

ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 [2568] Vol.24, No.3 [2025]

กันยายน – ธันวาคม 2568

ISSN 2822-1508 [Online]



Approved by TCI during
2025-2029



ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย
Thai-Journal Citation Index Centre

Advisory Board

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Saowanit Sukparungsee

Professor Dr. Vilai Rungsardthong

Associate Professor Dr. Surapun Yimman

Associate Professor Dr. Pianpool Kamoljitprapa

Associate Professor Dr. Malinee Sriariyanun

Editor-in-Chief

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Associate Professor Narumol Kreua-ongarjnukool

Editor

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Associate Professor Dr. Nonchanutt Chudpooti

Associate Professor Dr. Sekson Sirisubtawee

Co-Editor

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Yupaporn Areepong

Assistant Professor Dr. Chatchawan Singhapol

Dr. Wannarak Nopcharoenkul

Managing Editor

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Assistant Professor Dr. Chonnikarn Rodmorn

Editorial Team

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Associate Professor Dr. Orathai Polsen

Associate Professor Dr. Suvimol Phanyaem

Associate Professor Dr. Walaiporn Prissanaroon Ouajai

Associate Professor Dr. Tanapat Anusas-amornkul

Associate Professor Dr. Sukanya Thepwatee

Assistant Professor Dr. Anusara Srisrual

Assistant Professor Dr. Theerawut Phusantisampan

Assistant Professor Dr. Jintawat Tanamatayarat

Assistant Professor Dr. Thidarat Wangkham

Assistant Professor Dr. Saowapa Thumsing Niyomthai

Editorial Board

Professor Dr. Paul Pigram

La Trobe University, Australia

Professor Dr. Melvin Pascall

The Ohio State University, USA

Professor Dr. Andrea De Gaetano

Óbuda University, Budapest, Hungary and CNR-IASI Rome and CNR-IRIB Palermo, Italy

Editorial Board (cont.)

Associate Professor Dr. Nutapong Somjit

University of Leeds, United Kingdom

Dr. Nutsuda Sumonsiri

Teesside University, United Kingdom

Professor Dr. Sergey Meleshko

Suranaree University of Technology, Thailand

Emeritus Professor Dr. Yongwimon Lenbury

Mahidol University, Thailand

Professor Dr. Sutthisak Phongthanapanich

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Anuvat Sirivat

Chulalongkorn University, Thailand

Professor Dr. Supa Hannongbua

Kasetsart University, Thailand

Associate Professor Dr. Yaowadee Temtanapat

Thammasat University, Thailand

Associate Professor Dr. Khongsak Srikaeo

Pibulsongkram Rajabhat University, Thailand

Associate Professor Dr. Weeradej Meeinkuirt

Mahidol University, Thailand

Associate Professor Dr. Wararit Panichkitkosolkul

Thammasat University, Thailand

Associate Professor Dr. Montip Tiensuwan

Mahidol University, Thailand

Associate Professor Dr. Piyapatr Busababodhin

Maharakham University, Thailand

Associate Professor Dr. Wantida Chaiyana

Chiang Mai University, Thailand

Associate Professor Dr. Pranee Phinyocheep

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kwan Arayathanitkul

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Narumon Emarat

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kitiporn Plaimas

Chulalongkorn University, Thailand

Assistant Professor Dr. Chatchai Khunboa

Khon Kaen University, Thailand

Assistant Professor Dr. Julaluk Khemacheewakul

Chiang Mai University, Thailand

Assistant Professor Dr. Jutarat Iewkittayakorn

Prince of Songkla University, Thailand

Assistant Professor Dr. Yanisa Laoong-u-thai

Burapha University, Thailand

Assistant Professor Dr. Sararat Mahasaranon

Naresuan University, Thailand

Editorial Board (cont.)

Dr. Worawut Srisukkhram

Chiang Mai University, Thailand

Management Staff

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Miss Wilawan Sae-jeng

Miss Kitsiya Chuchuausuwan

JOURNAL POLICY

Journal of Applied Science and Emerging Technology (JASET) is an academic journal published Triannually by the Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. The JASET publishes papers in four types: (1) original research articles in Thai or English, (2) academic articles in Thai or English, (3) review articles in Thai or English, and (4) editorial corner/invitation articles in English, encompassing all areas of applied science and technology. The journal will not accept articles, which have been published or are being considered for publication by another journal, nor should papers published here be submitted to other journals.

"Journal of Applied Science and Emerging Technology does not have policy to collect publication fee"

"Journal of Applied Science and Emerging Technology published both as electronic journal [ISSN 2822-1508 (Online)] available on ThaiJO system"

Scope of the Journal

To publish academic, research and review articles covering all areas of both basic and applied science and technology including pure and applied mathematics, statistics, chemistry and applied chemistry, physics and industrial physics, environmental science and technology, biotechnology, agro-industrial and food technology, medical science and applications, health and beauty technology, computer and informatic science and materials science

Peer Review Process

Each article must be double blind peer reviewed by at least 3 reviewers from the related field.

Human and Animal Ethics in Research

The authors are requested for the appropriate disclosures and declarations if their research involves human participants and animals having an impact on their right, prestige, safety, and health. Hence, they must receive approval from the appropriate ethics committees for research involving humans and/or animals and submit the evidence of approval with the manuscript. Starting from May, 1st 2022)

Language

Both Thai and English

Publication Frequency

Once every four months (Triannual)

First Issue: January to April

Second Issue: May to August

Third Issue: September to December

Remarks

Authors have to be responsible for any legal effects that may occur due to their opinions expressed in the articles.

Website for submissions: www.tci-thaijo.org/index.php/JASCI

Contact: jaset@sci.kmutnb.ac.th

Copyright©2025 by Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced stored or transmitted in any material form or by any methods including electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior written permission of the publisher, except in accordance with the provisions of the Copyright Design and Patents Act 1988.

TABLE OF CONTENT

Editorial Corner (invitation article)

Extending the Legacy: A Journey into the Emerging World of Fractional Quantum Calculus

*Thanin Sitthiwirattam**.....e900007

Research Articles

Thermodynamic Modeling of Experimental Data for the Adsorption of Ternary Antibiotic Mixture from Aqueous Solution Using Flamboyant-Pod-Based Activated Carbon

Ojo Ilesanmi Ademola, Ajani Adegbenro Sunday, Ajani Oluwatayo Sandra,*

and Mustapha Lateef Olajuwon.....e264720

Geopolymer as a Viable Alternative for Moisture Control and Partial Discharge Mitigation in Buildings of Electrical Substations

Usman Ugbede Abdullahi Ocheni, Ibrahim Wahab Fawole, Olawale Ramoni Amusat,*

Lateef Olajuwon Mustapha, Suleiman Shehu Suleiman, and Rilwan Salau.....e264580

Forecasting the Elderly Population in Songkhla Province Using the Box-Jenkins Method

Jutamas Boonradsamee, Kulteera Thongyai, and Rugkita Ieamwijarn*.....e265260

Forecasting the Number of Road Accidents in Major and Secondary Tourist Cities in Thailand

การพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก และเมืองท่องเที่ยวรองในประเทศไทย

*Kanmalin Jaroenchasri, and Yupaporn Areepong**.....e263552

A Model for Analyzing Shuttlecock Landing Position Using Real-Time Object Detection Techniques

แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตันด้วยเทคนิค การตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์

*Mathuros Panmuang, and Chonnikarn Rodmorn**.....e265289

Extending the Legacy: A Journey into the Emerging World of Fractional Quantum Calculus

Thanin Sitthiwiratham^{1,2}

¹Mathematics Department, Faculty of Science and Technology, Suan Dusit University, Bangkok, 10300, Thailand

²Research Group for Fractional Calculus Theory and Applications, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800, Thailand

* Corresponding Author, E-mail: thanin_sit@dusit.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.001

Received 15 December 2025; **Revised** 23 December 2025; **Accepted** 25 December 2025

ABSTRACT

This paper provides a comprehensive and rigorous exposition of **Fractional Quantum Calculus (FQC)**, a sophisticated mathematical framework that systematically extends classical integer-order quantum calculus to the realm of arbitrary fractional orders. We delineate the construction of five interconnected yet distinct types of fractional difference operators: the foundational **Fractional Difference Calculus (FDC)**, **Fractional q -Difference Calculus (FqDC)**, and **Fractional Hahn Difference Calculus (FHDC)**, complemented by the advanced generalizations **Fractional Symmetric Hahn Difference Calculus (FSHC)** and **Fractional (p, q) -Calculus (FpqC)**. The unifying principle undergirding all five frameworks involves the non-integer generalization of iterated summation, leading to the derivation of both Riemann-Liouville and Caputo operators. Fractional quantum calculus furnishes an indispensable analytical instrument for modeling intricate physical and biological phenomena characterized by **inherent non-locality**, **memory-dependent behavior**, and **discrete dynamical evolution**, capabilities that transcend the limitations of conventional integer-order mathematical models.

KEYWORDS: Fractional quantum calculus, Fractional difference calculus, Fractional q -difference calculus, Fractional Hahn difference calculus, Symmetric Hahn difference, (p, q) -calculus, Non-local phenomena, Memory effects, Discrete systems

1. INTRODUCTION: UNIFYING THE DISCRETE, THE QUANTUM, AND THE FRACTIONAL

The mathematical landscape of **Fractional Calculus (FC)** traces its intellectual lineage to the foundational philosophical inquiries of Leibniz and de l'Hôpital in the waning years of the seventeenth century (Miller & Ross, 1989, Gray & Zhang, 1988). What began as an abstract theoretical speculation has matured into a robust and indispensable analytical tool for elucidating the behavior of complex systems across diverse scientific domains, including viscoelasticity, anomalous diffusion phenomena, and chaotic dynamics (Anastassiou, 2009, Ferreira & Torres, 2011). The distinctive merit of fractional calculus lies in its inherent capacity to encapsulate the temporal history and memory characteristics of dynamical systems, a feature conspicuously absent from the classical integer-order derivative formalism (L'Hôpital, 1695, Leibniz, 1695).

In parallel, the necessity to model phenomena occurring on discrete temporal scales or non-uniformly distributed grids catalyzed the emergence of **Quantum Calculus**, a calculus architecture constructed independently of the limiting process (Al-Salam, 1966, Agarwal, 1969). This framework encompasses several fundamental quantum operators: the h -difference operator (operative on uniformly spaced time scales), the q -difference operator or Jackson derivative (operative on geometric time scales), and the Hahn difference operator (synthesizing both uniform and geometric scaling).

The transformative synthesis emerges from the convergence of these two mathematical paradigms: **Fractional Quantum Calculus**. This novel theoretical structure furnishes a unified analytical vocabulary for investigating systems exhibiting both discrete-time characteristics *and* non-local

(memory-dependent) phenomena. This exposition systematically examines the mathematical construction and practical utility of five major classes of fractional quantum calculi, tracing the field's trajectory from its foundational principles to its contemporary, highly generalized instantiations.

2. THE THEORETICAL FOUNDATION: CORE PRINCIPLES OF FRACTIONAL QUANTUM CALCULUS

The rigorous construction of fractional operators within the quantum calculus paradigm rests fundamentally upon two indispensable mathematical constructs: the **Gamma Function** $\Gamma(\cdot)$ and the generalized **Falling Factorial Function**.

2.1. The Generalization Principle

The transition from integer order m to fractional order α is universally effected through the generalization of the formula for the m -fold iterated sum (or integral) using the Gamma function. Within a discrete system, the fractional sum of order α is defined as the foundational operator, with the fractional difference serving as its inverse operator.

2.2. The Two Principal Operators

All fractional quantum operators adhere to two canonical formulations, which determine how the temporal history of the function is incorporated into the operator:

- **Riemann-Liouville (R-L) Fractional Difference:** This operator is defined as an integer-order difference applied to a fractional-order sum. It is predominantly employed in theoretical investigations and exhibits dependence on the initial summation point.

- Caputo Fractional Difference:** Defined as a fractional-order sum of an integer-order difference, the Caputo formulation possesses a marked advantage in applied mathematical modeling: it admits initial conditions structurally analogous to those employed in classical integer-order calculus (namely, the specification of the function and its integer-order derivatives at an initial time), thereby facilitating application to boundary value problems and initial value problems.

3. THE FOUNDATIONAL TRIUMVIRATE: PRIMARY FRACTIONAL DIFFERENCE OPERATORS

The early development phase of fractional quantum calculus centered upon the fractional generalizations of three primary quantum operators.

3.1. Fractional Difference Calculus (FDC)

This constitutes the cornerstone of discrete fractional analysis, constructed upon the h -difference operator defined as $\Delta_h f(t) = \frac{f(t+h)-f(t)}{h}$ (with $h = 1$ for the classical discrete difference). Figure 1 shows the shift in $f(t)$ -value and the shift in t -value of Fractional Difference Calculus.

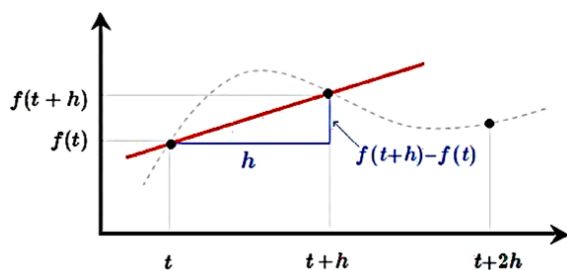


Figure 1 Displays the shift in $f(t)$ -value and the shift in t -value of Fractional Difference Calculus (as shown in (Sitthiwirattam, 2020)).

Construction: The theoretical edifice rests upon the discrete Gamma function and the associated h -falling factorial, denoted $t^{(\alpha, h)}$.

Applications: This framework proves indispensable for modeling phenomena evolving on **uniform temporal grids** where memory effects play a significant role, exemplified in financial mathematics, discrete-time control systems, and difference equations arising from the calculus of variations (Ferreira, 2011).

3.2. Fractional q -Difference Calculus (FqDC)

This calculus is constructed upon the **Jackson q -difference operator**, which operates on a **geometric time scale** characterized by the progression $(t, qt, q^2t, \dots)$. Figure 2 demonstrates the shift in $f(t)$ -value and the shift in t -value of q -Difference Calculus.

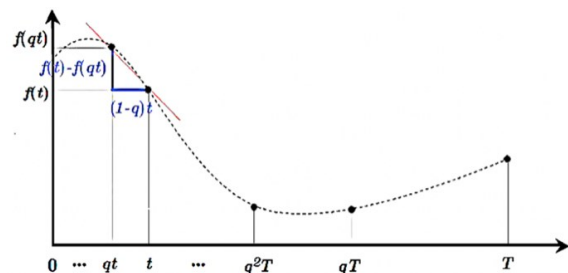


Figure 2 Displays the shift in $f(t)$ -value and the shift in t -value of Fractional q -Difference Calculus (as shown in (Sitthiwirattam, 2020)).

Construction: The theoretical framework employs the q -analogue of the Gamma function and the fractional q -Falling Factorial. The foundational fractional q -Integral (Kac & Cheung, 2002, Ernst, 2012) constitutes the precursor to both the R-L and Caputo q -difference operators.

Applications: This formalism possesses considerable relevance in theoretical physics, particularly in quantum field theory and molecular physics, and is applicable to any system exhibiting geometric progression or inherent scaling symmetry. Furthermore, it proves instrumental in solving advanced boundary value problems for fractional q -differential equations (Čermák & Nechvatál, 2010).

3.3. Fractional Hahn Difference Calculus (FHDC)

The Hahn operator $D_{q,\omega}$ represents a synthesis of the h -difference and q -difference operators, thereby creating a more versatile **affine time scale**. The shift in $f(t)$ -value and the shift in t -value of Fractional Hahn Difference Calculus is shown in Figure 3.

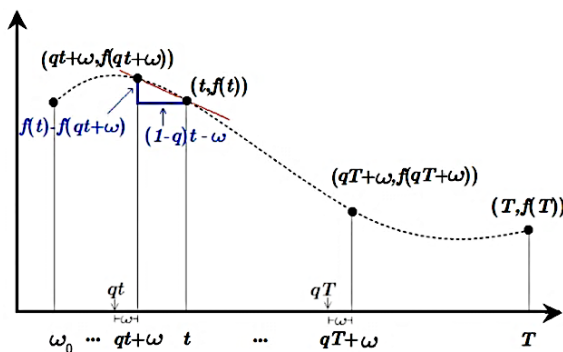


Figure 3 Displays the shift in $f(t)$ -value and the shift in t -value of Fractional Hahn Difference Calculus (as shown in (Sitthiwirattam, 2020)).

Construction: Introduced by Brikshavana and Sitthiwirattam in 2017 (Brikshavana & Sitthiwirattam, 2017), this calculus develops its integral and differential operators (Riemann-Liouville and Caputo forms) utilizing the q -Gamma function and the fractional (q, ω) -falling factorial.

Applications: The fractional Hahn difference calculus serves as a **unifying theoretical platform**, offering a systematic approach to generalize results from both FDC and FqDC. It has proven instrumental in the investigation of complex nonlocal boundary value problems incorporating fractional Hahn integral boundary conditions (Brikshavana & Sitthiwirattam, 2018).

4. THE ADVANCING FRONTIER: ADVANCED GENERALIZATIONS AND CONTEMPORARY EXTENSIONS

Recent scholarly developments have substantially enlarged the scope of fractional quantum calculus by introducing progressively more general or specialized difference operators, thereby

significantly amplifying the field's analytical capabilities.

4.1. Fractional Symmetric Hahn Difference Calculus (FSHC)

The **Symmetric Hahn Difference Operator**, denoted $\tilde{D}_{q,\omega}$, represents a sophisticated extension of the classical Hahn operator, engineered to simplify analytical procedures through the manifestation of distinct symmetrical properties.

Construction: Developed by Patanarapeelert and Sitthiwirattam in 2019 (Patanarapeelert & Sitthiwirattam, 2019), this calculus formulates the **fractional symmetric Hahn integral** alongside the corresponding Riemann-Liouville and Caputo symmetric difference operators.

Applications: This theoretical framework proves essential for addressing highly intricate nonlocal boundary value problems of symmetric character, specifically those involving sequential Caputo fractional Hahn integrodifference equations and nonlocal Robin-type boundary conditions (Patanarapeelert & Sitthiwirattam, 2018, Soontharanon & Sitthiwirattam, 2022). The symmetric character of the operator substantially simplifies the analytical techniques employed for establishing existence and uniqueness results.

4.2. Fractional (p, q) -Calculus (FpqC)

The (p, q) -calculus, characterized by the parameter constraint $0 < q < p \leq 1$, represents the most contemporary and maximally generalized formulation, inherently containing standard q -calculus as a particular limiting case (when $p = 1$).

Construction: Introduced by Soontharanon and Sitthiwirattam in 2020 (Soontharanon & Sitthiwirattam, 2020), this calculus is grounded in the (p, q) -difference operator and defines the **fractional (p, q) -integral** with corresponding Riemann-Liouville and Caputo operators. The theoretical development necessitates employment

of the generalized (p, q) -Gamma and (p, q) -falling factorial functions.

Applications: The fractional (p, q) -calculus framework provides two-parameter flexibility, conferring substantial advantages in both approximation theory and operator-theoretic investigations. Its principal applications encompass demonstrating convergence properties for iterates of (p, q) -Bernstein operators, and establishing a diverse array of inequalities, for example Opial-type integral, trapezoid and midpoint-type inequalities. These developments yield tighter analytical bounds for discrete systems (Nasiruzzaman et al., 2019, Neang et al., 2021). Furthermore, applications to elastic beam analysis and related structural mechanics problems underscore the practical utility of this framework in engineering contexts (Etemad et al., 2024).

5. THE MATHEMATICAL TOOLKIT: COMPARATIVE ANALYSIS OF FQC

The significance of fractional quantum calculus transcends the boundaries of pure mathematics; it furnishes a high-fidelity analytical lens for examining discrete, memory-laden phenomena in the natural world.

Table 1 Comparative framework of five major fractional quantum calculus types (Sitthiwiratham, 2021)

FQC Type	Governing Time Scale / Parameters	Core Analytical Advantage
FDC	Uniform $t, t+h, t+2h, \dots$	Discrete memory on regular grids
FqDC	Geometric $t, qt, q^2t, \dots$	Non-uniform evolution, scaling symmetry
FHDC	Affine $\sigma_{q,\omega}^k(t)$	Unified FDC/FqDC framework
FSHC	Affine/Symmetric $\sigma_{q,\omega}^k(t) - \rho_{q,\omega}^k(t)$	Symmetric BVP analysis
FpqC	Two-Parameter Affine $p^k q^{n-k} t$	Maximal parameter flexibility

where $\sigma_{q,\omega}^k(t) := q^{kt} + \omega[k]_q$ and $\rho_{q,\omega}^k(t) := \frac{t-\omega[k]_q}{q^k}$.

The paramount contribution of fractional quantum calculus across these diverse applications manifests in its capacity to accurately incorporate the **non-local kernel** inherent to fractional operators, thereby transforming frequently inadequate integer-order models into sophisticated analytical instruments that respect the complete temporal history and intrinsic mathematical structure of the system.

6. CONCLUSIONS AND FUTURE TRAJECTORIES

The field of Fractional Quantum Calculus has progressed beyond its nascent phase to embrace increasingly sophisticated multi-parameter generalizations. The foundational unifying principle, the systematic generalization of the iterated sum or integral has demonstrated remarkable robustness, constituting the structural foundation for all advanced operators, spanning from the elementary FDC to the sophisticated FpqC.

The trajectory for future mathematical inquiry is substantial and vital for the field's continued maturation:

- **Stability and Asymptotic Analysis:** The foundational theory pertaining to the **stability characteristics and asymptotic behavior** of solutions to generalized fractional quantum calculus remains incompletely developed. Rigorous mathematical investigation in this domain constitutes a prerequisite for dependable application in engineering and control systems.
- **General Solution Methodologies:** Whereas existence and uniqueness theorems proliferate extensively, comprehensive and generally applicable **analytical techniques for solving** the diverse classes of fractional quantum

differential equations remain severely constrained. The development of advanced transformation methods and series solution techniques will prove essential for realizing the complete potential of these mathematical models.

- **FSHC and FpqC Expansion and Specialization:** Additional exploration of the distinctive advantages inherent to the two-parameter in domains extending beyond approximation theory, such as non-local dynamical systems and fractional integral transforms, represents a particularly promising avenue for investigation.

The classical inheritance of traditional calculus is undergoing a profound transformation, being forged into an innovative mathematical apparatus precisely calibrated to represent the fundamental discreteness and memory characteristics intrinsic to contemporary scientific inquiry.

ACKNOWLEDGMENT

The author wishes to express sincere gratitude to the Journal of Applied Science and Emerging Technology (JASET), published by the Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand, for the gracious invitation to contribute this article to the Editorial Corner. This opportunity is deeply appreciated, allowing for the sharing of insights and perspectives with the journal's esteemed readership and the broader scientific community.

REFERENCES

Agarwal, R. P. (1969). Certain fractional q -integral and q -derivatives. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 66, 365-370.

Al-Salam, W. A. (1966). Some fractional q -integrals and q -derivatives. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 15(2), 135-140.

Anastassiou, G. A. (2009). Discrete fractional calculus and inequalities. *Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations*, 2009(1), 1-12.

Brikshavana, T., & Sitthiwiratham, T. (2017). Existence results for fractional Hahn difference and fractional Hahn integral boundary value problems. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2017(1), 7895186.

Brikshavana, T., & Sitthiwiratham, T. (2017). On fractional Hahn calculus with the delta operators. *Advances in Difference Equations*, 2017(1), 354.

Brikshavana, T., & Sitthiwiratham, T. (2018). On fractional Hahn integrodifference equations with nonlocal integral boundary conditions. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 460(2), 573-594.

Čermák, J., & Nečvatál, L. (2010). On q, h -analogue of fractional calculus. *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, 17(1), 51-68.

Ernst, T. (2012). *A Comprehensive Treatment of q -Calculus*. Birkhäuser.

Etemad, S., Ntouyas, S. K., Stamova, I., & Tariboon, J. (2024). On solutions of two post-quantum fractional generalized sequential Navier problems: an application on the elastic beam. *Fractal and Fractional*, 8(4), 236.

Ferreira, R. A. C. (2011). Discrete fractional calculus and fractional difference equations. *Journal of Approximation Theory*, 164(3), 304-320.

Ferreira, R. A. C., & Torres, D. F. M. (2011). Fractional h -difference equations arising from the calculus of variations. *Applicable Analysis and Discrete Mathematics*, 5(1), 110-121.

Gray, H. L., & Zhang, N. F. (1988). On a new definition of the fractional difference. *Journal of Applied Probability*, 25(Supplement), 53-73.

Kac, V., & Cheung, P. (2002). *Quantum Calculus*. Springer-Verlag.

Leibniz, G. W. (1695). *Letter to G. F. A. de L'Hôpital*, October 15, 1695.

L'Hôpital, G. F. A. de. (1695). *Letter to G. W. Leibniz*, September 30, 1695.

Miller, K. S., & Ross, B. (1989). Fractional difference calculus. In *Proceedings of the International Symposium on Univalent Functions, Fractional Calculus, and Their Applications*, Nihon University, Koriyama, Japan. pp. 139-152.

Nasiruzzaman, M., Mukheimer, A., & Mursaleen, M. (2019). Some Opial-type integral inequalities via (p, q) -calculus. *Journal of Inequalities and Applications*, 2019(1), 295.

Neang, P., Nonlaopon, K., Tariboon, J., Ntouyas, S. K., & Agarwal, P. (2021). Some trapezoid and midpoint type inequalities via fractional (p, q) -calculus. *Advances in Difference Equations*, 2021(1), 333.

Patanarapeelert, N., & Sitthiwiratham, T. (2018). On nonlocal Robin boundary value problems for Riemann–Liouville fractional Hahn integrodifference equation. *Boundary Value Problems*, 2018(1), 46.

Patanarapeelert, N., & Sitthiwiratham, T. (2019). On Fractional Symmetric Hahn Calculus. *Mathematics*, 7(10), 873.

Sitthiwiratham, T. (2020). Quantum calculus (Calculus without limit) with the filling of the missing spaces of utilization. *Journal of Science Innovation for Sustainable Development*, 2(1), 1–9.

- Sitthiwiratham, T. (2021). Knowledge for the future: Fractional quantum calculus (Calculus without limit). *Journal of Science Innovation for Sustainable Development*, 3(1), 1–9.
- Soontharanon, J., & Sitthiwiratham, T. (2020). On fractional (p, q) -calculus. *Advances in Difference Equations*, 2020(1), 35.
- Soontharanon, J., & Sitthiwiratham, T. (2022). On sequential fractional Caputo (p, q) -integrodifference equations via three-point fractional Riemann-Liouville (p, q) -difference boundary condition. *AIMS Mathematics*, 7(1), 704-722.

Thermodynamic Modeling of Experimental Data for the Adsorption of Ternary Antibiotic Mixture from Aqueous Solution Using Flamboyant-Pod-Based Activated Carbon

Ojo Ilesanmi Ademola^{1,2*}, Ajani Adegbenro Sunday¹, Ajani Oluwatayo Sandra³, and Mustapha Lateef Olajuwon²

¹Department of Physics and Material Science, Faculty of Pure and Applied Sciences, Kwara State University, Malete, Nigeria.

²Department of Physical Sciences, Faculty of Natural and Applied Sciences, Al-Hikmah University, Ilorin, Kwara State, Nigeria.

³Department of Medicine, Ladoke Akintola University of Technology Teaching Hospital, P.M.B 4001, Ogbomosho, Oyo state, Nigeria.

* Corresponding Author, E-mail: iaojo@alhikmah.edu.ng DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.002

Received 6 November 2025; **Revised** 19 December 2025; **Accepted** 25 December 2025

ABSTRACT

Antibiotic contamination in water poses significant environmental and public health risks, necessitating low-cost and sustainable treatment solutions. This study explores the development of Flamboyant-Pod-based Activated Carbon (FPAC), a bio-based adsorbent, for the removal of a Ternary Antibiotic Mixture (TAM). Raw Flamboyant Pods (FPs) were pretreated, chemically activated with Potassium Hydroxide (KOH), and carbonized at 500 °C for 40 min. The structural and surface modifications of FPAC were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy-Dispersive X-ray (EDX) analysis and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis. Batch adsorption experiments were performed under varying conditions of contact time (10-240 min), initial concentrations (20-100 mg/L), and temperatures (40-60 °C). Adsorption thermodynamic parameters, including Gibb's Free Energy (ΔG°), Enthalpy Change (ΔH°), Entropy Change (ΔS°), Isothermic Heat of Adsorption (ΔH_x), Activation Energy (E_a), Sorption Probability (S^*), Surface Coverage (θ), and Hopping Number (n), were evaluated to determine adsorption feasibility and mechanisms. FPAC exhibited a porous structure with enhanced carbon content and new functional groups, promoting chemical interactions with antibiotics. Adsorption proceeded rapidly within the first 100 min, achieving maximum capacities of 9.371 mg/g (Amoxicillin, AMO), 9.310 mg/g (Tetracycline, TETRA), and 8.733 mg/g (Ampicillin, AMP). Corresponding removal efficiencies were 85.91, 91.24, and 78.67%. Thermodynamic analysis revealed negative ΔG° and ΔH° values, confirming a spontaneous and exothermic process, while ΔH_x and E_a values indicated predominantly physisorption-driven adsorption. The findings establish FPAC as an efficient, low-cost, and environmentally friendly adsorbent with strong potential for the remediation of antibiotic-contaminated wastewater.

KEYWORDS: Activated carbon, Flamboyant pod, Antibiotic, Adsorption, Thermodynamic

Please cite this article as: A. Ojo S. Ajani S. Ajani and O. Mustapha, "Thermodynamic Modeling of Experimental Data for the Adsorption of Ternary Antibiotic Mixture from Aqueous Solution Using Flamboyant-Pod-Based Activated Carbon," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 24, no 3, pp. 1-13, ID. 264720, December 2025

1. INTRODUCTION

Water pollution, particularly from industrial and pharmaceutical waste, is a major global environmental challenge (Dufatanye et al., 2022; Gautam et al., 2024). Untreated wastewater discharged into natural water bodies degrades ecosystems, threatens biodiversity, and contributes to the spread of waterborne diseases (Abdelkarim and Djamila, 2020; Ortúzar et al., 2022). Among the pollutants of growing concern are pharmaceutical residues, especially antibiotics, which persist in aquatic environments and contribute to the development of antibiotic-resistant bacteria (Nomngongo and Chaba, 2019; Azarpira et al., 2019). Conventional wastewater treatment methods such as coagulation, flocculation, membrane separation, and chemical oxidation are often costly, inefficient, and produce toxic sludge (Renugadevi and Krishnaveni, 2021). Adsorption, in contrast, is widely regarded as a superior method due to its low cost, efficiency, ease of operation, and ability to remove diverse pollutants (Azarpira et al., 2019). However, the search for inexpensive, renewable, and effective adsorbents remains critical.

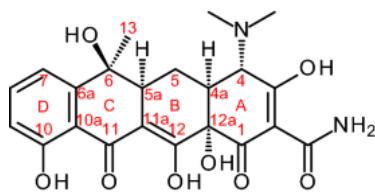
Flamboyant pod (*Delonix regia*) is an abundant agricultural residue that contributes to solid waste disposal problems in tropical regions (Abulude and Adejayan, 2017). Converting flamboyant pods waste into activated carbon provides a sustainable strategy for both waste management and water purification. Previous studies have demonstrated that activation with alkaline agents, such as KOH, enhances pore development and surface functionality, improving adsorption capacity (Ravichandran et al., 2018; Deyi et al., 2023).

Tetracyclines have been widely applied not only in human and veterinary medicine but also at sub-therapeutic levels in animal feed as growth promoters due to their low cost and broad

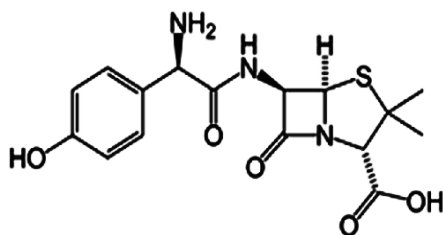
antimicrobial activity (Fomnya et al., 2021). They are among the most frequently detected antibiotics in the environment, ranking second globally in occurrence. Studies have revealed that tetracyclines are harmful to aquatic organisms. They inhibit the growth of various algal species and display embryotoxic effects in fish, highlighting their potential to disrupt aquatic ecosystems (Roberts and Chopra, 2021). The environmental persistence and biological impacts of tetracyclines underscore the urgent need for effective wastewater treatment strategies to mitigate their release and accumulation. The chemical structure of tetracycline is shown in Scheme 1.

Amoxicillin is also the most commonly prescribed antibiotic for children and for the treatment of bacterial infections. Over 80% of orally administered amoxicillin in humans is excreted unchanged in urine within two hours of consumption (Barbooti and Zahraw, 2020). Traces of the drug and its degradation products are frequently detected in aquatic environments. The predominant environmental sources of amoxicillin include the excretion of unmetabolized antibiotics by humans and animals, the disposal of unused or expired drugs, and wastewater discharges from pharmaceutical manufacturing plants (Choffor-Nchinda et al., 2018). The chemical structure of amoxicillin is shown in Scheme 2.

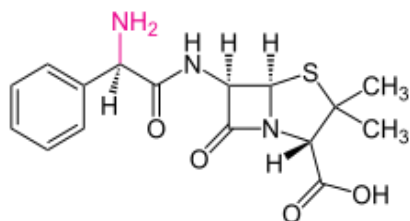
Ampicillin is used to treat a variety of bacterial infections, including ear and respiratory tract infections, and endocarditis. In obstetrics, it is used for the prevention of group B streptococcal infections in newborns and for in utero therapy. It also has applications in veterinary medicine, for example, in the treatment of *Clostridium* infections in poultry (Nafisur and Poornima, 2020). Ampicillin is regarded as a non-biodegradable antibiotic due to its persistence in the environment, and its removal has



Scheme 1 Chemical structure of tetracycline (Roberts and Chopra, 2021)



Scheme 2 Chemical structure of amoxicillin (Barbooti and Zahraw, 2020)



Scheme 3 Chemical structure of ampicillin (Nafisur and Poornima, 2020)

become an important focus in environmental remediation studies. The chemical structure of ampicillin is shown in Scheme 3.

Most adsorption studies focus on single-solute systems, yet real wastewater typically contains multicomponent mixtures (Wei et al., 2019; Alnajrani and Alsager, 2020; Amrutha et al., 2023). Investigating adsorption in multicomponent systems is therefore essential for real-world applications. This study develops activated carbon from flamboyant pods and applies it for the adsorption of a ternary antibiotic mixture (tetracycline, ampicillin, and amoxicillin) from aqueous solutions. The research integrates thermodynamic analyses to understand the adsorption mechanism and establish the feasibility of FPAC as a low-cost, eco-friendly adsorbent for pharmaceutical wastewater remediation.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Equipment, Chemicals and Sample

The experimental setup included a muffle furnace, mechanical flask shaker, digital analytical balance, UV-Vis spectrophotometer, rotary shaker, magnetic stirrer, pH meter, thermometer, desiccator, oven, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, Varian 660 MidIR Dual MCT/DTGS Bundle with ATR) and Scanning electron microscopy (SEM, Hitachi SU 3500, Tokyo, Japan).

Selected antibiotics (AMO, TETRA, and AMP) were purchased from One Step Pharmaceutical Store, Ilorin. Analytical-grade chemicals and reagents used include potassium hydroxide, hydrochloric acid, sodium hydroxide, potassium bromide, potassium sulphate, barium chloride, sulphuric acid, and phenanthroline. All were used as received without further purification.

2.2 Sample Pre-treatment

Flamboyant pods were collected from Mandate Estate, Ilorin, Nigeria (8.4752 °N, 4.5058 °E). The pods were washed, rinsed with distilled water, cut into smaller pieces, sun-dried, ground, and sieved (425-850 µm) using a sieve shaker (Deyi et al., 2023).

2.3 Activation and Carbonization of FPAC

Potassium hydroxide solutions of different molarities (0.5, 0.75, and 1.0 M) were prepared by dissolving 28, 42, and 56 g of KOH, respectively, in 1 L of distilled water. Equal particle sizes of FP (10 g) were then soaked in 100 mL of KOH solution (0.5-1.0 M) at room temperature for 24 h. After soaking, the mixture was evaporated to a paste, cooled, thoroughly washed with distilled water, and neutralized using 0.1 M HCl and 0.1 M NaOH until the pH reached 6.9-7.1. The resulting material was oven-dried at 105 °C overnight, cooled in a desiccator, and subsequently carbonized in a muffle furnace at 500 °C for 40 min (Ravichandran et al., 2018; Nomngongo and Chaba, 2019).

2.4 Characterization of FPAC

Surface chemistry was analyzed by mixing FP samples with potassium bromide in a 1:100 ratio. Spectra were recorded in the 4000-400 cm^{-1} range at 4 cm^{-1} resolution with 200 scans per sample (George et al., 2014; Mashkovtsev et al., 2023). Morphological features of FPAC were examined using SEM after sputter-coating with a 20 nm gold layer. Images were recorded at variable magnifications to study pore development (Ravichandran et al., 2018; Sarwar et al., 2021).

2.5 Optimization of TAM Stock Solutions

The TAM mixing ratio was developed using an I-Optimal Coordinate Exchange Design Model (IOCEDM) of Design Expert software. The aggregate concentration (100 mg/L) of the AMO, TETRA and AMP mixture was dissolved in distilled water at the different mixing ratios suggested by IOCEDM. Absorbance was recorded at maximum wavelength (λ_{max}) of 286.56 nm (AMO), 361.17 nm (TETRA), and 288.37 nm (AMP) with a UV-Vis spectrophotometer. Calibration curves of absorbance against concentration were developed for quantitative analysis (Okoye et al., 2018).

