

FRONTIERS IN ENGINEERING INNOVATION RESEARCH

แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม



ISSN 3056-9273 (Online)

Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

ปีที่ **22** ฉบับที่ **2** เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม **2567**

ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

สารบัญ

การบริหารจัดการด้านอัคคีภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลำดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ Fire management in the disaster prevention and mitigation division of lad luang municipality, phra pradaeng district, samut prakan province โดย : กาจก้อง ภิญโญ และพงศ์กุลธร โรจนวิรุฬห์	1
ทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงในเขต กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล The attitudes of stakeholders on causes leading to cost overrun in high-rise building projects in Bangkok and surroundings โดย : Vannoeun Som กิตติพงษ์ สุวีโร และวุฒิพงศ์ เมื่อน้อย	12
การวัดสนามความเครียดในการดึงทดสอบวัสดุโดยใช้วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน Strain field measurements in the tensile tests using digital image correlation โดย : ฤทธิพล จันทราชฎร์ และวิศิษฐ์ สีลาผาติกุล	24
ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค-เศรษฐศาสตร์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรม Techno-economic feasibility study of electricity generation from industrial wastewater treatment system โดย : ภาณุพงษ์ สามล จงจิตร หิรัญลาภ ชัยพร สุภาหิตานุกุล สุเมธ สถิตบุญอนันต์ และโจเซฟ เคดารี	36
การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น Investigation of using blowdown of cooling tower to generate electricity โดย : ธันยาภรณ์ คงสินชัย จงจิตร หิรัญลาภ ชัยพร สุภาหิตานุกุล สุเมธ สถิตบุญอนันต์ และโจเซฟ เคดารี	47
การประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี โครงข่ายประสาทเทียม Application of hardware-in-the-loop for maximum power tracking of solar panels using artificial neural network โดย : ไพโรจน์ ทองประศรี และชาม สุทธิ	59
การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชีวภาพจากพอลิแลกติกแอซิดผสมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งสาคุเสริมแรงด้วย เส้นใยใบสับปะรด Development of bio-composite material from polylactic acid blended with thermoplastic from sago starch and reinforced with pineapple leaf fiber โดย : ศรีสุดา จันศิริ จงจิตร หิรัญลาภ สุเมธ สถิตบุญอนันต์ ชัยพร สุภาหิตานุกุล และโจเซฟ เคดารี	71

<p>ระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์</p> <p>Prepaid water consumption control system via online top-up system and notification through line application</p> <p>โดย : อีระพล เหมือนขาว สุรินทร์ แห่งมงาม มาโนช ประชา พชรพล กาญจนเวโรจน์ และนันท์พัทธ์ ธนณัฐสกุล</p>	83
<p>ผลของพารามิเตอร์ควบคุมก๊าซไอเสียของการคาร์บอนไนเซชันชีวมวลร่วมกับ ขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านบัวสำหรับการดูดกลิ่น</p> <p>Flue gas control parameter effects of biomass carbonization with heating coil on the production of lotus charcoal for odor absorption</p> <p>โดย : ไพโรจน์ จันทรแก้ว อภิรักษ์ ชัดวิลาส อนุรัตน์ เทวตา จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และสำรวม โทศลานันท์</p>	93
<p>การออกแบบและพัฒนาผนังเปลือกอาคารเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลอเนกประสงค์</p> <p>Design and development of a multi-purpose modular solar cell facade</p> <p>โดย : จรัล รุ่งเรืองสรการ จงจิตร หิรัญลาภ ชัยพร สุภาหิตานุกุล สุเมธ สถิตบุญอนันต์ และโจเซฟ เคดารี</p>	104
<p>การพัฒนาปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่</p> <p>Development of large scale photovoltaic solar chimney</p> <p>โดย : อรุณยุพา บัวทรัพย์ จงจิตร หิรัญลาภ ชัยพร สุภาหิตานุกุล สุเมธ สถิตบุญอนันต์ และโจเซฟ เคดารี</p>	115



แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

คณะกรรมการจัดทำวารสาร แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

รศ. ดร. เข็มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ. ดร. ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ. ดร. กัณวรัช พลุประทุม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ. ดร. อารงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ. ณรงค์ บวบทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ. ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ศ. ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร. สุมนมาลย์ เนียมกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร. ศิริชัย แดงเอม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร. ศิริชัย ต่อสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร. ณัฐภัทร พันธุ์คง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ. ดร. อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ. ชวลิต แสงสวัสดิ์	33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผศ. ดร. ประช สิริสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนร์พี สุนันทพจน์



Frontiers in Engineering Innovation Research

Editorial Board Members

Consultant Board Members

President of Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Vice President of Academic Affairs
Dean, Faculty of Engineering

Editorial Board

Assoc. Prof. Dr. Khemchai Hemachandra	Faculty of Science Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Siriwan Srisorrachatr	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc. Prof. Dr. Ganwarich Pluphrach	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc. Prof. Dr. Thumrongrat Mungcharoen	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc. Prof. Narong Buabthong	Faculty of Engineering Thammasat University
Assoc. Prof. Dr. Somjate Patcharaphun	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Prof. Dr. Krischonme Bhumkittipich	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Sumonman Niamlang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Sirichai Dangeam	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Sirichai Torsakul	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Nathabhat Phankong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Pathomthat Chiradeja	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst. Prof. Dr. Ankana Punlor	College of Engineering Rangsit University
Asst. Prof. Chavalit Sangswasd	33 Soi Udomsuk 28 BangNa District Bangkok 10260

Editor in Chief

Asst. Prof. Dr. Porakoch Sirisuwan

Secretary

Miss Amonrat Yimyoo

System administrator

Mr. Patrapee Sunantapot



แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

บทบรรณาธิการ

วารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม (Frontiers in engineering innovation research) สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2567 ฉบับนี้ มีบทความที่ผ่านการพิจารณา และ ประเมินผลจากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีคุณภาพจำนวนไม่ต่ำกว่า 3 ท่าน ต่อการประเมิน 1 บทความ โดยกองบรรณาธิการได้มีการพิจารณาผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจากความเชี่ยวชาญในศาสตร์ของบทความที่รับพิจารณา

วารสารฉบับนี้ ได้รวบรวมตีพิมพ์เผยแพร่ในฉบับนี้ทั้งหมด 11 บทความ โดยยังคงมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี และ เน้นงานวิจัยด้านวิศวกรรมเป็นหลัก ซึ่งได้รับความสนใจนำส่งบทความจากผู้เขียนที่หลากหลายสถาบัน

วารสาร แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม ยังคงมีวัตถุประสงค์ที่จะเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีทั้งภายในประเทศและ ต่างประเทศ รวมทั้งพัฒนาศักยภาพ ความรู้ ความคิด สติปัญญาของนักศึกษา และบุคคลอื่นๆที่สนใจ ให้เป็นการพัฒนาที่ยั่งยืน ตลอดไป

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ. ดร. คณิต มานะรุระ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
รศ. ดร. นที อธิกคุณากร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ผศ. ดร. วุฒิวัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ. ดร. ณัฐพงษ์ พันธุ์ชนะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ. ดร. ณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
ผศ. ดร. พิทักษ์ บุญนุ่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ. ดร. สมบัติ ทิมทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผศ. ดร. มนต์ชัย พุกขวิไลเลิศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ. ดร. สุนิศา คุณารักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ. ดร. ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ. ดร. ภัทรพร พรเทพเกษมสันต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ. ดร. ปิติศานต์ กร้ามาตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร. พุกศยน นินทนางศา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. มานพ แยมแพง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. วรณศิริ จักรบุตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. รุกฤษ ปานชลธิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
ผศ. ดร. นิรันดร์ วัชรโคม	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี
ผศ. ดร. ปราโมทย์ วีรานุกูล	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รศ. ดร. จอมภพ แววศักดิ์	คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผศ. ดร. อรวลี อมรสิทธิ์ระกุล	คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
นางพุทธธิดา รัตนภรณ์	วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก
นายพูนศักดิ์ วงศ์เสงี่ยม	สำนักงานอำนวยการสาธารณสุข สำนักป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย
รศ. ดร. ทนงศักดิ์ อิ่มใจ	สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ. ดร. จิรวัดน์ สิตรานนท์	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

Peer Reviews

Assoc. Prof. Dr. Kanit Manatura	Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Nathee Athigakunagorn	Faculty of Engineering Kamphaengsaen Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Asst. Prof. Dr. Wuttiwat Kongrattanaprasert	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Krungthep Bangkok
Asst. Prof. Dr. Nattapong Phanthuna	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Asst. Prof. Dr. Narongrit Pimkumwong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Tak
Asst. Prof. Dr. Pituk Bunnoon	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Srivijaya
Assoc. Prof. Dr. Sombat Teekasap	Faculty of Engineering Thonburi University
Asst. Prof. Dr. Monchai Prukvilailert	Faculty of Engineering Thammasat University Rangsit Campus
Asst. Prof. Dr. Sunisa Kunarak	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst. Prof. Dr. Prachasanti Thaiyasuit	Faculty of Engineering Ubon Ratchathani University
Asst. Prof. Dr. Patrathorn Phornthepkasemsant	Faculty of Engineering Burapha University
Assoc. Prof. Dr. Pitisan Krammart	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Prusayon Nintanavongsa	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Chatchai Suppitaksakul	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Manop Yamfang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Waroonsiri Jakarbutr	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Thakrit Panklib	Faculty of Engineering and Technology Siam Technology College
Asst. Prof. Dr. Niran Watchrodorn	Faculty of Industrial Education Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Suphanburi Campus
Asst. Prof. Dr. Pramot Weeranukul	Faculty of Industrial Education Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Assoc. Prof. Dr. Jompob Waewsak	Faculty of Science and Digital Innovation Thaksin University

Peer Reviews

Asst. Prof. Dr. Onvalee Amornleetrakul

Faculty of Architecture and Design King Mongkut's
University of Technology North Bangkok

Mrs. Phutthathida Rattanaporn

Eastern Technological College

Mr. Poonsak Vongsakeam

Bureau of Disaster Prevention and Mitigation Bangkok

Assoc. Prof. Dr. Thanongsak Imjai

School of Engineering and Technology Walailak University

Asst. Prof. Dr. Jirawat Sitranon

School of Engineering and Innovation Rajamangala
University of Technology Tawan-ok

การบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ

กาจก้อง ภิญโญ^{1*} และพงศ์กุลธร โรจนวิรุฬห์¹
duriyaphan8246@gmail.com^{1*} p_kultorn@hotmail.com¹

¹ สาขาวิชาการจัดการความปลอดภัย คณะตำรวจศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ

Received: June 14, 2024 Revised: August 13, 2024 Accepted: August 14, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบริหารจัดการปัญหา อุปสรรค และเสนอแนะแนวทางการบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้กำหนดให้ประชากรทั้งหมดคือกลุ่มตัวอย่างมีจำนวน 50 คน และใช้กลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพจำนวน 15 คน ผู้วิจัยใช้กระบวนการวิจัยเชิงปริมาณและคุณภาพ และเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามและการสัมภาษณ์เชิงลึก ผลการวิจัยพบว่า 1) การบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ โดยรวม อยู่ในระดับดี 2) แนวทางการบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ คือ ควรมีผู้บัญชาการสถานการณ์ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านในการปฏิบัติด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยโดยตรง รวมถึงสร้างจิตสำนึกให้ประชาชนรับรู้และเข้ามามีส่วนร่วมในการป้องกันอค์คิภัยในชุมชน ส่งเสริมการมีส่วนร่วมมีการบูรณาการทุกภาคส่วนในการบริหารจัดการทั้งภาครัฐเอกชน ประชาชน มูลนิธิอาสาสมัครและมีศูนย์ฝึกอบรม และควรมีการสนับสนุนงบประมาณให้เพียงพอเพื่อให้ทุกภาคส่วนได้มีส่วนร่วมในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การบริหารจัดการด้านอค์คิภัย งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย อค์คิภัย

Fire management in the disaster prevention and mitigation division of lad luang municipality, phra pradaeng district, samut prakan province

Gardkong Pinyo^{1*} and Phongkultorn Rojviroon¹
duriyaphan8246@gmail.com^{1*} p_kultorn@hotmail.com¹

¹Public Administration program In Security Management, Faculty of Police Science, Royal Police Cadet

Received: June 14, 2024 Revised: August 13, 2024 Accepted: August 14, 2024

Abstract

This article aims to study the management of problems, obstacles, and suggest guidelines for the development of fire management in Lat Luang Municipality's public disaster prevention and relief work. Phra Pradaeng District Samut Prakan Province, sample group used in this study The total population was determined to be a sample of 50 people and a sample of 15 people was used to collect qualitative data. The researcher used quantitative and qualitative research processes. and collected data using questionnaires and in-depth interviews. The results of the research found that 1) Fire management of disaster prevention and relief work in Lat Luang Municipality. Phra Pradaeng District Samut Prakan Province as a whole is at a good level. 2) Guidelines for developing fire management of disaster prevention and relief work in Lat Luang Municipality. Phra Pradaeng District Samut Prakan Province: There should be a situation commander with specific knowledge and expertise in direct disaster prevention and relief operations. Including creating awareness for the people to be aware and participate in fire prevention in the community. Promote participation and integration of all sectors in management, including the public and private sectors, the public, volunteer foundations and training centers. And there should be sufficient budget support for all sectors to participate in sustainable disaster prevention and relief.

