Bulletin of Applied Sciences

Volume 15, Issue 1

January - June , 2026



Bulletin of Applied Sciences

PAPER

Thanakorn Yootho *et al.*

Low-Cost Toilet-Based Sit-to-Stand Device for Elderly with Lower Limb Weakness

Bulletin of Applied Sciences
ISSN 2822-1540 (Online)
Volume 15 Issue 1 January - June 2026

The journal is currently indexed and certified in Tier 1
of the Thai Journal Citation Index Centre (TCI)

Owner
Department of Science Service
Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation

Policy
Bulletin of Applied Sciences is pleased to consider submissions from author worldwide, publishing academic articles research articles and reviewed articles that focus on sciences and technologies particularly in the area of chemistry, physics, biotechnology, food science and food technology, material science, metrology, engineering and applied science.

Editor in Chief

Dr. Poovadee Tuchinda	Department of Science Service

Managing editor

Ms. Udomlak Veinngarm	Department of Science Service

Editorial board members

Prof. Dr. Duangdao Aht-Ong	Chulalongkorn University
Prof. Dr. Pavinee Chinachtoi	Food Science and Technology Association of Thailand (FoSTAT)
Assoc. Prof. Dr. Atitaya Siripinyanond	Mahidol University
Assoc. Prof. Dr. Jaroon Jakmunee	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Jittima Luckanagul	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Kannika Sahakaro	Prince of Songkla University
Assoc. Prof. Dr. Namtip Wipawin	Sukhothai Thammathirat Open University
Assoc. Prof. Dr. Napaporn Youngvises	Thammasat University
Assoc. Prof. Dr. Nares Chuersuwan	Suranaree University of Technology
Assoc. Prof. Dr. Oratai Jongprateep	Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Patnarin Worajittiphon	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Pimpa Hormnirun	Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Thee Chowwanonthapunya	Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Veena Satitpatipan	Mahidol University
Assoc. Prof. Dr. Wipharat Chuachuad Chaiyasith	Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Asst. Prof. Dr. Chairath Tangduangdee	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Parinda Penroj	Silpakorn University
Asst. Prof. Dr. Peerawatt Nunthavarawong	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst. Prof. Dr. Piyanart Ekworapoj	Srinakharinwirot University
Asst. Prof. Dr. Puttaruksa Varanusupakul	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Rakrudee Sarnthima	Mahasarakham University
Asst. Prof. Dr. Rattapoohm Parichatprecha	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Asst. Prof. Dr. Terdkiat Limpiteeprakarn	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Yaowapa Lorjaroenphon	Kasetsart University
Asst. Prof. Somporn Chaiarrekij	Chulalongkorn University
Dr. Anupong Joompang	Burapha University
Dr. Lada Punsukumtana	Independent Scholar
Dr. Manop Sittidech	Former Minister Counsellor for Science and Technology at the Royal Thai Embassy, Brussels, Belgium
Dr. Nongnaphat Duangdee	Thammasat University
Dr. Nuchanat Na-ranong	Independent Scholar

Dr. Ong-art Thanetnit — Chulalongkorn University
Dr. Prasarn Kiddee — Department of Skill Development
Dr. Sanchai Yotmanee — Phuket Rajabhat University
Dr. Warawut Suphamitmongkol — Kasetsart University
Mr. Chatree Wongkaew — Independent Scholar
Mr. Veera Tulasombut — Independent Scholar
Dr. Jiraborrirak Charoenpattarapreeda — Department of Science Service
Dr. Jirawat Salungyu — Department of Science Service
Dr. Jirod Chaisan — Department of Science Service
Dr. Sirinat Boonpo — Department of Science Service
Dr. Worraphol Nansu — Department of Science Service

Management department
Ms. Aratchaporn Wayoopagtr — Department of Science Service
Ms. Joy Phewsa-ard — Department of Science Service
Ms. Thipwatee Kokram — Department of Science Service

Public relations coordinator
Mr. Apiwat Changrob — Department of Science Service
Ms. Nicha Junkhonkhan — Department of Science Service

Frequency
We publish two issues per year: January – June and July – December.

Publication Fee
All articles submitted to Bulletin of Applied Sciences are free of charge.

Publisher
Institute of Digital Technology for Science Service
Department of Science Service
Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation
75/7 Rama VI Rd. Ratchathewi district, Bangkok, 10400
Website: https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/BAS
E-mail: bas@dss.go.th

Bulletin of Applied Sciences

Bull. Appl. Sci.
Volume 15 Issue 1 January - June 2026

Editorial

The Bulletin of Applied Sciences is a peer-reviewed, semi-annual academic journal published by the Department of Science Service (DSS). The journal is currently indexed and certified in Tier 1 of the Thai Journal Citation Index Centre (TCI) and publishes academic, research, and review articles focusing on science and technology. This issue contains several interesting articles, including:

1) Low-cost toilet-based sit-to-stand device for elderly with lower limb weakness,

2) An innovative-of the portable electric tjanting pen,

3) Improving coconut fiber sheet performance via stepwise chemical treatments,

4) Determination of technical measurement uncertainty and method verification for coliform detection using the Multiple Tube Fermentation method in drinking water in sealed containers, ice, and raw water samples,

5) Performance investigation of a transparent roof forced convection solar drying system for drying Andrographis paniculata, and

6) Study on the efficiency of automatic village water disinfection system using ultraviolet radiation.

The Editorial Board of the Bulletin of Applied Sciences would like to express its sincere appreciation to all authors who submitted their manuscripts for publication. Their valuable contributions in disseminating knowledge and research findings support the advancement of science, research, and innovation, while providing tangible benefits for professional practice and development.

We would also like to extend our heartfelt gratitude to all reviewers for their valuable contributions to the peer-review process. Through their expert evaluations and constructive recommendations, the submitted manuscripts have been significantly enhanced in terms of academic quality, accuracy, and readability.

In addition, we would like to thank everyone who has contributed to the successful completion of this issue. Their dedication, cooperation, and support have played an essential role in the publication of this journal.

The Editorial Board sincerely hopes that this issue will serve as a valuable source of scientific and technological knowledge for all readers. We trust that the information and research findings presented herein can be effectively applied to professional practice, support organizational development, and help solve practical problems encountered across various fields.

Finally, we would like to express our sincere gratitude to our readers for their continued interest in and support of the Bulletin of Applied Sciences. We invite you to look forward to more insightful knowledge and outstanding research articles in future issues of the journal.

Poovadee Tuchinda
Editor in Chief

Publication ethics

Bulletin of Applied Sciences (BAS), which aims to publish research and academic articles in the fields of chemistry, physics, biotechnology, food science and food technology, material science, metrology, engineering, and applied science, is committed to maintaining the highest standards of publication ethics. We intend to provide publishing standards, and have quality publications to acquire a qualification that is recognized both nationally and internationally. Thus, publisher, editors, reviewers, and authors are required to strictly follow our guidelines, standards, and publication ethics.

Duties of Editors

1. Ensure a submitted manuscript is relevant to aims and scopes of the journal. Also examine whether its quality meet the journal's standards. However, if an unsuitable submission is found, editors should inform authors immediately.
2. Pre-screen the manuscript, check duplications and plagiarism before sending to experts (at least 2 persons) for peer review.
3. Evaluate the manuscript for their intellectual merit without regard to race, gender, sexual orientation, religious belief, ethnicity, political viewpoints or affiliation of authors. Ensure that the peer review process is fair and unbiased. Where necessary, editors should seek additional opinions from experts before rejecting any manuscript.
4. Editors must have no conflicts of interest or relationships that pose potential conflicts related to manuscripts under consideration. Moreover, editors must avoid taking advantage of information obtained from a manuscript/article or the journal for business or use and misrepresent it as their own academic works.
5. Invite external reviewers in related field to provide a comprehensive evaluation of the manuscript. Ensure that authors and reviewers do not know each other's identity (double blind) including blind to an unauthorized person.
6. Decide based on feedback from the peer review, whether to seek more peer reviews (in case three reviewers have different opinions).
7. Must not make substantial edits on author's work or alter peer review reports or interfere with the information exchanged between reviewers and authors.
8. Collect and send the reviewer reports to authors, work with authors to revise the manuscript in response to the reviewers' comments. The revised manuscript is returned to the reviewers to ensure that their concerns have been satisfactorily resolved.
9. Once the manuscript has been accepted, editors shall arrange publication in the chronological order of submission date, content, or other suitability reasons.
10. In case, an accepted manuscript cannot be published in the journal volume that state in an acceptance letter at any reasons, editors should inform authors promptly and manage to publish in the next volume where appropriate.
11. Ensure the publication process is accurate and timely for both printed and online versions.

Duties of Authors

1. Assure the submitted manuscript is original, has not been published before and is not currently being considered for publication elsewhere. it is the responsibility of authors to obtain permission from copyright holders, to ensure that the use of images, data, and illustrations in the manuscript do not violate copyright laws.
2. Avoid plagiarism. Any relevant prior works and publications should be properly cited with reference lists at the end of the manuscript.
3. Ensure the manuscript followed the formatting instruction.
4. The research contained the experimental with animals or human must be allowed from ethical committee before testing. The author must submit the approved ethical statement along to submitted manuscript.
5. After pre-screening, if errors are discovered, authors should collaborate with editors or publisher to quickly correct their work before sending to evaluate by experts.
6. The manuscript is an academic work with authors' perspective not by the Department of Science Service or editorial board. Authors are responsible for their works.
7. Authors should have read and agreed to publication requirements policies thoroughly.
8. As standard copyright agreement, we would like to inform authors that you transfer or "assign" copyright to the Department of Science Service as the owner and publisher of the journal (BAS). After publication in BAS, the work must not be published and distributed by others.
9. Authors also should mention about financial and material support.

Duties of Reviewers

1. Provide unbiased, constructive feedbacks on the work's scholarly merits and scientific value. Evaluate the work's composition, scientific accuracy, creativity, and interest to the journal's readers as well as it is clear, concise, and relevant. Give objective and fair suggestions for improvements and avoid personal comments or criticism. Disclose conflicts of interest to editors (if any).
2. Notifying editors immediately if unable to review and/or decline the review.
3. Evaluate the manuscript in a timely manner. Notify editors when you fail to complete a review on time in order to set a new agreement.
4. Maintain privacy of the review process by refraining from discuss or reveal any information from the reviewed manuscript with outside parties.
5. Notify editors if any ethical concerns such as plagiarism or similarity between the reviewed manuscript and other published articles.
6. The revised manuscript will be returned to reviewers (together with the response letter) to ensure that the comments raised have been satisfactorily resolved. Reviewers make a recommendation report to editors as to whether the manuscript should be rejected, accepted, or required another revision.

Personal Data Protection

1. Manuscript contained plagiarism and copying such as figure and data will not be accepted for publication in Bulletin of Applied Sciences (BAS) journal
2. Bulletin of Applied Sciences (BAS) journal will not reveal name and personal information of reviewers.

Bulletin of Applied Sciences

Bull. Appl. Sci.
Volume 15 Issue 1 January - June 2026

Content

Low-cost toilet-based sit-to-stand device for elderly with lower limb weakness 1-9
Thanakorn Yootho, Yutthana Pititheeraphab

An innovative of the portable electric tjanting pen 10-15
Apaporn Sinthusarn, Somphon Sincharoenpokai, Kartoon Pengprom

Improving coconut fiber sheet performance via stepwise chemical treatmen 16-24
Thitarini Suropan, Surawut Puangmalee, Jarawee Leksuksri

Determination of technical measurement uncertainty and method verification for coliform detection using the Multiple Tube Fermentation method in drinking water in sealed containers, ice, and raw water samples 25-35
Denchai Wongsrikaew, Mantana Jamklang, Chompunoot Wangboon, Pongpat Kiatprasert, Watsana Penkhrue

Performance investigation of a transparent roof forced convection solar drying system for drying *Andrographis paniculata* 36-44
Kotchanipha Yuyen, Sarawut Nabnean

Study on the efficiency of automatic village water disinfection system using ultraviolet radiation 45-54
Apaporn Sinthusarn, Anucha Sinthusarn

Bulletin of Applied Sciences

Volume 15 Issue 1 January - June 2026
https://doi.org/10.60136/bas.v15.2026.4660

Research Article

Low-cost toilet-based sit-to-stand device for elderly with lower limb weakness

Thanakorn Yootho[1], Yutthana Pititheeraphab[1*]

College of Biomedical Engineering, Rangsit University, Patumthani 12000, Thailand
[*]Corresponding author's e-mail: yutthana.p@rsu.ac.th

Received: 19 February 2026, Revised: 5 May 2026, Accepted: 7 May 2026

Abstract

Falls in the bathroom pose a serious risk to older adults, leading to physical and psychological consequences and a reduced quality of life, including fractures, head injuries, fear of movement, and loss of independence. These falls result from both personal factors, such as muscle weakness, impaired balance, chronic conditions, and medication side effects, and environmental factors, including slippery floors, inadequate lighting, insufficient assistive devices, and unsuitable sanitary fixtures. This research aimed to design and develop a low-cost toilet-based sit to stand device for elderly with lower limb weakness that can be used with both standard and multipurpose toilet bowls. The device supports safe and comfortable transitions between sitting and standing and is designed based on biomechanical principles of the sit-to-stand movement. The system comprises a mechanical unit with a linear electric actuator, an electrical control system, a C-based control program, and a battery-powered energy source. Biomedical engineering tests confirmed correct operation and stable performance of the control and safety systems. Biomedical tests confirmed stable control and safety performance. The device safely supported loads of 10-120 kg. Lifting time ranged from 11.73-16.15 s, while lowering time ranged from 11.14-12.93 s. In 30 volunteers (15 males, 15 females), knee flexion angles decreased after device use from 86.07-89.93° to 60.70-72.90° in males and from 78.10-88.13° to 59.10-67.90° in females, indicating reduced knee joint load during sit-to-stand. These results indicate that the device effectively reduces biomechanical load on the knee joint during the sit-to-stand movement.

Keywords: Bathroom safety, Elderly, Fall prevention, Sit-to-stand assistive device

1. Introduction

Thailand and many countries around the world are rapidly entering an aging society, resulting in increasing attention to the health, safety, and quality of life of older adults. One of the most common and critical problems is falls, which are a leading cause of injury, disability, and unintentional death among the elderly. Falls also have long-term psychological impacts, such as fear of recurrent falls, reduced physical activity, and loss of independence in activities of daily living [1-2]. Standing up from a seated position is a fundamental activity that older adults must perform repeatedly each day and is one of the tasks that requires substantial lower-limb muscle strength, balance, and postural control. Biomechanical studies have shown that older adults exhibit altered sit-to-stand movement patterns compared with younger individuals, such as increased reliance on the arms and greater instability of the body's center of mass, these factors increase the risk of balance loss and falls [3]. Bathrooms are among the highest-risk areas for falls within residential environments due to slippery surfaces, limited space, and the need to transition from sitting to standing, particularly when rising from a toilet. Research has indicated that adjusting seat height and providing grab bars can improve stability and reduce excessive muscle activation in older adults [4]. However, in real-world use, a substantial number of accidents during sit-to-stand movements in bathrooms continue to occur, despite the availability of assistive devices and grab bars. Several limitations remain, including incompatibility with various toilet designs, lack of flexibility to accommodate individual body dimensions, and poor suitability for the spatial constraints of actual bathrooms. In addition, some devices are costly or require complex installation procedures, limiting accessibility for many older adults [5]. Shamim et al. conducted a biomechanical study to support the design of standing-assist devices and found that increasing seat height reduces the muscular effort required during standing, while the installation of grab bars enhances stability and postural control. Their findings highlight seat height and grab bars as critical elements in the design of standing-assist devices for older adults to improve safety and usability [6]. Hsieh et al designed a toilet standing-assist chair using a four-bar linkage mechanism to increase the seat rotation angle to more than 45 degrees, thereby improving standing efficiency while reducing system torque and driving force. The prototype was capable of supporting loads of up to 150 kg and required less driving force than commercially available devices [7]. Li Yuan et al analyzed sit-to-stand movements using inertial measurement units (IMUs) to develop a standing-assist device. The results demonstrated that designs capable of effectively supporting loads and maintaining the balance of the center of force improved stability, safety, and comfort during standing, with most users reporting high satisfaction. Based on these limitations and findings, this research aims to develop a low-cost smart sit-to-stand assistive device for older adults with lower limb muscle weakness. The device is designed to be compatible with both standard and multifunctional toilet systems and to provide

stability, structural strength, and safe load-bearing capacity for users weighing up to 100 kg. The assistive device is equipped with a movable seat platform that can automatically move vertically and forward–backward to reduce the physical effort required during standing up and sitting down. Safety is enhanced through the integration of motion limiters to restrict the range of movement. In addition, the system incorporates a user detection mechanism, an automatic seat return function that restores the seat to its lowest position when no user is detected, audible alerts during operation, and an emergency stop button to immediately halt operation and notify caregivers. The device primarily operates on battery power to enhance safety during use in bathroom environments. The developed sit-to-stand assistive device demonstrates potential to reduce the risk of falls, improve user safety, and promote independence in daily living activities among older adults, thereby contributing to long-term improvements in quality of life [8].

2. Materials and methods

The design of this device integrates multidisciplinary knowledge. Biomechanics is applied to analyze sit-to-stand movements, while mechanical engineering is used to design the structure and lifting mechanism, with a linear actuator as the primary driving component. An embedded control system based on a microcontroller is employed to manage system operations, in conjunction with power electronics and a DC power supply to ensure stable performance. The device is equipped with sensors to detect the upper and lower positions of the toilet seat platform. It also includes user control buttons to stop the movement at a position suitable for individual anthropometric differences. A voice-based alert system provides spoken notifications during operation. For safety, the system incorporates an emergency stop button and an external audio-visual alert system to notify caregivers outside the bathroom. The control software is developed in the C programming language to ensure accurate, stable, and reliable system operation.

2.1 Analyze sit-to-stand movement

The transition from a seated to a standing position is a fundamental movement in daily living; however, it is biomechanically complex because it requires coordinated interaction among the skeletal system, muscular activation, and postural control. This movement can be described as a percentage of the total sit-to-stand cycle (100%), as follows. At the initial phase (0%), the body remains in a seated position, with the center of mass (COM) located low and posterior to the base of support (BOS), while muscle activation is minimal. During the preparatory phase (~10%), the trunk flexes forward to shift the COM closer to the posterior boundary of the BOS, which helps reduce the mechanical load on the knee and hip joints. The weight transfer phase (~27%) is a critical stage in which the COM moves over the feet. During this phase, the hip, knee, and ankle extensor muscles must work synergistically to generate sufficient force. Subsequently, during the rising phase (~35%), the body continues to elevate using the strength of the lower limb muscles. At the point of maximum velocity (~45%), precise neuromuscular control is required to regulate force and movement speed in order to prevent loss of balance. Finally, in the stabilization phase (~73%), the body reaches an upright standing posture, and muscle activity decreases to maintain postural stability. In older adults experiencing age-related muscle atrophy, both muscle strength and balance control are diminished, particularly during the weight transfer and rising phases, which are associated with a high risk of falls. This risk is further increased during sit-to-stand movements performed on toilet seats, where space is limited and floor surfaces may be slippery. Therefore, the use of sit-to-stand assistive devices designed based on biomechanical principles, such as safely facilitating COM displacement, increasing the base of support, and reducing joint loading at the knee and hip, plays a crucial role in enhancing safety, stability, and overall quality of life for older adults during daily activities [9-11].

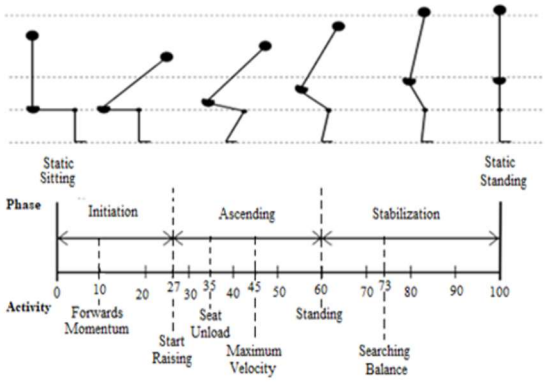


Figure 1 Biomechanical analysis of the sit-to-stand movement (Campos Padilla, I. Y, 2015)

2.2 Structure and Operating Mechanism

The mechanical system was designed to safely and reliably support the body weight and movements of older adults. The main structure is fabricated from steel, stainless steel, and corrosion-resistant plastic materials, providing sufficient mechanical strength, resistance to moisture, and suitability for use in bathroom environments. The device consists of three main components:(1) the supporting base structure, (2) the seating platform, and (3) the actuator assembly. The actuator assembly generates the driving force required to control the elevation and lowering of the seating platform by partially transferring the user's body weight to the mechanical structure. As a result, muscular effort is reduced during transitions from sitting to standing and frm standing to sitting. The device was designed for versatile use and can be installed in conjunction with a household toilet without requiring modification of the existing structure. The minimum height of the steel frame supporting the seating platform was set at 41 cm, approximately 1 cm higher than a standard toilet seat, while the maximum height was 56 cm. This vertical displacement range was designed to encompass the complete sit-to-stand sequence, from the initial seated posture to the pre-upright stabilization phase, consistent with biomechanical analyses of sit-to-stand movement in older adults (Figure 1). Given sex-related differences and inter-individual variability in lower limb anthropometry, particularly in thigh and shank lengths, the adjustable range was incorporated to ensure appropriate knee and hip joint angles at the initial seated position. This facilitates more favorable joint moment distribution and reduces the mechanical demand on the knee extensors during the sit-to-stand transition. Consequently, the design accommodates a wide range of user body dimensions rather than relying on mean anthropometric values alone. Furthermore, because the optimal initial seat height varies among individuals, the device was equipped with an electronic control circuit and push-button

interface. This allows users to adjust and stop the actuator-driven seating platform at a preferred height within the predefined range of motion, thereby enhancing usability and adaptability to individual needs.

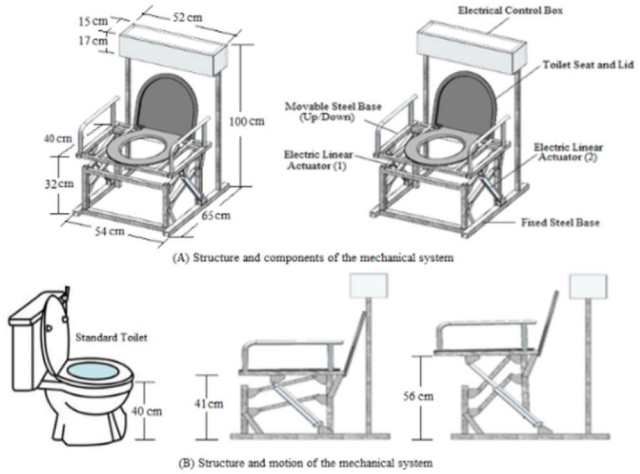


Figure 2 Structure and range of motion of the device

2.3 Hardware System

Figure 3 illustrates the hardware architecture of the stand-assist device designed to support elderly users during toilet use. The system consists of three main subsystems:(1) the electrical control system, which processes input signals and generates control commands to operate the mechanical system in lifting, lowering, or stop modes. This subsystem also integrates a voice alert circuit to indicate the operational status of the seat platform to the user; (2) the mechanical system, which comprises a load-bearing structure and electric linear actuator-based motion mechanisms that support the user's body weight and transfer forces to the device structure during the lifting and lowering processes; and (3) the direct current (DC) power supply system, which provides stable and continuous DC electrical power to both the electrical control system and the mechanical system to ensure reliable operation of the device.

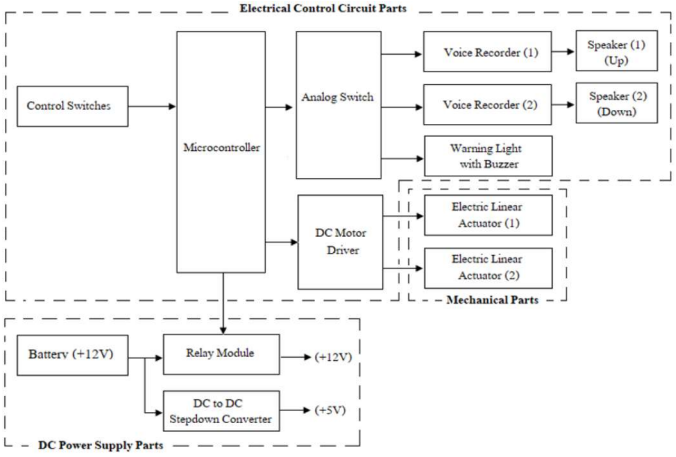


Figure 3 Block diagram of the hardware control system of the device

The operation of the electrical control circuit of the device (Figure 4) begins with four control switches (SW1–SW4), each connected in series with a 1 kΩ resistor and interfaced with the input ports of the microcontroller (A0–A3). These switches are used to receive command signals for lifting, lowering, stopping, and emergency shutdown. When a switch is pressed, the microcontroller processes the input signal and sends control commands to the mechanical system through a DC motor driver (MCT-HB-40A), which supplies +12 V to the electric linear actuators. As a result, the seat platform moves upward or downward according to the specified direction or stops immediately in response to the received command. During the lifting and lowering of the seat platform, the system operates in conjunction with a voice alert circuit consisting of two ISD1820 voice recording modules, which are controlled via an analog switch (CD4066BE). The system plays pre-recorded voice messages through speakers while the seat platform is moving upward or downward in order to inform elderly users of the current operating status of the device. In emergency situations, activation of switch SW4 triggers a warning light and an audible alarm module (SLAS–1101J, +12V) and immediately halts the operation of the entire system. Normal operation can resume only after the issue has been resolved and the system has been reset. In addition, a proximity sensor (JSN-SR04T) is employed to detect the presence of a user. If no user is detected in the bathroom for a period of 2 minutes, the system automatically commands the seat platform to return to its initial lowered position in cases where the seat has been left in the raised position after use. The power supply of the system is provided by a sealed lead-acid battery rated at +12 V and 9 Ah, which supplies +12 V to the mechanical system. A voltage regulator (LM2596) is used to step down and regulate the voltage to a stable +5 V for the electrical control circuit. In addition, a relay module is utilized to control the delivery of +12 V power to the actuators based on control signals from the microcontroller, ensuring that the system operates according to the predefined control logic in a stable and reliable manner.

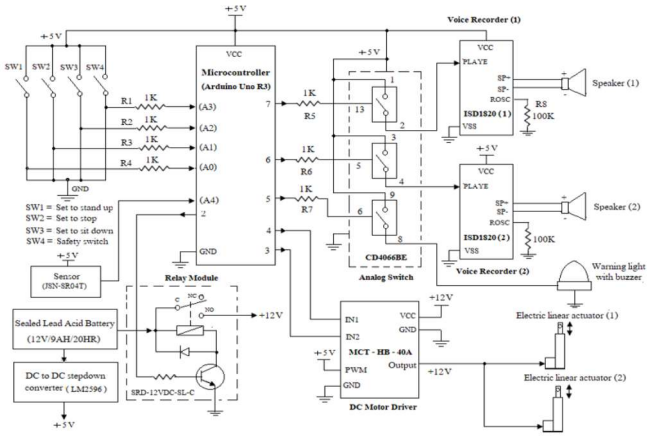


Figure 4 Illustrates the electrical control circuit of the device

2.4 Software System

The control software of the device was developed using the C programming language and operates according to the flowchart illustrated in Figure 5. When the system is powered on, all required libraries are initialized and the relevant variables are configured. Subsequently, the movable steel base and seat plate, which are mechanically coupled to the lifting mechanism, are set to their initial position at the lowest level. After system initialization, the software continuously monitors the status of the control switches (SW1–SW4) and executes control actions based on the conditions of each switch, as described below. SW1 (Upward movement): When SW1 is activated, the system

generates a voice alert stating “The device is lifting the seat upward (Up)” to inform the user that the lifting process has started. Simultaneously, linear electric actuators (1) and (2) are driven in the upward direction, causing the steel base and seat plate to move upward until the predefined maximum height is reached, provided that SW2 is not pressed during operation. SW2 (Stop): When SW2 is activated, the control system immediately stops the operation of linear electric actuators (1) and (2), resulting in a complete halt of the movement of the steel base and seat plate. SW2 is intended to stop the system at a position that is appropriate for the user to stand up from the toilet safely. SW3 (Downward movement): When SW3 is activated, the system generates a voice alert stating “The device is lowering the seat downward (Down)” to notify the user that the lowering process has begun. Linear electric actuators (1) and (2) are then driven in the downward direction, allowing the steel base and seat plate to descend to the predefined lowest position, provided that SW2 is not pressed during operation and SW4 (Emergency / assistance mode): When SW4 is activated, the system enters an emergency or assistance request mode. Both visual and audible alarms, including warning lights and a buzzer, are immediately triggered. At the same time, linear electric actuators (1) and (2) are abruptly stopped to ensure user safety. The system remains in the emergency state and does not return to normal operation until the emergency condition has been properly resolved. Furthermore, the upper and lower positional limits of the toilet seat base were defined using limit switches as a control mechanism. These switches were directly integrated into the electrical control circuit to interrupt or enable actuator operation when the seat base reached predefined positions. This configuration enhances positional accuracy, prevents overtravel, and reduces the risk of structural or component damage. Importantly, the limit switch mechanism was designed to operate independently of the softwave control process, without interfering with or influencing the behavior of the primary control system. This functional separation allows a clear distinction between the mechanical safety system and the motion control system, thereby improving overall system stability, safety, and engineering reliability.

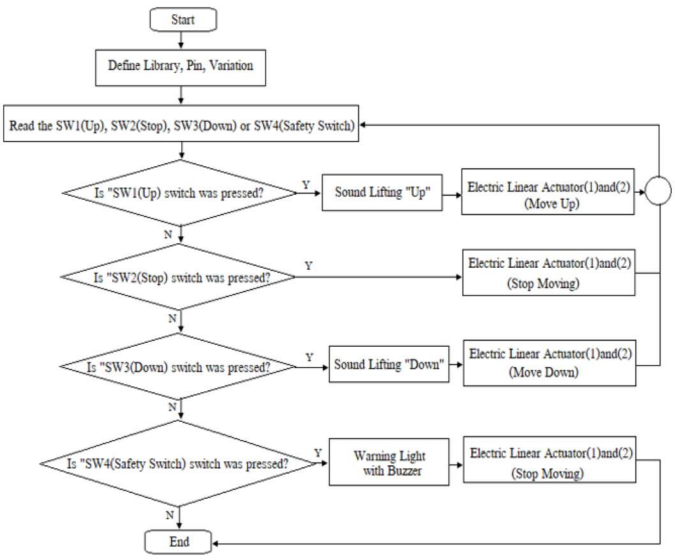


Figure 5 Flowchart illustrating the primary operating sequence of the device.

2.5 Device assembly

The assembly of the standing-assist device for use with a toilet, which can be installed on both standard and multifunctional toilets, involves the integration of the mechanical system, hardware system, and software system into a complete device, as illustrated in Figure 6. The coordinated operation of all subsystems begins when the user presses a control switch. The command signal is transmitted to the microcontroller, after which the control software processes the input and sends control signals to the hardware system to drive the actuators in the mechanical system. As a result, the seat platform moves upward or downward according to the predefined operating conditions. In addition, the system is equipped with both audible and visual alert mechanisms to enhance user safety.

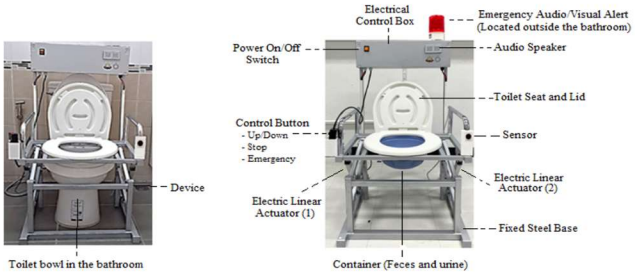


Figure 6 Shows the device is designed and built completely.

2.6 Testing Procedure

This study aimed to evaluate and verify the safety and mechanical performance of the developed low-cost sit-to-stand assistive device prior to testing with elderly individuals with lower limb weakness. The testing procedures were conducted in accordance with biomedical engineering standards and were divided into two levels, as described below.

2.6.1 Engineering Testing

The objective of the engineering testing was to confirm the safety of the device for practical use, ensuring that it does not pose any risk to test subjects. In addition, this phase aimed to evaluate the performance of the device in terms of mechanical functionality and control system operation. These tests were conducted to ensure that the device operates correctly, exhibits sufficient stability, and performs as intended according to the design specifications before proceeding to testing with human volunteers.

2.6.1.1 Functional Testing and Results

This section focused on testing the cause-and effect relationship between input signals such as commands issued via control switches or signals received from sensors and the output signals transmitted to the actuator system. The objective was to verify whether the system could correctly execute the predefined operational sequences and conditions as designed. The functional testing included evaluation of the power on–off switch operation, control switch functionality, vertical movement of the toilet seat platform, and the operation of the alert system. The results of the functional testing are presented in Table 1.

The test results presented in Table 1 indicate that both the power switch and the system control switches responded correctly and consistently to user commands. The system was able to initiate and terminate operation as specified by the user.

In addition, the voice-based audio alert system functioned in accordance with the movement status of the toilet seat platform. Specifically, clear and continuous alerts were provided during both the upward and downward movements of the seating platform, enabling users to remain aware of the operational status of the device at all times. These results demonstrate that the control system and alert system of the device operated in accordance with the predefined performance criteria.For safety-related functional testing, the device was evaluated with respect to three key safety functions: (1) a user absence detection system, in which the seating platform was automatically returned to its lowest position if no user was detected in the bathroom for more than 2 minutes after the platform had been raised and left unattended; (2) an emergency alert system; and (3) a movement limit protection system that prevented the seating platform from exceeding the predefined upper and lower boundaries during maximum elevation and minimum lowering. The results of these tests are presented in Table 2.

Table 1 Functional test results of control switches and voice alerts during seat movement.

Test No.	Power switch		Control switch			Voice announcement		Seat pad movement	
	On	Off	Up	Down	Stop	Up	Down	Up	Down
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Note: Evaluation criteria were Pass (✓) and Fail (×).

Table 2 Functional test results of the user absence detection, emergency alert, and seat position limit systems.

Test No.	Audio and visual alerts outside the bathroom		Seat position limit		User presence & auto seat return test (2 min)	
	Warning	No warning	Upper limit	Lower limit	Pass	Fail
1	✓		✓	✓	✓	
2	✓		✓	✓	✓	
3	✓		✓	✓	✓	
4	✓		✓	✓	✓	
5	✓		✓	✓	✓	
6	✓		✓	✓	✓	
7	✓		✓	✓	✓	
8	✓		✓	✓	✓	
9	✓		✓	✓	✓	
10	✓		✓	✓	✓	
11	✓		✓	✓	✓	
12	✓		✓	✓	✓	
13	✓		✓	✓	✓	
14	✓		✓	✓	✓	
15	✓		✓	✓	✓	

Note: Evaluation criteria were Pass (✓) and Fail (×).

The test results presented in Table 2 indicate that the device demonstrated an appropriate level of safety readiness. Both the alert system and the position control system operated as designed. Therefore, it can be concluded that the device was suitable for subsequent testing with human volunteers.

2.6.1.2 Mechanical Safety Testing and Results

This testing was conducted to verify that the developed intelligent sit-to-stand assistive device could safely support the body weight of volunteers without causing structural damage, system instability, or mechanical hazards to users. The testing focused on evaluating load-bearing capacity, structural strength, and operational stability based on measurable quantitative data. The test data were analyzed using statistical methods and are presented as mean ± standard deviation (Mean ± SD). The testing involved analysis of the relationship between different load levels and the time required for the seating platform to move upward to the maximum position and downward to the minimum position. Tests were performed over a weight range of 10-120 kg, (The device developed in this study is designed to support a maximum load of 100 kg; therefore, structural strength testing must be conducted under high-load conditions) with each load level repeated three times, and the results were recorded in Table 3. This testing aimed to assess the readiness and suitability of the device prior to evaluation with human volunteers.

Mean

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi \qquad (1)$$

$\bar{x}$ = mean

xi = the ith data value

n = total number of data points

Standard Deviation: SD (Sample SD)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(xi-\bar{x})^2}{n-1}} \qquad (2)$$

Figure 7 illustrates the mechanical strength and structural safety testing procedure of the device using calibrated weights ranging from 10 to 120 kg placed on the toilet seat platform to simulate the body weight of volunteers under real-use conditions. During testing, a stopwatch was used to measure the lifting time, dwell time, and lowering time of the seating platform. In addition, the overall operational condition of the device was monitored to verify normal functionality prior to evaluation with human volunteers.

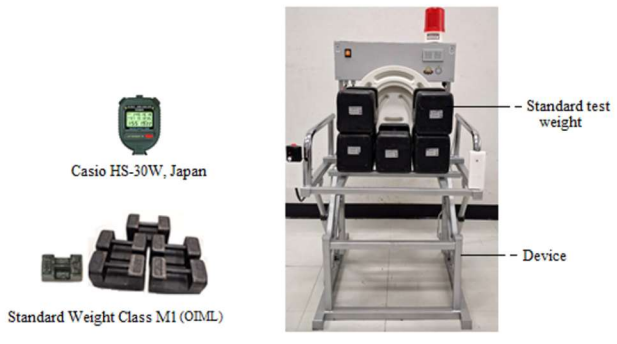


Figure 7 Structural strength testing of the device under applied loads ranging from 10 to 120 kg.

Table 3 Results of the mechanical safety testing of the device under different load levels.

Weight (kg)	Lifting time (s) Mean ± SD	Load holding time (5 min)	Lowering time (s) Mean ± SD	Device Condition
10	11.73 ± 0.03	✓	11.14 ± 0.02	✓
20	12.23 ± 0.04	✓	11.55 ± 0.02	✓
30	12.41 ± 0.03	✓	11.99 ± 0.03	✓
40	12.64 ± 0.02	✓	12.00 ± 0.06	✓
50	12.95 ± 0.08	✓	12.14 ± 0.01	✓
60	13.38 ± 0.12	✓	12.20 ± 0.02	✓
70	13.90 ± 0.12	✓	12.20 ± 0.03	✓
80	14.30 ± 0.13	✓	12.21 ± 0.02	✓
90	14.69 ± 0.04	✓	12.28 ± 0.04	✓
100	15.22 ± 0.23	✓	12.27 ± 0.03	✓
110	15.56 ± 0.11	✓	12.34 ± 0.08	✓
120	16.15 ± 0.28	✓	12.93 ± 0.23	✓

Note: Pass (✓) and Fail (×)

Based on Table 3, the results of the lifting and lowering time tests of the toilet seat base under loads ranging from 10-120 kg are presented. The results indicate that as the applied load increased, the lifting time showed a continuous upward trend, increasing from 11.73 ± 0.03 s at 10 kg to 16.15 ± 0.28 s at 120 kg**.** This demonstrates a clear relationship between the applied load and the operating time of the driving system. In contrast, the lowering time remained relatively constant across all load conditions, ranging from 11.14 ± 0.02 s to 12.93 ± 0.23 s, with low standard deviation values. This indicates good stability of the control system during the lowering phase, even under varying load levels. Furthermore, the load-holding test for a duration of 5 minutes showed that the device was able to maintain its position at all tested load levels without displacement or system malfunction. This reflects the reliability of both the mechanical structure and the control system. To further analyze the data, graphs illustrating the relationship between the applied load (kg) and the lifting and lowering times (s) were generated. The results of this analysis are presented in Figure 8**.**

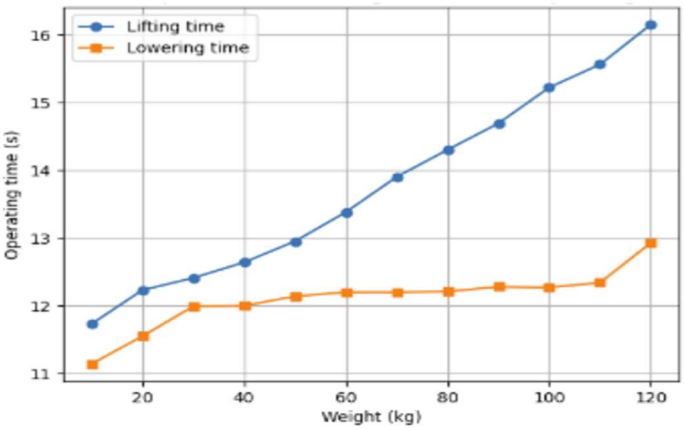


Figure 8 Graph illustrating the relationship between the applied load (kg) and the lifting–lowering time of the seat base (s).