2.6 Batch Adsorption Experiments

Initial concentrations of 20-100 mg/L, contact time from 10 to 240 min and the effect of temperature at 40-60 °C were tested using 1.0 g of FPAC in 100 mL TAM solution. Samples were shaken at 180 rpm at room temperature and neutral pH. Supernatant was centrifuged at 180 rpm for 20 min before UV-Vis analysis (Hasan et al., 2014; Rahmanian et al., 2018; Deyi et al., 2023). The Adsorption Capacity (q_e , mg/g) and Removal Efficiency (R_e , %) were calculated using Equations 2.1 and 2.2.

$$q_e = \frac{V(C_o - C_e)}{W} \quad (2.1)$$

$$R_e = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100\% \quad (2.2)$$

where V is the solution volume (L), C_o and C_e are initial and equilibrium concentrations (mg/L), and W is adsorbent weight (g).

2.7 Thermodynamic Parameters

The thermodynamic properties of the selected TAM adsorption onto the FPAC developed were investigated based on the existing adsorption thermodynamics models. These properties often give insight into the nature (physisorption or chemisorption) and the impact of the temperature-prompted energy of the adsorption process (Sahmoune, 2018; Zeng et al., 2024).

2.7.1 Gibb's free energy, enthalpy change and entropy change

Gibb's free energy, enthalpy change and entropy change of the adsorption study were investigated based on Equations 2.3-2.6. The values of ΔH° and ΔS° are evaluated from the slope and intercepts of the linear plot of $\ln K_c$ against $\frac{1}{T}$ (Batool et al., 2018; Korkmaz and Tuna, 2025).

$$K_c = \frac{C_o - C_e}{C_e} \quad (2.3)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (2.4)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H - T \Delta S \quad (2.5)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (2.6)$$

2.7.2 Isostatic heat of adsorption

The Isostatic heat of adsorption constants, ΔH_x and K were determined from the slope and intercept, respectively from the plot of $\ln C_e$ against $\frac{1}{T}$ from Equations 2.7 and 2.8 (Patil et al., 2024)

$$\frac{d \ln C_e}{dT} = \frac{-\Delta H_x}{RT^2} \quad (2.7)$$

$$\ln C_e = -\frac{\Delta H_x}{R} \frac{1}{T} + K \quad (2.8)$$

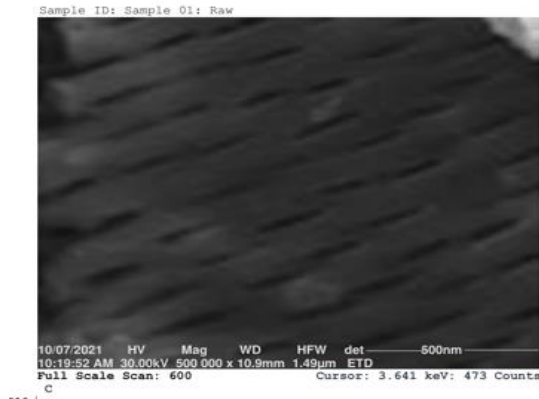


Figure 1 SEM image of the raw FP sample

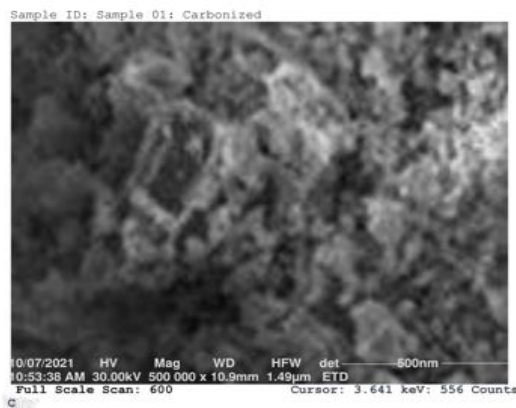


Figure 2 SEM images of the FPAC sample

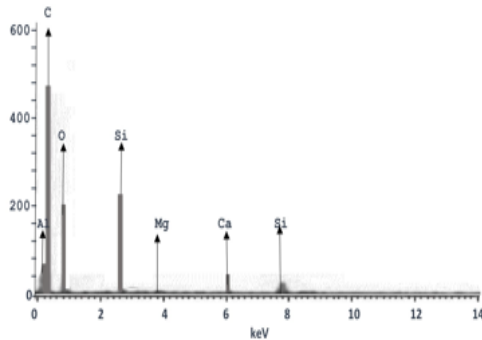


Figure 3 EDX of the raw FP sample

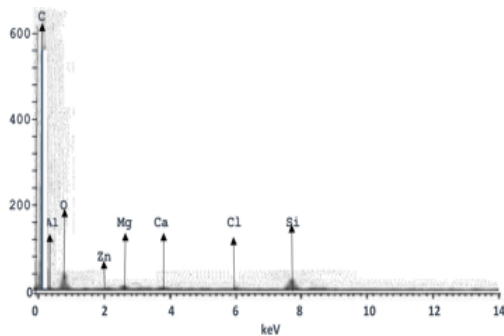


Figure 4 the EDX of the FPAC sample

2.7.3 Surface coverage versus the hopping number

The Hopping number and the surface coverage is expressed in Equation 2.9 while the relationship between the θ versus n is expressed in Equation 2.10 (Aniagor and Menkiti, 2020)

$$\theta = (1 - \frac{C_e}{C_o}) \quad (2.9)$$

$$n = \frac{1}{(1-\theta)\theta} \quad (2.10)$$

2.7.4 Activation energy and sorption probability

The activation energy and the sorption probability, E_a and S^* respectively, were evaluated from Equations 2.11 and 2.12 based on the plot of $\ln(1-\theta)$ against $\frac{1}{T}$ where the intercept and slope are $\ln S^*$ and $\frac{E_a}{R}$ respectively (Oladimeji et al., 2025).

$$\ln(1-\theta) = \ln S^* + \frac{E_a}{RT} \quad (2.11)$$

$$\ln(\frac{C_o - C_e}{C_o}) = \frac{E_a}{RT} \frac{1}{T} + \ln S^* \quad (2.12)$$

2.7.5 Eyring equations

The thermodynamic properties (ΔH^- and ΔS^-) used in the Eyring equation (Equations 2.13 and 2.14) were explicitly derived from the adsorption kinetics data under equilibrium-controlled conditions. At each temperature (313-333 K), the apparent rate constant was evaluated from the slope and intercept of the plot of $\ln \frac{k}{T}$ versus $\frac{1}{T}$ (Ebelegi, et al., 2020).

$$\ln \frac{k}{T} = (\ln \frac{k_B}{h} + \frac{\Delta S^-}{R}) - \frac{\Delta H^-}{RT} \quad (2.13)$$

$$\ln \frac{k}{T} = -\frac{\Delta H^-}{R} \frac{1}{T} + (\ln \frac{k_B}{h} + \frac{\Delta S^-}{R}) \quad (2.14)$$

where k_B is the Boltzmann constant ($1.3807 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) and h is the Plank constant ($6.6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$) and R is the universal gas constant ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Table 1 EDX results of both raw sample of FP and FPAC sample

Element	Raw FP (%)	FPAC (%)
Carbon (C)	43.11	60.75
Oxygen (O)	18.26	10.04
Silicon (Si)	22.47	10.45
Aluminum (Al)	6.12	11.23
Calcium (Ca)	5.47	2.09
Magnesium (Mg)	0.82	2.36
Potassium (K)	6.38	ND
Zinc (Zn)	ND	1.23
Chloride (Cl)	ND	0.95

ND- Not Detected

Table 2 FTIR spectra of raw sample of FP results of analysis

Peak (cm ⁻¹)	Trans (%)	Bond type	Functional group
3450.29	32.61	O-H	Hydroxyl
2925.43	64.00	CH ₂	Alkanes
1750.55	55.72	C=O	CAE
1608.50	64.38	C=C	BR
1429.03	67.21	C-H	AH
1360.96	61.80	C-O	Aldehyde
1250.40	32.05	C-O	Ether
1098.27	44.00	C-O	Alcohols
1025.01	64.26	C-O	Aldehyde
897.63	74.00	C-H	Cellulose

Table 3 FTIR spectra analysis of the FPAC sample

Peak (cm ⁻¹)	Trans (%)	Bond type	Functional group
3500.01	33.70	O-H	Hydroxyl
2973.17	64.00	C-H	Alkanes
1750.55	53.81	C=O	Carbonyl
1618.37	65.98	N-H	Amine
1497.21	68.09	C-O	AH
1360.98	64.72	C-O	Aldehyde
1250.49	33.51	C-O-C	Ether
1025.01	44.18	C-O	Aldehyde
900.15	65.22	C-H	Alkenes
850.70	70.30	C-H	Alkanes

CAE- Carbonyl, Alkenes and Ester; CA- Carbonyl and Alkenes;
 AH- Aromatic Hydrocarbon, BR- Benzene ring, Trans- Transmittance.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Development of Activated Carbon from Flamboyant Pod

Flamboyant pod activated carbon was successfully synthesized through KOH activation and carbonization at 500 °C. The activation process

promoted pore formation by degrading cellulose, hemicellulose, and lignin components, thus increasing interstitial spacing within the biomass. The breakdown of lignocellulosic structures during activation created a highly porous structure, which is desirable for adsorption. KOH acts as a dehydrating agent, enhancing carbonization and releasing volatiles, which contributes to pore development and surface functionality. This explains why FPAC shows superior adsorption performance compared to raw FP. These structural modifications are consistent with earlier reports (Ravichandran et al., 2018; Nomngongo and Chaba, 2019; Deyi et al., 2023).

3.2 Characterization of FPAC

SEM image (Figure 1) showed that raw FP exhibited dense, rod-like structures, while FPAC displayed porous and dispersed morphologies, confirming the development of adsorption sites shown in Figure 2. EDX analysis revealed elemental compositions dominated by C, O, Si, Al, and Ca (Table 1). In the FPAC sample, potassium disappeared, while Zinc and Chlorine appeared (Figures 3 and 4). Increased carbon content in FPAC suggests enhanced adsorption potential. The increased porosity after KOH activation results from the removal of volatile components and the etching effect of KOH, which widens and develops pores. The disappearance of potassium confirms effective washing, while the higher carbon percentage indicates greater adsorptive potential. The appearance of Zn and Cl may be due to contamination during treatment or enhanced mineral retention in the activated material.

FTIR spectroscopy was employed to identify the surface functional groups present on the raw FP and the KOH-activated FPAC and to evaluate chemical changes induced by alkaline activation. The spectra of raw FP and FPAC are presented in Figures 5 and

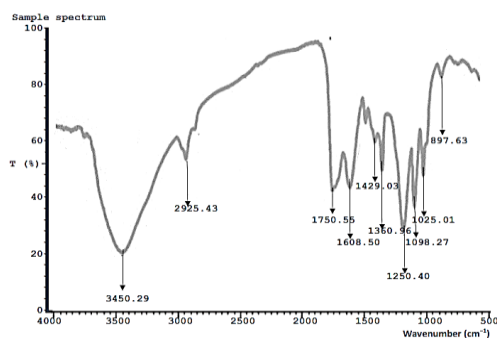


Figure 5 FTIR spectra of the raw sample of FP

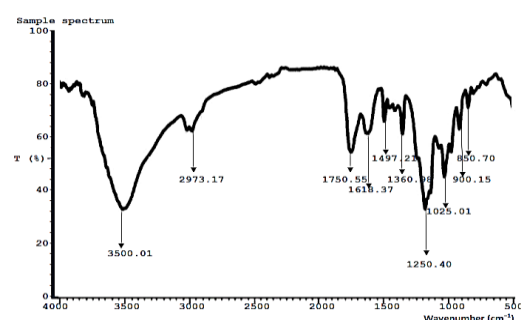


Figure 6 FTIR spectra of the FPAC sample

6, respectively, while the corresponding peak assignments are summarized in Tables 2 and 3.

The FTIR spectrum of raw FP exhibits several characteristic absorption bands associated with lignocellulosic biomass. A broad and intense band at 3450.29 cm^{-1} is attributed to O-H stretching vibrations of hydroxyl groups, arising from cellulose, hemicellulose, lignin, and adsorbed moisture. The peak at 2925.43 cm^{-1} corresponds to aliphatic C-H stretching of $-\text{CH}_2$ and $-\text{CH}_3$ groups, typical of polysaccharide and lignin structures.

A strong absorption band at 1750.55 cm^{-1} is assigned to C=O stretching vibrations, characteristic of carbonyl groups such as esters, aldehydes, and carboxylic acids presents in hemicellulose and lignin. The band observed at 1608.50 cm^{-1} is assigned to aromatic C=C stretching, confirming the presence of aromatic rings associated with lignin. Peaks in the range $1429.03\text{--}1360.96\text{ cm}^{-1}$ are attributed to C-H bending and C-O stretching,

associated with aromatic hydrocarbons and aldehyde-type functional groups.

The absorption band at 1250.40 cm^{-1} , is assigned to C-O stretching vibrations, typically arising from ethers, esters, or phenolic groups. Additional peaks at 1098.27 cm^{-1} and 1025.01 cm^{-1} correspond to C-O stretching of alcohols and aldehydes, while the band at 897.63 cm^{-1} is associated with β -glycosidic linkages, confirming the presence of cellulose.

Significant changes in the FTIR spectrum were observed after KOH activation, indicating chemical modification of the FP surface. The broad O-H stretching band persisted at 3500.01 cm^{-1} , though with reduced intensity, suggesting partial dehydration and restructuring of hydroxyl groups during activation. The aliphatic C-H stretching band at 2973.17 cm^{-1} also decreased in intensity, reflecting degradation of aliphatic chains.

The prominent peak at 1750.55 cm^{-1} in FPAC is assigned to C=O stretching, indicating the formation or retention of carbonyl-containing surface groups such as lactones, carboxylic acids, or esters following KOH activation. The appearance of a new band at 1618.37 cm^{-1} is attributed to N-H bending vibrations, suggesting nitrogen incorporation or surface amine functionalities, which can enhance adsorption via hydrogen bonding.

Bands observed at 1497.21 cm^{-1} and 1360.98 cm^{-1} correspond to C-O stretching and C-H bending, associated with aromatic and oxygenated functional groups. The absorption peak at 1250.49 cm^{-1} is assigned to C-O-C stretching vibrations, indicative of ether or ester linkages formed during chemical activation. Additional peaks between 1025.01 and 900.15 cm^{-1} are associated with C-O stretching and aromatic C-H vibrations, while the band at 850.70 cm^{-1} corresponds to out-of-plane C-H bending of aromatic structures.

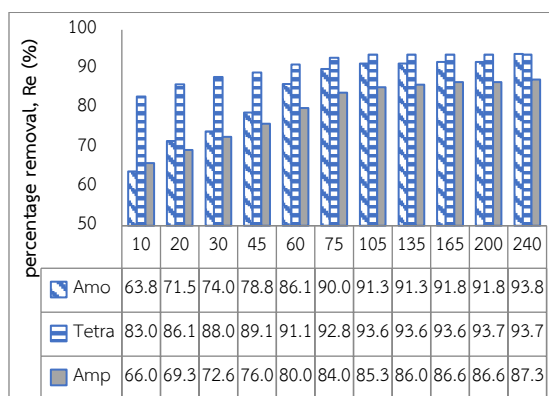


Figure 7 Removal efficiency against effect of contact time

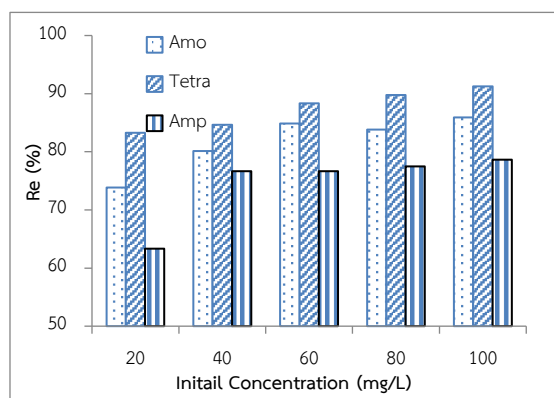


Figure 8 Removal efficiency against initial concentration

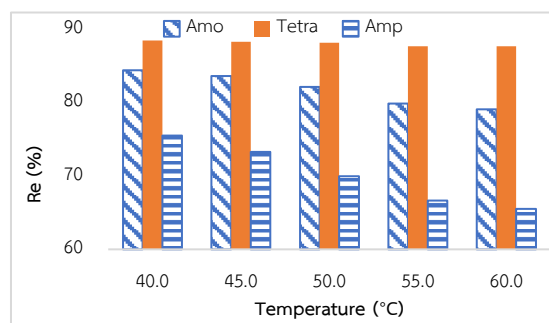


Figure 9 The plot of removal efficiency against temperature

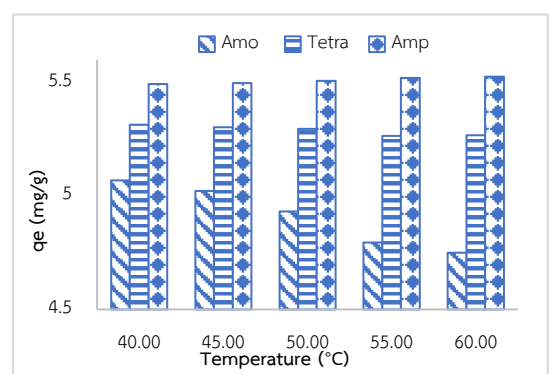


Figure 10 The plot of adsorption capacity against temperature

and nitrogen-containing groups after KOH activation confirm successful surface modification of FP. These functional groups enhance the affinity of FPAC toward polar antibiotic molecules through hydrogen bonding, π - π interactions, and electrostatic attraction, thereby improving adsorption efficiency. The FTIR results are consistent with earlier reports on chemically activated biomass-derived carbons and support the superior adsorption performance of FPAC (Seshadri et al., 2012; Ding et al., 2024).

3.3 Batch Adsorption Studies

The software generated 30 experimental runs that serve as test runs to determine the optimal condition to develop the FPAC that can give high removal efficiency of the selected antibiotics from aqueous solution. Correlation Coefficient (R^2) and standard deviation were used to evaluate the fitness of the model developed. The closeness of R^2 to unity, the smaller the standard of deviation and reasonable agreement between predicted R^2 and adjusted R^2 of less than 0.2, the better the model in predicting the response

Adsorption capacity increased rapidly during the first 100 min, followed by equilibrium plateauing (Figure 7). Maximum adsorption capacities at 100 mg/L were 9.371 mg/g (AMO), 9.310 mg/g (TETRA), and 8.733 mg/g (AMP). TETRA exhibited the highest affinity, followed by AMO and AMP consistent with earlier reports (Sahoo et al., 2018; Wang et al., 2023). The rapid uptake during the initial phase is due to abundant vacant active sites on FPAC. As equilibrium is approached, available sites become occupied, reducing adsorption rate. Higher affinity of TETRA suggests stronger interaction with FPAC functional groups compared to AMO and AMP, possibly due to its larger molecular structure and multiple binding sites.

The emergence and intensification of oxygen-containing functional groups (-OH, -C=O, -C-O-C)

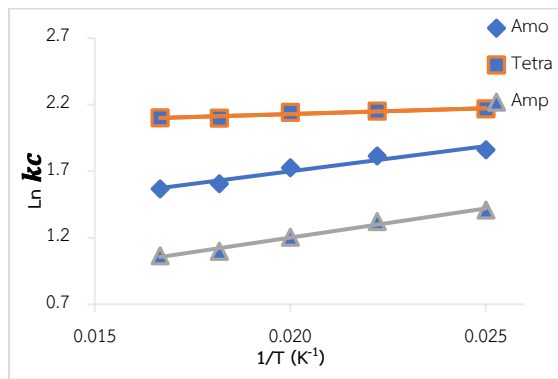


Figure 11 The plots of $\ln k_c$ against $\frac{1}{T}$

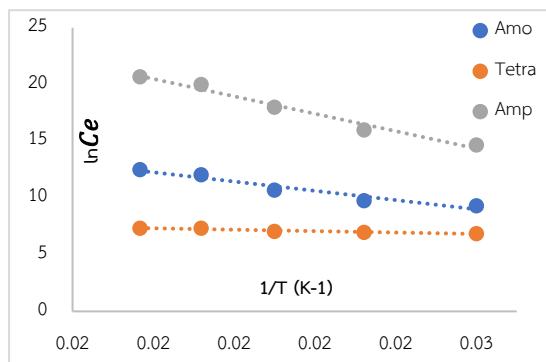


Figure 12 The plots of $\ln C_e$ against $\frac{1}{T}$

3.3.1 Effect of contact time and initial concentration

The observed trend confirms that an increase in initial concentration enhances the capacity of the FPAC. The data presented in Figures 7 and 8 demonstrate that the actual quantity of TAM adsorbed per unit mass of FPAC increased with increasing initial concentration. This behavior can be attributed to the availability of active adsorption sites on the carbon surface. The maximum removal efficiencies were 85.91% (AMO), 91.24% (TETRA), and 78.67% (AMP). These findings agree with Bello et al. (2012) and Deyi et al. (2023), confirming that FPAC offers effective adsorption even at elevated concentrations. At higher initial concentrations, the driving force for mass transfer increases, leading to higher adsorption capacity. This trend reflects competition among TAM molecules for limited adsorption sites.

3.3.2 Effect of temperature

Adsorption decreased with temperature (Figures 9 and 10), with optimum performance at 40 °C, confirming an exothermic adsorption process. At higher temperatures, increased kinetic energy favored desorption, reducing adsorption efficiency. The reduction in adsorption at elevated temperatures indicates an exothermic process. Higher thermal energy disrupts TAM-FPAC bonds, leading to desorption. This suggests that physical forces (e.g., van der Waals interactions, hydrogen bonding) dominate the process (Marczewski et al., 2016; Edet and Ifealebuegu, 2020).

3.4 Thermodynamics Studies

The influence of temperature on the adsorption of selected TAM was examined within the range of 40–60 °C under optimized conditions to evaluate the thermodynamic characteristics of the adsorption process. The findings revealed that the removal efficiency of TAM decreased with increasing temperature, particularly from 40 °C to 55 °C, indicating a temperature-sensitive adsorption process.

3.4.1 Gibbs Free Energy (ΔG°), Enthalpy (ΔH°), and Entropy (ΔS°)

Negative ΔG° values at all tested temperatures confirmed spontaneity and feasibility. The negative enthalpy changes ($\Delta H^\circ = -31.430$, -72.740 , and -36.412 kJ·mol⁻¹ for AMO, TETRA, and AMP, respectively) (Figure 11) confirm the exothermic nature of adsorption. The high magnitudes of these values indicate that the adsorption process was predominantly physisorption-driven, involving strong specific interactions between the adsorbates and the FP-based adsorbent. Any chemisorption contribution present (-72.740) is secondary and occurs concurrently with physisorption. Positive ΔS° values (7.85, 16.25, 2.71 kJ/mol·K) suggested

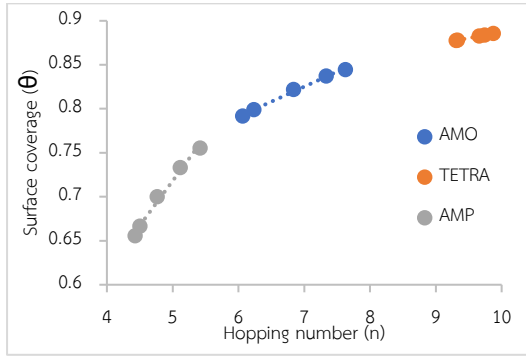
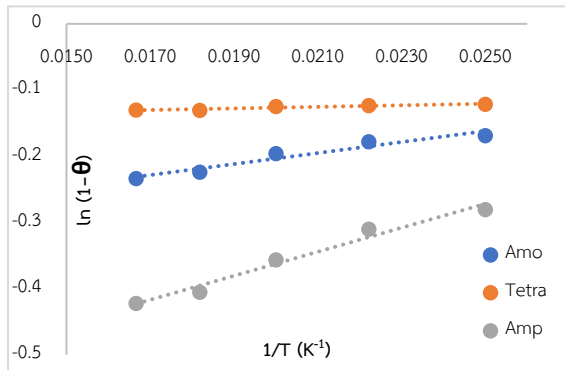
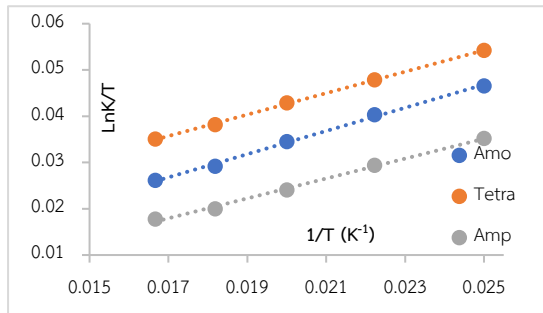


Figure 13: Surface coverage versus hopping number

Figure 14 The plot of $\ln(1-\theta)$ against $1/T$ Figure 15 The plot of $\ln \frac{k}{T}$ versus $\frac{1}{T}$

increased disorder at the adsorbent-solution interface (Table 4). These results align with similar studies (Xu et al., 2021; Lima et al., 2022). Negative ΔG° confirms feasibility, while negative ΔH° indicates adsorption is energy-releasing. The positive ΔS° suggests randomness increases at the solid-solution interface, likely due to displacement of water molecules and redistribution of solute species upon adsorption.

3.4.2 Isosteric Heat of Adsorption

The Isosteric Heat of Adsorption (ΔH_x) was derived from the slope of the $\ln C_e$ versus $\frac{1}{T}$ plot,

which displayed linearity across the tested temperature range (Figure 12). The corresponding R^2 and ΔH_x values are presented in Table 5. According to the literature (Neimark *et al.*, 2017; Al-Asadi *et al.*, 2023; Patil *et al.* 2024), physical adsorption is characterized by ΔH_x values below 40 kJ/mol, while chemical adsorption typically falls within the range of 40-800 kJ/mol. In the present study, the ΔH_x values were 33.94, 51.68, and 63.76 kJ/mol for AMO, TETRA, and AMP, respectively, indicating a predominantly chemical adsorption mechanism. These values also reflect a degree of surface energetic heterogeneity of the FP-activated carbon.

3.4.3 Surface Coverage and Hopping Number

The relationship between surface coverage and hopping number is illustrated in Figure 13. An increase in surface coverage corresponded with an increase in the mobility of the TAM toward vacant binding sites on the adsorbent surface. Variations in surface coverage and hopping number among AMO, TETRA, and AMP indicate that ampicillin more readily located binding sites on the adsorbent. The hopping number, which reflects the rate of molecular migration to adsorption sites, was smallest for AMP, suggesting a faster adsorption process. These observations are consistent with previous findings reported by Menkiti *et al.* (2014) and Aniagor and Menkiti, (2020).

3.4.4 Activation Energy and Sticking Probability

Activation energy (E_a) values were calculated from the slope of the appropriate Arrhenius plot (Figure 14) and found to be 6.9088, 9.7706, and 15.0842 kJ/mol for AMO, TETRA, and AMP, respectively. As presented in Table 5, the sticking probability (S^*) values for all antibiotics ranged between 0 and 1, confirming a favorable adsorption process characterized by a high likelihood of TAM

Table 4 Thermodynamic parameters for the uptake of AMO, TETRA and AMP onto FPAC

Adsorbate / Parameters	Temp. (K)	Amo	Tetra	Amp
R^2		0.9539	0.8924	0.9845
ΔH (kJ/mol)		-31.430	-72.740	-36.412
ΔS (kJ/gmol K)		7.8459	16.25	2.7079
ΔG (kJ/mol)	313.0	-2.7701	-5.1597	-1.2117
ΔG (kJ/mol)	318.0	-2.8093	-5.2409	-1.2252
ΔG (kJ/mol)	323.0	-2.8485	-5.3222	-1.2388
ΔG (kJ/mol)	328.0	-2.8878	-5.4035	-1.2523
ΔG (kJ/mol)	333.0	-2.9270	-5.4847	-1.2659

Table 5 Isotheric heat of adsorption, sticking probability and activation energy parameters

Adsorbate / Parameters	Amo	Tetra	Amp
ΔH_x (KJ/mol)	33.94	51.68	63.76
K	19.20	8.38	33.52
R^2	0.9429	0.8883	0.9790
E_a (kg/mol)	6.9088	9.7706	15.0842
S^*	0.6909	0.8606	0.4842

Table 6 Antibiotic uptake of Eyring equations parameters

Adsorbate / Parameters	Temp (K)	Amo	Tetra	Amp
R^2		0.9975	0.9995	0.9966
ΔH^- (kJ/mol)		-20.832	-19.261	-17.869
ΔS^- (kJ/mol)		-1.97370	-1.97270	-1.9739
ΔG^- (kJ/mol)	313	61.7560	61.7262	61.7652
ΔG^- (kJ/mol)	318	62.7428	62.7126	62.7522
ΔG^- (kJ/mol)	323	63.7297	63.6990	63.7391
ΔG^- (kJ/mol)	328	64.7165	64.6853	64.7261
ΔG^- (kJ/mol)	333	65.7034	65.6717	65.7130

molecules adhering to the FP surface. These S^* values indicate that the adsorption mechanism is primarily dependent on the adsorbate, adsorbent system and the temperature of the process (Ebelegi et al., 2020).

The positive values of E_a simply indicates the presence of an energy barrier that must be overcome before adsorption occurs. And the relatively low E_a values further indicate that the adsorption process is dominated by physisorption and is diffusion-assisted, requiring only a small energy barrier for adsorbate-adsorbent interaction.

The positive E_a values confirm the presence of an activation barrier, while the exothermic nature of the process is evidenced by the negative ΔH° values. Similar observations have been reported for biomass-derived adsorbents (Echereme et al., 2019; Ebelegi et al., 2020).

3.4.5 Eyring equations

Thermodynamic evaluation using the Eyring equation yielded large positive ΔG^- values, indicating that a significant amount of energy is required to activate the adsorption process. Thus, the reported ΔG^- values (61.76-65.71 kJ/mol across 313-333 K) as shown in Figure 15, directly reflect the temperature-dependent rate constants governing the adsorption process.

The negative ΔH^- values for AMO (-20.83 kJ/mol), TETRA (-19.26 kJ/mol), and AMP (-17.87 kJ/mol) confirm the formation of the activated complex is exothermic nature of the adsorption. Furthermore, the negative entropy changes, -1.9737, -1.9727, and -1.9739 kJ/mol-K, respectively, as shown in Table 6, suggests an associative transition state characterized by increased ordering as antibiotic molecules interact with the FPAC surface. This ordering is consistent with surface-controlled adsorption rather than bulk diffusion.

The positive ΔG^- values observed at all temperatures confirm the presence of an energy barrier that must be overcome for adsorption to proceed, indicating that although the process is thermodynamically favorable overall, it is kinetically controlled. These observations are consistent with previous adsorption studies employing the Eyring formalism (Ebelegi et al., 2020; Mechnou et al., 2022).

4. CONCLUSION

This study demonstrated that Flamboyant-pod-based activated carbon is an efficient, low-cost, and environmentally friendly adsorbent for the removal of a ternary antibiotic mixture (amoxicillin, tetracycline, and ampicillin) from aqueous solutions. Batch adsorption studies revealed that adsorption efficiency was influenced by concentration, contact time, and temperature, with optimum adsorption observed at 40 °C. Characterization by SEM, EDX, and FTIR confirmed significant surface modifications and pore development following KOH activation and carbonization. Thermodynamic analysis revealed negative ΔG° and ΔH° values, confirming that the process was spontaneous and exothermic. The isosteric heat of adsorption and activation energy values suggested that the adsorption was primarily physisorption-controlled. FPAC shows significant promise as a sustainable and effective adsorbent for the remediation of antibiotic-contaminated wastewater, contributing to environmental pollution control and resource valorization of agricultural residues.

REFERENCES

- Abdelkarim, S., & Djamil, H. (2020). Wastewater management challenges and solutions. *Journal of Environmental Science and Health*, 55(4), 320-330.
- Abulude, F. O., & Adejayan, A. O. (2017). Agricultural residues as low-cost adsorbents for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 7(6), 3651-3661.
- Al-Asadi, S. T., Al-Qaim, F. F., Al-Saedi, H. F. S., Deyab, I. F., Kamyab, H., & Chelliapan, S. (2023). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution using low-cost adsorbent: kinetic, isotherm adsorption, and thermodynamic studies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 676. doi: 10.1007/s10661-023-11334-2.
- Alnajrani, M. N., & Alsager, O. A. (2020). Antibiotics in wastewater: Occurrence, fate, and removal technologies. *Science of the Total Environment*, 720, 137574. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57616-4>
- Amrutha, J. G., Girish, C. R., Prabhu, B., & Mayer, K. (2023). Multi-component adsorption isotherms: review and modeling studies. *Environmental processes*, 10(2), 38-52. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00631-0>
- Aniagor, C. O., & Menkiti, M. C. (2020). Relational description of an adsorption system based on isotherm, adsorption density, adsorption potential, hopping number and surface coverage. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(3), 1073-1098.
- Azarpira, H., Mahdavi, M., & Nazari, R. (2019). Removal of pharmaceuticals from water using adsorption: A review. *Journal of Cleaner Production*, 223, 122-139.
- Barbooti, M. M., & Zahraw, Z. J. (2020). Antibiotics in wastewater: Impacts and challenges. *Environmental Processes*, 7(2), 459-472.
- Bello, O. S., Adegoke, K. A., & Olaniyan, A. A. (2012). Adsorptive removal of pharmaceuticals from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 44(1-3), 1-10.
- Choffor-Nchinda, E., Atanga, L. C., Nansseu, J. R., & Djomou, F. (2018). Effectiveness of amoxicillin alone in the treatment of uncomplicated acute otitis media: a systematic review protocol. *BMJ open*, 8(6), e021133.
- Deyi, A. V., Yaumi, A. L., Umar, H., Aji, M. M., & Mustafa, B. G. (2023). Adsorptive properties of Flamboyant seed pod activated carbon for the removal of anionic dye in wastewater. *Arid Zone Journal of Basic and Applied Research*, 2 (5), 124-131.
- Ding, J., Liang, J., Wang, Q., Tan, X., Xie, W., Chen, C., & Chen, X. (2024). Enhanced tetracycline adsorption using KOH-modified biochar derived from waste activated sludge in aqueous solutions. *Toxics*, 12(10), 69-81.
- Dufatanye, I., Lee, Y., Kim, H., & Lee, S. (2022). Industrial wastewater discharge and compliance investigation for environmentally resilient Rwanda. *Water*, 14(19), 3100. <https://doi.org/10.3390/w14193100>
- Ebelegi, A. N., Ayawei, N., & Wankasi, D. (2020). Interpretation of adsorption thermodynamics and kinetics. *Open Journal of Physical Chemistry*, 10(3), 166-182. <https://doi.org/10.4236/ojpc.2020.103010>
- Echereme, C. B., Nworie, O. E., & Edeh, I. J. (2019). Adsorption of pollutants on porous adsorbents at elevated temperatures. *Environmental Technology*, 40(15), 2021-2033.
- Edet, U. A., & Ifealebuegu, A. O. (2020). Kinetics, Isotherms, and Thermodynamic Modeling of the Adsorption of Phosphates from Model Wastewater Using Recycled Brick Waste. *Processes*, 8(6), 665. <https://doi.org/10.3390/pr8060665>
- Fomnya, H. J., Ngulde, S. I., Amshi, K. A., & Bilbonga, G. (2021). Antibiotics: Classifications and mechanism of resistance. *International Journal of Applied Microbiology and Biotechnology Research*, 9(15), 38-50.
- Gautam, R., Priyadarshini, E., Patel, A. K., & Arora, T. (2024). Assessing the impact and mechanisms of environmental pollutants (heavy metals and pesticides) on the male reproductive system: a comprehensive review. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 42(2), 126-153.
- George, A., Brown, R., & Wilson, D. (2014). Analytical methods in FTIR spectroscopy for biomass characterization. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 133, 200-208.
- Hasan, M. N., Rahman, M., & Alam, A. (2014). Effect of temperature on adsorption of pharmaceuticals. *Journal of Environmental Management*, 143, 145-152.