Keywords: Fire management, Disaster prevention and relief work, Fire

1. บทนำ

งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยมีอำนาจและหน้าที่รับผิดชอบในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย รวมถึงการปฏิบัติการป้องกันและระงับอัคคีภัยและภัยพิบัติอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีการประสานงานกับหน่วยงานภาครัฐและเอกชน เพื่อดำเนินการป้องกันและระงับอัคคีภัย และบรรเทาสาธารณภัย การให้การสงเคราะห์และบรรเทาความเดือดร้อนแก่ผู้ประสบภัย การกำหนดและประสานแผนการปฏิบัติงานให้สอดคล้องกับแผนที่กำหนดไว้ การดำเนินการตามกฎหมายว่าด้วยการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย ปฏิบัติภารกิจภายใต้พระราชบัญญัติ ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พ.ศ. 2550 และแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติ พ.ศ. 2558 รวมถึงกฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สิน และเสริมสร้างความเชื่อมั่นในศักยภาพของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยให้กับประชาชน [1]

ภาระหน้าที่ของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ มีหน้าที่ดำเนินการตามแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ที่สอดคล้องกับแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติเพื่อให้หน่วยงานใช้เป็นกรอบแนวทางในการดำเนินงาน ด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เนื่องจากพื้นที่เทศบาลเมืองลัดหลวงมีบ้านเรือนประชากร 37,047 หลังคาเรือน และมีประชากรอาศัยอยู่ประมาณ 72,077 คน [2] อีกทั้งยังเป็นพื้นที่ตั้งของสถานศึกษา สถานที่สำคัญทางศาสนา โรงพยาบาล และร้านค้าที่มีผลต่อเศรษฐกิจของเทศบาลเมืองลัดหลวง ที่กระจุกตัวอยู่เป็นจำนวนมาก หากเกิดเหตุอัคคีภัยจะทำให้อยู่ในระดับที่รุนแรงเป็นอย่างมาก แต่จากการปฏิบัติงานที่ผ่านมาได้มีแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ พ.ศ. 2558 ใช้เป็นกรอบในการบริหารจัดการและแก้ไขปัญหาสาธารณภัย รวมถึงแก้ไขปัญหาในสถานการณ์ใหญ่ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น การร่วมปฏิบัติการเหตุโรงงานระเบิด

และไฟไหม้โรงงานผลิตกระจก ในซอยสุขสวัสดิ์ 64 ต.บางครุ อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ ความเสียหายประมาณ 10 ล้านบาท ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปราศจากผู้เสียชีวิต หรือการร่วมปฏิบัติการเหตุไฟไหม้ตลาดเก่าอายุ 50 ปี อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ ความเสียหายประมาณ 30 ล้านบาท โดยไม่มีผู้เสียชีวิต และระงับเหตุไม่ให้เกิดความเสียหายเพิ่มเติม ทั้งในเรื่องการบริหารจัดการ การบูรณาการ และความสามารถของหน่วยงานในการเผชิญเหตุดังกล่าวได้เป็นอย่างดี และเป็นระบบ และจังหวัดสมุทรปราการที่เปลี่ยนแปลงไป จึงได้มีการปรับปรุงแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบัน โดยมีความสอดคล้องกับแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติ

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นแสดงถึงอำนาจหน้าที่ของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยและเจ้าหน้าที่ดับเพลิงรวมถึงปัญหาในการบริหารจัดการเพื่อแก้ไขปัญหาเพลิงไหม้ของเจ้าหน้าที่ดับเพลิงงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ และเนื่องจากผู้วิจัยปฏิบัติหน้าที่อยู่ในงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ จึงทำให้เกิดแนวคิดในการศึกษา “การบริหารจัดการด้านอัคคีภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ” เพื่อพิจารณาว่ามีปัจจัยปัญหา อุปสรรคในหลายด้าน เช่น ในด้านการพัฒนาบุคลากรให้มีความชำนาญในด้านอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความชำนาญในการเข้าพื้นที่เกิดเหตุและลดการเกิดอุบัติเหตุที่ไม่คาดคิดในการบรรเทาสาธารณภัยและการดับเพลิง ให้มีประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานมากขึ้นต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาปัญหาและอุปสรรคการบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ

2.2 เพื่อนำเสนอแนวทางพัฒนาการบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่อง การบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการเป็นการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods Research) เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ด้วยการศึกษาระยะและวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามและแบบสัมภาษณ์เจาะลึก

3.1 การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการสร้างเครื่องมือตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการด้านอค์คิภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ จากเอกสารที่มีอยู่ในประเทศและต่างประเทศ

3.1.2 ศึกษาหลักเกณฑ์และวิธีการสร้างแบบสอบถาม โดยกำหนดวัตถุประสงค์ของแบบสอบถาม กำหนดประเด็นของเนื้อหา แจกแจงประเด็นหลักเป็นประเด็นย่อย กำหนดประเภทคำถาม กำหนดจำนวนข้อคำถามในแต่ละประเภทคำถาม กำหนดรูปแบบคำถาม ตรวจสอบความสอดคล้องจัดทำแบบสอบถามเป็นข้อคำถาม เสนอคณะกรรมการที่ปรึกษาภาคินพนธ์ ตรวจสอบ แก้ไขแบบสอบถามฉบับร่างและจัดพิมพ์

3.1.3 กำหนดกรอบเพื่อสร้างแบบสอบถามและสร้างแบบสอบถามให้ครอบคลุมตัวแปรตามกรอบความคิด ได้แบบสอบถาม

3.1.4 นำแบบสอบถามที่สร้างขึ้น เสนออาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและให้ข้อเสนอแนะปรับปรุงแก้ไข

3.1.5 นำแบบสอบถามที่ปรับปรุงแก้ไขแล้ว เสนอผู้เชี่ยวชาญเพื่อตรวจสอบ ความตรงเชิงเนื้อหาให้มีความถูกต้องและชัดเจน โดยมีจำนวนผู้เชี่ยวชาญ 3 คน ได้แก่

1) นายประไพ กุจะพันธ์ เจ้าหน้าที่งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยชำนาญการพิเศษ หัวหน้าสถานีดับเพลิงและกู้ภัยคูสิตกองปฏิบัติการดับเพลิงและกู้ภัย 1 เป็นผู้มีความชำนาญด้านการบริหารจัดการเหตุเพลิงไหม้ และอาคารสูง รวมถึงเหตุเพลิงไหม้บ้านเรือนบริเวณถนนสุขุทัยโดยเป็นชุมชนแออัดจนทำให้เกิดความเสียหายเป็นจำนวนมาก จนมีผู้ได้รับบาดเจ็บ โดยอยู่ในทีมบริหารจัดการด้านความเสี่ยงบริเวณที่เกิดเหตุ

2) นายภุชพงศ์ สัตยโชติ เจ้าหน้าที่งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยชำนาญการพิเศษ หัวหน้าสถานีดับเพลิงและกู้ภัยลาดยาว กองปฏิบัติการดับเพลิงและกู้ภัย เป็นผู้มีความชำนาญด้านการบริหารจัดการเหตุเพลิงไหม้ และอาคารสูง รวมถึงอุบัติเหตุที่เกิดสะพานก่อสร้างข้ามแยกลาดกระบังถล่มจนมีผู้บาดเจ็บ และทรัพย์สินเสียหาย โดยอยู่ในทีมบริหารจัดการด้านความเสี่ยงบริเวณที่เกิดเหตุ

3) นายประสิทธิ์ พลกล้า เจ้าหน้าที่งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยชำนาญการพิเศษ หัวหน้าสถานีดับเพลิงและกู้ภัยราชภุทร์บูรณะ กองปฏิบัติการดับเพลิงและกู้ภัย 63 เป็นผู้มีความชำนาญด้านการบริหารจัดการเหตุเพลิงไหม้ และอาคารสูง รวมถึงเหตุเพลิงไหม้โกดังเก็บสินค้า ทำให้หลังคายุบตัวและกำแพงอาคารถล่ม และมีผู้ได้รับบาดเจ็บ โดยอยู่ในทีมบริหารจัดการด้านความเสี่ยงบริเวณที่เกิดเหตุ

3.1.6 นำเครื่องมือที่ตรวจสอบแล้วเบื้องต้น นำเสนอผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่านเพื่อหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence : IOC) โดยใช้ข้อคำถามที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.67 – 1.00 ขึ้นไปมาใช้ [3] ซึ่งใช้เกณฑ์การพิจารณา ดังนี้

คะแนน +1 แน่ใจว่าข้อความนั้นวัดตรงตามจุดประสงค์ และเนื้อหา

คะแนน 0 ไม่แน่ใจว่าข้อความนั้นวัดตรงตามจุดประสงค์ และเนื้อหา

คะแนน -1 แน่ใจว่าข้อความนั้นวัดไม่ตรงตามจุดประสงค์ และเนื้อหา

3.1.7 นำผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญมาหาค่าความตรงเชิงเนื้อหา โดยวิธีหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) เมื่อผ่านการประเมินของผู้เชี่ยวชาญแล้วนั้นไม่มีข้อความที่วัดได้ความสอดคล้องตามวัตถุประสงค์มีจำนวน ข้อ มีค่าดัชนีความสอดคล้องตามวัตถุประสงค์อยู่ระหว่าง 0.67 – 1.00 นำค่าความมาใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1.8 นำเครื่องมือที่ผ่านการตรวจสอบจากผู้เชี่ยวชาญแล้ว นำไปหาค่าความเที่ยง (Reliability) โดยทดลองใช้ (Try Out) กับเจ้าหน้าที่ดับเพลิง ที่ไม่ใช่ประชากรตัวอย่าง จำนวน 30 คน โดยใช้สูตรการหาค่าใช้ค่าสัมประสิทธิ์อัลฟา (Alpha – Coefficient) ตามวิธีการของครอนบาค [4]

3.1.9 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองใช้ มาหาค่าความเที่ยงของแบบสอบถามโดยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา (Alfa - coefficient) ตามวิธีของ Cronbach ได้ ค่าสัมประสิทธิ์ ความเที่ยงของแบบสอบถามทั้งฉบับเท่ากับ 0.89

3.1.10 จัดทำแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์เสนออาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระเพื่อขอรับความเห็นชอบและนำแบบสอบถามไปเก็บข้อมูลกับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาต่อไป

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากเอกสารและสื่อเทคโนโลยีสารสนเทศ โดยศึกษาค้นคว้าจากเอกสารทางวิชาการ เช่น แนวความคิด ทฤษฎี วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการด้านอค์กัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย รวมถึงเอกสารบทความ วิทยานิพนธ์ รายงานการประชุม และข้อมูลที่ได้จากเว็บไซต์ทางอินเทอร์เน็ต ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างแบบสัมภาษณ์เจาะลึก รวมทั้งใช้เป็นส่วนประกอบในการวิเคราะห์

และประมวลผลข้อมูลในงานวิจัยต่อไป

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์เจาะลึก กระบวนการนี้เป็นการเก็บข้อมูลตามแนวทางการวิจัยเชิงคุณภาพ ซึ่งช่วยให้ได้ข้อมูลเชิงลึกและครบถ้วน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์เจาะลึก (In-depth interview) ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้รับการสัมภาษณ์มาวิเคราะห์และประมวลผล โดยดำเนินการควบคู่กับการรวบรวมข้อมูลจากการทบทวนเอกสารและศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร การวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) ถูกดำเนินการตามแนวทางการวิจัยเชิงคุณภาพ เพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ของการวิจัย การวิเคราะห์นี้รวมถึงการพิจารณาประเด็นหลัก (major themes) และแบบแผนหลัก (major patterns) ที่พบในข้อมูลสัมภาษณ์ จากนั้นจึงนำประเด็นหลักมาพิจารณาแบ่งเป็นประเด็นย่อย (Sub-themes) และหัวข้อย่อย (Categories) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่เริ่มต้นจากภาพรวมไปสู่รายละเอียด

ในส่วนของการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามผู้ศึกษาได้กำหนดวิธีการประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1) ตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบสอบถามทุกฉบับ

2) นำข้อมูลจากแบบสอบถามตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปแบบสอบถาม นำมาวิเคราะห์คำร้อยละ

3) นำข้อมูลจากแบบสอบถาม ตรวจสอบให้คะแนนตามเกณฑ์ในการแปลผลต่อไปนี้ดังนี้

ค่าคะแนน 5 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับดีมาก

ค่าคะแนน 4 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับดี

ค่าคะแนน 3 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับปานกลาง

ค่าคะแนน 2 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับพอใช้

ค่าคะแนน 1 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับควรปรับปรุง

4) นำคะแนนที่ได้จากข้อที่ 3 มาวิเคราะห์หาค่าสถิติโดยใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อหาค่าสถิติ