Based on the overall results shown in Figure 8, it can be concluded that the device operates stably and is capable of supporting increased loads as designed. The increase in lifting time remains within predictable limits without any system abnormalities, while the lowering time remains consistent. These results indicate the effectiveness of the control system and confirm the suitability of the device for testing with human volunteers.

2.6.2 Human Subject Testing

The testing of the low-cost toilet-based sit-to-stand assistive device was conducted solely to evaluate the engineering performance and safety of the prototype and was not intended for medical diagnosis or treatment. Therefore, the participants were healthy individuals recruited from the general population. To ensure suitability and safety, eligible volunteers were healthy adults aged 20-60 years, of any sex, who participated voluntarily. Participants were required to be in good health and able to perform sitting and standing movements independently according to their natural movement patterns. Exclusion criteria included the presence of musculoskeletal, neurological, or cardiovascular disorders; a history of knee or hip injury or surgery within the past six months; body weight exceeding the load-bearing capacity of the device; pregnancy; or frequent episodes of dizziness or syncope. Individuals who did not meet these criteria were excluded from the study.

2.6.2.1 Sit-to-Stand Movement Evaluation and Results

This test aimed to measure the knee joint angle during the sit-to-stand movement, from the lowest to the highest position of the toilet seat base, excluding the standing-to-sitting phase. The test utilized the developed sit-to-stand assistive device, Kinovea motion analysis software, and a smartphone mounted on a fixed tripod for lateral video recording. Volunteer data 15 males and 15 females, including age, body weight, and height) were used as reference variables. During the experiment, volunteers sat in a standardized posture with consistent trunk and foot positions. The device was activated using a remote controller to initiate the standing motion, and the movement was recorded until standing was achieved. Each volunteer performed three trials. Knee joint angles were analyzed from the recorded videos, and the results were reported as mean ± standard deviation (Mean ± SD).



Figure 9 Sequence of sit-to-stand movement during testing of the assistive device

Based on Table4**,** the knee joint angle measurements of 15 male volunteers are presented. Before using the sit-to-stand assistive device, the knee joint angles ranged from 86.07 ± 0.76° to 89.93 ± 1.25°, which is consistent with a typical sitting posture. After using the assistive device, the knee joint angles decreased to a range of 60.70 ± 1.39° to 72.90 ± 0.79°, indicating greater knee extension during the movement from sitting to standing. The results show that all male volunteers exhibited a reduction in knee joint angle after using the device, demonstrating that the sit-to-stand assistive device effectively reduces knee flexion during the standing-up phase. This reduction likely decreases the muscular effort required from the lower limbs, thereby enabling volunteers to stand up more easily and with improved stability.

Table 4 Results of knee joint angle measurements before and after using the sit-to-stand assistive device (male volunteers).

Test No.	Age (years)	Weight (kg)	Height (cm)	Knee Angle Measured by Kinovea (°) (Mean ± SD)	
				before	after
1	34	57	173	87.00 ± 1.16	63.93 ± 2.07
2	25	82	174	87.73 ± 0.85	70.23 ± 1.47
3	20	80	174	87.67 ± 0.81	71.67 ± 0.76
4	20	63	172	88.07 ± 0.29	70.30 ± 1.06
5	55	61	166	86.63 ± 0.40	66.67 ± 1.92
6	21	53	176	88.37 ± 1.56	72.90 ± 0.79
7	37	60	160	86.30 ± 2.44	60.70 ± 1.39
8	28	50	170	88.27 ± 2.69	67.20 ± 0.95
9	22	60	165	86.97 ± 0.75	61.07 ± 0.80
10	43	65	172	87.37 ± 1.92	67.23 ± 1.76
11	22	80	175	87.10 ± 1.84	66.83 ± 0.46
12	57	62	173	86.07 ± 0.76	68.40 ± 1.39
13	22	89	178	86.30 ± 1.31	70.17 ± 0.25
14	20	57	170	87.63 ± 0.85	64.73 ± 2.91
15	24	60	175	89.93 ± 1.25	68.87 ± 0.67

Based on Table 5**,** the analysis of knee joint angles in 15 female volunteers shows that before using the sit-to-stand assistive device, the knee flexion angles ranged from 78.10 ± 0.46° to 88.13 ± 1.05°, which corresponds to a natural sitting posture. When using the assistive device, the knee joint angles decreased to a range of 59.10 ± 0.79° to 67.90 ± 0.87°, indicating increased knee extension during the posture transition. This trend was consistently observed in all female volunteers, demonstrating that the developed assistive device effectively supports the movement from sitting to standing by reducing knee flexion and decreasing the muscular effort required from the lower limbs. As a result, the sit-to-stand motion became smoother and more controlled.

Table 5 Knee joint angles before and after using the sit-to-stand assistive device (female volunteers)

Test No.	Age (years)	Weight (kg)	Height (cm)	Knee Angle Measured by Kinovea (°) (Mean ± SD)	
				before	after
1	21	57	160	85.50 ± 1.97	63.67 ± 0.90
2	26	71	165	86.57 ± 1.62	63.87 ± 2.44
3	41	58	158	88.13 ± 1.05	63.07 ± 1.25
4	22	51	164	87.83 ± 1.53	62.97 ± 0.84
5	38	65	160	88.10 ± 1.01	64.67 ± 1.63
6	21	85	158	86.20 ± 1.05	62.47 ± 1.89
7	41	41	159	87.17 ± 0.85	63.23 ± 2.05
8	22	74	159	87.20 ± 1.47	60.90 ± 1.57
9	47	62	167	86.60 ± 0.56	67.40 ± 0.26
10	21	55	165	87.07 ± 0.75	65.53 ± 1.04
11	52	57	163	87.00 ± 1.17	67.90 ± 0.87
12	21	58	158	87.37 ± 0.50	59.10 ± 0.79
13	22	45	154	87.83 ± 1.15	60.57 ± 1.16
14	29	58	152	78.10 ± 0.46	62.80 ± 2.29
15	22	73	167	87.27 ± 0.95	66.60 ± 1.00

2.6.2.2 Results of User Satisfaction Evaluation

User satisfaction after using the sit-to-stand assistive device was evaluated using a quantitative questionnaire based on a Likert scale. A total of 30 volunteers, including both male and female participants, were asked to rate their opinions regarding the device's performance, convenience, stability, safety, and design suitability. The satisfaction levels were defined on a five-point scale as follows: very high = 5, high = 4, moderate = 3, low = 2, and very low = 1. The evaluation results were analyzed and presented as percentages, as shown in Figure 10, to support the assessment of the effectiveness and suitability of the developed device.

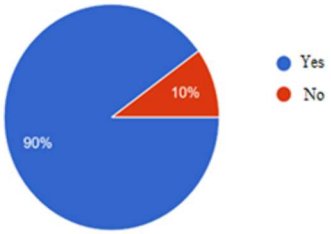


Figure 10 User satisfaction after using the device among 30 volunteers.

The analysis showed that 90% of the volunteers were satisfied with the use of the sit-to-stand assistive device, as it effectively facilitated the transition from sitting to standing and was perceived as convenient, stable, robust, and safe. However, 10% of the volunteers reported dissatisfaction, which may be attributed to individual differences in physical characteristics, such as height and body weight or a lack of familiarity with the device's operating mechanism, resulting in reduced ease of use during the standing-up process.

3. Results and discussion

This study evaluated the safety, mechanical performance, and preliminary usability of a low-cost sit-to-stand assistive device prior to testing in elderly individuals with lower limb weakness. The results from both engineering and human subject testing indicate that the device meets its design objectives and is suitable for further clinical evaluation. Engineering tests demonstrated that the control system operated reliably, with all functional components achieving a 100% pass rate. The system showed a consistent relationship between user inputs and actuator responses, while the integrated audio feedback enhanced user awareness during operation. Safety mechanisms including user absence detection, emergency alerts, and movement limit protection functioned effectively, supporting safe real-world use. Mechanical testing confirmed that the device has adequate structural strength and load-bearing capacity. Although lifting time increased with higher loads, performance remained stable and predictable, even beyond the intended maximum load. Lowering time remained relatively constant, indicating effective control during descent. The device also maintained stability under sustained loads, reflecting reliable structural and actuator performance.

4. Conclusions

This study aimed to design, develop, and evaluate a low-cost sit-to-stand assistive device for elderly individuals with lower limb weakness. The device was designed to be compatible with both standard and multipurpose toilet systems. Engineering-

based testing, conducted in accordance with biomedical engineering principles, was performed to assess mechanical safety, control system stability, and overall readiness prior to trials involving the target population. The results demonstrated that the control and safety systems operated reliably, with stable performance and consistent responsiveness to input commands. Mechanical safety testing under loads ranging from 10 to 120 kg confirmed that the device could safely support applied weights. Lifting time increased proportionally with load, while lowering time remained relatively constant, indicating effective coordination between the actuation and control systems. Testing with 30 healthy volunteers showed that the device significantly reduced knee flexion during the sit-to-stand movement in both male and female participants, contributing to a smoother and more stable transition. In terms of user perception, 90% of participants reported satisfaction with the device's performance and safety. The remaining 10% expressed dissatisfaction, likely due to differences in physical characteristics, such as height and body weight, as well as limited familiarity with the device, which may have affected ease of use. In conclusion, the developed device demonstrates strong potential in terms of safety, functionality, and user acceptance, supporting its future application in elderly individuals or those with lower limb weakness.

5. Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the College of Biomedical Engineering, Rangsit University, for providing facilities and equipment for experimentation, testing, and data collection, as well as for their continuous support throughout the research project. In addition, the authors would like to extend special thanks to the faculty members of the Faculty of Physical Therapy and Sports Medicine, Rangsit University, for their valuable academic knowledge and insightful guidance regarding muscle degeneration and weakness, as well as sit-to-stand assistive devices for older adults, and for their assistance in supervising the experimental testing involving 30 volunteers. Finally, the authors gratefully acknowledge all colleagues for their constructive suggestions and generous support, which significantly contributed to the successful completion of this study.

6. References

[1] World Health Organization (WHO). WHO global report on falls prevention in older age [Internet]. Geneva: WHO; 2007 [cited 2025 Jun 14]. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789241563536

[2] World Health Organization (WHO). Falls [Internet]. 2021 [cited 2025 Jun 14]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls

[3] Papa E, Cappozzo A. Sit-to-stand motor strategies investigated in able-bodied young and elderly subjects. Journal of Biomechanics. 2000;33(9):1113-1122. https://doi.org/10.1016/s0021-9290(00)00046-4

[4] Rao C, Liu W, Li Z, Nan X, Yin C, Yang J, et al. The comparison of different acupuncture therapies for post stroke depression: A protocol for a Bayesian network meta-analysis. Medicine. 2020;99(52):e23456. https://doi.org/10.1097/MD.0000000000023456

[5] Pighills AC, Torgerson DJ, Sheldon TA, Drummond AE, Bland JM. Environmental assessment and modification to prevent falls in older people. Journal of the American Geriatrics Society. 2011;59(1):26-33. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2010.03221.x

[6] Noroozi S, Weyand S, Smart R, Jakobi JM. Impact of seat height and grab bars on postural stability and muscle activity of older females standing from a toilet. Medicine. 2025;104(11):e41856. https://doi.org/10.1097/MD.0000000000041856

[7] Hsieh LC, Chen TH, Lai PC, Huang TM. The engineering design and prototyping of an auxiliary standing toilet chair driven by electric cylinders. Machines. 2025;13(5):402. https://doi.org/10.3390/machines13050402

[8] Li YL, Tu XK, Hu SC, Li X. A design of assistive device for toilet based on sitting-to-stand motion trajectory. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice. 2021;27(7):844-851. https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9771.2021.07.018

[9] Campos PI. Biomechanical analysis of the sit-to-stand transition [thesis]. Manchester: The University of Manchester; 2016.

[10] Janssen WGM, Bussmann HBJ, Stam HJ. Determinants of the sit-to-stand movement: A review. Physical Therapy. 2002;82(9):866-879. https://doi.org/10.1093/ptj/82.9.866

[11] Kralj A, Jaeger RJ, Munih M. Analysis of standing up and sitting down in humans: Definitions and normative data presentation. Journal of Biomechanics. 1990;23(11):1123-1138. https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90005-N

[12] Schellenberg M, Inaba K, Chen J, Bardes JM, Crow E, Lam L, et al. Falls in the bathroom: A mechanism of injury for all ages. Journal of Surgical Research. 2019;234:283-286. https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.09.044

[13] Zhou B, Xue Q, Yang S, Zhang H, Wang T. Design and control of a sit-to-stand assistive device based on analysis of kinematics and dynamics. Automatika. 2021;62(3-4):353-364. https://doi.org/10.1080/00051144.2021.1967603

[14] Li, Q, Che MR, Faiz YM. Examining emotional factors of smart toilets design for China's new elderly. International Journal of Management Thinking. 2024;2(1):52-74. https://doi.org/10.56868/ijmt.v2i1.56

[15] Moraru S-A, Moșoi AA, Kristaly DM, Moraru I, Petre VȘ, Ungureanu DE, et al. Using IoT assistive technologies for older people non-intrusive monitoring and living support in their homes. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022;19(10):5890. https://doi.org/10.3390/ijerph19105890

[16] Manríquez-Cisterna RJ, Ravankar AA, Salazar Luces JV, Hatsukari T, Hirata Y. A standing support mobility robot for enhancing independence in elderly daily living [Internet]. 2025 [cited 2025 Jun 28]. Available from: https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.19816

[17] Xu Y, Zhang B, Li Y, Guo R, Cao P, Zhu X, et al. Design and evaluation of the sit-to-stand movement assistive device for elderly. Actuators. 2024;13(3):102. https://doi.org/10.3390/act13030102

[18] Zou M, Lu R, Jiang Y, Liu P, Tian B, Liang Y, et al. Association between toileting and falls in older adults admitted to the emergency department and hospitalised: A cross-sectional study. BMJ Open. 2023;13(6):e065544. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-065544

[19] Wu X, Liu H, Liu Z, Chen M, Wan F, Fu C, et al. Robotic cane as a soft SuperLimb for elderly sit-to-stand assistance.

In: 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft); 2020 Jun 15; New Haven (CT), USA. p. 599-606. https://doi.org/10.1109/RoboSoft48309.2020.9116028

[20] Takahashi Y, Nagasawa T, Nakayama H, Hanzawa T, Arai Y, Nagashima T, et al. Robotic assistance for aged people. *In*: Proceedings of the 37th SICE Annual Conference; 1998 Jul 29-31; Chiba, Japan. p. 869-874. https://doi.org/10.1109/SICE.1998.742928

[21] Ng BP, Lu J, Tiu GF, Thiamwong L, Zhong Y. Bathroom modifications among community-dwelling older adults who experience falls in the United States: A cross-sectional study. Health & Social Care in the Community. 2022;30(1):253-263. https://doi.org/10.1111/hsc.13398

[22] Esmaeilzadeh P. Older adults' perceptions about using intelligent toilet seats beyond traditional care: Web-based interview survey. JMIR mHealth uHealth. 2023;11:e46430. https://doi.org/10.2196/46430

[23] Sadeh S, Gobert D, Shena K-H, Foroughi F, Hsiao H-Y. Biomechanical and neuromuscular control characteristics of sit-to-stand transfer in young and older adults: A systematic review with implications for balance regulation mechanisms. Clinical Biomechanics. 2023;109:106068. https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2023.106068

[24] Susilo TE, Putri LD, Syafira K, Rahayu UB, Pristianto A, Irawan DS, et al. Biomechanical analysis of sit-to-stand transitions: Identifying movement strategies in aging populations. Physiotherapy Health Science. 2025;8(1):8-13. https://doi.org/10.22219/physiohs.v8i1.40501

[25] Fu W, Liu Y, Hu W. Characterizing sit-to-stand transition of the elderly considering the effects of seat height and inclination. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2025;1-14. https://doi.org/10.1080/10255842.2025.2574541

Bulletin of Applied Sciences

Volume 15 Issue 1 January - June 2026
https://doi.org/10.60136/bas.v15.2026.3714

Research Article

An innovative of the portable electric tjanting pen

Apaporn Sinthusarn[1*], Somphon Sincharoenpokai[1], Kartoon Pengprom[1]

[1]*Institute of Community Science Technology, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand*
*Corresponding author's e-mail: apaporn@dss.go.th

Received: 23 February 2025, Revised: 25 March 2026, Accepted: 29 April 2026

Abstract

This research aimed to develop a portable electric tjanting pen to replace the traditional tjanting pen, which requires lengthy preparation of melted wax and poses health risks to batik artisans. The study began with a problem analysis, followed by the design of the external structure and internal system, as well as an investigation into alternative materials for batik wax. The process included the construction and development of the portable electric tjanting pen and palm wax sticks, preliminary usability testing, and refinement of the device based on expert recommendations. Additionally, the study assessed the satisfaction of batik artisans using the portable electric tjanting pen. The research results demonstrated that the portable electric tjanting pen could effectively be used to apply wax on batik fabric. When operated at a current of 15 volts in combination with palm wax sticks, the device achieved a maximum continuous writing time of 6 minutes and a maximum writing distance of 1,662 centimeters at a speed of 277 centimeters per minute. The portable electric tjanting pen and palm wax sticks were found to be user-friendly, time-saving by eliminating the need to boil wax, cost-effective in terms of production, and posed no long-term health risks. Moreover, the device is convenient to carry, making it suitable for use by children, youth, and the elderly. The batik artisans who tested the device reported a very high level of satisfaction ($\bar{X}$ = 4.44, S.D. = 0.69), equivalent to 88.8%.

Keywords: Innovation, Portable electric tjanting pen, Palm wax sticks

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาทดแทนปากกาจันติ้งแบบเดิมที่ต้องใช้เวลานานในการเตรียมน้ำเทียนและมีผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ประกอบการบาติก โดยเริ่มจากขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา การออกแบบโครงสร้างภายนอก ระบบภายใน และการศึกษาวัสดุทดแทนเทียนบาติก การสร้างและพัฒนานวัตกรรมปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาและแท่งเทียนจากไขปาล์ม การทดสอบการใช้งานเบื้องต้น และการปรับปรุงคุณภาพปากกาจันจิ้งไฟฟ้าแบบพกพาตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ รวมทั้งการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ประกอบการบาติกต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา ผลจากการวิจัยสรุปได้ว่า ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาสามารถนำไปใช้เขียนเทียนบนผืนผ้าบาติกได้จริง โดยการใช้งานที่กระแสไฟ 15 โวลต์ ร่วมกับแท่งเทียนจากไขปาล์ม สามารถเขียนเทียนได้เวลานานที่สุดเท่ากับ 6 นาที และระยะทางมากที่สุดเท่ากับ 1,662 เซนติเมตร ที่ความเร็วเท่ากับ 277 เซนติเมตรต่อนาที ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาและแท่งเทียนจากไขปาล์มใช้งานง่าย ช่วยประหยัดเวลาต้มเทียน ลดค่าใช้จ่ายการผลิต ไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพในระยะยาว อีกทั้งสะดวกต่อการพกพา เหมาะสำหรับการใช้งานสำหรับเด็ก เยาวชนและผู้สูงวัย ผู้ประกอบการที่ได้ทดลองใช้งาน มีความพึงพอใจระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.44, S.D. = 0.69) หรือคิดเป็นร้อยละ 88.8

คำสำคัญ: นวัตกรรม, ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา, แท่งเทียนไขปาล์ม

1. บทนำ (Introduction)

ผ้าบาติกเป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่สืบทอดมาหลายชั่วอายุคนในประเทศอินโดนีเซีย ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 มีการนำผ้าบาติกมาใช้สวมใส่ในชีวิตประจำวัน แบบลวดลายพิเศษใช้สำหรับชุดแต่งงาน สตรีมีครรภ์ เด็กแรกเกิด และผู้ล่วงลับ นอกจากนี้ยังมีการใช้ในงานแสดงออกทางศิลปวัฒนธรรม เช่น ละครหุ่นกระบอก และพิธีกรรมบางอย่าง เช่น การถวายเครื่องบูชาโดยโยนผ้าบาติกลงในปล่องภูเขาไฟ ชุดผ้าบาติกมีลวดลายที่ออกแบบหลากหลายสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลทางวัฒนธรรม ของชาวอินโดนีเซีย ตั้งแต่ตัวอักษรอาหรับไปจนถึงองค์ประกอบดอกไมของยุโรปผ่านลายฟีนิกซ์ของจีน ดอกซากุระของญี่ปุ่น และนกยูงอินเดียหรือเปอร์เซีย ผ้าบาติกจึงมิใช่เพียงผลิตภัณฑ์สิ่งทอธรรมดา แต่ยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความงดงามด้วยลวดลายและสีสันที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของพื้นที่ แสดงออกถึงความคิดสร้างสรรค์และจิตวิญญาณผ่านความหมายเชิงสัญลักษณ์ของสีและการออกแบบ กลายเป็นตัวแทนของมรดกทางวัฒนธรรมในแต่ละพื้นที่ที่สะท้อนวิถีชีวิต ความเชื่อ และภูมิปัญญาท้องถิ่นที่สืบทอดต่อกันมาอย่างยาวนาน [1-3]

ภาคใต้ของไทยได้รับอิทธิพลทางวัฒนธรรมจากอินโดนีเซียในการผลิตผ้าบาติก โดยมีการปรับเปลี่ยนลวดลายตามความคิดสร้างสรรค์ ตลอดจนความรู้สึกนึกคิดของคนในพื้นที่ เกิดเป็นกระบวนการรังสรรค์ลวดลายที่บอกเล่าเรื่องราวอันเป็นเอกลักษณ์ สะท้อนวัฒนธรรมความเป็นอยู่ตัวตนของชาวภาคใต้ สะท้อนถึงการผสมผสานอย่างกลมกลืนระหว่างศิลปวัฒนธรรมและธรรมชาติในท้องถิ่น แหล่งผลิตผ้าบาติกที่มีชื่อเสียงของไทยนั้น กระจายอยู่ในหลายจังหวัดทางภาคใต้ เช่น ปัตตานี นราธิวาส ยะลา สงขลา พังงา สตูล กระบี่ และภูเก็ต ซึ่งมีผู้ประกอบการประมาณ 200 ราย ที่ผลิตและจำหน่ายผ้าบาติกให้แก่นักท่องเที่ยว รวมถึงส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศ ผ้าบาติกจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เลขที่ 51/2557 รองรับโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ได้ให้ความหมายผ้าบาติก คือ ผ้าที่ใช้เทคนิค การทำลวดลายโดยวิธีเขียนหรือพิมพ์เส้นเทียนด้วยเทียนหรือวัสดุอื่นลงบนผืนผ้าที่ไม่ต้องการให้ติดสีและระบายสีหรือย้อมสีในส่วนที่ต้องการ ให้ติดสี โดยเอกลักษณ์ของผ้าบาติกคือสามารถมองเห็นลวดลายทั้งสองด้าน ของผืนผ้า ยกเว้นผ้าที่ผิวสัมผัสไม่เรียบ เช่น ผ้าฝ้ายปั่นมือ ผ้าใยกัญชง ซึ่งลวดลายการเขียนเทียนบนผืนผ้าอาจไม่ชัดเจนเท่ากันทั้งสองด้าน [4] ดังนั้นความโดดเด่นและคุณค่าของผ้าบาติกจึงอยู่ที่ลวดลายและสีสันอันเกิดจาก การเขียนเทียนและลงสีบนผืนผ้า ซึ่งสะท้อนถึงวิถีชีวิตและวัฒนธรรมในแต่ละพื้นที่ได้อย่างชัดเจน

แม้ผ้าบาติกจะเป็นผลิตภัณฑ์อัตลักษณ์ในพื้นที่ที่สามารถสร้างรายได้มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตของคนในชุมชน แต่ผู้ประกอบการผ้าบาติกยังคงประสบปัญหาและข้อจำกัดในกระบวนการผลิต เนื่องจากขั้นตอนการเขียนเทียนจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีทักษะความชำนาญในการใช้จันติ้ง (Canting หรือ Tjanting) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นอุปกรณ์คล้ายปากกามีกระเปาะขนาดเล็ก ที่ปลายปากกาสำหรับเก็บน้ำเทียน ใช้ตักน้ำเทียนในขณะร้อนและนำมาเขียนวาดลวดลายลงบนพื้นผ้า ซึ่งระหว่างเขียนเทียนจึงมักเกิดการแข็งตัวของน้ำเทียน ส่งผลให้เกิดการอุดตันและต้องเติมน้ำเทียนที่ร้อนบ่อยครั้ง ทำให้การทำงานไม่ต่อเนื่อง ใช้เวลานาน ผู้เขียนเทียนจึงต้องมีความอุตสาหะในการทำงาน เพื่อให้ได้ผ้าบาติกที่มีลวดลายสวยงามและคุณภาพสูง [5] ดังแสดงในรูปที่ 2

นอกจากนี้ผู้ประกอบการผ้าบาติกส่วนใหญ่จะดำเนินการผลิตภายในบริเวณที่พักอาศัยและไม่มีระบบการจัดการด้านความปลอดภัยและด้านสุขภาพที่เหมาะสม วัสดุหลักที่ใช้สำหรับการเขียนผ้าบาติก คือ เทียนบาติก (Batik wax) ซึ่งทำมาจากพาราฟิน (Paraffin) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว (n-Alkanes) และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เช่น Alkenes, Alkylbenzenes, Alkyltoluenes เป็นต้น ในกระบวนการผลิตเทียนบาติกจะถูกให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดควันของเทียนบาติกกระจายไปทั่วพื้นที่ทำงาน และในขั้นตอนอื่น ๆ ของกระบวนการผลิตก็ต้องใช้การให้ความร้อน เพื่อกำจัดเทียนบาติกออกจากผ้า ผู้ประกอบการผ้าบาติกจึงต้องสัมผัสหรือสูดดมควันเข้าไป ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพในระยะยาว โดยเฉพาะระบบทางเดินหายใจและการเต้นของหัวใจที่ผิดปกติ อีกทั้งการทำงานที่ต้องมีหม้อต้มเทียนบาติกอยู่ใกล้ในบริเวณเดียวกันอาจเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ประกอบการผ้าบาติกได้ [6]

ด้วยการตระหนักถึงปัญหากระบวนการผลิตผ้าบาติกที่มีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดประดิษฐ์อุปกรณ์และวัสดุแท่งเทียนจากธรรมชาติที่สามารถแก้ไขปัญหาและข้อจำกัดในการเขียนเทียน โดยการนำองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีผสมผสานกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสม สร้างเป็นนวัตกรรมปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาสำหรับงานเขียนผ้าบาติกและแท่งเทียนไขจากปาล์ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน ต้นทุนต่ำ มีความสะดวก และปลอดภัย เพิ่มโอกาสและทางเลือกใหม่สำหรับผู้ประกอบการผ้าบาติกของประเทศ ซึ่งเป็นการพัฒนาศักยภาพการผลิตของผู้ประกอบการบาติก รองรับความเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและการปรับตัวสู่สังคมยุคใหม่ ตามแนวทางการพัฒนา เศรษฐกิจสีเขียว BCG และส่งเสริมให้ผ้าบาติกเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนที่มีมูลค่าในเชิงเศรษฐกิจฐานรากช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้ผลิตได้อย่างยั่งยืน อีกทั้งยังสร้างชื่อเสียงและสร้างรายได้ให้กับประเทศไทย พร้อมก้าวสู่การเป็นซอฟต์พาวเวอร์ที่โดดเด่นของไทยต่อไป



รูปที่ 1 จันติ้งแบบเดิม



รูปที่ 2 ผ้าบาติก

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง

2.1.1 ประชากร ได้แก่ ผู้ประกอบการบาติกในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยที่มีประสบการณ์การเขียนเทียนด้วยจันติ้งแบบดั้งเดิม

2.1.2 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่

2.1.2.1 กลุ่มตัวอย่างที่ 1 ได้แก่ อาสาสมัคร จำนวน 6 คน ประกอบด้วย บุคคลทั่วไปที่มีประสบการณ์ในการเขียนเทียนบาติก จำนวน 3 คน และไม่มีประสบการณ์ในการเขียนเทียนบาติก จำนวน 3 คน ดำเนินการในขั้นตอนการทดสอบการใช้งานเบื้องต้นของปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนจากไขปาล์ม โดยการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา

จำนวน 1 ชุด และแท่งเทียนไขจากปาล์ม จำนวน 1 แท่ง ซึ่งมีขนาดแท่งเทียนความกว้างเท่ากับ 0.6 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 14.7 เซนติเมตร น้ำหนักเท่ากับ 3.28 กรัม มีการควบคุมอุณหภูมิของการหลอมแท่งเทียนที่ระดับไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลต์ และทดสอบการเขียนเทียนตามลายเส้นตรงลงบนผืนผ้าที่วาดลายเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 1 บันทึกผลของระยะทางและเวลาที่ใช้ในการทดสอบการใช้งาน

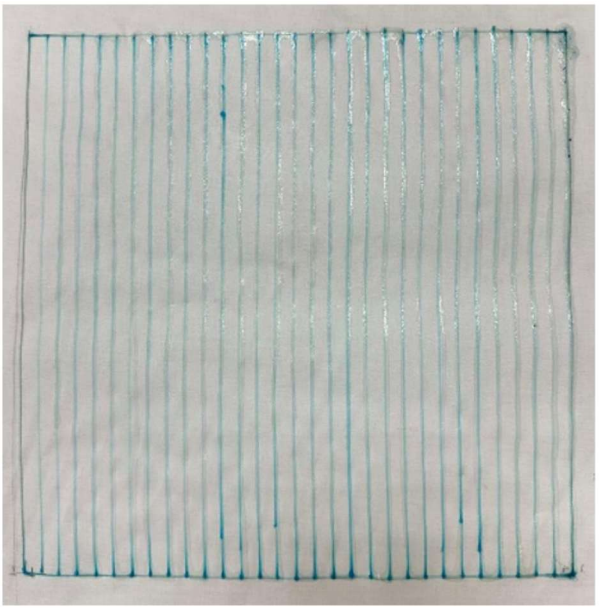
2.1.2.2 กลุ่มตัวอย่างที่ 2 ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านการเขียนเทียนในกระบวนการผลิตผ้าบาติก จำนวน 3 คน ประกอบด้วย ผู้ประกอบการผ้าบาติกในพื้นที่จังหวัดระนอง จำนวน 1 คน จังหวัดนนทบุรี จำนวน 1 คน และนักวิชาการ/ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการผลิตผ้าบาติก จำนวน 1 คน ดำเนินการในขั้นตอนการปรับปรุงปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ โดยการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา จำนวน 1 ชุด และแท่งเทียนไขจากปาล์ม จำนวน 3 แท่ง มีการควบคุมอุณหภูมิของการหลอมแท่งเทียนที่ระดับไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลต์ และทดสอบการเขียนเทียนโดยการวาดลวดลายอิสระลงบนผืนผ้าที่ไม่กำหนดลวดลายไว้บันทึกผลจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญภายหลังจากการทดสอบใช้งาน

2.1.2.3 กลุ่มตัวอย่างที่ 3 ได้แก่ ผู้ประกอบการผ้าบาติก จำนวน 67 คน ประกอบด้วย ผู้ประกอบการผ้าบาติกในพื้นที่จังหวัดปัตตานี จำนวน 47 คน และจังหวัดยะลา จำนวน 20 คน ดำเนินการในขั้นตอนการสำรวจความพึงพอใจต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา โดยการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา จำนวน 1 ชุด และแท่งเทียนไขจากปาล์ม มีการควบคุมอุณหภูมิของการหลอมแท่งเทียนที่ระดับไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 20 โวลต์ และทดสอบการเขียนเทียนตามลวดลายมาตรฐานบนผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2 และให้ผู้ประกอบการบาติกทำแบบสอบถามความพึงพอใจต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.2.1 แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ประกอบการบาติกต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา

2.2.2 ผืนผ้าที่วาดลายเส้นตรง สำหรับใช้ในการทดสอบการใช้งานเบื้องต้นของอาสาสมัคร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผืนผ้าที่วาดลายเส้นตรง

2.2.3 ผืนผ้าที่วาดลวดลายมาตรฐาน สำหรับใช้ในการทดสอบความพึงพอใจของผู้ประกอบการบาติก ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผืนผ้าที่วาดลวดลายมาตรฐาน

2.3 การดำเนินงานวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

2.3.1 วิเคราะห์ปัญหา (Analysis) โดยการศึกษาการใช้งานและสภาพแวดล้อมในการทำงานเดิม เพื่อวิเคราะห์ปัญหาและนำไปสู่การออกแบบพัฒนานวัตกรรม

2.3.2 ออกแบบ (Design) โดยการศึกษาข้อมูล แนวคิดทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และร่างแบบของนวัตกรรม

2.3.3 สร้างและพัฒนานวัตกรรม (Development) โดยการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ ออกแบบและสร้างนวัตกรรม รวมถึงปรับปรุงนวัตกรรมตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

2.3.4 สำรวจความพึงพอใจ (Satisfaction) โดยการออกแบบสอบถามสำรวจความพึงพอใจของผู้ประกอบการบาติกต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ข้อมูลผลการวิจัย

2.5 สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการวิเคราะห์ปัญหา

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษา เก็บข้อมูล สังเกต สำรวจปัญหาและความต้องการของผู้ประกอบการผ้าบาติกในพื้นที่ภาคใต้ของไทย ได้แก่ จังหวัดระนอง สตูล ภูเก็ต พังงา และนครศรีธรรมราช ระหว่างปี พ.ศ. 2565-2566 พบว่า กระบวนการผลิตผ้าบาติกในขั้นตอนการเขียนเทียนวาดลวดลายบนผืนผ้า เพื่อเป็นแนวกั้นไม่ให้เกิดการซึมผ่านของสีต่าง ๆ ปะปนกันในระหว่างการลงสีหรือระบายสีนั้น เป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยาก ต้องอาศัยผู้ที่มีทักษะความชำนาญในการเขียนเทียนด้วยปากกาจันติ้งแบบเดิม ใช้ระยะเวลานานในการต้มเทียนบาติกเพื่อให้ได้น้ำเทียนร้อนที่มีอุณหภูมิเหมาะสม โดยต้องอุ่นให้ความร้อนตลอดระยะเวลาการเขียนเทียน ทำให้ผู้เขียนเทียนและผู้ปฏิบัติงานในขั้นตอนต่าง ๆ ต้องสูดดมควันและกลิ่นของเทียน ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ

ในระยะยาว นอกจากนั้นการต้มเทียนบาติกในบริเวณที่ทำการผลิตยังส่งผลต่อสุขภาวะและอาชีวอนามัย รวมถึงอาจเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ผลิตผ้าบาติกได้

3.2 ผลการออกแบบ

ดำเนินการออกแบบนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาสำหรับเขียนเทียนบาติก ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการหลอมเทียน เพื่อแก้ปัญหาการผลิตผ้าบาติกในขั้นตอนการเขียนเทียนโดยใช้ปากกาจันติ้งแบบเดิม ดังนี้

3.2.1 โครงสร้างภายนอก ออกแบบโดยใช้แนวคิดร่วมสมัยของปากกาจันติ้งแบบเดิม ผสมผสานกับรูปแบบของปากกาขนนกโบราณและปีกของพญาครุฑ ซึ่งเป็นเครื่องหมายของหน่วยงานกรมวิทยาศาสตร์บริการ ได้เป็นรูปแบบโครงสร้างภายนอกของปากกาจันติ้งไฟฟ้าที่มีขนาดโดยรวม 2x15 เซนติเมตร มีลักษณะสวยงาม ทันสมัย และสื่อถึงความมีอิสระทางความคิด จินตนาการเชิงสร้างสรรค์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การออกแบบโครงสร้างภายนอก

3.2.2 พัฒนาระบบภายใน ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ให้ความร้อนโดยใช้แผ่นนำความร้อนขนาด 20 ถึง 60 วัตต์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต่อด้วยสายไฟฟ้าเข้าที่ตัวปากกาจันติ้ง มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้ (1) ปากของปากกาจันตั้งไฟฟ้าทำด้วยทองเหลือง (2) ท่อทองแดงเป็นบอดี้ภายในยึดกับตัวส่วนปากของปากกาจันติ้ง (3) แผ่นนำความร้อนที่หุ้มล้อมรอบท่อทองแดง (4) เทปทนความร้อนพันรอบแผ่นทำความร้อน (5) ผ้าพันท่อฉนวนกันความร้อน (6) บอดี้พลาสติกวัสดุทนความร้อน 120 องศาเซลเซียส (7) ท่อหรือช่องสำหรับบรรจุแท่งเทียน (8) วงจรปรับระดับศักย์ไฟฟ้า สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ 5 ระดับ ประกอบด้วย 5, 9, 12, 15, และ 20 โวลต์ (9) พอร์ตเชื่อมต่อ USB Type-C สำหรับต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มีลักษณะการทำงานคล้ายกับปืนกาว ดังแสดงในรูปที่ 6

การทำงานเริ่มจากนำแท่งเทียนใส่ลงบริเวณท่อหรือช่องว่างสำหรับบรรจุเข้าไปยังตัวปากกา ตัวปากกาจะให้ความร้อนหลอมแท่งเทียน โดยใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 24 โวลต์ ผ่านพอร์ตเชื่อมต่อ USB Type-C เข้ากับวงจรปรับระดับศักย์ไฟฟ้า ที่ควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าได้ 5 ระดับ ประกอบด้วย 5, 9, 12, 15 และ 20 โวลต์ การควบคุมดังกล่าวนี้จะเป็นการกำหนดระดับความร้อนของแผ่นทำความร้อนไฟฟ้าที่ห่อหุ้มล้อมรอบท่อทองแดงซึ่งเป็นบอดี้ภายในของปากกาจันติ้งที่ถูกหุ้มกันความร้อนด้วยเทปทนความร้อนและผ้าพันท่อฉนวนกันความร้อน ทำให้แท่งวัสดุกั้นสีสำหรับเขียนผ้าบาติกหลอมละลายและไหลออกไปยังปากของปากกาจันติ้ง สามารถนำไปเขียนลวดลายบนผ้าบาติกต่อได้

3.2.3 การศึกษาวัสดุทดแทนเทียนบาติก

ผลการศึกษาวัสดุทดแทนเทียนบาติก ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและมีการใช้งานในปัจจุบัน โดยนำวัสดุประเภทไขหรือแว็กซ์ (Wax) จากธรรมชาติ ได้แก่ ไขถั่วเหลือง (Soy wax) ขี้ผึ้ง (Bee wax) ไขมะพร้าว (Coconut wax) ไขข้าว (Rice wax) และไขปาล์ม (Palm wax) มาทดสอบคุณสมบัติและการใช้งานเขียนเทียนลงบนผ้าบาติก ประกอบด้วย จุดหลอมเหลว กลิ่น ควัน ราคา ประสิทธิภาพการกั้นสี และการล้างเทียน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 พบว่า ไขปาล์มเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้ทดแทนเทียนบาติก โดยสามารถใช้กั้นสีบนผ้าบาติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือควันขณะให้ความร้อน สามารถล้างออกได้ง่าย และราคาถูกกว่าเทียนบาติก