- Korkmaz, Ş., & Tuna, Ö. Adsorption potential of spherical ZnO particles for sufficient antibiotic removal: isotherm, kinetic and thermodynamics. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 5(1), 19-29.
- Lima, E. C., Hosseini-Bandegharai, A., Moreno-Piraján, J. C., & Anastopoulos, I. (2019). A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoff equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. *Journal of molecular liquids*, 273, 425-434. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048>
- Marczewski, A. W., Deryło-Marczewska, A., & Jaroniec, M. (2016). Influence of temperature on adsorption capacity of antibiotics. *Applied Surface Science*, 362, 560-570.
- Mashkovtsev, M., Tarasova, N., Baksheev, E., Rychkov, V., Zhuravlev, N., Solodovnikova, P., & Galiaskarova, M. (2023). Spectroscopic Study of Five-Coordinated Thermal Treated Alumina Formation: FTIR and NMR Applying. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5151. <https://doi.org/10.3390/ijms24065151>.
- Mechnou, I., Meskini, S., El Ayar, D., Lebrun, L., & Hlaibi, M. (2022). Olive mill wastewater from a liquid biological waste to a carbon/oxocalcium composite for selective and efficient removal of methylene blue and paracetamol from aqueous solution. *Bioresource technology*, 365, 128162. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128162>
- Nafisur, R., & Poornima, V. (2020). Assessment of ampicillin removal efficiency from aqueous solution by polydopamine/zirconium (IV) iodate: optimization by response surface methodology. *The Royal Society of Chemistry*, 10(34), 322-337.
- Neimark, A. V., Tarazona, P., & Seaton, N. A. (2017). Thermodynamics of adsorption and isosteric heat evaluation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 529, 23-33.
- Nomngongo, P. N., & Chaba, R. (2019). KOH-activated carbons for wastewater treatment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(5), 441-452.
- Okoye, C. O., Okoye, P. U., & Obi, C. (2018). Calibration and adsorption study of antibiotics in aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1531-1540.
- Oladimeji, F. O., Alade, A. O., Tijani, I. O., Abdulrasheed, W. A., Olarinde, M. O., Ilori, K. P., & Afolabi, T. J. (2025). Thermodynamic Properties of Polyaromatic Hydrocarbons Adsorption from Wastewater using Pineapple-Crown-Based Cellulose. *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)* 9(3), 80-87.
- Ortúzar, M., Esterhuizen, M., Olicón-Hernández, D. R., González-López, J., & Aranda, E. (2022). Pharmaceutical pollution in aquatic environments: a concise review of environmental impacts and bioremediation systems. *Frontiers in microbiology*, 13, 869332. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.869332>
- Patil, P., Jeppu, G., Vallabha, M. S., & Girish, C. R. (2024). Enhanced adsorption of phenolic compounds using biomass-derived high surface area activated carbon: Isotherms, kinetics and thermodynamics. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(60), 67442-67460.
- Rahmanian, B., Ali, A., & Bukhari, A. (2018). Effect of concentration on antibiotic adsorption. *Environmental Technology and Innovation*, 9, 110-119.
- Ravichandran, P., Kumar, R., & Raj, R. (2018). KOH activation and carbonization of agricultural residues. *Carbon Resources Conversion*, 1(3), 233-241.
- Renugadevi, K., & Krishnaveni, R. (2021). Comparative evaluation of wastewater treatment methods. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101967.
- Roberts, M., & Chopra, I. (2021). Tetracycline Antibiotics: Mode of Action, Applications, Molecular Biology, and Epidemiology of Bacterial Resistance. *American Society for Microbiology*, 65(2), 232-260.
- Sahoo, P. K., Patel, R. K., & Ray, S. K. (2018). Adsorption kinetics and thermodynamics of tetracycline on activated carbon. *Applied Surface Science*, 427, 513-523.
- Sarwar, A., Ali, M., Khoja, A. H., Nawar, A., Waqas, A., Liaquat, R., & Asjid, M. (2021). Synthesis and characterization of biomass-derived surface-modified activated carbon for enhanced CO₂ adsorption. *Journal of CO₂ Utilization*, 46, 101476. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2021.101476>
- Seshadri, V., Singh, K., & Mehta, M. (2012). FTIR analysis of chemically modified biomass. *Spectroscopy Letters*, 45(3), 214-222.
- Wang, C., Feng, X., Shang, S., Liu, H., Song, Z., & Zhang, H. (2023). Adsorption of methyl orange from aqueous solution with lignin-modified metal-organic frameworks: Selective adsorption and high adsorption capacity. *Bioresource Technology*, 388, 129781. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129781>
- Wei, J., Li, X., & Zhang, Y. (2019). Adsorption of antibiotics in multicomponent systems. *Journal of Hazardous Materials*, 368, 685-693.
- Xu, H., Wang, J., & Liu, S. (2021). Thermodynamic insights into antibiotic adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129646.
- Zeng, F., Chen, H., Mei, Y., Ye, L., Zhuang, S., Pu, N., & Wang, L. (2024). Performance and mechanism of sulfonamide-antibiotic adsorption by Ti₃C₂ MXene. *New Journal of Chemistry*, 48(38), 16742-16752.

Geopolymer as a Viable Alternative for Moisture Control and Partial Discharge Mitigation in Buildings of Electrical Substations

Usman Ugbede Abdullahi Ocheni^{1*}, Ibrahim Wahab Fawole¹, Olawale Ramoni Amusat¹, Lateef Olajuwon Mustapha², Suleiman Shehu Suleiman³ and Rilwan Salau^{1,4}

¹Department of Physics, University of Maiduguri, Borno State, Nigeria

²Department of Physical Sciences, Al-Hikmah University, Ilorin, Kwara State

³Department of Environmental Health Science, Bayero University, Kano, Kano State, Nigeria

⁴Department of Science Laboratory Technology, Federal Polytechnic Monguno, Borno State, Nigeria

* Corresponding Author, E-mail: oauusman@unimaid.edu.ng DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.003

Received 25 November 2025; **Revised** 24 December 2025; **Accepted** 26 December 2025

ABSTRACT

Partial discharges (PDs) accelerate insulation degradation and threaten the reliability and life-span of high-voltage substations. While PD mitigation studies largely focus on insulation materials and operating conditions, the role of substation building materials in controlling internal humidity remains underexplored. Conventional ordinary Portland cement (OPC) concrete is prone to moisture ingress, resulting in elevated humidity levels that intensify PD activity. This study reviews materials–environment–PD relationship by examining the properties of geopolymer concrete as an alternative to OPC. The conceptual proposal highlights the permeability, moisture resistance, and sustainability of geopolymer materials, and their potential to stabilise internal substation environments and mitigate humidity-driven PD risks are discussed. The study positions geopolymer concrete as a viable construction material for improving the long-term reliability of electrical substation infrastructure.

KEYWORDS: Electrical substations, Geopolymer concrete, Humidity control, Ordinary Portland cement, Partial discharge.

Please cite this article as: Ocheni, A. U. U., Fawole, I. W., Amusat, R. O., Mustapha L. O., Suleiman, S. S. & Salau, R., "Geopolymer as a Viable Alternative for Moisture Control and Partial Discharge Mitigation in Buildings of Electrical Substations," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 24, no 3, pp. 1-12, ID. 264580, December 2025

1. INTRODUCTION

Electrical substations are vital components of power networks, serving as interfaces between transmission and distribution networks. Within substations, voltage transformation to threshold operational level is carried out through various electrical equipment before power delivery to end users (Ali *et al.*, 2017; Bayliss and Hardy, 2007; Ezenwora *et al.*, 2009). The operational reliability of such equipment is influenced by the internal environmental conditions of substation buildings, which are, in turn, governed by external ambient conditions and the materials used in their construction (Byrne, 2013). In particular, a recent study reported by Ji *et al.* (2023) and Wang *et al.* (2018) have demonstrated that unfavourable environmental conditions within substations influence the partial discharge activity. Furthermore, elevated humidity, temperature fluctuations, pressure variations, and airborne pollutants increase the frequency and severity of PD responses in indoor substations. Perhaps Ji *et al.*, (2024) identified temperature, pressure, humidity, and contaminants as critical atmospheric variables influencing PD initiation and propagation. Thus, it is recommended that stringent environmental control to enhance the lifespan of electrical insulation systems must be activated.

Ordinary Portland cement (OPC) remains the most widely used construction material for electrical substation buildings. However, cement productions contribute to environmental degradation, climate change and disperse traceable level of ²³⁸U radionuclide into the environment. (Oni *et al.*, 2017; Adnan and Anas, 2025). Beyond environmental concerns, Cement-based concrete structures are inherently susceptible to moisture ingress. The absorption, adsorption, and subsequent desorption of moisture from cementitious walls elevate

internal humidity levels, creating conditions that exacerbate PD activity and accelerate insulation degradation (Byrne, 2013).

The influence of humidity on PD behaviour is well established in the literature. Ji *et al.* (2024) showed that strict regulation of humidity, temperature, and pressure is essential for extending the service life of electrical equipment. Tschentscher *et al.* (2020) demonstrated that humidity directly affects conduction processes and micro-discharge intensity at gas–solid interfaces in gas-insulated devices, highlighting moisture control as a critical strategy for reducing surface charge accumulation and PD-related failures. Li *et al.* (2021) further reported that high humidity accelerates insulation aging in transformers, reducing both electrical and mechanical strength, while Hassan *et al.* (2020) emphasized the need for comprehensive environmental monitoring to prevent insulation system failures caused by humidity, temperature, and pollution.

Despite these advances, existing PD mitigation studies predominantly focus on insulation materials, monitoring techniques, and equipment-level operating conditions, without the contribution of substation building materials to internal environmental control. Similarly, review studies on geopolymers primarily emphasize mechanical performance, durability, and sustainability, without linking these properties to partial discharge mitigation in high-voltage infrastructure. This review introduces a novel perspective by integrating geopolymer material science with partial discharge mitigation through a building–environment framework. Rather than treating PD solely as an insulation or operational problem, the study positions substation building materials as an upstream control parameter

capable of stabilising internal humidity and suppressing humidity-driven PD activity.

Geopolymer concrete (GPC), synthesized from industrial and agricultural by-products, offers a promising and sustainable alternative to OPC. Owing to its denser microstructure and lower permeability, GPC exhibits superior resistance to moisture ingress, improved durability, and enhanced environmental compatibility. These characteristics suggest its potential to maintain stable internal humidity conditions within substation buildings, thereby mitigating PD activity and prolonging the operational lifespan of electrical equipment.

The specific objectives of this study are to link (i) the moisture transport behaviour of geopolymer concrete, (ii) substation indoor environmental stability, and (iii) partial discharge mechanisms. Accordingly, this work positions geopolymer concrete not merely as a sustainable construction material, but as a functional humidity-regulating medium capable of enhancing the long-term reliability of electrical substation infrastructure.

2. MAIN BODY

2.1 Partial Discharge

Partial discharges (PDs) are localised electrical discharges that occur within or on the surface of electrical insulation materials when subjected to high-voltage electrical stress during equipment energisation (Byrne, 2013). They arise when the local electric field exceeds the dielectric breakdown strength but do not fully bridge the insulation gap between conductors. Instead, PDs cause progressive localised damage and accelerated ageing, which weakens insulation systems and can ultimately result in complete equipment failure and arc flashes (Awang *et al.*, 2017; Szilágyi *et al.*, 2023). PDs are commonly

classified into three types: corona, internal, and surface discharges (Hassan *et al.*, 2020; Melo *et al.*, 2024). Corona and internal discharges are primarily associated with factors such as mechanical wear, the presence of voids, gas ionisation around electrodes, or pre-existing deterioration within insulating materials (Wang *et al.*, 2018; Hassan *et al.*, 2020). In contrast, surface discharges are strongly influenced by adverse environmental conditions surrounding the insulation system, particularly humidity, temperature, and atmospheric pressure. Among these environmental factors, humidity plays a role in the initiation and exacerbation of surface partial discharge activity. Moisture adsorption on insulation and structural surfaces reduces surface resistivity, promotes contaminant deposition, and induces non-uniform electric field distributions, especially at material interfaces, pores, and surface defects (Wang *et al.*, 2018). Consequently, sustained high-humidity environments may compromise the long-term performance and reliability of electrical insulation in high-voltage installations. Furthermore, increased moisture content enhances ionic conduction and facilitates surface charge accumulation, leading to a reduction in PD inception voltage and an increase in discharge repetition rates (Li *et al.*, 2021). In enclosed infrastructures such as electrical substation buildings, internal humidity levels are strongly influenced by the hygroscopic behaviour and pore structure of construction materials. Conventional OPC based concrete exhibits relatively high open porosity and interconnected capillary pores, which promote water absorption, moisture retention, and cyclic adsorption–desorption processes. These moisture dynamics elevate ambient humidity and create favourable sufficient electrical conductivity for formation of conductive paths for surface PD development on electrical insulation systems. In

contrast, GPC offer intrinsic properties that can mitigate humidity-driven partial discharge mechanisms. The dense aluminosilicate gel matrix of geopolymers is characterised by reduced open porosity, lower water absorption capacity, and higher bulk density compared to OPC-based concrete. These properties limit moisture ingress, diffusion, and storage within the substation building envelope, thereby stabilising internal humidity levels. Reduced moisture availability helps preserve higher surface resistivity of insulation materials and minimises electric field enhancement at interfaces and defects, ultimately suppressing the initiation and propagation of surface partial discharges. Therefore, by indirectly controlling the environmental conditions that govern PD behaviour (Ji et al., 2023), geopolymer materials function as preventive dielectric-support materials rather than passive structural components. This material-based approach complements conventional PD monitoring and insulation design strategies by addressing the root cause of moisture-induced surface discharge activity, thereby enhancing the reliability and service life of high-voltage equipment such as switchgear, transformers, and cables (Byrne, 2013).

2.2 Humidity

The level of humidity in the building of electrical substation plays a dual role; it either suppress or promote the activity of partial discharge. Humidity, in the context of electrical insulation, refers to the presence of water vapour in the surrounding atmosphere. It is typically quantified as relative humidity (RH) or absolute humidity, and its impact on electrical systems extends beyond ambient conditions (Ab-Ghani et al., 2019). The relative humidity expressed as a percentage is a measure of the actual amount of water in the atmosphere compared to the maximum amount of water it can

hold (saturated) at the same temperature. High RH in the electrical substation is caused by water ingress through the building structure (Byrne, 2013). Moisture can infiltrate insulation through diffusion, absorption, or condensation – especially under fluctuating temperature and pressure conditions common in operational environments. Once inside, it can alter the dielectric properties, increase surface conductivity, and reduce dielectric strength, making the insulation more prone to initiating and sustaining PD activity (Ab-Ghani et al., 2019). The influence of humidity in PD research has grown as experimental studies and real-world failures have revealed that high moisture levels exacerbate insulation degradation. Water molecules interact with the insulation surface and internal structure, facilitating electron avalanche, surface tracking, and chemical breakdown of materials (Wang et al., 2018). A highly humid electrical substation building contains contaminants such as dust, salt and moisture that falls on insulation surfaces and condense that creates a conductive path to initiate discharge. This effect is strongly influenced by building material properties: OPC-based concrete, with high porosity and capillary connectivity, retains moisture creating pathway for PD activity, whereas GPC, owing to its reduced porosity, lower water absorption, higher density, and improved moisture resistance, limit moisture ingress and stabilise humidity. Consequently, geopolymer materials maintain higher insulation surface resistivity, reduce electric field enhancement, and offer a preventive, passive approach to mitigating PD in electrical substations.

2.3 Geopolymer

Geopolymer is an amorphous, eco-friendly, inorganic, and polymeric material produced by the dissolution of alumina and silica-based sources in a solution containing sodium hydroxide (NaOH) and

sodium silicate (Na_2SiO_3) as activator at ambient temperature (Issa et al., 2023; Ngui et al., 2022; Walkley et al., 2021). As a viable alternative to cement, geopolymers have the prospect of replacing OPC for the production of durable concrete with good structural qualities (Olarinoye et al., 2025). By considering the cementitious nature, cost-effectiveness, durability (Matsimbe et al., 2022), outstanding structural attributes and low carbon footprint status (Liu et al., 2023), geopolymer has turn out to be the most sustainable ecofriendly material for replacing conventional OPC in concrete for structural applications (Kanagaraj et al., 2024).

2.3.1 Properties of Geopolymer Concrete

Several aluminosilicate sources have been synthesised using various alkali activators in varying quantities to enhance the mechanical qualities of geopolymer concrete. The unique properties of geopolymers could be explored in mitigating partial discharge in buildings of electrical substations. Geopolymers' defining characteristics depend on the raw material sources which define their mineralogical and chemical compositions, physico-mechanical properties, structural properties as well as the manufacturing process, including the ratio of raw materials, the blending time and temperature, and any rheology modifiers, accelerators, or retarders that affect the curing and setting times (Doğan-Sağlamtimur et al., 2022). The molar ratio of silica and alumina (Si/Al), as well as the circumstances of curing, setting, and hardening of the geopolymer structures, are additional parameters that affect the properties and application areas of geopolymers (Janošević et al., 2018). Geopolymer properties are often investigated in terms of physical and mechanical properties; however, for the purpose of this work, physical properties of geopolymers such as, density,

porosity durability and water absorption in relation to partial discharge mitigation in buildings will be highlighted.

Density

The density of geopolymer composites depends on their composition, the type of alkali activator (Sodium-based or potassium-based), aggregate, and the ratio of silicon to aluminium (Si/Al ratio). For instance, depending on the nature of the precursor used, the synthesis route and the curing condition, geopolymer concrete could have densities vary between $2810 - 3870 \text{ kg/m}^3$ as compared to $2560 - 2790 \text{ kg/m}^3$ for OPC concrete (Olarinoye et al., 2025). However, higher water to mix ratios increases porosity of the geopolymer thereby decreasing its bulk density. This problem can be overcome by increasing the Si/Al ratio of the geopolymer matrix to become more compact and denser with fewer pores. Thus, the high dense nature of geopolymer concrete serve as buffer for moisture accumulation to support humidity which in turn help in mitigating partial discharge in buildings of electrical substations.

Porosity

The ratios of the mixture and curing conditions influences the porosity of geopolymers. Higher porosity arises from either insufficient compaction during moulding or higher water content, which weakens the geopolymer and thereby affecting its durability. Concrete's mechanical qualities are closely related to its porosity and pore distribution, both of which can be enhanced by adding mineral admixture (Ayub et al., 2014). The chemical makeup of the raw materials, the curing conditions, and the processing technique are some of the variables that affect the porosity of geopolymer concrete. When solid aluminosilicate precursors are dissolved by alkaline hydrolysis, a supersaturated solution of aluminate and silicate varieties is

Table 1 Factors that can mitigate partial discharge in concrete

Factors	Geopolymer concrete				Portland concrete	
	2 M NaOH		12 M NaOH			
Curing days	28	90	28	90	28	90
Water absorption (%)	4.44	3.91	4.75	4.27	5.08	4.53
Volume of permissible voids (%)	10.51	9.32	10.72	9.74	11.66	10.48
Charge passed (C)	977.61	928.73	1065.14	1023.43	1887.34	1792.97

Table 2 Properties of Geopolymer, Humidity Control and PD Mitigation Mechanism

Geopolymer Properties		Humidity Control	PD Mitigation
Porosity		Lower porosity acts as humidity buffer	Decreases the risk of PD due to discontinuous pore network
Water absorption		Control internal humidity due to low water absorption capability	Prevent electrical conductivity due to lower pore leading to high surface resistivity
Density		Low permeability due to high density of GPC reduces condensation of water, controlling humidity	Denser GPC with fewer pores decreases the risk of PD
Electrical conductivity		Geopolymers with lower electrical conductivity are characterised by few pores that can prevent moisture build-up	Fewer pores hinder ion mobility thus mitigating partial discharge

produced. This results in the formation of a gel, after which the water molecules that are meant to be consumed during the precursor's dissolution are released (Aredes et al., 2015). It has been discovered that a geopolymer's porosity is significantly influenced by its early water content during formation (Castillo et al., 2021). This is due to the fact that high water content causes voids to form, increasing a material's porosity and forming a permeable geopolymer that is susceptible to shrinkage and the formation of microcracks during the curing process (Hotek et al., 2023). In the end, this will result in the concrete's shape becoming deformed (Wielgus et al., 2021). Depending on the specific application and desired characteristics, geopolymers can have a wide range of porosities. Accordingly, geopolymers have a range of pore diameters, both open and closed, and their properties are related to the raw material source and the curing method (Aredes et al., 2015). However, by increasing the rate of geopolymerisation and creating a denser matrix, a

higher Si/Al ratio tends to decrease the porosity of geopolymers. From a partial discharge perspective, this reduction in porosity and pore connectivity directly limits moisture retention and ionic transport within substation building walls, thereby suppressing localised electric field distortion and space-charge accumulation that are fundamental to PD initiation and propagation under high-voltage stress. Consequently, controlling geopolymer porosity through optimised mix design and curing conditions provides a clear, material-based pathway for mitigating humidity-induced PD activity, offering a functional advantage over conventional OPC-based construction materials.

Durability

Durability has a major influence on how long concrete structures last. Prior knowledge of the durability qualities is desirable for the commercial deployment of geopolymer concrete for many applications including buildings of electrical substations. Geopolymers' chemical makeup coupled with a higher surface area and a higher

concentration of amorphous silica and alumina of their precursors produce less porous gel (Ngui *et al.*, 2022). This provides their exceptional durability properties that can enhance their performance to mitigate moisture ingress in buildings of electrical substations.

Water absorption

The water absorption in geopolymers is determined by porosity and curing conditions. The durability and chemical attack resistance of geopolymers are enhanced due to lower water absorption which is due to low porosity. Water absorption in fly ash and slag-based geopolymer concrete is typically lower than in Portland cement concrete. Thus, they can be utilised in severe conditions. The water absorption values of 3.91% and 4.44% for geopolymer concrete at lower NaOH concentration have been documented for 90- and 28-days curing period respectively by (Singh *et al.*, 2024) as against 4.53% and 5.08% for Portland concrete within the same period. This reduced water absorption is associated with the dense matrix, reduced permeability, and improved microstructural integrity, all of which contribute to the long-term durability of geopolymer-based structures. From a partial discharge standpoint, lower water absorption directly limits moisture accumulation within the concrete matrix and on the internal wall surfaces of substation buildings. Reduced moisture availability suppresses ionic conduction, surface wetting, and space-charge formation-key mechanisms responsible for PD initiation and intensification under high electric field conditions. Consequently, the inherently low water absorption of geopolymer concrete provides a clear and functional pathway for mitigating humidity-induced PD activity when compared with conventional OPC-based construction materials.

Electrical Conductivity

Geopolymers are generally good insulators due to their poor electrical conductivity. The type of alkaline activator employed, porosity, and moisture level all affect conductivity. In the absence of conductive additives, geopolymers often display characteristically low electrical conductivity, typically between 10^{-4} to 10^{-3} S/cm, making them an insulating material of choice in construction. The high resistivity which is often greater than 100 k Ω -cm inhibits considerable current leakage, which limits the initiation and occurrence of partial discharges under high voltage conditions (Zhang *et al.*, 2024). Besides, the low thermal conductivity of geopolymers and high resistivity, predisposes them to outperform the conventional Portland cement for the purpose of electrical insulation in high voltage environments. Thus, in buildings of electrical substations, geopolymer composites can minimise partial discharge by reducing surface erosion and dielectric losses from discharges (Alvarado *et al.*, 2024). This can be attributed to their dense aluminosilicate structure which has the capacity to regulate moisture, resist void formation and ion migration (Chen *et al.*, 2024; Dai *et al.*, 2022; Sharmin *et al.*, 2024). The behaviour of geopolymer composite as a sustainable insulation material for mitigating partial discharge is evidence from the work of Singh *et al.* (2024) as presented in Table 1, where electrical charges passing through the geopolymer concrete increased with increasing molar concentration of NaOH, while it decreased with decreasing water absorption and volume of permeable voids which are both connected to the porosity of the concrete. Besides, the quantity of charge passing through geopolymer concrete is lower as compared to the OPC concrete for the curing durations considered. This shows that geopolymer concrete can be used effectively to

mitigate partial discharge in the buildings of electrical substations. Table 2 presents the causal linkage summarising the mechanism of humidity control and partial discharge mitigation of core geopolymers properties.

2.3.2 Environmental Benefit of Geopolymer

In civil engineering construction applications, there are several environmental benefits of using geopolymers rather than OPC. Such benefits include, lower carbon footprints, utilisation of industrial wastes, less energy requirements, low water consumption, less pressure on pristine natural resources, reduced air pollutant emissions, carbon sequestration potential, and minimal ecological damage.

Reduced Carbon Footprints

In order to produce OPC, limestone must be calcined at temperatures of about 1450 °C, which releases a significant amount of CO₂ (Al-Jiboory and Al-Hazaa, 2022). According to (Adnan and Anas, 2025; Bouchenafa et al., 2022), the CO₂ emission from the process of calcining limestone is responsible for 2 billion tonnes annual global CO₂ emission. On the other hand, calcination is not necessary for the manufacturing of some geopolymer cement particularly, those produced from industrial wastes, hence process-related CO₂ emissions are avoided. For every tonne of cement produced, OPC releases about 1 tonne of CO₂ emissions (Palod et al., 2017). This CO₂ emissions can be cut by up to 80% with geopolymers (Ruviano et al., 2023). This directly aids in reducing global warming and achieving climate change targets such as those outlined in the Sustainable Development Goals (SDGs). This directly contributes to reducing global warming through the protection of the ecosystems, reducing natural disasters, preserving biodiversity, and ensuring sustainable human development (Pinlova et al., 2024). It also supports

achieving climate change targets outlined in the Sustainable Development Goals (SDGs), which aim to improve water quality, decrease marine pollution, protect terrestrial and aquatic ecosystems, and promote sustainable agriculture and forestry.

Use of Industrial Waste

Fly ash (Aziz et al., 2023; Guan et al., 2023), blast furnace slag (Inti et al., 2016; Ashveenkumar et al., 2022), and red mud (Liu et al., 2020; Singh et al., 2018) are examples of industrial by-products that are frequently used to make geopolymers. These materials would otherwise end up in landfills or present danger of contamination of surface and underground water in the environment. By diverting trash from disposal, this lowers the dangers associated with leachate and land use. It encourages zero-waste production and the circular economy (Philip et al., 2023). This also, protects the environment through the recycling of waste that contains polymer contaminant thereby reducing the risk of toxic substances that can contaminate soil and groundwater (Jiao et al., 2025).

Decreased Energy Use

Because OPC is produced in high-temperature kilns, it requires a lot of energy. Low-temperature processing usually less than 100 °C (Ekaputri et al., 2017; Lopes et al., 2023) or ambient curing (Aziz et al., 2023; Nurrudin et al., 2018) are used in the manufacturing of geopolymers. As a result, energy consumption is lower; thereby lessening reliance on fossil fuels. The reduction of reliance on fossil fuels significantly lowers greenhouse gas emissions, a major driver of global warming and climate change. Furthermore, the decreased fossil fuel combustion enhances air quality by reducing harmful pollutants such as Sulphur dioxide and Nitrogen oxides. This ultimately leads to improved public health and fewer respiratory issues among people.

Reduced Natural Resource Mining

OPC requires extensive mining of natural mineral resources such as, gypsum, clay, and limestone, which causes ecological imbalance (Adekunle *et al.*, 2017), radionuclide dispersal, biodiversity loss, pollution of the air and soil with dust. By using waste materials that already exist, geopolymers considerably reduces the requirement to extract pristine raw materials. The use of geopolymers helps protect the environment by mitigating the adverse effects of mining of natural resources. This is because the extraction of natural resources especially solid minerals often results in land excavation, soil erosion, biodiversity loss, and water pollution (Suleiman, 2024). These environmental impacts can devastate local communities that rely on natural resources for their livelihood. However, by adopting geopolymers, it significantly reduces the environmental degradation associated with mineral resources extraction.

Reduced Water Usage

Compared to OPC concrete mixes, geopolymer concrete mixes usually require less water, and can be cured in the absence of water. Also, the manufacture of cement utilises a significant amount of freshwater. This water requirement has been estimated as 0.5 kl/tons of OPC by (Selvarajan *et al.*, 2017). Thus, in arid and water-limited areas, the use of geopolymer-based concrete will prevent excessive use of the available water resources. This further contributes to environmental protection by safeguarding ecosystems, minimizing pollution, saving energy, and ensuring water remains available over the long term. In addition, it supports the preservation of natural habitats, reduces carbon emissions, and helps prevent water shortages, benefiting both nature and human populations.

Lower Air Pollutant Emission

In addition to CO₂ emissions, OPC production is also linked to hazardous emissions. Such hazardous emissions includes, emissions from the mining of lime stone, emission of nitrous oxide (N₂O), methane (CH₄) (Adekunle *et al.*, 2017; Mohsen *et al.*, 2022), SO₂, during production and particulate matter, which contributes to respiratory illnesses, acid rain, and smog formation. Besides, calcination of OPC raw materials and burning of fossil fuels to sustain elevated temperature in the kiln are the processes that constitute the highest environmental impact (Durastanti and Moretti, 2020). Since the manufacture of geopolymers is a lower temperature process, very little airborne pollution is released. The reduction of air pollutant emissions plays a vital role in protecting the environment. It lessens harm to ecosystems such as forests, soils, water bodies, and aquatic life by decreasing toxic substances and nutrient imbalances. This process supports biodiversity and forest vitality while also enhancing soil health and water cleanliness. In addition, cleaner air improves visibility and fosters the well-being of plants and wildlife. Moreover, lowering air pollution not only safeguards nature but also yields considerable health advantages for people, including fewer respiratory and heart diseases, reduced healthcare expenses, and longer life expectancy (Kyrchenko, 2024).

3. CONCLUSION

This article has reviewed the properties, electrical conductivity and the environmental benefits of geopolymer concrete in relation to its potential application in the construction of electrical substation buildings. The synthesis of the

review indicates that geopolymers materials exhibit superior moisture resistance and lower permeability compared to ordinary Portland cement (OPC), enabling improved stabilisation of internal substation humidity. Such stabilisation plays a critical role in reducing humidity-induced partial discharge activity, thereby limiting insulation degradation, preventing premature equipment failure, and extending the operational lifespan of high-voltage electrical assets. In addition to performance benefits, the use of geopolymer concrete offers substantial environmental advantages through the valorisation of industrial by-products, reduction of landfill disposal, and mitigation of risks associated with leachate formation and groundwater contamination. These attributes collectively position geopolymer concrete as a viable and sustainable alternative to OPC for enhancing the reliability of electrical substation infrastructure. However, this study is constrained by the lack of adequate dielectric data and coupled humidity-temperature simulations tailored to geopolymer applications in substations. Future study is recommended for a controlled experimental studies and numerical modelling to establish the relationship between geopolymer material properties and partial discharge suppression, as well as to optimisation technique for geopolymer composites for long-term insulation reliability.

REFERENCES

- Ab-Ghani, S., Abu-Bakar, N., Chairul, I. S., Khair, M. S., & Ab-Aziz, N. H. (2019). Effects of moisture content and temperature on the dielectric strength of transformer insulating oil. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 63(1), 107–116.
- Adekunle, O. O., Omorinsola, A. A., Nurudeen, A. A., & Yesiru, A. A. (2017). A study into the use of recycle iron and steel slag as an alternative aggregate in concrete production. *Civil and Environmental Research*, 9(2), 22–31.
- Adnan, & Anas, M. (2025). Geopolymer concrete as a sustainable alternative to OPC. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00155-8>
- Ali, K. J., Hasan, G. T., & Ahmed, A. M. (2017). Investigate and analyze the electromagnetic field levels inside an electric power substations. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 24(3), 10–14. <https://doi.org/10.25130/tjes.24.3.02>
- Al-Jiboory, Y. M., & Al-Hazaa, S. H. (2022). Assessment of altawseea ordinary portland cement northern Iraq: Mineralogy, microstructure, and hydration. *Iraqi Geological Journal*, 55(2C), 198–208. <https://doi.org/10.46717/igj.55.2C.15ms-2022-08-28>
- Alvarado, A., Baykara, H., Riofrio, A., Cornejo, M., & Merchan-Merchan, W. (2024). Preparation, characterization, electrical conductivity, and life cycle assessment of carbon nanofibers-reinforced Ecuadorian natural zeolite-based geopolymer composites. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28079>
- Aredes, F. G., Campos, T. M., Machado, J. P., Sakane, K. K., Thim, G. P., & Brunelli, D. D. (2015). Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. *Ceramics International*, 41(6), 7302–7311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.022>
- Ashveenkumar, P., Preethi, M., & Prashanth, P. (2022). Mechanical properties of geopolymer concrete with varying cement content using flyash and ground granulated blast furnace slag. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 13(4), 57–64. <https://doi.org/10.4314/ijest.v13i4.7>
- Awang, N. A., Suhaini, F. A., Arief, Y. Z., Ahmad, M. H., Ahmad, N. A., Muhamad, N. A., & Adzis, Z. (2017). Effect of humidity on partial discharge characteristics of epoxy/boron nitride nanocomposites. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(3), 1562–1567. <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i3.pp1562-1567>
- Ayub, T., Khan, S. U., & Memon, F. A. (2014). Mechanical characteristics of hardened concrete with different mineral admixtures: A review. (B. Lin, & J. R. Rabunal, Eds.) *Scientific World Journal*, 2014, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2014/875082>
- Aziz, I. H., Abdullah, M. M., Abd-Razak, R., Yahya, Z., Salleh, M. A., Chairapa, J., Jamaludin, L. (2023). Mechanical performance, microstructure, and porosity evolution of fly ash geopolymer after ten years of curing age. *Materials*, 16(3), 1096. <https://doi.org/10.3390/ma16031096>
- Bayliss, C. R., & Hardy, B. J. (2007). *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, 3rd ed. England: Elsevier Limited.
- Bouchenafa, C., Hamzaoui, R., Florence, C., & Mansoutre, S. (2022). Cement and clinker production by indirect mechanosynthesis process. *Construction Materials*, 2(4), 201–216. <https://doi.org/10.3390/constrmater2040014>
- Byrne, T. (2013). *Humidity Effects in Substations*. Capenhurst, Chester: EA Technology Limited, Capenhurst Technology Park. Retrieved from <http://www.eatechnology.com>
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Sánchez, S., Vesely, M., Garrido, P., & Palma, S. (2021). Factors affecting the compressive strength of geopolymers: A review. *Minerals*, 11(12), 1317. <https://doi.org/10.3390/min11121317>

- Chen, C., Shenoy, S., Sasaki, K., Zhang, H., & Tian, Q. (2024). Influence of liquid-to-solid ratios on properties and microstructure of coal gasification slag-based one-part geopolymer. *Case Studies in Construction Materials*, 20, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02924>
- Dai, S., Wang, W., An, S., & Yuan, L. (2022). Mechanical properties and microstructural characterization of metakaolin geopolymers based on orthogonal tests. *Materials(Basel)*, 15(8), 2957. <https://doi.org/10.3390/ma15082957>
- Doğan-Sağılamtimur, N., Bilgil, A., Ertürk, S., Bozkurt, V., Süzgeç, E., Akan, A. G., Hebda, M. (2022). Eco-geopolymers: Physico-mechanical features, radiation absorption properties, and mathematical model. *Polymers*, 14(2), 262. <https://doi.org/10.3390/polym14020262>
- Durastanti, C., & Moretti, L. (2020). Environmental impacts of cement production: A statistical analysis. *Applied Sciences*, 10(22), 8212. <https://doi.org/10.3390/app10228212>
- Ekaputri, J. J., Junaedi, S., & Wijaya. (2017). Effect of Curing Temperature and Fiber on Metakaolin-based Geopolymer. *International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM 2016)*. 171, pp. 572-583. Bali, Indonesia: Elsevier Procedia, Curran Associates, Inc. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.376>
- Ezenwora, J. A., Oyedum, O. D., & Ocheni, A. U. U. (2009). Design, construction and characterization of domestic live-wire detector device. *Natural and Applied Sciences Journal*, 10(1), 63–69.
- Guan, X., Luo, W., Liu, S., Hernandez, G. A., Do, H., & Li, B. (2023). Ultra-high early strength fly ash-based geopolymer paste cured by microwave radiation. *Developments in the Built Environment*, 14, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100139>
- Hassan, W., Hussain, G. A., Mahmood, F., Amin, S., & Lehtonen, M. (2020). Effects of environmental factors on partial discharge activity and estimation of insulation lifetime in electrical machines. *IEEE Access*, 8, 108491–108502. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998373>
- Hotek, P., Fiala, L., Lin, W., Chang, Y., & Cerny, R. (2023). Alkali-activated metashale mortar with waste cementitious aggregate: Material characterisation. *Material Process*, 13(1), 41. <https://doi.org/10.3390/materproc2023013041>
- Inti, S., Sharma, M., & Tandon, V. (2016). Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) and Rice Husk Ash (RHA) Uses in the Production of Geopolymer Concrete. In *Proceedings of Geo-Chicago 2016: Geotechnics for Sustainable Energy*. GSP 270, pp. 621–632. Illinois, Chicago, USA: Geo-Chicago.
- Issa, T. M., Sitarz, M., Mróz, K., & Rózycki, M. (2023). Geopolymers-Base Materials and Properties of Green Structural Materials. In T. Tracz, T. Zdeb, & I. Hager (Ed.), *10th MATBUD02023 Scientific-Technical Conference "Building Materials Engineering and Innovative Sustainable Materials*, pp. 1–7. Cracow, Poland.
- Janošević, N., Đorić-Veljković, S., Topličić-Čurčić, G., & Karamarković, J. (2018). Properties of geopolymers. *Series: Architecture and Civil Engineering*, 16(1), 45–56. <https://doi.org/10.2298/FUACE161226004J>
- Ji, Y., Giangrande, P., & Zhao, W. (2024). Effect of environmental and operating conditions on partial discharge activity in electrical machine insulation: A comprehensive review. *Energies*, 17(16), 3980. <https://doi.org/10.3390/en17163980>
- Ji, Y., Giangrande, P., Zhao, W., Madonna, V., Zhang, H., Li, J., & Galea, M. (2023). Investigation on combined effect of humidity-temperature on partial discharge through dielectric performance evaluation. *IET Science, Measurement & Technology*, 17(1), 37–46. <https://doi.org/10.1049/smt2.12128>
- Jiao, K., Li, J., Zhang, J., & Sun, P. (2025). Application of novel polymer materials for anti fouling control of landfills: A comprehensive durability evaluation. *Journal of Environmental Management*, 376, 124354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124354>
- Kanagaraj, B., Anand, N., Raj, S., & Lubloy, E. (2024). Advancements and environmental considerations in Portland cement-based radiation shielding concrete: materials, properties, and applications in nuclear power plants– Review. *Cleaner Engineering and Technology*, 19, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100733>
- Kyrchenko, O. (2024). Health benefits of air pollution reduction: Evidence from economic show down in India. *Economic and Human Biology*, 55(101437). <https://doi.org/10.1016/j.ehb.2024.101437>
- Li, L., Song, J., Lei, Z., Kang, A., Wang, Z., Men, R., & Ma, Y. (2021). Effect of ambient humidity and thermal aging on Nomex insulation in mining dry-type transformer. *High Voltage*, 6(1), 71–81. <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0293>
- Liu, J., Li, X., Lu, Y., & Bai, X. (2020). Effects of Na/Al ratio on mechanical properties and microstructure of red mud-coal metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 263, 120653. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120653>
- Liu, J., Shi, X., Zhang, G., & Li, L. (2023). Study the mechanical properties of geopolymer under different curing conditions. *Minerals*, 13(5), 690. <https://doi.org/10.3390/min13050690>
- Lopes, A., Lopes, S., & Pinto, I. (2023, November). Influence of curing temperature on the strength of a metakaolin-based geopolymer. *Materials*, 16(23), 7460. <https://doi.org/10.3390/ma16237460>
- Matsimbe, J., Dinka, M., & Olukanni, D. (2022). Geopolymer: A systematic review of methodologies. *Materials*, 15(19), 6852. <https://doi.org/10.3390/ma15196852>
- Melo, J. V., Lira, G. R., Costa, E. G., Vilar, P. B., Andrade, F. L., Marotti, A. C., Santos Júnior, A. C. (2024). Separation and classification of partial discharge sources in substations. *Energies*, 17(15), 3804. <https://doi.org/10.3390/en17153804>
- Mohsen, A., Kohail, M., Abadel, A. A., Alharbi, Y. R., Nehdi, M. L., & Ramadan, M. (2022). Correlation between porous structure analysis, mechanical efficiency and gamma-ray attenuation power for hydrothermally treated slag-glass waste-based geopolymer. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01505. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01505>
- National Ready Mixed concrete Association (NRMCA). (2021). *Concrete in Practice (CIP 16): Flexural Strength of Concrete*. Retrieved January

