limitations of the method. In addition, ecological models are easy to use to provide an estimation of data sources. For estimation based on epidemiology data, the  $M_1$  model explained more than the other models as well as having the smallest AIC. Therefore, the  $M_1$  models are appropriate for estimation based on epidemiology or public health data. The recapture was easy to use and was appropriate for considering epidemiological data for the source effect or variation.

The limitation of this study was the three sources of data which we received based on linked data from the NDARC. Therefore, we focused the analysis on the overall population. The findings presented here show that the comparison of the sources of variation models and the number of unknown OUD cases. Although direct capture-recapture is used in few areas in New South Wales, datasets suitable for this purpose are likely to exist in most areas. Further studies of this nature would provide other sources of data with essential information and enable further exploration of OUD cases. Moreover, the data should be considered based on factors of individuals for analysis.

### Acknowledgements

This study was supported by Kasetsart University Chalermprakiet Sakon Nakhon Province Campus. We acknowledge the National Drug and Alcohol Research Centre, UNSW, Australia for the data and for management data and thank the data team from the Biostatistics and Data Bases Program, the Kirby Institute, UNSW.

## References

- [1] Seber, G. A. F. (1982). *The estimation of animal abundance: and related parameters* (2<sup>nd</sup> Ed.). London: C. Griffin & Co., Ltd.,
- [2]. Wohlin, C., Runeson, P., & Brantestam, J. (1995). An experimental evaluation of capture-recapture in software inspections. *Journal of Software: Testing, Verification and Reliability*, 5(4), 213–232. DOI:10.1002/stvr.4370050403.
- [3] Chao, A., Tsay, P. K., Lin, S. H., Shau, W. Y., & Chao, D. Y. (2001). The applications of capture-recapture models to epidemiological data. *Statistics in Medicine*, 20(20), 3123–3157.
- [4] Tsay, P.K., & Chao, A. (2001). Population size estimation for capture - recapture models with applications to epidemiological data. *Journal of Applied Statistics*, 28(1), 25–36.
- [5] Kim, D.-S., Lee, M.-S., Kim, D.-H., Bae, J.-M., Shins, M.-H., Lee, C.-M., . . . Ahn, Y.-O. (1999). Evaluation of the completeness of cancer case ascertainment in the Seoul male cohort study: application of the capture-recapture method. *Journal of Epidemiology*, 9(3), 146–154. DOI:10.2188/jea.9.146.
- [6] Coumans, A. M., Cruyff, M., Van der Heijden, P. G. M., Wolf, J., & Schmeets, H. J. S. I. R. (2017). Estimating homelessness in the Netherlands using a capture-recapture approach. *Social Indicators Research: An International and Interdisciplinary Journal for Quality-of-Life Measurement*, 130(1), 189–212. DOI:10.1007/s11205-015-1171-7.
- [7] Poorolajal, J., Haghdoust, A. A., Mahmoodi, M., Majdzadeh, R., Nasseri-Moghaddam, S., & Fotouhi, A. (2010). Capture-recapture method for assessing publication bias. *Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 15(2), 107–115.
- [8] Abeni, D. D., Brancato, G., & Perucci, C. A. (1994). Capture-recapture to estimate the size of the population with human immunodeficiency virus type 1 infection. *Epidemiology*, 5(4), 410–414.
- [9] Mastro, T. D., Kitayaporn, D., Weniger, B. G., Vanichseni, S., Laosunthorn, V., Uneklabh, T.,... Limpakarnjanarat, K. (1994). Estimating the number of HIV-infected injection drug users in Bangkok: a capture-recapture method. *American Journal of Public Health*, 84(7), 1094–1099.
- [10] Böhning, D., Suppawattanabodee, B., Kusolvisitkul, W., & Viwatwongkasem, C. (2004). Estimating the number of drug users in Bangkok 2001: A capture–recapture approach using repeated entries in one list. *European Journal of Epidemiology*, 19(12), 1075. DOI:10. 1007/s10654-004-3006-8.
- [11] Comiskey, C. M., & Barry, J. M. (2001). A capture recapture study of the prevalence and implications of opiate use in Dublin. *European Journal of Public Health*, 11(2), 198–200. DOI:10.1093/eurpub/11. 2.198.
- [12] Chao, A. (2001). An overview of closed capture-recapture models. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 6(2), 158–175.

- [13] Fienberg, S. E. (1972). The multiple recapture census for closed populations and incomplete 2k contingency tables. *Biometrika*, 59(3), 591–603. DOI:10.1093/biomet/59.3.591.
- [14] Braeye, T., Verheagen, J., Mignon, A., Flipse, W., Pierard, D., Huygen, K., . . . Hens, N. (2016). Capture-recapture estimators in epidemiology with applications to pertussis and pneumococcal invasive disease surveillance. *PLOS ONE*, 11(8), e0159832. DOI: 10.1371/journal.pone.0159832.
- [15] Van Hest, N. A. H., Grant, A. D., Smit, F., Story, A., & Richardus, J. H. (2008). Estimating infectious diseases incidence: validity of capture-recapture analysis and truncated models for incomplete count data. *Epidemiology and Infection*, 136(1), 14–22.
- [16] Choi, Y. H., & Comiskey, C. M. (2003). Methods for providing the first prevalence estimates of opiate use in Western Australia. *International Journal of Drug Policy*, 14(4), 297–305. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-3959\(03\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0955-3959(03)00080-X).
- [17] Pollock, K. H. (1974). *The assumption of equal catchability of animals in tag-recapture experiments*. Unpublished Ph.D. Dissertation, Cornell University.
- [18] Sutherland, J. M. (2003). *Multi-list methods in closed populations with stratified or incomplete information*. Ph.D. Dissertation, Simon Fraser University.
- [19] Kurtz, Z. T. (2014). *Local log-linear models for capture-recapture*. Ph.D. Dissertation, Carnegie Mellon University.
- [20] Chao, A., Tsay, P. K., Lin, S. H., Shau, W. Y., & Chao, D. Y. (2001b). The applications of capture-recapture models to epidemiological data. *Statistics in Medicine*, 20(20), 3123–3157. DOI: <https://doi.org/10.1002/sim.996>.
- [21] Otis, D. L., Burnham, K. P., White, G. C., & Anderson, D. R. (1978). Statistical inference from capture data on closed animal populations. *Wildlife Monographs*, (62), 3–135.
- [22] Burnham, K. P., & Overton, W. S. (1979). Robust estimation of population size when capture probabilities vary among animals. *Ecology*, 60(5), 927–936. DOI:10.2307/1936861.
- [23] Chao, A. (1987). Estimating the population size for capture-recapture data with unequal catchability. *Biometrics*, 43(4), 783–791.
- [24] Darroch, J. N., Fienberg, S. E., Gary, F. V. G., & Junker, B. W. (1993). A three-sample multiple-recapture approach to census population estimation with heterogeneous catchability. *Journal of the American Statistical Association*, 88(423), 1137–1148. DOI:10.2307/2290811.
- [25] Agresti, A. (1994). Simple capture-recapture models permitting unequal catchability and variable sampling effort. *Biometrics*, 50(2), 494–500. DOI:10.2307/2533391.
- [26] Baillargeon, S., & Rivest, L.-P. (2007). Rcapture: Loglinear models for capture-recapture in R. *Journal of Statistical Software*, 19(5), 1–31. DOI:10.18637/jss.v019.i05.
- [27] Johnson, J. B., & Omland, K. S. (2004). Model selection in ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(2), 101–108. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.10.013>.

## Appendix

The log-linear models for multiple capture-recapture experiments [26]

### Model $M_0$

$$\log(\mu_{\omega}) = \log(N) + X_1 \log(p) + (t - X_1) \log(1-p)$$

where  $\omega_j = 1$  if the unit is captured at the  $j^{\text{th}}$  occasion and, 0 if not  $j=1, \dots, t$

### Model $M_t$

$$\log(\mu_{\omega}) = X_0 \gamma + \sum_{j=1}^t X_j \beta_j$$

where  $p_j = 1$  is stand for that of occasion  $j$ , 0 if not and  $j=1, \dots, t$

$$\gamma = \log \left\{ N \prod (1-p_j) \right\}$$

$$\beta_j = \log \left\{ \log(p_j / (1-p_j)) \right\}, j=1, \dots, t.$$

### Model $M_b$

$$\log(\mu_{\omega}) = X_0 \log(N_p) + X_1 \log(1-p) + X_2 \left\{ \frac{\log c}{1-c} \right\} + (t - X_1 - 1) \log(1-c).$$

where  $c$  = nuisance parameter

$\mu_j$  = the number of units that are first caught at the  $j^{\text{th}}$  capture occasion.

$\mu_j; j=1, \dots, t$

**Note:** For more information, see [26]

### Model selection criteria

Akaike Information Criterion (AIC)

$$AIC = -2 \ln[(\hat{\theta}_p) | Y] + 2p$$

**Note:** For more information, see [27]

# การประดิษฐ์และสมบัติที่เกิดจากรอยสัมผัสข้อที่ระหว่างทองคำและ ท่อนาโนไททาเนีย

## The Fabrication and Properties of Schottky Contact between Au/TiO<sub>2</sub> Nanotubes Semiconductors

วัชรวิญา ไชยราช<sup>1\*</sup> อุดม ทิพราช<sup>2</sup> และ กี-ซอกอัน<sup>3</sup>

Watchareeya Chaiyarat<sup>1\*</sup>, Udom Tipparach<sup>2</sup> and Ki-Seok An<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับสมบัติที่เกิดจากรอยสัมผัสข้อที่ระหว่างโลหะทองคำและท่อนาโนไททาเนีย โครงสร้างจุลภาคและลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนไททาเนียได้ถูกศึกษาโดยวิธีการ XRD SEM และ XPS ชั้นบางๆ ของทองคำที่มีความหนาในระดับไมครอนได้ถูกเคลือบบนผิวของท่อนาโนไททาเนีย โดยวิธีการไอระเหยด้วยความร้อน หัววัดแบบสองขั้วถูกใช้วัดเพื่อยืนยันรอยสัมผัสข้อที่ที่เส้นกราฟความสัมพันธ์ลักษณะของกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถอธิบายสมบัติที่เกิดขึ้นโดยใช้แผนภาพทางโครงสร้างพลังงาน

**คำสำคัญ:** รอยสัมผัสข้อที่ที่ ความหนาของทองในระดับไมครอน ท่อนาโนไททาเนีย

### Abstract

This work aims to investigate the phenomena of Schottky barrier between Au/TiO<sub>2</sub> nanotubes. The microstructure and surface morphologies of TiO<sub>2</sub> nanotubes were characterized by XRD, SEM and XPS. Micro-layers of Au were deposited on TiO<sub>2</sub> nanotubes surface by thermal evaporation. The two electronic probes were employed to confirm Schottky contact barrier between Au/TiO<sub>2</sub> interface. The IV characteristic curves can be explained by the energy band diagram.

**Keywords:** Schottky Contact, Miro-layer of Au, TiO<sub>2</sub> Nanotubes

<sup>1</sup> นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190 ประเทศไทย

<sup>2</sup> ผศ.ดร., ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190 ประเทศไทย

<sup>3</sup> ดร., ศูนย์วิจัยวัสดุฟิล์มบาง สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเชิงเคมี เขตยูซอง เมืองแดจอน 34114 สาธารณรัฐเกาหลี

<sup>1</sup> Graduate Student, Program in Ph.D.(Physics), Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190 Thailand

<sup>2</sup> Asst. Prof. Dr., Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190 Thailand

<sup>3</sup> Dr., Thin Film Materials Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Yuseong Post Office Box 107, Daejeon 34114, Republic of Korea

\* Corresponding author: E-mail address: por\_chai@hotmail.com

(Received: April 1, 2020; Revised: April 17, 2020; Accepted: April 20, 2020)

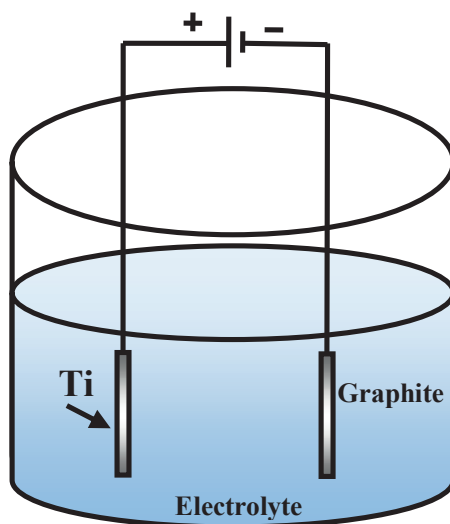
## Introduction

TiO<sub>2</sub> is one of the most studied semiconductors in material sciences because of its low cost, long-term stability, non-toxicity, and strong oxidizing power. TiO<sub>2</sub> is an n-type wide band gap semiconductor that can be absorbed UV light irradiation of wavelength about 315-400 nm. However, there are many restrictions to utilize bulk semiconductor as these photodevices because of the high manufactory cost, complicated processing step and photocorrosion. Especially, the bulk semiconductor material corrosions are occurred when they are exposed to light. This phenomenon results in poor chemical stability. Therefore, nanostructure materials with a wide band gap, TiO<sub>2</sub> nanotubes have great interest due easy fabrication, high photocatalytic activity, available abundant, high chemical stability, high surface-to-volume ratios and size dependent properties [1-3]. Therefore, TiO<sub>2</sub> nanotubes can be easily synthesized by anodization method. One of many applications of TiO<sub>2</sub> nanotubes is UV detector in Schottky barrier type. Schottky barrier can be formed if nanolayer metal deposited on semiconductor. Previous studies related to photodetective Titania nanotubes have mainly focused on the investigation of Titania as self-power UV detector [4]. However, the reported that explain the phenomena about occurring Schottky barrier between nanolayer metal deposited on TiO<sub>2</sub> nanotubes have not been published.

This paper is mainly focused on fabrication of Schottky barrier photodiodes on TiO<sub>2</sub> nanotubes surface. The low-cost anodization process was used to synthesize TiO<sub>2</sub> nanotubes. The Au layers were deposited on TiO<sub>2</sub> nanotubes surface by thermal evaporation. Electrical probes were employed to measure the electronic values. Also, the schematic physical diagrams to explain their mechanism were referred to the intra-band dynamic Au/TiO<sub>2</sub> nanotubes.

## Materials and Methodology

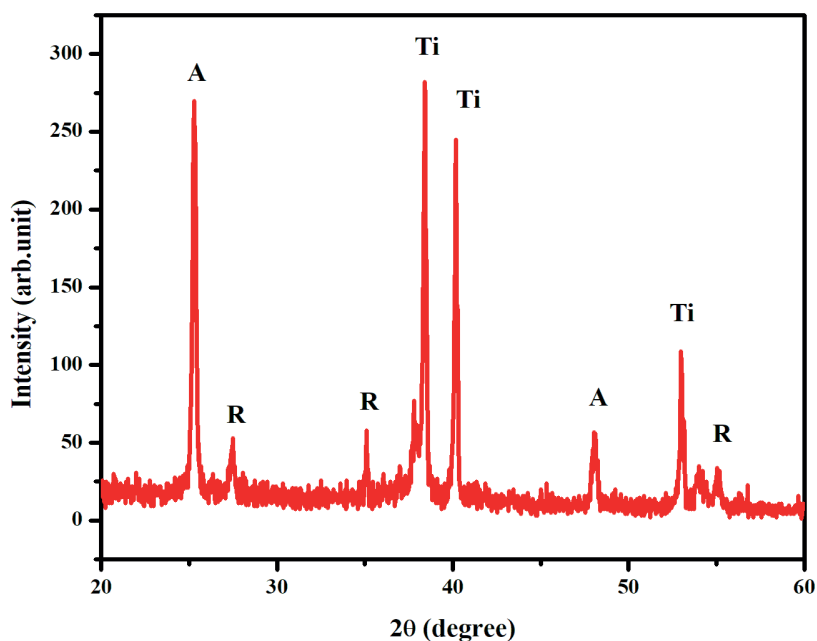
The 1.5x2.5 cm<sup>2</sup> pieces of Ti foils were used as substrates to form nanotubes in the anodization process. In the first step, these substrates were cleaned in acetone, ethanol and deionized water, respectively, for 15 min in ultrasonic bath. Ti piece was dried by N<sub>2</sub> gas flow. The setup of apparatus was showed in fig. 1. It was composed of two electrode such as Ti foil as anode and graphite sheet as cathode. The mixer solution of 0.3 wt% NH<sub>4</sub>F, 12% deionized water in ethylene glycol solvent was used as a chemical bridge solution between two electrodes. After anodization process, the substrate was annealed at 450 °C for 2 hr with applied temperature constant step at 3.75 °C / min to rearrange the amorphous to crystalline structure.



**Figure 1** An apparatus of anodization process.

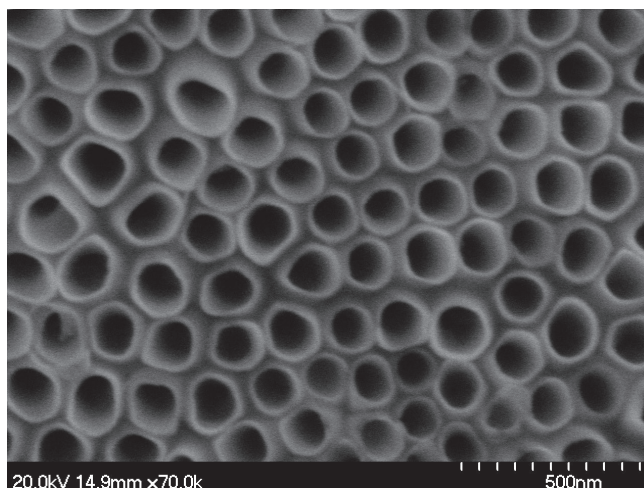
## Results and discussion

### 1. Morphology



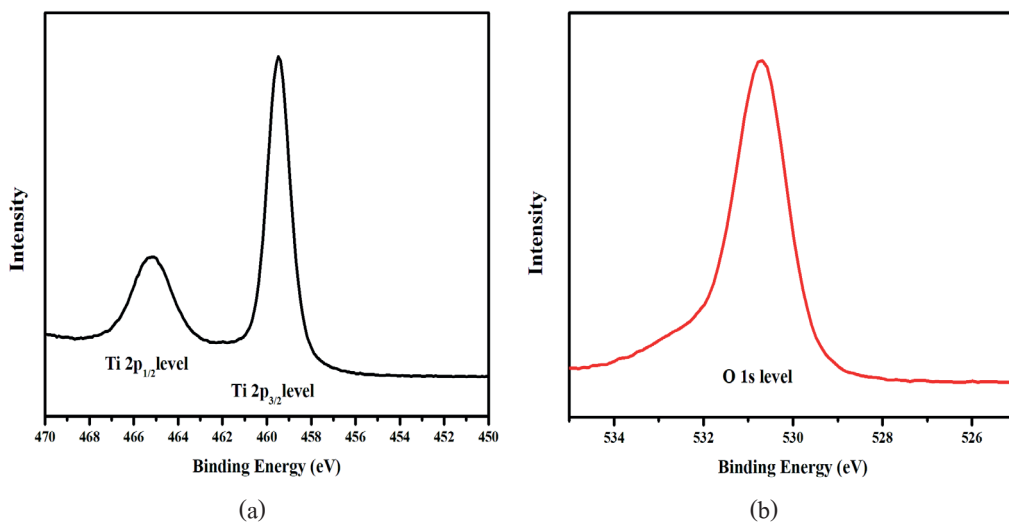
**Figure 2** XRD spectrum of  $\text{TiO}_2$  nanotubes after annealed at 450 °C.