5) วิเคราะห์สภาพการบริหารจัดการเพื่อแก้ไขปัญหาเพลิงไหม้ของเจ้าหน้าที่ดับเพลิงงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ปัญหาการบริหารจัดการเพื่อแก้ไขปัญหาเพลิงไหม้ของเจ้าหน้าที่ดับเพลิงงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ และแนวทางการเพิ่มศักยภาพในการบริหารจัดการเพื่อแก้ไขปัญหาเพลิงไหม้ของเจ้าหน้าที่ดับเพลิงงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ โดยภาพรวมเป็นรายด้าน รายข้อ โดยวิธีหา ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) โดยนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแนวคิดในการแปลความหมาย ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.21 - 5.00 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับดีมาก

ค่าเฉลี่ย 3.41 - 4.20 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับดี

ค่าเฉลี่ย 2.61 - 3.40 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.81 - 2.60 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับพอใช้

ค่าเฉลี่ย 1.00 - 1.80 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับควรปรับปรุง

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาการบริหารจัดการปัญหาและอุปสรรคด้านอค์คิ์ภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ โดยรวมพบว่ากลุ่มตัวอย่างมีความคิดเห็นเกี่ยวกับการบริหารจัดการด้านอค์คิ์ภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ โดยรวม

อยู่ในระดับดี (\bar{X} = 3.87, S.D. = 0.57) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า การบริหารจัดการด้านอค์คิ์ภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการด้านการวางแผน (Planning) อยู่ในระดับดี (\bar{X} = 4.08, S.D. = 0.52) รองลงมา ด้านการจัดองค์การ (Organizing) อยู่ในระดับดี (\bar{X} = 4.05, S.D. = 0.59) และน้อยที่สุดได้แก่ ด้านการทำงานงบประมาณ (Budgeting) อยู่ในระดับปานกลาง (\bar{X} = 3.23, S.D. = 0.57) ตามลำดับ

ผลจากการสัมภาษณ์แบบเจาะลึกของกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปตามหัวข้อจากประเด็นปัญหาและอุปสรรคในการบริหารจัดการด้านอค์คิ์ภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ได้ดังนี้

1) การวางแผน (Planning) การบัญชาการเหตุการณ์และการวางแผนอาจไม่ชัดเจน เป็นที่เสียายที่อำนาจสั่งการไม่ได้กำหนดไว้อย่างชัดเจน ทำให้ไม่มีแผนการที่เป็นเอกสารแนวทางที่ชัดเจนในการจัดการเหตุการณ์อค์คิ์ภัย

2) การจัดองค์การ (Organizing) มีปัญหาในการจัดการอุปกรณ์และวัสดุ โดยเฉพาะระดับเพลิงที่มีสภาพไม่พร้อมใช้งาน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับมือกับอุบัติเหตุ

3) การจัดคนเข้าทำงาน (Staffing) มีปัญหาในการจัดการอาสาสมัครในเขตพื้นที่ ที่อาจไม่สามารถควบคุมการบังคับและบัญชาได้อย่างเหมาะสม ทำให้มีความยุ่งเหยิงในการปฏิบัติงาน

4) การอำนวยการ (Directing) มีปัญหาในการให้คำสั่งและการแนะนำในการปฏิบัติงานโดยเฉพาะ ในกรณีที่ไม่มีผู้บัญชาการเหตุการณ์ที่ชัดเจน

5) การประสานงาน (Coordinating) การประสานงานระหว่างหน่วยงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้องอาจมีข้อบกพร่อง ทำให้มีความไม่เป็นไปตามแผน

6) การรายงาน (Reporting) มีปัญหาในการรายงานเหตุการณ์และการดำเนินการ ซึ่งอาจส่งผลให้ไม่มีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์และการดำเนินการต่อไป

7) การทำงานงบประมาณ (Budgeting) การใช้งบประมาณสำหรับการบริหารจัดการด้านอค์ศึภยอาจมี ปัญหาในการจัดสรรและใช้งบประมาณที่ไม่เพียงพอหรือไม่เหมาะสม

สรุปในภาพรวมปัญหาและอุปสรรคในการบริหารจัดการด้านอค์ศึภยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ พบว่า การบัญชาการเหตุการณ์เมื่อเกิดอค์ศึภย อำนาจสั่งการควบคุมขึ้นอยู่กับผู้บัญชาการเหตุการณ์ มีการบริหารจัดการที่ไม่ชัดเจน วัสดุ อุปกรณ์โดยเฉพาะรถดับเพลิงที่มีสภาพไม่พร้อมใช้งาน รวมถึงอาสาสมัครต่าง ๆ ในเขตพื้นที่ที่ไม่สามารถควบคุมการบังคับบัญชา การฝึกอบรมเจ้าหน้าที่และประชาชนต้องใช้งบประมาณสูง และประสบปัญหาในข้อจำกัดของอำนาจและขอบเขตในการปฏิบัติงาน ส่งผลให้การปฏิบัติงานในการบริหารจัดการด้านอค์ศึภยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เป็นไปได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

4.2 ผลการวิเคราะห์แนวทางพัฒนาการบริหารจัดการด้านอค์ศึภยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ การวิเคราะห์และแนวทางพัฒนาการบริหารจัดการด้านอค์ศึภยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ สามารถสรุปและแนวทางดังนี้

1) การวางแผน (Planning) ควรมีการวางแผนการทำงานในด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภยอย่างเป็นระบบและรอบคอบ เพื่อเตรียมความพร้อมในการรับมือกับอุบัติเหตุหรือภัยที่อาจเกิดขึ้น

2) การจัดองค์การ (Organizing) ควรจัดโครงสร้างหน่วยงานให้มีความเหมาะสมและมีการแบ่งหน้าที่และความรับผิดชอบที่ชัดเจน เพื่อให้งานดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ

3) การจัดคนเข้าทำงาน (Staffing) ควรมีการรับคนที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญในด้านการป้องกันและ

บรรเทาสาธารณภย โดยเฉพาะผู้บัญชาการที่มีความสามารถในการบริหารจัดการสถานการณ์ในสถานการณ์ที่เฉพาะเจาะจง

4) การอำนวยการ (Directing) ผู้บัญชาการควรสร้างแรงจูงใจให้กับเจ้าหน้าที่ในการปฏิบัติหน้าที่และมอบหมายงานอย่างชัดเจนเพื่อให้สามารถปฏิบัติหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5) การประสานงาน (Coordinating) ควรสร้างการร่วมมือและการประสานงานระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มีการใช้ทรัพยากรและการทำงานอย่างเหมาะสม

6) การรายงาน (Reporting) ควรมีระบบการรายงานที่ชัดเจนและเป็นระบบ เพื่อให้ ผู้บัญชาการสามารถทราบข้อมูลสำคัญในการตัดสินใจและประเมินผลการดำเนินงาน

7) การทำงานงบประมาณ (Budgeting) ควรมีการสนับสนุนงบประมาณให้เพียงพอเพื่อให้ทุกภาคส่วนมีส่วนร่วมในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภยอย่างยั่งยืน โดยให้ความสำคัญกับการจัดหาวัสดุ อุปกรณ์และรถดับเพลิงที่ทันสมัยและเพียงพอ

สรุป จากการวิจัยภาพรวมแนวทางพัฒนาการบริหารจัดการด้านอค์ศึภยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ดังนี้ ควรมีผู้บัญชาการสถานการณ์ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านในการปฏิบัติด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภยโดยตรง สร้างแรงจูงใจในการปฏิบัติหน้าที่ที่มีความเสี่ยง จัดหาวัสดุอุปกรณ์ รถดับเพลิงให้ทันสมัยและเพียงพอต่อการใช้งาน จัดตั้งสถานีที่ฝึกซ้อมของเจ้าหน้าที่ดับเพลิงและกู้ภัย และประชาชน รวมถึงสร้างจิตสำนึกให้ประชาชนรับรู้และเข้ามามีส่วนร่วมในการป้องกันอค์ศึภยในชุมชน ส่งเสริมการมีส่วนร่วมมีการบูรณาการทุกภาคส่วนในการบริหารจัดการทั้งภาครัฐ เอกชน ประชาชน มูลนิธิอาสาสมัครและมีศูนย์ฝึกอบรม และควรมีการสนับสนุนงบประมาณให้เพียงพอเพื่อให้ทุกภาคส่วนได้มีส่วนร่วมในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภยอย่างยั่งยืน

ก่อนเกิดภัย

การวางแผนและการบริหารจัดการด้าน อคติภัยของเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ได้รับการสำรวจด้านคุณภาพทั้ง ในมิติของการวางแผนการจัดองค์กร และการจัดคนเข้า ทำงาน โดยใช้วิธีการวิจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้น ก่อนเกิดภัยและแนวทางในการลดผลกระทบจากภัย อันตรายนั้น ๆ การวางแผนในภาพรวมพบว่าการ จัดทำแผนในการบริหารจัดการด้านอคติภัยอย่าง เหมาะสม และมีการติดตามผลการป้องกันอคติภัยอย่าง เต็มที่ อีกทั้งยังมีการสำรวจพื้นที่เพื่อวางแผนการแก้ไข ปัญหาอคติภัยอย่างพอเหมาะ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการลดความเสี่ยงจากภัยอันตรายได้เป็นอย่างดี ด้านการจัดองค์กรพบว่ามีการบริหารจัดการ ด้านอคติภัยอย่างเชี่ยวชาญและโปร่งใส ซึ่งช่วยให้ บุคลากรมีความมุ่งมั่นในการปฏิบัติงานเพื่อให้บรรลุ วิสัยทัศน์ขององค์กร และมีการปฏิบัติตามกฎระเบียบ องค์กรอย่างเคร่งครัด นอกจากนี้ยังมีการบริหารองค์กร อย่างโปร่งใสและยุติธรรมอย่างเหมาะสม ด้านการจัด คนเข้าทำงานพบว่าบุคลากรมีความรู้และทักษะที่ เกี่ยวข้องกับการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยอย่าง เหมาะสม และมีการปฏิบัติหน้าที่อย่างเต็มที่ตรงตาม ความเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ก่อนเกิดภัยยังมีปัญหา ต่าง ๆ เช่น ปัญหาในการสำรวจและปรับปรุงโครงสร้าง อาคารที่เกิดภัยได้และการจัดทำฐานข้อมูลเพื่อการ จัดการอคติภัยที่ยังมีความยุ่งยาก ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผล ต่อความสามารถในการลดผลกระทบจากภัยอันตราย ได้อย่างเต็มที่ในกรณีเหตุการณ์เช่นนี้ การแก้ไขปัญห เหล่านี้จำเป็นต้องมีการส่งเสริมการร่วมมือระหว่าง หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างมี ประสิทธิภาพและเฉพาะเจาะจง รวมถึงการพัฒนา ศักยภาพในการจัดการสถานการณ์เฉพาะเพื่อเตรียม ความพร้อมในการรับมือกับภัยอันตรายในอนาคต

ขณะเกิดภัย

การบริหารจัดการด้านอคติภัยขณะเกิดภัย พบว่ามีการบริหารจัดการอย่างเหมาะสมในด้านการ อำนวยการและการประสานงาน โดยมีการจัดเตรียม

ระบบสื่อสารและเครื่องมือสื่อสารที่จำเป็นได้อย่าง เพียงพอ และมีการประสานงานกับหน่วยงานที่ เกี่ยวข้องอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้การ จัดการเกิดผลสำเร็จในขณะเกิดภัย ในขณะเดียวกัน การวิจัยเชิงคุณภาพเน้นไปที่ปัญหาที่พบขณะเกิดภัย และปัญหาในการดำเนินการที่จะแก้ไขปัญหานั้น ตั้งแต่ปัญหาในการเข้าพื้นที่ระงับเหตุไปจนถึงการ อพยพประชาชน การจัดการปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างภัย อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการจัดตั้งศูนย์บัญชาการ เหตุการณ์และการประสานงานระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ อย่างเหมาะสม เพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่าง รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการรับมือกับสถานการณ์ ฉุกเฉินที่เกิดขึ้น การจัดการด้านอคติภัยขณะเกิดภัย ซึ่ง มีการเน้นทั้งการอำนวยความสะดวกและการประสานงานอย่าง เหมาะสมในการรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉินที่เกิดขึ้น ในชุมชนและพื้นที่ที่เป็นเสี่ยง การวิจัยทั้งสองประเภทนี้ ช่วยให้เข้าใจลึกซึ้งถึงปัญหาและวิธีการแก้ไขที่มีผลลัพธ์ ดีในสถานการณ์ฉุกเฉินทางอคติภัยในพื้นที่ได้ดี