- 23, 2024, from National Ready Mixed concrete Association (NRMCA): <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2021/01/16pr.pdf>
- Ngui, F. M., Muhammed, N., Mutunga, F. M., Marangu, J. M., & Kinoti, I. K. (2022). A review on selected durability parameters on performance of geopolymers containing industrial by-products, agro-wastes and natural pozzolan. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(4), 375–400. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1190244>
- Nurruddin, M. F., Haruna, S., Mohammed, B. S., & Galal, I. (2018). Methods of curing geopolymer concrete: A review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5(1), 31–36. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- Olarinoye, I. O., Kolo, M. T., Fawole, I. W., & Salihu, S. O. (2025). Characterising metal slag-based geopolymer concrete for radiation shielding application. *Confluence University Journal of Science and Technology*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.5455/CUJOSTECH.2504>
- Oni, A. A., Fawole, W. I., & Ocheni, A. U. U. (2017). Assessment of radiological health hazards from measured activity concentrations in soil samples around Gbose quarry Omu-aran, Kwara State. *Journal of the Nigerian Association of Mathematical Physics*, 41, 167–172.
- Palod, R., Deo, S. V., & Ramtekkar, G. D. (2017). Review and suggestions on use of steel slag in concrete and its potential use as cementitious component combined with GGBS. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(4), 1026–1035.
- Pham, T., Nguyen, N., Nguyen, T., Nguyen, T., & Pham, T. (2023). Effects of superplasticizer and water-binder ratio on mechanical properties of one-part alkali-activated geopolymer concrete. *Buildings*, 13(7),
- Pinlova, B., Sudheshwar, A., Vogel, K., Malinverno, N., Hischier, R., & Som, C. (2024). What can we learn about the climate impact of polylactic acid from a review and meta-analysis of lifecycle assessment studies. *Sustainability Production and Consumption*, 48, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.021>
- Ruviano, A. S., Santana, H. A., Lima, G. T., Barraza, M. T., Silvestro, L., Gleize, P. J., & Pelisser, F. (2023). Valorization of oat husk ash in metakaolin-based geopolymer pastes. *Construction and Building Materials*, 367, 130341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130341>
- Selvarajan, M., Bohra, A., Nath, K. R., Rao, M. V., Tiwary, N. K., & Saxena, A. (2017). Water Footprint Assessment of Cement Plants. *15th International Seminar on Cement and Building Materials*. Manakshaw Centre, New Delhi, India.
- Sharmin, S., Sarker, P. K., Biswas, W. K. & Abousnina, R. M. (2024). Characterization of waste clay brick powder and its effect on the mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 412, 134848. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134848>
- Singh, A., Bhadauria, S. S., Thakare, A. A., Kumar, A., Mudgal, M., & Chaudhary, S. (2024). Durability assessment of mechanochemically activated geopolymer concrete with a low molarity alkali solution. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02715. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02715>
- Singh, S., Aswath, M. U., & Ranganath, R. V. (2018). Effect of mechanical activation of red mud on the strength of geopolymer binder. *Construction and Building Materials*, 177, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.096>
- Suleiman, S. S. (2024). *Land Degradation caused by Solid Mineral Mining and its Impact on Rural Livelihoods in Eastern Kogi State* [Doctoral's thesis]. Bayero University, Kano, Nigeria.
- Szilágyi, R., Molinié, P., Kirkpatrick, M. J., Odic, E., Galli, G., & Dessante, P. (2023). Role of temperature in partial discharge inception voltage at triple junctions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 04231278f. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2023.3315686>
- Tschentscher, M., Graber, D., & Franck, M. C. (2020). Influence of humidity on conduction processes in gas-insulated devices. *High Voltage*, 5(2), 143–150. <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0315>
- Walkley, B., Ke, X., Hussein, O., & Provis, J. L. (2021). Thermodynamic properties of sodium aluminosilicate hydrate (N-A-S-H). *Dalton Transactions*, 50(39), 13968–13984.
- Wang, P., Li, Y., Cavallini, A., Zhang, J., Xiang, E., & Wang, K. (2018, October 21st–24th). The Influence of Relative Humidity on Partial Discharge and Endurance Features under Short Repetitive Impulsive Voltages. *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. pp. 506–509. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2018.8544905>
- Wielgus, N., Górski, M., & J., K. (2021). Discarded cathode ray tube glass as an alternative for aggregate in a metakaolin-based geopolymer. *Sustainability*, 13(2), 479. <https://doi.org/10.3390/su13020479>
- Zhang, S., Ukrainczyk, N., Zaoui, A., & Koenders, E. (2024). Electrical conductivity of geopolymer-graphite composites: Percolation, mesostructure and analytical modeling. *Construction and Building Materials*, 411, 134536.

Forecasting the Elderly Population in Songkhla Province Using the Box-Jenkins Method

Jutamas Boonradsamee^{1*}, Kulteera Thongyai¹, and Rugkita Ieamwijarn²

¹Department of Management, Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000 Thailand

²Department of Accounting, Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: jutamas.r@rmuts.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.004

Received 13 December 2025; **Revised** 25 December 2025; **Accepted** 26 December 2025

ABSTRACT

This research aimed to quantitatively forecast the elderly population in Songkhla province using the Box-Jenkins (Autoregressive Integrated Moving Average - ARIMA) method. This method is based on the assumption that the past behavior of a time series is sufficient to predict future behavior. This study used historical monthly time series data of the elderly population in Songkhla province from 2017 to 2024 to determine the most appropriate ARIMA model. The results showed that the most appropriate model was $ARIMA(4,2,0)(2,0,0)_{12}$, which exhibits a clear and consistent seasonal pattern (seasonal data). The AIC value was 1181.419, and the estimated variance of error (white noise) was 14188. Projections indicate a significant and continuous increase in the elderly population over the next five years, with an expected rise of more than 50,000 people between 2025 and 2029. The resulting forecast provides a quantitative estimate of the future elderly population size in Songkhla province. The research findings aim to provide valuable insights for local and provincial policymakers in Songkhla for effective resource allocation, health care planning, and development of comprehensive social welfare strategies to address the impacts of an aging society.

KEYWORDS: Elderly, Box-jenkins method, Forecasting, Time series model.

Please cite this article as: J. Boonradsamee, K. Thongyai, and R. Ieamwijarn, "Forecasting the Elderly Population in Songkhla Province Using the Box-Jenkins Method," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 24, no 3, pp. 1-13, ID. 265260, December 2025

1. INTRODUCTION

The number of elderly people worldwide is currently growing at a steady and quick pace. According to the World Health Organization, by 2030, one in six people worldwide will be 60 years of age or older. At that time, the proportion of the population aged 60 and over will increase from 1 billion in 2020 to 1.4 billion. By 2050, the global population aged 60 and over will double (2.1 billion), and the number of people aged 80 and over is projected to triple between 2020 and 2050 to 426 million (World Health Organization, 2025). After Nakhon Si Thammarat province, Songkhla province has the second-highest population in Southern Thailand and the Gulf of Thailand. Songkhla province's population has been growing since 2013; however, at an average annual rate of only 0.45%, this increase is not very rapid. The number of elderly people has increased in tandem with changes in the country's demographics. The percentages of people aged 0–14 and 15–59 have steadily declined between 2013 and 2018 (Songkhla Provincial Development Plan, 2021), while the percentage of those over 60 has increased, mirroring the national trend. According to this data, the old population is growing at a lower birth rate, while the child. In order to guarantee a high standard of living for the aged in Songkhla province, pertinent agencies must create policies in the social, economic, and health domains. In the future, there will be a lack of young caretakers and an increase in health issues for the elderly, such as diabetes, hypertension, or age-related degenerative diseases. The provincial labor force will decline at the same time.

This corresponds with information from the Human Resource Development Plan for the old in Songkhla province, which indicates that the province is encountering difficulties due to its increasing elderly

population. Consequently, it is imperative to cultivate and refine multifaceted foundational elements within the province to augment the capabilities of the aged. Preliminary data from the official registration system in 2021 indicated that Songkhla province had an elderly population of 229,680 as of June 30, 2021, or 16.27% of the total population. The elderly population can be categorized by their condition: 159,693 are socially engaged, 137,495 have chronic illnesses, 7,301 are home-bound, and 1,249 are bedridden. Almost all elderly people can live freely and carry out everyday tasks because they are socially active. Targeting this group is essential for driving positive societal aging in Songkhla province. According to the Songkhla Provincial Office of Social Development and Human Security (July 27, 2021), the most pressing issue for this demographic is financial distress, characterized by an insufficiency of income to sustain daily livelihoods. They expressed a need for comprehensive support for career and income generation. Health issues were also a major concern, highlighting the desire for a better quality of life among the elderly in Songkhla. Numerous past studies have focused on the quality of life of the elderly, both nationally and within Songkhla province. For example, Noknoi and Boripunt (2017) studied the quality of life of the elderly in Songkhla, Thongyai (2019) examined factors affecting the happiness of the elderly in the Kaoseng community, and Suk-anan (2020) investigated strategies for promoting employment among the Thai elderly. These studies generally focused on the overall quality of life. However, the recent global COVID-19 pandemic has caused changes in all dimensions. Considering the increasing elderly population and their current problems in Songkhla, the research team recognizes the importance of these societal changes.

Therefore, this research aims to forecast the upward trajectory of the aging population in Songkhla through a time-series analysis. By utilizing the Box-Jenkins method, a predictive model is constructed to provide empirical estimations of future elderly population trends. This study employs quantitative forecasting, a systematic approach that leverages historical time-series data to extrapolate future trends through the application of rigorous mathematical models. The Box-Jenkins method is distinguished by its high degree of accuracy and precision in quantitative forecasting. Its robustness stems from the prerequisite verification of time-series stationarity before estimation. Notably, this approach remains data-driven, as it does not necessitate a priori model specification, allowing the model structure to emerge from the empirical data itself. In this study, the forecasting model was manually specified, yielding a specialized model for the low-income demographic that offers granular insights. This approach is particularly efficacious for time-series data lacking discernible cyclical or seasonal patterns. The robustness of the Box-Jenkins method is well-documented across diverse forecasting domains. For instance, Anvari et al. (2016) developed an automated Box-Jenkins tool to analyze passenger demand in urban rail systems, while Idrus and Mohamed (2020) conducted a comparative study between Box-Jenkins and artificial neural networks to forecast air travel volume in Malaysia. Furthermore, in the context of demographic projections, Ayele and Zewdie (2017) utilized ARIMA modeling on annual Ethiopian population data (1961–2009), identifying the ARIMA (2,1,2) as the optimal fit. Parallel to these global applications, this research employs the Box-Jenkins ARIMA technique, utilizing a longitudinal dataset spanning 1960 to 2017 to project population trends.

The remainder of this article is structured as follows. Section 2 elucidates the theoretical framework of the Box-Jenkins forecasting methodology. Section 3 details the data collection process and analytical procedures, followed by Section 4, which presents the conclusion and discussion. In Section 5, numerical results from a performance comparison across various scenarios are provided. Finally, Section 6 outlines policy implications, offering strategic recommendations for future research.

2. METHODS

2.1 Box-Jenkins Method

The Box-Jenkins method is a quantitative forecasting technique based on the idea that the past behavior of a time series is sufficient to predict its future behavior. Unlike other forecasting methods, which require the forecaster to pre-specify the form of the relationship, especially when the time series lacks a clear trend, cycle, or seasonality, the Box-Jenkins method does not require a fixed model form before analysis. The model is identified during the analysis process itself, which involves the following steps:

Step 1. Calculate the value of the self-correlation function. (Autocorrelation Function: ACF) and Partial Autocorrelation Function (PACF) are the first step for stationary time situations, namely the time requirement for which the forecast value is to be calculated, to find the ACF and PACF values to be used for processing in the model, or to select the model which will be mentioned, or the amount of data to be examined again, as observed. These functions help in identifying the appropriate model by indicating the number of past observations (lags) to be considered. Calculate the ACF value using the following equation:

$$r_j = \frac{\sum_{t=1}^{N-j} (X_t - \bar{X})(X_{t+j} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2}, \quad (2.1)$$

where X_t is the data or observations at time

j is the number of time intervals between the data $j=1,2,3,...,k$,

N is the total number of data, and

$\bar{X}$ is the average of all the data where

$$\bar{X} = \frac{\sum_{t=1}^N X_t}{N}.$$

Calculate the PACF value using the following equation:

$$\hat{\phi}_{kk} = \begin{cases} r_1 & ; k=1 \\ \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} (\hat{\phi}_{(k-1)j} r_{k-j})}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} (\hat{\phi}_{(k-1)j} r_j)} & ; k=2,3,4,... \end{cases} \quad (2.2)$$

and $\hat{\phi}_{kk} = \hat{\phi}_{(k-1)j} - \hat{\phi}_{kk} \hat{\phi}_{(k-1)(k-j)}$; $j=1,2,3,...,k-1$.

Step 2. The appropriate model is determined by examining the patterns of the ACF and PACF plots, as summarized in Table 1.

The quantitative model used in this research's forecasting is the ARIMA(p,d,q) process. p is the number of regression terms, d is the rank of the difference that keeps the data stable, and q is the number of moving average terms. For example, the ARIMA (2,1,2) process has a rank 1 difference (d=1) that maintains stability, along with two regression terms and two moving average terms. If d=0, the ARIMA (p,d=0,q) process means ARMA (p,q). Note that the ARIMA(p,0,0) process means the AR(p) process, and the ARIMA(0,0,q) process means the MA(q) process. The ARIMA (p,d,q) model is derived

from the ARMA(p,q) process, which has the following general form.

i. pth-order autoregressive model: AR(p)

$$X_t = \delta + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + u_t, \quad (2.3)$$

where X_t is the data or observation at the time t,

δ is the process constant,

u_t is the random error at time t,

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ is the coefficient of the regression term,

and $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$ is the response variable at the lag, $t-1, t-2, \dots, t-p$.

ii. qth-order moving average model: MA(q)

$$X_t = \delta + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \theta_2 u_{t-2} - \dots - \theta_q u_{t-q}, \quad (2.4)$$

where X_t is the data or observation at time t,

δ is the constant mean,

u_t is the white noise process at time t,

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ is the coefficient of the moving average term, and $u_{t-1}, u_{t-2}, \dots, u_{t-q}$ is the moving average term q.

iii. pth and qth-order autoregressive moving average model: ARMA (p,q)

$$X_t = \delta + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \theta_2 u_{t-2} - \dots - \theta_q u_{t-q}, \quad (2.5)$$

where X_t is the data or observation at time t,

δ is the constant mean,

u_t is the white noise process at time,

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ is the coefficient of the moving average term,

$u_{t-1}, u_{t-2}, \dots, u_{t-q}$ is the moving average term q.

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ is the coefficient of the regression term, and

$X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$ is the response variable at the lag, $t-1, t-2, \dots, t-p$.

Table 1 Identifying Models using ACF and PACF.

Model	ACF	PACF
AR(p)	Decays exponentially	Cuts off after lag p
MA(q)	Cuts off after lag q	Decays exponentially
ARMA(p,q)	Decays exponentially	Decays exponentially

Table 2 The results of testing the stationarity of the data through the Unit Root Test method, the results before and after data adjustment.

Augmented Dickey-Fuller test					
At level		1 st Difference		2 nd Difference	
t - statistics	p - value	t - statistics	p - value	t - statistics	p - value
-1.3975	0.8254	-2.8841	0.2113	-7.7183	0.0100

Table 3 Comparison of best-fit ARIMA models through Akaike Info Criterion (AIC) requirements.

MODEL	AIC
ARIMA(2,2,2)(1,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(0,2,0)	1287.986
ARIMA(1,2,0)(1,0,0) ₁₂	1205.391
ARIMA(0,2,1)(0,0,1) ₁₂	1219.348
ARIMA(1,2,0)	1278.459
ARIMA(1,2,0)(2,0,0) ₁₂	Inf
ARIMA(1,2,0)(1,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(1,2,0)(0,0,1) ₁₂	1239.545
ARIMA(1,2,0)(2,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(0,2,0)(1,0,0) ₁₂	1208.09
ARIMA(2,2,0)(1,0,0) ₁₂	1197.401
ARIMA(2,2,0)	1261.342
ARIMA(2,2,0)(2,0,0) ₁₂	1189.355
ARIMA(2,2,0)(2,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(2,2,0)(1,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(3,2,0)(2,0,0) ₁₂	1188.844
ARIMA(3,2,0)(1,0,0) ₁₂	1194.276
ARIMA(3,2,0)(2,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(3,2,0)(1,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(4,2,0)(2,0,0)₁₂	1181.419
ARIMA(4,2,0)(1,0,0) ₁₂	1188.255
ARIMA(4,2,0)(2,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(4,2,0)(1,0,1) ₁₂	Inf
ARIMA(5,2,0)(2,0,0) ₁₂	Inf
ARIMA(4,2,1)(2,0,0) ₁₂	1183.713
ARIMA(3,2,1)(2,0,0) ₁₂	Inf
ARIMA(5,2,1)(2,0,0) ₁₂	1185.765

Step 3. Parameter estimation is the process of estimating the parameters contained in a time series model using the maximum likelihood method $L(\underline{\phi}, \underline{\theta}, \delta, \sigma_u^2 | \mathbf{X}_t, t = 1, 2, 3, \dots, N)$.

The estimated values of $\underline{\phi}, \underline{\theta}$, and δ can be calculated by minimizing the sum of squared errors, that is

$$\text{Minimize} \sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_t = X_t - \hat{\phi}_1 X_t - \dots - \hat{\phi}_p X_{t-p} - \hat{\delta} + \hat{\theta}_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \hat{\theta}_q \varepsilon_{t-q}. \quad (2.7)$$

It is an approximate value u_t , which is considered from the equation.

$$u_t = X_t - \hat{\phi}_1 X_t - \dots - \hat{\phi}_p X_{t-p} - \hat{\delta} + \hat{\theta}_1 u_{t-1} + \dots + \hat{\theta}_q u_{t-q}, \quad (2.8)$$

when the approximate values of ϕ, θ , and δ are found, the approximate values of σ_u^2 are obtained by

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2. \quad (2.9)$$

Let $\hat{\beta}$ the factors of the various parameters be replaced by the statistic used to test the t estimator given by

$$t_{\hat{\beta}} = \frac{\hat{\beta}}{SE(\hat{\beta})}, \quad (2.10)$$

where $SE(\hat{\beta})$ is the standard error of $\hat{\beta}$ and degrees of freedom is the number of terms N minus the parameter to be estimated.

Step 4. Model Suitability Checking: Once a time series model has been selected and its parameters have been estimated, the next step is to test its suitability. The principle for model suitability checks is based on the random probability properties of the error values u_t , particularly regarding the lack of self-correlation. That is, if the selected model is suitable and its parameter values are known, we will use Q the Chi-squared distribution, which is calculated using the following:

$$Q(k) = \{(N-d)[(n-d)+2]\} \sum_{j=1}^k \frac{r_j^2}{[(N-d)-j]}. \quad (2.11)$$

The Q statistic is used to test for non-self-correlation of error values u_t . It is the degree of freedom $Q = k$ of the statistic minus the number of parameters to be estimated for the chosen model.

where k is the number of time intervals (lags) between the data

N is the total number of observations of the time series,

d is the rank of the time series difference, and r_j is the autocorrelation at the lag j .

Step 5. Forecasting. Once the model assigned to the time series has been verified to be suitable, the next step is to apply the model equations to the forecast to find the forecast value.

2.2 Describing the Real Data

This research focuses on the quantitative analysis of a forecasting model for the elderly population in Songkhla Province. Statistical time series data from 2017 to 2024 were collected and analyzed using the Box-Jenkins method (or ARIMA model) to accurately forecast future trends and growth rates of the elderly population, providing important insights for provincial-level care planning. The collected data are presented in Figure 1.

Figure 1 shows that the number of elderly people in Songkhla Province has been steadily increasing each year. When considering each district, Hat Yai District has the highest number of elderly people, followed by Mueang Songkhla District, Sadao District, Chana District, and Singhanakhon District, which are the top five districts in Songkhla Province with the highest number of elderly people.

As shown in Figure 2, the average elderly population in Songkhla Province has been increasing annually and is likely to continue to increase. This

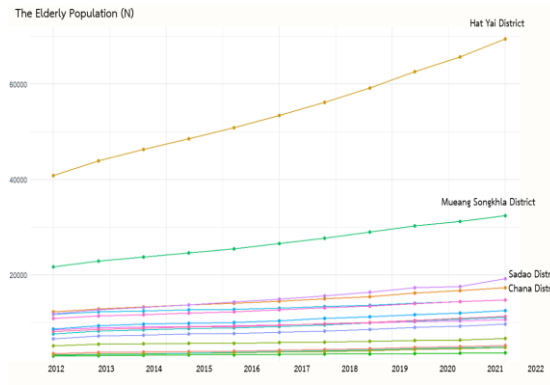


Figure 1 Annual Number of Elderly Population by District in Songkhla Province.

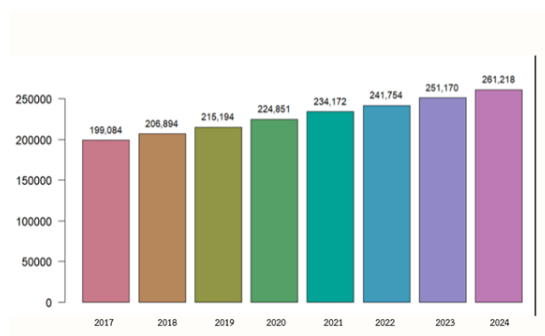


Figure 2 The Average number of elderly people per year, 2017 – 2024, of Songkhla Province.

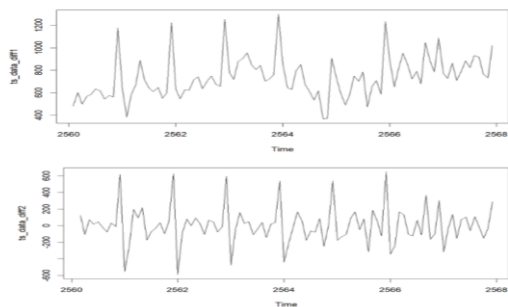


Figure 3 The Stationary Characteristics of Elderly Population Data by Finding 1st Difference and 2nd Difference.

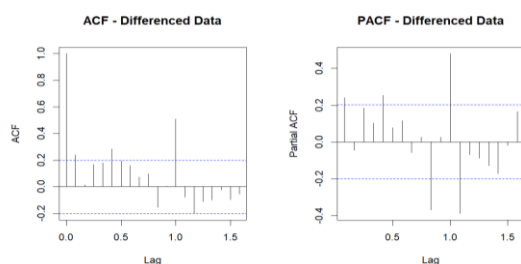


Figure 4 ACF and PACF diagrams.

increase in the elderly population impacts management in many areas, including the economy,

society, and health. This is particularly the case with a decline in the workforce, increased financial burdens, and the increasing demand for health and welfare services. This has led government agencies to plan and adjust policies to accommodate the growing elderly population. Furthermore, in today's society, the birth rate has significantly decreased. According to the Department of Older Persons Affairs, an "aging society" is defined as a society in which the proportion of the elderly or the population aged 60 years and over has steadily increased, while the proportion of the birth rate and the working-age population has decreased. The results of the quantitative analysis of the elderly population forecasting model in Songkhla Province, using the Box-Jenkins method, were used to create a forecast model for the future elderly population. Historical data on the elderly population in Songkhla Province were collected from 2017 to 2024.

3. DATA AND ANALYSIS

Data analysis revealed a steadily increasing trend of the elderly population each year, resulting in a shrinking workforce, financial burdens, and demand for health and welfare services. To accommodate the future expansion of the elderly population in Songkhla Province, researchers developed a quantitative forecasting model of the elderly population in Songkhla Province using the Box-Jenkins method. This model was developed by collecting historical statistics of the elderly population in Songkhla Province from 2017 to 2024. The steps can be summarized as follows:

3.1 Testing for Stationarity

The stationarity of the time series data was tested using the Augmented Dickey-Fuller (ADF) Unit Root

Test (Dickey and Fuller, 1979). For time series analysis, the researchers used the R statistical software (v4.3.2; R Core Team 2023) and core functions from the forecasting package v8.21 (Hyndman et al., 2023) for ARIMA modeling and the tseries package v0.10-54 (Trapletti and Hornik, 2024) for stationarity testing.

The hypotheses are given as:

H_0 : The data is non-stationary

H_1 : The data is stationary

From the Table 2 the data testing through the Unit Root Test method, the p-value results are as follows: The data on the number of elderly people in Songkhla Province has a p-value of 0.8254, which is higher than the level of significance (Level of Significant) set at 0.05, indicating that the data on the number of elderly people used in the study are not stationary. Therefore, the researcher calculated the first difference (1st Difference) and got a p-value of 0.2113, indicating that the data on the number of elderly people used in the study are not stationary. When calculating the first difference, the researcher calculated the second difference (2nd Difference) and got a p-value of 0.01, which is lower than the significance level of 0.05, resulting in data that is stationary at the significance level of 0.05. The study results can explain the differences in data, as shown in Figure 3.

3.2 Identifying the Model Order (p, q)

Consider the ACF (Autocorrelation Function) and PACF (Partial Autocorrelation Function) plots of the differentiated time series data used to identify the order (p and q) of the ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) model, as shown in Figure 4

Figure 4 illustrates the ACF - Differenced Data diagram showing the relationship between the time series and historical values (lags). The results show that the ACF value rapidly decreases (cuts off) after the first lag. At lag 1, the first bar exceeds the dotted blue line (value 0.2), indicating a significant relationship. At lags 2 and 3, the bar falls within the

range of the dotted blue line, indicating a non-significant relationship. Finally, at lag 12, the relationship is again high (approximately 0.5), indicating seasonality at lag 12 (since it is monthly data). In other words, for MA (q), the rapid "cut off" of the ACF after lag 1 suggests that the model may have a sequential MA (moving average) component, or perhaps a seasonal MA.

The PACF - Differenced Data diagram shows the relationship between the time series and historical values. By eliminating the effect of the intermediate values, at Lag 1, the first bar exceeds the blue dotted line (value 0.2), indicating a significant relationship. At Lag 2 and Lag 3, the bars are in the range of the blue dotted line. At Lag 10 and Lag 12, the relationship is again significant, which may be related to the seasonal structure, i.e., for AR (p): the PACF "Decays", i.e., it declines slowly or "Cuts off". From the figure, the PACF also "Cuts off" after Lag 1, because Lag 2 and Lag 3 are not significant, which may indicate that the model may have an AR (Autoregressive) component at the order of magnitude.

The ACF and PACF plots for the differenced series. The ACF (Autocorrelation Function) exhibits a distinct cut-off after lag 1, with the first lag significantly exceeding the 95% confidence threshold. Additionally, a prominent seasonal spike is observed at lag 12 (lag 1.0), suggesting a seasonal moving average (SMA) component. Simultaneously, the PACF (Partial Autocorrelation Function) shows significant spikes up to lag 4 before cutting off, which typically characterizes an AR(4) process. Following the Box-Jenkins identification logic, these patterns justify the inclusion of both non-seasonal and seasonal parameters in the candidate SARIMA model.

3.3 Finding the Best ARIMA Model

The best ARIMA model was automatically found to fit the time series data of the elderly population in

Table 4 Goodness-of-Fit and Forecasting Accuracy of the SARIMA(4, 2, 0)(2, 0, 0)₁₂ model.

Parameter	Lag	Coefficient	Standard Error
AR1	1	-0.4733	0.1005
AR2	2	-0.5194	0.1086
AR3	3	-0.3151	0.1081
AR4	4	-0.3249	0.1008
SAR1	12	0.4596	0.101
SAR2	24	0.3599	0.1112
$\sigma^2 = 14188$ AIC = 1180.12			
RMSE = 114.0422 MAPE = 0.03790666 ACF1 = -0.02079397			

Table 5 The increasing trend of the number of elderly people in Songkhla Province in 2025.

Month	Point Forecast	95% Confidence Interval	
		Lower	Upper
Jan	266,790.70	266,557.30	267,024.20
Feb	267,556.90	267,130.80	267,983.00
Mar	268,391.00	267,799.40	268,982.60
Apr	269,217.00	268,454.60	269,979.40
May	270,021.90	269,088.60	270,955.20
Jun	270,846.50	269,708.60	271,984.50
Jul	271,680.90	270,311.60	273,050.20
Aug	272,509.40	270,901.30	274,117.50
Sep	273,465.30	271,609.40	275,321.20
Oct	274,289.80	272,178.40	276,401.10
Nov	275,063.40	272,683.90	277,442.80
Dec	276,085.20	273,423.20	278,747.20

Songkhla Province using the Akaike Information Criterion (AIC). The results are shown in Table 3.

From Table 3, it was found that the best Seasonal ARIMA (SARIMA) model is based on the Akaike Information Criterion (AIC). The model with the lowest AIC was found to be SARIMA(4,2,0)(2,0,0)₁₂, which is the model with clear and consistent seasonal data, with an AIC of 1181.419. Several models resulted in infinite AIC values. This phenomenon occurs when the model structure is incompatible with the data's stochastic properties, primarily due to a lack of stationarity or invertibility. In such cases, the iterative estimation procedure fails to converge, often as a consequence of including redundant parameters beyond the information capacity of the time series. Although several candidate models, such as

SARIMA(4,2,1)(2,0,0)₁₂ exhibited AIC values comparable to the selected model, SARIMA(4,2,0)(2,0,0)₁₂ was preferred based on the principle of parsimony. The marginal improvement in model fit provided by the additional moving average (MA) parameter in the more complex configurations did not justify the increased model complexity. Furthermore, SARIMA(4,2,0)(2,0,0)₁₂ achieved the absolute minimum AIC (1181.419), suggesting an optimal balance between goodness-of-fit and model simplicity, thereby minimizing the risk of over-parameterization and enhancing forecasting robustness.

3.4 Model Estimation and Diagnostics

The residuals of the model were found to be white noise, meaning that there was no autocorrelation remaining, confirming that the model accurately

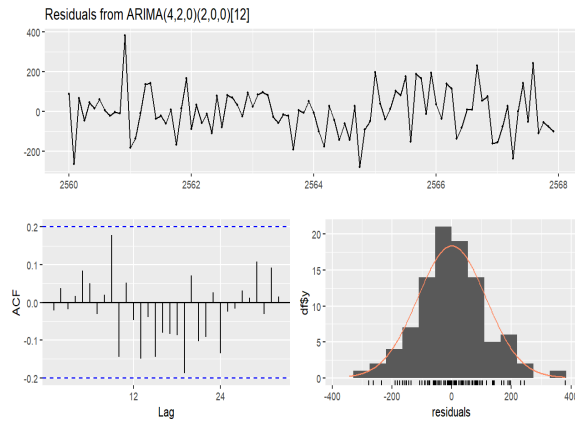


Figure 5 Residual Diagnostics.

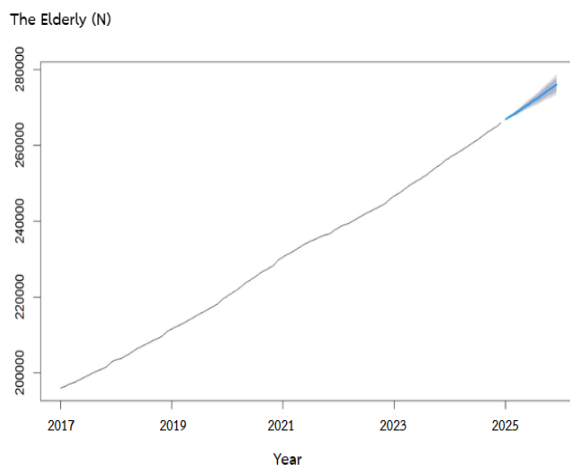


Figure 6 The Number of elderly people in Songkhla Province in 2025.

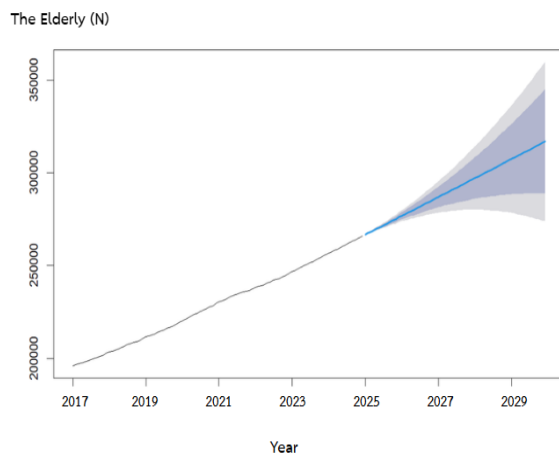


Figure 7 The Number of elderly people in Songkhla Province from 2025

captured the underlying patterns in the data. The results are described in Table 4

From Table 4, the results of the formally set and orthogonal systems for $SARIMA(4,2,0)(2,0,0)_{12}$ are obtained. Technical data are obtained by taking the difference between 2 values. The stationary data are softened by the Autoregressive (AR) component, the

non-seasonal lag of 4 periods, and the lag of 2 parts at the lag of 12 periods.

Good-fit test (Goodness-of-Fit) found that the AIC value of 1180.12, the lowest value used to test this, provided the best performance between that and simplicity (penalized for complexity). The recency factor for the deviation (white noise) was 14188. In forecasting (forecast accuracy), the RMSE value was 114.04, and the MAE value was 87.07, indicating the average size of the motherboard. The MAPE value was 0.0379. The deviation rate is very low, clearly indicating that the components can explain and predict the data to a high degree. An investigation of the residual diagnostics found an ACF1 value of -0.02079 , and the autocorrected residual at lag 1 was above zero. For the review, the residual diagnostics were adjusted to white noise without any structure or manipulation.

To evaluate the statistical significance of the $SARIMA(4, 2, 0)(2, 0, 0)_{12}$ model, the t-test was applied to each estimated parameter. As shown in Table 4, all coefficients (AR1 to AR4 and SAR1 to SAR2) yielded absolute t-values greater than 1.96. These results demonstrate that both the non-seasonal and seasonal components are statistically significant, providing strong evidence for the model's structural validity. Furthermore, the model demonstrates high forecasting precision with a MAPE of 3.79% and a near-zero ACF1 for residuals, indicating that the model has effectively captured both the non-seasonal trends and the 12-month seasonal cycles present in the time series.

For the first time, $SARIMA(4,2,0)(2,0,0)_{12}$ was able to capture the pattern and relationship of the data over time in the elderly population and was ready for formal forecasting. The results of the Residual Diagnostics examination are shown in Figure 5.

The $SARIMA(4, 2, 0)(2, 0, 0)_{12}$ model equation can be written as the following equation (12). Stationary

data is defined because $d=2$ and, $S=12$ which z_t are stationary variables, are defined as follows:

$$z_t = (1-B)^2 y_t = y_t - 2y_{t-1} + y_{t-2}, \quad (3.1)$$

where y_t is the time series data at time t , and

B is the backward shift operator.