รูปที่ 6 การออกแบบพัฒนาระบบภายใน



รูปที่ 7 การศึกษาวัสดุทดแทนเทียนบาติก

3.3 ผลการสร้างและพัฒนานวัตกรรม

3.3.1 ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา

การเขียนเทียนด้วยจันติ้งแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพต้นทุนแรงงาน และความปลอดภัย เนื่องจากปัญหาการอุดตัน การไหลของน้ำเทียนไม่สม่ำเสมอ และการใช้เทียนบาติกที่มีส่วนผสมของพาราฟินซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดควันที่สารพิษ เช่น โทลูอีนและฟอร์มาลดีไฮด์ส่งผลต่อสุขภาพของผู้ประกอบการในระยะยาว คณะผู้วิจัยได้พัฒนาต้นแบบระบบการทำงานปากกาจันติ้งไฟฟ้าที่สะดวกต่อการพกพา มีลักษณะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากึ่งอัตโนมัติที่อาศัยพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อนส่งไปยังท่อทองแดงในการหลอมละลายไขปาล์มที่ใช้เขียนลวดลายบนผืนผ้า โดยการเชื่อมสาย USB Type-C เข้ากับอุปกรณ์ชาร์จไฟฟ้าและที่ผลิตภัณฑ์ปากกา สามารถปรับระดับความร้อนด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่แผงวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ตามความเหมาะสมของการใช้งาน พกพาได้ง่ายและสามารถใส่แท่งเทียนเพิ่มเติมได้ เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการเขียนเทียน เพื่อแก้ปัญหาและลดข้อจำกัดในการเขียนเทียนโดยใช้ปากกาจันติ้งแบบเดิม ทำให้การเขียนลวดลายบนผืนผ้ามีความต่อเนื่องและมีคุณภาพ สะดวกต่อการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 8

3.3.2 แท่งเทียนจากไขปาล์มแท่งเทียนที่พัฒนาจากไขปาล์ม (Palm wax) วัสดุธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly natural wax) สามารถกั้นสีบนวัสดุประเภทผ้าได้ดีเทียบเท่าเทียนบาติก จึงเพิ่มความปลอดภัยต่อการใช้งาน เนื่องจากการเผาไหม้ที่สะอาดทำให้ควันและน้ำตาเทียนน้อย ไม่มีกลิ่นระเหยของสารพิษ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา



รูปที่ 9 แท่งเทียนจากไขปาล์ม

3.3.3 ทดสอบการใช้งานเบื้องต้นของปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนจากไขปาล์ม

จากตารางที่ 1 พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ 1 ทุกคนสามารถใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนจากไขปาล์ม เพื่อเขียนเทียนตามลายเส้นตรงบนผืนผ้าที่กำหนดไว้ (รูปที่ 1) ได้เป็นอย่างดี ผลการเขียนเทียน 1 แท่ง ใช้ระยะเวลาเฉลี่ยเท่ากับ 5.13 นาที ได้ระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 890.2 เซนติเมตร และมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 173.42 เซนติเมตรต่อนาที โดยคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ได้ค่ามากในทุกรายการ โดยพบว่ากลุ่มตัวอย่างที่ 1 ที่มีประสบการณ์จะสามารถเขียนเทียนได้ระยะทางที่มากกว่า ทั้งนี้ผลการทดสอบในภาพรวมแสดงให้เห็นว่าปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาสามารถใช้งานร่วมกับแท่งเทียนจากไขปาล์มได้ จึงดำเนินการทดสอบการใช้งานกับผู้เชี่ยวชาญเป็นขั้นตอนต่อไป

3.3.4 การปรับปรุงปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

จากการปรับปรุงปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ 2 มีความชื่นชอบปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาและแท่งเทียนไขจากปาล์ม โดยให้ความเห็นว่าสามารถใช้งานได้ดี ขณะใช้งานไม่มีควันและกลิ่นของเทียน ไม่ต้องใช้เวลานานในการหลอมเทียน มีความสะดวกต่อการพกพา ใช้งานง่ายเหมาะสำหรับผู้สูงอายุและเด็ก และมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่า ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาควรมีฝาปิดตรงช่องใส่แท่งเทียนเพื่อป้องกันน้ำเทียนหก รวมถึงน้ำเทียนควรมีการไหลตัวที่เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การทดลองใช้ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาของผู้เชี่ยวชาญ

คณะผู้วิจัยจึงนำข้อเสนอแนะของกลุ่มตัวอย่างที่ 2 มาปรับปรุงระบบการทำงานของปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพามีการพัฒนาให้สามารถปรับระดับความร้อนโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่แผงวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ได้ศึกษาและปรับปรุงระบบทำความร้อนให้เหมาะสมต่อการหลอมละลายเทียน เพื่อให้สามารถควบคุมการไหลของน้ำเทียนได้ต่อเนื่องและมีความเสถียรมากขึ้น รวมถึงออกแบบฝาปิดท่อน้ำเทียนเพื่อเพิ่มความปลอดภัยขณะใช้งานมากขึ้นด้วย จึงดำเนินการทดสอบการใช้งานกับผู้เชี่ยวชาญผู้ประกอบการบาติกเป็นขั้นตอนต่อไป

3.4 ผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้ประกอบการบาติกต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา

จากตารางที่ 2 พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ 3 มีความพึงพอใจต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาในภาพรวม พบว่า มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$= 4.44, S.D. = 0.69) หรือคิดเป็นร้อยละ 88.8 โดยความพึงพอใจมากที่สุดในเรื่องลดมลภาวะทางอากาศ ความปลอดภัยต่อสุขภาพ และภาพรวมของการทดลองใช้นวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์เพื่อพัฒนายกระดับกระบวนการผลิตตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการใช้งานเบื้องต้นของปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนจากไขปาล์ม

กลุ่มตัวอย่างที่ 1	ประสบการณ์ในการเขียนเทียนบาติก	ความกว้าง (cm)	ความยาว (cm)	น้ำหนัก (g)	เวลาที่ใช้ในการเขียนเทียน 1 แท่ง (min)	ระยะทางการเขียนเทียน 1 แท่ง (cm)	ความเร็วในการเขียนเทียน (cm/min)
1	มี	0.670	14.711	3.28	4.8	984.2	205.04
2	มี	0.650	14.681	3.08	8	814	101.75
3	มี	0.681	14.707	3.40	6	1,662	277.00
4	ไม่มี	0.647	14.635	3.50	6	681	113.50
5	ไม่มี	0.657	14.699	3.29	3	671	223.67
6	ไม่มี	0.649	14.714	3.41	3	529	176.33
ค่าเฉลี่ย		0.659	14.691	3.33	5.13	890.2	173.42
S.D.		0.01	0.03	0.15	1.95	408.07	67.01

ตารางที่ 2 ความพึงพอใจของผู้ประกอบการบาติกต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา

หัวข้อการวิเคราะห์	ความพึงพอใจ		
	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	การแปลผล
1. รูปแบบของผลิตภัณฑ์ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา	4.40	0.85	มากที่สุด
2. การใช้งานของผลิตภัณฑ์ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพา (ใช้ง่าย สะดวก)	4.30	0.69	มากที่สุด
3. การใช้งานอย่างต่อเนื่องเพื่อการผลิตเชิงสร้างสรรค์	4.43	0.74	มากที่สุด
4. การใช้งานของแท่งเทียน	4.31	0.72	มากที่สุด
5. การผลิตแท่งเทียน	4.24	0.75	มากที่สุด
6. ความปลอดภัยในการใช้งาน	4.34	0.76	มากที่สุด
7. ความปลอดภัยต่อสุขภาพ	4.66	0.47	มากที่สุด
8. ลดมลภาวะทางอากาศ	4.72	0.45	มากที่สุด
9. ใช้งานได้กับผู้สนใจที่ยังไม่มีประสบการณ์เขียนเทียนแบบเดิมเพื่อการสืบสาน และต่อยอดเชิงวัฒนธรรม	4.43	0.65	มากที่สุด
10. ภาพรวมของการทดลองใช้นวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์เพื่อพัฒนายกระดับกระบวนการผลิต	4.57	0.52	มากที่สุด
รวม	**4.44**	**0.69**	**มากที่สุด**

4. สรุป (Conclusions)

ปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาที่ได้ประดิษฐ์จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เขียนเทียนบนผืนผ้าบาติกได้จริง โดยการใช้งานที่กระแสไฟ 15 โวลต์ ร่วมกับแท่งเทียนที่ทำจากวัสดุไขปาล์ม ขนาด 0.6x14.7 เซนติเมตร น้ำหนัก 3.3 กรัม สามารถเขียนเทียนได้เวลานานที่สุดเท่ากับ 6 นาที และระยะทางมากที่สุดเท่ากับ 1,662 เซนติเมตร ที่ความเร็วเท่ากับ 277 เซนติเมตรต่อนาที นวัตกรรมปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาจึงเป็นอุปกรณ์กึ่งอัตโนมัติที่ใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อหลอมเทียนจากไขปาล์มได้อย่างต่อเนื่อง สามารถแก้ปัญหาให้กับผู้ประกอบการบาติกในเรื่องการประหยัดเวลาต้มเทียน ลดค่าใช้จ่ายการผลิต ไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพในระยะยาวจากกลิ่นและควันของเทียนบาติก อีกทั้งมีความสะดวกต่อการพกพา เหมาะสำหรับการใช้งานสำหรับเด็ก เยาวชนและผู้สูงวัย โดยมีผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจต่อการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.44, S.D. = 0.69) หรือคิดเป็นร้อยละ 88.8 และอยู่ในระดับมากที่สุดในทุกข้อของการวิเคราะห์ความพึงพอใจ

ทั้งนี้ในการดำเนินงานวิจัยขั้นต่อไปจำเป็นต้องมีการศึกษาประสิทธิภาพและต้นทุนของการใช้งานปากกาจันติ้งไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์มในกระบวนการผลิตผ้าบาติก รวมทั้งการเปรียบเทียบการใช้งานกับจันติ้งแบบเดิม เพื่อประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการใช้งานสำหรับภาพรวมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้นิพนธ์บทความวิจัยขอขอบคุณบุคลากรสถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความร่วมมือสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] UNESCO. Indonesian batik: UNESCO intangible cultural heritage [Internet]. 2009 [cited 2025 Jan 31]. Available from: https://ich.unesco.org

[2] UNESCO. Indonesian batik: Representative list of the intangible cultural heritage of humanity [Internet]. 2009 [cited 2025 Jan 31]. Available from: https://ich.unesco.org/en/RL/indonesian-batik-00170

[3] UNESCO. Education and training in Indonesian batik intangible cultural heritage for students, in collaboration with the Batik Museum in Pekalongan [Internet]. 2009 [cited 2025 Jan 31]. Available from: https://ich.unesco.org/es/BSP

[4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผ้าบาติก. (มผช. 51/2557). กรุงเทพฯ: สมอ.; 2557.

[5] วินัย อุดมทรัพย์. การทำผ้าบาติก. วารสารวิชาการสถาปัตยกรรมและศิลปกรรม สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547;4(1):45-54.

[6] Kienhuis PGM, Fitz N, Tolosa I, Peschier L. Paraffin wax spill identification by GC-FID and GC-MS. Oil Spill Environmental Forensics Case Studies. 2018:157-186. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804434-6.00008-2

Bulletin of Applied Sciences

Volume 15 Issue 1 January - June 2026
https://doi.org/10.60136/bas.v15.2026.4060

Research Article

Improving coconut fiber sheet performance via stepwise chemical treatments

Thitarini Suropan[1*], Surawut Puangmalee[1], Jarawee Leksuksri[1]

[1]*Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand*
*Corresponding author's e-mail: thitarinee@dss.go.th

Received: 27 May 2025, Revised: 10 March 2026, Accepted: 19 March 2026

Abstract

Coconut fibers have gained increasing attention due to their sustainability, eco-friendly characteristics, and potential as a reinforcing component in composite materials. However, coconut fibers possess a hydrophilic nature, a heterogeneous structure, and poor interfacial adhesion with matrix materials. Therefore, surface modification is essential to enhance their properties before application. This research aims to improve the physical, mechanical, hydrophobic, and interfacial adhesion properties of coconut fibers for the development of interior decorative wall panels, using polyvinyl alcohol (PVA) as a binder. Sequential chemical surface treatments were investigated using potassium permanganate combined with sulfuric acid and benzoyl chloride as well as a treatment sequence starting with sodium hydroxide followed by potassium permanganate combined with sulfuric acid and benzoyl chloride. The morphological characteristics of the fibers were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and the elemental composition was detected by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Physical and mechanical properties of the fiber sheets were underwent testing. The sodium hydroxide pre-treatment effectively removed some of the outer layer of fibers that were damaged and peeled off during the grinding process, resulting in improved accessibility of reactive sites for subsequent chemical modifications and reduced water absorption. Subsequent oxidation with potassium permanganate combined with sulfuric acid increased surface roughness and surface area, leading to a significant enhancement in tensile strength and interfacial bonding with the PVA matrix. In the final step with benzoyl chloride treatment, the hydrophilicity was reduced and the flame-retardant properties were improved, although a slight decrease in tensile strength was observed. Overall, the results indicate that sequential chemical modification significantly influences the structural, morphological, physical, and mechanical properties of coconut fibers and coconut fiber sheets. The most effective treatment was the sodium hydroxide pre-treatment followed by potassium permanganate / sulfuric acid oxidation, which provided optimal improvement for composite applications requiring high mechanical strength, reduced water absorption, and enhanced fiber–matrix interfacial adhesion with PVA binders.

Keywords: Coconut fiber, Chemical treatment, Composite materials, Polyvinyl alcohol, Mechanical properties

บทคัดย่อ

เส้นใยมะพร้าวได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากคุณสมบัติด้านความยั่งยืน ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และศักยภาพในการใช้งานร่วมในวัสดุเชิงประกอบ อย่างไรก็ตามเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะความชอบน้ำสูง โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ และความสามารถในการยึดเกาะกับวัสดุประสานต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ความไม่ชอบน้ำ และการยึดติดระหว่างวัสดุประสานกับเส้นใยมะพร้าว เพื่อประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแผ่นวัสดุตกแต่งผนังภายในอาคารจากเส้นใยมะพร้าวร่วมกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการศึกษาการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้น ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ รวมถึงกระบวนการการปรับสภาพที่เริ่มจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ ทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การตรวจสอบองค์ประกอบเชิงธาตุ และการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของแผ่นเส้นใยมะพร้าว พบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดผิวชั้นนอกของเส้นใยบางส่วนที่ถูกทำลาย หลุดลอกออกจากกระบวนการบด ส่งผลให้เปิดโครงสร้างผิวเส้นใยให้สารเคมีสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในขั้นตอนต่อมา และช่วยลดการดูดซึมน้ำ ตามด้วยกระบวนการออกซิเดชัน โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับกรดซัลฟิวริกช่วยเพิ่มความหยาบและพื้นที่ผิวของเส้นใย ส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงของแผ่นเส้นใยเพิ่มขึ้นและเสริมประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับตัวประสาน ขณะที่การปรับสภาพขั้นสุดท้ายด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ ซึ่งช่วยลดการดูดซึมน้ำและเพิ่มสมบัติการหน่วงไฟ ถึงแม้ว่าส่งผลให้ความต้านแรงดึงลดลง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้าง สัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของของเส้นใยมะพร้าว/แผ่นเส้นใยมะพร้าว โดยการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวแบบลำดับขั้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยมะพร้าวให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกลสูง การลดการดูดซึมน้ำ และการยึดเกาะที่ดีระหว่างเส้นใยกับตัวประสานชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

คำสำคัญ: เส้นใยมะพร้าว, การปรับสภาพทางเคมี, วัสดุคอมโพสิต, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์, สมบัติเชิงกล

1. บทนำ (Introduction)

เส้นใยมะพร้าว (Coconut fiber หรือ Coir fiber) เป็นวัสดุธรรมชาติที่ได้จากเปลือกของผลมะพร้าวที่มีลักษณะเหนียว แข็งแรงและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ทำให้ได้รับความสนใจอย่างมากในด้านวัสดุศาสตร์และอุตสาหกรรมที่เน้นความยั่งยืน เส้นใยมะพร้าวประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 32-43% เฮมิเซลลูโลส 15-25% และลิกนิน 40-45% รวมถึงสารแทรกอื่น ๆ เช่น เพคตินและเกลืออนินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใย อย่างไรก็ตามเส้นใยมะพร้าวยังมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างความชื้นสูงและความสามารถในการยึดเกาะกับตัวประสานพอลิเมอร์ [1-2] โดยการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความสามารถในการยึดเกาะของเส้นใยเซลลูโลสมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาการปรับสภาพทางเคมี (Chemical treatment) ของเส้นใย ได้แก่ การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkaline treatment) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Permanganate treatment) อะซิทิเลชัน (Acetylation) และเบนโซอิลเลชัน (Benzoylation) เป็นต้น โดยมีการศึกษาการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าการปรับสภาพดังกล่าวทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง ส่งผลให้วัสดุประสานสามารถสัมผัสกับเซลลูโลสในเส้นใยได้มากขึ้น การปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ช่วยเพิ่มความหยาบของพื้นผิวและเปิดรูพรุนของโครงสร้างเส้นใย เพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและตัวประสานในวัสดุเชิงประกอบมากขึ้น นอกจากนี้การปรับสภาพแบบออกซิเดชันยังช่วยลดความชอบน้ำของเส้นใย [1-5] เป็นต้น

การปรับสภาพด้วยด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นิยมใช้เพื่อกำจัดลิกนิน เพคติน เฮมิเซลลูโลส รวมถึงแวกซ์ออกจากพื้นผิวของเส้นใยบางส่วน ช่วยเพิ่มความหยาบของผิว ทำให้พื้นที่สัมผัสกับวัสดุประสานพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จากการศึกษาการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% เป็นเวลา 72 ชั่วโมง กับตัวประสานโพลีเอสเตอร์ พบว่าความแข็งแรงในการดัดงอและการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 40% เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยกระบวนการนี้ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสสามารถเกิดปฏิกิริยากับวัสดุประสานได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้การยึดเกาะของเส้นใยกับพอลิเมอร์ดีขึ้นและยังเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสบนพื้นผิวที่มีบทบาทสำคัญในการรับแรงกล การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสถูกดึงโปรตอน (H^+) ออกไปเป็นประจุลบ ($-O^-$) และจับกับโซเดียมไอออน (Na^+) เกิดเป็นเกลืออัลคอกไซด์ ($-O\text{-}Na^+$) ด้วยเหตุนี้จึงลดปริมาณความชื้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่และทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของเส้นใยลดลง [3,6-7] ปฏิกิริยาทางเคมีแสดงสมการได้ ดังนี้:

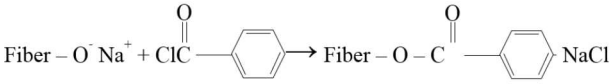
$$\text{Fiber} - \text{OH} + \text{NaOH} \longrightarrow \text{Fiber} - \text{O} - \text{Na} + \text{H}_2\text{O} \qquad (1)$$

การปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใย ปฏิกิริยานี้มักเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นกรดและส่งผลให้มีการนำหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น หมู่คาร์บอกซิลและหมู่แอลดีไฮด์เข้าสู่พอลิเมอร์เซลลูโลส การศึกษาพบว่าการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหลังจากการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบได้อย่างมีนัยสำคัญ [3,8-10] การศึกษาการปรับสภาพเส้นใยเซลลูโลส โดยใช้ระบบออกซิไดซ์ร่วมระหว่าง $KMnO_4$ และ H_2SO_4 พบว่าการใช้ H_2SO_4 ช่วยกระตุ้นการรีดิวซ์ของ Mn(VII) ไปเป็น Mn(II) ทำให้กระบวนการออกซิเดชันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น [11] การปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแบบออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพสำหรับเส้นใยธรรมชาติ โดยที่ $KMnO_4$ ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเซลลูโลส สามารถเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิล (–OH) ที่ผิวเส้นใยให้เป็นหมู่คาร์บอนิล (–C=O) หรือคาร์บอกซิลิก (–COOH) เมื่อผ่านกลไกการรีดักชันของ Mn(VII) ไปเป็น Mn(IV) ปฏิกิริยาดำเนินไปโดยการสร้างเซลลูโลส-แมงกาเนต เกิดการตกตะกอนของ MnO_2 โดยกลไกออกซิเดชันนี้ยังส่งเสริมการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วน เพิ่มความหยาบของพื้นผิว และส่งผลให้เกิดการเพิ่มจำนวนตำแหน่งที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะเคมีร่วมกับตัวประสานได้ดีขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวและประสิทธิภาพเชิงกลในวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ [10,12] ปฏิกิริยาทางเคมีแสดงสมการได้ ดังนี้

$$\text{Fiber} - \text{OH} + KMnO_4 \longrightarrow \text{Fiber} - \text{O} - \text{H} - \text{O} - (MnO_2) - \text{O}^-K^+ \qquad (2)$$

การปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ (C_6H_5COCl) ปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชัน (Benzoylation) เกิดหมู่เบนโซเอต ($-OCOC_6H_5$) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีวงแหวนเบนซีน (Aromatic ring) มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวเส้นใยบางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิล ส่งผลให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น เพิ่มการกระจายตัวของตัวประสานพอลิเมอร์ เพิ่มการยึดเกาะกับพอลิเมอร์ เช่น อีพอกซีและโพลียูรีเทน พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ [3,14] โดยทั่วไปการปรับสภาพด้วยเบนโซเลชันมีการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน การศึกษาผลของปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันต่อเส้นใยธรรมชาติ พบว่า สัณฐานพื้นผิวมีร่องและรอยแยกขนาดเล็ก มีความเรียบและสม่ำเสมอขึ้น ลดการดูดซึมน้ำ มีการเกิดหมู่เบนโซเอตบนโครงสร้างเซลลูโลส ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น และความเป็นผลึกของเส้นใยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [10,13] ปฏิกิริยาทางเคมีแสดงสมการได้ ดังนี้

$$\text{Fiber} - \text{OH} + \text{NaOH} \longrightarrow \text{Fiber} - \text{O} - \text{Na} + \text{H}_2\text{O} \qquad (3)$$



การศึกษาการปรับปรุงเส้นใยจากเปลือกหัวมันเสือด้วยเบนโซอิลคลอไรด์เพื่อการผลิตวัสดุเชิงประกอบไฮบริดไล่แมลงและเสริมแรงด้วยเส้นใยหัวมันเสือด้วยโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density polyethylene) และเรซินอัลคิดจากน้ำมันละหุ่ง พบว่า การปรับปรุงเส้นใยทำให้สมบัติเชิงกลได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง ความเค้นดัด ความแข็ง และแรงกระแทก (Impact load) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน พร้อมทั้งสังเกตว่าค่าการดูดซึมน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการปรับสภาพ [14]

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวก่อนและหลังการปรับสภาพทางเคมีแบบหลายขั้นตอน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพเชิงกล ลดความชอบน้ำ และการยึดเกาะกับวัสดุประสานพอลิเมอร์ของวัสดุเส้นใยมะพร้าวในการนำไปใช้พัฒนาแผ่นติดผนังตกแต่งภายในอาคารจากเส้นใยธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance รุ่น Type AC2105, Sartorius) เตาให้ความร้อน (Hot Plate รุ่น SP131320-33, Barnstead Thermolyne) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven รุ่น UF30, Memmert) เครื่องบด (Willey mill รุ่น Thomas willey mills model 4, Thomas scientific) เครื่องทดสอบความหนา (Thickness tester รุ่น 49-s6-10-0003, Technidyne) เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile tester รุ่น TMI/84-56, TMI)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM รุ่น JSM-6610LV, JEOL) เครื่องเคลือบด้วยโลหะนำไฟฟ้า (รุ่น 150R ES plus, Quorum)

2.2 สารเคมีและวัสดุ

เปลือกมะพร้าวสับขนาดประมาณ 3x3 เซนติเมตร จากจังหวัดตรัง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 10% w/v, Merck), กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4, 4 N, Merck) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$, 0.1 N, Carlo) เบนโซอิลคลอไรด์ (C_7H_5COCl 98%, Tokyo chemical industry) ใช้ในขั้นตอนการปรับสภาพเส้นมะพร้าว โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (10% w/v, Chemipan) โซเดียมซิลิเกต ($Na_2O(SiO_2)$, Sigma-Aldrich) กรดซิตริก ($C_6H_8O_7$, Loba Chemie) ตัวช่วยประสาน (Emulsifier X-1, Chemical Max) ใช้ในตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_6O, 95%, Merck)

2.3 วิธีดำเนินงาน

2.3.1 การเตรียมเส้นใย

การเตรียมเส้นใยมะพร้าวโดยนำเปลือกมะพร้าวสับขนาด 3 X 3 เซนติเมตร ล้างทำความสะอาดและตากให้แห้ง นำไปบดด้วยเครื่องบด Willey mill จากนั้นร่อนด้วยตะแกรง 100 เมช ขนาดเส้นใยประมาณ 1.5 - 1.8 มิลลิเมตร

2.3.2 การปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมี

การปรับสภาพด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้นมีการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับสภาพผิวเส้นใยในการช่วยกำจัดลิกนินเฮมิเซลลูโลสและเพคตินที่เคลือบอยู่บนผิวเส้นใย รวมถึงช่วยให้เปิดโครงสร้างเส้นใยให้สารเคมีอื่นสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น การใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเพื่อช่วยออกซิไดซ์ผิวเส้นใยให้เกิดร่องและเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะกับตัวประสานได้ดี ซึ่งเมื่อเส้นใยมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้พื้นผิวสามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้นด้วย จึงใช้ขั้นตอนการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์เพื่อให้เส้นใยลดสมบัติความชอบน้ำ โดยการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มตัวอย่าง R เป็นกลุ่มเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพตัวอย่างก่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีการใช้สารเคมีในขั้นตอน คือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ กลุ่มตัวอย่าง N เป็นกลุ่มเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพตัวอย่างก่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ ดังกระบวนการการปรับสภาพเส้นใยในตารางที่ 1 โดยเส้นใยมะพร้าวที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพจะใช้สัญลักษณ์ R1 ในการปรับสภาพครั้งแรกใช้สัญลักษณ์ R2 ด้วยการนำเส้นใยปริมาณ 100 กรัม แช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 4 นอร์มัล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเส้นใยล้างน้ำให้สะอาด นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจนเส้นใยแห้ง สัญลักษณ์ R3 โดยนำเส้นใยที่ผ่านกระบวนการ R2 ปริมาณ 100 กรัม ไปแช่ในเบนโซอิลคลอไรด์ 98% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ก่อนนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้งเส้นใยแห้งและปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

ในการปรับสภาพสัญลักษณ์ N1 โดยนำเส้นใยปริมาณ 100 กรัม แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเส้นใยล้างน้ำให้สะอาด อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนเส้นใยแห้ง จากนั้นนำเส้นใยที่ได้จาก N1 ไปทำการปรับสภาพเป็น N2 และ N3 โดยใช้กระบวนการเดียวกับ R2 และ R3

ตารางที่ 1 กระบวนการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารเคมี

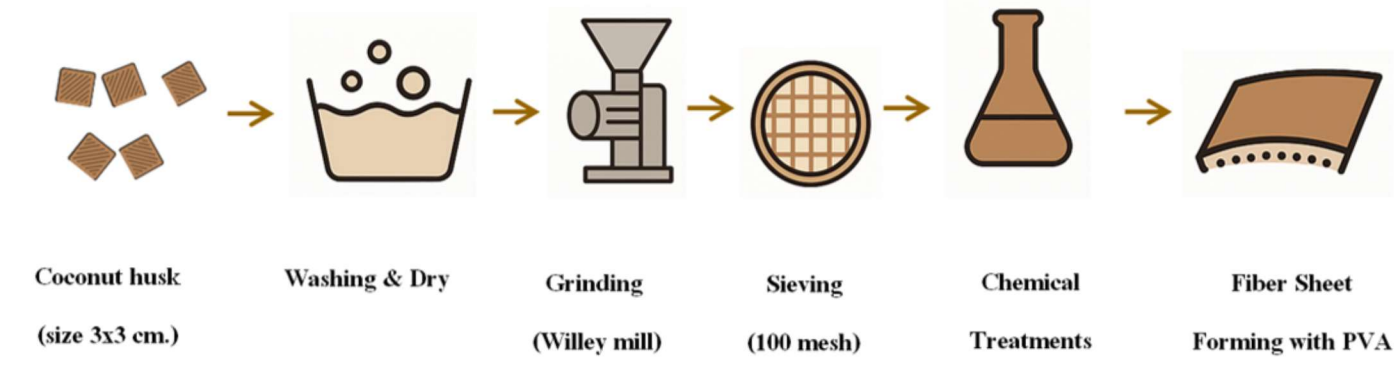
ตัวอย่าง	กระบวนการปรับสภาพเส้นใย
R1	เปลือกมะพร้าวที่ผ่านการบด
R2	นำ R1 - แช่ใน $KMnO_4$ 0.1 N ร่วมกับ H_2SO_4 4 N
R3	นำ R2 - แช่ C_7H_5ClO 98%
N1	นำ R1 - แช่ใน NaOH 10% w/v
N2	นำ N1 - $KMnO_4$ 0.1 N ร่วมกับ H_2SO_4 4 N
N3	นำ N2 - แช่ใน C_7H_5ClO 98%

2.3.3 การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยมะพร้าว

การขึ้นแผ่นเส้นใยมะพร้าวกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยนำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ละลายในน้ำให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เติมโซเดียมซิลิเกต กรดซิตริก และตัวช่วยประสาน ในอัตราส่วนโพลีไวนิลแอลกอฮอล์:น้ำ:โซเดียมซิลิเกต:กรดซิตริก (1:10:0.5:0.25) จากนั้นนำเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพแต่ละตัวอย่างจำนวน 10 กรัม ผสมกับกาวโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมปริมาณ 200 มิลลิลิตร เทลงในแม่พิมพ์ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร ทิ้งให้เซตตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะได้แผ่นเส้นใยที่มีความหนา 2 ± 0.25 มิลลิเมตร โดยรูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่ม

2.3.4 การทดสอบสมบัติ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวและการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) โดยนำตัวอย่างเส้นใยเคลือบโลหะทองด้วยเครื่องเคลือบโลหะนำไฟฟ้า นำตัวอย่างที่ได้ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 1,000X และการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) โดยอุปกรณ์ EDX ทำงานร่วมกับ SEM ตรวจจับรังสีเอกซ์และวิเคราะห์พลังงานด้วยโปรแกรมวิเคราะห์และสร้างสเปรกตัมที่แสดงสัดส่วนธาตุที่ตรวจพบ



ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent sheet density) บ่งชี้ถึงลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยที่มีผลจากการปรับสภาพเส้นใย โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 534:2011 ทำการวัดน้ำหนักของแผ่นเส้นใยต่อพื้นที่และความหนาของแผ่นเส้นใย เพื่อนำมาคำนวณหาความหนาแน่นปรากฏของแผ่นเส้นใย

การดูดซึมน้ำ (Water drop absorption) บ่งชี้ความสามารถของแผ่นเส้นใยในการดูดซับน้ำ โดยทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T835 Om – 14 ใช้การหยดน้ำกลั่นในปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร ลงบนแผ่นเส้นใยและจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาจนกว่าหยดน้ำจะถูกดูดซับและหายไป

ความต้านแรงดึง (Tensile strength) บ่งชี้ความสามารถที่ทนต่อแรงดึงสูงสุดต่อหน่วยความกว้างที่แผ่นเส้นใยสามารถต้านทานได้ก่อนจะขาด โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1924-2:2008 เตรียมตัวอย่างขนาดความกว้าง 15 มิลลิเมตร ความยาว 180 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ ความต้านแรงดึงชนิดอัตราการยืดตัวคงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้สมการ (4)

$$S = \frac{F}{W_i} \qquad (4)$$

เมื่อ S คือ ความต้านแรงดึง
F คือ ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึง
W_i คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ

อัตราการเผาไหม้ (Burning rate) ใช้ในการประเมินพฤติกรรมและลักษณะในการติดไฟของแผ่นเส้นใย โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1210:1996 เตรียมตัวอย่างขนาด 50 x 125 มิลลิเมตร วางตัวอย่างในแนวตั้ง ใช้เปลวไฟขนาดเล็กตั้งแกนกลางของท่อหัวเตาให้ตั้งตรง ตั้งหัวเตาให้เปลวไฟสีน้ำเงินสูง 20 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ทดสอบเปลวไฟเป็นเวลา 30 วินาที โดยไม่เปลี่ยนตำแหน่ง นำหัวเผาออกหลังจาก 30 วินาที หรือทันทีที่ส่วนหน้าการเผาไหม้ของชิ้นงานทดสอบถึงเครื่องหมาย 25 มิลลิเมตร เริ่มจับเวลาอีกครั้งของส่วนการเผาไหม้จากเครื่องหมาย 25 มิลลิเมตร จนการเผาไหม้สิ้นสุด วัดความยาวที่เสียหายจากการเผาไหม้ คำนวณอัตราการเผาไหม้เชิงเส้น หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้สมการ (5)

$$v = \frac{60L}{t} \qquad (5)$$

เมื่อ V คือ อัตราการเผาไหม้เชิงเส้น
L คือ ความยาวที่เสียหายจากการเผาไหม้
t คือ เวลา

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวและการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX

รูปที่ 1 (A) R1 แสดงภาพสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวหลังจากผ่านกระบวนการบดด้วยแรงกล พบว่า เส้นใยมีลักษณะผิวไม่เรียบและมีเศษสิ่งเจือปนบางส่วนเกาะติดอยู่บนพื้นผิว บางส่วนถูกทำลายและหลุดลอกออกจากโครงสร้างหลัก ซึ่งเป็นผลจากแรงเฉือนและแรงกระแทกระหว่างกระบวนการบด ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่า บนผิวเส้นใยประกอบด้วยธาตุออกซิเจน โพแทสเซียม ซิลิคอน คลอรีน และโซเดียม ซึ่งบ่งชี้ถึงการคงอยู่ของสารอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนจากกระบวนการการเจริญเติบโตของมะพร้าวทางธรรมชาติ เช่น แร่ธาตุในเนื้อเยื่อพืช หรือสารตกค้างจากสภาพแวดล้อม การปรากฏของธาตุดังกล่าวสะท้อนถึงสภาพพื้นผิวเส้นใยก่อนการปรับสภาพทางเคมีที่ประกอบด้วยสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพคตินและแร่ธาตุที่สะสมอยู่กับผนังเส้นใยชั้นนอก ซึ่งมีผลต่อสมบัติการยึดเกาะและการซึมผ่านของสารเคมีในขั้นตอนการปรับสภาพลำดับต่อไป [1-2]

รูปที่ 1 (B) R2 แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟูริก พบว่า พื้นผิวของเส้นใยมีลักษณะเรียบมากขึ้น สามารถสังเกตเห็นพื้นผิวเส้นใยได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ บ่งชี้ถึงสิ่งเจือปนและสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลสบนพื้นผิวเส้นใยถูกกำจัดออก การเปลี่ยนแปลงเชิงสัณฐานดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงผลการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟูริกที่ช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสบนพื้นผิวคล้ายกับ Abisha และคณะ [15] ที่รายงานการแสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตว่าเกิดรอยตื้นตามแกนยาวบนผิวเส้นใย โดยปฏิกิริยาของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนเส้นใยที่อาจกัดกร่อนส่วนประกอบอสัณฐานโดยการทำลายพันธะระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่า บนพื้นผิวของเส้นใยประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างธาตุที่ผ่านการออกซิไดซ์บางส่วนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตภายใต้สภาวะกรด ปฏิกิริยาดังกล่าวอาจทำให้หมู่ไฮดรอกซิลบนเซลลูโลสถูกออกซิไดซ์ให้เป็นหมู่คาร์บอนิล ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีขั้วและความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะเคมีร่วมกับตัวประสานได้ดีขึ้น [15]

รูปที่ 1 (C) R3 แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพแบบลำดับขั้น โดยเริ่มจากการออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟูริก และตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ พบว่าหลังการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ทำให้ชั้นนอกของเส้นใยถูกกำจัดออก พื้นผิวเส้นใยมีลักษณะเปลี่ยนแปลงโดยปรากฏโครงสร้างบางส่วน เช่น ปากหลุม (Border pit) บางส่วนที่มีไทโลส (Tylose) ปิดอยู่ รวมถึงมีร่องและรอยแยกขนาดเล็กบนพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบขึ้น สอดคล้องกับ Boussehel และคณะ [13] และ Olusanya และคณะ [17] ที่รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่มีลักษณะเรียบขึ้นหลังผ่านการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่า บนพื้นผิวของเส้นใยหลังการปรับสภาพประกอบด้วยออกซิเจน ซิลิคอน และคลอรีนที่ยืนยันถึงปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสกับเบนโซอิลคลอไรด์ทำให้เกิดพันธะเอสเทอร์บนพื้นผิวเส้นใย [13,17] และธาตุซิลิคอนที่พบสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Gil และคณะ [18] ยืนยันการมีอยู่ของซิลิคอนโดยใช้เทคนิค EDX ระบุจุดสีขาวบนพื้นผิวดังที่เห็นในในภาพเป็นวัสดุที่อุดมด้วยซิลิกา โดยถูกระบุว่าเป็นไทโลสและเป็นหลักฐานว่าเส้นใยไม่ได้ถูกปรับปรุงมากเกินไป

รูปที่ 1 (D) N1 แสดงภาพสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ผนังชั้นนอกของเส้นใยถูกกำจัดออกบางส่วน ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีความสะอาดมากขึ้นและสามารถสังเกตเห็นปากหลุมที่เป็นบริเวณสะสมอาหาร รวมถึงร่องระหว่างเส้นใย การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใย กระบวนการดังกล่าวมีผลในการกำจัดสิ่งเจือปนและสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพคตินออกจากโครงสร้างของเส้นใย [7] โดยส่งผลให้พื้นผิวมีความหยาบและพื้นผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการยึดเกาะเส้นใยกับตัวประสานต่อไป ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับการรายงานของ Bachtiar และ

คณะ [19] และ Osman และคณะ [20] ที่พบว่าการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถเปิดโครงสร้างเส้นใยและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับวัสดุประสานในวัสดุเชิงประกอบได้ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบธาตุออกซิเจน คาร์บอน และโซเดียมบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าว