In Fig. 2, the XRD spectrum of  $\text{TiO}_2$  nanotubes (450 °C) is shown. The XRD structure consists of the mixing of anatase ( $2\theta = 25.3^\circ$  and  $48^\circ$ ) and rutile ( $2\theta = 27.4^\circ$ ,  $35.1^\circ$  and  $53^\circ$ ) peaks. These results correspond with other works [5].



**Figure 3** SEM top-view image of  $\text{TiO}_2$  nanotubes after annealed at 450 °C.

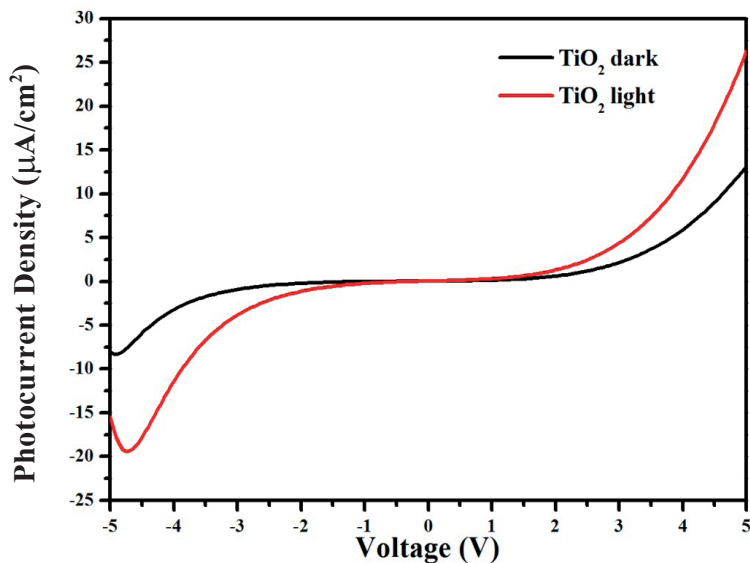
The top-views SEM images of  $\text{TiO}_2$  nanotubes after annealed with 450 °C are shown in Fig. 3. The highly ordered nanotubes are obtained with a diameter of 125 nm, wall thickness of 20 nm and tube length of about 2  $\mu\text{m}$ .



**Figure 4** XPS analysis of (a) Ti 2p level and (b) O 1s level.

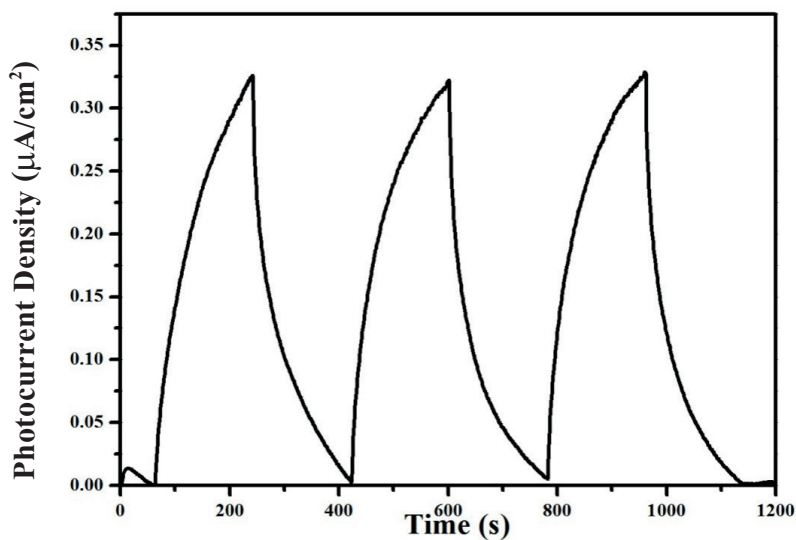
The presence of  $\text{TiO}_2$  nanotubes surface is confirmed by the Ti2p and O1s peaks as shown in Fig. 4(a), the spin-orbital splitting photoelectrons of  $\text{Ti}2p_{1/2}$  and  $\text{Ti}2p_{3/2}$  are located at binding energies of 465.20 and 459.47 eV, respectively. The separated peaks between the  $\text{Ti}2p_{1/2}$  and  $\text{Ti}2p_{3/2}$  level are of 5.73 eV. The O1s XPS spectra are shown in Fig. 4(b). The XPS data of  $\text{TiO}_2$  nanotubes are in good agreement with the previous reported literature values [6-7].

## 2. Electronic Properties



**Figure 5** Photocurrent versus voltage curves from applied voltage from -5 V to 5 V of Au/TiO<sub>2</sub> nanotubes.

The two electronic probes method under ambient air condition and room temperature was employed to obtain I-V data. In Fig. 5, at an applied voltage from -5 V to 5 V, the dark current changed from -8 μA to 13 μA while the photocurrent changed from -15 μA to 25 μA under 365 nm UV light. These show that the fabricated Schottky barrier between Au and TiO<sub>2</sub> nanotubes is occurred.



**Figure 6** Time-dependent photocurrent of Au/TiO<sub>2</sub> nanotubes.

The time response photocurrent densities measured under biased voltage 1 V of Au/TiO<sub>2</sub> nanotubes is shown in Fig. 6. It indicates that the time response photocurrent densities are exhibited good stability and periodic repeat. In order to focus on the photocurrent, the dark current was set at 0. The irradiation light source (VL-4 LC 4 W) with power density of 350 μW/cm<sup>2</sup> at wavelength of 365 nm was used. The performance of photosensitive device was determined by two parameters: spectral responsivity (R<sub>s</sub>) and external quantum efficiency (EQE) that can be expressed by [8]:

$$R_s = \frac{I_{ph}}{P_0 \cdot S}, \quad (1)$$

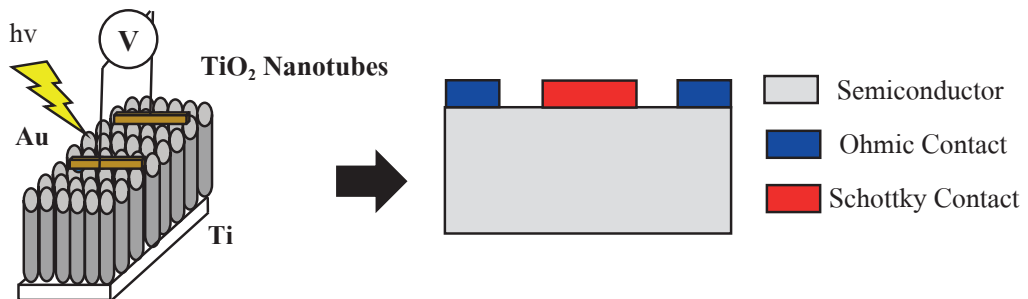
where I<sub>ph</sub> is the difference between illuminated current and dark current I<sub>ph</sub> = I<sub>illuminated</sub> - I<sub>dark</sub>, P<sub>0</sub> is the light power density irradiated on devices, and S is the area of devices.

$$EQE = \frac{R_s \cdot hc}{e\lambda}, \quad (2)$$

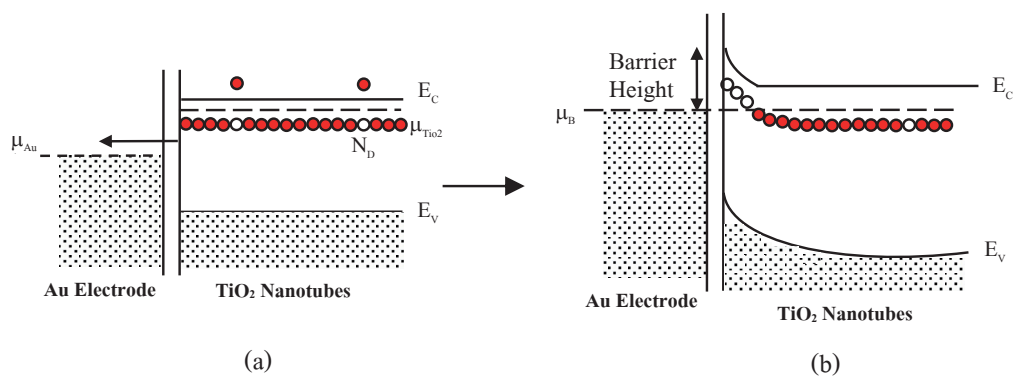
where h represents the Planck's constant, c stands for the velocity of light, e is the electronic charge and λ is the wavelength of the irradiation light.

The illuminated photocurrent density, spectral responsivity (R<sub>s</sub>) and external quantum efficiency (EQE) values are 0.94 mA/W. and 0.0032, respectively.

In Fig. 7., the model of Au/TiO<sub>2</sub> surface are shown. It is one of many types of photodetector called Schottky barrier type UV detector [9]. It is composed of two ohmic contact form from Au deposited on TiO<sub>2</sub> nanotubes then Schottky contact occurred between them. These phenomena can be explained by the inter-band dynamic between Au and TiO<sub>2</sub> nanotubes in Fig. 8(a) and Fig. 8(b).



**Figure 7** The model of Au/TiO<sub>2</sub> nanotubes showing Schottky barrier.



**Figure 8** The energy diagram carrier transport mechanisms of Au electrode and TiO<sub>2</sub> nanotubes interface.

TiO<sub>2</sub> nanotubes is n-type semiconductor. The work function of TiO<sub>2</sub> nanotubes is about 4.70 eV [10] while the work function of Au is about 5.40 eV [11]. Therefore, work function value of Au metal is more than work function value of TiO<sub>2</sub> nanotubes resulting in the band edge alignment between Au metal and TiO<sub>2</sub> nanotube surfaces [12]. In Fig. 8 (a), the chemical potential ( $\mu_{TiO_2}$ ) of TiO<sub>2</sub> nanotubes is between the donor state ( $N_D$ ) and the conduction band edge ( $E_C$ ). They will initially have different chemical potential. On contact charge, electrons will flow from TiO<sub>2</sub> nanotubes to Au metal achieve equilibrium as shown in Fig. 8 (b). These create a region of unbalance positive charge at TiO<sub>2</sub> interface giving rise to band bending. If a positive voltage is applied to Au metal surface in Fig. with respect to TiO<sub>2</sub> nanotube surfaces, the band edge profile in the vicinity of surface gate will be decreasingly bent upward as more as negative charge is attract to Au metal surface gate, filling donor states. This phenomenon contributes to I-V curve from electronic probe measurement.

## Conclusions

Schottky barrier can be fabricated by depositing Au on TiO<sub>2</sub> nanotubes surface. These can be confirmed by the two electronic probes. The photocurrent graph in I-V curve increase under 365 nm UV light irradiation. The calculated spectral responsivity and external quantum efficiency from time-dependent photocurrent graph of Au/TiO<sub>2</sub> nanotubes are 0.94 mA/W and 0.0032, respectively.

## Acknowledgments

This paper is a part of W. Chaiyarat's doctoral thesis at Physics Department, Ubon Ratchathani University. One of the authors, W. Chaiyarat, would like to thank the Human Resource Development in Science Project (Science Achievement Scholarship of Thailand, SAST) for financial support. We acknowledge the Korea Institute Chemical and Technology (KRICT) for research facility supports.

## References

- [1] Mor, G. K., Carvalho, M. A., Varghese, O. K., Pishko, M. V., & Grimes, C. A. (2004). A room-temperature  $\text{TiO}_2$ -nanotube hydrogen sensor able to self-clean photoactively from environmental contamination. *Journal of Materials Research*, 19(2), 628–634.
- [2] Varghese, O. K., Mor, G. K., Paulose, M., & Grimes, C. A. (2004). A Titania nanotube-array room-temperature sensor for selective detection of low hydrogen concentrations. *MRS Proceedings*, 828. A3.1/K4.1. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-828-A3.1/K4.1>.
- [3] Paulose, M., Varghese, O. K., Mor, G. K., Grimes, C. A., & Ong, K. G. (2006). Unprecedented ultra-high hydrogen gas sensitivity in undoped titania nanotubes. *Nanotechnology*, 17(2), 398–402.
- [4] Xie, Y., Huang, H., Yang, W., & Wu, Z. (2011). Low dark current metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on sol-gel-derived  $\text{TiO}_2$  films. *Journal of Applied Physics*, 109(2), 023114.
- [5] Su, Y., Han, S., Zhang, X., Chen, X., & Lei, L. (2008). Preparation and visible-light-driven photoelectrocatalytic properties of boron-doped  $\text{TiO}_2$  nanotubes. *Materials Chemistry and Physics*, 110(2-3), 239–246.
- [6] Erdem, B., Hunsicker, R. A., Simmons, G. W., Sudol, E. D., Dimonie, V. L., & El-Aasser, M. S. (2001). XPS and FTIR surface characterization of  $\text{TiO}_2$  particles used in polymer encapsulation. *Langmuir*, 17(9), 2664–2669.
- [7] Zhu, J., Chen, F., Zhang, J., Chen, H., & Anpo, M. (2006).  $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{TiO}_2$  photocatalysts prepared by combining sol-gel method with hydrothermal treatment and their characterization. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 180(1-2), 196–204.
- [8] Li, L., Wu, P., Fang, X., Zhai, T., Dai, L., Liao, M., ... Golberg, D. (2010). Single-crystalline CdS nanobelts for excellent field-emitters and ultrahigh quantum-efficiency photodetectors. *Advanced Materials*, 22(29), 3161–3165.
- [9] Monroy, E., Omnes, F., & Calle, F. (2003). Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors. *Semiconductor Science and Technology*, 18(4), R33–R51.
- [10] Kashiwaya, S., Morasch, J., Streibel, V., Toupance, T., Jaegermann, W., & Klein, A. (2018). The work function of  $\text{TiO}_2$ . *Surfaces*, 1(1), 73–89.
- [11] Uda, M., Nakamura, A., Yamamoto, T., & Fujimoto, Y. (1998). Work function of polycrystalline Ag, Au and Al. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 88-91, 643–648.
- [12] Pierret, R. F. (1996). *Semiconductor Device Fundamentals* (2<sup>nd</sup> Ed). Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co.

# ระบบการสร้างเส้นทางท่องเที่ยวชุมชนจากข้อมูล Geolocation ตามมาตรฐาน Google Maps Local Tourism Routes from Geolocation Data using Google Maps Platform

อระยา สุขนิตย์<sup>1\*</sup> และสุรสิทธิ สักดา<sup>1</sup>

Oraya Sooknit<sup>1\*</sup> and Surasit Sakda<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเส้นทางท่องเที่ยวของแหล่งท่องเที่ยวชุมชน โดยเลือกชุมชนต้นแบบคือ อ.ขอนอม จ.นครศรีธรรมราช โดยการเลือกประเภทที่ท่องเที่ยวตามความต้องการและจุดเริ่มต้นของเส้นทางจากที่ตั้งของผู้ใช้ การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของผู้ใช้จากกลุ่มเป้าหมายที่ใช้ในการวิจัยมี 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มสถานประกอบการที่ต้องการแนะนำสถานที่ท่องเที่ยว ที่พัก ร้านอาหาร หรือร้านขายของที่ระลึกของตนเองให้เป็นที่รู้จักสำหรับนักท่องเที่ยวรวม 60 รายการ และ 2) กลุ่มของนักท่องเที่ยวที่ต้องการทราบข้อมูลท่องเที่ยวของชุมชนซึ่งอาจยังไม่เป็นที่รู้จักมากนักโดยนำมาตรฐานของ Google Maps มาใช้ในการกำหนดพิกัดและแสดงพิกัดบนแผนที่ด้วยสูตร Haversine ร่วมกับฐานข้อมูล MySQL พัฒนาด้วยโปรแกรมภาษา PHP เพื่อสร้างเป็นลำดับเส้นทางท่องเที่ยว ผลการวิจัยพบว่า ระบบสารสนเทศที่พัฒนาสามารถกำหนดเส้นทางท่องเที่ยวให้กับนักท่องเที่ยวเพื่อช่วยสนับสนุนข้อมูลและวางแผนการท่องเที่ยวให้กับนักท่องเที่ยวได้ โดยวัดระดับความพึงพอใจด้วยข้อกำหนดของการทดสอบระบบสารสนเทศมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ที่ 4.82 อยู่ในระดับมากที่สุด การนำระบบสารสนเทศนี้มาใช้ในการอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวส่งผลให้นักท่องเที่ยวต่างถิ่นสามารถเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวของชุมชนได้มากขึ้น

**คำสำคัญ:** ภูเก็ตแมพ ภูเก็ตเอพีไอ สูตรคำนวณระยะทาง การระบุพิกัด เส้นทางท่องเที่ยว

## Abstract

This study aims to develop an interactive tourism information system offering personalized tourism routes in Kanhom district, Nakhon Si Thammarat province. The options of tourism varieties depend on the requirements and the starting points from users. Data were collected from two groups of participants: 1) 60 tourism-related enterprises which want to promote a particular tourist attraction, accommodation,

<sup>1</sup> อ., สาขาเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นครศรีธรรมราช 80110

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Technology, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat 80110

\* Corresponding author : Tel.: 062-0953149, E-mail address : oraya.s@rmutsv.ac.th.

(Received: March 31, 2020; Revised: April 17, 2020; Accepted: April 20, 2020)

restaurants and souvenir shops, and 2) a group of tourists who need information of new local tourist attractions. Google Maps Platform was used to define geolocation and mark points in the map by Haversine formula with MySQL database and PHP programming to generate a series of travel routes. The research results revealed that the developed application has an ability to generate travel routes and help the tourists to plan their routes to the target tourist attractions. The users of the information system showed a very high level of satisfaction at 4.82 towards the developed application. The access to this application in tourism industry can increase the numbers of other locality tourists in new tourist attractions in local place.