หลังเกิดภัย

การบริหารจัดการหลังเกิดภัยพบว่ามีความ โปร่งใสในด้านการรายงานและการทำงานประมาณ โดย มีการรายงานผลการปฏิบัติงานอย่างชัดเจนและเป็น กรณศึกษาที่มีประสิทธิภาพ เป็นต้น แต่กลับพบว่ามี ข้อจำกัดในการเปิดเผยข้อมูลและให้โอกาสให้บุคลากร ตรวจสอบการบริหารงาน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา ด้านการทำงานประมาณพบว่าการจัดทำประมาณ อย่างโปร่งใส แต่มีข้อจำกัดในการจัดหาวัสดุและ อุปกรณ์ที่เพียงพอและทันสมัย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ ความพร้อมในการรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉิน ในขณะเดียวกันการวิจัยเชิงคุณภาพมุ่งเน้นที่ปัญหาที่ เกิดขึ้นหลังเกิดภัยและการแก้ไขปัญหานั้น โดยมีการ จัดการปัญหาในด้านการประเมินความเสียหายและความ ต้องการเบื้องต้น การจัดการที่พักชั่วคราวและการช่วยเหลือ ผู้ประสบภัยด้านสุขภาพและสภาพจิตใจ เป็นต้น

5. อภิปรายผล

5.1 การบริหารจัดการด้านอค์ศึภยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยในเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ มีความสำคัญอย่างยิ่งในด้านการวางแผน เนื่องจากการวางแผนที่ดีช่วยให้การบริหารจัดการอค์ศึภยมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อสถานการณ์ฉุกเฉินได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นการวางแผนควรดำเนินการอย่างรอบคอบ พร้อมระบุวัตถุประสงค์ของการจัดการอค์ศึภยอย่างชัดเจน ด้านการจัดองค์กร ควรจัดทีมงานที่มีความเชี่ยวชาญและสามารถจัดการอค์ศึภยได้อย่างเหมาะสม โดยกำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบของแต่ละบุคคลในทีมอย่างชัดเจน เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพและเตรียมความพร้อมในกรณีฉุกเฉิน ในส่วนของการทำงบประมาณ ควรจัดสรรงบประมาณที่เพียงพอและเหมาะสมสำหรับการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการอค์ศึภย โดยพิจารณาจากการเคลื่อนไหวของงบประมาณในอดีตและการประเมินโอกาสภยในอนาคต เพื่อให้การจัดสรรงบประมาณมีประสิทธิภาพและใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ดังนั้น การบริหารจัดการด้านอค์ศึภยในงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ จำเป็นต้องผลานการวางแผนที่รอบคอบ การจัดองค์กรที่มีประสิทธิภาพ และการทำงบประมาณที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถจัดการสถานการณ์ฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความรับผิดชอบในการปกป้องชุมชนและทรัพยากรสาธารณะในพื้นที่ การให้คำแนะนำและการฝึกอบรมแก่ประชาชนเพื่อเพิ่มความร่วมมือในการป้องกันและจัดการกับภยอันตรายต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในชุมชนเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อสามารถลดความเสี่ยงและความเสียหายจากภยพิบัติให้เหลือน้อยที่สุด เนื่องจากงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ มีหน้าที่ในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภย จึงได้มีการจัดทำแผนบริหารจัดการด้านอค์ศึภย การเตรียมความพร้อมสำหรับการรับมือด้านอค์ศึภย และการติดตามผลการป้องกันอค์ศึภย

เพื่อให้การดับเพลิงเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เมื่อเกิดเหตุอค์ศึภยขึ้น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นแต่ละแห่งต่างออกปฏิบัติหน้าที่กันเอง อาจมีการปฏิบัติหน้าที่ทับซ้อนกันบ้างเนื่องจากไม่มีผู้ประสานงาน และยังขาดความร่วมมือในการปฏิบัติงานร่วมกันขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นบางแห่งไม่มีเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการระงับเหตุอค์ศึภย รวมถึงบุคลากรที่มีความชำนาญ [5] โดยผู้ศึกษาได้เสนอทางเลือกเชิงนโยบายไว้ 3 ทางเลือก ประกอบด้วย

ทางเลือกที่ 1 การให้อำนาจแก่องค์การบริหารส่วนจังหวัดเป็นหน่วยงานหลักในการจัดการอค์ศึภยในจังหวัดปทุมธานีไม่ใช่เป็นเพียงการสนับสนุนองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นขนาดเล็กเท่านั้น ให้เป็นหน่วยงานประสานให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นใกล้เคียง เนื่องจากมีความใกล้ชิดกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นด้วยกันมีศักยภาพมากพอที่จะเป็นหน่วยงานหลักมากกว่าหน่วยงานสนับสนุน อีกทั้งมีงบประมาณ และมีทรัพยากรต่าง ๆ เพียงพอสำหรับการปฏิบัติงาน

ทางเลือกที่ 2 การให้อำนาจแก่ศูนย์ป้องกันและบรรเทาสาธารณภย เขต 1 ปทุมธานี เป็นหน่วยงานหลักในการจัดการอค์ศึภยในจังหวัดปทุมธานี โดยประสานการทำงานร่วมกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดปทุมธานี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการอค์ศึภยให้มีความรวดเร็ว สามารถเข้าระงับเหตุอค์ศึภยได้ทันท่วงที และครอบคลุมทุกพื้นที่

ทางเลือกที่ 3 การใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ร่วมกันขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดการอค์ศึภยในจังหวัดปทุมธานี จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้มีความรวดเร็ว สามารถเข้าระงับเหตุอค์ศึภยได้ทันท่วงที และครอบคลุมทุกพื้นที่ อีกทั้งองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสามารถใช้ทรัพยากร วัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงบุคลากรในการปฏิบัติงานร่วมกันได้ ทำให้เกิดความประหยัดและความคุ้มค่าในการใช้ทรัพยากรมากขึ้น และผลการศึกษาปัญหาและอุปสรรคในการบริหารจัดการด้านอค์ศึภยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง

จังหวัดสมุทรปราการ พบว่า การบัญชาการเหตุการณ์ เมื่อเกิดอัคคีภัย อำนาจสั่งการควบคุมขึ้นอยู่กับผู้บัญชาการเหตุการณ์ มีการบริหารจัดการที่ไม่ชัดเจน วัสดุอุปกรณ์โดยเฉพาารถดับเพลิงที่มีสภาพไม่พร้อมใช้งาน รวมถึงอาสาสมัครต่าง ๆ ในเขตพื้นที่ที่ไม่สามารถควบคุมการบังคับบัญชา การฝึกอบรมเจ้าหน้าที่และประชาชนต้องใช้งบประมาณสูง และประสบปัญหาในข้อจำกัดของอำนาจและขอบเขตในการปฏิบัติงาน ส่งผลให้การปฏิบัติงานในการบริหารจัดการด้านอัคคีภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เป็นไปได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร โดยสอดคล้องกับการศึกษาปัญหาและอุปสรรคในการบริหารด้านอัคคีภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยกรุงเทพมหานคร พบว่า ผู้บัญชาการเหตุการณ์เมื่อเกิดสาธารณภัยมีอำนาจสั่งการควบคุมบัญชาการเหตุการณ์ แต่ขาดความรู้ความเชี่ยวชาญเนื่องจากไม่เป็นผูปฏิบัติในสายงานนี้โดยตรง สถานีดับเพลิงและกู้ภัย ไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ กรุงเทพมหานคร ตามมาตรฐานกำหนดถึงที่เกิดเหตุ 8 นาที การขาดอัตรากำลัง วัสดุ อุปกรณ์ โดยเฉพาะรถดับเพลิงที่มีสภาพเก่ามาก และประชาชนไม่มีส่วนร่วม พบว่า ต้องมีการแก้ไขกฎหมายให้มีผู้บัญชาการที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านในการปฏิบัติด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเพิ่มจำนวนสถานีให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ กำหนดโครงสร้างการบริหารจัดการที่ชัดเจน จัดหาวัสดุอุปกรณ์ รถดับเพลิงให้ทันสมัยและเพียงพอต่อการใช้งาน สร้างจิตสำนึกให้ประชาชนรับรู้และเข้ามามีส่วนร่วมในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยในชีวิตและทรัพย์สินของตนเอง [1]

5.2 ผลการศึกษาแนวทางการพัฒนาการบริหารจัดการด้านอัคคีภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ พบว่า ผลการศึกษาแนวทางการพัฒนาการบริหารจัดการด้านอัคคีภัยของงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเตรียมความพร้อมและการจัดการ

ในกรณีฉุกเฉินที่เกิดขึ้นในพื้นที่นั้น โดยมุ่งเน้นไปที่หลักการสร้างฐานรากที่มั่นคงและเตรียมการที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสถานการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การมีผู้บัญชาการสถานการณ์ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้สามารถบริหารจัดการกับสถานการณ์ฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเสริมสร้างความรู้และทักษะให้กับบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับงานบรรเทาสาธารณภัย เช่น การอบรมในการดับเพลิงในอาคารสูง หรือการจัดการความปลอดภัย จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติหน้าที่ การจัดหาวัสดุอุปกรณ์และรถดับเพลิงที่ทันสมัยและเพียงพอ เพื่อให้สามารถใช้งานในสถานการณ์ฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพ การตั้งสถานีที่ฝึกซ้อมของเจ้าหน้าที่ดับเพลิงและกู้ภัย ช่วยให้เจ้าหน้าที่ได้รับการฝึกฝนและเตรียมความพร้อมในการตอบสนองต่อสถานการณ์ฉุกเฉิน การสร้างจิตสำนึกให้ประชาชนรับรู้และมีส่วนร่วมในการป้องกันอัคคีภัย สามารถเพิ่มความมั่นใจและการมีส่วนร่วมในการจัดการสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในชุมชนได้อย่างเหมาะสม ควรมีการสนับสนุนงบประมาณให้เพียงพอ เพื่อให้ทุกภาคส่วนสามารถมีส่วนร่วมในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยอย่างยั่งยืน ดังนั้น การพัฒนาแนวทางการบริหารจัดการด้านอัคคีภัยตามที่กล่าวมาข้างต้นจะช่วยเสริมสร้างเตรียมความพร้อมในการป้องกันและจัดการกับสถานการณ์ฉุกเฉินอย่างมีประสิทธิภาพให้กับเทศบาลเมืองลัดหลวง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ และชุมชนในพื้นที่ดังกล่าวอย่างเหมาะสมและยั่งยืนในระยะยาว สอดคล้องกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบริหารจัดการงานป้องกันและระงับอัคคีภัยของโรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศร์ จังหวัดปราจีนบุรี ผลการศึกษาพบว่า 1) การจัดทำแผนป้องกันและระงับเหตุอัคคีภัยที่เป็นไปตามแนวทางของกระทรวงสาธารณสุข และระเบียบกฎหมายต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง 2) การสร้างสัมพันธภาพที่ดีในการประสานงานกับหน่วยงานภายนอก และ 3) การจัดให้มีการฝึกอบรมดับเพลิงและอพยพหนีไฟเป็นประจำทุกปี [6] ส่งผลให้เกิด

ประสิทธิภาพในงานป้องกันและระงับเหตุอัคคีภัย ได้มากที่สุด ตามลำดับ และในด้านวัสดุอุปกรณ์ เมื่อจำแนกรายข้อ พบว่า 1) การติดตั้งอุปกรณ์ดับเพลิงให้ครอบคลุมในทุกพื้นที่เสี่ยง 2) มีการทดสอบตรวจตราวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ให้มีสภาพพร้อมใช้งานอย่างสม่ำเสมอ และ 3) วัสดุอุปกรณ์ต้องเพียงพอต่อการปฏิบัติงานในการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบอัคคีภัยได้อย่างทันท่วงทีส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในงานป้องกันและระงับเหตุอัคคีภัยได้มากที่สุด ตามลำดับดังนั้น การให้ความสำคัญในด้านการบริหารจัดการ โดยมีการวางแผนงานตามแนวทางของกระทรวงสาธารณสุข และกฎหมายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องของการประสานงานที่ดีกับภาคีเครือข่าย การฝึกอบรมให้เกิดความชำนาญเป็นประจำทุกปี รวมถึงการใส่ใจและตรวจตราวัสดุ อุปกรณ์ ให้มีสภาพพร้อมใช้งานอย่างเพียงพอ และครอบคลุม จะส่งผลให้งานป้องกันและระงับเหตุอัคคีภัยเกิดประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบคุณ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงบทความให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น พร้อมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาการจัดการความปลอดภัย คณะตำรวจศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในการแนะแนวทางในการเขียนบทความครั้งนี้จนสำเร็จ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ruangcharas N. Fire management of the bangkok disaster prevention mitigation bureau [master's thesis]. Bangkok : Ramkhamhaeng University; 2022. (in Thai)
- [2] Office Lat Luang Municipality [Internet]. Local Registration Office Lat Luang. c2020 - [cited 2024 Feb 1]. Available from: <https://ladluang.go.th/th/news/111857>. (in Thai)

[3] Hombuppha S. Textbook on evaluation: educational measurement and evaluation. Nakhon Sawan: Nakhon Sawan Rajabhat University; 2015. (in Thai)

[4] Sapruangthong S. Guidelines for the implementation of information technology systems of small schools under the office of nakhon sawan education service area 1. Education journal Faculty of Education. 2024; 7(1):80-95. (in Thai)

[5] Subboon C. Policy proposal on fire management of administrative organization in pathumthani province [master's thesis]. Bangkok : Thammasat University; 2017. (in Thai)