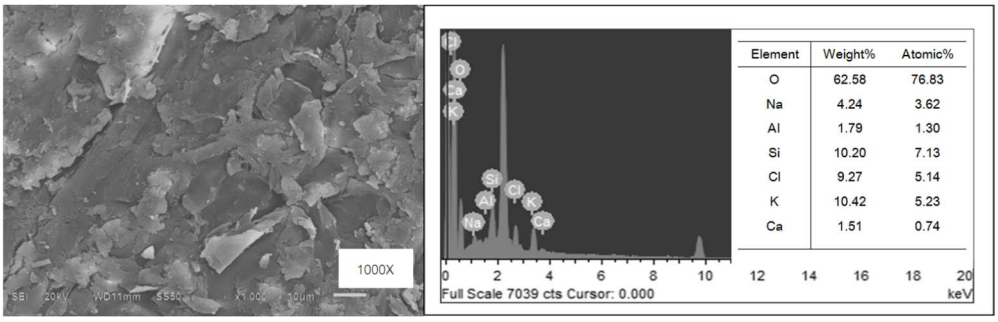
รูปที่ 1 (E) N2 แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพแบบหลายขั้นตอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริก ผลจากกระบวนการดังกล่าวทำให้พื้นผิวเส้นใยถูกกำจัดออกเพิ่ม ส่งผลให้โครงสร้างภายในของเส้นใยปรากฏชัดเจนขึ้น โดยสามารถสังเกตเห็นปากหลุมและไทโลสได้ชัดอีกทั้งร่องระหว่างเส้นใยมีความลึกและชัดมากกว่าตัวอย่างหลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว (รูปที่ 1 (D) N1) Arsyad และคณะ [5] รายงานว่าการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมร่วมกับสารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตช่วยเพิ่มความหยาบของพื้นผิวและเปิดรูพรุนของโครงสร้างเส้นใย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงถึงปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสขององค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส ที่ถูกกำจัดออกจากโครงสร้างเส้นใยบางส่วน กระบวนการนี้มีผลช่วยเพิ่มความสะอาดของพื้นผิวเส้นใยและเพิ่มพื้นผิวเส้นใยให้สามารถยึดเกาะกับตัวประสานของวัสดุเชิงประกอบได้มากยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ยืนยันการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว โดยพบธาตุออกซิเจน คาร์บอน และแคลเซียมบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการคงเหลือของสารประกอบหรือแร่ธาตุในเส้นใยหลังการปรับสภาพ

รูปที่ 1 (F) N3 แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพแบบหลายขั้นตอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ ตามลำดับ หลังการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ พบว่า พื้นผิวเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง N2 (รูปที่ 1(E) N2) โดยยังสามารถมองเห็นโครงสร้างปากหลุมและไทโลส ซึ่งเป็นบริเวณที่เกี่ยวข้องกับการสะสมและลำเลียงอาหารในเส้นใย โดยร่องบนพื้นผิวมีลักษณะเรียบและตื้นขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวเส้นใยบางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิล จึงทำให้ผิวของเส้นใยมีลักษณะเรียบขึ้น [13] การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX สนับสนุนข้อสังเกตดังกล่าว โดยพบธาตุออกซิเจน คาร์บอน แคลเซียม และคลอรีนบนพื้นผิวเส้นใยที่ยืนยันถึงปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส

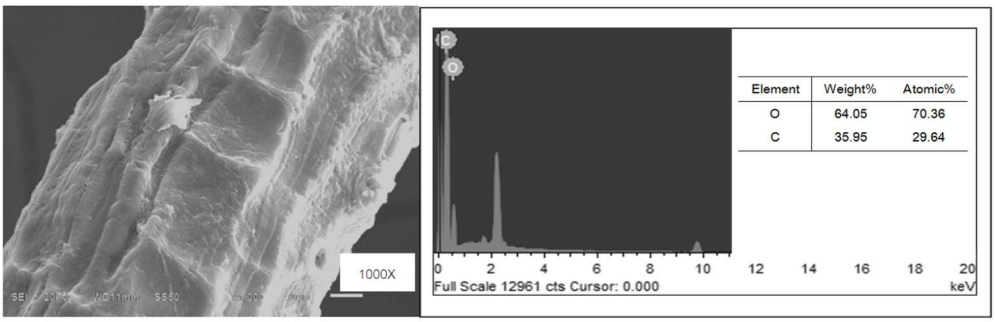
3.2 สมบัติของแผ่นเส้นใย

3.2.1 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent sheet density)

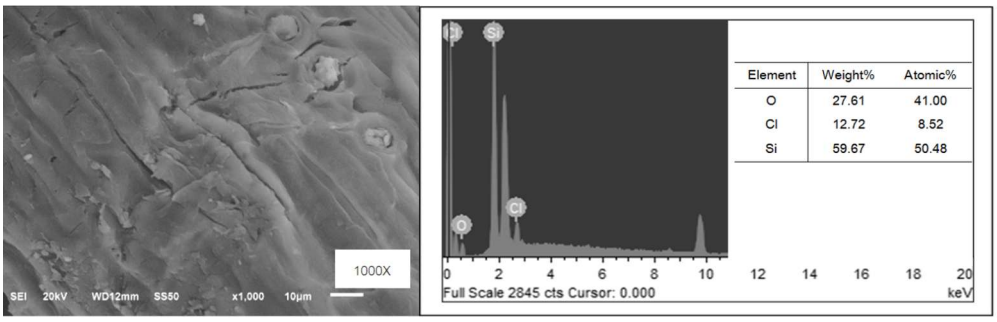
จากตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏของแผ่นเส้นใยมะพร้าว พบว่า ตัวอย่าง R1, R2 และ R3 มีค่าเฉลี่ย 536.36 ± 24.71, 541.42 ± 28.36 และ 535.21 ± 25.48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง N1, N2 และ N3 มีค่าเฉลี่ย 588.10 ± 27.60, 603.33 ± 22.15 และ 711.49 ± 26.62 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าว (รูปที่ 1) ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวระหว่างชุดตัวอย่าง R และ N อย่างชัดเจน โดยพบว่าตัวอย่าง R1-R3 พื้นผิวเส้นใยยังคงมีลักษณะไม่เรียบและมีเศษเจือปนเกาะติดอยู่บางส่วนบนผิวเส้นใยชั้นนอก แม้ผ่านการปรับสภาพแบบลำดับขั้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพในลำดับดังกล่าวยังไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของแผ่นเส้นใยมะพร้าว R1, R2 และ R3 มากนัก (รูปที่ 2) สำหรับตัวอย่าง N1-N3 ที่ผ่านการปรับสภาพตามลำดับขั้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ พบว่า ผิวเส้นใยชั้นนอกถูกกำจัดออกมากขึ้นจนถึงชั้นร่องเส้นใยมีความสะอาด ช่วยให้แผ่นเส้นใยสามารถจัดเรียงตัวระหว่างเส้นใยได้ดีขึ้น ส่งผลต่อความหนาของแผ่นเส้นใยลดลงและค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะในตัวอย่าง N3 ที่ผิวเส้นใยถูกกำจัดออกมากที่สุด บางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิลทำให้พื้นผิวมีความเรียบ ซึ่งช่วยลดช่องว่างภายในแผ่นเส้นใยได้ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏสูงสุดสอดคล้องกับ Pulkkinen และคณะ [21] ที่พบว่าเส้นใยที่มีผนังเส้นใยบางและมีความหยาบน้อยกว่ามักจะส่งผลต่อการเรียงของตัวเส้นใยได้ดีกว่าในโครงสร้างของแผ่นเส้นใย เนื่องจากความหนาแน่นปรากฏที่คำนวณได้จะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับความพรุนของแผ่นใยเส้น การปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนกระบวนการออกซิเดชันและเบนโซอิเลชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นเส้นใย



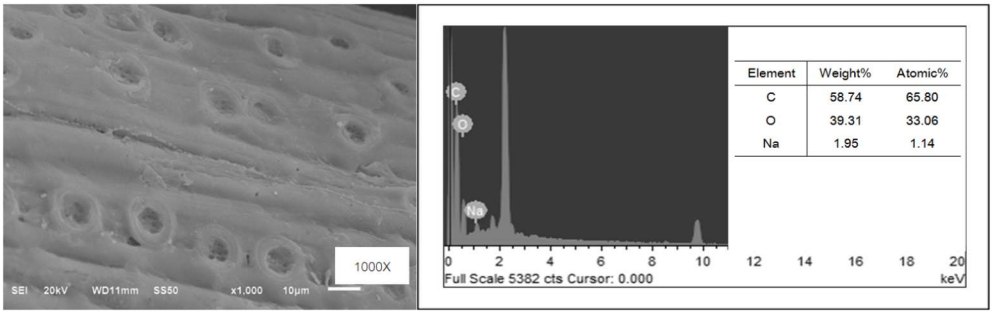
(A) R1



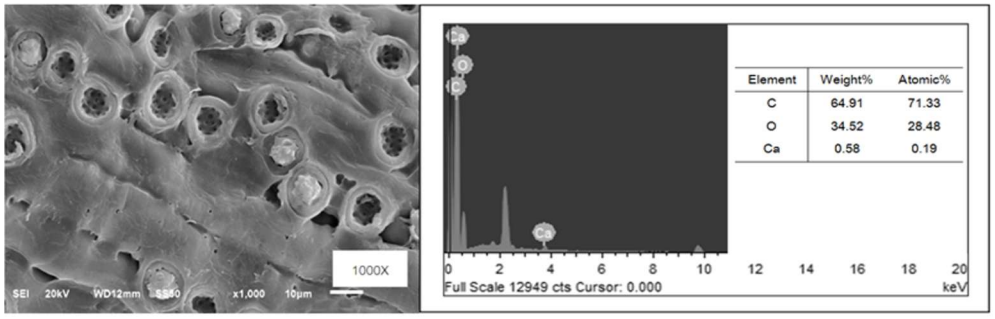
(B) R2



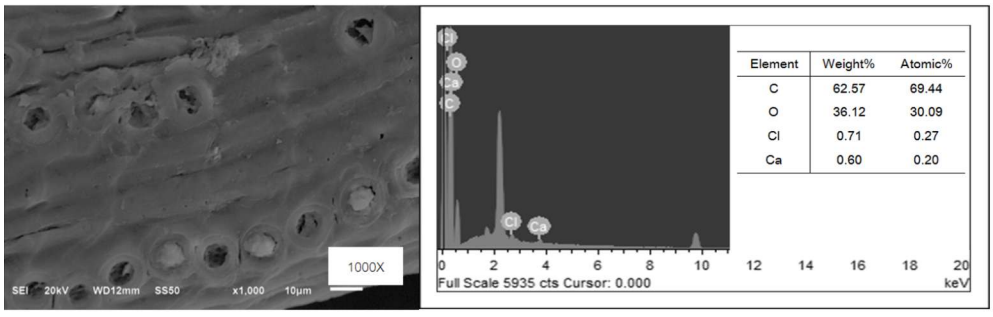
(C) R3



(D) N1



(E) N2



(F) N3

รูปที่ 1 ภาพถ่าย (SEM) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวและการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX



รูปที่ 2 ลักษณะแผ่นเส้นใยมะพร้าว R1, R2, R3

3.2.2 การดูดซึมน้ำ (Water drop absorption)

จากตารางที่ 2 แสดงค่าการดูดซึมน้ำแบบหยดของแผ่นเส้นใยมะพร้าว พบว่า การปรับสภาพเส้นใยแบบลำดับขั้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับการปรับสภาพ โดยตัวอย่าง R1 ซึ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 123.00 ± 48.09 วินาที แสดงถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำสูง เนื่องจากพื้นผิวชั้นนอกเส้นใยยังคงมีสิ่งเจือปนที่มีลักษณะชอบน้ำเป็นจำนวนมาก เช่น เฮมิเซลลูโลส และสารเพกติน เป็นต้น เมื่อเส้นใยถูกปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริก R2 ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเฉลี่ย 490.00 ± 32.13 วินาที เป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตภายใต้สภาวะกรดที่กำจัดสิ่งเจือปนที่มีลักษณะชอบน้ำบนผิวเส้นใย ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และสารเพกตินนั้นถูกกำจัดออกเพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง R1 สอดคล้องกับภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวที่มีลักษณะผิวเส้นใยที่สะอาดและเรียบมากขึ้น (รูปที่ 1 (B) R2) ส่งผลให้สมบัติการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใยลดลงอย่างมีนัยสำคัญสำหรับเส้นใยหลังการปรับสภาพต่อด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ R3 พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำลดลงต่อเนื่องเฉลี่ย 551.00 ± 35.42 วินาที ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันที่ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิล ทำให้ถูกจำกัดการสัมผัสระหว่างน้ำกับเส้นใยโดยตรง ส่งผลให้พื้นผิวมีลักษณะไม่ชอบน้ำมากขึ้น ในกรณีของชุดการปรับสภาพแบบลำดับขั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ N1–N3 พบว่า เส้นใยมีสมบัติการดูดซึมน้ำลดลง สามารถใช้เวลาการดูดซึมน้ำได้นานกว่า 30 นาที แสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการปรับสภาพแบบลำดับขั้นในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวและสัณฐานวิทยาของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยกำจัดสิ่งเจือปนที่ชอบน้ำ เช่น เฮมิเซลลูโลสและเพกติน ทำให้ผิวเส้นใยสะอาดและเปิดพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อมา สอดคล้องกับการศึกษาของ Arsyad และคณะ [5] พบว่า การปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยการปรับสภาพแบบออกซิเดชันนี้ช่วยลดความชอบน้ำของเส้นใยและเบนโซอิลคลอไรด์ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง [13] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX ที่ตรวจพบธาตุคลอรีนและคาร์บอนบนพื้นผิวเส้นใยหลังการปรับสภาพขั้นสุดท้าย สนับสนุนการเกิดพันธะเอสเทอร์และการแทนที่ของหมู่เบนโซอิลบนเส้นใย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพแบบลำดับขั้นสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความต้านทานการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใย

3.3.3 ความต้านแรงดึง (Tensile strength)

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าความต้านแรงดึงของแผ่นเส้นใยมะพร้าว ซึ่งสะท้อนถึงความแข็งแรงของแผ่นเส้นใยและการยึดประสานระหว่างเส้นใยกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังการปรับสภาพด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้น ตัวอย่าง R1 ซึ่งเป็นแผ่นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด 689.30 ± 13.06 นิวตันต่อเมตร เนื่องจากการพบลักษณะพื้นผิวเส้นใยยังคงมีสิ่งเจือปนและสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลสซึ่งขัดขวางการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อเส้นใยผ่านการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริก R2 พบว่า ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 1,686.00 ± 41.24 นิวตันต่อเมตร สำหรับตัวอย่าง R3 ซึ่งหลังการปรับสภาพต่อด้วยเบนโซอิลคลอไรด์มีค่าความต้านแรงดึงลดลงเหลือ 1,137.00 ± 35.09 นิวตันต่อเมตร สอดคล้องกับรูปถ่ายสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าว (รูปที่ 1(C) R3) ที่แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวเส้นใยเรียบขึ้นร่องระหว่างเส้นใยมีลักษณะตื้นขึ้น โดยปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันยังทำให้หมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับตัววัสดุประสานถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิลที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำและทำให้แรงยึดระหว่างเส้นใยและวัสดุประสานลดลง [20,17] แนวโน้มเดียวกันพบในชุดการปรับสภาพแบบลำดับขั้นของเส้นใยมะพร้าว N1–N3 ซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ย 792.00 ± 26.44 นิวตันต่อเมตร, 1,974.00 ± 29.38 นิวตันต่อเมตร, และ 857.40 ± 30.15 นิวตันต่อเมตร ตามลำดับ โดยค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของตัวอย่าง N2 แสดงถึงประสิทธิภาพของการปรับสภาพแบบลำดับขั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่สามารถปรับปรุงสภาพพื้นผิวเส้นใยให้เหมาะสมต่อการยึดติดกับตัวประสานมากที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่พบใน (รูปที่ 1 (E) N2) โดยผิวเส้นใยมีลักษณะสะอาดและมีความหยาบเพิ่มขึ้น จากการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและแว็กซ์ออกจากพื้นผิวเส้นใย ซึ่งส่งผลให้เกิดร่องและพื้นที่ผิวมากขึ้น ช่วยให้เกิดอัตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นและเสริมแรงยึดประสานในเชิงกลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การปรับสภาพต่อด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ลดลง เนื่องจากการเกิดการแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิลบนผิวเส้นใย โดยสรุปการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเป็นขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มสมบัติการยึดเกาะและความแข็งแรงเชิงกลของแผ่นเส้นใยมะพร้าวร่วมกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

3.3.4 อัตราการเผาไหม้ (Burning rate)

จากตารางที่ 2 พบว่า อัตราการเผาไหม้ของแผ่นเส้นใยมะพร้าวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเส้นใยผ่านการปรับสภาพทางเคมี โดยตัวอย่าง R1 ซึ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ยสูงสุดที่ 14.00 ± 1.80 มิลลิเมตรต่อนาที ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแบบลำดับขั้น ได้แก่ R2, R3, N1 N2 และ N3 มีค่าอัตราการเผาไหม้เฉลี่ย 11.00 ± 1.32, 10.00 ± 1.24, 11.00 ± 1.51, 9.00 ± 1.13 และ 7.00 ± 1.33 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติด้านการหน่วงไฟของวัสดุ การลดลงของอัตราการเผาไหม้นี้สามารถ

ตารางที่ 2 สมบัติของแผ่นเส้นใยมะพร้าว

ตัวอย่างแผ่นเส้นใย	ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m^3	ความต้านทานการดูดซึมน้ำ, s	ความต้านแรงดึง, N/m	อัตราการเผาไหม้, mm/min
R1	536.36 ± 24.71	123.00 ± 48.09	689.30 ± 13.06	14.00 ± 1.80
R2	541.42 ± 28.36	490.00 ± 32 .13	1,686.00 ± 41.24	11.00 ± 1.32
R3	535.21 ± 25.48	551.00 ± 35.42	1,137.00 ± 35.09	10.00 ± 1.24
N1	588.10 ± 27.60	> 1,800 .00	792.00 ± 26.44	11.00 ± 1.51
N2	603.33 ± 22.15	> 1,800.00	1,974.00 ± 29.38	9.00 ± 1.13
N3	711.49 ± 26.62	> 1,800.00	857.40 ± 30.15	7.00 ± 1.33

อธิบายได้ว่ากระบวนการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกช่วยในการกำจัดสิ่งเจือปนและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีคาร์บอนสูงและติดไฟง่ายบนพื้นผิวเส้นใยบางส่วนออก จากลักษณะสัณฐานเส้นใยรูปที่ 1 เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ลดลง จึงทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะเผาไหม้เกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ลดลงอย่างชัดเจน ผลการทดสอบดังกล่าวยังสัมพันธ์กับแนวโน้มของค่าความหนาแน่นปรากฏที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับสภาพ ซึ่งช่วยลดช่องว่างภายในแผ่นเส้นใยและลดการแพร่กระจายของเปลวไฟระหว่างเส้นใยได้ดีขึ้น นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ในขั้นสุดท้ายทำให้เกิดการแทนที่ของหมู่เบนโซอิล ส่งผลให้ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใยลดลง เมื่อแผ่นเส้นใยได้รับความร้อนจึงทำให้ความเร็วในการเผาไหม้ช้าลง [22] สอดคล้องกับการศึกษาของ Boussehel และคณะ [13] ที่พบว่าการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ทำให้เกิดหมู่เบนโซเอตบนโครงสร้างเซลลูโลสและส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น ผลรวมของกระบวนการเหล่านี้ทำให้ตัวอย่าง R3 และ N3 มีความทนไฟสูงสุดในกลุ่มตัว R และ N

4. สรุป (Conclusions)

การศึกษาผลของการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยกระบวนการทางเคมีแบบลำดับขั้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ ตลอดจนการปรับสภาพที่เริ่มต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ พบว่ากระบวนการปรับสภาพทางเคมีแบบลำดับขั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัณฐานวิทยาเส้นใยและสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใยมะพร้าว การปรับสภาพเส้นใยที่เริ่มจากโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดผิวชั้นนอกของเส้นใยบางส่วนที่ถูกทำลาย หลุดลอกออกจากกระบวนการบด เช่น แร่ธาตุ สารอินทรีย์และอื่น ๆ ออกจากพื้นผิวเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้แผ่นเส้นใยมีสมบัติลดการดูดซึมน้ำและช่วยเปิดโครงสร้างของผิวเส้นใยให้สารเคมีสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีในการปรับสภาพขั้นต่อไป การปรับสภาพต่อด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับกรดซัลฟิวริกช่วยเพิ่มความหยาบและพื้นที่ผิวของเส้นใย ส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงของแผ่นเส้นใยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ขณะที่การปรับสภาพขั้นสุดท้ายด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ทำให้เกิดการแทนที่ของหมู่เบนโซอิลบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติลดความไม่ชอบน้ำและการหน่วงไฟ แม้ว่าจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงลดลง จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวแบบลำดับขั้นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยมะพร้าวให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกลสูง การลดการดูดซึมน้ำ และการยึดเกาะที่ดีระหว่างเส้นใยกับตัวประสานชนิดตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

5. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Bhattacharya SS, Parmar PM. Effect of chemical treatment on physical and mechanical properties of coconut fibre. SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. 2022;14(4):1–5. https://doi.org/10.18090/samriddhi.v14i04.32

[2] Nissar M, Chethan KN, Birjerane YA, Patil S, Shetty S, Das A. Coconut coir fiber composites for sustainable architecture: A comprehensive review of properties, processing, and applications. Journal of Composites Science. 2025;9(10):516. https://doi.org/10.3390/jcs9100516

[3] Sahu P, Tiwari S, Om Prakash S. Surface modifications of natural fibers for use in preparation of biocomposites. SAMRIDDHI:
A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. 2021;13(1):26–34. https://doi.org/10.18090/samriddhi.v13i01.6

[4] Samanth M, Bhat KS. Conventional and unconventional chemical treatment methods of natural fibres for sustainable biocomposites. Sustainable Chemistry for Climate Action. 2023;3:100034. https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100034

[5] Arsyad M, Soenoko R. The effects of sodium hydroxide and potassium permanganate treatment on roughness of coconut fiber surface. *In*: International Mechanical and Industrial Engineering Conference 2018 (IMIEC 2018); 2018 Aug 30-31; State University of Malang, Indonesia. p. 05004. https://doi.org/10.1051/matecconf/201820405004

[6] Pannu AS, Singh S, Dhawan V. Effect of alkaline treatment on mechanical properties of biodegradable composite (BF/PLA) rod. Materials Today: Proceedings. 2021;46(19):9367–9371. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.912

[7] Verma D, Goh KL. Effect of mercerization/alkali surface treatment of natural fibres and their utilization in polymer composites: Mechanical and morphological studies. Journal of Composites Science. 2021;5(7):175. https://doi.org/10.3390/jcs5070175

[8] Madhushree M, Vairavel P, Mahesha GT, Bhat KS. Oxidative modifications of cellulose: Methods, mechanisms, and emerging applications. Journal of Natural Fibers. 2025;22(1):2497910. https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2497910

[9] Mohammed AA, Bachtiar D, Rejab MRM, Hasany SF. Effect of potassium permanganate on tensile properties of sugar palm fibre reinforced thermoplastic polyurethane. Indian Journal of Science and Technology. 2017;10(7):1–5. https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i7/111453

[10] Birniwa AH, Abdullahi SS, Ali M, Mohammad REA, Jagaba AH, Amran M, et al. Recent trends in treatment and fabrication of plant-based fiber-reinforced epoxy composite: A review. Journal of Composites Science. 2023;7(3):120. https://doi.org/10.3390/jcs7030120

[11] Budiyati E, Saputri FZ, Prasasti RIK, Elwin MR. Study on varied bagasse fiber and epoxy resin compositions with rice bran filler to biocomposite characteristics. JKPK (Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia). 2024;9(1):102–114. https://doi.org/10.20961/jkpk.v9i1.72587

[12] Kavitha SA, Priya RK, Arunachalam KP, Avudaiappan S, Saavedra Flores EI, Blanco D. Experimental investigation on

strengthening of *Zea mays* root fibres for biodegradable composite materials using potassium permanganate treatment. Scientific Reports. 2024;14:12754. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58913-y

[13] Boussehel H, Guerira B, Jawaid M, Fouad H, Khiari R. Effect of benzoyl chloride treatment on morphological, thermal, mechanical, and hydrothermal aging properties of date palm/polyvinyl chloride (PVC) composites. Scientific Reports. 2024;14:20384. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71489-x

[14] Babayo H, Musa H, Garba MD. Fabrication of benzoyl chloride treated tiger-nut fiber reinforced insect repellent hybrid composite. Scientific Reports. 2022;12:8797. https://doi.org/10.1038/s41598-022-12876-0

[15] Abisha M, Priya RK, Arunachalam KP, Avudaiappan S, Saavedra Flores EI, Parra PF. Biodegradable green composites: Effects of potassium permanganate ($KMnO_4$) treatment on thermal, mechanical, and morphological behavior of *Butea Parviflora* (BP) fibers. Polymers. 2023;15(9):2197. https://doi.org/10.3390/polym15092197

[16] Li X, Tabil LG, Panigrahi S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. Journal of Polymers and the Environment. 2007;15:25–33. https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3

[17] Olusanya SO, Ajayi SM, Sodeinde KO, Fapojuwo DP, Atunde MO, Diduyemi AE, et al. Hydrophobic modification of cellulose from oil palm waste in aqueous medium. Polymer Bulletin. 2024;81:1349-1371. https://doi.org/10.1007/s00289-023-04756-y

[18] Gil H, Zuleta AA, Reyes DE. Mechanical properties and sustainability aspects of coconut fiber modified concrete. Scientia et Technica. 2021;26(1):64–70. https://doi.org//10.22517/23447214.22901

[19] Bachtiar D, Mohammed AA, Palanisamy S, Imran AI, Siregar JP, Rejab MRM, et al. Effect of alkaline treatment on the thermal and mechanical properties of sugar palm fibre reinforced thermoplastic polyurethane composites. Scientific Reports. 2025;15:14085. https://doi.org/10.1038/s41598-025-99227-x

[20] Osman Z, Elamin M, Ghorbel E, Charrier B. Influence of alkaline treatment and fiber morphology on the mechanical, physical, and thermal properties of polypropylene and polylactic acid biocomposites reinforced with kenaf, bagasse, hemp fibers and softwood. Polymers. 2025;17(7):844. https://doi.org/10.3390/polym17070844

[21] Pulkkinen I, Alopaeus V, Fiskari J, Joutsimo O. The use of fibre wall thickness data to predict handsheet properties of eucalypt pulp fibres. O Papel (Brazil). 2008;69(10):71–85. https://www.researchgate.net/publication/251927679_The_use_of_fibre_wall_thickness_data_to_predict_handsheet_properties_of_eucalypt_pulp_fibres

[22] Xiao N, Zheng X, Song S, Pu J. Effects of complex flame retardant on the thermal decomposition of natural fiber. BioResources. 2014;9(3):4924–4933. https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4924-4933

Bulletin of Applied Sciences

Volume 15 Issue 1 January - June 2026
https://doi.org/10.60136/bas.v15.2026.4074

Research Article

Determination of technical measurement uncertainty and method verification for coliform detection using the Multiple Tube Fermentation method in drinking water in sealed containers, ice, and raw water samples

Denchai Wongsrikaew[1,2], Mantana Jamklang[1], Chompunoot Wangboon[1], Pongpat Kiatprasert[2], Watsana Penkhrue[1*]

[1]*School of Preclinical Sciences, Institute of Science, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*
[2]*Analytical Laboratory Centre, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus, 145 Nok Mueang, Mueang Surin 32000, Thailand*
*Corresponding author e-mail address: watsana.p@sut.ac.th

Received: 31 May 2025, Revised: 8 April 2026, Accepted: 22 April 2026

Abstract

Coliform bacteria are a group of microorganisms commonly used as bacteriological indicators for assessing the microbiological quality and hygiene of water and food products. However, most laboratories in Thailand still lack verification data for microbiological analytical methods in accordance with ISO 16140-3:2021, which is essential for enhancing laboratory competence and supporting ISO/IEC 17025 accreditation. The determination of the Standard Deviation for Intralaboratory Reproducibility (S_{IR}) and the method verification serves as definitive evidence that a laboratory can competently perform reference methods to ensure accurate and reliable results for clients. This study aimed to evaluate laboratory capability in quantifying coliform bacteria across various water samples, including bottled drinking water, ice, raw water, food-contact surface water, and deionized (DI) water. The evaluation determined the S_{IR} and the Estimated bias (eBias) using the Multiple Tube Fermentation (MTF) method based on ISO 16140-3:2021 protocol for the verification of reference methods in a single laboratory. Three inoculation levels were evaluated: low (1 cfu/mL), medium (10 cfu/mL), and high (20 cfu/mL). The results revealed an overall S_{IR} of 0.14. The eBias values for Group (A) samples were 0.00, 0.30, and 0.05 Log_{10} MPN/100 mL; for Group (B) samples were 0.18, 0.01, and 0.02 Log_{10} MPN/100 mL; and for Group (C) samples were 0.12, 0.06, and 0.05 Log_{10} MPN/100 mL, respectively. The method verification demonstrated that both S_{IR} and the eBias values across all water types complied with the acceptability limit of ≤0.5 Log_{10} MPN/100 mL specified by ISO 16140-3:2021. This confirms that the laboratory can successfully implement the MTF method according to APHA, AWWA, and WEF standards with high accuracy and reliability. Consequently, these findings support the laboratory's application for ISO/IEC 17025:2017 accreditation and demonstrate that this verified MTF technique is highly suitable for drinking water quality surveillance systems to protect public health

Keywords: Verification ISO 16140, Intralaboratory reproducibility standard deviation, Estimated bias (eBias)

บทคัดย่อ

โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform bacteria) เป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Bacteriological indicator) ในการตรวจคุณภาพน้ำและอาหาร เพื่อบ่งชี้ถึงสุขอนามัยและคุณภาพของน้ำและอาหารแต่อย่างไรก็ตามห้องปฏิบัติการในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังขาดข้อมูลการทวนสอบวิธีการวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาตามแนวทางของ ISO 16140-3:2021 ซึ่งจำเป็นต่อการยกระดับสมรรถนะห้องปฏิบัติการและการยื่นขอรับรอง ISO/IEC 17025 ทั้งนี้การหาค่าความเบี่ยงเบนของวิธีการทดสอบ (S_{IR}) และการทวนสอบวิธีการทดสอบ (Verification) เป็นการแสดงให้เห็นว่าห้องปฏิบัติการ สามารถปฏิบัติตามวิธีได้อย่างถูกต้อง และสร้างความมั่นใจแก่ผู้รับบริการว่าจะได้รับผลการทดสอบที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อตรวจสอบความสามารถของห้องปฏิบัติการในการวิเคราะห์ปริมาณโคลิฟอร์มในตัวอย่างน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท น้ำแข็ง น้ำดิบ น้ำสัมผัสอาหาร น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI water) โดยการประเมินค่าความเบี่ยงเบนภายในห้องปฏิบัติการ (S_{IR}) และค่าความเอนเอียง (Estimated bias; eBias) ตามแนวทางของมาตรฐาน ISO 16140-3:2021 Protocol for the verification of reference methods and validated alternative methods in a single laboratory ด้วยวิธี Multiple Tube Fermentation ซึ่งเลือกระดับการปนเปื้อน 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ที่ 1 cfu/mL, 10 cfu/mL และ 20 cfu/mL ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าค่าความเบี่ยงเบน (S_{IR}) มีค่าเท่ากับ 0.14 และค่า eBias ของตัวอย่างกลุ่ม (ก) มีค่าเท่ากับ 0.00, 0.30 และ 0.05 Log_{10} MPN/100 mL ตัวอย่างกลุ่ม (ข) ค่าเท่ากับ 0.18, 0.01 และ 0.02 Log_{10} MPN/100 mL และตัวอย่างกลุ่ม (ค) มีค่าเท่ากับ 0.12, 0.06 และ 0.05 Log_{10} MPN/100 mL จากการทวนสอบตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ประเภท มีค่า S_{IR} และค่า eBias ไม่เกินเกณฑ์การยอมรับ ที่ 0.5 log_{10} MPN/100 mL แสดงให้เห็นว่าห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการตรวจสอบปริมาณโคลิฟอร์ม โดยใช้วิธี Multiple Tube Fermentation ตามวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA และ WEF ซึ่งมีผลการทดสอบถูกต้องเป็นที่น่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการยื่นขอการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการทดสอบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 ได้ ดังนั้นวิธีการทดสอบด้วยเทคนิค Multiple Tube Fermentation method จึงเหมาะสมสำหรับการใช้ในระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำดื่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการประเมินและตรวจสอบการปนเปื้อนของจุลินทรีย์จากแบคทีเรียโคลิฟอร์ม ซึ่งจะช่วยให้มั่นใจได้ถึงความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาของน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำแข็ง และน้ำดิบ และมีบทบาทสำคัญในการปกป้องสุขภาพของประชาชนทั้งในระดับชุมชนและระดับประเทศ

คำสำคัญ: ระบบ ISO 16140, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความสามารถในการทำซ้ำ, การทวนสอบของวิธีวิเคราะห์

1. บทนำ (Introduction)

ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยามีบทบาทสำคัญในการควบคุมความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริโภค เพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือถูกต้องและสามารถใช้อ้างอิงได้ในระดับสากล ห้องปฏิบัติการจึงต้องดำเนินงานภายใต้ระบบคุณภาพที่สอดคล้องกับแนวทางปฏิบัติที่ดีในห้องปฏิบัติการ Good Laboratory Practice (GLP) และการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 ซึ่งเป็นข้อกำหนดทั่วไปว่าด้วยความสามารถของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ [1] การได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 ไม่เพียงแต่แสดงถึงความสามารถในการดำเนินการทดสอบอย่างถูกต้อง แต่ยังแสดงถึงระบบคุณภาพภายในห้องปฏิบัติการที่สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ มีการสอบเทียบเครื่องมืออย่างต่อเนื่อง มีการควบคุมเอกสาร และมีบุคลากรที่ผ่านการฝึกอบรมอย่างเหมาะสม ซึ่งล้วนแล้วแต่ส่งเสริมความเชื่อมั่นจากหน่วยงานกำกับดูแล อุตสาหกรรม และผู้บริโภค [2]

การทวนสอบวิธีทดสอบ (Method verification) เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 ซึ่งครอบคลุมถึงความสามารถของห้องปฏิบัติการในการดำเนินการทดสอบหรือสอบเทียบด้วยวิธีที่มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยระบุไว้ในข้อกำหนด ข้อ 7.2.1.5 ว่าห้องปฏิบัติการจะต้องทวนสอบว่าสามารถดำเนินการตามวิธีทดสอบได้อย่างถูกต้องก่อนการนำมาใช้ โดยต้องมั่นใจว่าสามารถบรรลุสมรรถนะที่ต้องการและต้องจัดเก็บบันทึกของการทวนสอบระบบภายใต้ ISO/IEC 17025:2017 การทวนสอบวิธีทดสอบหมายถึงกระบวนการแสดงให้เห็นว่าวิธีที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้ (Validated method) สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้บริบทของห้องปฏิบัติการนั้น ๆ และให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสมรรถนะที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนการตรวจสอบความใช้ได้ (Validation study) การทวนสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าวิธีดังกล่าวมีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานที่ตั้งไว้และสามารถให้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ในทางปฏิบัติ [3-4] ตามเอกสารแนวทางของ APHA (1998) [5] การทวนสอบวิธีเป็นสิ่งจำเป็นแม้ว่าวิธีทดสอบนั้นจะเป็นวิธีมาตรฐาน (Standard method) ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลก็ตาม เนื่องจากสมรรถนะของวิธีสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อใช้ในบริบทของห้องปฏิบัติการที่แตกต่างกัน เช่น ความชำนาญของผู้วิเคราะห์ เครื่องมือที่ใช้ หรือสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ [6] โดยทั่วไปการทวนสอบวิธีมักประกอบด้วยการประเมินคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ความถูกต้อง (Accuracy) ความแม่นยำ (Precision) ขีดจำกัดการตรวจพบ (Limit of detection; LOD) และขีดจำกัดการรายงานผล (Limit of quantitation; LOQ) เพื่อตรวจสอบว่าวิธีทดสอบนั้นสอดคล้องกับข้อกำหนดของผู้มาใช้บริหารและมาตรฐานสากล

การตรวจสอบวิธีการทดสอบ (Method verification) ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความเหมาะสมของวิธีทดสอบที่นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ ทั้งในแง่ของความสามารถในการใช้งานจริงและความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปแล้วการตรวจสอบจะดำเนินการผ่านการเปรียบเทียบผลการดำเนินงานที่ได้จากห้องปฏิบัติการกับข้อมูลจากการศึกษาการตรวจสอบความใช้ได้ (Validation) ของวิธีการนั้น [7] มีแนวปฏิบัติสากลหลายฉบับที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบวิธี เช่น แนวทางที่จัดทำโดย Analytical Laboratory Accreditation Criteria Committee (ALACC) ภายใต้ Official Methods of Analysis of AOAC International โดยแนวทางเหล่านี้มักจะกล่าวถึงลักษณะเฉพาะของวิธีการทดสอบ เช่น ขีดจำกัดของการตรวจจับ (LOD) ขีดจำกัดของการวัดปริมาณ (LOQ) ความไว (Sensitivity) ความจำเพาะ (Selectivity) และความเป็นเส้นตรง (Linearity) [8] อย่างไรก็ตาม แนวทางข้างต้นเน้นในด้านเคมีวิเคราะห์เป็นหลักและมักไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมกับวิธีทดสอบทางจุลชีววิทยา ซึ่งมีลักษณะของความแปรปรวนและข้อจำกัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น ความไม่แน่นอนในตัวอย่างชีวภาพหรือปริมาณของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระดับต่ำหรือไม่สม่ำเสมอ เพื่อตอบสนองความจำเป็นในการตรวจสอบวิธีทดสอบทางจุลชีววิทยา ในปี ค.ศ. 2021 องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization: ISO) ได้เผยแพร่มาตรฐานฉบับใหม่คือ ISO 16140-3:2021 Microbiology of the food chain – Method validation – Part 3: Protocol for the verification of reference methods and validated alternative methods in a single laboratory [9] ซึ่งเป็นแนวทางเฉพาะที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบวิธีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาอาหารประเภทเดียว (Single food microbiology laboratory) ได้อย่างเหมาะสม [10] มาตรฐาน ISO 16140-3:2021 ให้รายละเอียดที่ชัดเจนเกี่ยวกับขั้นตอนการทวนสอบวิธีทดสอบในบริบทของห้องปฏิบัติการเดียว โดยเฉพาะสำหรับการทดสอบจุลินทรีย์ในอาหาร ซึ่งช่วยให้ห้องปฏิบัติการสามารถประเมินสมรรถนะของวิธีทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้มาแล้ว ว่ายังคงมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในบริบทปัจจุบัน

การวิเคราะห์ปริมาณของแบคทีเรียในแหล่งน้ำตามธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ถือเป็นดัชนีสำคัญที่ใช้บ่งชี้ความสะอาดและความเป็นไปได้ของการปนเปื้อนจากของเสียของมนุษย์และสัตว์ ในบรรดาแบคทีเรียเหล่านี้ แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform Bacteria; TCB) เป็นดัชนีมาตรฐานนิยมในการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับการปนเปื้อนของเชื้อจากอุจจาระและสภาพแวดล้อมที่ไม่ถูกสุขลักษณะ [11] แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มเป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram-negative bacteria) รูปร่างแท่ง (Rod-shaped) ที่สามารถเจริญได้ทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobes) และมีความสามารถในการหมักน้ำตาลแลคโตสได้ แบคทีเรียกลุ่มนี้มักพบในระบบทางเดินอาหารของสัตว์เลือดอุ่น รวมถึงมนุษย์และในอุจจาระของสิ่งมีชีวิตเหล่านั้น นอกจากนี้โคลิฟอร์ม (Coliform) บางชนิดยังสามารถพบได้ตามธรรมชาติในดิน น้ำ และพืช ซึ่งทำให้การตรวจพบแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดของการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง [12] โดยทั่วไปแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform Bacteria; FCB) เป็นโคลิฟอร์มที่สามารถทนความร้อนได้และพบเฉพาะในระบบทางเดินอาหารและอุจจาระของสัตว์เลือดอุ่น แบคทีเรียในสกุล *Escherichia* โดยเฉพาะ *E. coli* เป็นตัวแทนที่สำคัญที่สุดของกลุ่มนี้ และถูกใช้เป็นดัชนีที่ชี้ให้เห็นถึงการปนเปื้อนของอุจจาระในระยะเวลาใกล้เคียงกับเวลาตรวจวัด [13] โคลิฟอร์มที่ไม่ใช่ฟีคัล (non-Fecal Coliform Bacteria) เป็นกลุ่มโคลิฟอร์มที่พบตามธรรมชาติในดินและพืช ตัวอย่างสกุลที่สำคัญ ได้แก่ *Enterobacter* และ *Citrobacter* ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มโคลิฟอร์มจากสิ่งแวดล้อม แม้จะไม่ใช่ตัวชี้วัดโดยตรงของการปนเปื้อนจากอุจจาระ แต่ก็สามารถสะท้อนถึงความเสี่ยงด้านสุขลักษณะได้เช่นกัน เนื่องจากแบคทีเรียโคลิฟอร์มมีความง่ายในการตรวจวัดและมีความสัมพันธ์กับการปรากฏของเชื้อก่อโรค จึงทำให้แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์มยังคงเป็นพารามิเตอร์หลักในแนวทางการประเมินคุณภาพน้ำดื่มในระดับสากล ซึ่งรวมถึงข้อกำหนดจากองค์การอนามัยโลก (WHO) และหน่วยงานด้านสาธารณสุขของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก [14]

การตรวจหาแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์ม เป็นการตรวจหาแบคทีเรียที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสะอาดของน้ำ วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม คือ วิธีการหมักแบบหลายหลอด (Multiple-tube Fermentation technique) เป็นการตรวจหาโคลิฟอร์มเชิงปริมาณเพื่อหาความหนาแน่นของโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำและประเมินผ่านตาราง Most Probable Number (MPN) ซึ่งเป็นค่าจากการทดลองและคำนวณผลทางสถิติที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการประมาณจำนวนของจุลินทรีย์ที่มีชีวิตในตัวอย่าง

โดยเฉพาะในกรณีที่จำนวนจุลินทรีย์อยู่ในระดับต่ำหรือไม่สามารถนับจำนวนได้โดยตรงจากการเพาะเลี้ยงแบบปกติ วิธีนี้นิยมใช้ในงานวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาของน้ำดื่ม น้ำเสีย อาหาร และสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสามารถให้ค่าประมาณของปริมาณจุลินทรีย์ได้แม้ในกรณีที่จุลินทรีย์ไม่สามารถแยกออกเป็นโคโลนีชัดเจนบนอาหารวุ้น [15]

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มในน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท น้ำแข็ง และน้ำดิบ ด้วยวิธี Multiple-tube Fermentation ให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง และ 2) เพื่อทวนสอบความถูกต้องและความแม่นยำของวิธี Multiple-tube Fermentation ในการวิเคราะห์แบคทีเรียโคลิฟอร์มในตัวอย่างน้ำประเภทต่าง ๆ ด้วยวิธีการประเมินค่าเอนเอียงของผลการวัดโดยประมาณ (eBias) ของวิธีทดสอบตามแนวทางมาตรฐาน ISO 16140-3:2021 ซึ่งจะช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์และสนับสนุนมาตรการควบคุมคุณภาพด้านความปลอดภัยของน้ำบริโภคในระดับห้องปฏิบัติการ

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

2.1.1 สำหรับตัวอย่างน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำดิบ (น้ำที่ยังไม่ผ่านกระบวนการบำบัด เช่น น้ำจากแม่น้ำ ลำคลอง แหล่งน้ำใต้ดิน หรือน้ำบาดาล ซึ่งมักนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม) น้ำประปา ตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร (น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตอาหารโดยตรง เช่น การล้างวัตถุดิบ ล้างอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์อาหาร) และตัวอย่างน้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนมีนาคม ถึง เมษายน พ.ศ. 2567 โดยให้เขย่าให้เข้ากันหลาย ๆ ครั้ง หรือเขย่าในแนวระนาบเดียวกันไม่น้อยกว่า 25 ครั้ง หากน้ำเต็มภาชนะให้เทออกเพื่อให้มีพื้นที่พอสำหรับทำการจะเขย่าตัวอย่างให้เข้ากัน แล้วให้กรองตัวอย่างปริมาตร 100 mL (ดังแสดงในตารางที่ 1)

2.1.2 สำหรับตัวอย่างน้ำแข็ง ให้เตรียมตัวอย่างโดยชะก้อนน้ำแข็งด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อจากนั้นเปลี่ยนถุงโดยใช้ถุงปลอดเชื้อสวมทับ 2 ชั้น ทุบน้ำแข็งให้เป็นก้อนเล็ก ๆ อย่างเบามือรอจนกระทั่งน้ำแข็งละลายหรือทำให้ละลายที่อุณหภูมิ 2-5 °C ภายใน 18 ชั่วโมง หรือละลายตัวอย่างที่อุณหภูมิน้อยกว่า 45 °C ไม่เกิน 15 นาที จากนั้นผสมตัวอย่างให้เข้ากันก่อน เพื่อใช้กรองตัวอย่างในปริมาตร 100 mL

2.1.3 สำหรับน้ำแข็งหลอด น้ำแข็งก้อนขนาดเล็ก ให้เตรียมตัวอย่างโดยการทำให้ละลายที่อุณหภูมิ 25 °C ภายใน 18 ชั่วโมง หรือละลายตัวอย่างที่อุณหภูมิน้อยกว่า 45 °C ไม่เกิน 15 นาที จากนั้นผสมตัวอย่างให้เข้ากันเพื่อใช้กรองตัวอย่างปริมาตร 100 mL

ตารางที่ 1 ที่มาของแหล่งตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างน้ำ	กระบวนการปรับสภาพเส้นใย
ตัวอย่างน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท ตัวอย่างน้ำแข็ง	ตัวอย่างจากผู้ประกอบการผลิตโรงน้ำดื่มเชิงพาณิชย์และห้างสรรพสินค้า
น้ำดิบ	ตัวอย่างจากลำคลอง และแหล่งน้ำใต้ดิน
น้ำประปา	ตัวอย่างจากน้ำประปาในพื้นที่ที่ทำการศึกษา
น้ำสัมผัสอาหาร	ตัวอย่างจากโรงงานผลิตอาหาร
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI)	ตัวอย่างจากห้องปฏิบัติการ

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ TOMY รุ่น SX-700

2.2.2 ตู้บ่มเชื้อ (Incubator) ยี่ห้อ Binder รุ่น BD-400

2.2.3 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น Quintix 6100-15 TOP ความละเอียด 0.1 mg

2.2.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ยี่ห้อ SI Analytics รุ่น Lab885

2.2.5 ปิเปตอัตโนมัติขนาด 1-10 mL และขนาด 10-100 µL ยี่ห้อ Eppendorf รุ่น Research plus

2.2.6 ตู้ปลอดเชื้อ (Safety Cabinet Class II) ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น 1300 Series A2

2.2.7 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น GP20

2.2.8 เครื่องเขย่า (Vortex mixer) ยี่ห้อ OniLab รุ่น MX-S

2.2.9 Loop เขี่ยเชื้อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 µL

2.2.10 กระบอกตวงแบบแก้ว (Cylinder) ขนาด 1,000 mL และ 50 mL

2.2.11 เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติ (Auto dispenser) ยี่ห้อ Brad รุ่น Dispensette-s

2.2.12 ขวดฝาเกลียวขาด 16x20 mm ที่ผ่านการตรวจสอบสารตกค้างและปราศจากเชื้อ

2.2.13 จานเพาะเลี้ยงปลอดเชื้อ (Petri dish) ที่ผ่านการตรวจสอบสารตกค้างและปราศจากเชื้อ

2.2.14 หลอดดักก๊าซ Durham tube

2.3 อาหารเลี้ยงเชื้อ

2.3.1 Lauryl Tryptose broth (LST) ความเข้มข้น 2 เท่า ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

2.3.2 Brilliant Green Lactose Bile broth 2% (BGLB) ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

2.3.3 EC-MUG medium ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

2.3.4 Tryptic Soy Agar (TSA) ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

2.3.5 Tryptic Soy Broth (TSB) ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

2.3.6 MacConkey Agar ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

2.4 การเตรียมเชื้อมาตรฐาน

2.4.1 นำเชื้อมาตรฐานกลุ่มที่ 1 [*Escherichia coli* (ATCC 25922), *Klebsiella aerogenes* (ATCC 13048)], กลุ่มที่ 2 [*Escherichia coli* (ATCC 25922), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212)] และกลุ่มที่ 3 [*Escherichia coli* (ATCC 25922), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212) และ *Klebsiella aerogenes* (ATCC 13048)] จาก Stock culture มา Streak ลงบนอาหาร Tryptic Soy Agar (TSA) บ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง เลือกโคโลนีเดี่ยวที่ได้มาเพาะเลี้ยงลงใน Tryptic Soy Broth (TSB) ปริมาตร 50 mL บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง

2.4.2 เมื่อครบกำหนดนำ Tryptic Soy Broth (TSB) มาทำการเจือจางในสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffered water) ตั้งแต่ 10^{-1} จนถึง 10^{-8} และทำการนับปริมาณเชื้อในช่วงการเจือจางด้วยเทคนิค Pour plate ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) นำไปบ่มที่ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง

2.4.3 นับจำนวนโคโลนีบน PCA และหาปริมาณเชื้อตั้งต้น (cfu/mL)

2.4.4 ทำการเจือจางเชื้อตั้งต้นของแต่ละกลุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ให้ได้ปริมาณเชื้อรวมกันประมาณ 35-75 cfu/400 mL

2.5 วิธีวิเคราะห์

2.5.1 การวิเคราะห์โคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยวิธี Multiple Tube Fermentation technique เพื่อการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement)

2.5.1.1 ตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนกลุ่มโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 1 ตัวอย่าง ปริมาตร 400 mL ผู้ทดสอบแบ่งตัวอย่างเอง คนละ 200 mL

2.5.1.2 ตัวอย่างเติมเชื้อ ผู้รับผิดชอบเตรียมตัวอย่าง อย่างน้อยปริมาตร 1,000 mL ผู้ทดสอบแบ่งตัวอย่างเองคนละ 400 mL จากนั้นผู้รับผิดชอบเติมเชื้อโดยแบ่งเชื้อดังนี้

กลุ่มที่ 1 *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Klebsiella aerogenes* (ATCC 13048)

กลุ่มที่ 2 *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212)

กลุ่มที่ 3 *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212) และ *Klebsiella aerogenes* (ATCC 13048) ให้ได้ปริมาณเชื้อรวมกันประมาณ 35-75 cfu/400 mL

2.5.1.3 ขั้นตอน Presumptive test ปิเปตตัวอย่าง 10 mL ลงในหลอด LST broth ความเข้มข้น 2 เท่า จำนวน 10 หลอด นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 0.5 °C บ่มเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง สังเกตหลอดที่ขุ่น และเกิดก๊าซในหลอดดักก๊าซ ให้อ่านผลเป็นหลอดที่ให้ผลบวก หลอดที่ไม่ขุ่น และไม่เกิดก๊าซ ให้นำไปบ่มที่ 35 ± 0.5 °C จนครบ 48 ± 3 ชั่วโมง และอ่านผลอีกครั้ง จากนั้นนำหลอดที่ให้ผลบวกไปทดสอบต่อในขั้น Confirmed test ต่อไป

2.5.1.4 ขั้น Confirmed test เขย่าหลอด LST broth ที่ให้ผลบวกให้เข้ากัน แล้วถ่ายเชื้อแต่ละหลอด 1 loop ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ BGLB broth หลอดต่อหลอด บ่มเพาะเชื้อที่ 35 ± 0.5 °C เป็นเวลา 48 ± 3 ชั่วโมง สังเกตหลอด BGLB broth ที่ขุ่น และเกิดก๊าซในหลอดดักก๊าซ ให้อ่านผลเป็นหลอดที่ให้ผลบวก บันทึกผลการตรวจวิเคราะห์ แล้วนำจำนวนหลอด BGLB broth ที่ให้ผลบวกไปอ่านค่าจากตาราง Most Probable Number (MPN) ดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อรายงานผลเป็นค่า MPN/100 mL

2.5.2 การวิเคราะห์โคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยวิธี Multiple Tube Fermentation technique เพื่อการประมาณค่า Estimated bias (eBias)

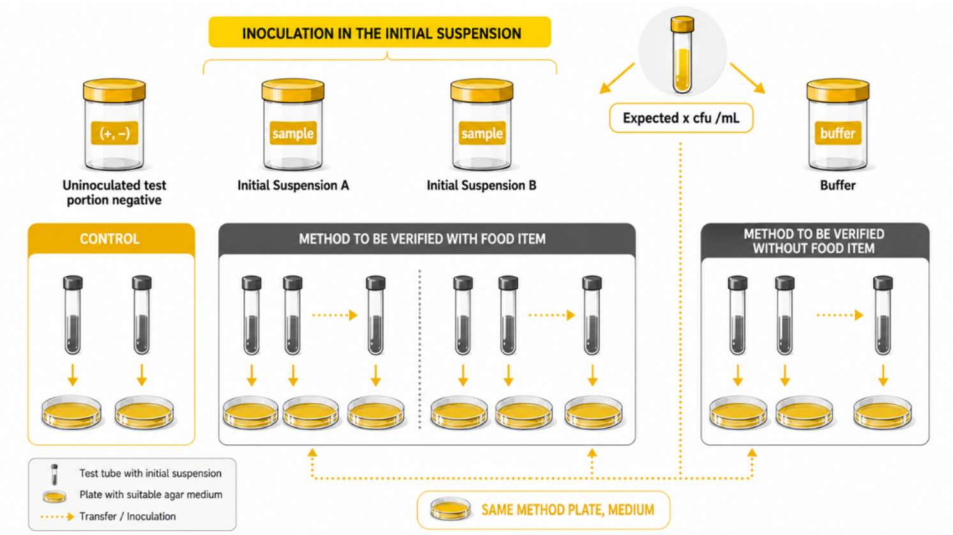
2.5.2.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative microbiological methods) ตามมาตรฐาน ISO 16140-3:2021 ได้กล่าวถึง non-Challenging food item และ Challenging food item เพื่อใช้ในการยืนยัน (Verification) วิธีการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผู้ใช้งาน (User laboratory) ต้องเลือกให้ครอบคลุมตามขอบเขตของวิธี (Scope of the method / Scope of validation) โดยทางห้องปฏิบัติการได้เลือกน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ตัวอย่างน้ำประปา และตัวอย่าง น้ำ DI เป็นตัวอย่างที่ไม่ท้าทายจากกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในขอบข่ายของวิธีอ้างอิงและอยู่ในขอบข่ายการทดสอบของห้องปฏิบัติการ (non-Challenging food item) และเลือกตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร และน้ำแข็ง เป็นตัวอย่างที่ท้าทายจากกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในขอบข่ายของวิธีอ้างอิงและอยู่ในขอบข่ายการทดสอบของห้องปฏิบัติการ (Challenging food item) กำหนดให้ 1 ตัวอย่างวิเคราะห์โดยผู้ทดสอบ 2 คน (คนที่ 1 กำหนดเป็น A และคนที่ 2 กำหนดเป็น B) ซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยระดับการปนเปื้อนของเชื้อในตัวอย่าง และสารละลายให้เลือก 3 ระดับ คือ ต่ำ กลาง สูง โดยเจือจางเชื้อให้ครอบคลุมปริมาณที่พบในการทดสอบในงานประจำ และทำระดับละ 2 ซ้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1

2.5.2.2 ตัวอย่างน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท น้ำดิบ น้ำแข็ง น้ำสัมผัสอาหาร น้ำประปา และน้ำ DI ที่มีการปนเปื้อนกลุ่มโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 1 ตัวอย่าง ปริมาตร 400 mL ผู้ทดสอบแบ่งตัวอย่างเองคนละ 200 mL

2.5.2.3 ตัวอย่างน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท น้ำดิบ น้ำแข็ง น้ำสัมผัสอาหาร น้ำประปา และน้ำ DI ที่เติมเชื้อมาตรฐาน กลุ่มที่ 1, 2 และ 3 โดยผู้รับผิดชอบเตรียมตัวอย่างอย่างน้อย 1,000 mL จากนั้นผู้ทดสอบแบ่งตัวอย่างเองคนละ 400 mL และการเจือจางเชื้อมาตรฐานสำหรับเติม Spike ลงในตัวอย่างทดสอบ โดยนำเชื้อมาตรฐานตั้งต้นที่มีความเจือจาง 10^{-8} ซึ่งมีปริมาณเชื้อคาดหวัง 3 x 10^{1} cfu/mL มาทำการเจือจางด้วย Buffered water ให้อยู่ในช่วงที่พบในงานประจำ 3 ระดับ (ต่ำ กลาง สูง) ตามการทดสอบใน Protocol 1 ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนี้

(1) ระดับการปนเปื้อนระดับต่ำ ให้เตรียมสารละลายที่มีปริมาณเชื้อคาดหวัง 1.5 cfu/mL โดยเริ่มจากการปิเปตเชื้อตั้งต้นที่ 3 x 10^{1} cfu/mL มาเจือจาง แบบ Ten – Fold dilution ด้วย Buffered water จะได้ปริมาณเชื้อ 3 cfu/mL จาก นั้นเจือจางต่อให้สัดส่วนแบบ 1 ต่อ 2 โดยปิเปตเชื้อจากหลอดที่คาดว่ามีปริมาณเชื้อ 3 cfu/mL ปริมาตร 5 mL ใส่ลงใน Buffered water ปริมาตร 5 mL จะได้สารละลายที่มีปริมาณเชื้อคาดหวัง 1.5 cfu/mL

(2) ระดับการปนเปื้อนระดับกลาง เตรียมสารละลายที่มีปริมาณเชื้อคาดหวัง 10 cfu/mL โดยการเจือจาง ให้สัดส่วนแบบ 1 ต่อ 3 เริ่มจากการปิเปตเชื้อตั้งต้นที่ 3 x 10^{1} cfu/mL ปริมาตร 4 mL ใส่ลงใน Buffered water ปริมาตร 8 mL จะได้ สารละลายที่มีปริมาณเชื้อคาดหวัง 10 cfu/mL



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทวนสอบเพื่อหา Estimated bias (eBias)

(3) ระดับการปนเปื้อนระดับสูง เตรียมสารละลายที่มีปริมาณเชื้อคาดหวัง 20 cfu/mL โดยเริ่มจากการปิเปตเชื้อตั้งต้นที่ 3 x 10^2 cfu/mL มาเจือจางแบบ 1 ต่อ 3 ด้วย Buffered water จะได้สารละลายที่มีปริมาณเชื้อคาดหวัง 1 x 10^2 cfu/mL จาก นั้นเจือจางสัดส่วนแบบ 1 ต่อ 5 โดยปิเปตเชื้อจากหลอดที่คาดว่ามีปริมาณเชื้อ 1 x 10^2 cfu/mL ปริมาตร 2 mL ใส่ลงใน Buffered water ปริมาตร 8 mL จะได้สารละลายที่มีปริมาณเชื้อคาดหวัง 20 cfu/mL

2.5.2.4 การศึกษาครั้งนี้ เป็นการทวนสอบตามรายการ [(Food) Item Verification)] เลือกรายการที่ใช้ในการทวนสอบจากกลุ่มตัวอย่างห้องปฏิบัติการจำนวน 6 รายการ คือ ตัวอย่างน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท น้ำดิบ น้ำแข็ง น้ำสัมผัสอาหาร น้ำประปา และน้ำ DI โดยใช้ตัวอย่างปริมาตร 100 mL/ขวด จำนวน 2 ขวดต่อตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เพื่อกำหนดเป็น Test portion A (สำหรับผู้ทดสอบคนที่ 1) และ B (สำหรับผู้ทดสอบคนที่ 2) โดยผู้ทดสอบแต่ละคนทำการเติมเชื้อที่เตรียมไว้ปริมาตร 1 mL/ขวด

2.5.2.5 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์สำหรับนับจำนวนเชื้อประกอบด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ปริมาตร 100 mL ไม่เติมเชื้อ (Negative control) และสารละลายบัฟเฟอร์ปริมาตร 100 mL จำนวน 42 ขวด

2.5.2.6 ขั้นตอน Presumptive test ปิเปตตัวอย่างปริมาตร 10 mL ลงในหลอด LST broth ความเข้มข้น 2 เท่า จำนวน 10 หลอด นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 0.5 °C บ่มเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง สังเกตหลอดที่ขุ่น และเกิดก๊าซ ในหลอดดักก๊าซ ให้อ่านผลเป็นหลอดที่ให้ผลบวก หลอดที่ไม่ขุ่นและไม่เกิดก๊าซให้นำไปบ่มที่ 35 ± 0.5 °C จนครบ 48 ± 3 ชั่วโมง และอ่านผลอีกครั้ง จากนั้นนำหลอดที่ให้ผลบวกไปทดสอบต่อในขั้น Confirmed test ต่อไป

2.5.2.7 ขั้น Confirmed test เขย่าหลอด LST broth ที่ให้ผลบวกให้เข้ากัน แล้วถ่ายเชื้อจากแต่ละหลอดปริมาตร 1 loop ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ BGLB broth หลอดต่อหลอด บ่มเพาะเชื้อที่ 35 ± 0.5 °C เป็นเวลา 48 ± 3 ชั่วโมง สังเกตหลอด BGLB broth ที่ขุ่นและเกิดก๊าซในหลอดดักก๊าซ ให้อ่านผลเป็นหลอดที่ให้ผลบวก บันทึกผลการตรวจวิเคราะห์ แล้วนำจำนวนหลอด BGLB broth ที่ให้ผลบวกไปอ่านค่าจากตาราง Most Probable Number (MPN) ดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อรายงานผลเป็นค่า MPN/100 mL

2.5.2.8 ดำเนินการทดสอบตาม ข้อ 2.5.2.6 และข้อ 2.5.2.7 จากนั้นประเมินผลการทดสอบจากผลตัวอย่างที่ไม่เติมเชื้อ (Negative control) ต้องได้ผลเป็นลบเท่านั้นหากเป็นบวกจะถือว่าการทดสอบครั้งนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้ถ้ามีผลเป็นลบให้นับจำนวนหลอดที่ให้ผลบวกจากตัวอย่างที่เติมเชื้อและสารละลายที่เติมเชื้อ Positive control เปรียบเทียบตารางเพื่ออ่านค่า MPN แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่า log (ตารางที่ 2) จากนั้นหาค่าความแตกต่างปริมาณเชื้อระหว่างตัวอย่างที่เติมเชื้อ และสารละลายที่เติมเชื้อทั้ง 3 ระดับ ซึ่งเกณฑ์การยอมรับต้องมีค่าต่างกันไม่เกิน 0.5 $\log_{10}$ cfu/mL

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement)

จากการวิเคราะห์ Coliform ด้วยวิธี Multiple Tube Fermentation technique เพื่อการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement) ซึ่งมาตรฐาน ISO 16140-3 กำหนดว่าผลการทดสอบจะต้องอยู่ในช่วง 6.9-23 MPN Index/100 mL และเกณฑ์การยอมรับได้ต้องมีค่าต่างกันไม่เกิน 0.5 $\log_{10}$ cfu/mL จากการศึกษาตัวอย่างจำนวน 21 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ก) น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำประปา และน้ำ DI ตัวอย่างน้ำ (ข) น้ำแข็ง และน้ำแข็งยูนิต ตัวอย่างกลุ่ม (ค) ตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร น้ำบาดาล และน้ำลำคลอง จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อยู่ในช่วง <1.1 ถึง >23 MPN Index/100 mL (ตารางที่ 3) และต้องตัดผลการทดสอบของตัวอย่างน้ำบางตัวอย่าง เช่น ตัวอย่าง No.1, No.10 และ No.15 เนื่องจากจำนวนหลอดที่ให้ผลเป็นบวก (Positive tube) ในขั้นตอน Confirmed test มีจำนวนน้อยกว่า 5 หลอด หรือมากกว่า 9 หลอด ซึ่งไม่สามารถนำไปคำนวณความแปรปรวนและค่า Log ได้ ดังนั้นข้อมูลผลการทดลองทั้งหมด 18 ตัวอย่าง คำเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการเดียวกัน (S_{IR}) ของการวิเคราะห์โคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำดิบ น้ำแข็ง น้ำสัมผัสอาหาร น้ำประปา และน้ำ DI พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.14 ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่า S_{IR} จากข้อมูลที่วิเคราะห์เท่ากับ 0.14 ซึ่งน้อยกว่า $2S_R$ ของข้อมูล validation report ที่มีค่าน้อยที่สุด Reproducibility standard deviation (Intermediate inoculation level) S_R = 0.18 ตาม Validation study ของ ISO 21528-2:2017 Microbiology of the food chain-Horizontal method for the detection and enumeration of *Enterobacteriaceae* - Part 2: Colony-count technique [16] ซึ่งผ่านเกณฑ์ Acceptability limit และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kemala และคณะ [17] ของดังนั้น ห้องปฏิบัติการสามารถนำผลไปประเมินใช้ในห้องปฏิบัติการต่อไปได้

3.2 การประมาณค่าการเอนเอียง Estimated bias (eBias)

เนื่องจากห้องปฏิบัติการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 16140-3:2021 Microbiology of the food chain method validation Part 3: Protocol for the verification of reference methods and validated alternative methods in a single laboratory แต่มาตรฐานดังกล่าวไม่ได้ระบุค่าความเอนเอียง (eBias) หรือความจำเพาะความเลือก (Selectivity) ที่ยอมรับได้ (Acceptance criteria) สำหรับวิธีการนั้น ๆ ห้องปฏิบัติการจึงจำเป็นต้องดำเนินการ ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยตนเอง (In-house Verification/Validation) โดยการสร้างและประเมินพารามิเตอร์ประสิทธิภาพหลัก ดังนี้ 1) eBias เพื่อประเมินความแม่นยำ (Trueness) 2) วิธี S_{IR} (Selectivity Index Ratio) เพื่อประเมินความสามารถในการจำเพาะเจาะจงต่อจุลินทรีย์เป้าหมาย โดยในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้กลุ่มสารละลายบัฟเฟอร์ (B*) เป็น Negative control เพื่อยืนยันความปลอดเชื้อของสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อยืนยันความปลอดเชื้อ (Sterility check) หากพบการเจริญในกลุ่ม B* ชุดการทดลองนั้นจะถูกปฏิเสธ (Rejected) และไม่นำไปคำนวณค่า eBias จากการศึกษาค่า Estimated bias (eBias) ของการวิเคราะห์โคลิฟอร์มแบคทีเรีย น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท

ตารางที่ 2 ค่า MPN, 95% Confidence Limits, และค่า $\log_{10}$ MPN สำหรับผลบวก และผลลบเมื่อใช้ตัวอย่าง 10 mL จำนวน 10 หลอด

No. of Positive tubes (10 mL Each)	MPN Index/100 mL	95% Confidence Limits (Exact)		$\log_{10}$ MPN
		Lower	Upper	
0	<1.1	-	3.4	NA
1	1.1	0.051	5.9	0.0414
2	2.2	0.37	8.2	0.3424
3	3.6	0.91	9.7	0.5563
4	5.1	1.6	13	0.7076
5	6.9	2.5	15	0.8388
6	9.2	3.3	19	0.9638
7	12	4.8	24	1.0792
8	16	5.8	34	1.2041
9	23	8.1	53	1.3617
10	>23	13	-	NA

น้ำดิบ น้ำแข็ง และตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร น้ำ DI ด้วยวิธี Multiple Tube Fermentation technique โดยแสดงตามตารางที่ 6 การคำนวณหาค่าของ eBias ที่ระดับการปนเปื้อนระดับสูง ระดับกลาง และระดับต่ำ คือ 20, 10 และ 1 CFU/mL ตามลำดับ พบว่าผลการประมาณ eBias ในตัวอย่างน้ำ 3 กลุ่ม ตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ก) น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำประปา และน้ำ DI ตัวอย่างน้ำ (ข) น้ำแข็ง และน้ำแข็งยูนิต และตัวอย่างกลุ่ม (ค) ตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร น้ำบาดาล และน้ำลำคลอง ดังตารางที่ 7 โดยผลการทดสอบค่าตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ก) มีค่า eBias value เท่ากับ 0, 0.3 และ 0.05 ตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ข) มีค่า eBias value 0.18, 0.01 และ 0.02 และตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ค) มีค่า eBias value 0.12, 0.06 และ 0.05 ตาม ISO16140-3:2021 กำหนดให้ Acceptability limit คือ ค่า Absolute difference (eBias) ต้องไม่เกิน 0.5 $\log_{10}$ ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยวิธี Multiple Tube Fermentation technique ที่ถูกทวนสอบจึงสามารถนำไปใช้ได้อย่างถูกต้องในห้องปฏิบัติการที่ทำการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 3 แสดงการคำนวณ S_{IR} ของ MPN Coliforms ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา

No.	Laboratory sample (i)*	Sample type**	Test portion (j)	No. Positive tube	Coliforms MPN resultin 100 mL (x_{ij})
1	1	น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท	A	3	3.6
	1		B	3	3.6
2	2	น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท	A	5	6.9
	2		B	9	23
3	3	น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท	A	5	6.9
	3		B	5	6.9
4	4	น้ำแข็ง	A	8	16
	4		B	7	12
5	5	น้ำแข็ง	A	7	12
	5		B	6	9.2
6	6	น้ำแข็ง	A	6	9.2
	6		B	5	6.9
7	7	น้ำสัมผัสอาหาร	A	6	9.2
	7		B	5	6.9
8	8	น้ำสัมผัสอาหาร	A	5	6.9
	8		B	7	12
9	9	น้ำสัมผัสอาหาร	A	6	9.2
	9		B	7	12
10	10	น้ำ DI	A	0	<1.1
	10		B	0	<1.1
11	11	น้ำ DI	A	6	9.2
	11		B	8	16
12	12	น้ำ DI	A	7	12
	12		B	8	16
13	13	น้ำประปา	A	7	12
	13		B	6	9.2
14	14	น้ำประปา	A	6	9.2
	14		B	6	9.2

No.	Laboratory sample (i)*	Sample type**	Test portion (j)	No. Positive tube	Coliforms MPN resultin 100 mL (x_{ij})
15	15	น้ำประปา	A	10	>23
	15		B	10	>23
16	16	น้ำแข็งยูนิต	A	7	12
	16		B	5	6.9
17	17	น้ำแข็งยูนิต	A	7	12
	17		B	5	6.9
18	18	น้ำแข็งยูนิต	A	6	9.2
	18		B	5	6.9
19	19	น้ำบาดาล	A	8	16
	19		B	8	16
20	20	น้ำบาดาล	A	8	16
	20		B	9	23
21	21	น้ำบาดาล	A	8	16
	21		B	9	23

*Laboratory sample (i) หมายถึง ตัวเลขแสดงลำดับตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

**Test portion (j) หมายถึง ผู้ทดสอบตัวอย่างโดย A คือผู้ทดสอบคนที่ 1 และ B คือผู้ทดสอบคนที่ 2

ตารางที่ 4 การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการเดียวกัน (S_{IR})

No.	Laboratory sample	Sample type	Test portion (j)	No. Positive tube	Coliforms MPN result in 100 mL	Log_{10} coliforms MPN/ 100 mL $y_{ij} = log\ 10\ (x_{ij})$	Difference log_{10} coliforms MPN/ 100 mL $y_{iA} - y_{iB}$	Squared differences $(y_{iA} - y_{iB})^2$
1	2	น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท	A	5	6.9	0.8388	0.5229	0.2734
	2		B	9	23	1.3617		
2	3	น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท	A	5	6.9	0.8388	0.0000	0.0000
	3		B	5	6.9	0.8388		
3	4	น้ำแข็ง	A	8	16	1.2041	-0.1249	0.0156
	4		B	7	12	1.0792		
4	5	น้ำแข็ง	A	7	12	1.0792	-0.1154	0.0133
	5		B	6	9.2	0.9638		
5	6	น้ำแข็ง	A	6	9.2	0.9638	-0.1250	0.0156
	6		B	5	6.9	0.8388		
6	7	น้ำสัมผัสอาหาร	A	6	9.2	0.9638	-0.1250	0.0156
	7		B	5	6.9	0.8388		
7	8	น้ำสัมผัสอาหาร	A	5	6.9	0.8388	0.2404	0.0578
	8		B	7	12	1.0792		

No.	Laboratory sample	Sample type	Test portion (j)	No. Positive tube	Coliforms MPN result in 100 mL	Log_{10} coliforms MPN/ 100 mL $y_{ij} = log\ 10\ (x_{ij})$	Difference log_{10} coliforms MPN/ 100 mL $y_{iA} - y_{iB}$	Squared differences $(y_{iA} - y_{iB})^2$
8	9	น้ำสัมผัสอาหาร	A	6	9.2	0.9638	0.1154	0.0133
	9		B	7	12	1.0792		
9	11	น้ำ DI	A	6	9.2	0.9638	0.2403	0.0577
	11		B	8	16	1.2041		
10	12	น้ำ DI	A	7	12	1.0792	0.1249	0.0156
	12		B	8	16	1.2041		
11	13	น้ำประปา	A	7	12	1.0792	-0.1154	0.0133
	13		B	6	9.2	0.9638		
12	14	น้ำประปา	A	6	9.2	0.9638	0.0000	0.0000
	14		B	6	9.2	0.9638		
13	16	น้ำแข็งยูนิต	A	7	12	1.0792	0.2404	0.0578
	16		B	5	6.9	0.8388		
14	17	น้ำแข็งยูนิต	A	7	12	1.0792	0.2404	0.0578
	17		B	5	6.9	0.8388		
15	18	น้ำแข็งยูนิต	A	6	9.2	0.9638	0.1250	0.0156
	18		B	5	6.9	0.8388		
16	19	น้ำบาดาล	A	8	16	1.2041	0.0000	0.0000
	19		B	8	16	1.2041		
17	20	น้ำบาดาล	A	8	16	1.2041	-0.1576	0.0248
	20		B	9	23	1.3617		
18	21	น้ำลำคลอง	A	8	16	1.2041	-0.1576	0.0248
	21		B	9	23	1.3617		
							SUM =	0.6624
							0.6624/(2x18) =	0.0184
							$S_{IR}\sqrt{0.0184}$ =	0.14

ตารางที่ 5 ผลของค่า S_{IR} เปรียบเทียบกับค่า S_R จาก ISO 21528-2:2017

Food item	S_{IR} Value	The mean value of SR ISO 21828-2:2017
Pasteurized Milk	0.14	0.18
Acceptance Criteria		$S_{IR} \leq 2 \times 0.18$ $0.14 < 0.36$ (Comply with the requirement)

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแสดงค่าเฉลี่ย และ $\log_{10}$ ของ ผลการทดสอบหาปริมาณ Coliforms (MPN/100 mL) และแสดงค่า Estimated bias (eBias)

Infection concentration level	Test portion	Test results			eBias = $\lvert\bar{y}_{item} - \bar{y}_{control}\rvert$	Acceptance results
		Coliforms MPN result in 100 mL	Mean	$\bar{y}$= $\log_{10}$ Mean MPN/100 ml		
Low (B*) (1 cfu/mL)	A	1.1	1.65	0.22	0.00	pass
	B	2.2				
Intermediate (B*) (10 cfu/mL)	A	6.9	8.05	0.90	0.00	pass
	B	9.2				
High (B*) (20 cfu/mL)	A	23	17.50	1.24	0.00	pass
	B	12				
Low (ก) (1 cfu/mL)	A	1.1	1.65	0.22	0.00	pass
	B	2.2				
Intermediate (ก) (10 cfu/mL)	A	16	16.00	1.20	0.30	pass
	B	16				
High (ก) (20 cfu/mL)	A	23	19.50	1.29	0.05	pass
	B	16				
Low (ข) (1 cfu/mL)	A	1.1	1.10	0.04	0.18	pass
	B	1.1				
Intermediate (ข) (10 cfu/mL)	A	6.9	8.05	0.91	0.01	pass
	B	9.2				
High (ข) (20 cfu/mL)	A	16	16.00	1.20	0.02	pass
	B	16				
Low (ค) (1 cfu/mL)	A	2.2	2.20	0.34	0.12	pass
	B	2.2				
Intermediate (ค) (10 cfu/mL)	A	9.2	9.20	0.96	0.06	pass
	B	9.2				
High (ค) (20 cfu/mL)	A	16	19.50	1.29	0.05	pass
	B	23				
uninoculated	<1.1					

โดยที่ $\bar{y}_{item}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากตัวอย่างน้ำที่เติมเชื้อ (Inoculated/Spiked Food Item) ที่แปลงเป็นค่า $\log_{10}$

$\bar{y}_{control}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากสารละลายบัฟเฟอร์ที่เติมเชื้อ (Positive Control/Reference Value) ที่แปลงเป็นค่า $\log_{10}$

ตารางที่ 7 ค่า eBias ตัวอย่างน้ำ (Food Item Verification)

Food Item	eBias value		
	Low	Medium	High
ตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ก) น้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำประปา และน้ำ DI	0.00	0.30	0.05
ตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ข) น้ำแข็ง และน้ำแข็งยูนิต	0.18	0.01	0.02
ตัวอย่างน้ำกลุ่ม (ค) ตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร น้ำบาดาล และน้ำลำคลอง	0.12	0.06	0.05

4. สรุป (Conclusion)

จากการหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดเชิงเทคนิค Technical uncertainty และการทวนสอบความใช้ได้ของวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและ *Escherichia coli* ในน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำดิบ น้ำแข็ง และตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร และน้ำ DI โดยอาศัยวิธี Multiple Tube Fermentation (MTF) ตามมาตรฐาน APHA (2017) ซึ่งตัวอย่างน้ำที่นำมาใช้ในการทวนสอบเป็นการสุ่มเก็บจากพื้นที่ศึกษา และได้มีการเติมเชื้ออ้างอิงในระดับความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับสูง ระดับกลาง และระดับต่ำ เพื่อตรวจสอบความสามารถของห้องปฏิบัติการในการดำเนินการตามวิธีทดสอบดังกล่าวกระบวนการทวนสอบดำเนินการภายใต้แนวทางของมาตรฐาน ISO 16140-3:2021 ซึ่งเป็นแนวปฏิบัติสำหรับการทวนสอบวิธีที่ยังไม่ผ่านการรับรองในห้องปฏิบัติการเดียว (Single-laboratory verification) โดยใช้ค่าความเอนเอียงโดยประมาณ Estimated bias (eBias) เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของวิธีทดสอบ ผลการทวนสอบพบว่าในตัวอย่างในน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิท น้ำดิบ น้ำแข็ง ตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร และน้ำ DI มีค่าการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการเดียวกัน S_{IR} เท่ากับ 0.14 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การทวนสอบวิธีทดสอบทางจุลชีววิทยา (Verification of microbiological method) เป็นการทดสอบเชิงปริมาณแบบ non–Validated reference method ซึ่งน้อยกว่า $2S_R$ ของข้อมูล ที่มีค่าน้อยสุด จึงผ่านเกณฑ์ Acceptability limit และค่า eBias ทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นกลุ่มตัวอย่าง (ก), (ข) และ (ค) ที่ระดับความเข้มข้นของเชื้อต่ำ กลาง และสูง มีค่าความเอนเอียงที่ได้ทั้งหมดอยู่ภายใต้เกณฑ์การยอมรับ (Acceptability limit) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.5 $\log_{10}$ MPN/100 mL (ISO 16140-3:2021) แสดงให้เห็นว่าห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการทดสอบตามวิธีการดังกล่าวได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ ผลการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับค่าจริงของปริมาณเชื้อที่เติมในตัวอย่าง ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำและความเที่ยงตรงของกระบวนการวิเคราะห์

ดังนั้น วิธีการ Multiple Tube Fermentation technique นี้สามารถนำไปใช้ในระบบเฝ้าระวังด้านความปลอดภัยของน้ำบริโภค เพื่อประเมินและติดตามการปนเปื้อนของจุลินทรีย์กลุ่มโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยเสริมสร้างความมั่นใจในคุณภาพน้ำดื่ม น้ำแข็ง น้ำดิบ ตัวอย่างน้ำสัมผัสอาหาร และน้ำ DI ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการคุ้มครองสุขภาพของประชาชนในระดับชุมชนและประเทศ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้นิพนธ์บทความวิจัยขอขอบคุณ (1) ศูนย์ทดสอบทางวิทยาศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ (2) ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา สาขาวิชาปรีคลินิก สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (3) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และ (4) กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) (NRIIS number: 160348)

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Jena GB, Chavan S. Implementation of Good Laboratory Practices (GLP) in basic scientific research: Translating the concept beyond regulatory compliance. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2017;89:20-25. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2017.07.010

[2] Anastasopoulos G. The new ISO/IEC 17025:2017. CAL LAB: The International Journal of Metrology. 2017;30-35.