**Keywords:** Google Maps, Google API, Haversine, Geolocation, Travel Route

## บทนำ

อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวเป็นส่วนสำคัญที่อยู่ในแผนยุทธศาสตร์ชาติ และในกรอบพัฒนาประเทศระยะยาว 2561-2580 มีเป้าหมายที่กำหนดไว้ คือ การเป็นจุดหมายปลายทางการท่องเที่ยวระดับโลก หรือเป็นแม่เหล็กการท่องเที่ยวระดับโลก โดยแนวคิดเศรษฐกิจสร้างสรรค์ [1]

การให้บริการข้อมูลการท่องเที่ยวที่มีอยู่ปัจจุบันเป็นเพียงการให้ข้อมูลเพื่อประกอบการพิจารณาในการท่องเที่ยวสำหรับคนทั่วไป ไม่เฉพาะเจาะจง โดยปัญหาของการท่องเที่ยวคือ ไม่สามารถบริหารจัดการเวลาได้ทำให้เสียเวลากับการค้นหาเส้นทางและพลาตในสถานที่ท่องเที่ยวสำคัญหรือสถานที่ท่องเที่ยวของชุมชนซึ่งยังไม่เป็นที่รู้จักมากนัก การนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาช่วยเป็นการยกระดับรูปแบบการท่องเที่ยวและนำเทคโนโลยีที่มีอยู่มาใช้ได้อย่างคุ้มค่า โดยการร่วมมือของสถานประกอบการขนาดเล็กในชุมชนให้หันมาศึกษาการใช้เทคโนโลยี โดยการระบุพิกัดสถานที่ท่องเที่ยวของตนเก็บเป็นข้อมูล Geolocation เพื่อให้ข้อมูลนั้นแสดงเป็นเส้นทางท่องเที่ยวแนะนำให้กับนักท่องเที่ยวเป็นรายบุคคล ด้วยการนำสูตร Haversine ในการคำนวณระยะทางจากตำแหน่งพิกัดเพื่อสร้างเป็นเส้นทางท่องเที่ยวของตนเองและทำให้นักท่องเที่ยวสามารถเข้าถึงสถานที่ท่องเที่ยวของชุมชนได้มากยิ่งขึ้นทำให้ชุมชนเกิดความเข้มแข็งพึ่งพาตนเองได้

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนรูปแบบการพัฒนาเส้นทางท่องเที่ยวที่เกี่ยวข้อง ได้มีการศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ที่ใกล้เคียงกัน โดยการนำเทคโนโลยีระบุพิกัดด้วย Geolocation ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเดียวกันกับ Google Search Engine ที่ค้นหาข้อมูลในรูปแบบแผนที่ [2] การวิเคราะห์เลือกเส้นทางที่เหมาะสมจะใช้ปัจจัยในการวิเคราะห์รวมกับการวิเคราะห์หาเส้นทางที่ดีที่สุด (Best Routing) ซึ่งเป็นฟังก์ชันในการวิเคราะห์ของ Network Analysis เพื่อหาเส้นทางเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังจุดหมายปลายทาง โดยมีผลลัพธ์เป็นระยะทางที่สั้นที่สุดหรือเป็นระยะเวลาที่น้อยที่สุด จากงานวิจัยการประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์เส้นทางท่องเที่ยว เขตพื้นที่ 12 เมือง ต้องห้าม...พลาต ในกลุ่มการท่องเที่ยวภาคกลาง [3] แสดงผลด้วย Google API ซึ่งการพัฒนาเว็บไซต์เพื่อช่วยให้แผนที่ Google Maps มีความน่าสนใจ สามารถสังเกตสถานที่สำคัญใกล้เคียงได้ง่าย [4] สอดคล้องกับนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ในด้านการบริการการท่องเที่ยวและพัฒนาโครงสร้างเพื่อเอื้อประโยชน์กับการท่องเที่ยว ด้านสารสนเทศให้ข้อมูลนำเสนอเส้นทาง ช่วยแก้ไขปัญหา

การเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยว เช่นเดียวกับแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม ส่งเสริม พัฒนาการท่องเที่ยวของ พระพุทธบาทบัวบก โดยการนำระบบสารสนเทศ Google Maps API ในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันให้มีความหลากหลายทำให้ผู้ใช้งานเว็บไซต์ได้เห็นภาพแผนที่ในมุมมองภาพกราฟิก [4] สำหรับเครื่องมือเกี่ยวกับแผนที่และพิกัดในหลายงานวิจัยได้นำเครื่องมือของ Google Maps มาใช้งาน [5] โดยในงานวิจัยเกี่ยวกับระบบติดตามและระบุตำแหน่งพิกัดของวัตถุได้นำสูตรที่ใช้ในการคำนวณระยะทางด้วย Haversine Formula [6] ซึ่งเป็นสมการที่สำคัญในการนำทางจุดสองจุดบนทรงกลมซึ่งก็คือพื้นผิวโลกจากละติจูดและลองจิจูด [7]

### การดำเนินการวิจัย

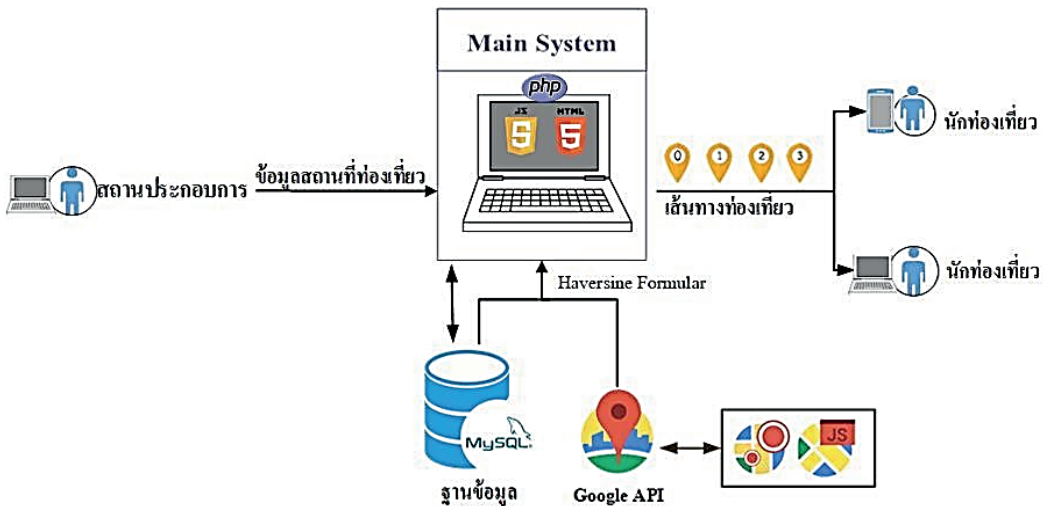
งานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีสารสนเทศมาช่วยเสริมสร้างประสิทธิภาพให้กิจกรรมการท่องเที่ยวแก่นักท่องเที่ยวเกิดขึ้นอย่างคุ้มค่าคุ้มค่า โดยได้มีรูปแบบการดำเนินการวิจัยในการพัฒนาระบบสารสนเทศจากการเก็บข้อมูลการท่องเที่ยว เกิดเป็นขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังนี้

**1. วิเคราะห์ความเป็นไปได้ (Requirement Analysis and Specification)** ได้ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลการท่องเที่ยวโดยใช้พื้นที่ต้นแบบสำหรับเก็บข้อมูลคือ อ.ชนอม จ.นครศรีธรรมราช พฤติกรรมการท่องเที่ยว รูปแบบการท่องเที่ยวที่นิยมในพื้นที่จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นด้วยแบบสอบถามแบบสำรวจรายการ (Check List) ในหัวข้อประเภทสถานที่ท่องเที่ยวที่ชอบในอ.ชนอม โดยแบบสอบถามใช้แบบตรวจสอบพิจารณาความเที่ยงตรงของเนื้อหาด้วย Index of Item-objective Congruence : IOC [8] จากกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยวจำนวน 30 คนด้วยวิธีการเลือกหน่วยตัวอย่างแบบโควตา (Quota Sampling) [9] โดยได้จำแนกตามความนิยมของกลุ่มนักท่องเที่ยวจำนวน 4 รูปแบบ จากทั้งหมด 13 รูปแบบ [10] ซึ่งเลือกจากรูปแบบการท่องเที่ยวที่ได้รับความนิยมในพื้นที่มากกว่าร้อยละ 80 สรุปข้อมูลดังนี้

1.1 รูปแบบการท่องเที่ยว อ.ชนอม ได้แก่ 1) การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม 2) การท่องเที่ยวทางทะเลและชายหาด 3) การท่องเที่ยวเชิงสิ่งแวดล้อมและนิเวศ และ 4) การท่องเที่ยวเชิงศาสนา

1.2 ข้อมูลสนับสนุนการท่องเที่ยว ได้แก่ 1) สถานที่ท่องเที่ยว 2) ร้านอาหาร 3) ที่พัก 4) ร้านขายของที่ระลึก

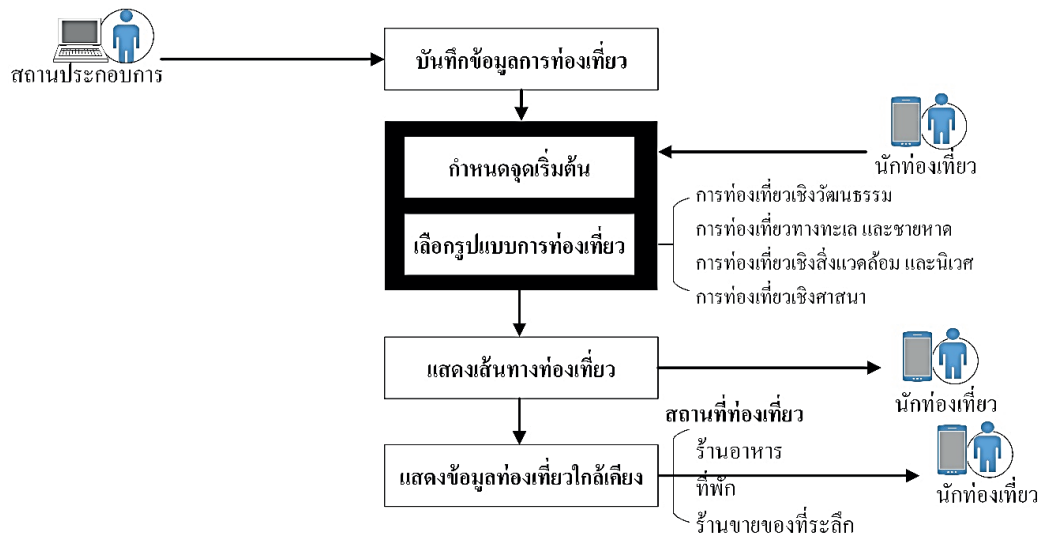
**2. ออกแบบระบบ (System Design)** จากการศึกษาความเป็นไปได้นักท่องเที่ยวสามารถนำมาใช้งานได้คือการพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันแบบ Responsive Web Design ซึ่งรองรับกับการใช้งานผ่านอุปกรณ์หลากหลายชนิด เช่น หน้าจอคอมพิวเตอร์ สมาร์ทโฟน โดยใช้ภาษา PHP ร่วมกับ HTML และ JavaScript เชื่อมต่อฐานข้อมูล MySQL เก็บข้อมูลการท่องเที่ยวและเชื่อมข้อมูลแผนที่การเดินทาง Google Maps ผ่านเส้นทางท่องเที่ยว ดังภาพที่ 1 โดยมีผู้เกี่ยวข้องกับระบบ ได้แก่ สถานประกอบการ และนักท่องเที่ยว โดยใช้ Data Flow Diagram ในการออกแบบการไหลของข้อมูล และ ER-diagram ในการออกแบบความสัมพันธ์ของข้อมูล



ภาพที่ 1 สถาปัตยกรรมของระบบ

**3. การพัฒนาและทดสอบระบบงานย่อย (Implementation and Unit Testing)** โดยในการพัฒนาระบบได้ออกแบบกระบวนการทำงานดังภาพที่ 2 ซึ่งมีผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบ 2 กลุ่ม คือ สถานประกอบการจะเป็นผู้บันทึกข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยว ที่พัก ร้านอาหารของตนเอง พร้อมทั้งข้อมูล Geolocation ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการระบุพิกัดละติจูด ลองจิจูด ที่ระบบได้ดึงมาจาก Google Maps API และบันทึกลงฐานข้อมูลเพื่อลดการเรียกใช้บริการจาก Google ในส่วนของนักท่องเที่ยวได้ระบุตำแหน่งเริ่มต้น และเลือกรูปแบบการท่องเที่ยวเพื่อให้ระบบแสดงเส้นทางท่องเที่ยวโดยคำนวณจากระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากจุดเริ่มต้น เรียงลำดับจุดแวะพักไปยังจุดที่ไกลที่สุด และแสดงเส้นทางนั้นบนแผนที่ พร้อมทั้งแสดงข้อมูล ที่พัก ร้านอาหาร ร้านขายของที่ระลึกใกล้เคียงในระยะไม่เกิน 10 กิโลเมตร โดย API ที่ใช้คือ Geocoding API และ Maps JavaScript API

3.1 กระบวนการทำงาน เริ่มต้นจากสถานประกอบการบันทึกข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยว ที่พัก ร้านอาหาร หรือร้านขายของที่ระลึกของตนเอง และส่วนของนักท่องเที่ยวกำหนดจุดเริ่มต้นในการเดินทาง พร้อมเลือกรูปแบบการท่องเที่ยว โดยระบบจะแสดงข้อมูลเส้นทางท่องเที่ยวให้นักท่องเที่ยวบนแผนที่ ดังแผนผังกระบวนการทำงานภาพที่ 2

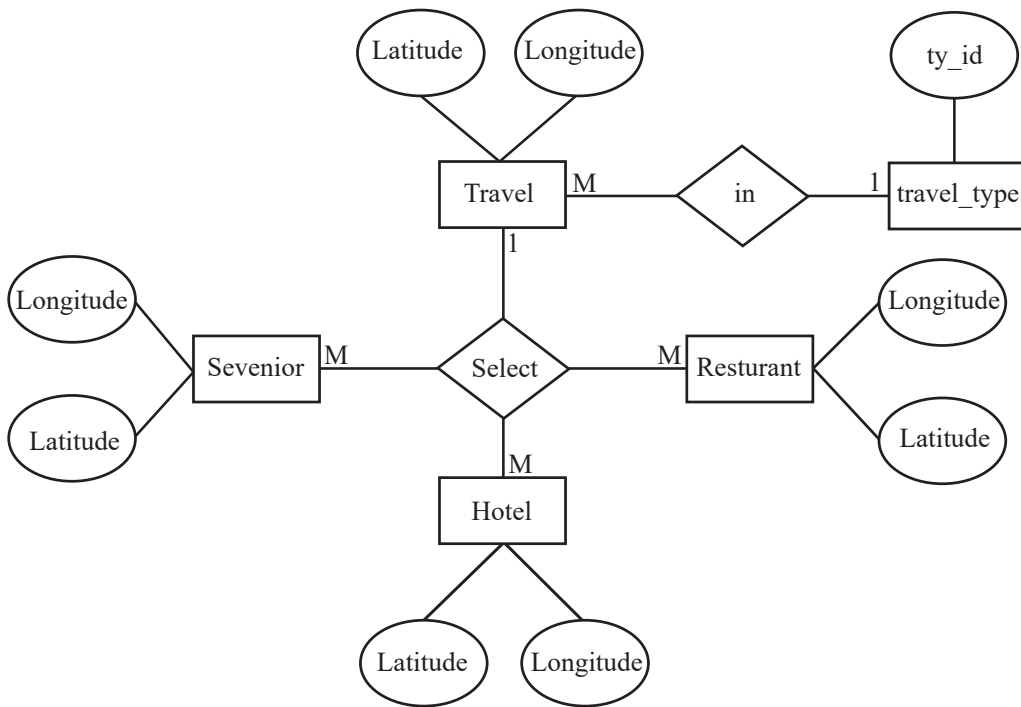


ภาพที่ 2 แผนผังกระบวนการทำงาน

3.2 การออกแบบความสัมพันธ์ของข้อมูล การออกแบบความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วย ER-diagram โดยข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันคือข้อมูล Travel คือสถานที่ท่องเที่ยว มีความสัมพันธ์กับข้อมูล travel\_type คือรูปแบบการท่องเที่ยวซึ่งสามารถกำหนดได้ตามความนิยมของแหล่งท่องเที่ยวแต่ละชุมชน โดยใน Travel , Hotel, Restaurant และ Souvenir จะมีการเก็บข้อมูลละจุด และลงจุดในทุกเรคคอร์ด รวมไปถึงข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นดังภาพที่ 3

4. ทดสอบการทำงานในภาพรวม กระบวนการทดสอบซอฟต์แวร์ 4 ขั้นตอน คือ 1) Unit Testing: 2) Integrate Testing 3) System Testing และ 4) Acceptance Testing [11]

5. ดำเนินงานและบำรุงรักษาระบบ นำระบบมาใช้งานจริงในเซิร์ฟเวอร์ Linux ด้วยภาษา PHP และฐานข้อมูล MySQL



ภาพที่ 3 ER-diagram

### การทดสอบและอภิปรายผล

จากการออกแบบและพัฒนาได้แสดงผลการดำเนินงานตามกระบวนการที่ได้ออกแบบไว้ ดังนี้

**1. บันทึกข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวและค่าละติจูด ลองจิจูด** เข้าสู่ระบบฐานข้อมูล โดยใช้ Geocoding API ในการแปลงที่อยู่เป็นพิกัดทางภูมิศาสตร์ในส่วนของละติจูดและลองจิจูดที่สอดคล้องกับสถานที่และบันทึกลงฐานข้อมูล โดยรวบรวมข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวจำนวน 25 แห่ง และแหล่งสนับสนุนการท่องเที่ยวจำนวน 35 แห่ง รวม 60 แห่ง โดยนำข้อมูลที่เป็นข้อมูลตัวอย่างมุ่งเน้นไปยังสถานที่ท่องเที่ยวที่มาจากชุมชนและสถานประกอบการขนาดเล็ก ให้สถานประกอบการเป็นผู้บันทึกข้อมูลด้วยตนเอง ดังภาพที่ 5(ก)