[6] Chamyu N. Factors affecting the efficiency of fire prevention and suppression management at chao phraya abhaibhubejhr hospital prachinburi province. Journal of Department of Health Service Support. 2017;13(2): 22-39. (in Thai)

ทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้าง อาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล

Vannoeyun Som¹ กิตติพงษ์ สุวีโร^{1*} และวุฒิพงษ์ เมืองน้อย²

vannoeyun_s@mail.rmutt.ac.th¹, kittipong.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, wutthipong.mou@kmutt.ac.th²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Received: May 19, 2023 Revised: August 21, 2024 Accepted: August 27, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลาย วิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างของทัศนคติของผู้ที่เกี่ยวข้อง และจัดกลุ่มสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณโดยใช้แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้รับเหมาก่อสร้างและที่ปรึกษาโครงการที่กำลังปฏิบัติงานและมีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างอาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 160 ราย โดยใช้การสุ่มอย่างง่าย และได้รับการตอบกลับคืนมาจำนวน 144 ชุด คิดเป็นร้อยละ 90 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ดัชนีความสำคัญ (RII) การทดสอบ t-test และการวิเคราะห์องค์ประกอบ (FA) ผลจากการศึกษาพบว่าทัศนคติของผู้รับเหมาก่อสร้างต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงในระดับมากที่สุดคือ ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง ส่วนทัศนคติของที่ปรึกษาโครงการในระดับมากที่สุดคือ การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน และเมื่อนำทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องทั้ง 2 กลุ่ม มาวิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างกันพบว่า ทัศนคติของผู้รับเหมาก่อสร้างและที่ปรึกษาโครงการมีความเหมือนกัน และเมื่อนำสาเหตุด้านต่างๆ ทั้ง 27 มาจัดกลุ่มใหม่ได้จำนวน 9 ด้านหลักได้แก่ สาเหตุด้านขั้นตอนการก่อสร้าง สาเหตุด้านการเงิน สาเหตุด้านแรงงาน สาเหตุด้านบริหารจัดการ สาเหตุด้านการสื่อสาร สาเหตุด้านวัสดุ สาเหตุด้านการประมาณราคา สาเหตุด้านการออกแบบ และสาเหตุภายนอก ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้จะส่งเสริมความรู้เกี่ยวกับสาเหตุด้านต่างๆ ที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายเพื่อเป็นแนวทางในการบริหารจัดการและวางแผนโครงการก่อสร้างต่อไป

คำสำคัญ: ผู้ที่เกี่ยวข้อง ต้นทุนบานปลาย โครงการก่อสร้างอาคารสูง กรุงเทพมหานคร ปริมณฑล

The attitudes of stakeholders on causes leading to cost overrun in high-rise building projects in Bangkok and surroundings

Vannoeyun Som¹, Kittipong Suweero^{1*} and Wutthipong Muengnoi²

Vannoeyun_s@mail.rmutt.ac.th¹, kittipong.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, wutthipong.mou@kmutt.ac.th²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Received: May 19, 2023 Revised: August 21, 2024 Accepted: August 27, 2024

Abstract

This research aims to study the attitudes of stakeholders towards the causes of cost overrun, analyze the similarities or differences in the attitudes of stakeholders, and group causes of cost overrun in high-rise building projects. A survey using a questionnaire was conducted to collect data from contractors and consultants working on high-rise building construction projects in Bangkok and its surroundings. Simple random sampling was used to distribute a total of 160 questionnaires, and 144 were returned, resulting in a 90% response rate. Data were analyzed using frequency, percentage, relative importance index (RII), t-test, and factor analysis (FA). Results showed that the most important attitude among contractors is that materials costs increased during construction among consultants are mistakes in construction and rework. When analyzing similarities or differences in attitudes, it was found that the most important attitude among all stakeholders was similarities. The total 27 most important causes were grouped into nine categories: construction phase, communication, design, finance, labor, management, estimation, external, and material causes. This study helps to increase knowledge about the various causes of cost overruns in high-rise building construction projects in Bangkok and its surroundings, serving as a guide for management and planning in future construction projects.

Keywords: Stakeholders, Cost overrun, High-rise buildings, Bangkok, Surroundings

1. บทนำ

การก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจและสังคม รวมทั้งมีความเกี่ยวพันและเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรม และธุรกิจอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตวัสดุอุปกรณ์ อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมการขนส่ง ธุรกิจการเงิน ธุรกิจประกันภัย ตลอดจนการจ้างแรงงานเป็นต้น [1] ในปี พ.ศ.2564-2566 อุตสาหกรรมก่อสร้างไทยมีมูลค่าโดยรวมคิดเป็นร้อยละ 8.1 ของมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) ส่วนใหญ่เป็นการลงทุนของภาครัฐ คิดเป็นสัดส่วนการลงทุนภาครัฐต่อภาคเอกชนประมาณ 56 ต่อ 44 [2]

กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล เป็นพื้นที่ที่มีการขยายตัวของการก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง ทำให้ที่ดินมีราคาสูง และมีความหนาแน่นของประชากรที่มากประมาณ 3,524 คนต่อตารางกิโลเมตร หรือมากเป็นอันดับที่ 13 ของโลก [3] นักลงทุนจึงนิยมก่อสร้างเป็นอาคารสูงเพื่อให้อาคารมีพื้นที่ใช้สอยและมีความคุ้มค่าเพิ่มมากขึ้น ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ได้กำหนดให้อาคารสูง หมายถึง อาคารที่มีความสูงเกินกว่า 8 ชั้น หรือเกินกว่า 23 เมตร [4] ทั้งนี้การก่อสร้างอาคารสูงมีความแตกต่างจากการก่อสร้างอาคารทั่วไป เนื่องจากมีระบบและขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อน รวมทั้งต้องใช้งบประมาณและระยะเวลาในการก่อสร้างที่มาก

สาเหตุของปัญหาต้นทุนบานปลายในการก่อสร้าง เช่น การขาดการจัดการงบประมาณโครงการ การขาดการสื่อสารในระหว่างการทำงาน การขาดการวางแผนขั้นตอนการทำงาน การขาดแคลนแรงงานที่มีทักษะและประสบการณ์ การขาดการติดตามผลการทำงาน ความผิดพลาดจากการออกแบบ การทำงานล่าช้า ปัญหาการเงินของผู้รับเหมา และเจ้าของโครงการ การประมาณราคาต้นทุนไม่แม่นยำและไม่สอดคล้องกับสภาวะราคาตลาด ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงนโยบายรัฐบาล และภัยธรรมชาติ ส่งผลเสียต่อผู้ที่เกี่ยวข้องภายในโครงการ เสียชื่อเสียงขององค์กร และผลกระทบในแง่ลบอื่นๆ อีกมากมาย [5-7] หากปัญหาต้นทุนบานปลายเกิด

ขึ้นกับการก่อสร้างอาคารสูงก็จะส่งผลให้ปัญหาทวีความรุนแรงมากกว่าโครงการก่อสร้างทั่วไปอีกด้วย

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น Haslinda และคณะ [6] ได้ศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงทั้งหมด 11 สาเหตุ ได้แก่ สภาพอากาศที่ไม่สามารถคาดเดาได้ การเพิ่มขึ้นของราคาวัสดุก่อสร้าง การถอดปริมาณผิดพลาด การเพิ่มขึ้นของค่าจ้างแรงงานตามสภาพแวดล้อม การขาดประสบการณ์ในพื้นที่ก่อสร้าง การขาดประสบการณ์ในประเภทการก่อสร้างที่ทำ การไม่รู้ข้อกำหนดหรือกฎบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง และการประมาณการและวางแผนต้นทุนที่ไม่ครอบคลุม โดยการประมาณการและวางแผนต้นทุนที่ไม่ครอบคลุมเป็นสาเหตุของการเกิดต้นทุนบานปลายมากที่สุด

Kaming และคณะ [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงทั้งหมด 10 สาเหตุ ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของราคาวัสดุก่อสร้าง การประมาณค่าวัสดุไม่ถูกต้อง การขาดแคลนวัสดุก่อสร้าง การขาดแคลนแรงงานฝีมือ การถอดปริมาณไม่ถูกต้อง การวางแผนผิดพลาด การเปลี่ยนแปลงการออกแบบ ผลิตภาพแรงงานต่ำ ข้อจำกัดด้านที่ตั้งของโครงการ ความซับซ้อนของโครงการ โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของราคาวัสดุก่อสร้างเป็นสาเหตุของการเกิดต้นทุนบานปลายมากที่สุด

จากการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาด้านต้นทุนบานปลายที่ผ่านมา ยังมีจำนวนสาเหตุหรือสาเหตุในการศึกษาที่น้อย และอาจไม่ครอบคลุมกับสาเหตุหรือบริบทในการเกิดต้นทุนบานปลายของก่อสร้างอาคารสูงในประเทศไทย อีกทั้งงานวิจัยเกี่ยวกับต้นทุนบานปลายในประเทศไทยยังมีไม่มาก และส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับความล่าช้าและการเปลี่ยนแปลงต้นทุนของการก่อสร้าง ดังนั้น เพื่อให้การแก้ไขปัญหาด้านต้นทุนบานปลายในการก่อสร้างอาคารสูงในประเทศไทยเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุหรือสาเหตุของการเกิดปัญหาดังกล่าวโดยใช้ทัศนคติของผู้เกี่ยวข้อง เนื่องจากทัศนคติเป็นการแสดงออกทางด้านความรู้ ความเข้าใจ และการกระทำที่มีต่อเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยความแตกต่างของ

ทัศนคติจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของแต่ละบุคคล [8] ทำให้ทัศนคติที่ไม่ตรงกันของผู้เกี่ยวข้องอาจจะทำให้การแก้ไขต้นทุนบานปลายทำได้ยากมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้จึงศึกษาทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลาย วิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างของทัศนคติของผู้ที่เกี่ยวข้อง และจัดกลุ่มสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงเพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ประกอบการรับเหมาก่อสร้าง และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการกำหนดกลยุทธ์การควบคุมต้นทุน และเป็นแนวทางในการลดหรือหลีกเลี่ยงสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ประชากร

ประชากรเป็นผู้ควบคุมงานของบริษัทรับเหมาก่อสร้าง และที่ปรึกษาโครงการที่กำลังปฏิบัติงาน และมีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้างอาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 267 ราย จากข้อมูลโครงการที่ขออนุญาตก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑลปี พ.ศ.2563-2566 [9]

2.2 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ควบคุมงานที่กำลังปฏิบัติงานและมีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้างอาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยวิธีการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) ซึ่งเป็นการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยให้โอกาสการถูกเลือกกับประชากรทั้งหมดอย่างเท่าเทียมกันด้วยวิธีการใช้ตารางเลขสุ่มโดยมีเลขกำกับหน่วยรายชื่อทั้งหมดของประชากร คำนวณจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องใช้ด้วยสมการของทาโร ยามาเน่ (Taro Yamane) ใช้ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และกำหนดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ร้อยละ 5 จนได้รายชื่อของกลุ่มตัวอย่างที่จะสอบถามจำนวน 160 ราย ดังสมการที่ 1

$$n = \frac{N}{1 + N(e)^2} \quad (1)$$

โดยที่ n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย, N คือ จำนวนประชากรทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัย, e คือ ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (กำหนดให้ $e=0.05$)

2.3 เครื่องมือการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นแบบสอบถาม (Questionnaires) แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นแบบสอบถามปลายปิดเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ส่วนที่ 2 เป็นแบบสอบถามปลายปิดเพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับสาเหตุด้านต่างๆ ที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงโดยมีลักษณะคำถามเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale) มีเกณฑ์การประเมินระดับความคิดเห็น 5 ระดับ ดังนี้ 1 หมายถึง สาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในระดับน้อยที่สุด 2 หมายถึง สาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในระดับน้อย 3 หมายถึง สาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในระดับปานกลาง 4 หมายถึง สาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในระดับมาก 5 หมายถึง สาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในระดับมากที่สุด ส่วนที่ 3 เป็นแบบสอบถามปลายเปิดเพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามแสดงความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแนวทางการลด หรือหลีกเลี่ยงสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูง

2.4 วิธีสร้างเครื่องมือการวิจัย

ผู้วิจัยทำการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี นิยามศัพท์ เฉพาะจากเอกสาร ตำรา รายงานวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายจนได้จำนวน 27 สาเหตุ ดังตารางที่ 2 จากนั้นนำสาเหตุดังกล่าวไปสร้างเครื่องมือหรือแบบสอบถาม แล้วจึงนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ประกอบด้วยอาจารย์มหาวิทยาลัยคุณวุฒิปริญญาเอกด้านการบริหารงานก่อสร้างจำนวน 3 ท่าน และผู้จัดการโครงการบริษัทเอกชน