[3] Trishch R, Maletska O, Hrinchenko H, Artiukh S, Burdeina V, Antonenko N. Development and validation of measurement techniques according to ISO/IEC 17025:2017. In: 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL); 2019 Sep 6–8; Sozopol, Bulgaria. p. 1-6. https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019539

[4] Mehta B. Implementing ISO/IEC 17025:2017. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press; 2019.

[5] American Public Health Association (APHA). Standard methods for the examination of water and waste water. 20th ed. Washington (DC): APHA; 1998.

[6] American Public Health Association (APHA). Standard methods for the examination of water and sewage. 2nd ed. New York: APHA; 1912.

[7] Lombard B. ISO Standardization and validation of reference testing methods—Validation of alternative methods in food microbiology. Japanese Journal of Food Microbiology. 2010;27(1):8-20. https://doi.org/10.5803/jsfm.27.8

[8] Honsa JD, McIntyre DA. ISO 17025: Practical benefits of implementing a quality system. Journal of AOAC International. 2003;86(5):1038-1044. https://doi.org/10.1093/jaoac/86.5.1038

[9] International Organization for Standardization (ISO). Microbiology of the food chain – Method validation – Part 3: Protocol for the verification of reference methods and validated alternative methods in a single laboratory. (ISO 16140-3:2021). Geneva: ISO; 2021.

[10] Lombard B, Leclercq A. Validation of innovative food microbiological methods according to the EN ISO 16140

standard. Food Analytical Methods. 2011;4:163-172. https://doi.org/10.1007/s12161-010-9154-4

[11] Paruch AM, Mæhlum T. Specific features of *Escherichia coli* that distinguish it from coliform and thermotolerant coliform bacteria and define it as the most accurate indicator of faecal contamination in the environment. Ecological Indicators. 2012;23:140-142. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.026

[12] Edberg SC, Rice EW, Karlin RJ, Allen MJ. *Escherichia coli*: The best biological drinking water indicator for public health protection. Journal of Applied Microbiology. 2000;88(S1):106S-116S. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2000.tb05338.x

[13] Leclerc H, Mossel DAA, Edberg SC, Struijk CB. Advances in the bacteriology of the coliform group: Their suitability as markers of microbial water safety. Annual Reviews of Microbiology. 2001;55:201-234. https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.201

[14] World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality: Incorporating the first and second addenda. Geneva: WHO; 2022.

[15] Ahmed T, Baidya S, Acharjee M, Rahman T. Qualitative analysis of drinking water through the most probable number (MPN) method. Stamford Journal of Microbiology. 2013;3(1):9-16. https://doi.org/ https://doi.org/10.3329/sjm.v3i1.22745

[16] International Organization for Standardization (ISO). Microbiology of the food chain - Horizontal method for the detection and enumeration of Enterobacteriaceae - Part 2: Colony-count technique. (ISO 21528-2:2017). Geneva: ISO; 2017.

[17] Nagur KS, Surati S, Sitorus AAM, Cahyaningsih E, Putri F, Wilasti Y. Implementation of ISO 16140-3:2021 for enumeration of Enterobacteriaceae in food products. Journal of Food and Drug Safety. 2023;4(1):88-96. https://doi.org/10.54384/eruditio.v4i1.195

Bulletin of Applied Sciences

Volume 15 Issue 1 January - June 2026
https://doi.org/10.60136/bas.v15.2026.4590

Research Article

Performance investigation of a transparent roof forced convection solar drying system for drying *Andrographis paniculata*

Kotchanipha Yuyen[1], Sarawut Nabnean[2*]

[1]*Division of Science Education, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand*
[2]*Division of Science, Major in Physics, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand*
[*]Corresponding author's e-mail: sarawut.n@lawasri.tru.ac.th

Received: 14 January 2026, Revised: 13 April 2026, Accepted: 15 April 2026

Abstract

This research investigated the performance of a transparent roof forced convection solar drying *Andrographis paniculata* (commonly known as "Fah Talai Jone"). The system was designed as a large-scale greenhouse with an area of 3×12 m^2. The roof structure consisted of alternating transparent and opaque corrugated metal sheets, each measuring 50×120 cm^2, while the walls were constructed from concrete blocks enclosing all four sides. The ventilation system comprised 6 fans powered by two 80 watt photovoltaic panels. In the experiment, a total of 200 kg of *Andrographis paniculata* was dried using the system between 8:00 a.m. and 6:00 p.m. The average solar radiation intensity during the experimental period was 366 W/m^2. Drying system temperature ranged from 36 - 41 °C, which is suitable for herbal processing as it prevents thermal degradation. The initial moisture content of 82% (wb) was successfully reduced to 10% (wb) within only three days. In comparison, natural sun drying achieved a final moisture content of 22% (wb). Thae solar dryer compared to natural sun drying a 40% reduction in drying time. The dried *Andrographis paniculata* obtained from the solar dryer demonstrated superior quality in terms of bioactive compound retention, color attributes, and a water activity of 0.41, which allows for extended storage stability by reducing the risk of fungal growth. Furthermore, the system effectively prevented insect infestation, rainfall interference, and dust contamination, ensuring a more hygienic and reliable drying process.

Keywords: Solar drying system, *Andrographis paniculata*, Wet basis moisture content, Water activity

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสเพื่อใช้อบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมีลักษณะเป็นโรงเรือนขนาดใหญ่ มีพื้นที่ 3×12 ตารางเมตร สำหรับหลังคาใช้หลังคาลอนเมทัลชีทแบบใสสลับกับหลังคาลอนเมทัลชีทแบบทึบแสงสลับกันแต่ละแถว ซึ่งหลังคาแต่ละแผ่นมีขนาด 50×120 ตารางเซนติเมตร ส่วนผนังเป็นอิฐบล็อกก่อขึ้นเป็นกำแพงทั้ง 4 ด้าน ระบบระบายอากาศประกอบด้วยพัดลม 6 ตัว ต่อเข้ากับแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 80 วัตต์ จำนวน 2 แผง ในการทดลองในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสในการอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรจำนวน 200 กิโลกรัม ขณะที่ทำการทดลองอบแห้งในช่วงเวลา 08.00 น. ถึง 18.00 น. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 366 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งแปรค่าอยู่ในช่วง 36 ถึง 41 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณภูมิที่มีความเหมาะสมสำหรับการแปรรูปสมุนไพรที่ไม่สูงมากเกินและสามารถอบแห้งฟ้าทะลายโจรที่มีความชื้นเริ่มต้น 82 (%wb) จนเหลือความชื้นเพียง 10 (%wb) ภายในระยะเวลาเพียง 3 วัน เมื่อเทียบกับการตากแห้งฟ้าทะลายโจรตามธรรมชาติ ซึ่งเหลือความชื้นสุดท้าย 22 (%wb) เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติแล้วสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้ 40% สำหรับสมุนไพรฟ้าทะลายโจรแห้งที่ได้จากระบบอบแห้งนั้น มีคุณภาพที่ดี ทั้งทางด้านปริมาณสารสำคัญ ผลของสี และปริมาณน้ำอิสระที่มีค่า 0.41 เป็นผลให้สามารถเก็บรักษาฟ้าทะลายโจรแห้งได้นานเนื่องจากไม่เกิดเชื้อราได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันแมลง ฝน และฝุ่นละอองได้ดี

คำสำคัญ: ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, ฟ้าทะลายโจร, ความชื้นมาตรฐานเปียก, ปริมาณน้ำอิสระ

1. บทนำ (Introduction)

ในช่วงปลายปี 2562 ที่ผ่านมาเกิดการระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 (COVID-19) อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อไวรัสโควิด-19 จำนวนมาก และผู้เสียชีวิตจากเชื้อโควิด-19 กว่า 34,000 คน [1] ในขณะเดียวกันทางองค์การอนามัยโลกจึงประกาศให้โรคติดเชื้อโควิด-19 เป็นโรคระบาด และหาแนวทางในการป้องกันและรักษาผู้ที่ติดโรคโควิด-19 ทั้งวัคซีนป้องกันและยาปฏิชีวนะเพื่อลดอาการของโรคในผู้ป่วยที่ติดเชื้อ ปัจจุบันผู้ติดเชื้อโควิด-19 ได้ลดลงอย่างมาก หรือเทียบกับการเป็นไข้หวัด แต่ก็ต้องเตรียมความพร้อมและระมัดระวังอย่างมากเมื่อเกิดการระบาดขึ้นมาอีกครั้ง สำหรับประเทศไทยมีการปลูกพืชสมุนไพรในหลายพื้นที่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในเขตภาคกลางของประเทศมีสมุนไพรพื้นถิ่นหลายชนิดเช่น ไพล ขมิ้นชัน ขิง ตะไคร้ ใบมะกรูด ฟ้าทะลายโจร เป็นต้น สมุนไพรฟ้าทะลายโจรเป็นสมุนไพรที่มีฤทธิ์เย็นและเป็นสมุนไพรที่อยู่ในบัญชียาหลักแห่งชาติ มีสรรพคุณหลักคือ ลดไข้ แก้ไอ แก้เจ็บคอ บรรเทาอาการหวัด และช่วยลดการอักเสบของระบบทางเดินหายใจ มีสารสำคัญ คือ แอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide) ช่วยต้านเชื้อไวรัสและเสริมภูมิคุ้มกัน ซึ่งเหมาะสำหรับต้านโรคโควิด-19 ซึ่งในจังหวัดลพบุรีอยู่ในเขตภาคกลางของประเทศ มีการปลูกพืชสมุนไพรเป็นจำนวนมากเช่นกัน สำหรับสมุนไพรทางเลือกที่มีฤทธิ์ต้านโรคโควิด-19 คือ ฟ้าทะลายโจรที่มีการปลูกและแปรรูปในพื้นที่จังหวัดลพบุรีในหลายพื้นที่ เป็นพืชสมุนไพรที่สามารถนำมารักษาผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 อีกทั้งการเข้าถึงสมุนไพรฟ้าทะลายโจรของคนทั่วไปในประเทศไทยยังเข้าถึงได้ง่ายและราคาไม่สูง [2] ฟ้าทะลายโจรเป็นสมุนไพรที่บรรจุอยู่ในบัญชียาสมุนไพรของกรมแพทย์แผนไทยมีสารสำคัญ คือ แอนโดรกราโฟไลด์ที่มีฤทธิ์ลดอาการปวด ต้านการอักเสบ ลดไข้ [3] ซึ่งปกติสารสำคัญนี้มีอยู่ทุกส่วนของต้นฟ้าทะลายโจร แต่จะมีมากสุดอยู่ที่บริเวณใบ พบสารในกลุ่มแลคโตน (Lactone) มีองค์ประกอบ 4 ชนิด ประกอบด้วย แอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide) นีโอแอนโดรกราโฟไลด์ (Neoandrographolide) 14-ดีออกซี-11,12-ไดดีไฮโดรแอนโดรกราโฟไลด์ (14-Deoxy-11,12-Didehydroandrographolide) และ 14-ดีออกซีแอนโดรกราโฟไลด์ (14-Deoxyandrographolide) [4] จากข้อมูลตำรามาตรฐานยาสมุนไพร (Thai Herbal Pharmacopoeia) กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ได้ระบุถึงปริมาณสาระสำคัญกลุ่มแลคโตนรวมไม่น้อยกว่าร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะต้องมีปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก [5] จึงจะเป็นสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่มีประสิทธิภาพในการรักษาโรค โดยปกติจะมีการแปรรูปเป็นฟ้าทะลายโจรแห้งก่อนจะนำมาทำเป็นยา โดยการทำให้แห้งถ้ามีความชื้นสูงก็จะทำให้เกิดเชื้อราได้ง่าย และส่งผลให้ยาที่ฟ้าทะลายโจรที่มีความชื้นสูงไม่มีคุณภาพ

วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ไร่ทหารสานประชาเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่อยู่ในเขตตำบลนิคมสร้างตนเอง อำเภอเมืองจังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่เน้นด้านการปลูกและแปรรูปพืชสมุนไพร เป็นอีกกลุ่มที่มีความสำคัญในเรื่องแนวทางผลิตสมุนไพรที่มีความสำคัญยิ่งโดยเฉพาะการผลิตฟ้าทะลายโจรแห้งส่งให้กับโรงพยาบาลในการจัดทำยาฟ้าทะลายโจรให้กับผู้ป่วยเป็นจำนวนมากและฟ้าทะลายโจรที่ผลิตในช่วงแรกเป็นฟ้าทะลายโจรที่ได้จากการตากแห้งตามธรรมชาติ ซึ่งมีการปนเปื้อนฝุ่นละอองในบรรยากาศ การเปียกฝน และความชื้นของอากาศแวดล้อมที่สูง ทำให้เกิดเชื้อราได้ง่าย และไม่มีคุณภาพส่งผลให้ไม่สามารถส่งขายให้กับโรงพยาบาลได้ ดังนั้นทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจึงได้ทำการแปรรูปด้วยเครื่องอบแห้งแบบไฟฟ้าซึ่งทำให้ฟ้าทะลายโจรที่ได้มีคุณภาพ แต่ปัญหาเรื่องของพลังงานไฟฟ้าที่ควบคุมต้นทุนได้ยาก รวมถึงปริมาณการอบแห้งแต่ละครั้งไม่เพียงพอกับความต้องการของโรงพยาบาล จึงได้ทำการปรึกษากับทางนักวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ซึ่งได้เสนอแนวทางในการใช้พลังงานทดแทนทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นพลังงานความร้อนในการอบแห้ง ซึ่งปัจจุบันระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีจำนวนมาก โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรง [6-8] ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม [9-10] ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมกล่าวคือระบบที่รับรังสีอาทิตย์โดยตรงร่วมกับระบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม [11-13] สำหรับงานงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมีการศึกษาการอบแห้งฟ้าทะลายโจรด้วยเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก สำหรับอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจร [14] เครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรงแบบเรือนกระจกอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งค่อนข้างสูง และในช่วงที่ฝนตกอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งลดต่ำลง จึงจำเป็นต้องใช้การเปิดระบบแก๊ส LPG หรือแก๊สเบิร์นเนอร์มาช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง และเปิดพัดลมไฟฟ้ากระแสสลับที่ติดตั้งไว้ผนังด้านหลังของเครื่องอบแห้งเพื่อช่วยระบายความชื้น การใช้พลังงานความร้อนเสริมในการอบแห้งดังกล่าวทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังมีการวิจัยน้อยมากสำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม ทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ไร่ทหารสานประชาได้ทำการวิจัยร่วมกับนักวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีในการร่วมกันพัฒนาระบบอบแห้ง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหลักในการทำแห้ง โดยได้ทำการออกแบบและสร้างระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส โดยได้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจร ซึ่งเป็นระบบอบแห้งแบบพาความร้อนแบบบังคับ และปิดคลุมด้วยหลังคาใสเป็นการอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรด้วยพลังงานสะอาด เพื่อลดต้นทุนในการผลิตฟ้าทะลายโจรอบแห้งให้ได้คุณภาพ และทำการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำอิสระ สี และปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจรที่ได้จากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 ปริมาณความชื้นของวัสดุ

การอบแห้ง หมายถึง กระบวนการลดความชื้นของวัสดุ (Moisture material) โดยอาศัยความร้อนเพื่อทำให้น้ำเกิดการระเหยออกจากวัสดุ ซึ่งโดยปกติผักผลไม้ หรือสมุนไพรสด จะมีปริมาณความชื้นสูง ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ค่อนข้างง่าย การอบแห้งจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งเพื่อช่วยลดความชื้นของวัสดุ ทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพ (Micro-organism) ได้ ปกติจะสามารถบอกปริมาณความชื้นของวัสดุได้ 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, wb) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, db) ซึ่งความชื้นมาตรฐานเปียก หมายถึง อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำภายในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุชื้น และความชื้นมาตรฐานแห้ง หมายถึง อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง ซึ่งความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [15]

$$M_w = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

$$M_d = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb)
M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)
m_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ (กิโลกรัม)
m_f คือ น้ำหนักวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)

2.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่นำมาใช้ในการอบแห้งหรือการระเหยความชื้นออกจากวัสดุต่อค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคา ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการระเหยน้ำของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร โดยการคำนวณนี้ถือได้ว่าเป็นการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้งที่ได้รับพลังงานจากการส่งผ่านรังสีอาทิตย์เข้ามายังภายในระบบอบแห้ง สำหรับประสิทธิภาพเชิงความร้อนนี้หาได้จากสมการที่ 3 หรือสมการที่ 4 [16]

$$\eta_s = \frac{Q}{A_s G} = \frac{\dot{m}C(T_o - T_i)}{A_s G} \times 100\% \qquad (3)$$

$$\eta_s = \frac{WL}{A_s G} \times 100\% \qquad (4)$$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่ที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (ตารางเมตร)
C คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (จูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)
G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (วัตต์ต่อตารางเมตร)
L คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (จูลต่อกิโลกรัม)
$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
Q คือ พลังงานที่นำมาใช้ในการอบแห้งหรือการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ (จูล)
T_o คือ อุณหภูมิขาออกจากระบบอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
T_i คือ อุณหภูมิขาเข้าระบบอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
W คือ มวลน้ำที่ระเหยออกจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (กิโลกรัม)
η_s คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง (%)

สำหรับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุหรือฟ้าทะลายโจรอาจหาได้จากผลต่างของมวลรวมก่อนเข้าระบบอบแห้งกับมวลแห้งที่ได้ หรือสามารถหาได้จากการคำนวณด้วยปริมาณความชื้นของฟ้าทะลายโจรที่ปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ 5 [16]

$$W = \frac{m_i(M_i - M_f)}{100 - M_f} \qquad (5)$$

โดยที่ M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของฟ้าทะลายโจร (%wb)
M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของฟ้าทะลายโจร (%wb)

นอกจากนี้สมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการทดลองนี้สามารถวัดได้จากการประหยัดเวลาในการอบแห้ง (Saving in drying time, S) [16] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 ดังนี้

$$S = \frac{(t_{OS} - t_{SD})}{t_{OS}} \times 100\% \qquad (6)$$

โดยที่ S คือ การประหยัดเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (%)
t_{OS} คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งฟ้าทะลายโจรตามธรรมชาติ (ชั่วโมง)
t_{SD} คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งฟ้าทะลายโจรด้วยระบบอบแห้ง (ชั่วโมง)

พลังงานที่ใช้ในการดึงความชื้นออกจากวัสดุชื้น เป็นในการระเหยน้ำออกจากวัสดุชื้น 1 กิโลกรัมต่อปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งหรือเรียกว่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 ดังนี้ [16]

$$SMER = \frac{W}{A_s G} \qquad (7)$$

โดยที่ SMER คือ อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง)
W คือ มวลน้ำที่ระเหยออกจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (กิโลกรัม)
A_S คือ พื้นที่ที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (ตารางเมตร
G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (วัตต์ต่อตารางเมตร)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นการหาค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้งปริมาณ 1 กิโลกรัม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8 ดังนี้ [16]

$$SEC = \frac{A_s G}{W} \qquad (8)$$

โดยที่ SEC คือ อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)
W คือ มวลน้ำที่ระเหยออกจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (กิโลกรัม)
A_S คือ พื้นที่ที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (ตารางเมตร)
G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตกกระทบหลังคา (วัตต์ต่อตารางเมตร)

2.3 การวิเคราะห์สี

การตรวจสอบคุณภาพทางด้านสีของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรอบแห้งโดยอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส ทำการตรวจสอบสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab โดยค่าสีที่วัดได้อ้างอิงตามระบบ Commission International de l'Eclairage (CIE) แสดงผลการวัดสีในรูปค่าพารามิเตอร์ของสี (L*,a*,b*) ซึ่งค่า L* เป็นการบอกถึงความสว่าง (Lightnees) โดยค่า L*=100 แสดงถึงสีขาว จนถึงค่า L*=0 แสดงถึงสีดำ สำหรับค่า a* บอกถึงความเป็นสีแดง-เขียว (Redness-Greeness) โดยค่าของ +a* แสดงถึงสีแดง และค่า -a* แสดงถึงสีเขียว ส่วนค่า b* บ่งบอกความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (Yellowness-Blueness) โดยค่า +b* บ่งบอกถึงความเป็นสีเหลือง และค่า -b* บอกถึงความเป็นสีน้ำเงิน ในปัจจุบันนิยมใช้ผลสีดังกล่าวในการบอกลักษณะของสีของวัตถุที่ทำการศึกษา สำหรับข้อมูลในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสีของฟ้าทะลายโจรอบแห้งโดยแสดงการคำนวณค่าความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนไปจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการอบแห้งหรือฟ้าทะลายโจรสด เป็นไปตามสมการที่ 9 สำหรับการคำนวณค่าความเข้มของสี (Hue angle, h) ของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรโดยใช้ค่า a* และ b* สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 10 สำหรับค่าความอิ่มตัวของสีหรือความสดของสี (Chroma, C*) คำนวณได้ตามสมการที่ 11

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^*_{ref})^2 + (a^* - a^*_{ref})^2 + (b^* - b^*_{ref})^2} \quad (9)$$

$$h = \begin{cases} \tan^{-1}(b^*/a^*) & (\text{when } a^* > 0) \\ 180° + an^{-1}(b^*/a^*) & (\text{when } a^* < 0) \end{cases} \quad (10)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (11)$$

โดยที่ ΔE คือ ค่าความแตกต่างรวมของสีของฟ้าทะลายโจร (-)

L^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกความสว่างของสีของฟ้าทะลายโจรอบแห้ง (-)

L^*_{ref} คือ ค่าพารามิเตอร์บอกความสว่างของสีของฟ้าทะลายโจรสด (-)

a^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีแดงหรือเขียวของฟ้าทะลายโจรอบแห้ง (-)

a^*_{ref} คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีแดงหรือเขียวของฟ้าทะลายโจรสด (-)

b^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินของฟ้าทะลายโจรอบแห้ง (-)

b^*_{ref} คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความเป็นสีแดงหรือเขียวของฟ้าทะลายโจรสด (-)

h คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าเฉดสีของฟ้าทะลายโจรอบแห้ง (-)

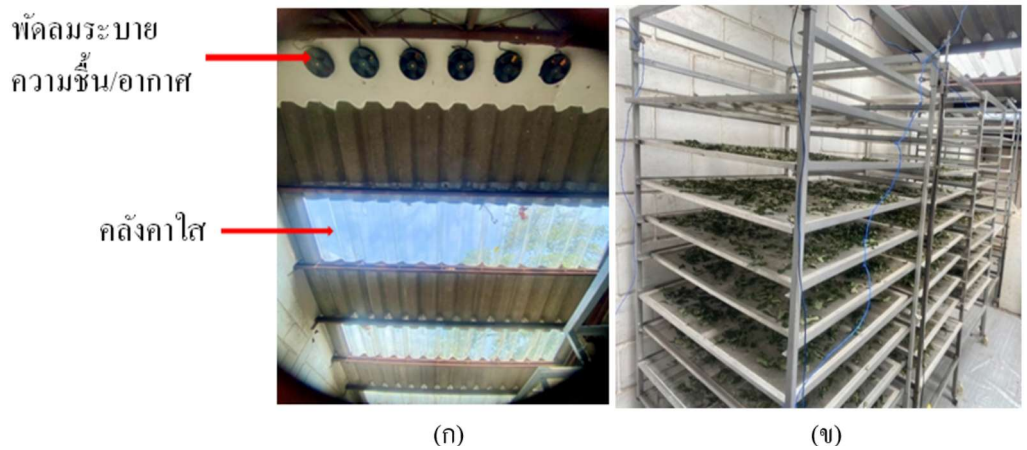
C^* คือ ค่าพารามิเตอร์บอกค่าความอิ่มตัวของสีหรือความสดของสีของฟ้าทะลายโจรอบแห้ง (-)

2.4 อุปกรณ์การทดลอง

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่และเหมาะสำหรับเป็นระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ โดยมีลักษณะโครงสร้างมุงด้วยหลังคาปิดคลุมแบบกระเบื้องลอนคู่ใสขนาด 50×120 ตารางเซนติเมตร เคลือบสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) ซึ่งมีส่วนให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบอบแห้งนั้นมีสีสดและสารสำคัญไม่ถูกทำลาย พื้นที่หลังคาทั้งหมดที่ใช้มีขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 12 เมตร ซึ่งเรียงสลับเป็นหลังคาใสครึ่งหนึ่งของหลังคากระเบื้องแบบทึบแสง ผนังห้องอบแห้งเป็นผนังอิฐบล็อก มีประตูเข้า-ออกหนึ่งทาง ภายในระบบอบแห้งสามารถใส่ชั้นวางผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 8 อัน อันละ 10 ชั้น แต่ละชั้นประกอบด้วยตะแกรงสำหรับวางผลิตภัณฑ์ โดยตะแกรงขนาดความกว้าง 0.9 เมตร ยาว 0.9 เมตร ทำด้วยมุ้งลวดซึ่งทำให้อากาศไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งได้เป็นอย่างดี บริเวณด้านหน้าของระบบอบแห้งผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งพัดลม DC 12 โวลต์ 25 วัตต์ ขนาด 6.8 นิ้ว จำนวน 6 ตัว สูงจากพื้น 3.50 เมตรโดยต่อเข้ากับแผงโซลาร์เซลล์แบบผลึกเดี่ยวขนาด 80W รุ่น CNSDPV80M จำนวน 2 แผ่น โดยต่อพัดลมจำนวน 3 ตัวต่อแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง สำหรับพัดลมที่ใช้ในระบบอบแห้งนี้ทำหน้าที่ระบายอากาศชื้นออกจากระบบอบแห้ง โดยการทดลองแต่ละครั้งสามารถรองรับการอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 1

2.5 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งฟ้าทะลายโจร โดยมีวิธีการเตรียมฟ้าทะลายโจรจากไร่ทหารสานประชา อายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 3.5 - 4.5 เดือน ซึ่งเป็นช่วงที่มีการสะสมสารแอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide) สูงสุด ปราศจากรอยโรคและการปนเปื้อนของเชื้อรา นำมาล้างน้ำให้สะอาดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนเศษดิน แล้วนำมาตัดเป็นท่อนความยาวประมาณ 3 - 4 เซนติเมตร จำนวน 200 กิโลกรัม เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลความร้อนก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง โดยเริ่มทำการทดลองตั้งแต่เวลา 08.00 - 18.00 น. ในระหว่างวันที่ทำการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยหัววัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer) ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP22 ช่วงการใช้งาน -40 องศาเซลเซียส ถึง 80 องศาเซลเซียส ค่าความคลาดเคลื่อน 1% ทำการติดตั้งบนหลังคาของระบบอบแห้ง ดังรูปที่ 2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (Thermocouples type K) ค่าความแม่นยำอยู่ที่ ±2% สำหรับวัดอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม ดังรูปที่ 3 การวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยหัววัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity Sensor) ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 ช่วงการใช้งาน -40 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส มีค่าความแม่นยำ 1.3% สำหรับวัดความชื้อสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งเทียบกับอากาศแวดล้อม ดังรูปที่ 4 ซึ่งเก็บข้อมูลเฉลี่ยทุก ๆ 10 นาที ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR8432-20 ดังรูปที่ 5 โดยที่รูปที่ 2 - 5 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากสถานที่ดำเนินการวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ได้ดำเนินการวัดอัตราการไหลของอากาศและชั่งมวลตัวอย่างของฟ้าทะลายโจรอบแห้งเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่ามวลที่ชั่งจะคงที่จึงจะหยุดการทดลอง



(ก) (ข)

รูปที่ 1 (ก) หลังคาใสปิดคลุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และพัดลมระบายความชื้น/อากาศ
(ข) ชั้นวางฟ้าทะลายโจรภายในระบบอบแห้ง



รูปที่ 2 หัววัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer)
ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP22 ติดตั้งบนหลังคาระบบอบแห้ง



รูปที่ 3 เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouples type K)
สำหรับวัดอุณหภูมิ ติดตั้งภายในเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 4 หัววัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity Sensor)
ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 ติดตั้งภายในเครื่องอบแห้งและภายนอก

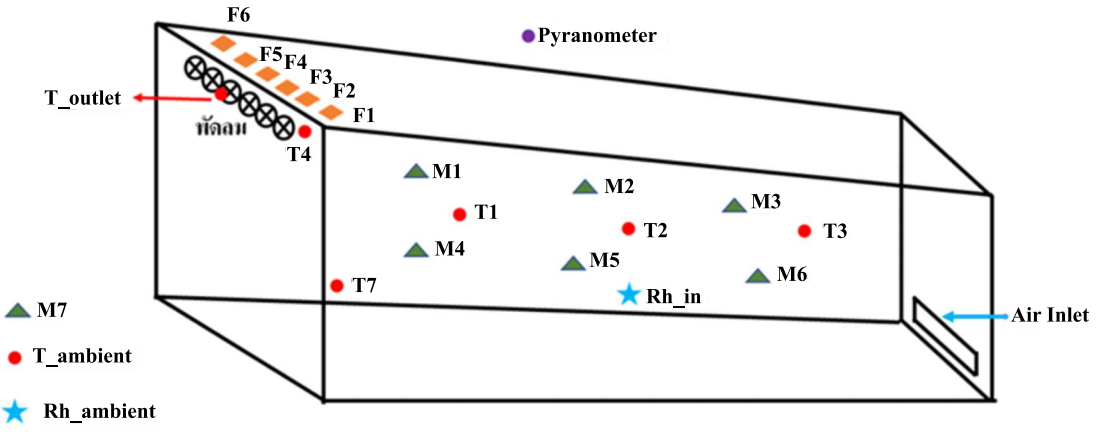


รูปที่ 5 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)
ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR8432-20

สำหรับตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ ความชื้นสันสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการไหลของอากาศและตำแหน่งมวลตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 6 หลังจากนั้นเมื่อได้ฟ้าทะลายโจรแห้งจากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ขั้นตอนถัดไปจะนำมวลฟ้าทะลายโจรแห้งที่ได้ใส่ตู้อบและตั้งอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ตามมาตรฐาน AOAC, [17]) หรือจนกว่ามวลจะไม่ลดลง

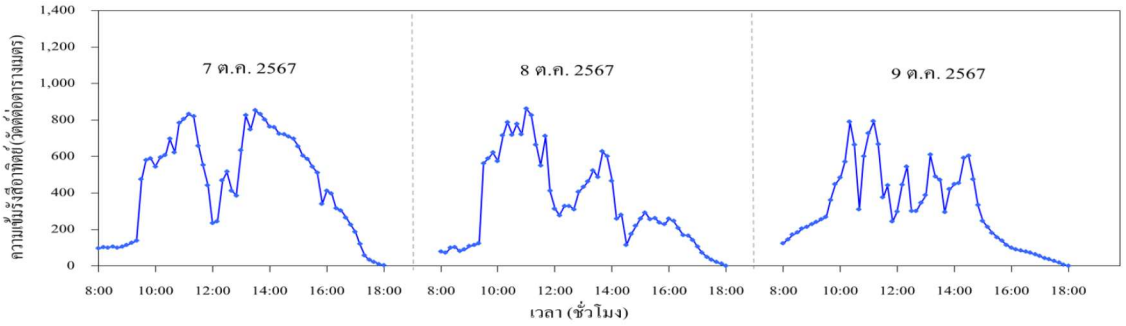
3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งฟ้าทะลายโจร โดยทำการทดลองอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบเต็มพื้นที่ตากสามารถอบแห้งฟ้าทะลายโจรได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม โดยการทดลองอบแห้งฟ้าทะลายโจรในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ท้องฟ้าเริ่มปลอดโปร่งมากขึ้น ฝนลดลง มีแดดดีเกือบตลอดทั้งวัน ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 08.00 - 18.00 น. ในขณะที่ทำการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการชั่งมวลเพื่อศึกษาอัตราการลดลงของมวลฟ้าทะลายโจรที่อบแห้งภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการวางมวลตัวอย่างไว้ภายในและภายนอกของระบบอบแห้งดังรูปที่ 6 และบันทึกอัตราการไหลของอากาศทุก ๆ 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังได้ทำการบันทึกข้อมูลของความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้ภายนอกด้านบนหลังคาของระบบอบแห้ง สำหรับอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดทั้งภายในระบบอบแห้งเทียบกับแวดล้อม เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างและการแปรค่าของผลที่ได้จากการวัดทั้งภายในระบบอบแห้งและสภาวะแวดล้อมในเวลาเดียวกัน

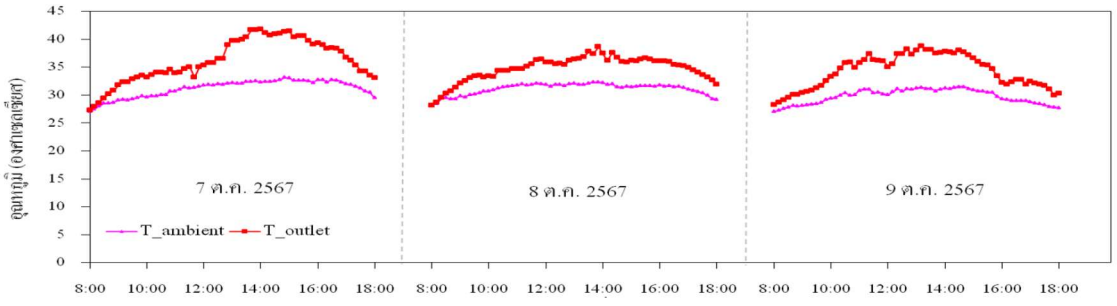


รูปที่ 6 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ (T) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Rh) ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer) และมวลตัวอย่าง (M)

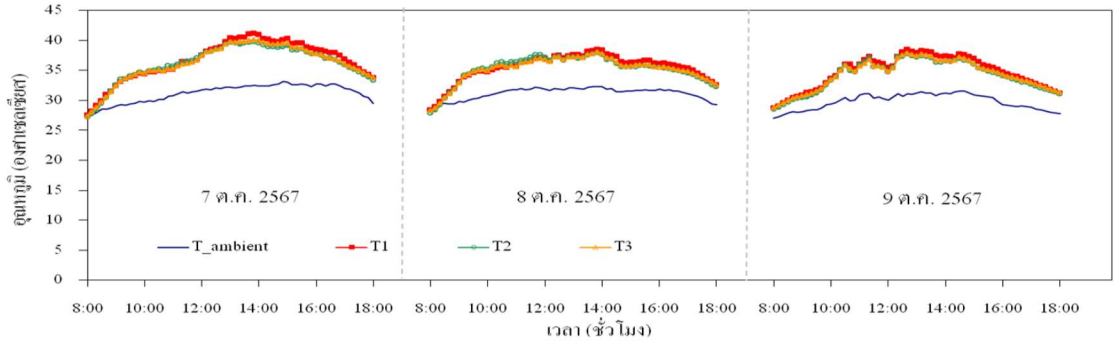
สำหรับการทดลองอบแห้งฟ้าทะลายโจรด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในช่วงวันที่ 7 - 9 ตุลาคม พ.ศ. 2567 โดยทำการทดลองอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบเต็มพื้นที่ภายในระบบอบแห้ง ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวมีลักษณะของท้องฟ้าแจ่มใสและมีเมฆบางส่วนตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดในวันที่สองของการทดลองประมาณ 864 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยระหว่างการทดลองอยู่ที่ 366 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นดังรูปที่ 7 สำหรับรูปที่ 8 เป็นการแปรค่าอุณหภูมิขาเข้า-ขาออกจากระบบอบแห้ง รูปที่ 9 เป็นการแปรค่าอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งบริเวณด้านหน้า กลาง และด้านหลัง เทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม สำหรับค่าอุณหภูมิที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในแต่ละวันจะอยู่ในช่วงเวลา 10.00 - 14.00 น. แปรค่าอยู่ในช่วง 36 - 41 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความชื้นสัมพันธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งที่ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 32% (ดังรูปที่ 10) ทำให้มวลฟ้าทะลายโจรภายในระบบอบแห้งสามารถคายความชื้นได้ดี และระบบระบายอากาศด้วยพัดลมดูดอากาศช่วยในการระบายความชื้น โดยมีอัตราการไหลของอากาศอยู่แปรค่าดังรูปที่ 11 ซึ่งสามารถลดความชื้นของฟ้าทะลายโจรเริ่มต้น 82 (%wb) จนเหลือ 10 (%wb) ภายในระยะเวลา 3 วัน ในขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติใช้ระยะเวลา 3 วัน เท่ากัน ซึ่งเหลือความชื้นสุดท้าย 22 (%wb) (ดังรูปที่ 12) ในกรณีดำเนินการตากแห้งต่อจนเหลือความชื้นใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งจะต้องใช้ระยะเวลา 5 วัน สำหรับการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งนี้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้ง (Saving in drying time) ได้ถึง 40% เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ ซึ่งเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาในกรณีการลดระยะเวลาของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจะอยู่ในช่วง 30% - 60% [18-19] สำหรับอัตราการดึงน้ำจำเพาะของระบบอบแห้งสำหรับอบแห้งฟ้าทะลายโจร มีค่าเท่ากับ 24.29 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง และค่าอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ มีค่าเท่ากับ 0.04 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 63.41%