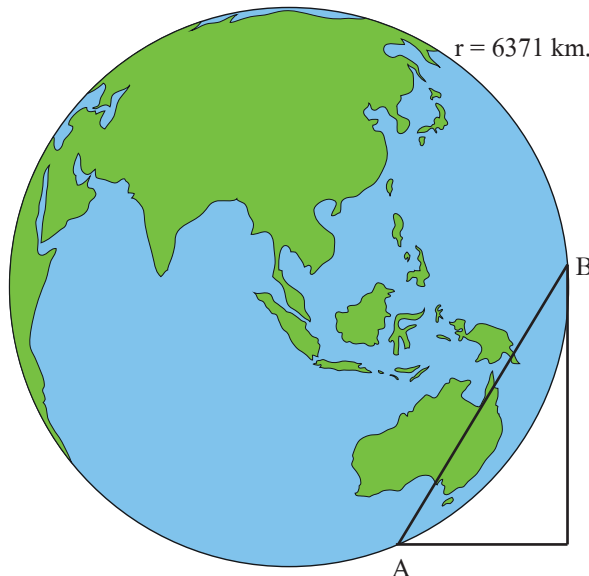
**2. เลือกจุดเริ่มต้นในการเดินทางและค้นหาประเภทของสถานที่ท่องเที่ยว** โดยเลือกจุดเริ่มต้นเพื่อระบุพิกัดดังภาพที่ 5(ข)

**3. คำนวณเส้นทางท่องเที่ยว** โดยดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลและคำนวณโดย Query กับข้อมูล Geolocation จากสูตร Haversine [7, 12] ซึ่งเป็นสมการในการหาระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดโดยใช้ละติจูด ลองจิจูดระหว่างจุด 2 จุดมาคำนวณระยะห่าง และใช้ร่วมกับกฎ Cosine [13] ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวด้านของรูปสามเหลี่ยมกับมุมหนึ่งในรูปสามเหลี่ยมนั้น ดังภาพที่ 4 และนำสูตรมาคำนวณกับ MySQL และเงื่อนไขในการค้นหา

$$\text{distance} = 2.R.\arcsin \left\{ \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\text{Lat}_1 - \text{Lat}_2}{2} \right) + \cos(\text{Lat}_1) \cdot \cos(\text{Lat}_2) \cdot \sin^2 \left( \frac{\text{Long}_1 - \text{Long}_2}{2} \right)} \right\} \quad (1)$$

### นำสูตร Haversine หาระยะทางด้วย MySQL

distance = 6371 \* acos( cos( radians(lat1) ) \* cos( radians(lat2) ) \* cos(radians(long2)-radians(long1)) +  
 sin(radians(lat1)) \* sin( radians(lat2) ) )



ภาพที่ 4 มุมและด้านบนพื้นผิวโลกที่ใช้คำนวณด้วยกฎ Cosine

ในการทำงานกับฐานข้อมูลจากตาราง Travel และ travel\_type ซึ่งค่า 6371 คือค่ารัศมีของโลกเฉลี่ย หน่วยเป็นกิโลเมตร [14] Acos(num) คือใช้หาค่ามุม Radian ของ Arc cosine ของ num ที่กำหนด Cos(x) คือ ให้ค่า Cosine ของ x เมื่อ x มีหน่วยเป็น Radians ซึ่งเป็นหน่วยวัดมุมชนิดหนึ่งบนระนาบสองมิติ ตัวแปร lat1, long1 คือ ค่าละติจูด ลองจิจูดของจุดเริ่มต้น ตัวอย่างตามภาพที่ 5(ข) โดยเรียงลำดับระยะทางที่คำนวณได้ใน distance แสดงจากน้อยไปหามาก ในภาพที่ 5(ค) แสดงเป็นเส้นทางจากจุดเริ่มต้นเรียงลำดับจากจุดที่ใกล้ที่สุดไปยังจุดที่ไกลที่สุดดังตารางที่ 1 การวัดความถูกต้อง (Accuracy) หมายถึงค่าที่ได้มานั้นวัดได้เท่ากับค่ามาตรฐานหรือใกล้เคียงโดย S เป็นค่ามาตรฐาน และ E เป็นค่าความคลาดเคลื่อน เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (MAPE) [15]

$$\text{Percentage Error} = \left| \frac{E-S}{S} \right| \times 100\% \quad (2)$$

S เป็นค่าปริมาณฟิสิกส์มาตรฐาน

E เป็นค่าปริมาณฟิสิกส์เดียวกับ S แต่ได้จากการทดลอง

$$\text{MAPE} = \frac{\sum |\text{Percentage Error}|}{n} \quad (3)$$

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

**ตารางที่ 1** ผลลัพธ์ระยะทางที่ได้จากการคำนวณจากจุดเริ่มต้นที่ค้นหา

| จุด                                 | ชื่อสถานที่        | ระยะทางจากสูตร | ระยะทางจาก Google | ความคลาดเคลื่อน |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|
| 1.                                  | ขนมเกรนจ์แคนยอน    | 95.00 กม.      | 105 กม.           | 9.52%           |
| 2.                                  | สวนน้ำโน           | 95.18 กม.      | 105 กม.           | 8.76%           |
| 3.                                  | สวนลู่วิญญูป่าฝ่อง | 95.19 กม.      | 104 กม.           | 8.47%           |
| 4.                                  | อ่าวเตล็ด          | 100.01 กม.     | 111 กม.           | 9.90%           |
| ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน |                    |                |                   | 9.16%           |

4. สร้างเส้นทางท่องเที่ยวด้วย Maps JavaScript API จากการลำดับเส้นทางท่องเที่ยวในภาพที่ 5(ค) และได้นำข้อมูลนั้นมาแสดงในแผนที่ในภาพที่ 5(ง) รวมไปถึงแสดงข้อมูลท่องเที่ยวอื่น ได้แก่ ที่พัก ร้านอาหาร และร้านขายของที่ระลึกในระยะไม่เกิน 10 กิโลเมตรของสถานที่ท่องเที่ยวในภาพที่ 5(จ)

5. ประเมินผลการใช้ระบบ ผู้วิจัยได้นำสารสนเทศที่ใช้รูปแบบการคำนวณระยะทางโดย Query ด้วยข้อมูล Geolocation เพื่อสร้างเส้นทางท่องเที่ยวด้วยเครื่องมือ Google Maps API ไปให้ผู้ใช้งานที่เป็นนักท่องเที่ยว จำนวน 30 คนในประเด็นของผู้ใช้ และทดสอบโดยนักวิจัยในประเด็นของระบบการทำงาน ผลการประเมินตามกระบวนการทดสอบระบบ 4 ด้าน คือ 1) ทำสอบระบบงานย่อย 2) การทำงานเชื่อมต่อของระบบ 3) ทดสอบภาพรวมของระบบ และ 4) การตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ และวัดความพึงพอใจแบบมาตราส่วน 5 ระดับ โดยผลการประเมินโดยรวม  $\bar{x} = 4.82$  ระดับความพอใจ มากที่สุด และค่า S.D. = 0.25 ในภาพที่ 6

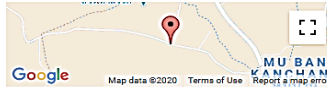
## เพิ่มสถานที่ท่องเที่ยว

สถานที่ท่องเที่ยวหรือกิจกรรมท่องเที่ยวในอำเภอขนอม

ค้นหาสถานที่

สวนน้ำโจ

ตรวจสอบ



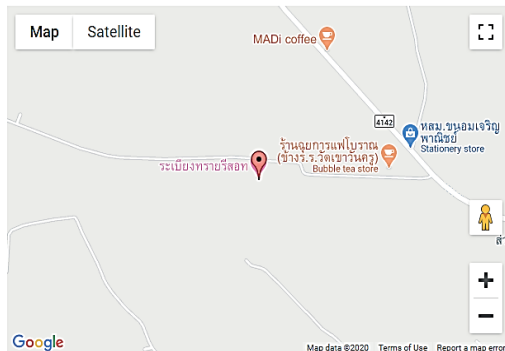
ละติจูด

9.262949500000000

ลองจิจูด

99.761868900000010

### (ก) บันทึกข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยว



จุดเริ่มต้น ละติจูด ลองจิจูด  
 อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช 9.211370000000001 99.790180000000007

#### เลือกประเภทกิจกรรมท่องเที่ยว

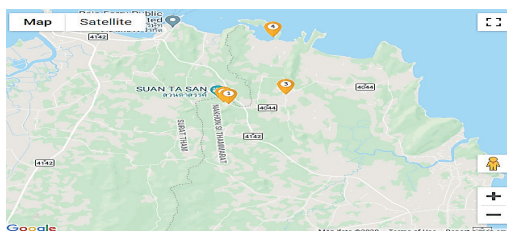
| เลือก                               | ประเภทสถานที่ท่องเที่ยว            |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | ท่องเที่ยวเชิงสิ่งแวดล้อม และนิเวศ |
| <input type="checkbox"/>            | ท่องเที่ยวทางศาสนา                 |
| <input type="checkbox"/>            | ท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม              |
| <input type="checkbox"/>            | ท่องเที่ยวทางทะเล ชายหาด           |
| <input type="button" value="ตกลง"/> |                                    |

เส้นทางท่องเที่ยวแนะนำจากจุดเริ่มต้น อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช

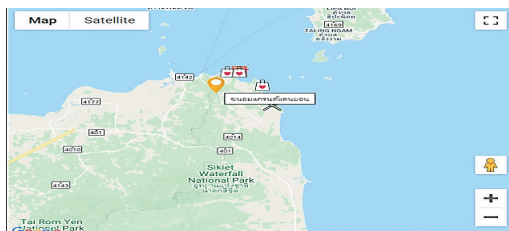
| ลำดับ | ระยะทาง    | เวลา           | ประเภทกิจกรรม                      |
|-------|------------|----------------|------------------------------------|
| 1     | 95.00 กม.  | เวลา 02:06 ชม. | ท่องเที่ยวเชิงสิ่งแวดล้อม และนิเวศ |
| 2     | 95.18 กม.  | เวลา 02:06 ชม. | ท่องเที่ยวเชิงสิ่งแวดล้อม และนิเวศ |
| 3     | 95.19 กม.  | เวลา 02:06 ชม. | ท่องเที่ยวเชิงสิ่งแวดล้อม และนิเวศ |
| 4     | 100.01 กม. | เวลา 02:13 ชม. | ท่องเที่ยวทางศาสนา                 |

กิจกรรมแนะนำ: พายเรือโดยมีค่าบริการชม. ละ 100 บาท มีที่จอดรถบริการฟรี มีบ้านพักชั่วคราวให้บริการหลังละ 100 บาท

### (ข) เลือกจุดเริ่มต้นและเลือกประเภทกิจกรรมท่องเที่ยว



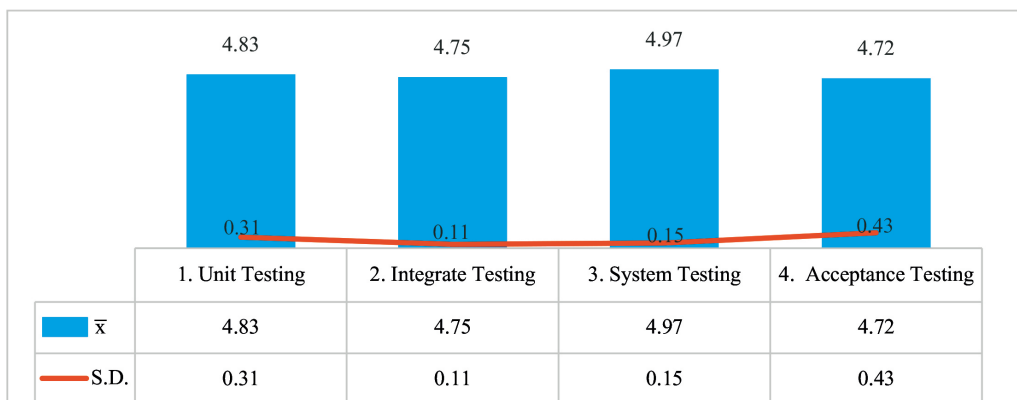
### (ค) กำหนดเส้นทางท่องเที่ยว



### (ง) กำหนดเส้นทางท่องเที่ยว

### (จ) แสดงแหล่งสนับสนุนใกล้เคียง ใน Google Map

### ภาพที่ 5 ผลการพัฒนาระบบ



ภาพที่ 6 ผลการประเมินการใช้งาน

### สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาสารสนเทศโดยการคำนวณระยะทางด้วยสูตร Haversine จากข้อมูล Geolocation ที่บันทึกไว้บนฐานข้อมูลเพื่อสร้างเส้นทางท่องเที่ยวด้วยมาตรฐาน Google Maps โดยรวบรวมข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวตัวอย่างเข้าสู่ระบบจำนวน 25 แหล่งและแหล่งสนับสนุนการท่องเที่ยวจำนวน 35 แหล่ง และรูปแบบการท่องเที่ยว 4 รูปแบบตามความนิยมของท้องถิ่น ใช้วิธีการคำนวณระยะทางจากการการบันทึกข้อมูล Geolocation จากสถาปัตยกรรม Google Maps และนำข้อมูลนั้นมาคำนวณระยะทางด้วยสูตร Haversine เพื่อสร้างเป็นเส้นทางสำหรับการเดินทางท่องเที่ยวของนักท่องเที่ยวโดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 9.16% และผลการทดสอบระบบโดยรวมอยู่ที่ 4.82 จากระดับคะแนนสูงสุด 5 ระบบสารสนเทศจะช่วยในการบริหารเวลาในการท่องเที่ยวได้อย่างคุ้มค่าไปสู่ต้นแบบสำหรับการท่องเที่ยวของชุมชนเพื่อสร้างความเข้มแข็งให้กับชุมชนท่องเที่ยวและพัฒนาศักยภาพของอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวต่อไปในวงกว้าง

### อภิปรายผล

ในส่วนของการสร้างเส้นทางท่องเที่ยวชุมชนจากข้อมูล Geolocation ได้ผลการประเมินการใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด และกระบวนการวิจัยสอดคล้องกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อการเดินทางท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานีผ่านระบบดาวเทียมบอกพิกัด [16] ซึ่งมีวิธีการคำนวณระยะทางที่ต่างกันโดยใช้สมการระยะห่างระหว่างข้อมูล 2 ชุดด้วยทฤษฎีระยะห่างของยูคลิด (Euclidean Distance) และการประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์เส้นทางท่องเที่ยวเขตพื้นที่ 12 เมืองต้องห้าม...พลาดในกลุ่มการท่องเที่ยวภาคกลาง [3] โดยใช้หลักการไดจ์สตรา (Dijkstra) คำนวณหาระยะทางสั้นที่สุดของกราฟหรือเส้นทางที่ไม่มีทิศทาง อย่างไรก็ตามในการคำนวณยังมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 9.16% จึงควรมีแนวทางเพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้นจากการคำนวณระยะทางจากเส้นทางเดินรถต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Suppasorn, Y. *Keep calm and look forward to 2019* (Online). Retrieved 25 February 2020, from <http://www.tatreviewmagazine.com/article/tourism-thailand-2562>.
- [2] Wladyka, K. D. (2017). Queries to Google search as predictors of migration flows from Latin America to Spain, *Journal of Population and Social Studies*, 25(4), 312–327.
- [3] Chaiyakarm, T. (2018). Application of geographic information system for choosing path by using network analyst for traveling in the central of Thailand, *Thai Science and Technology Journal*, 26(7), 1116–1129.
- [4] Phengsuk, T. (2018). The information development of the Buddha's footprint heritage tourism-route by the Google API. Case study: Bua-bok Buddha's footprint in Udon Thani, *Journal of Humanities and Social Sciences, Rajapruk University*, 4(2), 52–63.
- [5] Noimahawai, S., & Longpradit, P. (2016). Personalised location awareness application for Phetchaburi tourism with Google Map API on mobile with Android operating system, *Journal of Project in Computer Science and Information Technology*, 2(2), 49–57.
- [6] Chaiyaratamee, K., & Khunboa, C. (2010). Object tracking system using wireless sensor network in open area (Zigbee), In *The 11<sup>th</sup> Graduate Research Conference*. 461–467. February 12, 2010, Faculty of Engineering. Khon Kean: Khon Kaen University.
- [7] Anisya & Swara, G. Y. (2017). Implementation of haversine formula and best first search method in searching of tsunami evacuation route. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 97(1), 012004. DOI :10.1088/1755-1315/97/1/012004.
- [8] Tuntavanitch, P., & Jindasri, P. (2018). The real meaning of IOC. *Journal of Educational Measurement Mahasarakham University*, 24(2), 3–12.
- [9] Taherdoost, H. (2016). Sampling methods in research methodology; how to choose a sampling technique for research. *International Journal of Academic Research in Management (IJARM)*. 5(2), 18–27.
- [10] Office of the Board of Directors of the national tourism policy. (2017–2021). *Passed by the national tourism development* (2<sup>nd</sup> Edition). Bangkok: The Printing Office the War Veterans Organization.
- [11] Chauhan, R. K., & Singh, I. (2014). Latest research and development on software testing techniques and tools, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4(4), 2368–2372.
- [12] Gravelle, R. (2015). MySQL: calculating distance based on latitude and longitude (Online). Retrieved 28 February 2020, from [www.databasejournal.com](http://www.databasejournal.com).
- [13] SunflowerCosmos.org. (2007). *Earth* (Online). Retrieved 2 March 2020, from [http://www.sunflowercosmos.org/A00-05-solar\\_system\\_earth.html](http://www.sunflowercosmos.org/A00-05-solar_system_earth.html).

- [14] Mathwarehouse.com. (2020). *Law of sines and cosines how to determine which formular to use* (Online). Retrieved 2 March 2020, from <https://www.mathwarehouse.com/trigonometry/law-of-sines-and-cosines.php>.
- [15] Swanson, D. A., Tayman, J., & Bryan, T. M. (2011). MAPE-R: a rescaled measure of accuracy for cross-sectional subnational population forecasts. *Journal of Population Research*, 28(2-3), 225–243. DOI: 10.1007/s12546-011-9054-5.
- [16] Rakpakdee, K., Namwong, P., Rimthong, M., & Morachart, W. (2017). Decision support systems for travel Ubon Ratchathani tourism through global positioning system. *Journal of Research and Development Buriram Rajabhat University*, 12(2), 84–91.