ที่ทำงานเกี่ยวกับการควบคุมต้นทุนจำนวน 2 ท่าน เพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) นำแบบสอบถามที่ผ่านความเห็นชอบของผู้เชี่ยวชาญมา คำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับ วัตถุประสงค์ (IOC: Indexes of Item-Objective Congruence) โดยผู้เชี่ยวชาญจะพิจารณาว่าข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์แต่ละข้ออย่างไรโดยให้คะแนน +1 หรือ 0 หรือ -1 ดังนี้ +1 หมายถึง แนใจว่าข้อคำถามสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ 0 หมายถึง ไม่แนใจว่าข้อคำถามสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ -1 หมายถึง แนใจว่าข้อคำถามไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ โดยค่า IOC ดังสมการที่ 2

$$IOC = \frac{\sum R}{N} \quad (2)$$

โดยที่ IOC คือ ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์, R คือ ผลรวมของคะแนนความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ, N คือ จำนวนของผู้เชี่ยวชาญ

โดยเกณฑ์การพิจารณาถ้าค่า IOC ได้มากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 แสดงว่าข้อคำถามสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ แต่ถ้าค่า IOC ได้น้อยกว่า 0.50 แสดงว่าข้อคำถามไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ควรปรับปรุงแก้ไขต่อไป ผู้วิจัยนำแบบสอบถามที่มีข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญนำไปปรับปรุงแก้ไข แล้วนำไปสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างทดลองที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างจริงจำนวน 30 ชุด แล้วนำผลการทดลองมา คำนวณหาค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Reliability) โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) โดยเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาคเท่ากับ 0.73 ซึ่งมากกว่า 0.70 ทำให้เครื่องมือดังกล่าวมีความเชื่อมั่น และสามารถนำแบบสอบถามไปใช้ในการรวบรวมข้อมูลต่อไปได้ นำแบบสอบถามมาปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมแล้วสร้างเป็นแบบฟอร์มออนไลน์ของ Google Form หลังจากนั้นแปลง URL ของ Google Form เป็น QR CODE ให้กลุ่มตัวอย่าง

สามารถสแกน QR CODE ผ่านมือถือ เพื่อเข้าไปดำเนินการตอบแบบสอบถามออนไลน์ต่อไป

2.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยส่งหนังสือขอความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลและ QR CODE แบบสอบถามของ Google Form ไปยังบริษัทรับเหมาก่อสร้าง และที่ปรึกษาโครงการที่เป็นกลุ่มตัวอย่างทางไปรษณีย์ด่วนพิเศษ (EMS) จำนวน 160 ชุด แบ่งออกเป็นผู้รับเหมาก่อสร้างจำนวน 80 ชุด และที่ปรึกษาโครงการจำนวน 80 ชุด ร่วมกับการติดต่อทางโทรศัพท์ และการลงพื้นที่ โดยมีผู้ตอบแบบสอบถามกลับมา จำนวน 144 ชุด คิดเป็นอัตราการตอบกลับร้อยละ 90 ของจำนวนแบบสอบถามทั้งหมด 160 ชุด

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) For Windows เวอร์ชัน 28 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 4 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยใช้สถิติความถี่ (Frequency) และร้อยละ (Percentage)

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงโดยใช้สถิติดัชนีความสำคัญ (Relative Importance Index, RII) ดังสมการที่ 3

$$RII = \frac{\sum W}{A \times N} \quad (3)$$

โดยที่ W คือ ค่าคะแนนที่ได้จากผู้ให้ข้อมูล, A คือ มาตราส่วนประมาณค่ามากที่สุดของระดับตัวเลือก (A=5), N คือ จำนวนของผู้ให้ข้อมูลทั้งหมด

ตอนที่ 3 วิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างของทัศนคติของผู้ที่เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงโดยใช้สถิติ t-test กำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

ตอนที่ 4 การวิเคราะห์สาเหตุและจัดประเภทของสาเหตุที่มีความเหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มด้วยกัน โดยใช้สถิติการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis: FA) วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Components Analysis, PCA) และตรวจสอบความเหมาะสมในการใช้ FA ด้วยวิธี Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) ถ้าค่า KMO สูงกว่า 0.5 แสดงว่าข้อมูลเหมาะสมที่จะใช้ FA ดังสมการที่ 4

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (4)$$

โดยที่ r_{ij} คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง i และ j , a_{ij} คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วนระหว่าง i และ j

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการส่งแบบสอบถามไปทั้งหมด 160 ชุด ได้รับการตอบแบบสอบถามกลับมาจำนวน 144 ชุด คิดเป็นร้อยละ 90 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามโดยใช้สถิติความถี่ (Frequency) และร้อยละ (Percentage) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม	ผู้รับเหมาก่อสร้าง		ที่ปรึกษาโครงการ		รวม	
	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
เพศ						
ชาย	66	91.67	63	87.50	129	89.58
หญิง	6	8.33	9	12.50	15	10.42
อายุ						
ต่ำกว่า 25 ปี	3	4.17	3	4.17	6	4.17
25-35 ปี	11	15.28	7	9.72	18	12.50
36-45 ปี	20	27.78	25	34.72	45	31.25
46-55 ปี	32	44.44	34	47.22	66	45.83
มากกว่า 55 ปี	6	8.33	3	4.17	9	6.25
ระดับการศึกษา						
ต่ำกว่าปริญญาตรี	2	2.78	0	0.00	2	1.39
ปริญญาตรี	56	77.78	58	80.56	114	79.17
ปริญญาโท	13	18.06	13	18.06	26	18.06
ปริญญาเอก	1	1.39	1	1.39	2	1.39
ตำแหน่งงาน						
กรรมการผู้จัดการ	4	5.56	2	2.78	6	4.17
ผู้จัดการโครงการ	41	56.94	30	41.67	71	49.31
วิศวกรโครงการ	19	26.39	30	41.67	49	34.03
วิศวกรประมาณราคา	8	11.11	10	13.89	18	12.50
ประสบการณ์						
ต่ำกว่า 5 ปี	5	6.94	3	4.17	8	5.56
5-15 ปี	14	19.44	30	41.67	44	30.56
16-26 ปี	31	43.06	17	23.61	48	33.33
มากกว่า 26 ปี	22	30.56	22	30.56	44	30.56

จากตารางที่ 1 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชาย จำนวน 129 ราย คิดเป็นร้อยละ

89.583 อายุอยู่ในช่วง 46-55 ปี จำนวน 66 ราย คิดเป็นร้อยละ 45.833 ระดับการศึกษาจบปริญญาตรี

จำนวน 114 ราย คิดเป็นร้อยละ 79.167 ตำแหน่งงานเป็นผู้จัดการโครงการ จำนวน 71 ราย คิดเป็นร้อยละ 49.306 และมีประสบการณ์อยู่ในช่วง 16-26 ปี คิดเป็นร้อยละ 33.333

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงโดยใช้สถิติค่าดัชนีชี้ความสำคัญ (RII) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจัดอันดับทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูง

สาเหตุต้นทุนบานปลาย	เอกสารอ้างอิง	ผู้รับเหมาก่อสร้าง		ที่ปรึกษาโครงการ	
		ค่า RII	อันดับที่	ค่า RII	อันดับที่
F01 การจ่ายเงินงวดงานที่ล่าช้าจากเจ้าของโครงการ	[6-7]	0.753	11	0.744	15
F02 ขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา	[6-7], [10]	0.744	12	0.747	14
F03 ขาดสภาพคล่องทางการเงินของเจ้าของโครงการ	[10-11]	0.744	12	0.742	16
F04 การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน	[6-7]	0.836	4	0.858	1
F05 ขาดการวางแผนและกำหนดระยะเวลาการทำงาน	[6-7], [12]	0.819	7	0.828	6
F06 ความล่าช้าในการตรวจรับงานจากเจ้าของโครงการ	[7], [10]	0.825	5	0.831	5
F07 การเปลี่ยนรายละเอียดงานจากเจ้าของโครงการ	[6], [13]	0.825	5	0.828	6
F08 การขาดแคลนวัสดุก่อสร้าง	[6-7], [10]	0.869	2	0.856	2
F09 ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง	[6-7], [13]	0.889	1	0.853	3
F10 วัสดุก่อสร้างไม่ได้คุณภาพและมาตรฐาน	[12]	0.853	3	0.844	4
F11 ความขัดแย้งและข้อพิพาทภายในโครงการ	[14-15]	0.642	21	0.642	20
F12 ขาดการประสานงานระหว่างฝ่ายต่างๆในโครงการ	[6], [15]	0.625	22	0.628	22
F13 ความผิดพลาดในการสื่อสารภายในโครงการ	[13]	0.653	20	0.636	21
F14 การขาดแคลนแรงงาน	[6-7], [10]	0.794	9	0.789	11
F15 ผลผลิตภาพแรงงานต่ำ	[6-7]	0.775	10	0.781	12
F16 แรงงานขาดทักษะและประสบการณ์การทำงาน	[6-7]	0.797	8	0.781	12
F17 ขาดการบริหารจัดการต้นทุนโครงการ	[15]	0.694	17	0.678	19
F18 ขาดการบริหารจัดการสัญญาโครงการ	[13]	0.686	19	0.686	18
F19 ขาดการบริหารจัดการจัดซื้อจัดจ้างในโครงการ	[13-14]	0.689	18	0.694	17
F20 ความผิดพลาดในการกำหนดระยะเวลาการทำงาน	[6-7]	0.711	16	0.811	9
F21 ความผิดพลาดในการถอดปริมาณงาน	[7], [10]	0.733	14	0.828	6
F22 การใช้ราคาตลาดที่ล่าสมัย	[7], [11]	0.717	15	0.797	10
F23 การออกแบบไม่สมบูรณ์และมีข้อผิดพลาด	[14]	0.611	23	0.614	23
F24 ความล่าช้าในการออกแบบและการอนุมัติแบบ	[6], [11]	0.592	25	0.578	25
F25 การเปลี่ยนแปลงแบบจากเจ้าของโครงการ	[11]	0.594	24	0.597	24
F26 การเกิดภัยธรรมชาติ	[14-15]	0.522	27	0.550	26
F27 การเปลี่ยนแปลงนโยบายรัฐบาล	[13-14]	0.547	26	0.522	27

จากตารางที่ 2 ทัศนคติของผู้รับเหมาก่อสร้างต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงที่มีค่าดัชนีความสำคัญมากที่สุดคือ " F09 ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง" มีค่า RII=0.889 ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

กับผลงานวิจัยของ Haslinda และคณะ [6] ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นนั้นเกิดจากความแปรปรวนของสภาวะเศรษฐกิจ เงินเฟ้อ ความต้องการของวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้น วัสดุก่อสร้างขาดตลาด ทำให้โครงการต้องซื้อวัสดุก่อสร้างในราคาสูงกว่าที่คาดการณ์

ไว้และต้องรอวัสดุมากกว่าปกติส่งผลทำให้โครงการเกิดความล่าช้าและต้นทุนบานปลายในที่สุด ดังนั้นปัญหาราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้างนั้นเป็นปัญหาที่มีความสำคัญอย่างมากซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องควรมีการจัดการและวางแผนการใช้วัสดุอย่างสม่ำเสมอ

ส่วนทัศนคติของที่ปรึกษาโครงการต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายที่มีค่าดัชนีความสำคัญมากที่สุดคือ "F04 การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน" มีค่า RII=0.858 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Kaming และคณะ [7] ปัญหาการทำงานผิดพลาดเกิดจากการขาดการติดตาม และการตรวจสอบการทำงาน

ของคณงานก่อสร้าง แบบก่อสร้างไม่สมบูรณ์ เมื่อแบบก่อสร้างไม่ชัดเจน อาจทำให้การก่อสร้างผิดไปจากที่ควรจะเป็น ทำให้ต้องรื้องาน แก้งานใหม่ให้เป็นไปตามแบบที่กำหนด ดังนั้นผู้ควบคุมงานควรมีการตรวจสอบการทำงานของคณงาน และแบบก่อสร้างให้มีความสมบูรณ์พร้อมที่จะปฏิบัติงานทุกครั้ง

ตอนที่ 3 การวิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างของทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงโดยใช้สถิติ t-test และกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างของทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูง 10 อันดับแรก โดยใช้สถิติ t-test

สาเหตุต้นทุนบานปลาย	ผู้รับเหมาก่อสร้าง		ที่ปรึกษาโครงการ		Sig.
	ค่า RII	อันดับที่	ค่า RII	อันดับที่	
F04 การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน	0.836	4	0.858	1	0.189
F08 การขาดแคลนวัสดุก่อสร้าง	0.869	2	0.856	2	0.586
F09 ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง	0.889	1	0.853	3	0.103
F10 วัสดุก่อสร้างไม่ได้คุณภาพและมาตรฐาน	0.853	3	0.844	4	0.767
F06 ความล่าช้าในการตรวจรับงานจากเจ้าของโครงการ	0.825	5	0.831	5	0.862
F05 ขาดการวางแผนและกำหนดระยะเวลาการทำงาน	0.819	7	0.828	6	0.772
F07 การเปลี่ยนรายละเอียดงานจากเจ้าของโครงการ	0.825	5	0.828	6	0.870
F21 ความผิดพลาดในการถอดปริมาณงาน			0.828	6	
F20 ความผิดพลาดในการกำหนดระยะเวลาการทำงาน			0.811	9	
F22 การใช้ราคาตลาดที่ล้าสมัย			0.797	10	
F14 การขาดแคลนแรงงาน	0.794	9			
F15 ผลผลิตภาพแรงงานต่ำ	0.775	10			
F16 แรงงานขาดทักษะและประสบการณ์การทำงาน	0.797	8			