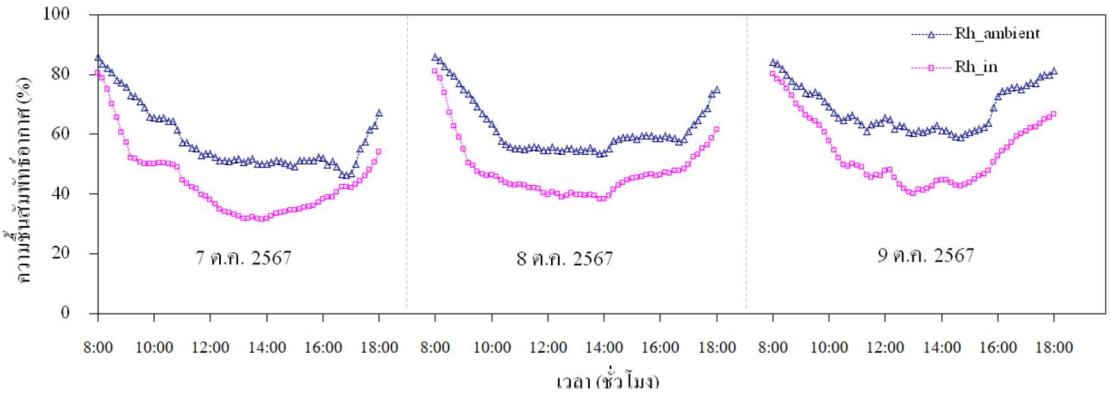
รูปที่ 7 การแปรค่าของความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



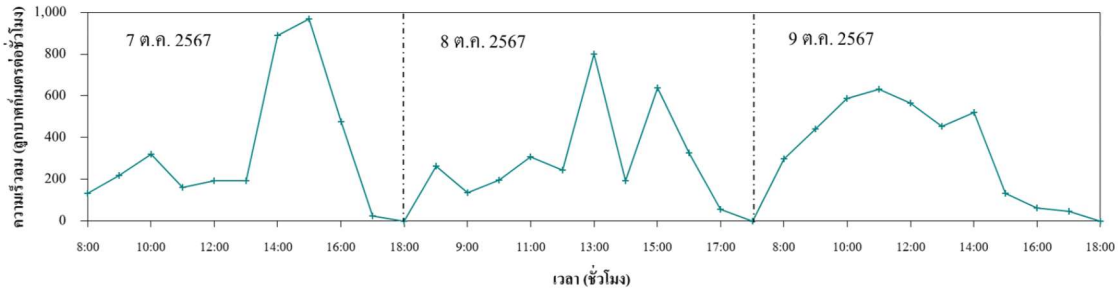
รูปที่ 8 การแปรค่าของอุณหภูมิภายนอก เทียบกับช่องระบายอากาศของระบบอบแห้ง
ในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



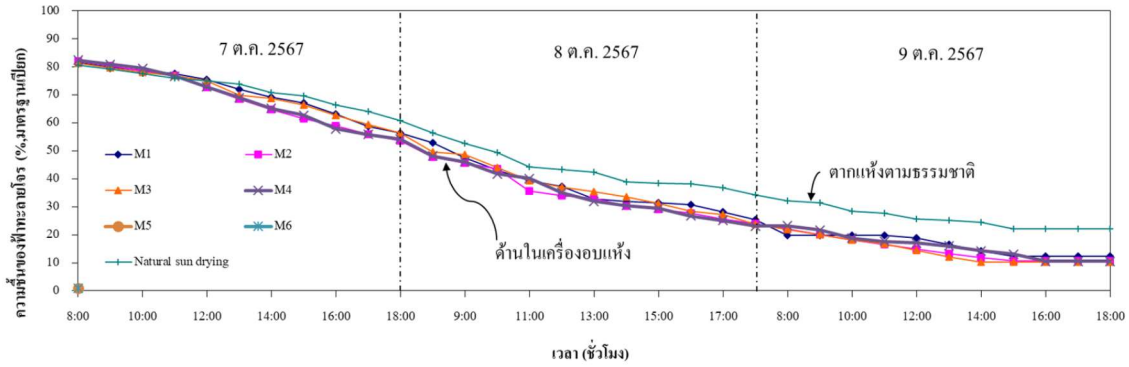
รูปที่ 9 การแปรค่าของอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งบริเวณด้านหน้า กลาง และหลังระบบอบแห้ง
ในช่วงเวลาที่ทำการทดลองการอบแห้ง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



รูปที่ 10 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งเทียบกับภายนอกระบบอบแห้ง ในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



รูปที่ 11 การแปรค่าของอัตราการไหลของอากาศภายในระบบอบแห้งในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)



รูปที่ 12 การแปรค่าของความชื้นของตัวอย่างฟ้าทะลายโจรที่เก็บ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในโรงอบแห้งและการตากแห้งด้วยแสงแดดธรรมชาติ ในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (7 - 9 ตุลาคม 2567)

หลังจากการอบแห้งฟ้าทะลายโจร ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างของฟ้าทะลายโจรที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส ที่ผ่านการอบแห้งที่มีความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ฟ้าทะลายโจรที่ทำการตากแห้งตามธรรมชาติ ฟ้าทะลายโจรสดและได้นำมาวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี (Water activity, aw) ด้วยเครื่องหาแอคติวิตีของน้ำ ของสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี จังหวัดลพบุรี ซึ่งผลการวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตีของฟ้าทะลายโจรแห้งที่อบด้วยโรงอบแห้งแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่า aw น้อยกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าเชื้อราจะไม่สามารถเติมโตได้ จึงสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน สำหรับค่าปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์จากตารางที่ 1 พบว่า ปริมาณสารแอนโดกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจรสดมีค่าเท่ากับ 5.27 (%w/w) และเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์อยู่ที่ 3.08 (%w/w) ซึ่งผลที่ได้ของปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจรแห้งน้อยลงกว่าฟ้าทะลายโจรสดอันเป็นผลมาจากความร้อนของระบบอบแห้งที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ [19] แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าของตำรามาตรฐานยาสมุนไพร (Thai Herbal Pharmacopoeia) ที่ระบุไว้ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จึงจะเป็นสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่มีประสิทธิภาพในการรักษาโรค เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ ปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์เท่ากับ 0.57 (%w/w) จากการทดลอง พบว่าการตากแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้สามารถรักษาปริมาณสารสำคัญแอนโดกราโฟไลด์ไว้ได้ดีกว่าการใช้วิธีการตากแห้งตามธรรมชาติ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการวัดค่าสีของฟ้าทะลายโจรอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab ซึ่งจะแสดงผลของการวัดสีจากเครื่องวัดสี Hunter lab แสดงดังตารางที่ 2 ผลการวัดสีของฟ้าทะลายโจร

ตารางที่ 1 ค่าแอคติวิตีของฟ้าทะลายโจร

ผลิตภัณฑ์	ค่า water activity, a_w	ปริมาณสารแอนโดรกราโฟไลด์ (%w/w)
ฟ้าทะลายโจรสด	0.96	5.27
ฟ้าทะลายโจรอบแห้งภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส	0.41	3.08
ฟ้าทะลายโจรตากแห้งตามธรรมชาติ	0.54	0.57

ตารางที่ 2 ผลการวัดสีของฟ้าทะลายโจร

ผลิตภัณฑ์	Color value					
	L*	a*	b*	C*	h	ΔE
ฟ้าทะลายโจรตากในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใส	29.64	-5.71	12.81	14.02	114.10	4.60
ฟ้าทะลายโจรตากแห้งตามธรรมชาติ	35.22	0.64	18.62	18.63	88.00	10.28
ฟ้าทะลายโจรสด	31.79	-8.59	15.68	17.88	118.10	0.00

จากการวัดสีของฟ้าทะลายโจรที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจร รวมถึงฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติและฟ้าทะลายโจรสด จากการทดลองสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 2 สีของฟ้าทะลายโจรสดจะเปลี่ยนจากสีเขียวสดเป็นสีเขียวเข้มหลังจากการอบแห้งโดยมีระดับความเข้มของสีที่แตกต่างกัน ค่าดัชนีสีบ่งชี้ว่าสีของฟ้าทะลายโจรที่อบแห้งในระบบอบแห้งเป็นสีเขียวเข้ม (a* = -5.71) สำหรับสีของฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติจะมีสีเขียวออกเป็นสีน้ำตาล (a* = 0.64) เมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของฟ้าทะลายโจรที่ตากในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสและที่ตากแห้งตามธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบกับสีของฟ้าทะลายโจรสด พบว่า สีของฟ้าทะลายโจรที่ได้จากระบบอบแห้งไม่ได้เปลี่ยนสีของฟ้าทะลายโจรและยังคงสีเขียวเข้มโดยมีค่าเท่ากับ 4.60 สำหรับฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 10.28 ซึ่งเปลี่ยนแปลงมากกว่าและออกไปทางสีน้ำตาล ผลของสีที่ได้จากระบบอบแห้งยังตรงกับความต้องการของผู้รับซื้อและเป็นที่ยอมรับ

4. สรุป (Conclusions)

จากการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งฟ้าทะลายโจรแบบพาความร้อนแบบบังคับชนิดหลังคาใสในครั้งนี้ สามารถอบแห้งฟ้าทะลายโจรได้ครั้งละ 200 กิโลกรัม อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมทำให้สามารถอบแห้งฟ้าทะลายโจรโดยใช้ระยะเวลาเพียง 3 วัน จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 82 (%wb) จนเหลือความชื้นสุดท้าย 10 (%wb) เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติในระยะเวลาที่เท่ากันจะได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 22 (%wb) ปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.60 โดยสามารถลดปริมาณน้ำอิสระของฟ้าทะลายโจรสดด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จาก 0.96 ให้เหลือ 0.41 ซึ่งทำให้สามารถเก็บรักษาฟ้าทะลายโจรแห้งได้ระยะเวลาที่นานขึ้นเมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ สำหรับฟ้าทะลายโจรแห้งที่ได้จากระบบอบแห้งมีปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์อยู่ที่ 3.08 (%w/w) เทียบกับปริมาณสารสำคัญแอนโดรกราโฟไลด์ของฟ้าทะลายโจรที่ตากแห้งตามธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 0.57 (%w/w) ทำให้ฟ้าทะลายโจรที่ได้จากระบบอบแห้งมีคุณภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลังคาใสมีประสิทธิภาพ 63.41% นอกจากนี้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้ยังสามารถนำไปอบแห้งสมุนไพรกลุ่มอื่นที่มีลักษณะใบที่คล้ายกันได้โดยที่ต้องการอุณภูมิที่ไม่สูงมากและยังสามารถใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.สราวุฒิ แนบเนียร อาจารย์ที่ปรึกษา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณวิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์ไร่ทหารสานประชา ตำบลนิคมสร้างตนเอง อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ที่ให้ใช้สถานที่และฟ้าทะลายโจรใช้ในการทดลองในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] องค์การอนามัยโลก. รายงานสถานการณ์โดยองค์การอนามัยโลกประจำประเทศไทยฉบับที่ 265 [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 7 กันยายน 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/searo/thailand/2023_ 06_13_tha-sitrep-265-covid-19_th.pdf?sfvrsn=e213bba3_1

[2] นภสร ผ่องใส, ชวลิน อินทร์ทอง, ดวงทิพย์ สนธิเมือง, ภัทรศศิร์ เหล่าจีนวงค์, บดินทร์ ชาตะเวที. ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อพฤติกรรมการใช้ฟ้าทะลายโจรในการดูแลสุขภาพช่วงภาวะติดเชื้อโควิด-19 ของประชาชนในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา. วารสารไทยไภษัชยนิพนธ์. 2565;17(1):57-69. https://doi.org/10.69598/tbps.17.1.57-69

[3] มหาวิทยาลัยมหิดล, คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี. สรรพคุณ ฟ้าทะลายโจร [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 12 ตุลาคม 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://www.rama.mahidol.ac.th/altern_med/th/km/19jun2020-1729

[4] Hossain MS, Urbi Z, Sule A, Hafizur Rahman KM. Andrographis paniculate (Burm. f.) Wall. ex Nees: A review of ethnobotany, phytochemistry, and pharmacology. The Scientific World Journal. 2014;1:274905. https://doi.org/10.1155/2014/274905

[5] Thailand, Ministry of Public Health, Department of Medical Sciences. Thai herbal pharmacopoeiaVol. II. Bangkok: Office of National Buddhism Press; 2007.

[6] Elwakeel AE, Oraiath AAT, Ghanem THM, Elbeltagi A, Salem A, Dewidar AZ, et al. Mathematical modeling, drying kinetics, and economic analysis of a hybrid photovoltaic thermal solar dryer for henna leaves. Scientific Reports. 2025;15:21392. https://doi.org/10.1038/s41598-025-03460-3

[7] Kidane H, Farkas I, Buzás J. Characterizing agricultural product drying in solar systems using thin-layer drying models: comprehensive review. Discover Food. 2025;5:84. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00362-1

[8] Nnamchi O, Tom C, Akpan G, Umunna M, Ubong D, Ibeh M, et al. Solar dryers: A review of mechanism, methods and critical analysis of transport models applicable in solar drying of product. Green Energy and Resources. 2025;3(2):100118. https://doi.org/10.1016/j.gerr.2025.100118

[9] Sharma BB, Vaidya P, Kumar N, Tiwari A, Bansal S, Faruque MRI, et al. Enhancing post-harvest sustainability in temperate crops through smart IoT-integrated indirect solar dryer. Scientific Reports. 2025;15:28608. https://doi.org/10.1038/s41598-025-13499-x

[10] Monicka AA, Shree P, Blessie RF, Tazeen H, Navaneetham B, Andria SS, et al. A comprehensive review of indirect solar drying techniques integrated with thermal storage materials and exergy-environmental analysis. Environment, Development and Sustainability. 2025;27:25769-25813. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04755-7

[11] Fernandes L, Tavares PB. A review on solar drying devices: Heat transfer, air movement and type of chambers. Solar. 2024;4(1):15-42. https://doi.org/10.3390/solar4010002

[12] Rahman MA, Hasnain SMM, Paramasivam P, Zairov R, Ayanie AG. Solar drying for domestic and industrial applications: A comprehensive review of innovations and efficiency enhancements. Global Challenges. 2025;9(2):2400301. https://doi.org/10.1002/gch2.202400301

[13] Rajagukguk RA, Lee H. Application of explainable machine learning for estimating direct and diffuse components of solar irradiance. Scientific Reports. 2025;15:7402. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91158-x

[14] จักรพรรณ์ ผิวสอาด, ชยพัทธ์ ภูสำเภา. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก สำหรับอบแห้งสมุนไพรฟ้าทะลายโจร. Life Sciences and Environment Journal. 2565;23(2):324-333. https://doi.org/10.14456/lsej.2022.25

[15] เสริม จันทร์ฉาย. เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์; 2560.

[16] Fudholi A, Sopian K, Othman MY, Ruslan MH. Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. Energy Buildings. 2014;68:121-129. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.072

[17] Association of Official Analytical Chemists International (AOAC). Official methods of analysis of AOAC International. 22nd ed. Oxford: Oxford University Press; 2023. https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001

[18] Kumar A, Tiwari GN. Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of Jaggery. Journal of Food Engineering. 2006;73(2):121-134. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.011

[19] Jaidee W, Rujanapun N, Malee K, Chaisawad S, Puttarak P, Hiransai P, et al. Degradation kinetics of andrographolide in aqueous solution, product identification and biological activity evaluation. Scientific Reports. 2025;15:28856. https://doi.org/10.1038/s41598-025-13652-6

Bulletin of Applied Sciences

Volume 15 Issue 1 January - June 2026
https://doi.org/10.60136/bas.v15.2026.4053

Research Article

Study on the efficiency of automatic village water disinfection system using ultraviolet radiation

Apaporn Sinthusarn[1*], Anucha Sinthusarn[1]

[1]*Institute of Community Science Technology, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand*
*Corresponding author's e-mail: apaporn@dss.go.th

Received: 24 May 2025, Revised: 29 July 2025, Accepted: 1 August 2025

Abstract

This research study aimed to evaluate the efficiency of an automatic ultraviolet (UV) disinfection system for village tap water, beginning with the system's design and development and followed by real-world application testing in target communities. The findings revealed that the automatic UV disinfection system effectively functioned and was appropriately designed for integration into various village tap water systems across Thailand. The system includes twelve low-pressure mercury UV lamps with a total power consumption of 658 watts. Lamps rated at 100, 75, and 18 watts produced UV doses of 9.314, 7.737, and 4.643 milliwatt-seconds per square centimeter, respectively, resulting in a significant microbiological reduction of Escherichia coli and most pathogens by 90% (1-log or D_{90}). At a water flow rate of 32 liters per second, the UV radiation achieved a 99% reduction (2-log or D_{99}) in microbial contamination. Field implementation was conducted at a large surface water village supply system in Moo 2, Phon Khrok Sub-district, Tha Tum District, Surin Province, where the system was installed at the main distribution pipe connected to the elevated water tank. The results confirmed effective disinfection; however, pathogen contamination was still detected at the endpoints due to pipeline recontamination. To address this, drinking water filtration systems developed by the Department of Science Service were installed to ensure compliance with the potable water quality standards of the Department of Health. This research is scalable for addressing village tap water quality nationwide and aligns with the 20-Year Master Plan for Water Resource Management (2018–2037), which mandates that every village have access to clean water for consumption and household use that meets quality standards.

Keywords: Efficiency, Disinfection system, Village tap water, Ultraviolet

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ โดยเริ่มจากการออกแบบและพัฒนาการทดสอบการใช้งานจริงในพื้นที่กลุ่มเป้าหมาย ผลการวิจัยสรุปได้ว่า ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ มีประสิทธิภาพการใช้งาน โดยระบบได้รับการออกแบบและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศ ระบบประกอบด้วยหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้า รวมเท่ากับ 658 วัตต์ จำนวน 12 หลอด พบว่า หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ สามารถผลิตปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต (UV dose) เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้จำนวนอีโคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางจุลชีววิทยา ร้อยละ 90 (1-log หรือ D_{90}) และที่อัตราการไหล 32 ลิตรต่อวินาที น้ำจะได้รับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) เมื่อทดสอบการใช้งานของระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในพื้นที่ประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ โดยดำเนินการติดตั้งระบบในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนหอถังสูงของระบบประปาหมู่บ้าน พบว่า สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ ระบบจึงมีประสิทธิภาพการใช้งานในพื้นที่ได้จริง ทั้งนี้ปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อโรคในท่อส่งน้ำประปาหมู่บ้าน ทำให้พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่จุดเก็บน้ำปลายทาง ดังนั้นจึงดำเนินการติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีของกรมวิทยาศาสตร์บริการ เพื่อให้น้ำประปาหมู่บ้านมีคุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ขยายผลเพื่อแก้ปัญหาการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศได้ สอดรับกับแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี (พ.ศ. 2561 – 2580) ที่กำหนดให้ทุกหมู่บ้านมีน้ำสะอาดอุปโภค บริโภค มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ, ระบบฆ่าเชื้อโรค, น้ำประปาหมู่บ้าน, รังสีอัลตราไวโอเลต

1. บทนำ (Introduction)

การจัดการการเข้าถึงน้ำประปาดื่มได้ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศ ยังคงเป็นความท้าทายอย่างหนึ่งของรัฐบาลไทย ในการพัฒนาไปสู่สถานะประเทศที่มีรายได้สูงและการบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) เป้าหมายที่ 6 การเข้าถึงการใช้น้ำสะอาดและสุขาภิบาลที่ดี ทั้งนี้การผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในบางพื้นที่ที่อยู่นอกเขตการให้บริการของการประปาส่วนภูมิภาค โดยเฉพาะน้ำประปาหมู่บ้านยังประสบปัญหาคุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้อุปโภคบริโภค มีข้อมูลจากกรมอนามัยในการสุ่มเฝ้าระวังคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 – 2567 จำนวน 10,271 แห่ง พบว่ามีเพียง 420 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 4 เท่านั้น ที่ผ่านการรับรองเป็นน้ำประปาหมู่บ้านสะอาด ที่มีความปลอดภัยสำหรับนำมาบริโภคในครัวเรือน ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำประปาในเขตเมือง [1] และการรายงานจากศูนย์การเรียนรู้ชุมชนชาวไทยภูเขา “แม่ฟ้าหลวง” พบว่าคุณภาพน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย จากการปนเปื้อนโคลิฟอร์มแบคทีเรียสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 75 และปนเปื้อนอีโคไล คิดเป็นร้อยละ 36 [2] ซึ่งการปนเปื้อนของเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านส่วนใหญ่มีสาเหตุเนื่องมาจากผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาซึ่งเป็นผู้ปฏิบัติงานที่เป็นตัวแทนของหมู่บ้านในการดูแลระบบผลิตน้ำประปาไม่มีความเข้าใจเพียงพอในการเติมปริมาณของสารละลายคลอรีนที่เหมาะสมและเพียงพอกับคุณภาพน้ำดิบเพื่อฆ่าเชื้อโรคที่อยู่ในน้ำและให้มีคลอรีนอิสระคงเหลือไว้ในน้ำตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม อีกทั้งไม่มีการบำรุงรักษาระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านอย่างต่อเนื่องและไม่มีการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทดสอบคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน

เทคโนโลยีรังสีอัลตราไวโอเลตมีการนำมาใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1910 ที่เมืองมาร์กเซย ประเทศฝรั่งเศส ช่วงเวลานั้นยังไม่ได้รับความเชื่อถือต่อมาในปี ค.ศ. 1955 เทคโนโลยีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในน้ำได้ถูกนำไปใช้ในประเทศออสเตรียและสวิตเซอร์แลนด์ และในปี ค.ศ. 1985 มีโรงงานประมาณ 1,500 แห่งทั่วยุโรปที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตสำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการค้นพบว่าโปรโตซัว เช่น คริปโตสปอริเดียม และจิอาเดียมีความอ่อนไหวต่อรังสีอัลตราไวโอเลตอย่างมาก ทำให้เทคโนโลยีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตมีการแพร่หลายในอเมริกาเหนือ ในปี ค.ศ. 2001 มีโรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยเทคโนโลยีรังสีอัลตราไวโอเลตมากกว่า 6,000 แห่ง ที่ดำเนินการอยู่ในยุโรป ในปี ค.ศ. 2009 ประเทศจีนนำวิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตมาใช้ในระบบประปาโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำหลินเจียงเซียงไฮ้ ถือเป็นที่แรก ๆ ในประเทศจีนที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นกระบวนหลักในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ และในปี 2017 จีนได้สร้างโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำลาซานาจิน โดยใช้วิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นกระบวนการหลักที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของจีน [3] สำหรับในประเทศไทยมีการนำรังสีอัลตราไวโอเลตมาใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มโดยการติดตั้งร่วมกับเครื่องกรองน้ำขนาดต่าง ๆ เพื่อใช้ในอาคารบ้านเรือนต่าง ๆ แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ในระบบการผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่และระบบประปาหมู่บ้าน ซึ่งยังคงใช้สารละลายคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาเพียงอย่างเดียว

รังสีอัลตราไวโอเลต สามารถแบ่งประเภทตามช่วงความยาวคลื่นได้ 4 ช่วง ดังนี้

1.1 UV-A ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 315 – 400 นาโนเมตร

1.2 UV-B ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 280 – 315 นาโนเมตร

1.3 UV-C ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 200 – 280 นาโนเมตร

1.4 Vacuum UV (VUV) ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 100 – 200 นาโนเมตร

การฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 200 – 300 นาโนเมตร ปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นผลคูณของความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตและระยะเวลาที่สัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต หน่วยของปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่พบมีทั่วไป เช่น จูลต่อตารางเมตร (J/m^2) หรือ มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร(mJ/cm^2) หรือ มิลลิวัตต์วินาทีต่อตารางเซนติเมตร (mWs/cm^2) โดยแปลงค่า 10 J/m^2 = 1 mJ/cm^2 = 1 mWs/cm^2 = 10 Ws/m^2

รังสีอัลตราไวโอเลตทำให้เชื้อโรคไม่สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้ เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตจะทำลายสารพันธุกรรมทำให้ไม่สามารถแบ่งตัวได้ และเมื่อเชื้อโรคได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีปริมาณความเข้มสูงจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลายและเซลล์ตายในที่สุด ข้อมูลปริมาณรังสีอัตราไวโอเลตที่เหมาะสมสามารถทำลายเชื้อโรคได้ แยกแต่ละประเภทเชื้อดังตารางที่ 1 ทั้งนี้สามารถประเมินประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้ค่าการลดลอการิทึม (Log reduction) หรือค่า D value ดังตารางที่ 2 โดยตัวอย่างการอธิบายค่าการลดลอการิทึม เช่น 1-log หรือ D_{90} หมายถึง ค่าปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่ทำให้จำนวนเชื้อโรคตั้งต้นลดลง ร้อยละ 90 ดังนั้น 2-log จำนวนเชื้อโรคลดลง ร้อยละ 99 และ 3-log จำนวนเชื้อโรคลดลง ร้อยละ 99.9 เป็นต้น

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำลายเชื้อโรคได้ [4]

Table
Shows UV dosage for destroying micro-organisms (3)

Micro-organisms	*Dosage of Ultraviolet radiation (UV dose) in mWsec / cm² needed to kill the selected micro-organisms*	
Bacteria	*90% (1 log reduction)*	*99% (2 log reduction)*
Bacillus subtilis	*5.8*	*11*
Escherichia coli	*3*	*6.6*
Pseudomonas aeruginosa	*5.5*	*10.5*
Pseudomonas fluorescens	*3.5*	*6.6*
Salmonella enteritidis	*4*	*7.6*
Salmonela paratyphi - Enteric fever	*3.2*	*6.1*
Salmonella typhosa - Typhoid fever	*2.1*	*4.1*
Salmonella typhimurium	*8*	*15.2*
Sarcina lutea	*19.7*	*26.4*
Shigella dysenteriae – Dysentery	*2.2*	*4.2*
Shigella flexneri – Dysentery	*1.7*	*3.4*
Shigella paradysenteriae	*1.68*	*3.4*
Staphylococcus aerus	*2.6*	*6.6*
Vibrio comma – Cholera	*3.4*	*6.5*
Virus	*90% (1 log reduction)*	*99% (2 log reduction)*
Bacteriophage - E. Coli	*2.6*	*6.6*
Infectious Hepatitis	*5.8*	*8*
Poliovirus – Poliomyelitis	*3.15*	*6.6*

ตารางที่ 2 Log reduction แสดงปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำลายเชื้อโรค [5]

Log reduction	Reduction factor	% Reduced
1	10	90%
2	100	99%
3	1,000	99.9%
4	10,000	99.99%
5	100,000	99.999%
6	1,000,000	99.9999%

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านในการลดจุลชีพที่เหมาะสมกับระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัย โดยติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติไว้บริเวณจุดปล่อยน้ำประปาหมู่บ้านจากหอถังสูง เพื่อให้กระบวนการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านในขั้นสุดท้ายมีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตก่อนการจ่ายน้ำสู่ท่อส่งน้ำประปา การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในระบบประปาหมู่บ้านของหมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนา ปรับปรุงและขยายผลสำหรับการใช้งานกับระบบประปาหมู่บ้านได้ทั่วประเทศ เพิ่มโอกาสและทางเลือกใหม่สำหรับการพัฒนาคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านของประเทศด้วยต้นทุนต่ำ

มีความปลอดภัย ทดแทนการใช้สารเคมี ด้วยเทคโนโลยีที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศน์ และมนุษย์ เป็นการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสู่การดูแลประชาชน ทำให้ในอนาคตทุกพื้นที่ในประเทศไทยมีน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภคและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัย สร้างคุณภาพชีวิตที่ดี เป็นสังคมแห่งความสุขและยั่งยืนตลอดไป

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 กำหนดกลุ่มเป้าหมายในการวิจัย

2.2 การออกแบบ (Design) การสร้างและพัฒนา (Development) ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่

2.3 การทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ โดยทำการศึกษาปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมกับปริมาณและอัตราการไหลของคุณภาพน้ำดิบตามสมการ Keitz และสูตรคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต ดังนี้

$$E_{UV} = \frac{P_{UVC}(2\alpha+\sin 2\alpha)}{2LD\pi^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{L}{2D}$$

เมื่อ P_{UVC} คือ กำลังไฟฟ้าของหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต หน่วยเป็น วัตต์ (W)

L คือ ระยะห่างขั้วหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต หน่วยเป็น เมตร (m)

D คือ ระยะห่างของจุดที่ต้องการให้โดนรังสี หน่วยเป็น เมตร (m)

E_{UV} คือ ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต หน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

α คือ ครึ่งหนึ่งของมุมที่รับโดยหลอดอัลตราไวโอเลต หน่วยเป็น เรเดียน

สูตรคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต D = It

เมื่อ D คือ ริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต (UV dose) หน่วย $mW\text{-}s/cm^2$ หรือ $W\text{-}s/m^2$ หรือ mJ/cm^2

I คือ ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลต (UV intensity) หน่วย mW/cm^2 หรือ W/m^2

T คือ ระยะเวลาสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต (exposure time) หน่วย วินาที (s)

รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีโดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ตามมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัยและวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางจุลชีววิทยาโดยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย มีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

2.3.1 สำรวจระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

2.3.2 ทดสอบคุณภาพน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

2.3.3 ติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติเข้ากับระบบประปาหมู่บ้าน พร้อมเก็บน้ำประปาต้นทางและปลายทาง

2.3.4 ทดสอบคุณภาพน้ำประปาต้นทางและปลายทาง ภายหลังติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

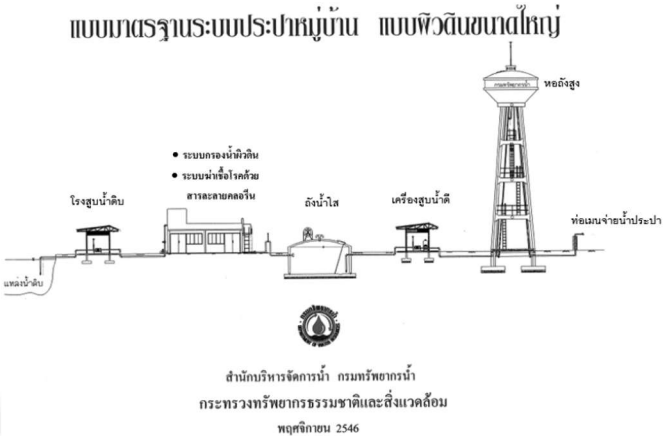
2.4 การติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ จุดเก็บน้ำประปาปลายทาง

2.5 การอภิปรายผลและสรุปผลการดำเนินงาน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 กลุ่มเป้าหมายในการศึกษาวิจัยประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต คือ ระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ ตั้งอยู่ที่ หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์

3.2 ผลการออกแบบ (Design) การสร้างและพัฒนา (Development) ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ กรมทรัพยากรน้ำได้ออกแบบมาตรฐานระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ ซึ่งมีลักษณะรูปแบบเป็นระบบประปาที่นำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำ คลอง สระน้ำขนาดใหญ่ โดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งนำมาผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยการทำให้น้ำดิบตกตะกอน ซึ่งใช้สารละลายสารส้มหรืออาจต้องเติมสารละลายปูนขาวเพิ่ม ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ เมื่อผ่านกรรมวิธีการรวมตะกอนและการตกตะกอนแล้ว นำน้ำเข้าสู่ระบบกรองต่อไป และนำน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองแล้วเข้าสู่ถังน้ำใส และทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารละลายคลอรีน โดยสูบจ่ายไปยังถังน้ำใสหรืออัดเข้าเส้นท่อขึ้นหอถังสูง จากนั้นทำการสูบน้ำจากถังน้ำใสด้วยเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งขึ้นหอถังสูง แล้วจ่ายน้ำสะอาดจากหอถังสูงลงสู่ท่อจ่ายน้ำประปาเพื่อจ่ายน้ำให้แก่ประชาชนในหมู่บ้านได้มีน้ำใช้ในการอุปโภคและบริโภค โดยการจ่ายน้ำตามท่อผ่านมาตรวัดน้ำ [6]



รูปที่ 1 แบบมาตรฐานระบบประปาหมู่บ้าน แบบผิวดินขนาดใหญ่ กรมทรัพยากรน้ำ

คณะนักวิจัยมีผลงานวิจัยการออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ ในการทดลองใช้งานระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ มีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้อีโคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ลดลงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) และเมื่อทดลองใช้กับตัวอย่างน้ำดิบที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ผลการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำดิบดังกล่าวไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขยายผลโดยการออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานเชิงพื้นที่ โดยการศึกษาปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต (E_{UV}) ของหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต

ลำดับ	ขนาดกำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ผลิต (ร้อยละ 35 ของกำลังไฟฟ้า) (วัตต์) (P_{UVC})	จำนวนที่ใช้งาน (หลอด)	ระยะห่างขั้วหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต (L) (เมตร)	กำหนดระยะระหว่างหลอดผลิตรังสีกับจุดที่ต้องการให้โดนรังสี (D) (เมตร)	ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต (E_{UV}) มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) (คำนวณค่าเฉพาะ 1 หลอด)
1	100	0.042	35	4	0.59	0.10	9.314
2	75	0.055	26.25	2	0.53	0.10	7.737
3	18	0.055	6.3	6	0.16	0.10	4.643

ที่เหมาะสมกับปริมาณและอัตราการไหลของคุณภาพน้ำดิบ ตามสมการ Keitz และสูตรคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต

ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ ดำเนินการออกแบบและพัฒนาโดยใช้หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ จำนวนรวม 12 หลอด ขนาดกำลังไฟรวม 658 วัตต์ เมื่อคำนวณตามสมการ Keitz พบว่า ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 , 75 และ 18 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังรายละเอียดตามตารางที่ 3 หากใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรค 1 วินาที จะมีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 1 พบว่า หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 และ 75 วัตต์ มีค่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต สูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้อีโคไลลดลงที่ 6.6 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) ส่วนหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ มีค่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตสูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้อีโคไลลดลงที่ 3 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 90 (1-log หรือ D_{90})

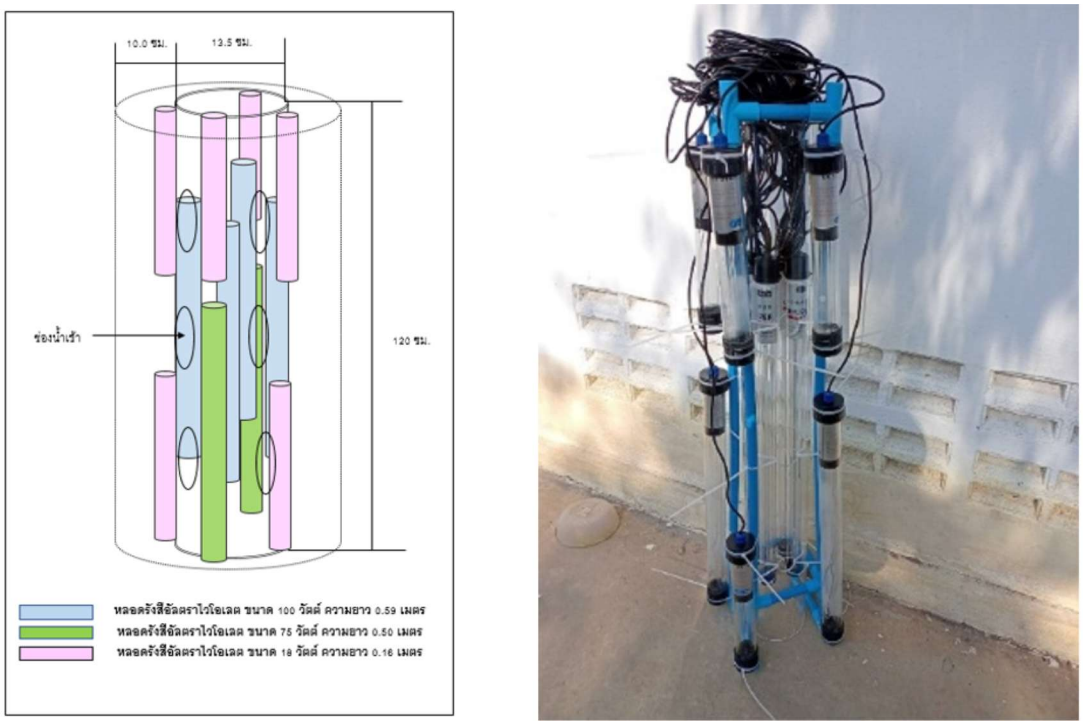
ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ ประกอบด้วย

3.2.1 หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต จำนวน 12 หลอด ขนาดกำลังไฟรวม 658 วัตต์

3.2.2 ท่อติดตั้งหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 เซนติเมตร มีความสูง 120 เซนติเมตร มีช่องให้น้ำไหลผ่าน จำนวน 12 ช่อง ภายในติดตั้งหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ จำนวน 4 หลอด เว้นระยะห่างเท่ากัน

3.2.3 ขาตั้งยึดท่อติดตั้งหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว และข้อต่อสำหรับประกอบเป็นขาตั้งยึดท่ออะคริลิกให้มั่นคง เพื่อเป็นที่ยึดติดหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้า 75 วัตต์ จำนวน 2 หลอด และขนาดกำลังไฟฟ้า 18 วัตต์ จำนวน 6 หลอด เว้นระยะห่างเท่ากันโดยจุดยึดติดอยู่ใกล้ช่องน้ำไหลผ่านท่ออะคริลิกใส

3.2.4 ระบบตั้งเวลา (Timer) เปิดปิดการทำงานอัตโนมัติ



รูปที่ 2 แบบท่อรวมหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

การคำนวณพื้นที่หรือปริมาตรน้ำที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตครอบคลุมเบื้องต้น พบว่า บริเวณภายในท่ออะคริลิกที่ติดตั้งหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาด 100 วัตต์ ครอบคลุมปริมาตรน้ำเท่ากับ 0.0084 ลูกบาศก์เมตร หรือ 8.4 ลิตร ส่วนบริเวณภายนอกด้านบนและด้านล่าง มีปริมาตรน้ำเท่ากัน คือ 0.0118 ลูกบาศก์เมตร หรือ 11.8 ลิตร รวมปริมาตรน้ำทั้งหมด เท่ากับ 32 ลิตร ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่า ในเวลา 1 วินาที มีน้ำปริมาตร 32 ลิตร ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีค่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99})