# สวนยางพาราแบบวนเกษตรในระยะเปิดกรีดในจังหวัดพัทลุง ภาคใต้ของประเทศไทย

## Rubber Agroforestry Systems in Mature Plantations in Phatthalung Province, Southern Thailand

อุไรวรรณ ทองแกมแก้ว<sup>1\*</sup> อิริค ฟินอท<sup>2</sup> และเบญเนดิกซ์ แชมบูน<sup>3</sup>

Uraiwan Tongkaemkaew<sup>1\*</sup>, Eric Penot<sup>2</sup> and Benedicte Chambon<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

ระบบวนเกษตรสวนยางพารามีการศึกษาการจำแนกประเภทของพืชร่วมในระยะยางพาราเปิดกรีดไว้แตกต่างกันออกไป การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุและอธิบายประเภทของระบบวนเกษตรสวนยางพาราในระยะเปิดกรีดที่มีอยู่ในจังหวัดพัทลุงซึ่งเป็นตัวแทนของภาคใต้ของประเทศไทย ทำการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบประชุมกลุ่ม จำนวน 5 กลุ่ม และแบบสอบถามแบบกึ่งโครงสร้างกับเกษตรกรจำนวน 56 ราย พร้อมทั้งทำการสำรวจแปลงปลูกพืชร่วมยางพาราของเกษตรกร จำนวน 44 แปลง จากการศึกษาพบว่า ระบบวนเกษตรสวนยางพารามี 7 ประเภท โดยพบพืชร่วมยางพาราคือ ไม้ผล 20 ชนิด ไม้ยืนต้น 14 ชนิด และพืชท้องถิ่น 6 ชนิด ช่วงเวลาการปลูกพืชร่วมพบว่ามีความแตกต่างกันออกไป ชนิดของพืชร่วมและระยะเวลาการอยู่ร่วมกันกับยางพาราสามารถบ่งชี้ได้ว่าเป็นทางเลือกสำหรับเกษตรกรที่ปลูกยางพาราเชิงเดี่ยวเพื่อสร้างความยืดหยุ่นและการไม่พึ่งพาพืชเพียงชนิดเดียว อย่างไรก็ตามก่อนที่จะแนะนำการปลูกยางพาราแบบวนเกษตรจำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของระบบวนเกษตรสวนยางพาราโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อผลผลิตและความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตในดิน

**คำสำคัญ:** พืชร่วมยางพารา ไม้ใช้สอย ไม้ผล พืชผัก

<sup>1</sup> ศศ.ดร., คณะเทคโนโลยีและการพัฒนาชุมชน มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>2</sup> นักวิจัย, หน่วยปฏิบัติการความร่วมมือการวิจัยนวัตกรรมและการพัฒนาด้านการเกษตรและอาหาร, มหาวิทยาลัยมงเปอลีเย; ศูนย์วิจัยเกษตรกรรมแห่งฝรั่งเศสเพื่อการพัฒนาระหว่างประเทศ, มงเปอลีเย, ประเทศฝรั่งเศส

<sup>3</sup> นักวิจัย, ศูนย์วิจัยเกษตรกรรมแห่งฝรั่งเศสเพื่อการพัฒนาระหว่างประเทศ, เครือข่ายความร่วมมือการวิจัยยางพาราระหว่างไทยกับฝรั่งเศส, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 10900; หน่วยปฏิบัติการความร่วมมือการวิจัยประสิทธิภาพของระบบไม้ยืนต้น, มหาวิทยาลัยมงเปอลีเย; ศูนย์วิจัยเกษตรกรรมแห่งฝรั่งเศสเพื่อการพัฒนาระหว่างประเทศ, มงเปอลีเย, ประเทศฝรั่งเศส

<sup>1</sup> Asst.Prof. Dr., Faculty of Technology and Community Development, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand

<sup>2</sup> Researcher, Innovation and Development in Agriculture and the Food Sector Joint Research Unit (UMR Innovation), University Montpellier; The French Agricultural Research for International Development (CIRAD), Montpellier, France

<sup>3</sup> Researcher, The French Agricultural Research for International Development (CIRAD), Hevea Research Platform in Partnership (HRPP), Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand; Performance of Tree Crop Based Systems Internal Research Unit, University Montpellier; The French Agricultural Research for International Development (CIRAD), Montpellier, France

\* Corresponding author: Tel.: 081-9655583, E-mail address: uraiwan@tsu.ac.th

(Received: March 27, 2020; Revised: April 18, 2020; Accepted: April 20, 2020)

## Abstract

Rubber-based agroforestry systems (RAS) can be characterized by the type of trees/shrubs and crops associated with the rubber trees. The present study objective was to identify and describe the RAS in mature plantations existing in Phatthalung province. This province is representative of South Thailand and gathers many farmers with agroforestry practices. The methodology for data collection combined focus group discussions with 5 groups and individual interviews with 56 farmers using a semi-structured questionnaire and farmer's field survey for 44 RAS plots. The results showed an important diversity of the RAS. Seven types of agroforestry systems were identified with 20 species of fruit trees, 14 species of timber trees and 6 species of pluri annual local crops. The analysis of the timeline to plant rubber and intercrops showed some flexibility for the establishment of the RAS. The associated crops and the sometimes-long existence of these RAS indicate that they could be an interesting alternative to monoculture for the farmers to improve resilience and not rely only on one crop. However, before recommending these RAS, additional research is needed to better characterize the impact of these systems in particular on crop yield and soil biodiversity quality.

**Keywords:** Associate Plants, Timber Trees, Fruit Trees, Vegetables

## Introduction

Rubber has long been a strategic commodity in Thailand. After its introduction in Southern Thailand, two cropping systems co-existed: monospecific and rubber-based agroforestry systems (RAS) [1-2]. In the 1960's, Thai government launched a rubber replanting scheme to improve smallholders' well-being based on clonal monoculture. So progressively, most local rubber plantations turned to be monospecific plantations increasing farmers' dependence on only one crop when rubber price do fluctuate a lot. After a pick in 2011, rubber prices started to decrease and the trend continues until now [3], decreasing rubber farmers income particularly in the southern region where rubber represents a big share of total landholding [2]. In this case, RAS could be an interesting alternative to monoculture as they allow diversifying sources of income for small-scale rubber farmers [4-5].

Agroforestry is defined as "the cultivation of the soil with a simultaneous or sequential association of trees and crops or animals to obtain products or services useful to man" [6]. The most common criteria used to define agroforestry are the system's structure, its function, its socio-economic scale and level of management, and its ecological spread. Structurally, the system can be grouped as agrisilviculture (crops including trees/shrub crops + trees), silvopastoral (pasture/animals + trees), and agrosilvopastoral (crops + pasture/animals + trees) [7]. In Thailand, RAS is an alternative agricultural practice for rubber smallholders to enhance both ecological integrity and crop diversity [8]. During the whole lifespan of the rubber plantation, RAS can be classified into three main types: 1) intercropping during immature phase with annual crops such as pineapple, chili, banana, rice, sweet potato, long bean and corn 2) the rubber-fruit system during mature phase with guava, long kong, salacca, mangosteen, durian, and levistona and 3) the rubber-timber species system with neem, mahogany and teak during both immature and mature phase [5]. RAS in mature plantations represent only 6% of the mature rubber plantations in South Thailand [9].

And very few information is available on these systems except surveys in the 2010's [4-5]. The aim of this study was to identify the RAS existing in Phatthalung province and to describe the main systems including the reasons for the farmers to adopt RAS with focus on mature rubber plantations.

### Methodology

The study area was selected in Phatthalung province because of the presence of RAS. A preliminary survey was conducted with key informants i.e. some representative staff of the Rubber Authority of Thailand (RAOT) in the district level. The criterion for site selection was the high concentration of farmers with rubber agroforestry practices in mature plantations. Four areas: Pabon, Tamod, Srinakarin, and Sribanpod districts, close to the long Bantad Mountain in the western of Phatthalung were selected for the study. Five focus group discussions were conducted to identify the main RAS adopted in the four districts and to create a sample of farmers for field surveys. The focus group discussions addressed the following questions: 1) why adopting rubber agroforestry? 2) what are the reasons to select the kind of associated plants and the expected benefits? and 3) how many households have adopted rubber agroforestry? Then, individual interviews were conducted with farmers using a semi-structured questionnaire. Fifty-six farmers who grew the rubber agroforestry systems were selected by purposive sampling with the following criteria: the share of total landholding under agroforestry systems, the kind of association and planting year of association. To complete the interview with the farmers, field survey of 44 RAS plots was conducted to collect data on the composition of the system, the number of species of plants and spacing (planting pattern). Data analysis was typology of the structure of the rubber agroforestry systems at the cropping system scale based on the combination of species, spacing and planting year. Field work was conducted between May and August 2015.

### Results

#### Diversity of Rubber Agroforestry Systems

The typology of RAS included seven types based on the associated crops: i) one species of fruit trees (38%), ii) one species of timber trees (35%), iii) pluri annual local crops (4%), iv) fruit tree, timber trees and pluri annual local crops (4%), v) fruit trees and timber trees (9%), vi) fruit trees and pluri annual local crops (9%), vii) timber trees and pluri annual local crops (1%). All associated crops were planted between the rubber rows in normal spacing using either systematic or non-systematic planting patterns. In the systematic planting, there were less than three species of plants when in non-systematic planting there were usually many species.

#### Species of Associated Plant in Mature Rubber Plantations

Twelve families and twenty species of fruit trees were found mostly local fruits (Table 1). Mangosteen, longkong, langsat and salack were the most frequent companion fruit trees with rubber. There were nine families and fourteen species for timber trees. They were mainly wild varieties common in the southern region. RAS with timber trees can have several species associated. Some of them grew by themselves; some were planted by farmers. Last, six families and six species of pluri annual local crops, i.e. vegetables for cooking grown one time and harvested more than 3 years, were found. The most frequent

companion crops in this group were lasia, gnenom and pineapple. These results show the diversity of associated crops in mature rubber plantations.

### **Timeline Planting of Associated Plants in Rubber Plantations**

Three timelines to plant the companion crops in rubber plantations were identified that before rubber, together with rubber, after rubber (Table 1). Fruits trees can be planted long before rubber; sometimes, old fruit tree plantations was converted to RAS. The other companion crops were planted just before rubber or even after. These results show the flexibility for setting up RAS.

### **Discussion**

Results showed that two types of agroforestry systems co-existed: simple agroforest characterized by only one type of crop associated with rubber and complex agroforest characterized by more than one, generally several, types of associated species [10]. With 77% of the RAS observed, simple agroforests were more popular than complex agroforests (23%).

Timber trees and fruit trees were planted in both systematic and non-systematic systems with complex and simple agroforests. Timber trees were the first preferred associated crop for farmers due to its low labor requirement for maintenance; however, income is obtained at a long term income, sometimes at the end of the rubber lifespan. Fruit trees were the second preferred crop for regular income and consumption. However, its high labor force requirement particularly in harvesting season and high input need for production (fertilizer, pesticide) are the main constraints. Jongrungrot and Thungwa (2014) already mentioned that fruit trees and vegetables crops in the plots would increase household income while timber can be considered as an asset for their children [4]. RAS in Phatthalung province were quite the same as some Indonesian RAS [11-12]. Improved RAS combining the use of clonal planting material and agroforestry practices were developed in Indonesia in the 1980 and studied between 1994 and 2007 by ICRAF/CIRAD partially after a visit in Thailand in 1996 to take advantages of local existing agroforestry systems [10, 13]. These RAS could be interesting alternatives to monospecific rubber plantations, rubber farmers in Phatthalung are interested by RAS combining rubber with fruit tree, timber tree, and pluri annual local crop. Rodrigo *et al.* (2005) showed that banana intercropping did not affect growth and yield of rubber at maturity [14]. However, to become recommendation, in depth study of the effect of associated plants in the RAS on crops yield and soil biodiversity quality is needed. This study also did not fully record the density of rubber trees and companion crops; this should be included in next study of the RAS in Southern Thailand. RAS improve farmers' income and increase their resilience to economic uncertainties [5]. Fruit trees and timber trees could also improve the environment. Indeed, agroforestry generates positive externalities in particular for biodiversity conservation, soil fertility maintenance and water conservation [15]. Their contribution is far from negligible, be it in terms of traded products, fuel wood, subsistence crops, nutritional value, medicinal plants, timber, etc. If farmers worldwide have developed such systems, it is certainly not only because they mimic forests or foster biodiversity conservation; there must be something else [16]: biological or eco-systemic advantages and economic outputs of specific local products through valorization of self-consumption (medicinal plants, fuel wood, timber, rattan...) [17-18].

**Table 1** Species of associated plants in rubber plots and planting timelines.

| Family                        | Common Name                  | Scientific Name                               | Planting Years |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|
| <b>Fruit Trees</b>            |                              |                                               |                |
| 1. Anacardiaceae              | Marian plum                  | 1. <i>Bouea burmanica</i> Griff               | -20, 0, +15    |
|                               | Plum Mango                   | 2. <i>Bouea oppositifolia</i> Meissn          | -20, 0, +15    |
|                               | Mango                        | 3. <i>Mangifera indica</i> Linn               | -20, 0, +15    |
| 2. Bombacaceae                | Durian                       | 4. <i>Durio zibethinus</i> Linn               | -10, 0, +15    |
| 3. Guttiferae                 | Mangosteen                   | 5. <i>Garcinia magostana</i> Linn             | -20, 0, +15    |
| 4. Leguminosae-<br>Mimosodeae | Djenkol, Jenkol or<br>Jering | 6. <i>Archidendron jiringa</i> Jack           | -10, 0, +15    |
| 5. Meliaceae                  | Longkong<br>Langsat          | 7. <i>Lansium domesticum</i> Corr             | -10, 0, +15    |
| 6. Minosaceae                 | Stink bean                   | 8. <i>Parkia specioca</i> Hassk               | -15, 0, +13    |
| 7. Moraceae                   | Jack fruit                   | 9. <i>Artocarpus heterophyllus</i> Lamk       | -15            |
|                               | Champedak                    | 10. <i>Artoca rpus champenden</i> Spreng      | -5, 0, +20     |
| 8. Myrtaceae                  | Black plum                   | 11. <i>Syzygium cacuminis</i> (Craib) Chantar | -10            |
| 9. Palmae                     | Coconut                      | 12. <i>Cocos nucifera</i> Linn                | -25            |
|                               | Salak                        | 13. <i>Salacca rumphii</i> Wall               | 0, +15         |
|                               | Sala                         | 14. <i>Salacca zalacca</i> Gaertn.            | 0, +15         |
|                               | Areca nut palm               | 15. <i>Areca catechu</i> Linn.                | 0, +15         |
|                               | Asam paya                    | 16. <i>Eleiodoxa conferta</i> Griff           | 0, +15         |
| 10. Phyllanthaceae            | Burmese grape                | 17. <i>Baccaurea ramiflora</i> Lour           | +15            |
| 11. Sapindaceae               | Rambutan                     | 18. <i>Nephelium lappaceum</i> Linn           | -6, 0, +15     |
|                               | Longan                       | 19. <i>Dimocarpus longan</i> Lour             |                |
| 12. Stilaginaceae             | Black Currant Tree           | 20. <i>Antidesma ghaesembills</i> Gaerth      | +10            |

**Table 1** Species of associated plants in rubber plots and planting timelines, continued.

| Family                          | Common Name       | Scientific Name                                                 | Planting Years |
|---------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Timber Trees</b>             |                   |                                                                 |                |
| 1. Dipterocarpaceae             | Iron wood         | 1. <i>Hopea odorata</i> Roxb                                    | -5, 0, +15     |
|                                 | Shorea            | 2. <i>Shorea roxburghii</i> G. Don                              | 0, +8          |
|                                 | Yang              | 3. <i>Dipterocapus alatus</i> Roxb. ex G. Don                   | -5, 0, +5      |
| 2. Labiatae                     | Teak              | 4. <i>Tectona grandis</i> L.f.                                  | 0 to +5        |
| 3. Lauraceae                    | Litsea            | 5. <i>Litsea grandis</i> Hook.f.                                | 0 to +12       |
| 4. Leguminosae –<br>Minosoideae | Brown salwood     | 6. <i>Acacia mangium</i> Willd                                  | 0 to +27       |
| 5. Magnoliaceae                 | Champak           | 7. <i>Michelia champaca</i> Linn                                | 0, +8          |
| 6. Malvaceae                    | Large-Leaved Hau  | 8. <i>Talipariti macrophyllum</i> Fryxell<br>(Large-Leave type) | 0, +10         |
|                                 | Small-Leaved Hua  | 9. <i>Talipariti macrophyllum</i> Fryxell<br>(Small-Leave type) | 0, +10         |
| 7. Meliaceae                    | Mahogany          | 10. <i>Wietenia macrophylla</i> King                            | 0              |
|                                 | Siamese neem Tree | 11. <i>Azardirachta excelsa</i> (Jack) Jacobs                   | 0, +13         |
|                                 | Cigar box cedar   | 12. <i>Toona ciliata</i> M. Roem                                | +3             |
| 8. Rubiaceae                    | Bur flower tree   | 13. <i>Anthocephalus chinensis</i> (Rich. ex Walp.)             | +3             |
| 9. Barringtoniaceae             | Karuk             | 14. <i>Barringtonia macrostachya</i> (Jack) Kurz,<br>Rep. Pegu  | +3             |
| <b>Pluri Annual Local Crops</b> |                   |                                                                 |                |
| 1. Araceae                      | Lasia             | 1. <i>Lasia spinosa</i> Linn                                    | +5             |
| 2. Brommeliaceae                | Pineapple         | 2. <i>Ananas comosus</i> Merr                                   | 0, +7          |
| 3. Gnetaceae                    | Gnemon            | 3. <i>Gnetum gnemon</i> Linn                                    | 0, +25         |
| 4. Gramineae                    | Bamboo            | 4. <i>Bambusa multiplex</i> (Lour) Raeusch                      | +3             |
| 5. Padanceae                    | Pandanus palm     | 5. <i>Pandanus amaryllifolius</i> Roxb                          | +5             |
| 6. Palmae                       | Rattan palm       | 6. <i>Calamus caesius</i> Blume                                 | +3             |

Note - = before rubber, 0 = together with rubber and + = after rubber

## Conclusion

In Phatthalung province, two rubber agroforestry systems were found: simple and complex agroforests. Three different kinds of associated species in simple agroforests and systematic spacing patterns with rubber row. Most intercrops were planted by the farmers. The complex agroforests had non-systematic spacing pattern and more species. Some plants grew naturally. The associated plants in both systems were mostly local species plants, particularly fruit trees and pluri annual local crops while some timber trees have grown natural. Mangosteen, longkong, langsat and gnomom were the most popular intercrops due to existing markets. Through the development of both simple and complex agroforests, farmers have been able to diversify their source of income. Although research is still needed, these RAS could become in the future part of the RAOT recommendations. Indeed, RAOT role is still to provide smallholders with the necessary technical and financial assistance for rubber plantation or replantation and could be complemented with promotion of rubber agroforestry system to partially replace rubber monoculture. Therefore, developing transportation, marketing and processing for the non-rubber output, such as timber, vegetables and fruits are necessary as well as providing information on fruits and timber markets. In addition, researchers could develop innovation platforms in partnership with existing agroforestry groups in order to select and improve the best and most adapted and resilient agroforestry practices with new management methods to reduce maintenance costs and diversify sources of incomes. One of the most important points for innovation implementation is to explore and identify clearly local markets and labor force requirement of the associated plant species in rubber agroforestry system for smallholders.