The equation in the form of AR operator is the product equation of Non-Seasonal AR(4) and Seasonal AR(2) acting on z_t without MA term because of $q=0$ and $Q=0$ as follows equation

$$(1-0.4596B^{12}-0.3599B^{24})(1-(-0.4733)B-(-0.5194)B^2-(-0.3151)B^3-(-0.3249)B^4)z_t = w_t, \quad (3.2)$$

when w_t (White Noise Error Term) with variance σ^2 equal to 14188, the total AR coefficient (α_i) is given by polynomial expansion as follows.

$$\begin{aligned} z_t &= \sum_{i=1}^{28} \alpha_i z_{t-i} + w_t \\ z_t &= (-0.4733)z_{t-1} + (-0.5194)z_{t-2} + (-0.3151)z_{t-3} + (-0.3249)z_{t-4} \\ &\quad + (0.4596)z_{t-12} + (0.3599)z_{t-24} \\ &\quad - (0.2175)z_{t-13} - (0.2387)z_{t-14} - (0.1448)z_{t-15} - (0.1493)z_{t-16} \\ &\quad - (0.1703)z_{t-25} - (0.1869)z_{t-26} - (0.1134)z_{t-27} - (0.1170)z_{t-28} \\ &\quad + w_t \end{aligned}$$

3.5 Ljung-Box Q Test

The SARIMA(4, 2, 0)(2, 0, 0)₁₂ model was tested using the Ljung-Box Q statistic under the following hypothesis:

H_0 : The model is suitable

H_1 : The model is not suitable

The SARIMA(4, 2, 0)(2, 0, 0)₁₂ model is an appropriate model for forecasting the number of elderly people in Songkhla province. The Ljung-Box Q test value is 19.947, and the p-value is 0.1071, which is greater than the significance level of 0.05, meaning that the model is appropriate for forecasting data because the residuals are "White Noise", indicating that there is no significant relationship. The analysis was conducted in R using the forecast and tseries packages.

4. FORECASTING RESULTS AND DISCUSSION

The time series of elderly people in Songkhla province can be forecast using the SARIMA(4, 2, 0)(2, 0, 0)₁₂ forecasting model for the elderly population in 2025 can be summarized as follows in Table 5.

From Table 5, the point prediction values show that the number of elderly people has continuously increased throughout 2025, starting in January 2025 with 266,791 people and ending in December 2025 with 276,085 people. This confirms the aging society in which the elderly population will increase steadily each month. The width of the 95% confidence interval has expanded significantly when considering the time period. In January 2025, the 95% confidence interval was approximately 467 people wide, and in December 2025, the 95% confidence interval was approximately 5,324 people wide. The expansion of the number of elderly people is shown in Figure 6

The time series of elderly people in Songkhla province can be forecast using the SARIMA(4, 2, 0)(2, 0, 0)₁₂. Trends in the increasing number of elderly people in Songkhla Province from 2025 to 2029.

The forecasting results for the five years from 2025 to 2029 reveal a consistent and statistically significant upward trend in the elderly demographic. According to the model estimates, the number of elderly citizens is projected to rise from 266,791 in January 2025 to 316,940 by December 2029. Over this 60-month horizon, the total increase is expected to reach approximately 50,149 individuals, reflecting a steady expansion of the aging population in the region. This continuous growth trajectory, as illustrated in Figure 7, underscores the intensifying demographic shift toward an aging society in Songkhla province.

For five years, the trend in elderly population growth for interval planning, health, welfare, and infrastructure planning for 2028-2029 should use a

95% confidence interval as the basis for resource allocation. The model should be reviewed and updated annually with new actual data to reduce the width of the long-term confidence interval. Since the forecast for December 2029 has a 95% chance that the elderly population will not exceed 359,948.6 people, relevant agencies should prepare budgets and personnel to cope with this peak level to avoid service shortages if the elderly population actually increases.

5. POLICY IMPLICATION

This research provides quantitative evidence that there is an urgency for provincial and national agencies to develop and implement comprehensive policies to meet the needs of an aging society. The findings can serve as an important tool for strategic planning of healthcare, social welfare, economic development, and infrastructure to ensure a good quality of life for the growing elderly population in Songkhla Province.

Relevant agencies should allocate budgets to support the development of public infrastructure for the elderly at the community and local levels. That is, it is recommended that government agencies allocate budgets to support the management of public spaces sufficient to accommodate the increasing number of elderly people in the future.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by Thailand Science Research and Innovation Fund (NSRF), Fundamental Fund (FF-67), and Rajamangala University of Technology Srivijaya project number 4696535

REFERENCES

Ayele, A. W., & Zewdie, M. A. (2017). Modeling and forecasting Ethiopian human population size and its pattern. *International Journal of Social Sciences, Arts and Humanities*, 4(3), 71-82.

- Anvari, S., Tuna, S., Canci, M., & Turkay, M. (2016). Automated Box-Jenkins forecasting tool with an application for passenger demand in urban rail systems. *Journal of Advanced Transportation*, 50(1), 25-49.
- Banchongphatthana, P., & Phantharak, K. (2021). *A study and comparison of ARIMA, ARIMAX, and GARCH forecasting models on the SET50 index before and after the COVID-19 pandemic crisis* [Master's thesis]. Thammasat University. (in Thai)
- Chanachok, K. (2010). *Guidelines for promoting the quality of life of the elderly in Plapak subdistrict administrative organization, Nakhon Phanom province* [Master's thesis]. Khon Kaen University.
- Department of Provincial Administration, Ministry of Interior. (2024). *Official Registration Statistics System*.
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American statistical association*, 74(366a), 427-431.
- Duangjai, K. (2011). *Factors affecting the quality of life of the elderly in Lam Sin subdistrict, Si Nakharin district, Phatthalung province* [Master's thesis]. Thaksin University. (in Thai)
- Hoksakul, K. (2008). *The participation of the elderly in organizing health activities*. Chiang Mai University. (in Thai)
- Husin, W. Z. W., & Aziz, N. A. (2021). Box-Jenkins model for forecasting malaysia life expectancy. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*.
- Hyndman, R., Athanasopoulos, G., & Bergmeir, C., et al. (2023). *forecast: Forecasting functions for time series and linearmodels*. Retrieved August 28, 2025, from <https://pkg.robjhyndman.com/forecast/>
- IDRUS, N., & MOHAMED, N. (2020). Forecasting the number of airplane passengers using box-jenkins and artificial neural network In Malaysia. *Universiti Malaysia Terengganu Journal of Undergraduate Research*, 2(4), 89-100.
- Jiandon, C., Suwannapong, N., & Boonshuyar, C., et. al. (2011). Quality of life of rural elderly in Wangnamkheaw District, Nakhonratchasima Province. *Journal of Public Health*, 41(3), 229-239.
- Kasem, T., & Tantiphalachiva, K. (1985). *Medical care for the elderly*. Bangkok: Arun Printing.
- Lorchirachoonkul, W., & Jittordwech, J. (2015). *Forecasting Techniques*. Bangkok: Chulalongkorn University. Press. (in Thai)
- Noknoi, J., & Boripunt, W. (2005). A study on the quality of life of the elderly in Songkhla province. *Princess of Naradhiwas Univ J*. 9(2), 15-27.
- Prompak, C. (2013). *Aging society of Thailand*. Bangkok: The Printing Office of the Secretariat of the Senate.
- Rochana, K., & Wongprachan, R. (2025). Statistical models for air quality forecasting: A case study of particulate matter less than 2.5 microns (PM2.5) in Chiang Mai Province. *NKRAFA J Sci Technol*. 21(2), 242-258.
- Songkhla Provincial Development Plan. (2021). *Provincial Government Report*. Songkhla, Thailand.
- Suk-anan, S. (2020). The Promoting Work Strategy for Thai Aging. *Journal of Social Synergy*. 11(1), 1-17.
- Thongyai, K. (2019). Factors affecting the happiness of the elderly in Kaoseng community, Mueang district, Songkhla province. *MUT Journal of Business Administration*, 16(1), 154-179.

- Trapletti, A., & Hornik, K. (2024). *tseries: time series analysis and computational finance*. R package version 0.10–58.
- World Health Organization. (2025). *Ageing and health*. Retrieved December 22, 2025, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>

การพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก และเมืองท่องเที่ยวรองในประเทศไทย

กันมารลีนด์ เจริญชาศรี¹ และ ยูปากรณ์ อารีพงษ์^{1*}

¹ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800 ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: yupaporn.a@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.005

รับเมื่อ 16 สิงหาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 12 ธันวาคม 2568 ตอรับเมื่อ 17 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบการพยากรณ์ และวิธีการพยากรณ์ที่ดีที่สุดสำหรับการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนในประเทศไทย ซึ่งในการศึกษานี้ มีความสนใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับมาตรการส่งเสริมการท่องเที่ยวและกระจายรายได้สู่ภูมิภาคต่าง ๆ จึงทำการแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่มตามการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย (ททท.) ซึ่งได้แก่ (1) เมืองท่องเที่ยวหลัก และ (2) เมืองท่องเที่ยวรอง และทำการสร้างตัวแบบการพยากรณ์โดยใช้ข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนบนโครงข่ายถนนของกระทรวงคมนาคมซึ่งเก็บข้อมูลจากระบบรายงานข้อมูลอุบัติเหตุของกระทรวงคมนาคม โดยศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารสำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินงานมีลักษณะเป็นรายเดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 รวมทั้งสิ้นจำนวน 72 เดือน และทำการศึกษาวิธีการพยากรณ์เดี่ยวโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุกรมเวลา 3 วิธี ได้แก่ (1) วิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Smoothing Method) (2) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา (Time Series Regression Method) (3) วิธีการบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method) และวิธีการพยากรณ์รวม 5 วิธี ได้แก่ (1) วิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน (Simple Average Method or Equivalent Weighted method: EW) (2) วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (3) วิธีการรวมแบบอิงค่า MAPE (MAPE-Based combination) (4) วิธีการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted Method: UNEW) และ (5) วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าอันดับ (Weighted Ranking method: WR) เมื่อได้ค่าพยากรณ์ที่มาจากวิธีการคำนวณด้วยวิธีข้างต้นแล้ว ทำการตรวจสอบและเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบการพยากรณ์โดยใช้เกณฑ์ค่าร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ที่ต่ำสุด เพื่อเลือกตัวแบบการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้ จากผลการวิจัยพบว่า วิธีการพยากรณ์ข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก โดยใช้วิธีการพยากรณ์รวมโดยการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted method: UNEW) และวิธีการพยากรณ์ข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง โดยใช้วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งเป็นวิธีการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และผลจากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยสามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยนี้ไปใช้ในการวางแผนมาตรการป้องกันอุบัติเหตุ และรับมือให้เป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนน, เมืองท่องเที่ยวหลัก, เมืองท่องเที่ยวรอง, ตัวแบบการพยากรณ์, การพยากรณ์เดี่ยว, การพยากรณ์รวม

Forecasting the Number of Road Accidents in Major and Secondary Tourist Cities in Thailand

Kanmalin Jaroenchasri¹ and Yupaporn Areepong^{1*}

¹Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: yupaporn.a@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.005

Received 16 August 2025; **Revised** 12 December 2025; **Accepted** 17 December 2025

ABSTRACT

This study purpose to identify the most suitable forecasting model and compare the forecasting performance of different methods to determine the best approach for predicting the number of road accidents in Thailand. Additionally, this study considers the impact of tourism promotion and regional income distribution by categorizing data into two groups, following the classification of the Tourism Authority of Thailand (TAT): (1) Major Tourist Cities and (2) Secondary Tourist Cities. The forecasting models were developed using monthly road accident data collected from the Ministry of Transport's accident reporting system, managed by the Information and Communication Technology Center, Office of the Permanent Secretary, Ministry of Transport. The dataset spans from January 2019 to December 2024, totaling 72 months. This study employs 3 individual forecasting methods based on time series analysis: (1) Exponential Smoothing Method, (2) Time Series Regression Method, and (3) Box-Jenkins Method. Additionally, 5 combined forecasting methods: (1) Simple Average Method or Equivalent Weighted method: EW, (2) Regression-Based combination, (3) MAPE-Based combination, (4) Unequivalent Weighted Method: UNEW, and (5) Weighted Ranking method: WR. The forecasting accuracy of each method was assessed using the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) criterion, with the model yielding the lowest MAPE being selected as the most effective. The findings indicate that for Major tourist cities, the most efficient forecasting approach was the Unequivalent Weighted Method (UNEW). While, Secondary tourist cities, the best-performing method was the Regression-Based Combination. The results of this study are expected to be beneficial for relevant authorities in formulating effective road accident prevention measures and response strategies to enhance public safety and regional planning.

KEYWORDS: Number of road accidents, Major tourist cities, Secondary tourist cities, Forecasting model, Individual forecasting, Combined forecasting

Please cite this article as: K. Jaroenchasri and Y. Areepong, "Forecasting the Number of Road Accidents in Major and Secondary Tourist Cities in Thailand," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 1-16, ID. e263552, December 2025 (in Thai).

1. บทนำ

อุบัติเหตุทางถนนเป็นปัญหาสำคัญในสังคมที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน รวมถึงเป็นภาระต่อระบบสาธารณสุขและเศรษฐกิจของประเทศ โดยจากสถิติของกระทรวงคมนาคม (Office of Transport and Traffic Policy and Planning, Safety Planning Division, 2023) และจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ประเทศไทยมีอัตราการเกิดอุบัติเหตุทางถนนในระดับสูง (Bunjongprasoet, 2021) เมื่อเทียบกับหลายประเทศทั่วโลก แม้จะมีมาตรการป้องกันและควบคุม เช่น การรณรงค์เรื่องความปลอดภัย การกำหนดกฎหมายจราจร และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคม

จำนวนการเกิดอุบัติเหตุในแต่ละปีที่เกิดขึ้นในประเทศไทยไม่ได้มีแนวโน้มที่จะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยด้านต่าง ๆ เช่น การขยายตัวของเมืองและโครงสร้างพื้นฐาน ระบบขนส่ง และการคมนาคม ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้ใช้ถนนมีความสะดวกในการสัญจรมากยิ่งขึ้น ประกอบกับในปัจจุบันมีการสนับสนุนให้ท่องเที่ยวในประเทศไทยมากขึ้น โดยมีการแบ่งเป็นเมืองท่องเที่ยวหลักและเมืองท่องเที่ยวรอง เพื่อรองรับมาตรการจากทางหลายหน่วยงาน ช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยวและกระจายรายได้สู่ภูมิภาคต่าง ๆ ซึ่งจากการสนับสนุนนี้เป็นเรื่องที่ดีต่อระบบเศรษฐกิจภายในประเทศอย่างมาก แต่ก็นำไปสู่จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ปัญหาการเกิดอุบัติเหตุเกิดได้จากหลากหลายปัจจัย (Ministry of Transport, 2024). เช่น ความผิดพลาดและความประมาทของผู้ใช้ถนน ด้านสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการขับขี่ ด้านความบกพร่องของยานพาหนะที่นำมาใช้งาน รวมทั้งความบกพร่องของถนนเองเช่นกัน ในการเกิดอุบัติเหตุแต่ละครั้งได้ส่งผลกระทบในหลายด้าน เช่น การเสียชีวิตและบาดเจ็บ ความเสียหายต่อทรัพย์สิน ด้านสังคม ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านเศรษฐกิจ

ทางหลวง ทางหลวงชนบท และการทางพิเศษแห่งประเทศไทย เป็นส่วนหนึ่งของระบบการขนส่งทางบกที่อยู่ภายใต้การดูแลของกระทรวงคมนาคม ซึ่งได้มีการพัฒนาและมีการพัฒนาขยายตัวเรื่อย ๆ ตามความเจริญของบ้านเมือง ส่งผลให้ผู้ใช้ระบบการเดินทางสัญจรทางบกเกิดความคล่องตัว สะดวกรวดเร็ว ทัวถึง และมีความปลอดภัย

ซึ่งช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน และยังเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยในการเติบโตของเศรษฐกิจในประเทศอีกด้วย

การพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนเป็นหนึ่งในแนวทางสำคัญที่สามารถนำไปใช้ในการวางแผนป้องกัน จัดการกับปัญหา และกำหนดมาตรการป้องกันอุบัติเหตุให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งหากสามารถคาดการณ์แนวโน้มจำนวนการเกิดอุบัติเหตุได้อย่างแม่นยำ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจะสามารถวางแผนรับมือได้ล่วงหน้า ไม่ว่าจะเป็นการจัดสรรทรัพยากร การพัฒนากฎหมายจราจร เพื่อลดการเกิดอุบัติเหตุ หรือลดความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาจำนวนการเกิดอุบัติเหตุจราจรทางถนนบนโครงข่ายถนนของกระทรวงคมนาคมของเมืองท่องเที่ยวหลักและเมืองท่องเที่ยวรอง โดยการนำเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลาใช้ในการพยากรณ์ทั้งวิธีการพยากรณ์เดี่ยว และวิธีการพยากรณ์รวมเพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ใหม่ที่มีความแม่นยำมากขึ้นและมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องผลการวิจัยของ Riansut, W. (2020) ที่ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกยางพาราในประเทศไทยด้วยวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ และวิธีการพยากรณ์รวม ที่พบว่าวิธีการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ วิธีการพยากรณ์รวม ผู้วิจัยจึงนำวิธีการที่เหมาะสมมาใช้ในการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุ และพยากรณ์ค่าในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนมาตรการป้องกันอุบัติเหตุ และรับมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยลดจำนวนอุบัติเหตุ ลดการสูญเสียที่เกิดจากอุบัติเหตุ และทำให้การจราจรปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) ชุดข้อมูลอุบัติเหตุบนโครงข่ายถนนของกระทรวงคมนาคม ซึ่งเป็นข้อมูลสาธารณะตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 และเป็นข้อมูลทุติยภูมิประกอบด้วยเหตุการณ์อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบนถนนของกระทรวงคมนาคมได้แก่ ถนนทางหลวง ทางหลวงชนบท และการทางพิเศษแห่งประเทศไทย(ทางด่วน) ซึ่งข้อมูล

เหตุการณ์อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นนี้มาจากการบันทึกโดยระบบรายงานข้อมูลอุบัติเหตุของกระทรวงคมนาคม (Ministry of Transport, 2024)

2) ข้อมูลจำนวนจังหวัดในประเทศไทยที่ถูกจัดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งกำหนดให้มีเมืองท่องเที่ยวหลักจำนวน 22 จังหวัด และเมืองท่องเที่ยวรองจำนวน 55 จังหวัด ทั้งนี้เป็นไปตามประกาศอธิบดีกรมสรรพากร เรื่อง กำหนดเขตพื้นที่ท่องเที่ยวสำหรับการอบรมสัมมนา และการเดินทางท่องเที่ยวและที่พักเพิ่มเติมจากจังหวัดท่องเที่ยวรอง ประกาศ ณ วันที่ 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 โดยพิจารณาตามคำแนะนำของกระทรวงการท่องเที่ยวและกีฬา (Government Contact Center (GCC), 2024)

2.2 การจัดการและเตรียมข้อมูล

เชื่อมโยงข้อมูลจังหวัดซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มเมืองท่องเที่ยวหลักและเมืองท่องเที่ยวรอง เข้ากับข้อมูลเหตุการณ์การเกิดอุบัติเหตุบนโครงข่ายถนนของกระทรวงคมนาคม และทำการแบ่งอนุกรมเวลาจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก และอนุกรมเวลาจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 จำนวน 60 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2566 ใช้สำหรับการวิเคราะห์เพื่อสร้างตัวแบบการพยากรณ์ด้วยวิธีต่างๆ และส่วนที่ 2 จำนวน 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ใช้สำหรับการตรวจสอบและเปรียบเทียบผลของการพยากรณ์ในแต่ละตัวแบบที่สร้างขึ้นด้วยข้อมูลในส่วนที่ 1

3. การสร้างตัวแบบการพยากรณ์และวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลอนุกรมเวลาไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลา เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและคัดเลือกตัวแบบที่เหมาะสม จำนวน 8 วิธี โดยวิธีการพยากรณ์เดี่ยว 3 วิธี ได้แก่ (1) วิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Smoothing Method) (2) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา (Time Series Regression Method) และ (3) วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method) และวิธีการพยากรณ์ร่วม 5 วิธี ได้แก่ (1) วิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน (Simple Average Method or Equivalent Weighted method: EW) (2)

วิธีการพยากรณ์ร่วมโดย ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (3) วิธีรวมแบบอิงค่า MAPE (MAPE-Based combination) (4) วิธีการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted method: UNEW) และ (5) วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าอันดับ (Weighted Ranking method: WR)

3.1 การสร้างตัวแบบพยากรณ์

3.1.1 วิธีการพยากรณ์เดี่ยว

1) วิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Smoothing Method) เหมาะสำหรับการพยากรณ์ข้อมูลที่มีแนวโน้ม และมีอิทธิพลของฤดูกาล และใช้พยากรณ์ระยะสั้นจนถึงปานกลาง ข้อมูลควรอยู่ในรูปแบบรายเดือน รายสัปดาห์ หรือรายไตรมาส โดยในงานวิจัยนี้ ใช้การพยากรณ์ 2 รูปแบบ ได้แก่

1.1) วิธีการปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก (Winters' Additive Exponential Smoothing Method) เหมาะสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีการเคลื่อนไหวจากทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล โดยที่อิทธิพลของฤดูกาลต่อค่าของอนุกรมเวลามีค่าคงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป และไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของข้อมูลอนุกรมเวลา โดยมีตัวแบบพยากรณ์ คือ

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + S_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

1.2) วิธีการปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ (Winters' Multiplicative Exponential Smoothing Method) เหมาะสมกับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีการเคลื่อนไหวจากทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล โดยที่อิทธิพลของฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป และมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับข้อมูลอนุกรมเวลา โดยมีตัวแบบพยากรณ์ คือ

$$Y_t = (\beta_0 + \beta_1 t) S_t \varepsilon_t \quad (2)$$

โดยสัญลักษณ์ของสมการ (1) และ (2) แสดงดังนี้

Y_t คือ ค่าข้อมูลหรือค่าสังเกต ณ คาบเวลาที่

β_0, β_1 คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ

ε_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t

S_t คือ ค่าความผันแปรตามฤดูกาล ณ เวลา t

2) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา (Time Series Regression Method)

2.1) กรณีที่ข้อมูลอนุกรมเวลาไม่มีแนวโน้ม มีแต่ความผันแปรตามฤดูกาล ในกรณีนี้จำนวนตัวแปรดัมมีที่สร้างขึ้นมีจำนวนเท่ากับ $L-1$ ตัว โดยที่ L คือจำนวนฤดูกาลต่อปี
ตัวแบบการถดถอยคือ

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 S_{1t} + \dots + \beta_{L-1} S_{L-1,t} + \varepsilon_t \quad (3)$$

2.2) กรณีที่ข้อมูลอนุกรมเวลามีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและมีความผันแปรตามฤดูกาล ตัวแบบการถดถอยคือ

$$Y_t = \beta_0 + \beta t + \beta_1 S_{1t} + \dots + \beta_{L-1} S_{L-1,t} + \varepsilon_t \quad (4)$$

โดยสัญลักษณ์ของสมการ (3) และ (4) แสดงดังนี้

Y_t คือ ค่าข้อมูลหรือค่าสังเกต ณ คาบเวลาที่ t

β_0 คือ ระยะที่ตัดแกนตั้ง (Y-intercept)

β คือ อัตราการเพิ่มหรือลดของ Y_t เมื่อเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย

β_i คือ ค่าวัดความผันแปรตามฤดูกาลที่ i เมื่อเทียบกับฤดูกาล ที่ L สำหรับ $i = 1, 2, \dots, L-1$

ε_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t

3) วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method) เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูงสำหรับการพยากรณ์ในระยะสั้น โดยกระบวนการพยากรณ์นี้ต้องอาศัยข้อมูลอนุกรมเวลาที่เป็นสเตชันนารี (Stationary Series) กล่าวคือ อนุกรมเวลานั้นต้องมีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่สำหรับแต่ละเวลา
ตัวแบบพยากรณ์คือ

$$(1-B)^d(1-B^L)^D(1-\phi_1 B - \dots - \phi_p B^p)(1-\phi_L B^L - \dots - \phi_{PL} B^{PL})Y_t = \theta_0 + (1-\theta_1 B - \dots - \theta_q B^q)(1-\theta_L B^L - \dots - \theta_{QL} B^{QL})\varepsilon_t \quad (5)$$

โดยที่

Y_t คือ ค่าข้อมูลหรือค่าสังเกต ณ คาบเวลาที่ t

θ_0 คือ ค่าคงที่

$\phi_1, \dots, \phi_p$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยในตัว

$\theta_1, \dots, \theta_q$ คือ สัมประสิทธิ์ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

$\phi_L, \dots, \phi_{PL}$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยในตัวส่วนฤดูกาล

$\theta_L, \dots, \theta_{QL}$ คือ สัมประสิทธิ์ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ส่วนฤดูกาล

B คือ ตัวดำเนินการถดถอยหลังเวลา โดยที่ $B^m Y_t = Y_{t-m}$

p คือ อันดับของตัวแบบการถดถอย

d คือ จำนวนครั้งของการทำผลต่างเพื่อให้อนุกรมเวลาอยู่ในสถานะคงที่

q คือ อันดับของตัวแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

P คือ อันดับของตัวแบบการถดถอยฤดูกาล

D คือ จำนวนครั้งของการทำผลต่างฤดูกาล

Q คือ อันดับของตัวแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ฤดูกาล

L คือ จำนวนฤดูกาล (อนุกรมเวลารายเดือน $L = 12$)

ε_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ณ คาบเวลาที่ t และ

$$\varepsilon_t \sim \text{Niid}(0, \sigma^2)$$

ในวิธีการพยากรณ์เดี่ยวแต่ละวิธี เมื่อได้ตัวแบบการพยากรณ์แล้ว จะต้องตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ โดยตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของค่าความคลาดเคลื่อน (ε_t) ซึ่งมี 4 เงื่อนไข ได้แก่ (1) ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (2) ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ (3) ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และ (4) ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน แต่สำหรับวิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา (Time Series Regression Method) หากพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระต่อกัน สามารถกำหนดให้เป็นตัวแบบ $AR(1)$ ได้ โดยที่ $\varepsilon_t = \phi \varepsilon_{t-1} + \eta_t$ และทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ใหม่ และตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบการพยากรณ์โดยทำการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของค่าความคลาดเคลื่อน (ε_t) ทั้งหมดอีกครั้ง หากทำการตรวจสอบแล้วพบว่าเป็นไปตาม เงื่อนไขทั้งหมดแสดงว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์อนุกรมเวลาได้

3.1.2 การพยากรณ์รวม (Combined Forecasts: CF)

การพยากรณ์รวมเป็นการรวมกันของค่าพยากรณ์เดี่ยวตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไป เพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ใหม่ที่มีความแม่นยำมากขึ้นและมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งหลักการในการพยากรณ์รวมนั้นจะเป็นการพิจารณาตัวแบบพยากรณ์ที่มีพื้นฐานต่างกัน โดยมีตัวแบบคือ

$$\widehat{CF}_{it} = \sum_{i=1}^m W_i \widehat{Y}_{it} \quad (6)$$

โดยที่

W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีการพยากรณ์ที่ i

$\widehat{Y}_{it}$ คือ ค่าพยากรณ์ของวิธีการพยากรณ์ที่ i ณ คาบเวลาที่ t

i คือ วิธีการพยากรณ์ที่ i ; $i = 1, 2, \dots, m$

t คือ คาบเวลา ; $t = 1, 2, \dots, n$

m คือ จำนวนวิธีการพยากรณ์เดี่ยว

1) วิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน (Simple Average Method or Equivalent Weighted Method: EW) เป็นวิธีที่กำหนดให้ค่าพยากรณ์เดี่ยวแต่ละวิธีที่นำมารวมกันมีความสำคัญเท่ากันทุกวิธี โดยไม่ให้ค่าน้ำหนักใดมากกว่าหรือน้อยกว่าวิธีอื่น ผลการพยากรณ์รวมจึงเกิดจากการเฉลี่ยค่าพยากรณ์ของแต่ละวิธีโดยตรง สูตรการคำนวณเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนัก คือ

$$W_i = \frac{1}{m} \quad (7)$$

โดยที่ W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีการพยากรณ์ที่ i
 m คือ จำนวนวิธีการพยากรณ์เดี่ยว

2) วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้วิธีการถดถอย เป็นวิธีที่นำค่าพยากรณ์เดี่ยวแต่ละวิธีมาใช้เป็นตัวแปรอิสระในสมการถดถอย เพื่อหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรวมค่าพยากรณ์เหล่านั้นเข้าด้วยกัน โดยการคัดเลือกตัวแปรอิสระจะดำเนินการด้วยวิธี Stepwise ซึ่งจะคัดเลือกเฉพาะวิธีการพยากรณ์ที่มีอิทธิพลต่อค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่านั้น ซึ่งมีตัวแบบการคำนวณ ดังนี้

$$CF_{it} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \hat{Y}_{it} + \varepsilon_t \quad (8)$$

โดยที่

$\hat{Y}_{it}$ คือ ค่าพยากรณ์ของวิธีการพยากรณ์ที่ i ณ คาบเวลา t

i คือ วิธีการพยากรณ์ที่ i ; $i = 1, 2, \dots, m$

t คือ คาบเวลา ; $t = 1, 2, \dots, n$

3) วิธีรวมผลการพยากรณ์แบบอิงค่า MAPE (MAPE-Based combination) ซึ่งจะมีการคำนวณค่าน้ำหนัก (W_i) โดยอ้างอิงจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยว ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 ซึ่งมีสูตรการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนี้

$$W_i = \frac{100 - MAPE_{w_i}}{\sum_{i=1}^m 100 - MAPE_{w_i}} \quad (9)$$

$$\text{เมื่อ } MAPE_{w_i} = \left(\frac{100}{n} \right) \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \quad (10)$$

โดยที่ W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีการพยากรณ์ที่ i

Y_t คือ ค่าจริงของข้อมูล

$\hat{Y}_t$ คือ ค่าพยากรณ์ของข้อมูล

n คือ จำนวนข้อมูล

4) วิธีการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted Method: UNEW) เป็นให้น้ำหนักกับแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยวไม่เท่ากัน โดยพิจารณาจากจำนวนครั้งที่แต่ละวิธีให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด หากวิธีการพยากรณ์ใดให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำบ่อยครั้ง จะได้รับน้ำหนักมากขึ้น และในทางกลับกันถ้าวิธีการพยากรณ์ใดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงบ่อยครั้ง จะได้รับน้ำหนักน้อย ซึ่งมีสูตรการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนี้

$$W_i = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดในวิธี } i}{\text{ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการพยากรณ์}} \quad (11)$$

โดยที่

W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ยของวิธีการพยากรณ์ที่ i

n คือ จำนวนครั้งที่ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดในวิธีที่ i

5) วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าอันดับ (Weighted Ranking Method: WR) เป็นการรวมผลการพยากรณ์ที่ให้น้ำหนักกับแต่ละวิธีการพยากรณ์ โดยกำหนดค่าอันดับให้แต่ละวิธีการพยากรณ์ซึ่งพิจารณาจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยว หากวิธีการพยากรณ์ใดให้ค่า MAPE มากที่สุด ค่าอันดับที่ได้จะน้อยที่สุด และในทางกลับกันถ้าวิธีการพยากรณ์ใดให้ค่า MAPE ต่ำที่สุด จะได้รับค่าอันดับที่มากที่สุด จากนั้นนำค่าอันดับที่ได้ของแต่ละวิธีหารด้วยผลรวมของค่าอันดับทั้งหมดเพื่อคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธีการพยากรณ์ ซึ่งมีสูตรการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนี้

$$W_i = \frac{\psi_i}{\sum_{i=1}^m \psi_i} \quad (12)$$

โดยที่

W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีการพยากรณ์ที่ i

ψ_i คือ ค่าอันดับของวิธีการพยากรณ์ที่ i
 $\sum_{i=1}^m \psi_i$ คือ ผลรวมของค่าอันดับทั้งหมดของวิธีการพยากรณ์ที่ i ; $i = 1, 2, \dots, m$

m คือ จำนวนวิธีการพยากรณ์เดี่ยว

3.2 การเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์ และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้

วิธีการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ที่ได้จากวิธีการพยากรณ์ที่ต่างกันไป อาจพิจารณาเปรียบเทียบความเอนเอียงของค่าพยากรณ์ หรือเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าพยากรณ์ ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าพยากรณ์ โดยใช้ ค่าร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error : MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \times 100$$

โดยที่ Y_t คือ ค่าข้อมูลหรือค่าสังเกต ณ คาบเวลา t
 $\hat{Y}_t$ คือ ค่าพยากรณ์ ณ คาบเวลา t
 n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

โดยพิจารณาจากค่า MAPE ของการพยากรณ์ในแต่ละวิธี และเลือกตัวแบบที่ให้ค่า MAPE ต่ำที่สุด หากวิธีการใดให้ค่า MAPE ต่ำที่สุดถือว่าวิธีการพยากรณ์นั้นมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลนั้น ๆ มีประสิทธิภาพและความแม่นยำมากที่สุด ทั้งนี้ ค่า MAPE มักใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยทั่วไปสามารถจัดระดับได้ดังนี้ ได้แก่ ค่า MAPE ต่ำกว่า 10 ถือว่ามีความแม่นยำสูงมาก ค่า MAPE ตั้งแต่ 10 ถึงต่ำกว่า 20 ถือว่ามีความแม่นยำดี ค่า

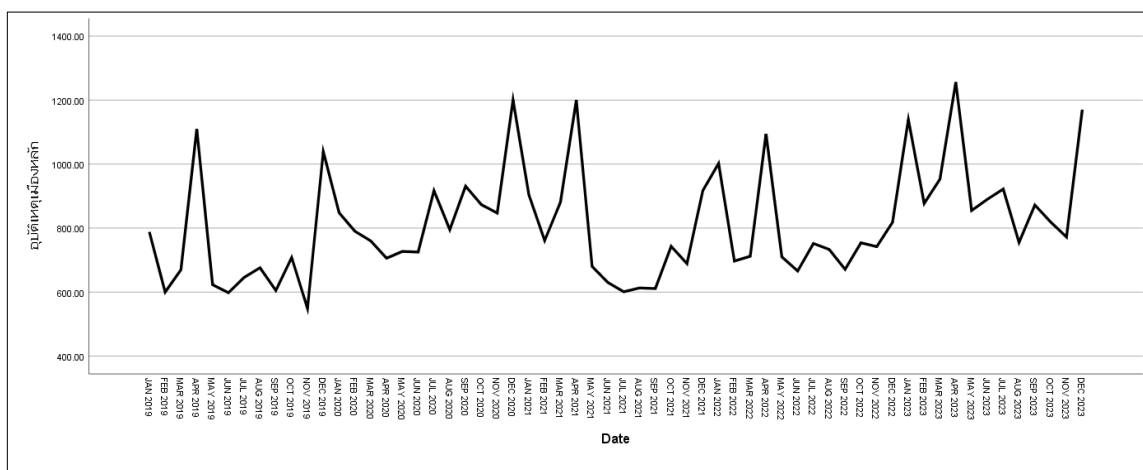
MAPE ตั้งแต่ 20 ถึงต่ำกว่า 50 ถือว่ามีความแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และค่า MAPE ตั้งแต่ 50 ขึ้นไปถือว่ามีความแม่นยำต่ำและอาจไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการพยากรณ์เชิงปฏิบัติ

3.3 การพยากรณ์ค่าในอนาคต

เมื่อได้ตัวแบบการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำมากที่สุดแล้ว จะนำตัวแบบการพยากรณ์ดังกล่าวไปใช้ในการพยากรณ์ค่าในอนาคต โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาเดิมที่ใช้กับวิธีการที่เลือกใช้วิธีการพยากรณ์นั้น ๆ เป็นฐานในการคำนวณ ทั้งนี้ การพยากรณ์จะดำเนินการตามโครงสร้างของตัวแบบที่เลือก เช่น การใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้จากกระบวนการสร้างตัวแบบร่วมกับค่าปัจจุบันของตัวแปร เพื่อคำนวณค่าพยากรณ์ในอนาคต

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลักและเมืองท่องเที่ยวรอง มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมและมีความแม่นยำสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ค่าในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลที่นำมาใช้สำหรับการวิจัยนี้เป็นข้อมูลทุติยภูมิซึ่งเป็นข้อมูลสาธารณะ เก็บรวบรวมตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ทั้งนี้ ได้ทำการศึกษาวิธีการพยากรณ์เดี่ยว 3 วิธี และวิธีการพยากรณ์รวม 5 วิธี และนำค่าการพยากรณ์ที่ได้มาเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการพยากรณ์โดยใช้เกณฑ์ค่าร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ที่ต่ำสุด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 การเคลื่อนไหวของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

4.1 ตัวแบบการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

4.1.1 วิธีการพยากรณ์เดี่ยวของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

1) วิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Smoothing Method)

จากการเคลื่อนไหวของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก ซึ่งมีทั้งแนวโน้ม และการผันแปรตามฤดูกาล ชุดข้อมูลนี้จึงเหมาะสมกับวิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลังด้วยวิธีของวินเทอร์ ทั้งนี้ จากการเคลื่อนไหวของข้อมูลพบว่าอิทธิพลของฤดูกาลมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของข้อมูลเมื่อเวลามีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้วิธีการปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ (Winters' Multiplicative Exponential Smoothing Method) สำหรับทำการสร้างตัวแบบการพยากรณ์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เพื่อคำนวณหาค่าคงที่การปรับเรียบ ซึ่งได้ค่า $\alpha = 0.310$, $\gamma = 9.142\text{E-}7$ และ $\delta = 0.001$ จากนั้นนำค่าปรับเรียบที่ได้ไปทำการหาค่าระดับของข้อมูล a_t และส่วนที่เป็นแนวโน้ม b_t โดยใช้โปรแกรม Minitab 18 เพื่อนำค่าที่ได้จากการประมวลผลไปใช้ในการหาสมการพยากรณ์แสดงดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = (909.054 + 0.892(m))\hat{S}_{t-p+m}$$

$$\begin{array}{lll} \text{เมื่อ } \hat{S}_1 = 1.160 & \hat{S}_2 = 0.923 & \hat{S}_3 = 0.984 \\ \hat{S}_4 = 1.327 & \hat{S}_5 = 0.889 & \hat{S}_6 = 0.866 \\ \hat{S}_7 = 0.947 & \hat{S}_8 = 0.882 & \hat{S}_9 = 0.910 \\ \hat{S}_{10} = 0.960 & \hat{S}_{11} = 0.886 & \hat{S}_{12} = 1.266 \end{array}$$

p คือ จำนวนฤดูกาล

2) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา (Time Series Regression Method)

ทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อพิจารณาตัวแปรอิสระว่าส่งผลต่อตัวแปรตามหรือไม่ โดยใช้ค่าที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS โดยจากผลการทดสอบ พบว่าค่า Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.001 (sig.< 0.001) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha=0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) กล่าวคือ มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ส่งผลต่อตัวแปรตามที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$

เมื่อทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยจากการคัดเลือกตัวแบบของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก ซึ่งเมื่อพิจารณาว่า Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.001 (sig.< 0.001) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha=0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) กล่าวคือ $\alpha \neq 0$ (ค่าคงที่มีค่าไม่เท่ากับ 0) และ $\beta \neq 0$ แสดงว่าข้อมูลอนุกรมเวลานี้มีแนวโน้มที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ดังนั้น สมการที่ใช้ในการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุของเมืองท่องเที่ยวหลักโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา คือ

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t = & 914.55 + 0.001t - 57.69S_1 \\ & - 252.064S_2 - 205.037S_3 + 69.589S_4 \\ & - 287.585S_5 - 307.958S_6 - 245.332S_7 \\ & - 301.706S_8 - 281.279S_9 - 243.053S_{10} \\ & - 305.286S_{11} + \varepsilon_t \end{aligned}$$

โดยที่

$$\varepsilon_t = \phi_1 \varepsilon_{t-1} + e_t$$

$\hat{Y}_t$ คือ จำนวนการเกิดอุบัติเหตุของเมืองท่องเที่ยวหลัก

t คือ เวลา (จุดกำเนิด ณ วันที่ 1 มกราคม 2567)

3) วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method)

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนไหวของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก พบว่าข้อมูลมีแนวโน้ม และการผันแปรตามฤดูกาล ซึ่งบ่งชี้ว่าข้อมูลมีลักษณะไม่คงที่หรือไม่เป็นสเตชันนารี จึงดำเนินการกำหนดผลต่างปกติ ($d = 1$) เพื่อลดแนวโน้มของข้อมูล และกำหนดผลต่างตามฤดูกาล ($D = 1$) เพื่อลดผลกระทบของฤดูกาล เพื่อที่จะทำให้อนุกรมเวลากลายเป็นสเตชันนารี

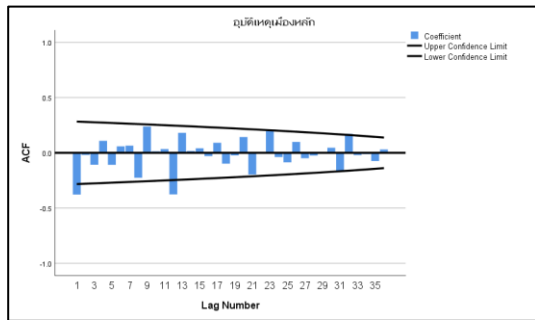
จากนั้นพิจารณารูป ACF(รูปที่ 2) และ PACF(รูปที่ 3) ได้ตัวแบบที่เหมาะสม คือ $ARIMA(0,1,1)(1,1,0)_{12}$ ดังนั้นตัวแบบการพยากรณ์คือ

$$(1-B)(1-B^{12})(1-\phi_{12}B^{12})Y_t = (1-\theta_1B)\varepsilon_t$$

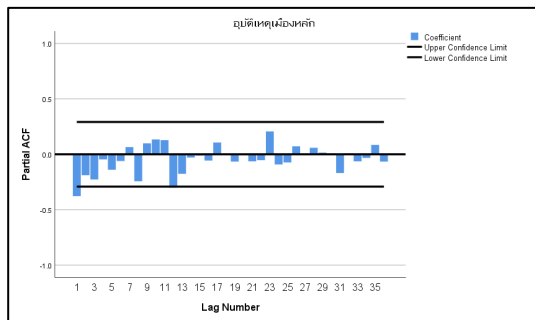
เมื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์รูปแบบของ $ARIMA(0,1,1)(1,1,0)_{12}$ จะได้ค่าประมาณของ $\hat{\theta}_0 = 0$, $\hat{\theta}_1 = 0.655$ และ $\hat{\phi}_{12} = -0.575$

ดังนั้น สมการการพยากรณ์ คือ

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t = & Y_{t-1} + Y_{t-12} + Y_{t-13} - 0.575Y_{t-12} + 0.575Y_{t-13} \\ & + 0.575Y_{t-24} - 0.575Y_{t-25} - 0.655\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned}$$



รูปที่ 2 กราฟ ACF ของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก



รูปที่ 3 กราฟ PACF ของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

4.1.2 วิธีการพยากรณ์ร่วมของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

นำค่าที่ได้จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยวไปทำการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมด้วยวิธีการต่าง ๆ จำนวน 5 วิธี ได้แก่ (1) วิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน (Simple Average Method or Equivalent Weighted method: EW) (2) วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (3) วิธีรวมแบบอิงค่า MAPE (MAPE-Based combination) (4) วิธีการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted method: UNEW) และ (5) วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าอันดับ (Weighted Ranking method: WR)

โดยจะกำหนดให้ $\hat{Y}_{1t}$ แทน ค่าพยากรณ์ของวิธีที่ 1 (Exponential Smoothing Method) , $\hat{Y}_{2t}$ แทน ค่าพยากรณ์ของวิธีที่ 2 (Time Series Regression Method) และ $\hat{Y}_{3t}$ แทนค่าพยากรณ์ของวิธีที่ 3 (Box-Jenkins Method)

1) วิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน (Simple Average Method or Equivalent Weighted method: EW)

จากการพยากรณ์ด้วยวิธีพยากรณ์เดี่ยว 3 วิธี ($m=3$) จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากันคือ

$W_1 = W_2 = W_3 = \frac{1}{3}$ ดังนั้น ตัวแบบที่ได้จากวิธีการพยากรณ์ร่วมโดยวิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน คือ

$$CF_{EW} = \frac{1}{3}\hat{Y}_{1t} + \frac{1}{3}\hat{Y}_{2t} + \frac{1}{3}\hat{Y}_{3t}$$

2) วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย

เมื่อทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยจากการคัดเลือกตัวแบบของข้อมูลที่ได้จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยวทั้ง 3 วิธี เมื่อพิจารณาค่า Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.001 (sig.< 0.001) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha=0.05$ พบว่า $\beta_{expo} \neq 0$ เพียงค่าเดียว แสดงว่า ค่าพยากรณ์เดี่ยวโดยวิธี Exponential Smoothing Method ส่งผลต่อค่าจริง (Y_t) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์ร่วมคือ

$$CF_{it} = 1.104\hat{Y}_{1t}$$

3) วิธีรวมแบบอิงค่า MAPE (MAPE-Based combination)

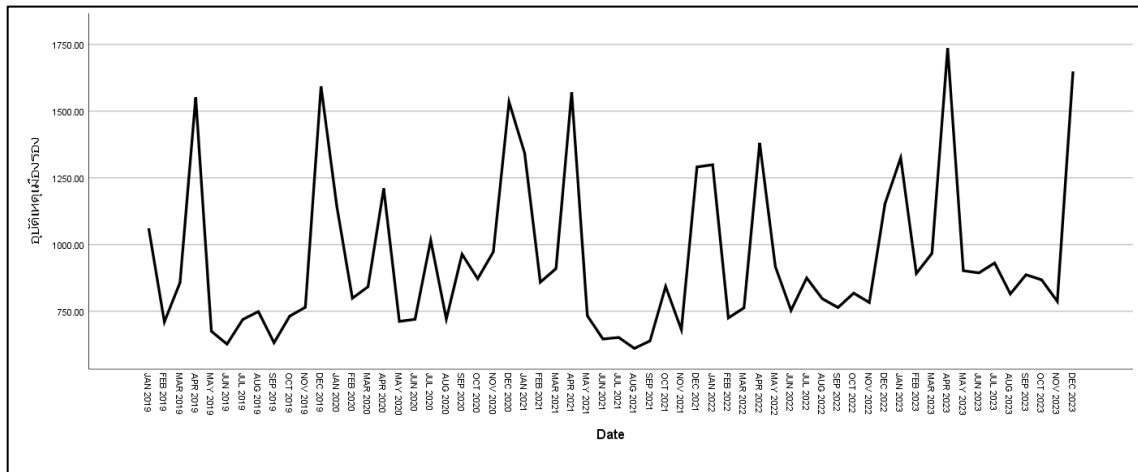
ทำการคำนวณค่าน้ำหนัก (W_i) โดยอ้างอิงจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยว ได้ค่าถ่วงน้ำหนัก คือ $W_{expo} = 0.3344$, $W_{tr} = 0.3301$ และ $W_{box} = 0.3355$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์ร่วม คือ

$$CF_{MAPE} = 0.3344\hat{Y}_{1t} + 0.3301\hat{Y}_{2t} + 0.3355\hat{Y}_{3t}$$

4) วิธีการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted Method: UNEW)

ทำการคำนวณค่าน้ำหนัก (W_i) โดยอ้างอิงจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยว จากสูตรการคำนวณดังสมการ (10) ซึ่งพบว่าจำนวนครั้งที่ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของแต่ละวิธีต่างกัน ดังนี้ 1) วิธี Exponential Smoothing มีจำนวนครั้งของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด 5 ครั้ง 2) วิธี Time Series Regression มีจำนวนครั้งของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด 2 ครั้ง และ 3) วิธี Box-Jenkins มีจำนวนครั้งของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด 5 ครั้ง จะได้ค่าถ่วงน้ำหนัก คือ $W_1 = 0.4167$, $W_2 = 0.1667$ และ $W_3 = 0.4167$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์ร่วม คือ

$$CF_{UNEW} = 0.4167\hat{Y}_{1t} + 0.1667\hat{Y}_{2t} + 0.4167\hat{Y}_{3t}$$



รูปที่ 4 การเคลื่อนไหวของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

5) วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าอันดับ (Weighted Ranking method : WR)

กำหนดค่าอันดับให้แต่ละวิธีการพยากรณ์ซึ่งพิจารณาจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดียว หากวิธีการพยากรณ์ใดให้ค่า MAPE มากที่สุด ค่าอันดับที่ได้จะน้อยที่สุดจากนั้นนำค่าอันดับที่ได้ของแต่ละวิธีหารด้วยผลรวมของค่าอันดับทั้งหมดเพื่อคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธีการพยากรณ์จากสูตรการคำนวณสมการ (11) จะได้ค่าถ่วงน้ำหนัก คือ $W_1 = 0.3333$, $W_2 = 0.1667$ และ $W_3 = 0.5$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์รวม คือ

$$\hat{CF}_{WR} = 0.3333\hat{Y}_{1t} + 0.1667\hat{Y}_{2t} + 0.5\hat{Y}_{3t}$$

หลังจากได้ค่าพยากรณ์จากวิธีการทั้ง 8 วิธีแล้ว และนำข้อมูลส่วนที่ 2 ที่ทำการสำรองไว้มาทำการเปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากแต่ละวิธี โดยใช้เกณฑ์ค่าร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ที่ต่ำสุด แสดงดังตารางที่ 1

ทำการพิจารณาจากค่าร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) ที่ได้จากวิธีการพยากรณ์ทั้ง 8 วิธี เมื่อทำการ

4.2 ตัวแบบการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

4.2.1 วิธีการพยากรณ์เดียวของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

1) วิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Smoothing Method)

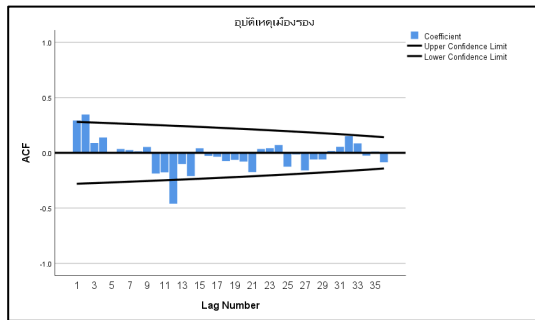
จากการเคลื่อนไหวของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง ซึ่งมีทั้งแนวโน้ม และการ

เปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก ในส่วนของการพยากรณ์เดียว พบว่าตัวแบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ตัวแบบที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method) ซึ่งมีค่า MAPE เท่ากับ 8.597 และเมื่อทำการเปรียบเทียบในส่วนของการพยากรณ์รวม พบว่าตัวแบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ตัวแบบที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิธีการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted method: UNEW) ซึ่งมีค่า MAPE เท่ากับ 7.643 กล่าวคือ วิธีการพยากรณ์รวมช่วยทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลงและปรับปรุงประสิทธิภาพของการพยากรณ์ ซึ่งทำให้ค่าพยากรณ์ที่ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

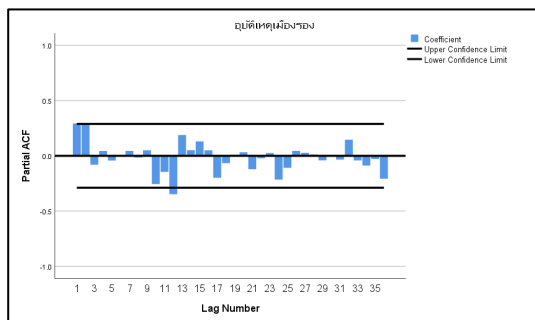
จึงสรุปได้ว่า วิธีการพยากรณ์รวมโดยการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted method: UNEW) เป็นวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงมากที่สุด

4.2 ตัวแบบการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

ผันแปรตามฤดูกาล ชุดข้อมูลนี้จึงเหมาะสมกับวิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลังด้วยวิธีของวินเทอร์ ทั้งนี้ จากการเคลื่อนไหวของข้อมูลพบว่าอิทธิพลของฤดูกาลมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของข้อมูลเมื่อเวลามีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้วิธีการปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ (Winters' Multiplicative Exponential Smoothing Method) สำหรับทำการสร้างตัวแบบการพยากรณ์โดยใช้โปรแกรม



รูปที่ 5 กราฟ ACF ของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองทองเที๋ยรอง



รูปที่ 6 กราฟ PACF ของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองทองเที๋ยรอง

สำเร็จรูป SPSS เพื่อคำนวณค่าคงที่การปรับเรียบ ซึ่งได้ค่า $\alpha = 0.282$, $\gamma = 0.001$ และ $\delta = 0.211$ จากนั้นนำค่าปรับเรียบที่ได้ไปทำการหาค่าระดับของข้อมูล a_t และส่วนที่เป็นแนวโน้ม b_t โดยใช้โปรแกรม Minitab 18 เพื่อนำค่าที่ได้จากการประมวลผลไปใช้ในการหาสมการพยากรณ์แสดงดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = (1054.6 + 4.069(m))\hat{S}_{t-p+m}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \hat{S}_1 &= 1.341 & \hat{S}_2 &= 0.853 & \hat{S}_3 &= 0.921 \\ \hat{S}_4 &= 1.580 & \hat{S}_5 &= 0.839 & \hat{S}_6 &= 0.768 \\ \hat{S}_7 &= 0.874 & \hat{S}_8 &= 0.771 & \hat{S}_9 &= 0.810 \\ \hat{S}_{10} &= 0.865 & \hat{S}_{11} &= 0.827 & \hat{S}_{12} &= 1.503 \end{aligned}$$

p คือ จำนวนฤดูกาล

2) วิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา (Time Series Regression Method)

ทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อพิจารณาตัวแปรอิสระว่าส่งผลต่อตัวแปรตามหรือไม่ โดยใช้ค่าที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS โดยจากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณาค่า Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.001 (sig.< 0.001) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha=0.05$ จึงปฏิเสธ

สมมติฐานหลัก (H_0) กล่าวคือ มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ส่งผลต่อตัวแปรตามที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$

เมื่อทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยจากการคัดเลือกตัวแบบของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองทองเที๋ยรอง ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.001 (sig.< 0.001) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha=0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) กล่าวคือ $\alpha \neq 0$ (ค่าคงที่มีค่าไม่เท่ากับ 0) และ $\beta \neq 0$ แสดงว่าข้อมูลอนุกรมเวลานี้มีแนวโน้มที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ดังนั้น สมการที่ใช้ในการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุของเมืองทองเที๋ยรองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา คือ

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t &= 1357.225 + 2.416t - 183.024S_1 \\ &\quad - 623.040S_2 - 554.456S_3 + 64.928S_4 \\ &\quad - 639.288S_5 - 701.704S_6 - 593.520S_7 \\ &\quad - 695.936S_8 - 659.752S_9 - 612.768S_{10} \\ &\quad - 643.984S_{11} + \varepsilon_t \end{aligned}$$

โดยที่

$$\varepsilon_t = \phi_1 \varepsilon_{t-1} + e_t$$

$\hat{Y}_t$ คือ จำนวนการเกิดอุบัติเหตุของเมืองทองเที๋ยรอง

t คือ เวลา (จุดกำเนิด ณ วันที่ 1 มกราคม 2567)

3) วิธีบอกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method)

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนไหวของข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองทองเที๋ยรอง พบว่าข้อมูลมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่ และยังคงมีการผันแปรตามฤดูกาล ซึ่งบ่งชี้ว่าข้อมูลมีลักษณะไม่คงที่หรือไม่เป็นสเตชันนารี จึงดำเนินการกำหนดผลต่างตามฤดูกาล ($D=1$) เพื่อลดผลกระทบของฤดูกาลเพียงอย่างเดียว เพื่อที่จะทำให้อนุกรมเวลากลายเป็นสเตชันนารี

จากนั้นพิจารณารูป ACF (รูปที่ 4) และ PACF (รูปที่ 5) ได้ตัวแบบที่เหมาะสม คือ $ARIMA(1,0,0)(1,1,0)_{12}$ ดังนั้นตัวแบบการพยากรณ์คือ

$$(1-B^{12})(1-\phi_1 B)(1-\phi_{12} B^{12})Y_t = \varepsilon_t$$

เมื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์รูปแบบของ $ARIMA(1,0,0)(1,1,0)_{12}$ จะได้ค่าประมาณของ $\hat{\theta}_0 = 0$, $\hat{\phi}_1 = 0.424$ และ $\hat{\phi}_{12} = -0.642$

ดังนั้น สมการการพยากรณ์ คือ

$$\hat{Y}_t = 0.424Y_{t-1} + Y_{t-12} - 0.642Y_{t-12} - 0.424Y_{t-13} + 0.642Y_{t-24} + 0.272Y_{t-23} - 0.272Y_{t-25} + \varepsilon_t$$

4.2.2 วิธีการพยากรณ์รวมของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

นำค่าที่ได้จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยว ไปทำการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมด้วยวิธีการต่าง ๆ จำนวน 5 วิธี โดยจะกำหนดให้ $\hat{Y}_{1t}$ แทน ค่าพยากรณ์ของวิธีที่ 1 (Exponential Smoothing Method) , $\hat{Y}_{2t}$ แทน ค่าพยากรณ์ของวิธีที่ 2 (Time Series Regression Method) และ $\hat{Y}_{3t}$ แทนค่าพยากรณ์ของวิธีที่ 3 (Box-Jenkins Method)

1) วิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน (Simple Average Method or Equivalent Weighted method: EW)

จากการพยากรณ์ด้วยวิธีพยากรณ์เดี่ยว 3 วิธี ($m=3$) จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากันคือ $W_1 = W_2 = W_3 = \frac{1}{3}$ ดังนั้น ตัวแบบที่ได้จากวิธีการพยากรณ์รวมโดยวิธีการให้น้ำหนักที่เท่ากัน คือ

$$CF_{EW} = \frac{1}{3}\hat{Y}_{1t} + \frac{1}{3}\hat{Y}_{2t} + \frac{1}{3}\hat{Y}_{3t}$$

2) วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย

เมื่อทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยจากการคัดเลือกตัวแบบของข้อมูลที่ได้จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยวทั้ง 3 วิธี เมื่อพิจารณาค่า Sig. ที่มีค่าน้อยกว่า 0.001 (sig.< 0.001) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $\alpha=0.05$ พบว่า $\beta_{box} \neq 0$ เพียงค่าเดียว นั่นคือค่าพยากรณ์เดี่ยวโดยวิธี Box-Jenkins ส่งผลต่อค่าจริง (Y) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์รวม คือ

$$CF_{it} = 0.930\hat{Y}_{3t}$$

3) วิธีรวมแบบอิงค่า MAPE (MAPE-Based combination)

ทำการคำนวณค่าน้ำหนัก (W) โดยอ้างอิงจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยว ได้ค่าถ่วงน้ำหนัก คือ

$W_{expo} = 0.3257$, $W_{tr} = 0.3269$ และ $W_{box} = 0.3474$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์รวม คือ

$$CF_{MAPE} = 0.3257\hat{Y}_{1t} + 0.3269\hat{Y}_{2t} + 0.3474\hat{Y}_{3t}$$

4) วิธีการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted Method: UNEW)

การคำนวณค่าน้ำหนัก (W_i) โดยอ้างอิงจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยว จากสูตรการคำนวณดังสมการ (10) ซึ่งพบว่าจำนวนครั้งที่ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของแต่ละวิธีต่างกัน ดังนี้ 1) วิธี Exponential Smoothing มีจำนวนครั้งของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด 3 ครั้ง 2) วิธี Time Series Regression มีจำนวนครั้งของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด 1 ครั้ง และ 3) วิธี Box-Jenkins มีจำนวนครั้งของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด 8 ครั้ง จะได้ค่าถ่วงน้ำหนัก คือ $W_1 = 0.25$, $W_2 = 0.0833$ และ $W_3 = 0.6667$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์รวม คือ

$$CF_{UNEW} = 0.25\hat{Y}_{1t} + 0.0833\hat{Y}_{2t} + 0.6667\hat{Y}_{3t}$$

5) วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าอันดับ (Weighted Ranking method : WR)

กำหนดค่าอันดับให้แต่ละวิธีการพยากรณ์ซึ่งพิจารณาจากค่า MAPE ของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยว หากวิธีการพยากรณ์ใดให้ค่า MAPE มากที่สุด ค่าอันดับที่ได้จะน้อยที่สุดจากนั้นนำค่าอันดับที่ได้ของแต่ละวิธีหารด้วยผลรวมของค่าอันดับทั้งหมดเพื่อคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธีการพยากรณ์จากสูตรการคำนวณสมการ (11) จะได้ค่าถ่วงน้ำหนัก $W_1 = 0.1667$, $W_2 = 0.3333$ และ $W_3 = 0.5$ ดังนั้น จะได้ตัวแบบพยากรณ์รวม คือ

$$CF_{WR} = 0.1667\hat{Y}_{1t} + 0.3333\hat{Y}_{2t} + 0.5\hat{Y}_{3t}$$

หลังจากได้ค่าพยากรณ์จากวิธีการทั้ง 8 วิธีแล้ว และนำข้อมูลส่วนที่ 2 ที่ทำการสำรองไว้มาทำการเปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากแต่ละวิธี โดยใช้เกณฑ์ค่าร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ที่ต่ำสุด

จากตารางที่ 2 ทำการพิจารณาจากค่าร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) ที่ได้จากวิธีการพยากรณ์ทั้ง 8 วิธี เมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง ในส่วนของการพยากรณ์เดี่ยว พบว่าตัวแบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือตัวแบบที่ได้จากการพยากรณ์โดยวิธีบอกซ์เจนกินส์ (Box-Jenkins Method) ซึ่งมีค่า MAPE เท่ากับ 15.069 และเมื่อทำการเปรียบเทียบในส่วนของการพยากรณ์รวม

พบว่าตัวแบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ตัวแบบที่ได้จากการพยากรณ์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยมีค่า MAPE ซึ่งมีค่า MAPE เท่ากับ 11.944 กล่าวคือ วิธีการพยากรณ์ร่วมช่วยทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลงและปรับปรุงประสิทธิภาพของการพยากรณ์ ซึ่งทำให้ค่าพยากรณ์ที่ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

จึงสรุปได้ว่า วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งเป็นวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรองเนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงมากที่สุด

โดยจากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 มีความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ ดังนี้

Y_t	แทน อนุกรมเวลา ณ เวลา t ตามลำดับ
$\hat{Y}_{expo}$	แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีการปรับให้เรียบแบบเลขชี้กำลัง
$\hat{Y}_{tr}$	แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยอนุกรมเวลา
$\hat{Y}_{box}$	แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์
$\hat{Y}_{EW}$	แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีการพยากรณ์ร่วมโดยการให้น้ำหนักที่เท่ากัน
$\hat{Y}_{RE}$	แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย
$\hat{Y}_{MAPE}$	แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีการพยากรณ์ร่วมโดยวิธีรวมแบบอิงค่า MAPE

2) ตัวแบบการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทั้ง 8 วิธี โดยใช้เกณฑ์ค่า MAPE ที่ต่ำสุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดกับชุดข้อมูล คือ วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS ด้วยวิธีการถดถอย และพบว่าค่าพยากรณ์ที่ได้จากการพยากรณ์เดียวโดยวิธี Box-Jenkins มีการส่งผลกระทบต่อค่าจริงเพียงวิธีการเดียว ดังนั้นตัวแบบที่ใช้ในการพยากรณ์ คือ

$$CF_{it} = 0.930\hat{Y}_{3t}$$

เมื่อ $\hat{Y}_{3t}$ แทนค่าพยากรณ์วิธีที่ 3 Box-Jenkins เมื่อทำการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมือง

$\hat{Y}_{UNEW}$ แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีการพยากรณ์ร่วมโดยการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน

$\hat{Y}_{WR}$ แทน ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบวิธีการพยากรณ์ร่วมโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยค่าอันดับ

5. สรุปผลการวิเคราะห์

1) ตัวแบบการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

เมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทั้ง 8 วิธี โดยใช้เกณฑ์ค่า MAPE ที่ต่ำสุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดกับชุดข้อมูล คือ วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted method: UNEW) โดยตัวแบบที่ใช้ในการพยากรณ์ คือ

$$CF_{UNEW} = 0.4167\hat{Y}_{1t} + 0.1667\hat{Y}_{2t} + 0.4167\hat{Y}_{3t}$$

เมื่อ

$\hat{Y}_{1t}$ แทน ค่าพยากรณ์วิธีที่ 1 Exponential Smoothing

$\hat{Y}_{2t}$ แทน ค่าพยากรณ์วิธีที่ 2 Time Series Regression

$\hat{Y}_{3t}$ แทน ค่าพยากรณ์วิธีที่ 3 Box-Jenkins

เมื่อทำการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลักในช่วงเวลาอีก 12 เดือนข้างหน้า ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2567 ได้ค่าพยากรณ์ดังแสดงในตารางที่ 3

ท่องเที่ยวรองในช่วงเวลาอีก 12 เดือนข้างหน้า ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2567 ได้ค่าพยากรณ์ดังแสดงในตารางที่ 4

6. อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการสรุปดังกล่าวมีวิธีการพยากรณ์ข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก โดยใช้วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยการให้น้ำหนักที่ไม่เท่ากัน (Unequivalent Weighted method: UNEW) และวิธีการพยากรณ์ข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง โดยใช้วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งเป็นวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดแสดงให้เห็นว่าการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาโดยใช้วิธีการพยากรณ์ร่วมสามารถพยากรณ์ค่าในอนาคตที่มีความแม่นยำ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบตัวแบบการพยากรณ์ด้วยค่า MAPE ของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

ปี พ.ศ.	เดือน	Y_t	$\hat{Y}_{expo}$	$\hat{Y}_{lr}$	$\hat{Y}_{box}$	$\hat{Y}_{EW}$	$\hat{Y}_{RE}$	$\hat{Y}_{MAPE}$	$\hat{Y}_{UNEW}$	$\hat{Y}_{WR}$
2567	มกราคม	1,138	1,074.95	1,080.43	1,237.92	1,131.10	1,186.76	1,131.43	1,143.77	1,157.35
	กุมภาพันธ์	946	883.74	872.01	951.17	902.31	975.66	902.49	909.88	915.50
	มีนาคม	1,107	933.93	916.77	992.07	947.59	1,031.07	947.77	955.30	960.14
	เมษายน	1,422	1,211.72	1,192.85	1,340.53	1,248.37	1,337.76	1,248.70	1,262.25	1,272.98
	พฤษภาคม	1,040	857.71	838.31	949.31	881.78	946.92	882.04	892.64	900.28
	มิถุนายน	882	840.50	820.94	938.85	866.76	927.92	867.04	878.22	886.42
	กรกฎาคม	910	906.29	886.67	1,001.93	931.63	1,000.56	931.90	942.87	950.84
	สิงหาคม	846	853.07	833.42	920.09	868.86	941.80	869.07	877.72	883.31
	กันยายน	886	876.65	856.92	934.09	889.22	967.83	889.41	897.30	902.08
	ตุลาคม	865	918.02	898.01	959.35	925.13	1,013.51	925.28	931.91	935.35
	พฤศจิกายน	990	858.37	837.42	932.49	876.09	947.65	876.32	885.76	891.94
	ธันวาคม	1,460	1,167.31	1,143.27	1,145.20	1,151.93	1,288.73	1,151.96	1,154.09	1,152.25
MAPE			8.879	10.063	8.597	7.815	8.171	7.808	7.643	7.703

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบตัวแบบการพยากรณ์ด้วยค่า MAPE ของชุดข้อมูลจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

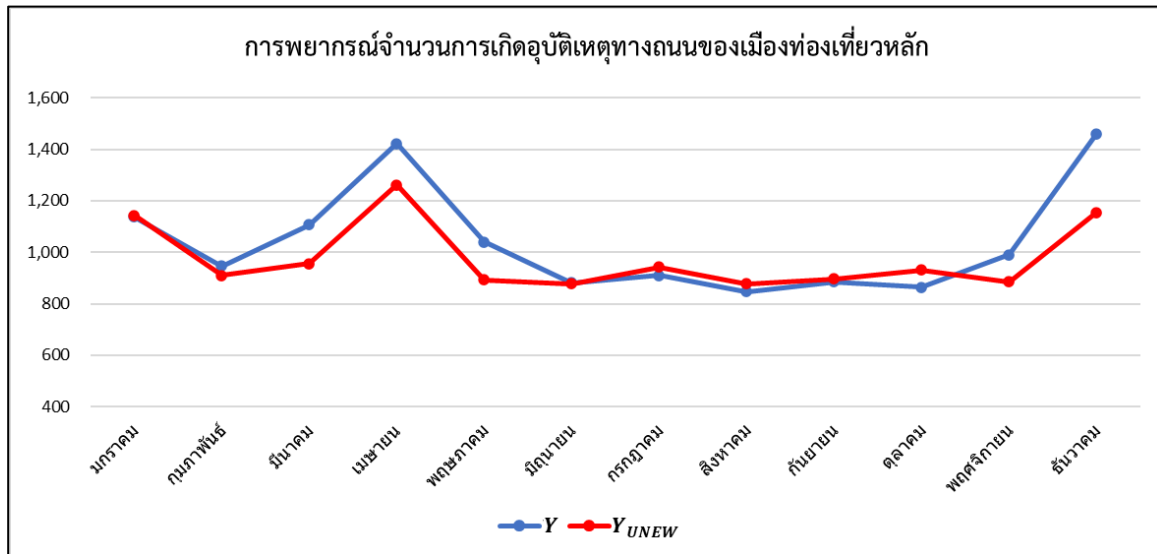
ปี พ.ศ.	เดือน	Y_t	$\hat{Y}_{expo}$	$\hat{Y}_{lr}$	$\hat{Y}_{box}$	$\hat{Y}_{EW}$	$\hat{Y}_{RE}$	$\hat{Y}_{MAPE}$	$\hat{Y}_{UNEW}$	$\hat{Y}_{WR}$
2567	มกราคม	1,399	1,409.98	1,382.21	1,481.19	1,424.46	1,377.84	1,425.64	1,455.14	1,436.33
	กุมภาพันธ์	862	904.49	907.69	858.15	890.11	798.27	889.44	873.86	890.11
	มีนาคม	1,028	986.72	967.83	867.16	940.57	806.66	939.01	905.44	940.57
	เมษายน	1,627	1,679.88	1,586.44	1,521.30	1,595.87	1,415.15	1,594.24	1,566.37	1,595.87
	พฤษภาคม	924	868.76	883.70	917.88	890.11	853.84	890.71	902.75	890.11
	มิถุนายน	713	795.12	823.42	805.86	808.13	749.63	808.10	804.64	808.13
	กรกฎาคม	716	922.79	933.93	896.06	917.59	833.54	917.15	905.90	917.59
	สิงหาคม	674	821.62	833.87	803.87	819.79	747.78	819.46	810.81	819.79
	กันยายน	673	856.63	872.34	808.21	845.73	751.82	844.94	825.66	845.73
	ตุลาคม	628	922.95	921.31	835.98	893.41	777.65	892.20	864.83	893.41
	พฤศจิกายน	684	904.91	891.06	784.46	860.14	729.73	858.54	823.46	860.14
	ธันวาคม	1,053	1,649.69	1,532.53	1,330.58	1,504.27	1,237.74	1,500.53	1,427.19	1,504.27
MAPE			20.373	20.082	15.069	18.236	11.944	18.167	16.611	18.307

ตารางที่ 3 ผลการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวหลัก

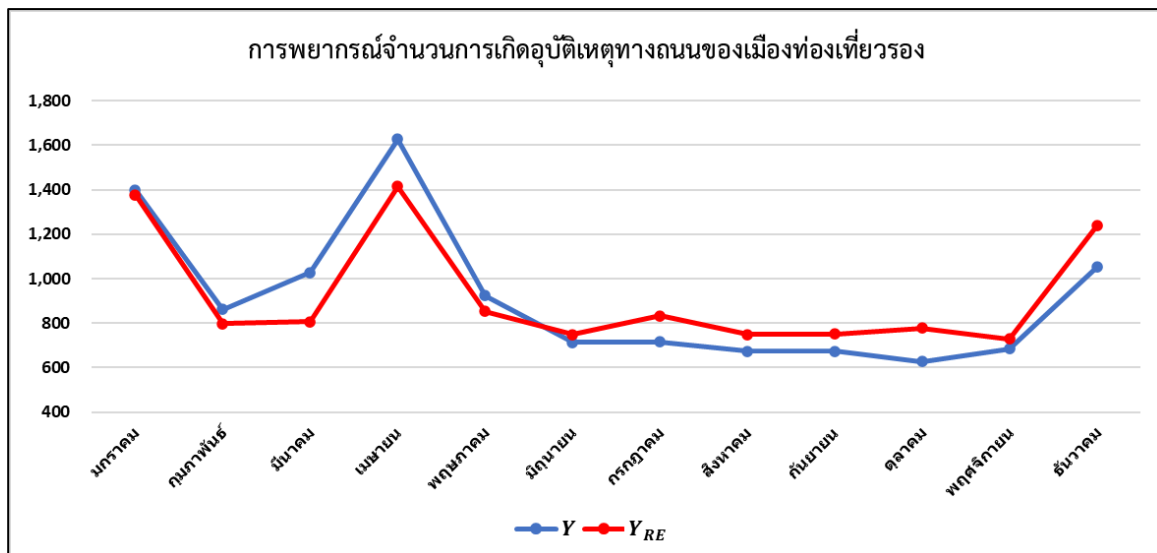
ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1,143.77	909.88	955.30	1,262.25	892.64	878.22
ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
942.87	877.72	897.30	931.91	885.76	1,154.09

ตารางที่ 4 ผลการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยวรอง

ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1,377.84	798.27	806.66	1,415.15	853.84	749.63
ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
833.54	747.78	751.82	777.65	729.73	1,237.74



รูปที่ 7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจริง และค่าพยากรณ์ที่ได้จากวิธีที่ดีที่สุดของเมืองท่องเที่ยวหลัก



รูปที่ 8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจริง และค่าพยากรณ์ที่ได้จากวิธีที่ดีที่สุดของเมืองท่องเที่ยวรอง

มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Riansut, W. (2020) ที่ได้ทำการศึกษาปริมาณการส่งออกยางพาราในประเทศไทย โดยการสร้างตัวแบบพยากรณ์เดี่ยวด้วยวิธีบอกซ์เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ และวิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าวิธีการพยากรณ์ร่วมมีความแม่นยำในการพยากรณ์มากกว่าตัวแบบพยากรณ์เดี่ยว เนื่องจากมีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นเกณฑ์การตัดสินใจเพื่อหาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับชุดข้อมูล

ทั้งนี้ แม้ผลการศึกษาของงานวิจัยฉบับดังกล่าวจะสอดคล้องกับกรณีของเมืองท่องเที่ยวรองในงานวิจัยนี้ แต่สำหรับชุดข้อมูลของเมืองท่องเที่ยวหลักกลับไม่ได้ให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ วิธีการพยากรณ์ร่วมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยไม่ได้ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดในกรณีนั้น อาจเกิดจากลักษณะจำเพาะของชุดข้อมูลอนุกรมเวลาในแต่ละพื้นที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างข้อมูล ความแปรผัน และปัจจัยเชิงพื้นที่ในอดีตและปัจจุบัน ทำให้ความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์อาจแตกต่างกันตามลักษณะของชุดข้อมูล