3.3 ผลการทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่

3.3.1 ผลสำรวจระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คัดเลือกระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ ซึ่งได้รับงบประมาณในการก่อสร้าง ปี พ.ศ. 2565 ซึ่งน้ำดิบเป็นแหล่งน้ำผิวดินขนาดใหญ่ในพื้นที่ น้ำประปาต้นทางเป็นน้ำประปาที่ได้จากจุดปล่อยน้ำจากหอถังสูง ณ บริเวณระบบประปาหมู่บ้าน และน้ำประปาปลายทางเป็นน้ำประปา ณ โรงเรียนบ้านโพนขวาว ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ ปัจจุบันน้ำประปาหมู่บ้านที่ผลิตได้ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย จากการสังเกตเบื้องต้น พบว่า น้ำประปาหมู่บ้านมีความขุ่นไม่เหมาะนำมาบริโภค แหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาหมู่บ้านมีความขุ่นสูง ผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาไม่เข้าใจในกระบวนการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านและไม่ปฏิบัติตามคู่มือการผลิตน้ำประปา โดยเฉพาะในขั้นตอนการเติมสารส้มเพื่อตกตะกอน ใช้วิธีวางก้อนสารส้มให้น้ำดิบไหลผ่านเท่านั้น ทำให้การตกตะกอนไม่สมบูรณ์ มีตะกอนขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากปนอยู่ในน้ำ น้ำจึงมีความขุ่นสูง เมื่อปล่อยน้ำเข้าขั้นตอนกรองทรายและส่งต่อเข้าสู่ถังน้ำใส น้ำที่ผ่านกรองทรายยังมีความขุ่นหลงเหลืออยู่ จากนั้นตามระบบการทำงานปั๊มน้ำจะสูบน้ำจากถังน้ำใสขึ้นสู่หอถังสูง โดยเติมสารละลายคลอรีนผ่านปั๊มเติมสารเคมีเพื่อผสมกับน้ำที่สูบขึ้นหอถังสูง แต่จากการตรวจสอบพบว่า ผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาดำเนินการเพียงเติมน้ำเข้าไปในถังที่เตรียมสำหรับบรรจุสารละลายคลอรีนเท่านั้น ไม่มีการเตรียมสารละลายคลอรีนขึ้นมาใหม่ เนื่องจากไม่มีการจัดซื้อเก็บไว้ มีเพียงสารส้มเท่านั้นที่ซื้อมาเก็บไว้ใช้งาน จึงทำให้น้ำประปาหมู่บ้านที่ผลิตได้ไม่เหมาะแก่การนำมาใช้บริโภค ชุมชนใช้น้ำประปาสำหรับการอุปโภค ส่วนการบริโภคใช้วิธีซื้อน้ำดื่มบรรจุขวด ทำให้มีค่าใช้จ่ายในครัวเรือนเพิ่มขึ้น และยังไม่มีแนวทางในการแก้ปัญหาน้ำประปา

ตารางที่ 4 แสดงปริมาตรน้ำที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตในระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

ลำดับ	บริเวณ	ขนาดกำลังไฟฟ้า (วัตต์)	จำนวนหลอดที่ใช้งาน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	ระยะห่างขั้วหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต (เมตร)	กำหนดระยะระหว่างหลอดผลิตรังสีกับจุดที่ต้องการให้โดนรังสี (เมตร)	ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตรวม (E_{UVC}) (มิลลิวัตต่อตารางเซนติเมตร)	ปริมาตรน้ำที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต (ลูกบาศก์เมตร)
1	ภายในท่ออะคริลิก	100	4	0.135	0.59	0.10	37.256	0.0084
2	ภายนอกด้านบน	18	4	0.235	0.16	0.10	18.572	0.0118
3	ภายนอกด้านล่าง	75	2	0.235	0.16	0.10	15.474	0.0118
		18	2				9.286	

หมู่บ้านให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ปัญหาคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านดังกล่าว คณะนักวิจัยจึงวางแผนการดำเนินงานเพื่อแก้ปัญหาในกระบวนการตกตะกอนของน้ำดิบด้วยการออกแบบและพัฒนาระบบเติมสารส้มแบบอัตโนมัติที่มีความแม่นยำใช้งานสะดวกและง่ายขึ้นกว่าเดิม ทำให้กระบวนการตกตะกอนสมบูรณ์ขึ้น สภาพของน้ำดิบมีความขุ่นลดลง จากนั้นจึงทำการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ เพื่อทดแทนการใช้สารละลายคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้าน เพิ่มความสะดวกใช้งานง่ายให้กับผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน ทำให้สามารถ ผลิตน้ำประปาหมู่บ้านสำหรับชุมชนให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ชุมชนสามารถใช้น้ำอุปโภคบริโภคได้ปลอดภัย ช่วยลดรายจ่ายจากค่าน้ำดื่มบรรจุขวด พร้อมมีสุขภาวะอนามัยที่ดีขึ้น ชุมชนมีความน่าอยู่และมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

3.3.2 ผลทดสอบคุณภาพน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

ผลการทดสอบคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมีทั่วไป โลหะหนักทั่วไป และแบคทีเรีย ของตัวอย่างน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง ในพื้นที่หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ โดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ เมื่อเทียบกับเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย (ตารางที่ 5) พบว่า

3.3.2.1 ตัวอย่างน้ำดิบ มีคุณภาพน้ำที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในรายการความขุ่น สีปรากฏ ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และเหล็ก ซึ่งเป็นผลคุณภาพน้ำดิบตามแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปที่สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคได้โดยใช้กระบวนการผลิตตามคู่มือของระบบประปาหมู่บ้านของกรมทรัพยากรน้ำ

3.3.2.2 ตัวอย่างน้ำประปาต้นทางและปลายทาง มีคุณภาพน้ำที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในรายการความขุ่น ความเป็นกรดและด่าง เหล็ก โคลิฟอร์มแบคทีเรีย และอีโคไล ซึ่งในรายการความขุ่นและเหล็ก พบว่า มีค่าเกินค่ามาตรฐานแต่มีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างน้ำดิบ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างน้ำประปาทั้ง 2 จุด เมื่อได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพจากกระบวนการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านแล้ว ทำให้ค่าความขุ่นและเหล็กลดน้อยลง แต่ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้มีคุณภาพน้ำได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน จึงควรต้องปรับปรุงหรือตรวจสอบกรรมวิธีการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านอย่างละเอียดเพื่อแก้ไขคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในส่วนของรายการความเป็นกรดและด่างที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบกับตัวอย่างน้ำดิบซึ่งมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน อาจมาจากสาเหตุการปนเปื้อนของสารเคลือบท่อประปาซึ่งต้องสำรวจท่อประปาและเปลี่ยนใหม่ นอกจากนี้การพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียและอีโคไลในตัวอย่างน้ำประปาที่จุดต้นทางและจุดปลายทาง จึงควรต้องปรับปรุงระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาเพื่อให้น้ำประปาหมู่บ้านมีคุณภาพได้มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ผลการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย (ตารางที่ 6) พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำดิบน้ำประปาหมู่บ้านจุดต้นทางและปลายทาง จึงไม่เหมาะสมสำหรับการบริโภค ควรมีกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในระบบการผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน



รูปที่ 4 การสำรวจระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ ในพื้นที่หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์

ตารางที่ 5 ผลทดสอบคุณภาพด้านกายภาพและเคมีของน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง โดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์

ลำดับ	รายการทดสอบคุณภาพน้ำ	หน่วยวัด	ค่ามาตรฐาน	ผลทดสอบน้ำดิบ/น้ำประปา		
				น้ำดิบ	น้ำประปาต้นทาง	น้ำประปาปลายทาง
1	ความขุ่น (Turbidity)	เอ็นทียู	ไม่เกิน 5	238.0	16.8	5.32
2	สีปรากฏ (Apparent color)	แพลตตินัมโคบอลท์	ไม่เกิน 15	33	17	6
3	ความเป็นกรดและด่าง (pH)	-	6.5 – 8.5	7.6	6.6	5.1
4	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 500	608	257	252
5	ความกระด้าง (Hardness)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as $CaCO_3$)	ไม่เกิน 300	37.8	37.0	35.7
6	ซัลเฟต (Sulfate)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	10.5	43	44
7	คลอไรด์ (Chloride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	88.7	97	97
8	ไนเตรท (Nitrate)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO_3)	ไม่เกิน 50	0.85	2.7	8.9
9	ไนไตรท์ (Nitrite)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO_2)	ไม่เกิน 3	-	ไม่พบ	0.03
10	ฟลูออไรด์ (Fluoride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.7	0.46	0.20	0.19
11	เหล็ก (Iron)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	5.9	0.533	0.171
12	แมงกานีส (Manganese)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	0.01	น้อยกว่า 0.010	น้อยกว่า 0.010
13	ทองแดง (Copper)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1	0.01	น้อยกว่า 0.010	ไม่พบ
14	สังกะสี (Zinc)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 3	ไม่พบ	0.021	น้อยกว่า 0.010
15	ตะกั่ว (Lead)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	0.007	ไม่พบ	ไม่พบ
16	โครเมียมรวม (Total chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.05	0.01	ไม่พบ	ไม่พบ
17	แคดเมียม (Cadmium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.003	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
18	สารหนู (Arsenic)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
19	ปรอท (Mercury)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.001	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
20	โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total coliforms bacteria)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	-	มากกว่า 23	มากกว่า 23
21	อีโคไล (*Escherichia coli*)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	-	1.1	1.1

หมายเหตุ : “-” หมายถึง ไม่ได้ส่งตรวจวิเคราะห์

ตารางที่ 6 ผลทดสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง ด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

กิจกรรม	ตัวอย่างน้ำ	ผลทดสอบ	
ก่อนการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	น้ำดิบ	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
	น้ำประปาต้นทาง	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
	น้ำประปาปลายทาง	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

3.3.3 ผลการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติเข้ากับระบบประปาหมู่บ้าน พร้อมเก็บน้ำประปาต้นทางและปลายทาง

3.3.3.1 ตัวอย่าง อุปกรณ์ และสารเคมี

1) ตัวอย่างน้ำ ได้แก่ น้ำดิบ น้ำประปาต้นทาง และน้ำประปาปลายทาง

2) ระบบเติมสารละลายสารส้มแบบอัตโนมัติ

3) ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

4) ชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

5) สารส้มก้อน

6) ถังพลาสติกขนาดบรรจุ 100 ลิตร

3.3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1) ทำความสะอาดระบบประปาหมู่บ้าน โดยล้างระบบตกตะกอน ระบบกรองทราย ถังเก็บน้ำใส และหอถังสูง

2) ติดตั้งชุดอุปกรณ์เติมสารส้มแบบอัตโนมัติ

3) เตรียมสารละลายสารส้ม เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จำนวนปริมาตร 100 ลิตร พร้อมกำหนดอัตราการไหลสารละลายสารส้มที่ปริมาตร 0.5 ลิตรต่อนาที สำหรับตกตะกอนน้ำดิบที่มีความขุ่นมากกว่า 200 เอ็นทียู

4) ติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสนอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติบนหอถังสูง โดยวางในตำแหน่งครอบท่อจ่ายน้ำประปาหมู่บ้านขนาด 4 นิ้ว

5) เชื่อมต่อสายไฟฟ้าเข้ากับระบบตั้งเวลา (Timer) เปิดปิดการทำงานอัตโนมัติ ทำการตั้งเวลาเปิดการทำงานที่ 05.00 น. และปิดการทำงานที่ 21.00 น. (ครอบคลุมช่วงเวลาการใช้น้ำของชุมชน)

6) เก็บตัวอย่างน้ำประปาต้นทางและน้ำประปาปลายทางสำหรับการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 และการทดสอบคุณภาพน้ำตามเกณฑ์น้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ทีมนักวิจัยดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการตกตะกอนโดยการติดตั้งระบบเติมสารส้มแบบอัตโนมัติที่โรงสูบน้ำดิบ เพื่อให้มีการเติมสารละลายสารส้มในความเข้มข้นและอัตราการไหลที่เหมาะสม ทำให้น้ำดิบมีการตกตะกอนได้ดีในถังตกตะกอน น้ำใสที่ผ่านการตกตะกอนจะไหลออกจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังกรองเพื่อกรองตะกอนขนาดเล็กที่หลุดมาจากถังตกตะกอน น้ำที่ผ่านการกรองไหลเข้ามากักเก็บในถังน้ำใสและส่งน้ำขึ้นหอถังสูง ซึ่งมีการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตไว้ในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนหอถังสูง เพื่อจัดส่งน้ำไปยังผู้ใช้น้ำประปาหมู่บ้านตามระบบจ่ายน้ำต่อไป

3.3.4 ผลทดสอบคุณภาพน้ำประปาต้นทางและปลายทาง ภายหลังติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

ผลการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย (ตารางที่ 7) พบว่า น้ำประปาจุดต้นทางผลไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แต่น้ำประปาจุดปลายทาง ผลพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของเชื้อโรคในระบบท่อส่งน้ำประปา จึงทำให้จุดเก็บน้ำประปาปลายทางมีการตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

3.4 ผลการติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ จุดเก็บน้ำประปาปลายทาง

จากผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ณ จุดเก็บน้ำประปาปลายทางที่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย คณะผู้วิจัยจึงดำเนินการติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ จุดปลายทางของระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่โรงเรียนบ้านโพนขวาว หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ เพื่อให้เด็กนักเรียน ครู และประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียงได้มีน้ำดื่มที่มีคุณภาพได้มาตรฐานน้ำบริโภคด้วยความเชื่อมั่น ลดค่าครองชีพในการซื้อน้ำดื่มและมีสุขภาพที่ดี โดยมีผลการทดสอบคุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9



รูปที่ 5 การติดตั้งระบบเติมสารส้มแบบอัตโนมัติที่โรงสูบน้ำดิบ



รูปที่ 6 การติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติเข้ากับระบบประปาหมู่บ้าน

3.5 การอภิปรายผล

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ โดยมีกลุ่มเป้าหมายในการวิจัย คือ ระบบประปาหมู่บ้าน แบบผิวดินขนาดใหญ่ หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ ซึ่งผลการวิจัยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

3.5.1 การออกแบบและพัฒนา โดยใช้ชุดอุปกรณ์รวมหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ จำนวน 4, 2 และ 6 หลอด ตามลำดับ รวมมีขนาดกำลังไฟฟ้า 658 วัตต์ จำนวน 12 หลอด เมื่อคำนวณตามสูตร Keitz พบว่า ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ หากใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรค 1 วินาที จะมีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์. วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้จำนวนอีโคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ลดลงในภาพรวม ร้อยละ 90 (1-log หรือ D_{90}) และที่อัตราการไหล 32 ลิตรต่อวินาที น้ำจะได้รับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99})

3.5.2 การใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในพื้นที่ เนื่องจากระบบประปาหมู่บ้านกลุ่มเป้าหมายยังมีปัญหาคุณภาพน้ำทั้งด้านกายภาพ เคมีทั่วไป และแบคทีเรีย จึงทำให้นักวิจัยจำเป็นต้องดำเนินงานแก้ปัญหาในกระบวนการตกตะกอนของน้ำดิบด้วยการออกแบบและพัฒนาระบบเติมสารส้มที่มีความแม่นยำใช้งานสะดวกและง่ายขึ้นกว่าเดิม ทำให้กระบวนการตกตะกอนสมบูรณ์ขึ้น สภาพของน้ำดิบมีความขุ่นลดลง จากนั้นจึงทำการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนหอถังสูงของระบบประปาหมู่บ้าน เพื่อทดแทนการใช้สารละลายคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้าน ผลการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย พบว่า น้ำประปาจุดต้นทางไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แต่น้ำประปาจุดปลายทางพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แสดงว่าระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ แต่ภายในท่อส่งน้ำประปาอาจมีการปนเปื้อนของเชื้อโรคอยู่ ดังนั้นจึงควรเพิ่มขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคในระบบท่อส่งน้ำประปาด้วยสารละลายคลอรีนก่อนการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและควรมีการบำรุงรักษาให้ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านทั้งระบบอย่างสม่ำเสมอ

3.5.3 การติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ซึ่งมีระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ณ จุดปลายทางของระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่โรงเรียนบ้านโพนขวาว ทำให้มีการฆ่าเชื้อโรคที่ปะปนในระบบท่อส่งน้ำประปา ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านจึงเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย สามารถแก้ปัญหาการพบเชื้อโรคในน้ำประปาที่จุดปลายทาง ดังนั้นในกรณีที่ระบบท่อส่งน้ำประปาหมู่บ้านไม่มีความสะอาดปลอดภัยเพียงพอ จึงควรติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตไว้บริเวณจุดจ่ายน้ำสำหรับบริโภค เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพน้ำดื่มตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ทำให้เด็กนักเรียน ครู และประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียงได้บริโภคน้ำสะอาด รวมทั้งช่วยลดค่าครองชีพในการซื้อน้ำดื่มและเพิ่มสุขภาวะที่ดีให้กับประชาชนในพื้นที่

3.5.4 ระบบประปาหมู่บ้านไม่มีผู้ที่มีความรู้ความเข้าใจและมีประสบการณ์เชี่ยวชาญเป็นผู้ดูแลระบบ ทำให้ไม่สามารถรักษาคุณภาพน้ำให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานได้อย่างต่อเนื่อง จึงเป็นข้อจำกัดในการวิจัย อีกทั้งระบบเติมสารส้มที่ผู้วิจัยพัฒนาติดตั้งเป็นเพียงระบบต้นแบบ จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาให้สามารถทำงานได้คงที่และต่อเนื่อง มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานในการควบคุมคุณภาพน้ำของผู้ดูแลระบบประปาหมู่บ้าน

ตารางที่ 7 ผลทดสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำประปาต้นทางและปลายทางด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย หลังติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยแสงอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

กิจกรรม	น้ำประปา	ผลทดสอบ	
หลังการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ	ต้นทาง	(-) สีแดงจางเล็กน้อย	ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
	ปลายทาง	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ตารางที่ 8 ผลทดสอบคุณภาพด้านกายภาพและเคมีของน้ำประปาหมู่บ้านจุดปลายทาง ณ โรงเรียนบ้านโพนขวาว โดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์

ลำดับ	รายการทดสอบคุณภาพน้ำ	หน่วยวัด	ค่ามาตรฐาน	ผลทดสอบ
1	ความขุ่น (Turbidity)	เอ็นทียู	ไม่เกิน 5	2.0
2	สีปรากฏ (Apparent color)	แพลตตินัมโคบอลท์	ไม่เกิน 15	น้อยกว่า 5
3	ความเป็นกรดและด่าง (pH)	-	6.5 – 8.5	7.0
4	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 500	264
5	ความกระด้าง (Hardness)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as $CaCO_3$)	ไม่เกิน 300	ไม่พบ
6	ซัลเฟต (Sulfate)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	67.4
7	คลอไรด์ (Chloride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	85.2
8	ไนเตรท (Nitrate)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO_3)	ไม่เกิน 50	ไม่พบ
9	ไนไตรท์ (Nitrite)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO_2)	ไม่เกิน 3	ไม่พบ
10	ฟลูออไรด์ (Fluoride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.7	0.57
11	เหล็ก (Iron)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	ไม่พบ
12	แมงกานีส (Manganese)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	ไม่พบ
13	ทองแดง (Copper)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1	0.01
14	สังกะสี (Zinc)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 3	ไม่พบ
15	ตะกั่ว (Lead)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	ไม่พบ
16	โครเมียมรวม (Total chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.05	0.002
17	แคดเมียม (Cadmium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.003	ไม่พบ
18	สารหนู (Arsenic)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	ไม่พบ
19	ปรอท (Mercury)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.001	ไม่พบ
20	โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total coliforms bacteria)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	ไม่พบ
21	อีโคไล (*Escherichia coli*)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	ไม่พบ

ตารางที่ 9 ผลทดสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำประปาหมู่บ้านจุดปลายทาง ณ โรงเรียนบ้านโพนขวาว ด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

ตัวอย่างน้ำ	ผลทดสอบ	ข้อแนะนำ
โรงเรียนบ้านโพนขวาว	(-) สีแดงจางเล็กน้อย	ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย



รูปที่ 7 ติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ โรงเรียนบ้านโพนขวาว หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์

4. สรุป (Conclusions)

ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ ได้รับการออกแบบและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศ โดยระบบประกอบด้วยผลิตหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้า รวมเท่ากับ 658 วัตต์ จำนวน 12 หลอด พบว่า หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ สามารถผลิตปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้จำนวนอีโคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ลดลงในภาพรวม ร้อยละ 90 (1-log หรือ D_{90}) และที่อัตราการไหล 32 ลิตรต่อวินาที น้ำจะได้รับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต ที่สามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) เมื่อทดสอบการใช้งานของระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในพื้นที่ประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ โดยดำเนินการติดตั้งระบบในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนหอถังสูงของระบบประปาหมู่บ้าน พบว่า สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ ทำให้คุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ระบบจึงมีประสิทธิภาพการใช้งานในพื้นที่ได้จริง แต่เนื่องจากระบบท่อส่งน้ำประปาหมู่บ้านยังมีการปนเปื้อนของเชื้อโรค จึงทำให้พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่จุดเก็บน้ำปลายทาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีของกรมวิทยาศาสตร์บริการ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพและความปลอดภัยของน้ำดื่มให้กับเด็กนักเรียน ครูและประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียง เป็นการนำวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมสู่การดูแลประชาชน ทำให้ทุกพื้นที่ในประเทศไทยมีน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภคและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัย สร้างคุณภาพชีวิตที่ดี เป็นสังคมแห่งความสุขและยั่งยืนตลอดไป และควรมีการวิจัยพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตสำหรับประปาหมู่บ้านให้มีประสิทธิภาพถึงระดับ 4-Log หรือ $D_{99.99}$ เพื่อทดแทนการใช้คลอรีนอย่างถาวรในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้นิพนธ์บทความวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรสถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความร่วมมือสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] กรุงเทพธุรกิจ. น้ำประปาหมู่บ้าน แค่ 4% ผ่านรับรองความปลอดภัย [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://www.bangkokbiznews.com/health/public-health/1162649

[2] ศูนย์การศึกษาเพื่อชุมชนในเขตภูเขา. รายการข้อมูลที่นำมาใช้ (วิเคราะห์สถานการณ์) ตัวชี้วัดที่ 3.32 : รอบ 5 เดือนแรก ประจำปีงบประมาณ 2568 ศูนย์การเรียนรู้ชุมชนชาวไทยภูเขา “แม่ฟ้าหลวง” เข้าถึงน้ำบริโภคสะอาดตามมาตรฐานกรมอนามัย [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://hhdc.anamai.moph.go.th/web-upload/40x2bbc9a2164f1c536be9c0394dc58f0e6/filecenter/pa/pa2568/3.32/01_First_Round/3.32-01.pdf

[3] Sun W, Ao X, Lu D, Zhang Y, Xue Y, He S, et al. Ultraviolet technology application in urban water supply and wastewater treatment in China: Issues, challenges and future directions. Water Research X. 2024;23:1-8. https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100225

[4] Paidalwar AA, Khedikar IP. Overview of water disinfection by UV technology – A review. International Journal of Science Technology & Engineering. 2016;2(9):213-219. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30976.25608

[5] Caroline K. Misleading math: Kill claims and log reduction [Internet]. 2019 [cited 2024 Dec 12]. Available from: https://infectioncontrol.tips/2019/06/17/kill-claims-and-log-reduction/

[6] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมทรัพยากรน้ำ, สำนักบริหารจัดการน้ำ. แบบมาตรฐานระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการน้ำ; 2546.

Submission guidelines

Submission preparation checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

1. Certify that the manuscript is authors' original work, has not been published before, and is not being considered for publication elsewhere.
2. Confirm that results, records and reports are presented clearly, honestly without fabrication, falsification.
3. When referring to a source accessed from the internet, provide the URLs and a retrieval date in the reference list.
4. Certify that the experiment's independent variables are not changed, altered, or influenced on purpose by the researchers (Experimental manipulation).
5. Prepare manuscript in Microsoft Word format, align paragraphs justified, use single-spaced lines, Times New Roman font, and Vancouver referencing style. More stylistic and reference list requirements are outlined in the Author Guidelines.
6. As part of online submission process, the journal will contact authors through their registered e-mail address, please check your inbox regularly. If it is not there, please check your spam/junk mail folder. If you still experience difficulties during submission, please contact tci.thai@gmail.com or bas@dss.go.th
7. Authorship list should be honestly reflected their intellectual contributions to the work.
8. Provide authors, name and mobile phone number in "Comment for Editor" and save. For inquiries, please also send to "Comment for Editor".

Author guidelines
Manuscript preparation and submission
For Research and Academic article

1. The manuscript should be written in English.
2. The title should be in Times New Roman, bold, 16-point font, and center-aligned. Only the first word should be capitalized.
3. The author's full name (first name and last name) should be in Times New Roman, regular, 14-point font, and center-aligned. Use superscript numerals (1, 2, 3, etc.) after the author's name to indicate the corresponding affiliation. Use an asterisk (*) after the corresponding author's name to indicate the corresponding e-mail address.
4. The affiliations should be in Times New Roman, italic, 10-point font and center-aligned. Use superscript numerals (1, 2, 3, etc.) before each affiliation to correspond to the superscript numerals following the author names.
5. The corresponding author's e-mail address should be in Times New Roman, regular, 10-point font, and center-aligned. Use an asterisk (*) before the corresponding author's e-mail address.

Example:

Title of the paper

First name Last name [1*], First name Last name [2]

[1]Institute of Digital Technology for Science Service, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand
[2]Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
*Corresponding author's e-mail: bas@dss.go.th

6. The main section headings should be in Times New Roman, 10-point font, bold, and left-aligned.
7. The content should be in Times New Roman, 10-point font, regular, with a first-line indent of 0.25 cm.
8. The table must have a caption that includes the table number placed above the table, in Times New Roman, regular, 10 pt, and left-aligned.
9. The figure must have a caption that includes the figure number on the bottom of the figure, in Times New Roman, regular, 10 pt, and center-aligned. Images must have a minimum resolution of 300 dpi. Authors must submit the original image files in TIFF, EPS, PNG, or JPEG.
10. The manuscript should be prepared and submitted in a length of 10-15 pages.

11. Guidelines for creating a graphical abstract: The author is solely responsible for creating the graphical abstract. The submission will be subject to thorough evaluation, verification, and possible refinement by the editorial board to ensure accuracy and completeness.

11.1 Image size: please provide an image with a minimum size of 1024 × 768 pixels (height × width) and a minimum resolution of 300 dpi.

11.2 File type: preferred file types are TIFF, EPS, PNG, and JPEG.

11.3 Additional text, outlines, or synopses must not be included. All text or labels must be part of the image file.

Research article

1. The manuscript should be written in English.
2. The manuscript should include the title, author's full name (first name and last name), full affiliation, the corresponding author's e-mail address, abstract, and the main text.
3. Abstract

3.1 The main headings should be in Times New Roman, 10-point font, bold, and left-aligned.

3.2 The abstract should be in Times New Roman, 10-point font, regular, 200-250 words in length, with a first-line indent of 0.25 cm.

4. Keywords should be in Times New Roman, 10-point font, left-aligned, and include 3-5 keywords.
5. Main text

5.1 The main headings should be in Times New Roman, 10-point font, bold, left-aligned.

5.2 The body text should be in Times New Roman, 10-point font, regular, with a first-line indent of 0.25 cm.

5.3 The manuscript should include the following sections: Introduction, Materials and methods, Results and discussion, Conclusions, Acknowledgements, and References.

6. References should be formatted according to the Vancouver referencing style.

Academic article

1. The manuscript should be written in English.
2. The manuscript should include the title, author's full name (first name and last name), full affiliation, the corresponding author's e-mail address, abstract, and the main text.
3. Abstract

3.1 The main headings should be in Times New Roman, 10-point font, bold, and left-aligned.

3.2 The abstract should be in Times New Roman, 10-point font, regular, 200-250 words in length, with a first-line indent of 0.25 cm.

4. Keywords should be in Times New Roman, 10-point font, left-aligned, and include 3-5 keywords.
5. Main text

5.1 The main headings should be in Times New Roman, 10-point font, bold, left-aligned.

5.2 The body text should be in Times New Roman, 10-point font, regular, with a first-line indent of 0.25 cm.

5.3 The manuscript should include the following sections: Introduction, Content, Conclusions, Acknowledgements, and References.

6. References should be formatted according to the Vancouver referencing style.

Bulletin of Applied Sciences

Volume 15 Issue 1 January - June 2026
https://doi.org/10.60136/bas.vXX.202X.XXXX

Research Article

Title of the paper (Times New Roman, 16 pt, **Bold**, Centered align)

First name Last name [1], First name Last name [2*]
(Times New Roman, 14 pt, Regular, Centered align)

Full Affiliation (Times New Roman, 10 pt, Italic, Centered align)
[1]Department, Faculty, University, Province Postcode, Country
[2]Department, Faculty, University, Province Postcode, Country which different from the above
[*]Corresponding author's e-mail: e-mail (Times New Roman, 10 pt, Regular, Centered align)

Received: xxx, Revised: xxx, Accepted: xxx (Times New Roman, 9 pt, Italic, Centered align)

Abstract (Main topic: Times New Roman, 10 pt, **Bold**, Align Left)
Text (Content: Times New Roman, 10 pt, 200-250 words, Tab 0.25 cm)……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Keywords: Keyword, keyword, keyword, keyword, keyword (Times New Roman, 10 pt, Align Left, 3–5 keywords/phrases)

1. Introduction (Main topic: Times New Roman, 10 pt, **Bold**, Align Left)

1.1 Text (Content: Times New Roman, 10 pt, Regular, Tab 0.25 cm) .....

2. Materials and methods (Main topic: Times New Roman, 10 pt, **Bold**, Align Left)

2.1 Text (Content: Times New Roman, 10 pt, Regular, Tab 0.25 cm) .....

3. Results and discussion (Main topic: Times New Roman, 10 pt, **Bold**, Align Left)

3.1 Text (Content: Times New Roman, 10 pt, Regular, Tab 0.25 cm) .....

4. Conclusions (Main topic: Times New Roman, 10 pt, **Bold**, Align Left)

4.1 Text (Content: Times New Roman, 10 pt, Regular, Tab 0.25 cm) .....

5. Acknowledgements (Main topic: Times New Roman, 10 pt, **Bold**, Align Left)

Text (Content: Times New Roman, 10 pt, Regular, Tab 0.25 cm) .....

6. References (Main topic: Times New Roman, 10 pt, **Bold**, Align Left, 10-20 references)

[1] Text (Times New Roman, 10 pt, Regular, Align Left)
[2] Text .....
[3] Text .....
[4] Text .....
[5] Text .....
[6] Text .....
[7] Text .....
[8] Text .....
[9] Text .....
[10] Text .....

Table and Figure

Table: Every table must have a caption that includes the table number placed above the table, in Times New Roman, regular, 10 pt, and left-aligned.

Figure: Every figure must have a caption that includes the figure number on the bottom of the figure, in Times New Roman, regular, 10 pt, and centered align. Images must have a minimum resolution of 300 dpi. Authors must submit the original image files in TIFF, EPS, PNG, or JPEG.

Manuscript preparation

Please prepare a manuscript of 10-15 pages.

Guidelines for creating a graphical abstract

The author is solely responsible for creating the graphical abstract. The submission will be subject to thorough evaluation, verification, and possible refinement by the editorial board to ensure accuracy and completeness.

1. Image size: please provide an image with a minimum size of 1024 × 768 pixels (height × width) and a minimum resolution of 300 dpi.
2. File type: preferred file types are TIFF, EPS, PNG, and JPEG
3. Additional text, outlines, or synopses must not be included. All text or labels must be part of the image file.

Please recommend the names of 3-5 referees

We encourage authors to submit the names of 3-5 referees (preferably not from the author's own country) who are suitable to review the work, in order to assist the peer review process.

1. Name, Affiliation, Country, e-mail
2. Name, Affiliation, Country, e-mail
3. Name, Affiliation, Country, e-mail
4. Name, Affiliation, Country, e-mail
5. Name, Affiliation, Country, e-mail

Guidelines for writing references in the Vancouver style

The Vancouver style consists of two parts:

1. In-text citation: When referencing the work of others, whether in part or in whole, include the reference number in square brackets ([ ]) immediately after the author's name or the cited text. Use the same reference numbers consistently for repeated citations. In the reference list at the end of the article, arrange the references in the order in which they appear in the text. When citing multiple references simultaneously, use an en dash (–) between consecutive numbers (e.g., [1–3]). If the reference numbers are not consecutive, separate them with commas (e.g., [2,4]).

2. Reference list: The reference list is a compilation of all sources cited in the text. It appears at the end of the article under the heading "References." Arrange the references in numerical order (1, 2, 3, …) within square brackets ([ ]). The reference numbers must correspond to the order of their appearance in the text. The information included in each reference entry varies depending on the type of source, such as books, journal articles, theses, conference papers, online documents, e-books, patents, standards, and others.

Reference list

should follow the **Vancouver style**, as illustrated below:

1. Books

> Author AA. *Title of Book*. Edition (if applicable). Place of Publication: Publisher; Year of Publication.

[1] Hubschmann HJ. Handbook of GC-MS: Fundamentals and application. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2015.

[2] AOAC International. HPLC post-column derivatization environmental food and feed analysis product testing solutions. Mountain View (CA): Pickering Laboratories; 2019.

2. Chapter in a book

> Author AA. Title of Chapter. *In*: Editor AA, editor(s). Title of Book. Edition (if applicable). Place of Publication: Publisher; Year of Publication. p. Start Page-End Page.

[1] Box GEP, Wilson KB. On the experimental attainment of optimum conditions. *In*: Kotz S, Johnson NL, editors. Breakthroughs in statistics. New York: Springer; 1992. p. 270-310.

[2] Meltzer PS, Kallioniemi A, Trent JM. Chromosome alterations in human solid tumors. *In*: Vogelstein B, Kinzler KW, editors. The genetic basis of human cancer. New York: McGraw-Hill; 2002. p. 93-113.

3. Journal articles

> Author AA. Title of Article. Title of Journal. Year of Publication;Volume(Issue):Start Page-End Page.

[1] Intiang J, Sirichote W, Boonsanit S. Development of automatic calibration system for electronic balances. Bulletin of Applied Sciences. 2019;8(8):40-47.

[2] Rose ME, Huerbin MB, Melick J, Marion DW, Palmer AM, Schiding JK, et al. Regulation of interstitial excitatory amino acid concentrations after cortical contusion injury. Brain Research. 2002;935(1-2):40-46.

[3] Wen S, Miao Y, Tang Y, Song Z, Feng Q. Theoretical and experimental study on high-entropy flotation of micro-fine cassiterite. International Journal of Mining Science and Technology. 2025;35(1):19-39.

4. Articles with a DOI

> Author AA. Title of Article. Title of Journal. Year of Publication;Volume(Issue):Start Page-End Page. https://doi.org/DOI

[1] Kang C, Ma H, Li Y, Zhang C, Hong Y, Shao M. Determination of acrylamide in foods by automatic accelerated solvent extraction and gas chromatography-mass spectrometry. Acta Chromatographica. 2020;33(1):64-72. https://doi.org/10.1556/1326.2020.00755

[2] Driver CN, Laporta ML, Bergese SD, Urman RD, DiPiazza F, Overdyk FJ, et al. Frequency and temporal distribution of postoperative respiratory depressive events. Anesthesia & Analgesia. 2021;132(5):1206-1214. https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000005478

5. Theses/Dissertations

> Author AA. Title of Thesis/Dissertation [Type/Degree Level]. Place of Publication: Institution; Year of Degree Awarded.

[1] Borkowski MM. Infant sleep and feeding: A telephone survey of Hispanic Americans [dissertation]. Mount Pleasant (MI): Central Michigan University; 2002.
[2] Tesema BH. Tannery solid waste generation rate and preparation of leather board from chrome shaving waste and plant fibers "a wealth from waste approach for leather industry" [thesis]. Ethiopia: Addis Ababa University; 2018.

6. Conference papers

> Author AA. Title of Paper. *In*: *Title of Conference Proceedings*; Date of Conference; Place of Conference. p. Start Page-End Page.

[1] Christensen S, Oppacher F. An analysis of Koza's computational effort statistic for genetic programming. *In*: Proceedings of the 5th European Conference on Genetic Programming; 2002 Apr 3–5; Kinsdale, Ireland. p. 182-191.
[2] Koning AJ, Hilaire S, Duijvestijn MC. TALYS: Comprehensive nuclear reaction modeling. *In*: Haight RC, Chadwick MB, Kawano T, Talou P, editors. *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*; 2004 Sep 6–Oct 1; Santa Fe (NM), USA. p. 1154-1159.

7. Online documents / Electronic resources

> Author AA. Title of Document [Media Type]. Year of Publication [cited Year Month Day]. Available from: URL

[1] Caroline K. Misleading math: Kill claims and log reduction [Internet]. 2019 [cited 2024 Dec 12]. Available from: https://infectioncontrol.tips/2019/06/17/kill-claims-and-log-reduction/
[2] U.S. Food and Drug Administration. Is your hand sanitizer on FDA's list of products you should not use? [Internet]. 2020 [cited 2025 Jan 13]. Available from: https://www.fda.gov/drugs/drug-safety-and-availability/fda-updates-hand-sanitizers-consumers-should-not-use#products

8. Electronic books (e-Books)

> Author AA. Title of Book [Media Type]. Edition (if applicable). Place of Publication: Publisher; Year of Publication [cited Year Month Day]. Available from: URL

[1] Knoop KJ, Stack LB, Storrow AB, Thurman J. The atlas of emergency medicine [Internet]. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2021 [cited 2021 Apr 27]. Available from: https://accessmedicine.mhmedical.com/book.aspx?bookid=2969
[2] AOAC International. Appendix F: Guidelines for standard method performance requirements [Internet]. Oxford: Oxford University Press; 2016 [cited 2023 Dec 20]. Available from: https://www.aoac.org/wp-content/uploads/2019/08/app_f.pdf

9. Patents

> Inventor AA, inventor(s); Assignee's Name, assignee(s). Title of Invention. Country of Patent Issuance Patent Number. Date of Patent.

[1] Pagedas AC, inventor; Ancel Surgical R&D Inc., assignee. Flexible endoscopic grasping and cutting device and positioning tool. United States patent US 20020103498. 2002 Aug 1.
[2] Smith P, Evans D, Singer GE, inventors. Oxford University, assignee. Flexible heart valve. European patent 1474623. 2020 Oct 12.
[3] Ohkubo S, inventor; Seiko Ohkubo, assignee. Acupressure appliance for medical treatment. United Kingdom patent GB 2350301. 2000 Nov 29.

10. Standards

> Name of Organization or Professional Association. Title of Standard. (Standard Number). Place of Publication: Publisher; Year of Publication.

[1] ASTM International. *Standard test method for tensile properties of plastics.* (ASTM D638–14). West Conshohocken (PA): ASTM International; 2014.

[2] British Standards Institution (BSI). *Foodstuffs – Determination of sucralose – High performance liquid chromatographic method.* (BS EN 16155:2012). London: BSI; 2012.

[3] International Organization for Standardization (ISO). Metallic materials-calibration and verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines-calibration and verification of the force-measuring system. (ISO 7500-1:2018(E)). Geneva: ISO; 2018.

For other publications

include all bibliographical information necessary for retrieving the reference, when in doubt.

Keyword index

A
Andrographis paniculata 36

B
Bathroom safety 1

C
Chemical treatment 16
Coconut fiber 16
Composite materials 16

D
Disinfection system 45

E
Efficiency 45
Elderly 1
Estimated bias (eBias) 25

F
Fall prevention 1

I
Innovation 10
Intralaboratory reproducibility standard deviation 25

M
Mechanical properties 16

P
Palm wax sticks 10
Polyvinyl alcohol 16
Portable electric tjanting pen 10

S
Sit-to-stand assistive device 1
Solar drying system 36

U
Ultraviolet 45

V
Verification ISO 16140 25
Village tap water 45

W
Water activity 36
Wet basis moisture content 36

Author index

A
Anucha Sinthusarn 45
Apaporn Sinthusarn 10, 45

C
Chompunoot Wangboon 25

D
Denchai Wongsrikaew 25

J
Jarawee Leksuksri 16

K
Kartoon Pengprom 10
Kotchanipha Yuyen 36

M
Mantana Jamklang 25

P
Pongpat Kiatprasert 25

S
Sarawut Nabnean 36
Somphon Sincharoenpokai 10
Surawut Puangmalee 16

T
Thanakorn Yootho 1
Thitarini Suropan 16

W
Watsana Penkhrue 25

Y
Yutthana Pititheeraphab 1