## References

- [1] Rubber Research Institute of Thailand (RRIT). (2007). *Rubber: A technical bulletin*. Bangkok: Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- [2] Research Institute of Thailand (RRIT). (2010). *The rubber development strategy 2009-2014*. Bangkok: Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- [3] Office of Agricultural Economics (OAE). (2003-2015). *Agricultural statistics of Thailand 2002-2014*. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- [4] Jongrungrat, V., Thungwa, S., & Snoeck, D. (2014). Tree-crop diversification in rubber plantations to diversity sources of income for small-scale rubber farmers in Southern Thailand. *Bois et Forêts des Tropiques*, 321, 21–32.
- [5] Stroesser, L., Penot, E., Michel, I., Tongkaemkaew U., & Chambon, B. (2018). Income diversification for rubber farmers through agroforestry practices: how to withstand rubber price volatility in Phatthalung Province, Thailand. *Revue Internationale des Études du Développement*, 235, 117–145.

- [6] Torquebiau, E.F. (2000). A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, 323(11), 1009–1017.
- [7] Nair, P.K.R. (1985). Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 3(2), 97–128.
- [8] Warren-Thomas, E., Nelson, L., Juthong, W., Bumrungsri, S., Brattström, O., Stroesser, L.,... Dolman, P.M. (2020). Rubber agroforestry in Thailand provides some biodiversity benefits without reducing yields. *Journal of Applied Ecology*, 57 (1), 17-30. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13530>.
- [9] Simien, A., & Penot, E. (2011). Current evolution of smallholder rubber-based farming systems in Southern Thailand. *Journal of Sustainable Forestry*, 30(3), 247–260. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2011.53093>.
- [10] Inyod, H., Tongkaemkaew, U., & Phitthayaphinant, P. (2020). Rubber agroforestry systems in Trang province. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 48 (SUPPL. 1), 385–392.
- [11] Penot, E. (2001). *Stratégies paysannes et évolution des savoirs: l'hévéaculture agro-forestière indonésienne*. Thèse de doctorat. Université Montpellier I.
- [12] Wibawa, G., Joshi, L., Van Noordwijk, M., & Penot, E. (2007). *Rubber based agroforestry systems (RAS) as alternatives for rubber monoculture system*. 1-22. In *The International Rubber Research and Development Board (IRRDB) Annual Meeting and Conference 2006*, November 13-17, 2006, Ho Chi Minh City: Vietnam.
- [13] Jongrungrat, V. (2014). *The Economic efficiency and social security of smallholder farming system which practices associate crops in rubber plots in southern Thailand*. Doctor Dissertation. Prince of Songkla University.
- [14] Rodrigo, V.H.L, Stirling, C.M., Silva, T.U.K., & Pathirana, P.D. (2005). The growth and yield of rubber at maturity is improved by intercropping with banana during the early stage of rubber cultivation. *Field Crops Research*, 91(1), 23–33.
- [15] Tongkaemkaew, U., Sukkul, J., Sumkhan, N., Panklang, P., Brauman, A., & Ismail, R. (2018). Litterfall, litter decomposition, soil macrofauna, and nutrient content in rubber monoculture and rubber based agroforestry plantations. *Forest and Society*, 2(2), 138–149.
- [16] Torquebiau, E., & Penot, E. (2006). Ecology versus economics in tropical multistata agroforest. In B.M. Kumar & P.K.R. Nair (Eds.). *Tropical Homegardens: A Time-Tested Example of Sustainable Agroforestry*. 269–282. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- [17] Sinclair, F. (1999). A general classification of agroforestry practice. *Agroforestry Systems*, 46(2), 161–180.
- [18] McGinty, M.M., Swisher, M.E., & Alavalapati, J. (2008). Agroforestry adoption and maintenance: self-efficacy, attitudes and socio-economic factors. *Agroforestry Systems*, 73(2), 99–108.

ระดับกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในดินตะกอนบริเวณอ่าวปัตตานี  
จังหวัดปัตตานี ประเทศไทย  
Natural Radioactivity Levels in Sediment Collected in Pattani Bay  
Pattani Province, Thailand

ไมมูน อินตัน<sup>1\*</sup>, ไชนับ คอเลาะ<sup>1</sup> และ โรสลีนา อนันตนุกุลวงศ์<sup>1</sup>  
Maimoon Intan<sup>1\*</sup>, Sainap Doloh<sup>1</sup> and Roseleena Anantanukulwong<sup>1</sup>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดระดับกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณอ่าวปัตตานี และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กับค่าเฉลี่ยมาตรฐานดินตามรายงานของ UNSCEAR (2008) โดยเก็บตัวอย่างดินตะกอน บริเวณอ่าวปัตตานี จังหวัดปัตตานี จำนวน 7 สถานี ใน 2 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน และฤดูร้อน วิเคราะห์ กัมมันตภาพรังสีด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ โดยเลือกใช้หัววัดรังสีชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ปรับเทียบโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานดิน (IAEA Soil 6) ผลการวิเคราะห์พบนิวไคลด์ กัมมันตรังสีธรรมชาติ ได้แก่ โพแทสเซียม-40 ยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 ในฤดูร้อนมีค่ากัมมันตภาพ จำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ  $803.29 \pm 107.16$ ,  $59.93 \pm 16.13$  และ  $79.47 \pm 12.44$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และฤดูฝน  $648.78 \pm 212.46$ ,  $44.42 \pm 20.42$  และ  $66.20 \pm 30.16$  เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่า สูงกว่าค่าเฉลี่ยตามรายงานของ UNSCEAR (2008) คือ 412, 35 และ 45 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่าบังชี้ความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติพบว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ

คำสำคัญ: อ่าวปัตตานี ตะกอนดิน นิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ แกมมาสเปกโตรมิเตอร์

Abstract

This research aimed to measure radioactivity levels in marine sediment collected in some areas of Pattani Bay and compare with world average values of those in soil reported by UNSCEAR (2008). Sediment samples were collected from 7 sites along the seashore of Pattani Bay, Pattani province during the summer and rainy seasons. Radioactivity was analysed using gamma spectrometer with a high purity germanium detector (HPGe) using IAEA Soil 6 as a reference material. The detected radionuclides were related to the naturally occurring isotopes  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ . The average values of specific activities of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  are:  $803.29 \pm 107.16$ ,  $59.93 \pm 16.13$  and  $79.47 \pm 12.44$  Bq/kg, respectively (summer season), and  $648.78 \pm 212.46$ ,  $44.42 \pm 20.42$  and  $66.20 \pm 30.16$  Bq/kg, respectively (rainy season). It was

<sup>1</sup> อ.,สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ยะลา 95000

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala, 95000

\* Corresponding author : Tel. 087-2950665, Email address: maimoon.i@yru.ac.th

(Received: March 4, 2020; Revised: April 4, 2020; Accepted: April 22, 2020)

found that, their hazard indices were higher than the UNSCEAR (2008)'s reported values of 412, 35 and 45 Bq/kg for  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ , respectively. However, the values of hazard index of natural radionuclides in sediment samples were found at the normal level.

**Keywords:** Pattani Bay, Sediment, Natural Radionuclide, Gamma Ray Spectrometer

## บทนำ

อ่าวปัตตานีเป็นพื้นที่ริมฝั่งทะเล สันนิษฐานว่าเดิมเกิดขึ้นจากสันทรายแล้วกลายเป็นแหลมยื่นออกไปในทะเลขนานกับแผ่นดิน เรียกกันว่า “แหลมโพธิ์” ซึ่งมีความยาวประมาณ 22 กิโลเมตร ในอ่าวปัตตานีมีพื้นที่ราว 75 ตารางกิโลเมตร เหมาะสมต่อการประมงขนาดเล็กแบบยังชีพของชาวบ้าน จะมีลำน้ำสองสายที่ไหลสู่อ่าวปัตตานีคือแม่น้ำปัตตานีและคลองยะหริ่งระบบไหลเวียนน้ำภายในอ่าวที่ผสมผสานกันระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มและน้ำกร่อย เป็นระบบนิเวศแบบทะเลตื้นและป่าชายเลน ตะกอนดินจากปากน้ำที่ไหลลงอ่าวปัตตานีทำให้เกิดความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติ มีสัตว์น้ำที่เป็นแหล่งอาหารจำนวนมากภายในอ่าว ส่วนลำน้ำที่สำคัญอีกสายหนึ่งคือคลองหนองจิกไหลลงสู่ทะเลที่ทางตะวันตกของอ่าวปัตตานี ความสำคัญของแม่น้ำปัตตานีคือเป็นแหล่งน้ำที่มีการตั้งถิ่นฐานของชุมชนขนาดใหญ่เล็กจำนวนมากพึ่งพาลำน้ำสายนี้โดยทางกายภาพมีการปรับและเปลี่ยนแปลงมาตามลำดับทั้งที่โดยธรรมชาติและ การเปลี่ยนแนวทางเดินของน้ำโดยมนุษย์ ปัจจุบันแม่น้ำปัตตานีไหลผ่านอำเภอเบตง ถึงอำเภอธารโต อำเภอบันนังสตา อำเภอเมืองยะลา อำเภอยะรัง อำเภอหนองจิก ออกสู่ปากอ่าวที่ตำบลสะบารัง อำเภอเมืองปัตตานีสายหนึ่งและสายน้ำแยกไปออกที่ตำบลบางควา อำเภอหนองจิกอีกสายหนึ่ง ความยาวราว 210 กิโลเมตร จากการทับถมของตะกอนจากแหล่งน้ำต่าง ๆ ข้างต้น ส่งผลให้อ่าวตื้นเขินขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้สัตว์น้ำบางส่วนอพยพออกสู่ทะเลลึก ทำให้ส่งผลกระทบต่อทางเศรษฐกิจที่สำคัญทั้งต่อชุมชนรอบอ่าวและต่ออุตสาหกรรมประมง [1] จากการสอบถามชาวประมงในพื้นที่พบว่า สภาวะความเสื่อมโทรมที่เกิดแสดงอย่างชัดเจนจากการที่มีการอพยพออกของประชากรในชุมชน เพื่อไปประกอบอาชีพยังพื้นที่อื่นในประเทศเพื่อนบ้าน นับเป็นหลักฐานที่จะสามารถเชื่อมโยงเหตุการณ์ในอดีตได้เป็นอย่างดี [1] หากมีการวิเคราะห์ระดับกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในดินตะกอน [2-3] บริเวณอ่าวปัตตานี จะสามารถเป็นข้อมูลที่เฝ้าระวังสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลอ่าวไทยบริเวณจังหวัดปัตตานีได้ [1]

เนื่องจากว่าตะกอนดินเมื่ออยู่ลึกลงไปใต้ดินจะได้รับปริมาณรังสีจากรังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดินที่มาจากอัตรการแผ่กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติและไอโซโทปรังสีที่มีกัมมันตภาพพร้อมโลก ได้แก่ ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ซึ่งทั้ง 3 ธาตุนี้จะสลายตัวตามหลักครึ่งชีวิต (Half-life) และยังมีค่าครึ่งชีวิตยาวจึงยังมีปรากฏอยู่ในโลกจนถึงทุกวันนี้ ในระหว่างการสลายตัวจะแผ่รังสีออกมาในปริมาณต่าง ๆ กันอาจออกมาในรูปของรังสีแอลฟา เบตา และแกมมา ธาตุดังกล่าวเป็นไอโซโทปรังสีที่มีการสลายตัวต่อเนื่องเป็นห่วงโซ่เรียกว่าอนุกรมและจะไปสิ้นสุดที่ไอโซโทปที่เสถียรมีอยู่ 4 อนุกรม [4]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดทำงานวิจัยนี้ โดยมีเป้าหมายเพื่อตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีและรวบรวมเป็นฐานข้อมูลนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณส่วนหนึ่งของอ่าวไทยเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลต่อการสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในดินตะกอน โดยข้อมูลที่ได้นี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเลบริเวณนี้ในอนาคตได้

## วิธีดำเนินการวิจัย

### การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

#### วัสดุ

- 1) สารรังสีมาตรฐานในรูปของแข็ง สำหรับปรับเทียบสเปกตรัม
- 2) สารรังสีมาตรฐานดิน (IAEA Soil 6)
- 3) ตัวอย่างตะกอนดินอ่าวปัตตานี
- 4) พลาสติกบรรจุตัวอย่าง
- 5) ภาชนะพลาสติกรูปทรงกระบอก

#### อุปกรณ์

- 1) คู่มือความร้อน
- 2) โกร่งบดดิน
- 3) เครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.001 กรัม
- 4) ตะแกรงร่อนขนาด 212 ไมโครเมตร
- 5) ระบบวัดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ประกอบด้วย หัววัดรังสีชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe; Canberra, Model GC1319 USA) พร้อมโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา (Canberra, Genie2k Software Version 2.1, USA)
- 6) ถ้ำกำบังรังสีกัมมันตภาพรังสี (Canberra, Model 747, USA)

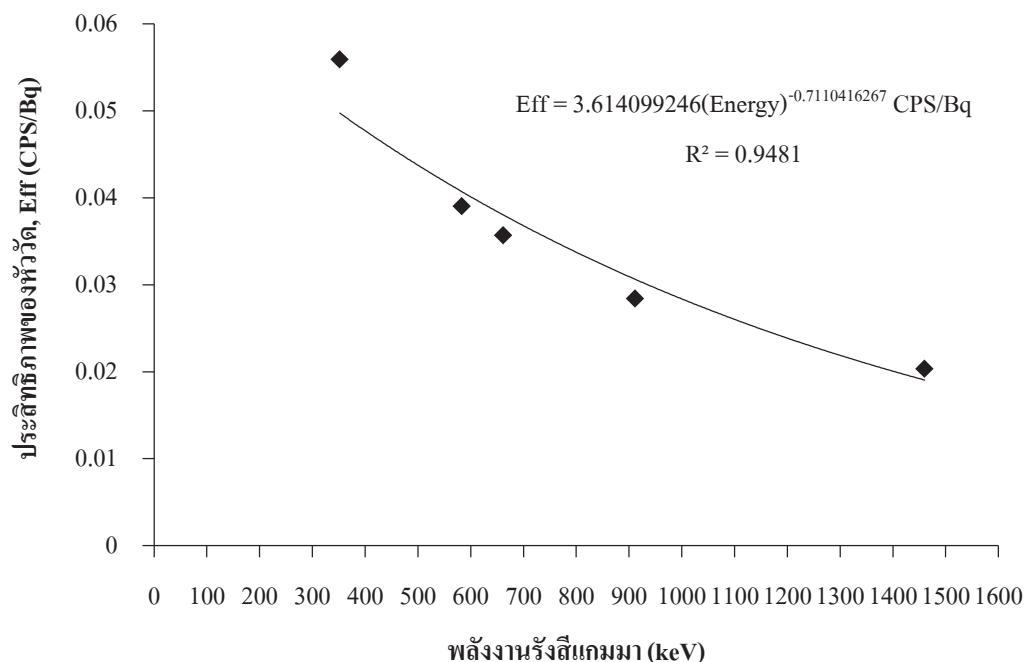
### การเก็บและเตรียมตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินตะกอนบริเวณอ่าวปัตตานีตั้งแต่สถานีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ม.อ.) แหลมดาชิ บ้านบุติ คาโต๊ะ ตะโละสะมิแล ดันหยงดูโล๊ะ และแหลมนก จังหวัดปัตตานี จำนวน 7 สถานี (ภาพที่ 1) ใน 2 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน และฤดูร้อน โดยทำการเก็บตัวอย่างแบบผิวหน้าดินตะกอน (Ekman Dredge Grab) ความลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตร ซึ่งแต่ละจุดห่างจากชายฝั่ง 1 กิโลเมตร จะได้ตัวอย่างประมาณ 3-5 กิโลกรัม (ภาพที่ 2 ก) และ (ข)) นำตัวอย่างดินตะกอนผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้อง และนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิทนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 212 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินตะกอนที่ร่อน บรรจุลงในภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีความสูงเท่ากับขนาดของสารมาตรฐานดิน (IAEA Soil 6) และบันทึกน้ำหนักที่ได้ หลังจากนั้นปิดฝาให้แน่นและห่อหุ้มด้วยเทปพันสายไฟสีดำ โดยต้องระวังไม่ให้มีการไหลเข้าออกของอากาศได้ ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 วัน เพื่อให้เข้าสู่สมดุลทางรังสีแบบถาวร (Radioactive Secular Equilibrium) ระหว่างเรดอนและลูกหลานที่มีครึ่งชีวิตสั้นของเรดอน ดังภาพที่ 2



### การตรวจวัดตัวอย่าง

นำตัวอย่างดินที่เข้าสู่สมมูลทางรังสีส่งตรวจวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์โดยใช้ตัวเจอร์เมียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe; Canberra, Model GC1319 USA) ซึ่งอยู่ภายในถ้ำกำบังรังสีภูมิหลัง (Canberra, Model 747, USA) หัววัดจะเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA 8192 ช่อง Canberra Model Inspector 2000, USA) และวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานรังสีแกมมาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (Canberra, Genie2k Software Version 2.1, USA) หัววัดรังสีแกมมามีประสิทธิภาพสัมพัทธ์เท่ากับ 13.9% และมีกำลังแยกเท่ากับ 1.75 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ที่พลังงานรังสีแกมมา 1332 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ และมีอัตราส่วนระหว่างยอดพลังงานต่อฐานคอมพ์ตันเท่ากับ 44.8 : 1 [5] ที่ห้องปฏิบัติการเฉพาะด้านหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ซึ่งทำการปรับเทียบเครื่องมือโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานดิน (IAEA Soil 6) ความสูง 2.12 เซนติเมตร เป็นตัวปรับเทียบมาตรฐานเพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพของหัววัดเท่ากับ  $Eff = 3.614099246(Energy)^{-0.7110416267}$  CPS/Bq ดังภาพที่ 3 และคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดินตะกอน บริเวณอ่าวปัตตานีจำนวน 14 ตัวอย่าง โดยทำการตรวจวัดรังสีแกมมาใช้เวลาในการตรวจวัด 7,200 วินาที ต่อ 1 ตัวอย่าง