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างของทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงพบว่าสาเหตุที่เหมือนกัน 10 อันดับแรกตามทัศนคติของผู้รับเหมาก่อสร้างและที่ปรึกษาโครงการ ได้แก่ F04 การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน F05 ขาดการวางแผนและกำหนดระยะเวลาการทำงาน F06 ความล่าช้าในการตรวจรับงานจากเจ้าของโครงการ F07 การเปลี่ยนรายละเอียดงานจากเจ้าของโครงการ F08 การขาดแคลนวัสดุก่อสร้าง F09 ราคาวัสดุ

ก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง และสาเหตุที่แตกต่างกัน ได้แก่ F10 วัสดุก่อสร้างไม่ได้คุณภาพ และมาตรฐาน พบว่ามีค่า Sig. มากกว่า 0.05 ดังนั้นทัศนคติของผู้รับเหมาก่อสร้างและที่ปรึกษาโครงการมีความคิดเห็นเหมือนกันเนื่องจากผู้ที่เกี่ยวข้องทั้ง 2 กลุ่มนี้มีบทบาทและหน้าที่ที่คล้ายคลึงกันจึงทำให้มีความคิดเห็นที่สอดคล้องกัน

ตอนที่ 4 การวิเคราะห์ตัวแปรและจัดประเภทของตัวแปรที่มีความเหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มด้วยกัน โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบ (FA) วิธีการ

วิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) และตรวจสอบความ สุ่มกว่า 0.5 แสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสมในกลุ่ม ดัง
เหมาะสมในการจัดกลุ่มด้วยวิธี KMO ซึ่งถ้าค่า KMO ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรและจัดกลุ่มของตัวแปรโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบ (FA)

สาเหตุต้นทุนบานปลาย	กลุ่มสาเหตุต้นทุนบานปลาย (Component)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F06 ความล่าช้าในการตรวจรับงานจากเจ้าของโครงการ	0.954								
F07 การเปลี่ยนรายละเอียดงานจากเจ้าของโครงการ	0.928								
F05 ขาดการวางแผนและกำหนดระยะเวลาการทำงาน	0.911								
F04 การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน	0.894								
F02 ขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา		0.949							
F03 ขาดสภาพคล่องทางการเงินของเจ้าของโครงการ		0.945							
F01 การจ่ายเงินงวดงานที่ล่าช้าจากเจ้าของโครงการ		0.939							
F14 การขาดแคลนแรงงาน			0.958						
F16 แรงงานขาดทักษะและประสบการณ์การทำงาน			0.944						
F15 ผลผลิตภาพแรงงานต่ำ			0.930						
F19 ขาดการบริหารจัดการจัดซื้อจัดจ้างในโครงการ				0.930					
F18 ขาดการบริหารจัดการสัญญาโครงการ				0.899					
F17 ขาดการบริหารจัดการต้นทุนโครงการ				0.881					
F11 ความขัดแย้งและข้อพิพาทภายในโครงการ					0.935				
F13 ความผิดพลาดในการสื่อสารภายในโครงการ					0.909				
F12 ขาดการประสานงานระหว่างฝ่ายต่างๆในโครงการ					0.863				
F09 ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง						0.881			
F10 วัสดุก่อสร้างไม่ได้คุณภาพและมาตรฐาน						0.876			
F08 การขาดแคลนวัสดุก่อสร้าง						0.871			
F20 ความผิดพลาดในการกำหนดระยะเวลาการทำงาน							0.875		
F22 การใช้ราคาตลาดที่ล่าสมัย							0.860		
F21 ความผิดพลาดในการถอดปริมาณงาน							0.808		
F23 การออกแบบไม่สมบูรณ์และมีข้อผิดพลาด								0.868	
F24 ความล่าช้าในการออกแบบและการอนุมัติแบบ								0.830	
F25 การเปลี่ยนแปลงการออกแบบจากเจ้าของโครงการ								0.806	
F27 การเปลี่ยนแปลงนโยบายรัฐบาล									0.897
F26 การเกิดภัยธรรมชาติ									0.885
% of Variance	13.401	10.238	10.185	9.553	9.442	9.277	8.536	8.430	6.176
Cumulative %	13.401	23.639	33.824	43.377	52.818	62.095	70.631	79.061	85.237

หมายเหตุ: Extraction method: principal component analysis; Rotation method: varimax with Kaiser normalization; Rotation converged in 10 iterations; Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) measure of sampling adequacy=0.728; Bartlett's test of sphericity Approx. Chi-Square=3146.997; df=351; sig=0.000; Factor loading of an absolute value<0.4 is suppressed.

จากตารางที่ 4 การวิเคราะห์ตัวแปรและจัดประเภทของตัวแปรที่มีความเหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มด้วยกัน โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบ (FA) ได้ ดังนี้

1) สาเหตุด้านขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction Phase Causes) ประกอบด้วย F04 การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน F05 ขาดการวางแผนและกำหนดระยะเวลาการทำงาน F06 ความล่าช้าในการตรวจรับงานจากเจ้าของโครงการ F07 การเปลี่ยนรายละเอียดงานจากเจ้าของโครงการ ซึ่งปัญหาด้านขั้นตอนการก่อสร้างเป็นปัญหาพบบ่อยเนื่องจากแบบก่อสร้างไม่ชัดเจน มีความเสี่ยงทำให้เกิดความล่าช้าเป็นอันดับแรก เมื่อแบบก่อสร้างไม่ละเอียดพอจะทำให้การก่อสร้างผิดไปจากที่ควรจะเป็น ทำให้ต้องปรับแก้งานใหม่ หรืออาจไม่ได้รับการตรวจรับงานจากผู้ว่าจ้างเลยก็เป็นได้ ดังนั้น ผู้รับเหมาก่อสร้างและผู้ที่เกี่ยวข้องควรตรวจสอบแบบให้มีความสมบูรณ์พร้อมที่จะปฏิบัติงานทุกครั้ง

2) สาเหตุด้านการเงิน (Finance Causes) ประกอบด้วย F01 การจ่ายเงินงวดงานที่ล่าช้าจากเจ้าของโครงการ F02 ขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา F03 ขาดสภาพคล่องทางการเงินของเจ้าของโครงการ ซึ่งปัญหาด้านการเงินส่งผลต่อการดำเนินการโครงการอย่างมากเนื่องจากการแข่งขันด้านราคา การรับเงินงวดงานที่ล่าช้าส่งผลทำให้ผู้รับเหมาก่อสร้างขาดสภาพคล่องทางการเงิน ผู้รับเหมาเองเมื่อไม่ได้รับค่างวดงานหรือได้รับเงินล่าช้า การหมุนเวียนเงินหรือค่าแรงงานที่ต้องจ่ายก็จะกระทบไปด้วย และเกิดความเสียหายทั้งระบบ ดังนั้น การจัดการด้านการเงินจึงเป็นสิ่งที่สำคัญต่อความสำเร็จของโครงการซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกๆ ฝ่ายควรมีการวางแผนและติดตามประสิทธิภาพการใช้จ่ายของโครงการอย่างสม่ำเสมอ

3) สาเหตุด้านแรงงาน (Labour Causes) ประกอบด้วย F14 การขาดแคลนแรงงาน F15 ผลิตภาพแรงงานต่ำ F16 แรงงานขาดทักษะและประสบการณ์การทำงาน ผลการวิจัยของ ปัญหาของบริษัทรับเหมาก่อสร้างในขณะนี้คือการขาดแคลนแรงงานทั้งปริมาณและทักษะเนื่องมาจากปัญหาความไม่สมดุลในตลาดแรงงาน ส่งผลให้ผลิตภาพแรงงานมัก

ต่ำกว่าค่าจ้าง โครงการก่อสร้างหลายๆ โครงการเกิดความล่าช้าและหยุดชะงักส่งผลต่อความสามารถในการทำกำไรของโครงการในที่สุด

4) สาเหตุด้านบริหารจัดการ (Management Causes) ประกอบด้วย F17 ขาดการบริหารจัดการต้นทุนโครงการ F18 ขาดการบริหารจัดการสัญญาโครงการ F19 ขาดการบริหารจัดการจัดซื้อจัดจ้างในโครงการ ซึ่งความผิดพลาดในการบริหารจัดการโครงการเป็นสาเหตุที่สำคัญมากต่อความสำเร็จของโครงการ ปัญหาในการบริหารโครงการอาจเกิดจากการสื่อสารการประสานงานระหว่างฝ่ายต่างๆ ที่ไม่มีประสิทธิภาพ การจัดการโครงการ การบริหารการเงิน การบริหารทรัพยากรต่างๆ ของโครงการที่เกิดความผิดพลาดไม่สามารถควบคุมให้เป็นไปตามแผน ส่งผลต่อความสำเร็จอย่างมาก

5) สาเหตุด้านการสื่อสาร (Communication Causes) ประกอบด้วย F11 ความขัดแย้งและข้อพิพาทภายในโครงการ F12 ขาดการประสานงานระหว่างฝ่ายต่างๆ ในโครงการ F13 ความผิดพลาดในการสื่อสารภายในโครงการ ซึ่งการสื่อสารนั้นเป็นสิ่งสำคัญมากในการบริหารจัดการโครงการและผู้จัดการโครงการที่จำเป็นจะต้องมีความรู้ความสามารถในการบริหารจัดการทางด้านนี้เป็นอย่างมากในการดำเนินโครงการตั้งแต่เริ่มต้นจนโครงการประสบความสำเร็จ ประกอบไปด้วยความหลากหลายของหน่วยงานขององค์กรภายในที่ต้องทำการประสานงานแลกเปลี่ยนส่งผ่านงานในแต่ละขั้นตอนซึ่งกันและกัน การประสานงานกับลูกค้าหรือหน่วยงานองค์กรภายนอกที่เกี่ยวข้อง การประชาสัมพันธ์ความเคลื่อนไหว ความคืบหน้างาน หรือมีผลกระทบใดๆ ต่อผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหลายเหล่านี้เป็นต้น ดังนั้น ผู้บริหารจัดการจำเป็นจะต้องตระหนักถึงและให้ความสำคัญไม่น้อยกว่าความสำคัญทางด้านอื่นๆ

6) สาเหตุด้านวัสดุ (Material Causes) ประกอบด้วย F08 การขาดแคลนวัสดุก่อสร้าง F09 ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง F10 วัสดุก่อสร้างไม่ได้คุณภาพและมาตรฐาน ซึ่งปัญหาด้านวัสดุและอุปกรณ์เกิดจากความแปรปรวนของสภาวะ

เศรษฐกิจ ความต้องการของวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้น วัสดุก่อสร้างขาดตลาดและราคาเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อโครงการก่อสร้างโดยตรงทำให้โครงการต้องซื้อวัสดุและอุปกรณ์ในราคาที่สูงกว่าที่งบประมาณตั้งไว้ ดังนั้น ผู้ที่เกี่ยวข้องควรมีการวางแผนด้านการใช้วัสดุและอุปกรณ์ภายในโครงการอย่างละเอียดถี่ถ้วน

7) สาเหตุด้านการประมาณราคา (Estimation Causes) ประกอบด้วย F20 ความผิดพลาดในการกำหนดระยะเวลาการทำงาน F21 ความผิดพลาดในการถอดปริมาณงาน F22 การใช้ราคาตลาดที่ล้าสมัย การประมาณราคาผิดพลาดต่ำกว่าความเป็นจริงอาจเกิดเนื่องจากข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง การประเมินสถานการณ์ต่างๆ ที่ไม่สมบูรณ์ ความยุ่งยากซับซ้อนของโครงการที่มากกว่าที่คาดการณ์ไว้ แบบไม่สมบูรณ์ในระหว่างการประมูลงาน การใช้ราคาวัสดุและแรงงานที่ไม่ล้าสมัยและการคิดคำนวณที่ผิดพลาดส่งผลต่อค่าใช้จ่ายของโครงการและระยะเวลาการก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ผู้ประมาณราคาและผู้ที่เกี่ยวข้องควรมีติดตามข้อมูลราคาตลาด การเลือกใช้วิธีการถอดปริมาณงานและการคำนวณที่มีความแม่นยำ ครบถ้วน และควรมีการวางแผนการทำงาน การตรวจสอบปริมาณงานจากแบบก่อสร้างเป็นต้น

8) สาเหตุด้านการออกแบบ (Design Causes) ประกอบด้วย F23 การออกแบบไม่สมบูรณ์ และมีข้อผิดพลาด F24 ความล่าช้าในการออกแบบและการอนุมัติแบบ F25 การเปลี่ยนแปลงการออกแบบจากเจ้าของโครงการ ซึ่งความผิดพลาดหรือข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งเกิดจากการขาดความรู้ ขาดประสบการณ์ และขาดความสามารถในการตรวจสอบและการอนุมัติแบบอย่างครอบคลุม โดยเฉพาะโครงการก่อสร้างอาคารสูงที่มีความซับซ้อนเป็นพิเศษ การออกแบบที่ไม่สมบูรณ์หรือเจ้าของโครงการไม่ได้รับขอบเขตของโครงการที่ชัดเจน การเปลี่ยนแปลงแบบบ่อยครั้ง การเพิ่มเติมงานนอกเหนือจากที่ระบุไว้ในสัญญา อาจทำให้โครงการมีความล่าช้า หรือเลื่อนออกไปได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อกำไรของโครงการ หรือทำให้โครงการเกิดต้นทุนบานปลายในที่สุด ดังนั้น ผู้ที่เกี่ยวข้องควรมีการวางแผนการออกแบบอย่าง