7. ข้อเสนอแนะ

1. ในการทำวิจัยครั้งต่อไป อาจทำการศึกษาวិธีการพยากรณ์อื่น ๆ เพิ่มเติม เนื่องจากอาจมีวิธีที่สามารถพยากรณ์ได้มีประสิทธิภาพมากกว่า

2. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำหนดการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของเมืองท่องเที่ยว โดยการแบ่งจังหวัดต่าง ๆ ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เมืองท่องเที่ยวหลัก และเมืองท่องเที่ยวรอง โดยใช้ข้อมูลจากการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย ซึ่งจังหวัดในกลุ่มต่าง ๆ ได้มาจากตามประกาศของทางรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง หากในอนาคตมีการเปลี่ยนแปลงจังหวัดที่ถูกจัดกลุ่มนี้ จะต้องมีการอัปเดตการจัดกลุ่มใหม่ และหากใช้ตัวแบบที่ได้จากการวิจัยนี้กับชุดข้อมูลที่ถูกแบ่งกลุ่มใหม่ อาจมีความคลาดเคลื่อนที่สูงได้ ดังนั้น หากนำตัวแบบนี้ไปใช้ จะต้องมีการสืบค้นเกี่ยวกับการจัดกลุ่มของจังหวัดด้วย

3. ในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการพยากรณ์จำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของจังหวัดต่าง ๆ แต่ละจังหวัด หรือจะแบ่งเป็นรายภาคได้ ตามความสนใจของผู้ที่ต้องการศึกษา

4. ในการทำวิจัยครั้งต่อไป อาจพิจารณาปัจจัยอื่นที่อาจมีผลต่อจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนน เช่น จำนวนนักท่องเที่ยว สภาพอากาศ ปริมาณการจราจร และปัจจัยภายนอกที่สะท้อนลักษณะทางกายภาพหรือสภาพของถนนที่ใช้ในการสัญจร ซึ่งการพิจารณาปัจจัยเหล่านี้เพิ่มเติมอาจช่วยให้ผลการพยากรณ์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และช่วยเพิ่มความสามารถในการอธิบายความแปรผันของข้อมูลได้

เอกสารอ้างอิง

- Boonraksa, P. (2018). *Predicting the Occurrence of Accidents on the Road using Time Series Techniques* [Master of Science thesis]. Mahasarakham University. (in Thai)
- Bunjongprasoet, P. (2021). *Predicting road traffic accidents in Bangkok* [Master of Science thesis]. Thammasat University. (in Thai)
- Department of Disaster Prevention and Mitigation, Ministry of Interior. (2024). *Definitions for road accident data reporting*. Retrieved from <https://backofficeminisite.disaster.go.th/apiv1/apps>
- Government Contact Center (GCC). (2024). *Travel to secondary cities in 2024: Tax deduction up to 15,000 Baht*. Retrieved December 24, 2024, from <https://www.gcc.go.th/2024>
- Ministry of Transport. (2024). *Road accidents on the Ministry of Transport's road network*. Retrieved December 12, 2024, from <https://datagov.mot.go.th/dataset/roadaccident>
- Ministry of Transport. (2025). *Vision and mission of the Department of Highways*. Retrieved February 15, 2025, from <https://www.mot.go.th/land/info?id=6&sid=vision12>
- Mingkwon, Y. (2023). A Comparison of Forecasting Models for Carbon Dioxide Emission Quantity from Power Generation Sector, *Ladkrabang Science Journal*, 32(2), 122-135.
- Office of Transport and Traffic Policy and Planning, Safety Planning Division. (2023). *Road accident situation analysis report of the Ministry of Transport 2022*. Retrieved from https://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/PDF/2566-1/RoadAccidentAna2565_final.pdf
- Prachachat Online. (2024). *Tax reduction measures for travel to 55 secondary provinces*. Retrieved December 24, 2024, from <https://www.prachachat.net/breaking-news/news-1578861>
- Riansut, W. (2020). Forecasting the Export Quantity of Rubber in Thailand. *Journal of Agricultural Research and Academic Development (Mathematics and Statistics section)*, Thaksin University. (in Thai)
- Riansut, W. (2023). Forecasting the Average Monthly Retail Price of Diesel in Bangkok, *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, 16(3), 842-853. (in Thai)
- Royal Decree Issued under the Revenue Code on Tax Exemption (No. 757) B.E. 2565 (2022). *Royal Gazette*, 139(69 ก), 24-27. <https://www.ratchakitcha.soc.go.th>
- Srisurin, K. (2024). A Comparative Analysis of Techniques for Forecasting Energy Demand in Thailand. In *Proceedings of the 11th National and 9th International Conference "Community Economic Development with the BCG Model"*, Northeastern University, Thailand.
- Tanyarattanasrisakul, M. (2019). A comparison of forecasting methods between Winters' multiplicative exponential smoothing, Box-Jenkins, and combined methods, for forecasting monthly prices of white shrimp *Litopenaeus vannamei*, *Research Journal, RMUTSB Acad. J.* 7(1), 72-86. (in Thai)
- Tensanthia, J. (2021). *Forecasting the value of corn export of Thailand*. [Master's thesis]. Maejo University. (in Thai)
- Thanaporsin, W. (2018). *Sales forecasting of entertainment business: A case study of The Marvel experience Thailand*. [Master's independent study]. Ubon Ratchathani University. https://www.ubs.ubu.ac.th/thesis_detail.aspx?att_id=94

แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตันด้วยเทคนิคการตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์

มธุรส ผ่านเมือง¹, และ ชนิกานต์ รอดมรรณ^{2*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 ประเทศไทย

^{2*}ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800 ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: chonnikarn.r@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.006

รับเมื่อ 15 ธันวาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 27 ธันวาคม 2568 ตอรับเมื่อ 29 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับตรวจจับและวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตัน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนการเล่นและการฝึกซ้อม (Scouting) โดยคณะผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองตรวจจับวัตถุด้วยสถาปัตยกรรม YOLOv8 และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลในเงื่อนไขต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่า โมเดลที่ผ่านการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลภาพจำนวน 9,800 ภาพ และกำหนดรอบการเรียนรู้ที่ 300 รอบ (Epochs) ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่า Precision ร้อยละ 95 ค่า Recall ร้อยละ 92 และค่าความคลาดเคลื่อน (Validation Loss) ต่ำสุดที่ 2.07 เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวมาพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันและทดสอบการใช้งานจริงร่วมกับกลุ่มผู้เชี่ยวชาญและนักศึกษาในสาขาวิทยาศาสตร์การกีฬา พบว่า ระบบสามารถระบุตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตัน จำแนกพื้นที่ในสนาม และแสดงผลสถิติได้อย่างถูกต้อง โดยผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับดี โดยเฉพาะในด้านประโยชน์ต่อการเรียนรู้และความสะดวกในการนำข้อมูลไปใช้ อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัดด้านความเร็วในการประมวลผลและความเสถียรในการติดตามวัตถุในบางสถานการณ์

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, การตรวจจับวัตถุ, แบดมินตัน, YOLOv8, การวิเคราะห์เกมกีฬา

A Model for Analyzing Shuttlecock Landing Position Using Real-Time Object Detection Techniques

Mathuros Panmuang¹, and Chonnikarn Rodmorn^{2*}

¹Department of Educational Technology and Communications, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, 12110 Thailand

^{2*}Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: chonnikarn.r@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.03.006

Received 15 December 2025; **Revised** 27 December 2025; **Accepted** 29 December 2025

ABSTRACT

This research aims to develop an Artificial Intelligence (AI) system for detecting and analyzing badminton shuttlecock positions to enhance the efficiency of game planning and training (Scouting). The researchers developed an object detection model based on the YOLOv8 architecture and conducted comparative performance tests under various conditions. The results indicated that the model trained with a dataset of 9,800 images for 300 epochs yielded the highest performance, achieving a Precision of 95%, a Recall of 92%, and a minimum Validation Loss of 2.07. When integrated into a web application and tested by experts and sports science students, the system demonstrated the ability to accurately identify shuttlecock landing positions, classify court zones, and display statistical results. Overall user satisfaction was rated at a good level, particularly regarding its utility for learning and the convenience of data utilization. However, limitations regarding processing speed and tracking stability in certain scenarios remain.

KEYWORDS: Artificial intelligence, Object detection, Badminton, YOLOv8, Sports analysis

Please cite this article as: M. Panmuang and C. Rodmorn, "A Model for Analyzing Shuttlecock Landing Position Using Real-Time Object Detection Techniques," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 24, no 3, pp. 1-15, ID. 265289, December 2025

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การแข่งขันกีฬาเบดมินตันมีระดับความเข้มข้นสูงอย่างต่อเนื่อง การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกลยุทธ์ได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพัฒนาสมรรถนะของนักกีฬาและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันอย่างยั่งยืน การตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ภายในสนามจึงไม่อาจอาศัยเพียงสัญชาตญาณหรือประสบการณ์ของนักกีฬาและผู้ฝึกสอนเท่านั้น หากแต่จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเชิงปริมาณที่มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือสูง เพื่อสะท้อนรูปแบบการเล่นและพฤติกรรมเชิงการแข่งขันอย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม แนวทางการวิเคราะห์การแข่งขันแบบดั้งเดิมซึ่งอาศัยการสังเกตและการประเมินเชิงอัตวิสัยของผู้ฝึกสอนยังคงมีข้อจำกัดที่สำคัญหลายประการ ทั้งในด้านความต่อเนื่องของการวิเคราะห์ ความแม่นยำในการตีความเหตุการณ์ในสนาม ตลอดจนข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากรในการจัดการข้อมูลวิดีโอที่มีปริมาณมากและมีความซับซ้อนสูง ข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลให้การนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์เชิงกลยุทธ์ยังไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของการแข่งขันในระดับสูงได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลด้านกีฬา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานตรวจจับและติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีขนาดเล็กและมีความเร็วสูง เช่น ลูกเบดมินตัน งานวิจัยที่ผ่านมาหลายฉบับได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคการตรวจจับวัตถุในการระบุและติดตามตำแหน่งของลูกเบดมินตันจากวิดีโอการแข่งขัน (Cao et al., 2021; Lai et al., 2025) อย่างไรก็ตาม ความท้าทายที่สำคัญของการตรวจจับวัตถุในลักษณะดังกล่าวยังคงอยู่ที่ ปัญหาการตรวจจับพลาดในบางเฟรม (Missed detections) ซึ่งมีสาเหตุจากปัจจัยหลายประการ อาทิ ความเร็วของลูกที่สูง มุมมองของกล้องที่จำกัด หรือสภาพแสงที่ไม่เอื้ออำนวย ส่งผลให้ข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ขาดความต่อเนื่องและลดความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้วิเคราะห์เชิงลึก เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยในกีฬาที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น กีฬาเทนนิส ได้เสนอแนวทางการผสมผสานเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเข้ากับอัลกอริทึม Kalman Filter เพื่อประมาณค่าและเติมเต็มตำแหน่งของลูกในเฟรมที่ไม่สามารถตรวจจับได้โดยตรง แนวทางดังกล่าวช่วยให้สามารถ

สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของลูกได้อย่างต่อเนื่องและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น (อภิสิทธิ์ เปรมปรีดี และคณะ, 2567) ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การตรวจจับวัตถุเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ หากขาดกระบวนการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพลวัตที่สามารถนำผลลัพธ์เชิงเทคนิคไปต่อยอดให้เกิดคุณค่าเชิงกลยุทธ์

นอกเหนือจากการติดตามตำแหน่งและเส้นทางการเคลื่อนที่ของลูกเบดมินตันแล้ว งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในช่วงที่ผ่านมาได้ขยายขอบเขตการวิเคราะห์ไปสู่การทำความเข้าใจเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในสนามแข่งขัน อาทิ การระบุช่วงเวลาการตีลูก (Shot Refinement) และการจำแนกประเภทของช็อต (Shot Recognition) โดยอาศัยข้อมูลท่าทางการเคลื่อนไหวของผู้เล่นร่วมกับตำแหน่งของลูกชนไก่ (Hsu et al., 2023) นอกจากนี้ ยังมีความพยายามในการพัฒนาแบบจำลองที่มีโครงสร้างน้ำหนักเบาเพื่อรองรับการประมวลผลแบบเรียลไทม์ ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานในสถานการณ์จริง (Kim & Cheng, 2023) แม้งานวิจัยดังกล่าวจะสะท้อนถึงความก้าวหน้าอย่างมีนัยสำคัญในเชิงเทคนิค แต่ผลลัพธ์ส่วนใหญ่มีแนวโน้มไปที่ตัวชี้วัดเชิงเทคนิค เช่น ความแม่นยำในการตรวจจับ หรือความถูกต้องในการจำแนกประเภทของช็อต ซึ่งยังไม่สามารถตอบโจทย์การวิเคราะห์เชิงกลยุทธ์ในเชิงพื้นที่ได้อย่างเป็นรูปธรรม

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ายังมีความช่องว่างขององค์ความรู้ที่สำคัญ กล่าวคือ การขาดแบบจำลองที่สามารถนำข้อมูลจากกระบวนการตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์มาสังเคราะห์เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งสุดท้ายที่ลูกเบดมินตันตกกระทบพื้นสนาม ซึ่งถือเป็นผลลัพธ์ที่สะท้อนเจตนาเชิงกลยุทธ์และประสิทธิภาพของการตีในแต่ละช็อตได้อย่างชัดเจน การวิเคราะห์ตำแหน่งลูกตกในพื้นที่ไม่เพียงช่วยอธิบายรูปแบบการโจมตีและการกระจายการใช้งานพื้นที่ของผู้เล่นเท่านั้น แต่ยังสามารถเปิดเผยจุดอ่อนในการป้องกันของคู่ต่อสู้ ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงกลยุทธ์ที่มีคุณค่าสูงต่อการวางแผนและการปรับกลยุทธ์การแข่งขัน

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกเบดมินตัน โดยอาศัยเทคนิคการตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์จากวิดีโอการแข่งขัน โดยเริ่มจากการระบุตำแหน่งของลูกในแต่ละเฟรม จากนั้นนำข้อมูลเชิงตำแหน่งมาวิเคราะห์เพื่อหาจุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ในแต่ละช็อต และทำการจำแนกตำแหน่งการตกใน

เชิงพื้นที่ของสนาม ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกส่งเคราะห์ให้อยู่ในรูปของข้อมูลเชิงสถิติและการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริงผ่านระบบเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของนักกีฬาและผู้ฝึกสอน ความเป็นนวัตกรรมของงานวิจัยนี้อยู่ที่การเชื่อมโยงข้อมูลเชิงเทคนิคจากกระบวนการตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์เข้ากับการวิเคราะห์เชิงกลยุทธ์ที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริง โดยเปลี่ยนผลลัพธ์จากการตรวจจับให้กลายเป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์รูปแบบการเล่นเชิงพื้นที่ ซึ่งไม่เพียงช่วยยกระดับการฝึกซ้อมและการแข่งขันในระดับบุคคลเท่านั้น แต่ยังมีศักยภาพในการต่อยอดไปสู่การพัฒนากีฬาเบดมินตันในระดับสโมสรระดับชาติ และระดับนานาชาติในอนาคต

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ความท้าทายและเทคนิคพื้นฐานในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กที่เคลื่อนที่เร็ว

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการแก้ปัญหาเชิงเฉพาะในสาขาคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ได้แก่ การตรวจจับและติดตามวัตถุขนาดเล็กที่เคลื่อนที่เร็ว (Small and Fast Moving Object Detection and Tracking) ซึ่ง Mirzaei et al. (2023) พบว่าเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง เนื่องจากวัตถุมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ภาพ มีลักษณะภายนอกที่จำกัดและมักได้รับผลกระทบจากภาพเบลออันเกิดจากการเคลื่อนที่ (Motion blur) เพื่อตอบสนองต่อความท้าทายดังกล่าว งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอแนวทางแก้ไขในหลายระดับ ดังนี้

- การปรับปรุงสถาปัตยกรรมของแบบจำลองสำหรับการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก โดย Sun et al. (2022) ได้นำเสนออัลกอริทึม RSOD ซึ่งปรับปรุง YOLOv3 ด้วยการดึงคุณลักษณะจากชั้นที่ตื้นกว่า (Shallower layer) ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กเพิ่มขึ้น

- การแก้ปัญหาภาพเบลอจากการเคลื่อนที่ Rozumnyi et al. (2021) ได้นำเสนอแนวทาง FMODEtect ซึ่งผสานเทคนิคการแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง (Matting) และการลดความเบลอ (Deblurring) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

- การเพิ่มประสิทธิภาพด้านความเร็วเพื่อรองรับการประมวลผลแบบเรียลไทม์ โดย Srigrarom & Chew (2020) เสนอระบบไฮบริดที่ใช้การตรวจจับการเคลื่อนไหวเพื่อคัดกรองวัตถุในเบื้องต้น ก่อนยืนยันผลด้วยแบบจำลองเชิงลึก ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Kim & Cheng (2023) ที่เน้นการใช้แบบจำลองน้ำหนักเบา (Lightweight Model) เช่น YOLOv5 เพื่อรักษาสมดุลระหว่างความเร็วและความแม่นยำ แนวทางที่ได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาการติดตามวัตถุประเภทนี้คือแนวคิดแบบ Track-by-Detection ซึ่งเริ่มจากการตรวจจับวัตถุในแต่ละเฟรม ก่อนทำการเชื่อมโยงข้อมูลข้ามเฟรม (Mirzaei et al., 2023) ทั้งนี้ สถาปัตยกรรมในตระกูล YOLO (You Only Look Once) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในฐานะเทคโนโลยีพื้นฐานที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถรักษาความสมดุลระหว่างความแม่นยำในการตรวจจับและความเร็วในการประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อวิเคราะห์กีฬาเบดมินตัน

จากรากฐานทางเทคนิคด้านการตรวจจับและติดตามวัตถุขนาดเล็กที่เคลื่อนที่เร็ว งานวิจัยในกลุ่มนี้ได้นำแนวคิดแบบ Track-by-Detection และสถาปัตยกรรม YOLO มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์กีฬาเบดมินตันโดยเฉพาะ ซึ่งสามารถจำแนกงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

- การตรวจจับและติดตามลูกเบดมินตัน (Detection and Tracking) โดยงานวิจัยของ Cao et al. (2021) ถือเป็นหนึ่งในงานบุกเบิกที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ YOLO ในการตรวจจับลูกเบดมินตันสำหรับงานด้านหุ่นยนต์ ต่อมา Lai et al. (2025) ได้พัฒนาระบบ YO-CSA-T ที่ใช้ YOLOv8 ร่วมกับกลไก Attention เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับ อย่างไรก็ตาม การตรวจจับเพียงอย่างเดียวมักประสบปัญหาการสูญหายของข้อมูลในบางเฟรม งานวิจัยของ อภิสิทธิ์ เปรมปรีดี และคณะ (2567) รวมถึง Shah et al. (2020) จึงได้นำอัลกอริทึม Kalman Filter มาใช้เพื่อประมาณค่าและเติมเต็มตำแหน่งของลูกในเฟรมที่ขาดหาย ช่วยเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งให้เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีความต่อเนื่องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

- การวิเคราะห์ขั้นสูงและการทำนาย (Advanced Analysis and Prediction) เมื่อสามารถระบุตำแหน่งลูกได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยได้ต่อยอดไปสู่การวิเคราะห์เชิงลึกและ

การทำนาย โดย Shah et al. (2020) ใช้ข้อมูลตำแหน่งจาก YOLOv3 ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายตำแหน่งที่ลูกตก (Fall point prediction) ขณะที่ Singh (2021) มุ่งเน้นการทำนายเส้นทางการเคลื่อนที่ในอนาคต (Trajectory prediction) นอกจากนี้ Hsu et al. (2024) ได้พัฒนาอัลกอริทึม Shot refinement โดยผสานข้อมูลตำแหน่งลูกกับท่าทางการเคลื่อนไหวของผู้เล่นเพื่อระบุจังหวะการตี (Hit Moment) ส่วน Wang (2021) และ Zhao (2023) ได้นำเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องมาใช้ในการจำแนกประเภทการตีและรูปแบบการเคลื่อนที่ของผู้เล่น

- การประยุกต์ใช้งานจริง (Practical application) ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งลูกแบดมินตันมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการตัดสินใจผลการแข่งขัน Kopania et al., (2022) จึงได้พัฒนาระบบ Instant Review เพื่อสนับสนุนการตัดสินของกรรมการ โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจสอบตำแหน่งที่ลูกตกกระทบพื้นสนาม งานวิจัยดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของการวิเคราะห์ตำแหน่งลูกในบริบทการใช้งานจริง และยืนยันถึงความจำเป็นของระบบที่สามารถระบุจุดตกได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้

3. วิธีการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตัน โดยอาศัยเทคนิคการตรวจจับวัตถุจากวิดีโอแบบเรียลไทม์ กระบวนการดำเนินงานประกอบด้วย การเตรียมและจัดการข้อมูล การฝึกสอนแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง และการนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานผ่านระบบเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการวิเคราะห์เชิงกลยุทธ์ ทั้งนี้ การพัฒนาระบบดังกล่าวดำเนินการตามกระบวนการมาตรฐานในการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยระดับสากล แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับ กรอบ การทำงาน ที่นำเสนอ โดย Kamoljitprapa และ Leelasilapasart (2025) ซึ่งได้กำหนดลำดับขั้นตอนการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์อย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การรวบรวมข้อมูล การเตรียมข้อมูลเบื้องต้น การแบ่งชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและการทดสอบ ไปจนถึงการประเมินผลการดำเนินงานของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้นำกรอบแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นแนวทาง

หลักในการออกแบบและวางแผนการทดลองของงานวิจัยนี้ เพื่อให้กระบวนการดำเนินงานมีความเป็นระบบ มีความน่าเชื่อถือ และสามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้อย่างเหมาะสม

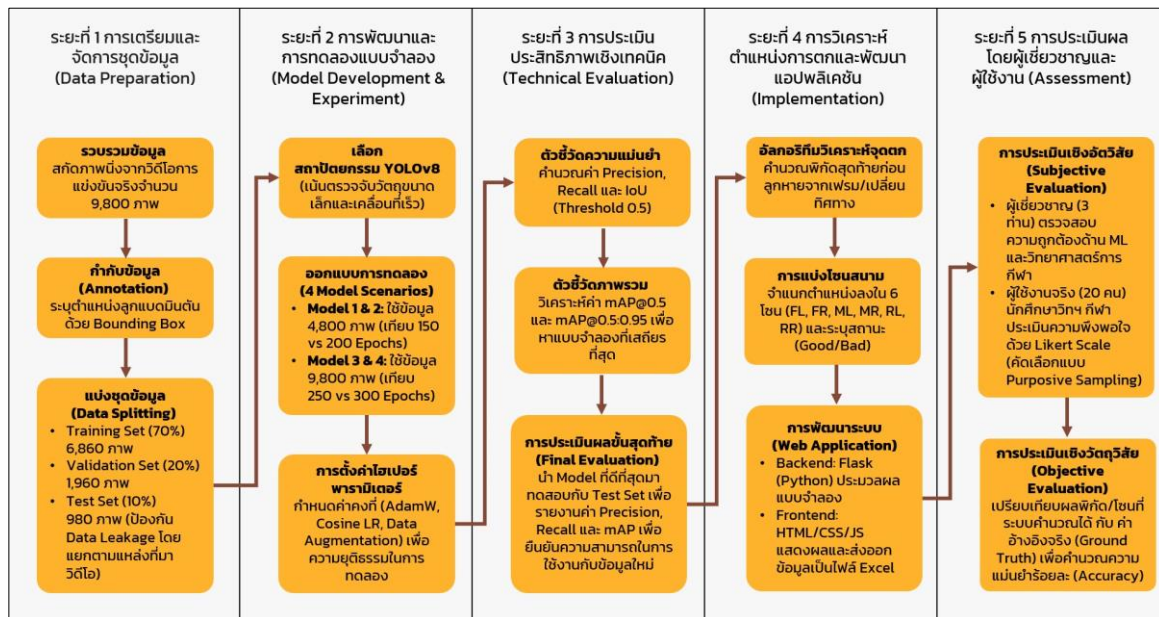
3.1 ภาพรวมของระบบ

ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยกระบวนการหลัก 5 ส่วน ได้แก่ 1) การเตรียมและจัดการชุดข้อมูล (Data Preparation) 2) การพัฒนาและการทดลองแบบจำลอง (Model Development & Experiment) 3) การประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิค (Technical Evaluation) 4) การวิเคราะห์ตำแหน่งการตกและพัฒนาแอปพลิเคชัน (Implementation) และ 5) การประเมินผลโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งาน (Assessment) ดังรูปที่ 1

ในขั้นตอนการประมวลผล วิดีโอการแข่งขันที่ผู้ใช้อัปโหลดเข้าสู่ระบบจะถูกแยกออกเป็นลำดับของเฟรมภาพ จากนั้นแบบจำลองตรวจจับวัตถุจะทำหน้าที่ระบุตำแหน่งของลูกแบดมินตันในแต่ละเฟรม ผลลัพธ์เชิงตำแหน่งที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อระบุจุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ในแต่ละช็อต ก่อนทำการจำแนกตำแหน่งการตกของลูกออกเป็นโซนต่าง ๆ ภายในสนามแบดมินตัน ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของข้อมูลเชิงสถิติและข้อมูลเชิงกลยุทธ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริงเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์รูปแบบการเล่นและการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์

3.2 การเตรียมชุดข้อมูล

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยภาพนิ่งจำนวน 9,800 ภาพ ซึ่งสกัดมาจากวิดีโอการแข่งขันแบดมินตันจริง เพื่อให้สะท้อนลักษณะการเคลื่อนไหวของลูกแบดมินตันภายใต้สภาวะการจริง ภาพทั้งหมดผ่านกระบวนการกำกับข้อมูล (Annotation) โดยระบุตำแหน่งของลูกแบดมินตันในแต่ละเฟรมในรูปแบบกรอบสี่เหลี่ยม (Bounding Box) สำหรับงานตรวจจับวัตถุ เพื่อให้การฝึกสอนและการประเมินผลมีความเป็นระบบและสามารถทำซ้ำได้ ชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ชุดฝึกสอน (Training Set) ชุดตรวจสอบความถูกต้อง (Validation Set) และชุดทดสอบ (Test Set) ตามสัดส่วน 70:20:10 ของจำนวนภาพทั้งหมด โดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 1 กระบวนการพัฒนาระบบ

- Training Set: จำนวน 6,860 ภาพ (ร้อยละ 70) ใช้สำหรับการเรียนรู้และการปรับค่าน้ำหนักของแบบจำลอง
- Validation Set: จำนวน 1,960 ภาพ (ร้อยละ 20) ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระหว่างการฝึกสอน รวมถึงการติดตามแนวโน้มของค่า loss และตัวชี้วัดต่าง ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเรียนรู้มากเกินไป (Overfitting)
- Test Set: จำนวน 980 ภาพ (ร้อยละ 10) ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพขั้นสุดท้ายของแบบจำลองกับข้อมูลที่ไม่เคยปรากฏในการฝึกสอนมาก่อน

การแบ่งชุดข้อมูลดังกล่าวได้รับการออกแบบให้แต่ละชุดมีความหลากหลายของฉาก มุมกล้อง และสภาพแสงในส่วนที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้การประเมินผลสามารถสะท้อนความสามารถในการทำงานทั่วไปของแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ เพื่อป้องกันปัญหาข้อมูลรั่วไหลระหว่างชุดข้อมูล (Data Leakage) ภาพที่สกัดมาจากวิดีโอเดียวกันจะถูกจัดให้อยู่ภายในชุดข้อมูลเดียวกันเท่านั้น โดยไม่มีการกระจายเฟรมจากวิดีโอเดียวกันไปอยู่ในหลายชุดข้อมูล แนวทางดังกล่าวช่วยลดอคติที่อาจเกิดจากความคล้ายคลึงของข้อมูลระหว่างชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ ซึ่งจะส่งผลให้การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองมีความสมจริงและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

การจัดเตรียมชุดข้อมูลในลักษณะดังกล่าว มีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนการฝึกสอนแบบจำลองตรวจจับ

วัตถุที่มีความเสถียร และรองรับการวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตันอย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 แบบจำลองตรวจจับวัตถุ

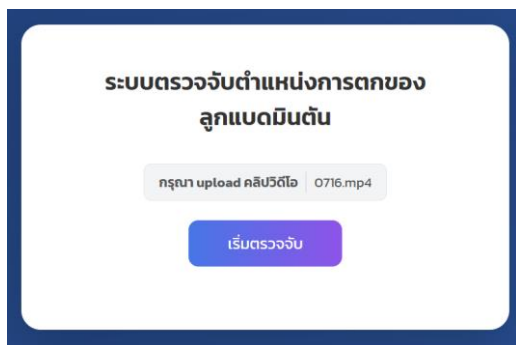
งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองการตรวจจับวัตถุเชิงลึกในตระกูล YOLO (You Only Look Once) ซึ่งมีจุดเด่นด้านความเร็วในการประมวลผลและความเหมาะสมต่อการใช้งานแบบเรียลไทม์ แบบจำลองดังกล่าวได้รับการคัดเลือกเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เช่น ลูกแบดมินตัน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของปัญหาที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

1) หลักการทำงานและสถาปัตยกรรมของ YOLO

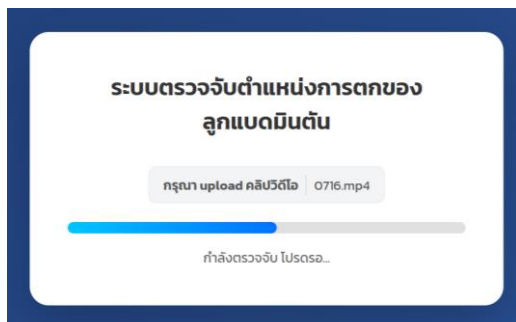
YOLO มีหลักการทำงานที่แตกต่างจากแบบจำลองตรวจจับวัตถุแบบสองขั้นตอน (Two-stage detectors) เช่น R-CNN ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการสร้างพื้นที่สนใจ (Region proposals) ก่อนทำการจำแนกวัตถุ ส่งผลให้ใช้เวลาในการประมวลผลสูงกว่า ในทางตรงกันข้าม YOLO ใช้แนวคิดการประมวลผลภาพเพียงครั้งเดียว (Single-pass detection) โดยพิจารณาภาพทั้งภาพพร้อมกันและแบ่งภาพออกเป็นตารางขนาด $S \times S$ หากจุดกึ่งกลางของวัตถุตกอยู่ในช่องใด ช่องดังกล่าวจะรับผิดชอบในการทำนายกรอบล้อมวัตถุ (Bounding Box) และค่าความน่าจะเป็นของคลาส (Class Probability) ส่งผลให้สามารถตรวจจับวัตถุได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ



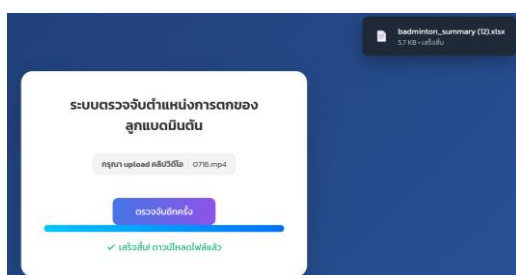
รูปที่ 2 ตัวอย่างชุดข้อมูล (Dataset)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3 หน้าจอการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน

จากการทบทวนพัฒนาการของสถาปัตยกรรม YOLO โดย Jiang et al. (2022) พบว่า โครงสร้างของ YOLO ในเวอร์ชันปัจจุบันสามารถอธิบายได้เป็น 3 ส่วนหลัก ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุ ดังนี้

1.1) Backbone: ทำหน้าที่สกัดคุณลักษณะเด่น (Feature Extraction) จากภาพต้นฉบับ โดยในเวอร์ชันใหม่ ของ YOLO มักใช้โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพด้านการคำนวณ เช่น CSPDarknet หรือ EfficientRep เพื่อช่วยลดภาระการประมวลผล ขณะเดียวกันยังสามารถรักษาข้อมูลเชิงโครงสร้างที่สำคัญของภาพไว้ได้อย่างเหมาะสม

1.2) Neck: ทำหน้าที่รวมและถ่ายทอดคุณลักษณะจากหลายระดับความลึกของโครงข่าย (Feature Aggregation) โดยใช้เทคนิค เช่น Path Aggregation Network (PANet) เพื่อผสานข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่แตกต่างกัน แนวทางดังกล่าวช่วยเพิ่มความสามารถในการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันภายในภาพเดียว

1.3) Head: ทำหน้าที่ทำนายผลลัพธ์สุดท้ายของการตรวจจับ ได้แก่ ตำแหน่งของกรอบ (Localization) และการจำแนกประเภทของวัตถุ (Classification) ซึ่งเป็นผลลัพธ์หลักที่นำไปใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ตำแหน่งลูกแบดมินตันของงานวิจัย

2) การประยุกต์ใช้การตรวจจับวัตถุขนาดเล็กและการเคลื่อนที่เร็ว

ลูกแบดมินตันถือเป็นวัตถุขนาดเล็ก (Small Object) ที่มีความท้าทายสูงในการตรวจจับจากวิดีโอการแข่งขัน งานวิจัยของ Vijayakumar & Vairavasundaram (2024) ระบุว่า YOLO ในเวอร์ชันล่าสุด เช่น YOLOv8 ได้รับการพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของรุ่นก่อนหน้า โดยมีการปรับปรุงโครงสร้างของแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อาทิ การใช้โมดูล C2f ในส่วน backbone เพื่อเพิ่มความสามารถในการสกัดคุณลักษณะที่ซับซ้อน และการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบ anchor-free ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณ และเพิ่มความเร็วในการอนุมาน (inference) ทำให้เหมาะสมต่อการตรวจจับวัตถุในวิดีโอแบบเรียลไทม์

นอกจากนี้ การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองจะอาศัยตัวชี้วัดมาตรฐาน ได้แก่ ค่า Intersection over Union (IoU) และ Mean Average Precision (mAP) ซึ่งใช้วัดความสอดคล้องระหว่างกรอบล้อมวัตถุที่แบบจำลองทำนายได้เทียบกับค่าความเป็นจริง ตัวชี้วัดดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งในบริบทของการแข่งขันกีฬา ซึ่งมักเกิดการบังซ้อนของวัตถุ (Occlusion) และการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองทั้ง 4 ชุด

Model	#Images (Train)	Epochs	Objective
Model 1	4,800	150	ใช้เป็นกรณีฐาน (baseline) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองภายใต้ปริมาณข้อมูลจำกัดและจำนวนรอบการฝึกสอนเริ่มต้น
Model 2	4,800	200	เพิ่มจำนวนรอบการฝึกสอนเพื่อศึกษาผลของการเรียนรู้เชิงลึกที่มากขึ้นภายใต้ปริมาณข้อมูลเท่าเดิม
Model 3	9,800	250	เพิ่มปริมาณข้อมูลฝึกสอนเพื่อศึกษาผลของความหลากหลายของข้อมูลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับ
Model 4	9,800	300	เพิ่มจำนวนรอบการฝึกสอนบนชุดข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อค้นหาแบบจำลองที่มีความเสถียรสูงสุด

3) ประสิทธิภาพในการตรวจจับแบบเรียลไทม์

Hussain (2023) ได้เปรียบเทียบพัฒนาการของสถาปัตยกรรม YOLO ตั้งแต่เวอร์ชันที่ 1 ถึงเวอร์ชันที่ 8 พบว่าแนวโน้มการพัฒนาของ YOLO มุ่งเน้นการรักษาสมดุลระหว่างความเร็วในการประมวลผลและความแม่นยำในการตรวจจับ (Speed-Accuracy Trade-off) เพื่อรองรับการนำไปใช้งานจริงบนอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด เช่น อุปกรณ์ปลายทาง (Edge devices) โดย YOLO เวอร์ชันใหม่ยังมีการปรับปรุงฟังก์ชันการสูญเสีย (Loss Function) และประยุกต์ใช้เทคนิคการเพิ่มข้อมูล (Data Augmentation) เช่น Mosaic เพื่อเพิ่มความทนทานของแบบจำลองต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น ความหลากหลายของฉาก มุมกล้อง และสภาพแสง

ดังนั้น การเลือกใช้ YOLO ในงานวิจัยนี้จึงมีความสอดคล้องกับความต้องการของระบบวิเคราะห์ตำแหน่งลูกแบดมินตัน ซึ่งต้องอาศัยทั้งความสามารถในการประมวลผลแบบเฟรมต่อเฟรมด้วยอัตราเฟรมสูง (High FPS) และความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กที่เคลื่อนที่เร็ว เพื่อให้สามารถนำพิกัดตำแหน่งที่ได้ไปใช้ในการคำนวณตำแหน่งลูกตกในขั้นตอนถัดไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4) การออกแบบการทดลองและการตั้งค่าแบบจำลอง