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพหัววัดรังสีชนิด HPGe โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานดิน IAEA Soil 6

### การวิเคราะห์ตัวอย่าง

นำสเปกตรัมดินตะกอนไปวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้พีคที่พลังงาน 1460.81, 351.90 และ 911.60 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ เพื่อคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีจำเพาะของนิวไคลด์โพแทสเซียม (K) ยูเรเนียม (U) และทอเรียม (Th) โดยวัดรังสีแกมมา [6] ของตัวอย่างดินตะกอน ทำการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีแกมมา

ที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  และ  $^{228}\text{Ac}$  ตามลำดับ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบจำนวนนับรังสีแกมมาของตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐานดิน (IAEA Soil 6) ซึ่งทราบปริมาณที่สนใจ [7] ตามสมการที่ 1

$$S.A = \frac{\text{cps}}{\text{Eff} \times P_y \times W_t} \quad (1)$$

- เมื่อ S.A คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ ในตัวอย่างดินตะกอน (Bq/kg)  
cps คือ อัตรานับสุทธิ (Peak Area/Counting Time)  
Eff คือ ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี (CPS/Bq)  
 $W_t$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ทำการวัดรังสี (kg)  
 $P_y$  คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีรังสีแกมมาออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (%yield)

จากนั้นนำไปคำนวณค่าบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่างๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (Absorbed Dose Rates in Air; D) กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Radium Equivalent Activity;  $R_{eq}$ ) ดัชนีความเสี่ยงของรังสีภายนอก (External Hazard Index;  $H_{ex}$ ) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกายรอบปี (Annual External Effective Dose Rate;  $AED_{out}$ ) [7] โดยนำข้อมูลกัมมันตภาพจำเพาะของยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม แทนค่าในสมการ (2) – (5) ผลการคำนวณที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

$$D(\text{nGy/hr}) = (0.462C_{Ra} + 0.604C_{Th} + 0.0417C_K) \quad (2)$$

$$AED_{out}(\text{mSv/y}) = D(\text{nGy/hr}) \times 8760 (\text{hr}) \times 0.2 \times 0.7(\text{Sv/Gy}) \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$R_{eq}(\text{Bq/kg}) = C_{Ra} + 1.43C_{Th} + 0.077C_K \quad (4)$$

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1 \quad (5)$$

- เมื่อ  $C_{Ra}$  คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ  $^{238}\text{U}$  ในหน่วยของ Bq/kg  
 $C_{Th}$  คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ  $^{232}\text{Th}$  ในหน่วยของ Bq/kg  
 $C_K$  คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ  $^{40}\text{K}$  ในหน่วยของ Bq/kg

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

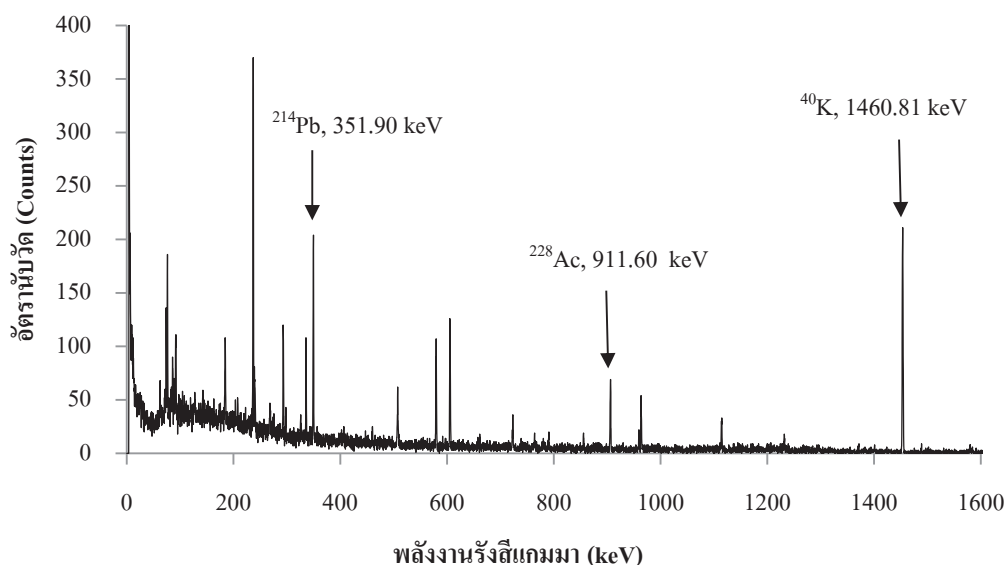
#### การวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอน

จากการวิเคราะห์นิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตะกอนบริเวณอ่าวปัตตานี จังหวัดปัตตานี นำสเปกตรัมของตัวอย่างไปวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้พีคที่พลังงาน 1460.81, 351.90 และ 911.60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีจำเพาะของนิวไคลด์โพแทสเซียม (K) ยูเรเนียม (U) และทอเรียม (Th) โดยวัดรังสีแกมมา [4] ของตัวอย่างดินตะกอน ทำการวิเคราะห์ความแรงของรังสีแกมมาที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  และ  $^{228}\text{Ac}$  ตามลำดับ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบจำนวนนับรังสีแกมมาของตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐานดิน (IAEA Soil 6) พบว่า กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีในธรรมชาติ

( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  และ  $^{232}\text{Th}$ ) ในตัวอย่างดินตะกอนฤดูร้อน มีค่า  $803.29 \pm 107.16$ ,  $59.93 \pm 16.13$  และ  $79.47 \pm 12.44$  Bq/kg และฤดูฝนมีค่า  $648.78 \pm 212.46$ ,  $44.42 \pm 20.42$  และ  $66.20 \pm 30.16$  Bq/kg ตามลำดับ (ตารางที่ 1 และภาพที่ 4)

ตารางที่ 1 กัมมันตภาพจำเพาะที่มีในธรรมชาติในดินตะกอนอ่าวปัตตานี

| สถานี                                              | กัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/kg) |                     |                   |                   |                   |                   |
|----------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                                    | $^{40}\text{K}$          |                     | $^{238}\text{U}$  |                   | $^{232}\text{Th}$ |                   |
|                                                    | ฤดูร้อน                  | ฤดูฝน               | ฤดูร้อน           | ฤดูฝน             | ฤดูร้อน           | ฤดูฝน             |
| 1. คาโต๊ะ                                          | 917.77                   | 673.76              | 95.72             | 47.56             | 66.19             | 82.78             |
| 2. ดันหยงดูโล๊ะ                                    | 790.32                   | 748.05              | 56.31             | 58.78             | 89.13             | 76.95             |
| 3. แหลมดาฮี                                        | 979.90                   | 716.03              | 55.84             | 25.85             | 72.89             | 54.89             |
| 4. บูดิ                                            | 678.24                   | 755.74              | 46.76             | 53.17             | 73.77             | 82.95             |
| 5. ตะโล๊ะสะมิแล                                    | 777.51                   | 171.00              | 53.57             | 7.35              | 101.66            | 1.76              |
| 6. มหาวิทยาลัย<br>สงขลานครินทร์<br>วิทยาเขตปัตตานี | 735.68                   | 733.97              | 55.12             | 64.46             | 70.38             | 80.39             |
| 7. แหลมนก                                          | 743.57                   | 742.93              | 56.17             | 53.77             | 82.25             | 83.66             |
| ค่าเฉลี่ย                                          | $803.29 \pm 107.16$      | $648.78 \pm 212.46$ | $59.93 \pm 16.13$ | $44.42 \pm 20.42$ | $79.47 \pm 12.44$ | $66.20 \pm 30.16$ |
| UNSCEAR<br>(2008) [8]                              | 412                      |                     | 35                |                   | 45                |                   |



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดกับพลังงานรังสีแกมมา

## ค่าบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ

สำหรับการคำนวณค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ ในดินตะกอนบริเวณอ่าวปัตตานี พบว่า อัตราปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) มีค่าอยู่ในช่วง 65.08 – 111.28 nGy/hr ค่าเฉลี่ย  $98.37 \pm 15.88$  nGy/hr ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศไทยซึ่งมีค่า 77 nGy/hr [9] กัมมันตภาพสมมูลเรเดียม ( $Ra_{eq}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 140.50 – 239.43 Bq/kg ค่าเฉลี่ย  $212.23 \pm 34.39$  Bq/kg ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้คือ 370 Bq/kg ค่าดัชนีความเสี่ยงของรังสีภายนอก ( $H_{ex}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.38 - 0.65 ค่าเฉลี่ย  $0.57 \pm 0.09$  ต่ำกว่าที่กำหนดไว้คือ ไม่เกิน 1.0 ส่วนปริมาณรังสียังผลที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย รอบปี ( $AED_{out}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.08 – 0.14 mSy/y ค่าเฉลี่ย  $0.12 \pm 0.02$  mSy/y ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของทั่วโลกที่มีค่า 0.48 mSy/y [9] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายต่าง ๆ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ

| สถานี                                          | ปริมาณรังสี<br>ดูดกลืน<br>(D) nGy/hr | กัมมันตภาพ<br>สมมูลเรเดียม<br>( $Ra_{eq}$ ) Bq/kg | ดัชนีความเสี่ยง<br>ของรังสี<br>ภายนอก<br>( $H_{ex}$ ) | ปริมาณรังสียังผล<br>ที่ได้รับจากร่างกาย<br>รอบปี ( $AED_{out}$ )<br>mSy/y |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1. คาโตะ                                       | 111.27                               | 239.43                                            | 0.65                                                  | 0.14                                                                      |
| 2. ดันหยงลูโตะ                                 | 108.82                               | 235.52                                            | 0.64                                                  | 0.13                                                                      |
| 3. แหลมตาชี                                    | 92.82                                | 197.50                                            | 0.53                                                  | 0.11                                                                      |
| 4. บูดิ                                        | 100.31                               | 217.23                                            | 0.59                                                  | 0.12                                                                      |
| 5. ตะโละสะมิแล                                 | 65.08                                | 140.92                                            | 0.38                                                  | 0.08                                                                      |
| 6. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์<br>วิทยาเขตปัตตานี | 103.80                               | 224.17                                            | 0.61                                                  | 0.13                                                                      |
| 7. แหลมนก                                      | 106.49                               | 230.83                                            | 0.62                                                  | 0.13                                                                      |
| ค่าเฉลี่ย                                      | $98.37 \pm 15.88$                    | $212.23 \pm 34.39$                                | $0.57 \pm 0.09$                                       | $0.12 \pm 0.02$                                                           |

## สรุป

จากการตรวจวัดระดับกัมมันตภาพรังสีที่สะสมในดินตะกอนบริเวณอ่าวปัตตานี จังหวัดปัตตานี ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้หัววัดรังสีชนิดเจอร์มานีเยมบริสุทธิ์สูง พบกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีในธรรมชาติ ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  และ  $^{232}\text{Th}$ ) ในตัวอย่างดินตะกอนฤดูร้อน มีค่า  $803.29 \pm 107.16$ ,  $59.93 \pm 16.13$  และ  $79.47 \pm 12.44$  Bq/kg และฤดูฝนมีค่า  $648.78 \pm 212.46$ ,  $44.42 \pm 20.42$  และ  $66.20 \pm 30.16$  Bq/kg ตามลำดับ ค่ากัมมันตภาพรวมของนิวไคลด์ทั้ง 3 ชนิด แต่ละฤดูกาล จะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินตะกอนส่วนใหญ่เกือบทุกจุดที่เก็บในฤดูร้อน มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์สูงกว่าฤดูฝน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำฝนและทิศทางลมมรสุมมีผลต่อระดับปริมาณรังสี และเห็นได้ชัดว่าค่าดังกล่าวสูงกว่าค่าเฉลี่ยในดินตามรายงานของ UNSCEAR (2008) เป็นจุดที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยต่อไป แต่เมื่อนำไปประเมินค่าดัชนีบ่งชี้ความเป็นอันตรายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ พบว่ายังอยู่ในระดับที่ปลอดภัย

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม และ ผศ.ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ์ อาจารย์สาขาฟิสิกส์ และนักวิชาการประมง พัน ยี่สิบ สาขาเทคโนโลยีการประมง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ช่วยเหลือด้านการเก็บตัวอย่าง คอยให้คำแนะนำที่ค้ำจุนบรรลุล่วงวัตถุประสงค์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hajisamae, S. (2011). Pattani bay facts and challenges. *Sri Trang News Journal*, 34(7), 4–6.
- [2] Phaophang, C. (2013). *Radioactivity levels in marine sediment collected in Chonburi province*. Doctoral Dissertation. Bangkok: Kasetsart University.
- [3] Wongsanit, S. (2010). *Gross alpha and beta activities in sea water, sediment and plankton in the coastal ecosystem: the upper gulf of Thailand*. Master's Thesis. Bangkok: Kasetsart University.
- [4] Doloh, S. (2013). *Thermoluminescence dating technique of freshwater shells and flint in Khao-Harn cave historical site Satun province*. Master's Thesis. Prince of Songkla University, Pattani Campus.
- [5] Bhongsuwan, T., & Hemtrakoonwong, H. (2017). Radionuclide content in beach sand in Ta Kua Pa district, Phang Nga province. *Naresuan University Journal*, 25(1), 123–137.
- [6] Limsuwan, S., Vichaidid, T., & Limsuwan, P. (2011). ESR dating of laterite from Ban Tha Ta Suea, Kanchanaburi, Thailand. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(2), 545–549.
- [7] Veiga, R., Sanches, N., Anjos, R.M., Macario, K., Bastos, J., Iguatemy, M.,... Umisedo, N.K. (2006). Measurement natural radioactivity in Brazilian beach sands. *Radiation Measurements*, 41(2), 189–196.
- [8] United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2008). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Report to General Assembly, with Scientific Annexes. New York: Author.
- [9] United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Report to General Assembly, with Scientific Annexes. New York: Author.

## ดัชนี (Index)

### ดัชนีผู้เขียน (Author Index)

### หน้า

|                        |                           |    |
|------------------------|---------------------------|----|
| กนกพร สังขรักษ์        | Kanokphorn Sangkharak     | 1  |
| กี-ชอกอัน              | Ki-Seok An                | 58 |
| แจ่มจันทร์ เพชรศิริ    | Jamjun Pechsiri           | 1  |
| จอมภพ แวศักดิ์         | Jompob Waewsak            | 39 |
| ชนะ จันทร์น้ำ          | Chana Chuncham            | 39 |
| ไชนับ ดอเลาะ           | Sainap Doloh              | 86 |
| ธนาภา ขาวมัน           | Thanapa Khawman           | 11 |
| นฤกร สุทธิจิตร         | Naruporn Suttijit         | 20 |
| พัศราภรณ์ ละใบสอาด     | Pasaraporn Labaisaad      | 30 |
| พีรพงศ์ อติทรัพย์ไพศาล | Peerapong Atisappisan     | 30 |
| แมทธิว ลอว์            | Matthew Law               | 49 |
| ไมมูน อินตัน           | Maimoon Intan             | 86 |
| เบญเนดิช แซมบูน        | Benedicte Chambon         | 78 |
| รุจิราภรณ์ จันทร์วดี   | Ruchiraphon Chandravadee  | 1  |
| รัตนากาล คำสอน         | Rattanakarn Khomson       | 20 |
| รัชฎาภรณ์ อึ้งเจริญ    | Ratchadaporn Ungcharoen   | 49 |
| โรสลีนา อนันตนุกุลวงศ์ | Roseleena Anantanukulwong | 86 |
| ลีลี อิงศรีสว่าง       | Lily Ingsrisawang         | 49 |
| ลัทธวรรณ นิยมธรรม      | Lattawan Niyontham        | 39 |
| วราภรณ์ แดงนาภาพกุล    | Waraporn Dangnapaponkul   | 11 |
| วัชรญา ไชยราช          | Watchareeya Chaiyarat     | 58 |
| วุฒิชัย ศรีโสดาพล      | Wuttichai Srisodaphol     | 20 |
| สิวพร แซ่วัน           | Siwaporn Saewan           | 11 |
| สุมิตา แก้วทอง         | Sumita Kaewthong          | 11 |
| สุภญา ศิริรัฐนิคม      | Suphada Kiriratnikom      | 30 |
| สุทธญาณ์ ไชยรัตน์      | Sutthaya Chaiyarat        | 20 |
| สุรสิทธิ์ ศักดา        | Surasit Sakda             | 66 |
| อานุช ศิริรัฐนิคม      | Anut Kiriratnikom         | 30 |
| อุดม ทิพราช            | Udom Tipparach            | 58 |
| อรยา สุขนิตย์          | Oraya Sooknit             | 58 |
| อุไรวรรณ ทองแกมแก้ว    | Uraiwan Tongkaemkaew      | 78 |
| อีริค ฟินอท            | Eric Penot                | 78 |

## ดัชนีคำสำคัญ

## หน้า

|                              |    |
|------------------------------|----|
| การกำกับแบบเกรซฟูล           | 11 |
| การทำซ้ำของจุดยอด            | 11 |
| การทำซ้ำของเส้นเชื่อม        | 11 |
| กราฟวิถึ                     | 11 |
| การวิเคราะห์ความไว           | 20 |
| การประมาณค่า                 | 49 |
| กระบวนการย่อยส่วน            | 39 |
| การระบุพิกัด                 | 66 |
| กูเกิ้ลแมพ                   | 66 |
| กูเกิ้ลเอพีไอ                | 66 |
| เกมมาสเปกโตรมิเตอร์          | 86 |
| ความต้องการฟอสฟอรัส          | 30 |
| ความหนาของทองในระดับไมโคร    | 58 |
| ฐานข้อมูลภูมิอากาศลม         | 39 |
| ดีไนตริฟิเคชัน               | 1  |
| ไดแคลเซียมฟอสเฟต             | 30 |
| ตะกอนดิน                     | 86 |
| ท่อนาโนไททาเนีย              | 58 |
| นโยบายสินค้าคงคลัง           | 20 |
| นิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ | 86 |
| แบบจำลองบรรยากาศ             | 39 |
| แบบจำลองการไหลของลม          | 39 |
| ปลาคูกลำพัน                  | 30 |
| พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต       | 1  |
| พอลิเมอร์ชีวภาพ              | 1  |
| พลังงานลม                    | 39 |
| พืชผัก                       | 78 |
| พืชร่วมยางพารา               | 78 |
| ไม้ใช้สอย                    | 78 |
| ไม้ผล                        | 78 |
| ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ       | 1  |
| ระบาดวิทยา                   | 49 |
| รอยสัมผัสข้อเท้า             | 58 |
| วิธีการจับ-จับใหม่           | 49 |
| เศษส่วนของสินค้าที่เสีย      | 20 |
| สารประกอบไนโตรเจน            | 1  |
| สูตรคำนวณระยะทาง             | 66 |
| เส้นทางการท่องเที่ยว         | 66 |
| อัตราการนำเข้าเสีย           | 20 |
| โอปิออยด์                    | 49 |
| อ่าวปัตตานี                  | 86 |

| <b>Keywords Index</b>                            | <b>Page</b> |
|--------------------------------------------------|-------------|
| Aquaculture                                      | 1           |
| Atmospheric Model                                | 40          |
| Associate Plants                                 | 79          |
| Biopolymer                                       | 1           |
| Capture-recapture                                | 50          |
| Denitrification                                  | 1           |
| Duplication of a Vertex                          | 11          |
| Duplication of an Edge                           | 11          |
| Deterioration Rate                               | 20          |
| Di-calcium Phosphate                             | 31          |
| Downscaling Process                              | 40          |
| Estimation                                       | 50          |
| Epidemiology                                     | 50          |
| Fraction of Defective Items                      | 20          |
| Fruit Trees                                      | 79          |
| Graceful Labeling                                | 11          |
| Google Maps                                      | 67          |
| Google API                                       | 67          |
| Geolocation                                      | 67          |
| Gamma Ray Spectrometer                           | 87          |
| Haversine                                        | 67          |
| Inventory Policy                                 | 20          |
| Miro-layer of Au                                 | 58          |
| Nitrogen Compound                                | 1           |
| Nieuhofii's Catfish ( <i>Clarias nieuhofii</i> ) | 31          |
| Natural Radionuclide                             | 87          |
| Opioid                                           | 50          |
| Polyhydroxyalkanoates                            | 1           |
| Path                                             | 11          |
| Phosphorus Requirement                           | 31          |
| Pattani Bay                                      | 87          |
| Systems                                          | 1           |
| Sensitivity Analysis                             | 20          |
| Sediment                                         | 87          |
| Schottky Contact                                 | 58          |
| TiO <sub>2</sub> Nanotubes                       | 58          |
| Travel Route                                     | 67          |
| Timber Trees                                     | 79          |
| Vegetables                                       | 79          |
| Wind Flow Model                                  | 40          |
| Wind Energy                                      | 40          |
| Wind Climate Database                            | 40          |

## Lists of Riviewers

Manuscripts of research articles and academic articles of Thaksin University Journal, Volume 23, No. 1 (January – April 2020) were reviewed by the reviewers as follows:

- |                                            |                                                                                                  |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Prof. Dr. Buncha Somboonsuke             | Faculty of Natural Resources,<br>Prince of Songkla University                                    |
| 2 Prof. Dr. Santi Maensiri                 | Institute of Engineering,<br>Suranaree University of Technology                                  |
| 3 Assoc. Prof. Dr. Chakchai So-In          | Faculty of Science, Khon Kaen University                                                         |
| 4 Assoc. Prof. Dr. Nikom Chusiri           | Faculty of Science, Thaksin University                                                           |
| 5 Assoc. Prof. Dr. Niwooti Whangchai       | Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources,<br>Maejo University                       |
| 6 Assoc. Prof. Dr. Orapint Jintasataporn   | Faculty of Fisheries, Kasetsart University                                                       |
| 7 Assoc. Prof. Dr. Pichai Thongdeelert     | Faculty of Agriculture, Kasetsart University                                                     |
| 8 Assoc. Prof. Dr. Sirichai Thepa          | School of Energy, Environment and Materials,<br>King Mongkut's University of Technology Thonburi |
| 9 Assoc. Prof. Dr. Sommai Chiayvareesajja  | Faculty of Natural Resources,<br>Prince of Songkla University                                    |
| 10 Assoc. Prof. Dr. Wiboonluk Pungrasmi    | Faculty of Engineering, Chulalongkorn University                                                 |
| 11 Assoc. Prof. Dr. Wutiporn Phromkunthong | Faculty of Natural Resources,<br>Prince of Songkla University                                    |
| 12 Assoc. Prof. Kiatkrai Ayuwat            | Faculty of Engineering, Kasetsart University                                                     |
| 13 Assoc. Prof. Reawat Loapaiboon          | Faculty of Science, Ubon Ratchathani University                                                  |
| 14 Asst. Prof. Dr. Noppamas Pukkhem        | Faculty of Science, Thaksin University                                                           |
| 15 Asst. Prof. Dr. Nuanpan Lawson          | Faculty of Applied Science,<br>King Mongkut's University of Technology North Bangkok             |
| 16 Asst. Prof. Dr. Ratinan Boonklurb       | Faculty of Science, Chulalongkorn University                                                     |
| 17 Asst. Prof. Dr. Rattanporn Wangkeeree   | Faculty of Science, Naresuan University                                                          |
| 18 Asst. Prof. Dr. Sarawut Luksanato       | Faculty of Logistics, Burapha University                                                         |
| 19 Asst. Prof. Dr. Winai Bodhisuwan        | Faculty of Science, Kasetsart University                                                         |
| 20 Asst. Prof. Tanutpats Dhiratanuttdilok  | Faculty of Management Science, Kasetsart University                                              |
| 21 Dr. Komrit Wattanavatee                 | Faculty of Science, Prince of Songkla University                                                 |

# General Information of Thaksin University

## About the Journal

Thaksin University Journal is a peer-reviewed journal publishing research articles, academic articles, socially-engaged articles in Multidisciplinary of sciences and technology of researchers, educators, and staff of Thaksin University and other institutions.

## Publication Conditions

1. The work described has not been published previously.
2. The author must be a member of Thaksin University Journal except for special articles that the Editor gives an exception.
3. The manuscript must be typed in Thai or English with both Thai and English abstracts.
4. Content and ideas published in this journal must be the author's only; the Editor does not necessarily agree with it.
5. The reviewers must review the manuscript.

## Types of Published Articles

1. Research articles
2. Academic articles
3. Socially-Engaged articles
4. Letter to editor (to propose supportive or argumentative ideas of researchers, including presenting interesting knowledge and experience)

## Journal Conditions

1. Manuscript must be typed on white A4-size paper, single side, with page number and Angsana New Font size 14 with not more than 8 pages length, including figures and tables.

2. Margins

- |                 |    |
|-----------------|----|
| · Top margin    | 1" |
| · Bottom margin | 1" |
| · Left margin   | 1" |
| · Right margin  | 1" |

3. Manuscript Online Submission

The corresponding author must submit the manuscript online via Thai Journals Online (ThaiJo2) at <https://www.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal>.

4. The application for membership can be processed into ways:

**Journal Authors**

Researchers, academicians, or students who want to submit the article(s) must pay for reviewers' compensation, **2,000 Baht/ 70 US Dollars per article** if the article is accepted. via **Krungthai** Bank account:

**Account Name: Thaksin University Journal**

**Account Number: 678-4-59223-9**

**Branch: Tesco Lotus – Talad Papayom**

After completing the payment, the membership applicant must attach the file of payment slip online at <https://www.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal> or contact the journal coordinators at the following address:

Research and Development Institute, Thaksin University, Phatthalung Campus  
222 Moo. 2, Bann Prao Sub-district, Papayom District, Phatthalung, Thailand 93210  
Tel. 074-609-600 ext. 7254 or 081-540-7304 Fax No. 074-609-654-5  
E-mail address: [tsujournal@tsu.ac.th](mailto:tsujournal@tsu.ac.th) or [research.tsu@gmail.com](mailto:research.tsu@gmail.com)

5. Article cancellation or dismissal has conditions as follows:

Article cancellation is done before article publication.

Article dismissal is done during or after article publication.

The cancellation or dismissal can be proceeded by downloading the form at <https://www.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal>; however, **if the article has already been sent to the reviewers, the corresponding author must be responsible for the reviewing fees.**

**Manuscript Guidelines**

The article must consist of:

**1. Title**

Title must be in Thai and English, **center** of the page. **The first alphabets** of all words of the title must be **capitalized with bold 20 font size**, prepositions and articles.

**2. Authors**

Identify all authors with **14 font size**, **center** of the page with **logarithm**. Position, academic title, and affiliation in the footnote on the first page: Department, Faculty and University stated in the same page, both Thai and English.

**3. Abstract**

Abstract must be in Thai and English, **not more than 250 words**, with **14 font size**.

#### **4. Keywords**

Keywords both in Thai and English related to the article, not more than 5 words, below the abstract.

It must be typed with 14 font size, left-margin. Proper nouns (the first alphabet of each word) must be capitalized.

#### **5. Main Body** consists of:

- 1) Introduction: Significance or background of the study, research objectives, and/or review of related literature
- 2) Research methodology
- 3) Results
- 4) Discussion
- 5) Conclusion
- \* 4) and 5) can probably be merged
- 6) Acknowledgement (if any)
- 7) References must be **APA 6<sup>th</sup> Edition** and in **English only**

#### **6. Attachment**

This is attached with the manuscript to certify that the experiment is biological safe, ethical (using animal samples) or moral (doing experiment in human).

#### **7. Abbreviation and Signs**

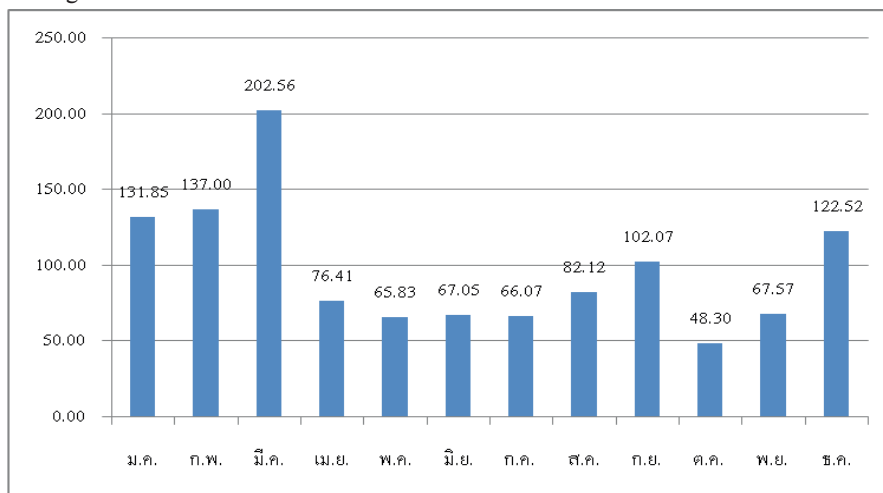
Abbreviation comes up with its full version in the first time, and only abbreviation later. Please avoid using abbreviation in the title and abstract. It is not recommended to use the abbreviation that is used less than four times in the article. The author(s) must provide definition or description of any signs used in the article when appearing in the first time.

#### **8. Figure**

Figure is at the center of the page, following by description below the figure in 14 font size. It must be clear monochrome (black and white color). If necessary, it can be colored. The word “figure” is bold, and the description is normal and set in the center of the page. Lined figure must be in clear black.

### Example

kilogram /rai



**Figure 1** Fall of Monthly Leaves

### 9. Table

“Table” must be bold and at the left side of the column, and the description is above the table, with 14 font size.

### Example

**Table 1** Percentage of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium intensity in remains of decayed leaves in each period of time

| Week | Nitrogen<br>(percent) | Phosphorus<br>(percent) | Potassium<br>(percent) |
|------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 0    | 0.81 ± 0.15           | 0.12 ± 0.08             | 0.44 ± 0.14            |
| 1    | 1.00 ± 0.05           | 0.09 ± 0.05             | 0.24 ± 0.12            |
| 2    | 0.89 ± 0.15           | 0.11 ± 0.02             | 0.10 ± 0.02            |
| 3    | 0.83 ± 0.14           | 0.17 ± 0.08             | 0.08 ± 0.02            |
| 4    | 0.78 ± 0.15           | 0.24 ± 0.24             | 0.09 ± 0.01            |
| 6    | 0.87 ± 0.11           | 0.16 ± 0.01             | 0.09 ± 0.02            |
| 8    | 0.84 ± 0.04           | 0.20 ± 0.13             | 0.09 ± 0.02            |
| 10   | 0.84 ± 0.07           | 0.20 ± 0.07             | 0.08 ± 0.02            |
| 12   | 0.80 ± 0.03           | 0.24 ± 0.03             | 0.07 ± 0.02            |

## References

The reference lists must be APA 6<sup>th</sup> Edition referencing in English only and In-text Citation.

Intext Citations: Identify number in the bracket “[ ]” at the end of message in sequences.

1. Put the number in the bracket [ ] at the end of message or author’s name such as [1].
2. Put the continuous number started from 1. Any repeated list uses the same numbers.
3. All in-text citation must be in the reference lists based on the identified number in the bracket [ ].
4. Multi-citations for the same message:
  - 4.1 In case of not more than 2 lists, put the numbers of reference lists in numerical order using comma such as [1, 5].
  - 4.2 In case of more than 2 lists and those are continuous lists, use hyphen (-) such as [1-3], [1-5].
  - 4.3 In case of more than 2 lists and those are continuous and discontinuous lists, put comma (,) and hyphen (-) such as [1, 4-5].

## In-text Citation

Identify number in the bracket “[ ]” at the end of message in sequences.

### Example

1. Use of some chemical fertilizers or single fertilizers in too long length, which affect the lack of plant nutrition [1]...
2. Scherer [2] reported that...
3. and it also causes imbalance of plant nutrition in the soil [3-4]...

## Referencing

Start the list with surname of the author, abbreviation of middle name (if any), and first name respectively, for example, Kessaratikoon, P., Choosiri, N., & Boonkrongcheep, R.

### 1) Books

Name of author/(year).//*Book Title*.//publication place/:/press.

#### **Example**

- [1] Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2005). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. New Jersey: Pearson Education, Inc.,

Name of author/(year).// *Book Title* (edition).//publication place/:/press.

#### **Example**

- [2] Satirajinda, M. (2000). *Iron & steel heat treatment engineering* (7<sup>th</sup> Ed). Bangkok: The Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King’s Patronage.

## 2) Research Articles

Author's name/(year).// Title of Article./Journal, // volume/(issue),/page number.

### Example

- [3] Keereekoch, T., Srisuwan, T., Patimin, S., Khunphan, R., Yayaman, A., Dinteb, H., & Subhadhirasakul, S. (2016). Effects of steam sterilization and potassium permanganate soak on microbial load and quality of ginger powder. *Thaksin University Journal*, 19(2), 9-21.

## 3) Proceeding Articles

Author's name/(year).//Title of Article./In/Conference's Name./page//date/month/year,/ Conference venue//place/:/press.

### Example

- [4] Boonkrongcheep, R., Maeha, A., & Kessaratikoon, P. (2016). Measurement and analysis of specific activities of natural radionuclides ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$ ) in Thai Rice Bag Samples. In *The 24<sup>th</sup> Thaksin University National Academic Conference*, 18. May 21-24, 2016, The 60<sup>th</sup> Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center. Songkhla: Thaksin University.

## 4) Book Chapter

Author's name// (year).//Title of Chapter./In/Editors (if any).//Name of Book./page number//publication place/:/press.

### Example

- [5] Lawrence, J. A., & Dodds, A. E. (2003). Goal-directed activities and life-span development. In J. Valsiner & K. Connolly (Eds.). *Handbook of Developmental Psychology*. 517-533. London, England: Sage Publications.

## 5) Articles in the Newspaper

Author's name/(year,date).//Title of Article./Name of Newspaper./page number.

### Example

- [6] Schultz, S. (2005, December 28). Calls made to strengthen state energy policies. *The Country Today*. 1A, 2A.

## 6) Thesis

Researcher's name/(year).//Thesis Title./level of study/degree//publication place/:/ institution.

### Example

- [7] Paungfoo, C. (2003). *Use of molecular biology techniques in studying the nitrifying bacteria community from shrimp farming system*. Doctoral Dissertation. Prince of Songkla University.

## 7) Information from the Internet

Use the general forma of citation following by website; for example, the author borrows the ideas from a book on the website, so the reference list consists of the name of author, year of publication, book title, and publication place. Another information should be added: searching date and URL – Retrieved + date + from URL

Author's name/(year).//*Title (Online)*.//publication place:/press.//Retrieve ...from http://  
www.....

### Example

[8] Department of Foreign Trade. (2012). *The situation of sawn rubber wood Thailand* (Online). Retrieved 3 August 2016, from <http://www.dft.go.th/en-us/Information-Service/PR-Materials/ctl/DetailUserContent/mid/660/conternted/4252>.

## 8) List of Interviewees

Name of interviewee/position,/interviewing place,/interviewing date/interview.

### Example

[9] Pardee, H. N. Professor of Economics and Political Science, University of California. 2000, November 8, Interview.

## 9) Patent

Name of patent register/(year).//*Name of Invention*. country. patent number.

### Example

[10] Jansun, E. *et. al.* (2015). *Kit for gold nanoparticles synthesis from gold-leaf*. Thailand. No. 1303000492.

## 10) Articles with Digital Object Identifier (DOI) or Database's Unique Identifier (If it is presented on the first page of article.)

Surname. Name.//year).// Title of Article. *Journal*,/Volume/(Issue),/page. DOI.

### Example

[11] Noojeensang, K., & Waewsak, J. (2016). Assessment of sea wave power potential in the Gulf of Thailand using simulating wave nearshore (SWAN). *Thaksin University Journal*, 19(1), 12-20. DOI: 10.14456/tsuj.2016.2.



สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยทักษิณ

222 หมู่ 2 ต.บ้านพร้าว อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง 93210

โทรศัพท์ 074-609-600 ต่อ 7254 โทรศัพท์/โทรสาร 074-609-655

E-mail Address : tsujournal@tsu.ac.th, research.tsu@gmail.com