เพื่อศึกษาผลของปริมาณข้อมูลฝึกสอนและจำนวนรอบการฝึกสอน (epochs) ต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับลูกแบดมินตัน งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยสร้างแบบจำลองจำนวน 4 ชุด (Model 1–4) ซึ่งแตกต่างกันเฉพาะจำนวนภาพฝึกสอนและจำนวน epochs ขณะที่กำหนดค่าการฝึกสอนอื่น ๆ ให้คงที่ทั้งหมด เพื่อให้การเปรียบเทียบผลลัพธ์มีความยุติธรรมและสามารถสรุปผลได้อย่างเป็นระบบ โดยรายละเอียดของการตั้งค่าแบบจำลองแต่ละชุด รวมถึงจำนวนภาพฝึกสอนและจำนวนรอบการฝึกสอน แสดงได้ดังตารางที่ 1

เพื่อควบคุมตัวแปรและลดอคติในการเปรียบเทียบผลการทดลอง งานวิจัยนี้จึงกำหนดค่าพารามิเตอร์การฝึกสอนให้เหมือนกันในทุกแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- Input size: `imgsz = 940` เพื่อรักษารายละเอียดของวัตถุขนาดเล็ก
- Batch size: `batch = 16` เพื่อความเสถียรของกระบวนการเรียนรู้
- Optimizer: AdamW เพื่อลดปัญหาการเรียนรู้มากเกินไป (Overfitting) และเพิ่มความเสถียรของการฝึกสอน
- Initial learning rate: `lr0 = 0.0005` เพื่อให้การปรับค่าน้ำหนักเป็นไปอย่างค่อยเป็นค่อยไป
- Learning rate schedule: Cosine learning rate (`cos_lr = True`) เพื่อการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมอย่างรวดเร็ว
- Mixed precision: `amp = True` เพื่อลดระยะเวลาในการฝึกสอนและใช้ทรัพยากรการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ
- Pretrained weights: `pretrained = True` เพื่อเริ่มต้นจากค่าน้ำหนักที่ผ่านการเรียนรู้ทั่วไปมาก่อน
- Checkpoint: `save_period = 20` เพื่อบันทึกแบบจำลองเป็นระยะและติดตามแนวโน้มการเรียนรู้ นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มความทนทานของแบบจำลองต่อความผันแปรของวิดีโอการแข่งขันจริง เช่น การเอียงของกล้อง การสั่น และการเปลี่ยนแปลงมุมมอง ได้กำหนดเทคนิคการเพิ่มข้อมูล (Data Augmentation) ให้เหมือนกันในทุกแบบจำลอง ได้แก่
 - Degrees = 0.5 (การหมุนภาพ)
 - Translate = 0.05 (การเลื่อนตำแหน่ง ±5%)
 - Scale = 0.3 (การปรับขนาด ±30%)
 - Shear = 0.5 (การเฉือนภาพ)

- Perspective = 0.0002 (การเปลี่ยนมุมมอง)

การควบคุมพารามิเตอร์และเทคนิคการเพิ่มข้อมูลให้เหมือนกันในทุกการทดลองจะช่วยให้สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่า ความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ เกิดจากปริมาณข้อมูลฝึกสอนและจำนวนรอบการฝึกสอนเป็นหลัก มิใช่ผลจากปัจจัยแทรกซ้อนอื่น ๆ ส่งผลให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

3.4 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

1) ตัวชี้วัดพื้นฐานในการประเมินความถูกต้องของตำแหน่งที่แบบจำลองทำนายคือค่า Intersection over Union (IoU) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ซ้อนทับกัน (Area of overlap) ของกรอบล้อมวัตถุที่แบบจำลองทำนาย กับกรอบอ้างอิงจริง (Ground truth) ต่อพื้นที่รวมของกรอบทั้งสอง (Area of Union) โดยค่า IoU มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดค่าเกณฑ์มาตรฐาน (Threshold) ที่ 0.5 กล่าวคือ หากค่า IoU มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 จะถือว่าการตรวจจับนั้นเป็นการตรวจจับที่ถูกต้อง (True Positive)

2) ค่าความแม่นยำ (Precision) นำมาใช้ประเมินคุณภาพของผลการทำนาย โดยพิจารณาสัดส่วนของผลลัพธ์ที่แบบจำลองระบุว่าเป็นลูกเบตมินตันทั้งหมด ซึ่งเป็นการตรวจจับที่ถูกต้องจริง ตัวชี้วัดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) เนื่องจากสภาพแวดล้อมในการแข่งขันแบดมินตันอาจมีวัตถุหรือแสงสะท้อนที่มีลักษณะใกล้เคียงกับลูกเบตมินตัน หากแบบจำลองมีค่า Precision ต่ำ จะส่งผลให้เกิดการตรวจจับผิดพลาด (False Positive) บ่อยครั้ง และลดความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่น่าไปใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งลูกตก

3) ค่าการเรียกคืน (Recall) ใช้ประเมินความสามารถของแบบจำลองในการตรวจจับวัตถุได้อย่างครบถ้วน โดยพิจารณาว่า จากจำนวนลูกเบตมินตันที่ปรากฏจริงในทุกเฟรมภาพ แบบจำลองสามารถตรวจจับได้คิดเป็นสัดส่วนเท่าใด สำหรับงานวิจัยนี้ ค่า Recall ถือเป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากลูกเบตมินตันมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและมักเกิดภาพเบลอจากการเคลื่อนที่ (Motion blur) หากค่า Recall ต่ำ จะบ่งชี้ถึงการตกหล่นของการตรวจจับ (Missed Detection) ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของลูกขาดความต่อเนื่องและกระทบต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์ตำแหน่งลูกตก

4) ค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (Mean Average Precision - mAP) เพื่อสะท้อนภาพรวมของประสิทธิภาพที่สมดุลระหว่างความแม่นยำ (Precision) และความครบถ้วน (Recall) งานวิจัยใช้ดัชนี Mean Average Precision (mAP) ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Precision และ Recall (P-R Curve) (Lippi et al., 2021) โดยพิจารณาใน 2 ระดับ ได้แก่

4.1) mAP@0.5: เป็นการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ค่าเกณฑ์ IoU 0.5 ซึ่งสะท้อนความสามารถในการระบุตำแหน่งและจำแนกวัตถุได้ถูกต้องในระดับมาตรฐาน

4.2) mAP@0.5:0.95: เป็นการประเมินประสิทธิภาพในระดับที่เข้มงวดมากขึ้น โดยคำนวณค่าเฉลี่ยของ mAP ที่ค่า IoU ตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.95 (เพิ่มขึ้นทีละ 0.05) ตัวชี้วัดนี้สะท้อนถึงความแม่นยำเชิงตำแหน่งของกรอบล้อมวัตถุ (Bounding Box Tightness) ว่ามีความกระชับและสอดคล้องกับตำแหน่งจริงของลูกเบตมินตันมากเพียงใด

จากตัวชี้วัดดังกล่าว การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำและความครบถ้วนของการตรวจจับได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถสรุปในรูปแบบสมการมาตรฐานตามแนวทางที่เสนอโดย Malta et al. (2021) ต่อไปนี้

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.2)$$

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i$$

การตรวจจับวัตถุที่ถูกต้อง (True Positive: TP) หมายถึงกรณีที่แบบจำลองสามารถระบุวัตถุเป้าหมายได้อย่างถูกต้องตามตำแหน่งและประเภท ในขณะที่การตรวจจับผิดพลาด (False Positive: FP) หมายถึงกรณีที่แบบจำลองทำนายการมีอยู่ของวัตถุเป้าหมายทั้งที่ไม่ปรากฏจริง หรือระบุวัตถุผิดประเภท ส่วนการตรวจจับตกหล่น (False Negative: FN) หมายถึงกรณีที่แบบจำลองไม่สามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏอยู่จริงได้ วิธีการ IoU จะคำนวณจากสัดส่วนของพื้นที่ที่ทับซ้อนกัน

ระหว่างกรอบล้อมวัตถุที่แบบจำลองทำนายกับกรอบอ้างอิงจริง ต่อพื้นที่รวมของกรอบทั้งสอง ทั้งนี้ ความถูกต้องของการตรวจจับจะถูกพิจารณาจากการเปรียบเทียบค่า IoU ที่ได้กับค่าเกณฑ์ (Threshold) ที่กำหนดไว้ โดยหากค่า IoU มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเกณฑ์ดังกล่าว การตรวจจับนั้นจะถูกจัดเป็นการตรวจจับที่ถูกต้อง

3.5 การวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตัน

หลังจากระบบสามารถระบุตำแหน่งของลูกแบดมินตันในแต่ละเฟรมได้แล้ว จะดำเนินการวิเคราะห์ลำดับการเคลื่อนที่ของลูกเพื่อระบุจุดสิ้นสุดของแต่ละช็อต โดยกำหนดให้ตำแหน่งสุดท้ายที่ตรวจพบก่อนที่ลูกจะหายไปจากเฟรมหรือก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนที่อย่างมีนัยสำคัญ เป็นตำแหน่งที่ลูกแบดมินตันตกกระทบพื้นสนาม วิธีการดังกล่าวช่วยให้สามารถประมาณตำแหน่งลูกตกได้อย่างสอดคล้องกับพฤติกรรมการเล่นจริงในสถานการณ์การแข่งขัน

เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ สนามแบดมินตันถูกแบ่งออกเป็นโซนการเล่นตามแนวสิบลูกและแนวกว้าง ได้แก่ พื้นที่หน้า กลาง และหลัง โดยแยกออกเป็นด้านซ้ายและด้านขวา รวมเป็นทั้งหมด 6 โซน ได้แก่ Front Left (FL), Front Right (FR), Middle Left (ML), Middle Right (MR), Rear Left (RL) และ Rear Right (RR) ตำแหน่งลูกตกที่ตรวจพบจะถูกนำไปจับคู่กับโซนที่สอดคล้องกัน จากนั้นจึงจำแนกผลลัพธ์ของแต่ละช็อตออกเป็นลูก “ดี” (Good) หรือ “เสีย” (Bad) เพื่อสะท้อนผลลัพธ์เชิงกลยุทธ์และประสิทธิภาพของการตีในแต่ละจังหวะ

3.6 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน

เพื่อให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตัน โดยระบบถูกออกแบบในลักษณะสถาปัตยกรรมแบบแยกส่วน (Client-Server Architecture) ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนหน้าบ้าน (Frontend) และส่วนหลังบ้าน (Backend)

ในส่วนหน้าบ้าน ใช้ภาษา HTML, CSS และ JavaScript สำหรับการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้และการโต้ตอบกับระบบ ส่วนหลังบ้านพัฒนาด้วย Flask ซึ่งเป็นไมโครเฟรมเวิร์กของภาษา Python ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการประมวลผลและเรียกใช้งานแบบจำลอง YOLO ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว โดยแบบจำลองจะถูกโหลดจากไฟล์ที่จัดเก็บไว้บนเซิร์ฟเวอร์

เพื่อนำมาประมวลผลวิดีโอในแต่ละเฟรม และส่งผลลัพธ์กลับไปยังส่วนติดต่อผู้ใช้

ผู้ใช้สามารถอัปโหลดไฟล์วิดีโอการแข่งขันในรูปแบบ .mp4 ผ่านหน้าเว็บ ระบบจะดำเนินการประมวลผลวิดีโอโดยอัตโนมัติ พร้อมแสดงสถานะความคืบหน้าแบบเรียลไทม์ เมื่อการประมวลผลเสร็จสมบูรณ์ ระบบจะสร้างผลลัพธ์ในรูปแบบไฟล์ Microsoft Excel ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลตำแหน่งลูกตกในแต่ละโซน รวมถึงสถิติในรูปแบบร้อยละของลูก “ดี” และลูก “เสีย” ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้สนับสนุนการวิเคราะห์ฟอร์มการเล่น การประเมินจุดแข็ง-จุดอ่อน และการวางแผนกลยุทธ์การแข่งขันของนักกีฬาและผู้ฝึกสอนได้อย่างเป็นรูปธรรม

3.7 การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งาน

ปฏิบัติ ประกอบด้วยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ซึ่งมีความเชี่ยวชาญด้านการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และวิทยาศาสตร์การกีฬา มุ่งเน้นการพิจารณาความถูกต้องของผลลัพธ์ ความเหมาะสมของกระบวนการวิเคราะห์ และศักยภาพของระบบในการนำไปใช้งานจริง ขณะเดียวกัน ได้มีการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจริง โดยกำหนดกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากประชากรที่เป็นนักศึกษาศาสตร์วิทยาศาสตร์การกีฬา ชั้นปีที่ 3 จำนวน 45 คน และคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจำนวน 20 คน ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมตามหลักการความอิ่มตัวของข้อมูล (Data Saturation) ที่ระบุว่ากลุ่มตัวอย่างในช่วง 15–20 คน สามารถให้ข้อมูลที่ครอบคลุมและสะท้อนความหลากหลายของพฤติกรรมการใช้งานจริงได้อย่างเพียงพอ โดยเฉพาะในบริบทของการเรียนรู้และการวิเคราะห์ฟอร์มการเล่น ทั้งนี้ การประเมินทั้งสองส่วนดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ได้แก่ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด ครอบคลุมประเด็นด้านความเหมาะสม ความแม่นยำ และความสามารถในการนำระบบไปประยุกต์ใช้งานจริง

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองตรวจจับวัตถุจำแนกตามขนาดชุดข้อมูลและจำนวนรอบการเรียนรู้

แบบจำลอง	ชุดข้อมูล	Images	Epochs	Val/Loss	Precision	Recall	mAP@50	mAP@50-95
Model 1	Validation	4,800	150	2.17	0.88	0.70	0.85	0.30
Model 2	Validation	4,800	200	2.20	0.92	0.88	0.91	0.34
Model 3	Validation	9,800	250	2.16	0.93	0.89	0.91	0.35
Model 4	Validation	9,800	300	2.07	0.95	0.92	0.92	0.45
Model 4	Test Set	980	300	-	0.91	0.89	0.90	0.41

ตารางที่ 3 สรุปข้อมูลดิบรายฝั่ง (Raw Data Summary)

Side	FL-G	FL-B	FR-G	FR-B	ML-G	ML-B	MR-G	MR-B	RL-G	RL-B	RR-G	RR-B
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2

ตารางที่ 4 สรุปสถิติโซน (Zone Statistics)

Zone	รายละเอียด	จำนวนลูก	ร้อยละ
FL	หน้า-ซ้าย (Front Left)	0	0.0
FR	หน้า-ขวา (Front Right)	0	0.0
ML	กลาง-ซ้าย (Mid Left)	0	0.0
MR	กลาง-ขวา (Mid Right)	0	0.0
RL	หลัง-ซ้าย (Rear Left)	6	60.0
RR	หลัง-ขวา (Rear Right)	4	40.0
รวม	ทั้งหมด	10	100.0

ตารางที่ 5 ผลการประเมินความแม่นยำในการระบุตำแหน่งการตกและสถานะของลูกแบดมินตัน (Objective Evaluation)

โซน	ผลจากระบบ (ลูก)	ข้อมูลจริงจากผู้เชี่ยวชาญ (ลูก)	จำนวนที่ระบุถูกต้อง (Correct)	ความแม่นยำ (Accuracy %)
RL (หลัง-ซ้าย)	6	6	6	100%
RR (หลัง-ขวา)	4	4	3	75%
รวม	10	10	9	90%

ตารางที่ 6 ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบตรวจจับลูกแบดมินตัน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพึงพอใจ
1. ประโยชน์ต่อการเรียนรู้และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี	4.33	0.47	ดี
2. ความเข้าใจของขั้นตอนการอัปโหลดวิดีโอและดูผลลัพธ์	4.00	0.00	ดี
3. ความเร็วในการประมวลผลวิดีโอและแสดงผล	3.33	0.47	ปานกลาง
4. ความแม่นยำในการตรวจจับลูกและหาจุดตก	3.33	0.47	ปานกลาง
5. ความสะดวกในการแสดงผลการวิเคราะห์ (เช่น โซนลูกตก, คะแนน)	4.33	0.47	ดี
6. การส่งออกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel ทำงานได้ถูกต้องและสะดวก	4.33	0.47	ดี
7. การนำเข้าและส่งออกข้อมูล (Import/Export) ทำได้อย่างราบรื่น	4.00	0.00	ดี
8. ความสามารถของระบบในการวิเคราะห์ลูกและแบ่งโซน	3.33	0.47	ปานกลาง
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	3.87	0.35	ดี

4. ผลลัพธ์

4.1 ผลการเปรียบเทียบและคัดเลือกแบบจำลอง

จากการทดลองฝึกสอนแบบจำลองตรวจจับลูกแบดมินตันจำนวน 4 แบบ ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์

1) เมื่อเปรียบเทียบ Model 1 และ Model 2 ซึ่งใช้ชุดข้อมูลขนาด 4,800 ภาพเท่ากัน พบว่าการเพิ่ม

การฝึกสอน (Hyperparameters) ให้เหมือนกัน แต่แตกต่างกันในด้านขนาดชุดข้อมูล และจำนวนรอบการฝึกสอนผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ แสดงได้ดังตารางที่ 2 และสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1) จำนวนรอบการฝึกสอนจาก 150 เป็น 200 รอบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างมี

นัยสำคัญ โดยเฉพาะค่า Recall ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 70 เป็นร้อยละ 88 และค่า mAP@0.5 ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 85 เป็นร้อยละ 91 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถเรียนรู้ลักษณะของวัตถุได้ครอบคลุมมากขึ้น และลดอัตราการตรวจจับตกหล่น (Missed Detection) ได้อย่างชัดเจนเมื่อได้รับระยะเวลาในการเรียนรู้ที่เหมาะสม

2) ใน Model 3 ซึ่งเพิ่มขนาดชุดข้อมูลเป็น 9,800 ภาพ และฝึกสอนเป็นจำนวน 250 รอบ แสดงให้เห็นว่าค่า Precision เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 93 และค่า Recall เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 89 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความแม่นยำโดยรวม (Accuracy) พบว่าลดลงเล็กน้อยเหลือร้อยละ 73 เมื่อเทียบกับ Model 2 ที่มีค่าร้อยละ 74 ขณะเดียวกัน ค่า mAP@0.5-0.95 ซึ่งสะท้อนความเที่ยงตรงของกรอบล้อมวัตถุ (Bounding Box Tightness) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็นร้อยละ 35 ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจเกิดจากความหลากหลายของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ทำให้แบบจำลองต้องใช้จำนวนรอบการฝึกสอนมากขึ้นเพื่อปรับตัวและเข้าสู่สภาวะเสถียร

3) Model 4 ซึ่งใช้ชุดข้อมูลขนาด 9,800 ภาพเท่ากับ Model 3 แต่เพิ่มจำนวนรอบการฝึกสอนเป็น 300 รอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพสูงสุดในทุกตัวชี้วัด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน (Validation loss) ลดลงต่ำที่สุดที่ 2.07 และมีค่า Precision สูงถึงร้อยละ 95 ค่า Recall ร้อยละ 92 รวมถึงค่า mAP@0.5-0.95 ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็นร้อยละ 45 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าแบบจำลองไม่เพียงสามารถตรวจจับลูกแบดมินตันได้อย่างแม่นยำและครบถ้วนเท่านั้น แต่ยังสามารถระบุตำแหน่งของกรอบล้อมวัตถุ (Bounding Box) ได้อย่างกระชับและสอดคล้องกับตำแหน่งจริงมากที่สุด นอกจากนี้ การพิจารณาแนวโน้มการเรียนรู้ของ Model 4 พบว่าค่าประสิทธิภาพเริ่มคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการฝึกสอนมากกว่านี้ ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองได้เข้าสู่จุดอิ่มตัวของการเรียนรู้ (Learning saturation point) ที่เหมาะสมแล้ว ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยจึงเลือก Model 4 เป็นแบบจำลองหลักสำหรับการนำไปพัฒนาและใช้งานในระบบเว็บแอปพลิเคชัน

4) เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวมาประเมินประสิทธิภาพขั้นสุดท้ายกับชุดข้อมูลทดสอบ (Test Set) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่เคยปรากฏในการฝึกสอนมาก่อน พบว่าค่า mAP@50 ยังคงอยู่ในระดับสูงที่ 0.90 และค่า mAP@50-95 อยู่ที่ 0.41 การ

ที่ประสิทธิภาพบนชุดข้อมูลทดสอบมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับชุดข้อมูลตรวจสอบ (มีส่วนต่างเพียงร้อยละ 2) เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความสามารถในการนำไปใช้งานทั่วไป (Generalization) ได้เป็นอย่างดี ไม่เกิดปัญหาการเรียนรู้มากเกินไป (Overfitting) และมีความแม่นยำเพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นแกนหลักในระบบวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตันตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

4.2 ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน

ระบบตรวจจับและวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตันถูกพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่มุ่งเน้นความสะดวกในการใช้งานและการเข้าถึงของผู้ใช้ทั่วไป โดยส่วนติดต่อผู้ใช้ถูกออกแบบให้มีขั้นตอนการใช้งานที่ชัดเจนและเป็นลำดับ เริ่มจากหน้าหลักซึ่งผู้ใช้สามารถอัปโหลดไฟล์วิดีโอการแข่งขันในรูปแบบ .mp4 พร้อมแสดงชื่อไฟล์ที่เลือกและปุ่มเริ่มต้นการประมวลผล

เมื่อผู้ใช้เริ่มการตรวจจับ ระบบจะเข้าสู่สถานะการประมวลผลโดยอัตโนมัติ พร้อมแสดงแถบสถานะความคืบหน้า (Progress Bar) และข้อความแจ้งเตือนเพื่อให้ผู้ใช้รับทราบถึงสถานะของระบบระหว่างการทำงาน เมื่อกระบวนการประมวลผลเสร็จสิ้น ระบบจะแสดงข้อความยืนยันความสำเร็จ และทำการสร้างผลลัพธ์ในรูปแบบไฟล์ Microsoft Excel ซึ่งถูกดาวน์โหลดให้แก่ผู้ใช้โดยอัตโนมัติ

ตัวอย่างส่วนติดต่อผู้ใช้และผลลัพธ์ที่ได้จากระบบแสดงไว้ดังภาพตัวอย่างเมื่อการประมวลผลเสร็จสมบูรณ์ ระบบจะสร้างและดาวน์โหลดไฟล์ผลลัพธ์ในรูปแบบ Microsoft Excel ซึ่งภายในประกอบด้วยตารางสรุปข้อมูลดิบและสถิติการกระจายตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตันในเชิงพื้นที่ ตัวอย่างตารางผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ แสดงได้ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

คำอธิบายด้วยย่อ

- ตำแหน่ง F = หน้า (Front), M = กลาง (Mid), R = หลัง (Rear)
- ทิศทาง L = ซ้าย (Left), R = ขวา (Right)
- ผลลัพธ์ G = ลูกดี (Good), B = ลูกเสีย (Bad)
- ตัวอย่างเช่น RL-G หมายถึง ลูกตกที่โซนหลัง-ซ้าย และเป็นลูกดี

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นข้อมูลดิบของตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตันที่จำแนกตามฝั่งสนามและผลลัพธ์ของ

แต่ละข้อ ในขณะที่ยังมีตารางที่ 4 แสดงการสรุปสถิติการกระจายตัวของตำแหน่งการตกของลูกในเชิงพื้นที่ ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่าลูกแบดมินตันส่วนใหญ่ตกในพื้นที่ด้านหลังของสนาม โดยเฉพาะโซนหลัง-ซ้าย (RL) คิดเป็นร้อยละ 60 และโซนหลัง-ขวา (RR) คิดเป็นร้อยละ 40 ซึ่งสะท้อนรูปแบบการเล่นที่เน้นการตีลูกยาวไปยังพื้นที่ท้ายสนามเพื่อกดดันคู่ต่อสู้ในเชิงกลยุทธ์

จากการสรุปผลเชิงสถิติของตำแหน่งการตกของลูกจากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ผู้วิจัยได้ดำเนินการประเมินความแม่นยำเชิงวัตถุวิสัย (Objective Evaluation) โดยนำวิดีโอทดสอบไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านกีฬาแบดมินตันทำการตรวจสอบและระบุตำแหน่งพิกัดการตกที่แท้จริง (Ground Truth) จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งพิกัดที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 5

จากตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด 10 ครั้ง ระบบสามารถตรวจจับและระบุโซนการตกได้ถูกต้องแม่นยำจำนวน 9 ครั้ง คิดเป็นความแม่นยำร้อยละ 90 โดยจุดที่เกิดความคลาดเคลื่อนมักอยู่ในโซนหลัง (Rear Zone) เนื่องจากเป็นช่วงที่ลูกมีความเร็วลดลงและเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว (Deceleration) อย่างไรก็ตาม ค่าความแม่นยำในระดับดังกล่าวยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงกลยุทธ์เพื่อสะท้อนภาพรวมการเล่นได้อย่างมีประสิทธิภาพตามเป้าหมายของงานวิจัย

4.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ

จากการประเมินระบบตรวจจับตำแหน่งลูกแบดมินตันโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน พบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอยู่ในระดับดี โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.25 จากคะแนนเต็ม 5 คะแนน ผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อการใช้งานพื้นฐานได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในด้านความถูกต้องของการวิเคราะห์ตำแหน่งเชิงพื้นที่ของลูกแบดมินตัน และการนำเสนอรายงานผลลัพธ์ในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

อย่างไรก็ตาม ผู้เชี่ยวชาญได้ให้ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาระบบเพิ่มเติมในสองประเด็นสำคัญ ประเด็นแรกคือด้านความเร็วในการประมวลผล โดยระบบยังมีความล่าช้า

(Latency) ในขั้นตอนการอัปโหลดไฟล์วิดีโอและการประมวลผลผลลัพธ์ โดยเฉพาะในกรณีที่ไฟล์วิดีโอมีขนาดใหญ่หรือมีความละเอียดสูง ประเด็นที่สองคือความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจจับในบางสถานการณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ (Human Visual Inspection) โดยเฉพาะในจังหวะที่ลูกแบดมินตันมีความเร็วสูงหรือเกิดการซ้อนทับกับเส้นสนาม ซึ่งเป็นประเด็นที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบให้มีความแม่นยำและเสถียรยิ่งขึ้นในอนาคต

4.4 ผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่าง

จากผลการประเมิน พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ในระดับดี (ค่าเฉลี่ย 3.87 จาก 5 คะแนน) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการด้านการใช้งาน การเรียนรู้ และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกลยุทธ์ได้อย่างเหมาะสม เมื่อพิจารณารายชื่อ พบว่าผู้ใช้งานให้คะแนนในระดับดีใน 5 ประเด็นหลัก ได้แก่ 1) ประโยชน์ต่อการเรียนรู้และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี 2) ความเข้าใจง่ายของขั้นตอนการอัปโหลดวิดีโอและดูผลลัพธ์ 3) ความสะดวกในการแสดงผลการวิเคราะห์ 4) การส่งออกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel ทำงานได้ถูกต้องและสะดวก และ 5) การนำเข้าและส่งออกข้อมูล (Import/Export) ทำได้อย่างราบรื่น

อย่างไรก็ตาม รายการที่ได้รับคะแนนต่ำที่สุดซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง ได้แก่ ความเร็วในการประมวลผล ความแม่นยำในการตรวจจับลูก และความสามารถในการวิเคราะห์แบ่งโซนสนาม ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญในก่อนหน้านี้ โดยชี้ให้เห็นว่าระบบยังมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพการประมวลผลและความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับในบางสถานการณ์ ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในงานวิจัยระยะถัดไป

5. การอภิปราย

ผลการวิจัยจากการพัฒนาและทดสอบระบบตรวจจับตำแหน่งลูกแบดมินตันด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ใช้สถาปัตยกรรม YOLOv8 (Model 4) มีศักยภาพสูงในการตรวจจับลูกแบดมินตัน โดยมีค่า Precision สูงถึงร้อยละ 95 และค่า Recall ร้อยละ 92 ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Track-by-Detection ที่ Mirzaei et al. (2023) และ Cao et al. (2021) ระบุว่าเป็นแนวทางที่มี

ประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการติดตามวัตถุขนาดเล็กที่เคลื่อนที่รวดเร็ว นอกจากนี้ การเลือกใช้ YOLOv8 ยังสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Kim & Cheng (2023) ที่เน้นย้ำถึงความสำคัญของแบบจำลองน้ำหนักเบาที่สามารถรองรับการประมวลผลแบบเรียลไทม์และการนำไปใช้งานจริง

อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินจากทั้งผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานจริงชี้ให้เห็นว่าระบบยังมีข้อจำกัดด้านความเสถียรของการติดตามลูกและความแม่นยำในการระบุจุดตกในบางสถานการณ์ โดยเฉพาะกรณีที่ลูกแบดมินตันเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงหรือเกิดภาพเบลอจากการเคลื่อนที่ (Motion Blur) ซึ่งเป็นความท้าทายเดียวกับที่ Mirzaei et al. (2023) และ Rozumnyi et al. (2021) ได้กล่าวถึงในงานวิจัยก่อนหน้า ในประเด็นความพยายามแก้ไขด้วยเทคนิคการลดความเบลอ (Deblurring)

นอกจากนี้ การที่ระบบยังมีการตรวจจับตกหล่นในบางเฟรม (Missed Detection) ซึ่งสะท้อนผ่านค่า Recall แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการประยุกต์ใช้เทคนิคเสริมเพื่อเติมเต็มข้อมูลที่ขาดหายไป ดังเช่นงานวิจัยของ Lai et al. (2025) ที่เสนอการใช้กลไก Attention เพื่อเพิ่มความแม่นยำ หรือแนวทางของ อภิสิทธิ์ เปรมปรีดี และคณะ (2567) และ Shah et al. (2020) ที่ประยุกต์ใช้ Kalman Filter เพื่อประมาณค่าตำแหน่งและสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของลูกให้มีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น

ในด้านการประยุกต์ใช้งานจริง ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานยืนยันว่าระบบมีคุณค่าอย่างมากต่อการเรียนรู้และการวิเคราะห์เกมกีฬา โดยเฉพาะการสรุปผลในรูปแบบข้อมูลเชิงสถิติและการส่งออกไฟล์ Excel ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์เชิงลึกและการวางแผนกลยุทธ์การแข่งขัน ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Instant Review System) ที่ Kopania et al. (2022) ระบุว่าการระบุตำแหน่งลูกอย่างแม่นยำมีบทบาทสำคัญต่อการตัดสินใจผลการแข่งขัน

แม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดในบางประเด็น แต่ผลการทดลองและการประเมินทั้งเชิงเทคนิคและเชิงผู้ใช้งานแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแนวทางการวิเคราะห์ตำแหน่งลูกแบดมินตันด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ซึ่งสามารถต่อยอดไปสู่การวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น การจำแนกประเภทการตี (Shot Classification) และการวิเคราะห์รูปแบบการเล่น

เชิงกลยุทธ์ ตามแนวทางของ Wang (2021) และ Zhao (2023) ในอนาคต

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สำหรับการวิเคราะห์ตำแหน่งการตกของลูกแบดมินตัน เพื่อยกระดับประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เกม (Scouting) และสนับสนุนการวางแผนกลยุทธ์การแข่งขัน โดยผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองตรวจจับวัตถุด้วยสถาปัตยกรรม YOLOv8 และบูรณาการเข้ากับระบบเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถใช้งานได้จริง เพื่อแปลงข้อมูลจากวิดีโอการแข่งขันให้เป็นข้อมูลเชิงสถิติและเชิงพื้นที่ที่มีความหมายทางกลยุทธ์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การกำหนดค่าพารามิเตอร์การฝึกสอนที่เหมาะสม โดยเฉพาะการใช้จำนวนรอบการฝึกสอน 300 รอบ ร่วมกับชุดข้อมูลที่มีความหลากหลายและเพียงพอจำนวน 9,800 ภาพ เป็นปัจจัยสำคัญ ที่ส่งผลให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุด แบบจำลองที่ได้สามารถตรวจจับลูกแบดมินตันได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่า Precision ร้อยละ 95 และมีความครอบคลุมในการตรวจจับด้วยค่า Recall ร้อยละ 92 เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานในระบบจริง พบว่าสามารถสนับสนุนการวิเคราะห์รูปแบบการเล่น การระบุโซนการตกของลูก และการจัดทำรายงานสถิติในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถนำไปใช้งานต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่อยู่ในระดับดี ระบบที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์และการเรียนรู้เชิงลึกในการวิเคราะห์เกมกีฬาแบดมินตัน และสามารถต่อยอดไปสู่การเป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการฝึกซ้อม การวิเคราะห์การแข่งขัน และการพัฒนานักกีฬาในระดับสโมสรระดับชาติ และระดับนานาชาติได้ในอนาคต

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังคงมีข้อจำกัดในด้านความเร็วในการประมวลผล และความเสถียรของการติดตามวัตถุในสถานการณ์ที่ลูกแบดมินตันมีความเร็วสูงหรือเกิดภาพเบลอจากการเคลื่อนที่ ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการระบุจุดตกในบางกรณี ดังนั้น แนวทางการพัฒนาในอนาคตควรมุ่งเน้นการผสมผสานเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง เช่น Kalman Filter หรือเทคนิคการประมวลผลภาพขั้นสูง เพื่อ

พัฒนาไปสู่การเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในวงการกีฬาแบดมินตันต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์
ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ SCI-690031

เอกสารอ้างอิง

- Cao, Z., Liao, T., Song, W., Chen, Z., & Li, C. (2021). Detecting the shuttlecock for a badminton robot: A YOLO based approach. *Expert Systems with Applications*, 164, 113833. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113833>
- Hsu, Y.-H., Yu, C.-C., & Cheng, H.-Y. (2024). Enhancing Badminton Game Analysis: An Approach to Shot Refinement via a Fusion of Shuttlecock Tracking and Hit Detection from Monocular Camera. *Sensors*, 24(13), 4372. <https://doi.org/10.3390/s24134372>
- Hussain, M. (2023). YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection. *Machines*, 11(7), 677. <https://doi.org/10.3390/machines11070677>
- Jiang, P., Ergu, D., Liu, F., Cai, Y., & Ma, B. (2022). A Review of Yolo Algorithm Developments. *Procedia Computer Science*, 199, 1066–1073. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.135>
- Kamoljitprapa, P., & Leelasilapasart, P. (2025). Development of Machine Learning Regression Models for CO₂ Emission Forecasting in Thailand. In *7th International Conference on Statistics: Theory and Applications (ICSTA'25)*, Paris, France, pp. 1-7. <https://doi.org/10.11159/icsta.25.146>
- Kim, J., & Cheng, K. (2023). AI-powered badminton video detection: Enhancing gameplay analysis and training. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.23708325.v1>
- Kopania, M., Nowisz, J., & Przelaskowski, A. (2022). Automatic Shuttlecock Fall Detection System in or out of a Court in Badminton Games—Challenges, Problems, and Solutions from a Practical Point of View. *Sensors*, 22(21), 8098. <https://doi.org/10.3390/s22218098>
- Lai, Y., Shi, Z., & Zhu, C. (2025). YO-CSA-T: A real-time badminton tracking system utilizing YOLO based on contextual and spatial attention. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.06472>
- Lippi, M., Bonucci, N., Carpio, R. F., Contarini, M., Speranza, S., & Gasparri, A. (2021). A yolo-based pest detection system for precision agriculture. In *2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, PUGLIA, Italy, pp. 342–347. <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480344>
- Malta, A., Mendes, M. & Farinha, T. (2021). Augmented Reality Maintenance Assistant Using YOLOv5. *Applied Sciences*, 11(11), 4758. <https://doi.org/10.3390/app11114758>
- Mirzaei, B., Nezamabadi-pour, H., Raoof, A., & Derakhshani, R. (2023). Small Object Detection and Tracking: A Comprehensive Review. *Sensors*, 23(15), 6887. <https://doi.org/10.3390/s23156887>
- Prempre, A., Kiatwuthiamorn, J. & Cumpim, C. (2024). Ball Tracking System Using Kalman Filter and Deep Learning. *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 14(40), 108-133. <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/pitjournal/article/view/592>
- Rozumnyi, D., Matas, J., Sroubek, F., Pollefeys, & Oswald, M.R. (2020). FMODetect: Robust Detection of Fast Moving Objects. In *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 3521-3529.
- Singh, S. (2021). *Using Deep Learning to Predict the Path of a Shuttlecock in Badminton* [Master's thesis]. Arkansas State University.
- Srigarom, S.m & Chew, K.H. (2020). Hybrid motion-based object detection for detecting and tracking of small and fast moving drones. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens, Greece, pp. 615-621. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213912>
- Sun, W., Dai, L., Zhang, X., Chang, P., & He, X. (2022). RSOD: Real-time small object detection algorithm in UAV-based traffic monitoring. *Applied Intelligence*, 52, 8448–8463. <https://doi.org/10.1007/s10489-021-02893-3>
- Vijayakumar, A., & Vairavasundaram, S. (2024). YOLO-based Object Detection Models: A Review and its Applications. *Multimedia Tools and Applications*, 83, 83535–83574. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18872-y>
- Vrajesh, S.R., Amudhan, A.N., Lijiya, A., & Sudheer, A.P. (2020). Shuttlecock Detection and Fall Point Prediction using Neural Networks. In *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)*, Belgaum, India, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/INCET49848.2020.9154136>
- Wang, W. (2021), Using Machine Learning Algorithms to Recognize Shuttlecock Movements. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9976306. <https://doi.org/10.1155/2021/9976306>
- Zhao, Y. (2023). Automatic shuttlecock motion recognition using deep learning. *IEEE Access*, 11, 111281–111291. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3322455>