ครอบคลุม กำหนดขอบเขตของงานที่ชัดเจนและการตรวจสอบแบบก่อสร้าง

9) สาเหตุภายนอก (External Causes) ประกอบด้วย F26 การเกิดภัยธรรมชาติ F27 เปลี่ยนแปลงนโยบายรัฐบาล ซึ่งสาเหตุภายนอกส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงการ การทำงานต้องหยุดชะงัก ส่งผลต่อการเงินของโครงการและการดำเนินการของโครงการ

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงพบว่า ทัศนคติของผู้รับเหมาก่อสร้างที่มีระดับความสำคัญมากที่สุดคือ ราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง ส่วนทัศนคติของที่ปรึกษาโครงการที่มีระดับความสำคัญมากที่สุดคือ การทำงานผิดพลาดทำให้ต้องทำงานซ้ำซ้อน และเมื่อนำทัศนคติของผู้เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์ความเหมือนหรือแตกต่างกันพบว่าทัศนคติของผู้รับเหมาก่อสร้างและที่ปรึกษาโครงการมีความเหมือนกัน และเมื่อนำสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายทั้ง 27 มาจัดกลุ่มสาเหตุใหม่ได้จำนวน 9 สาเหตุหลัก ได้แก่ สาเหตุด้านขั้นตอนการก่อสร้าง สาเหตุด้านการเงิน สาเหตุด้านแรงงาน สาเหตุด้านบริหารจัดการ สาเหตุด้านการสื่อสาร สาเหตุด้านวัสดุ สาเหตุด้านการประมาณราคา สาเหตุด้านการออกแบบ และสาเหตุภายนอก ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้ช่วยเสริมความรู้เกี่ยวกับสาเหตุด้านต่างๆที่ทำให้เกิดต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างอาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อเป็นแนวทางในการบริหารจัดการและวางแผนโครงการก่อสร้างต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการ RMUTT E-CUBE-I SCHOLARSHIP ที่ให้ทุนการศึกษาในการเรียนปริญญาโทและให้การสนับสนุนมาโดยตลอด ขอขอบคุณผู้รับเหมาก่อสร้าง และที่ปรึกษาโครงการทุกท่านที่ช่วยสละเวลามาให้ข้อมูล ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiradamkeng W. Construction cost estimation. 5th ed. Bangkok: Wankawee; 2020. (in Thai)
- [2] Lumkam P. Industry Outlook 2022-2024: Construction Contractor. [Internet]. 2022 Jun [cited 2022 Jun 22]; Available from: <https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/construction-construction-materials/construction-contractors/io/construction-contractor-2022>.
- [3] Wikipedia. Bangkok. [Internet]. 2022 Jun [cited 2022 Jun 22]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bangkok>.
- [4] Office of Building Control and Inspection. Building Control Act. 5th ed. Bangkok: Royal Gazette; 2015. (in Thai)
- [5] Yamoat N, Pongsuwan A, Triwong T. Factors affecting success of high rise building construction projects in administrators and practitioners' opinions. *Electronic Journal of Open and Distance Innovative Learning*. 2021;11(2):225-39. (in Thai)
- [6] Haslinda AN, Xian TW, Norfarahayu K, Hanafi RM, Fikri HM. Investigation on the factors influencing construction time and cost overrun for high-rise building projects in Penang. *Journal of Physics*. 2018;995:012043.
- [7] Kaming PF, Olomolaiye PO, Holt GD, Harris FC. Factors influencing construction time and cost overruns on high-rise projects in Indonesia. *Construction Management & Economics*. 1997;15(1):83-94.
- [8] Surakitbowon S. *Social Psychology*. 1st. Bangkok: Suweerivarn; 2002. (in Thai)
- [9] Department of City Planning and Urban Development. Summary of building permit results in Bangkok. [Internet]. 2022 Jun [cited 2022 Jun 22]; Available from: <https://webportal.bangkok.go.th/cpud/page/sub/19028>.
- [10] Maki OL. Causes of cost overrun in construction project [master's thesis]. Doha: Qatar University; 2016.
- [11] Durdyev S, Omarov M, Ismail S, Lim M. Significant contributors to cost overruns in construction projects of Cambodia. *Cogent Engineering*. 2017;4(1):1383638.
- [12] Kamaruddeen AM, Sung CF, Wahi W. A study on factors causing cost overrun of construction projects in Sarawak, Malaysia. *Civil Engineering and Architecture*. 2020;8(3): 191-99.
- [13] Azis AAA, Memon, Rahman IA, Karim ATA. Controlling cost overrun factors in construction projects in Malaysia. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013;5(8):2621-29.
- [14] Sohu S, Abdullah AH, Nagapan S, Buriro AA, Kaleemullah K. Stakeholders' perception on critical cost variation factors in Malaysian building projects. *Civil Engineering Journal*. 2018;4(9):2075-81.
- [15] Gunduz M, Maki OL. Assessing the risk perception of cost overrun through importance rating. *Technological and Economic Development of Economy*. 2018;24(5):1829-44.

การวัดสนามความเครียดในการดึงทดสอบวัสดุโดยใช้วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน

ฤทธิพล จันทราชภูรี^{1*} และวิศิษฐ์ สีลาผาดิกุล¹
rittapol.cha@rmutr.ac.th^{1*}, wisit.lee@rmutr.ac.th¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ (ศาลายา)

Received: June 25, 2024 Revised: October 20, 2024 Accepted: November 7, 2024

บทคัดย่อ

การพัฒนาวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน (ดีไอซี) ในการวัดสนามความเครียดเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากสำหรับการดึงทดสอบวัสดุ เพราะเป็นวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานในระหว่างการวัด หลากหลายงานศึกษาได้ใช้ซัพพิกเซลอัลกอริทึมของวิธีดีไอซีในการเพิ่มความแม่นยำให้กับการวัด แต่ยังมีรายงานการศึกษาถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัดโดยวิธีนี้น้อยมาก ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาซัพพิกเซลอัลกอริทึมที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีการนิวตันราฟสัน ซึ่งจะถูกประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ภาพหลายจุดที่ถูกสร้างจากคอมพิวเตอร์ ขนาดของซัพเซตที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำประกอบด้วยขนาดเล็ก (21×21 พิกเซล) ขนาดกลาง (31×31 พิกเซล) และขนาดใหญ่ (41×41 พิกเซล) พบว่าซัพเซตขนาดเล็กจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการกระจัดสูงกว่าขนาดอื่น ไม่ได้มีเพียงแต่ขนาดของซัพเซตเท่านั้นแต่ขนาดของจุดมีบทบาทสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกัน จากนั้นทำการสาธิตดึงทดสอบวัสดุจริงเพื่อสังเกตผลจากการวัดด้วยวิธีดีไอซีเปรียบเทียบกับอุปกรณ์วัดระยะยึดแบบวีดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ เทคนิคการปรับให้เรียบถูกใช้ลดสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นก่อนนำเสนอสนามความเครียดมาสร้างกราฟความเค้นความเครียดในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ในท้ายที่สุดผลจากการดึงทดสอบวัสดุจริงแสดงให้เห็นว่าวิธีดีไอซีมีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้วัดสนามความเครียดและค่ายังมอดูลัส

คำสำคัญ: สนามความเครียด ดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน ซัพพิกเซลอัลกอริทึม การดึงทดสอบวัสดุ

Strain field measurements in the tensile tests using digital image correlation

Rittipol Chantarat^{1*} and Wisit Lelaphatikul¹
rittipol.cha@rmutr.ac.th^{1*}, wisit.lee@rmutr.ac.th¹

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Received: June 25, 2024 Revised: October 20, 2024 Accepted: November 7, 2024

Abstract

Developments in digital image correlation (DIC) to measure strain fields are very useful for tensile tests because it is a non-contact metrology technique. Many studies use the sub-pixel registration algorithms of DIC to increase measurement accuracy but there are few studies reported on measurement errors. Then, the aim of this paper is to develop the sub-pixel registration algorithm based on Newton-Raphson iteration that is evaluated for its performances by using computer-generated speckle images. The subset sizes for evaluation are small (21×21 pixels), medium (31×31 pixels) and large (41×41 pixels). It is shown that the systematic errors and the random errors of small subsets are greater than other subset sizes. Not only subset sizes but also the speckle sizes play an important role for errors. Next, real tensile tests were performed to investigate the measurement results of DIC compared with a video extensometer. The smoothing technique is used for noise reduction in the strain fields before plotting stress-strain curves. Finally, the results of real tensile tests indicate that DIC can be capable to measure strain fields and Young's modulus.

Keywords: Strain field, Digital image correlation, Sub-pixel algorithm, Tensile tests

1. บทนำ

วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน (Digital Image Correlation) หรือเรียกย่อว่า ดีไอซี (DIC) [1] ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในสาขาการทดลองทางกลศาสตร์ (Experimental Mechanics) และงานวิจัยด้านอื่นๆ เพราะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการวัดความเครียดบนพื้นผิวของชิ้นงานโดยไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานในระหว่างการวัด วิธีการนี้มีความง่ายและยืดหยุ่นในการทดลอง นอกจากนี้วิธีดีไอซียังสามารถที่จะวัดสนามการกระจัด (displacement field) และสนามความเครียด (strain field) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบและการดึงทดสอบวัสดุ [2-5]

หลักการพื้นฐานของวิธีดีไอซีจะใช้วิธีการเปรียบเทียบภาพหลายจุด (speckle pattern) บนพื้นผิววัสดุทดสอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวัดการกระจัดบนผิววัสดุ การเปรียบเทียบภาพหลายจุดจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำอยู่ที่หนึ่งพิกเซล เพื่อเพิ่มความแม่นยำที่น้อยกว่าหนึ่งพิกเซลจำเป็นต้องพัฒนาอัลกอริทึมของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาใหม่ อัลกอริทึมนี้เรียกว่าซัพพิกเซลอัลกอริทึม (sub-pixel algorithm) ตัวอย่างของซัพพิกเซลอัลกอริทึม เช่น the coarse-fine search method [6], correlation coefficient interpolation [7], Newton-Raphson iteration [8] และ multiscale extended digital image correlation [9] ซึ่งถูกพัฒนาจากหลากหลายนักวิจัยมาเกือบสี่ทศวรรษ

การประเมินประสิทธิภาพของซัพพิกเซลอัลกอริทึมโดยใช้การจำลองภาพหลายจุดจากคอมพิวเตอร์ช่วยให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อนของอัลกอริทึม จากงานวิจัย [10] ได้ใช้ภาพหลายจุดที่จำลองจากคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของซัพพิกเซลอัลกอริทึมโดยใช้วิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient interpolation) และ วิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson iteration) จากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (systematic error) และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

(random error) ของการกระจัดพบว่าวิธีนิวตันราฟสันมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มน้อยกว่าวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เมื่อทำการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบสนามความเครียดที่มีค่าการกระจายสม่ำเสมอ (uniform strained distribution) พบว่าวิธีนิวตันราฟสันมีการกระจายของสนามความเครียดที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในการดึงทดสอบวัสดุจริงเพื่อวัดค่าสนามความเครียดโดยวิธีดีไอซีให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำจำเป็นที่จะต้องออกแบบการทดลองและเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสม [11-12] สำหรับการเลือกอัลกอริทึมจำเป็นที่จะต้องพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเช่น ชนิดของซัพพิกเซลอัลกอริทึม การเลือกใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัด [13] และการเลือกใช้ฟังก์ชันเพื่อประมาณค่าของแสง [14] วิธีนิวตันราฟสันจะใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัดจากอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งที่เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ homogeneous deformation ที่เกิดกับชิ้นงานขณะอยู่ใต้ภาระดึง ซึ่งอัลกอริทึมชนิดอื่นจะใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัดกับการเสียรูปในรูปแบบอื่นหรือไม่ใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัด

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าความถูกต้องแม่นยำของวิธีดีไอซีส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับการใช้ซัพพิกเซลอัลกอริทึม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ซัพพิกเซลอัลกอริทึมที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีนิวตันราฟสันเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยและมีฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัดที่เหมาะสมกับการเสียรูปของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ภาระดึง ภาพหลายจุดที่จำลองจากคอมพิวเตอร์จะถูกใช้เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของโปรแกรม จากนั้นจะทำการสาธิตดึงทดสอบวัสดุอลูมิเนียมโดยใช้วิธีดีไอซีในการวัดสนามความเครียดบนชิ้นงานแล้วเปรียบเทียบความเครียดเฉลี่ยกับอุปกรณ์วัดระยะยืดแบบวีดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ กราฟความเค้นความเครียดในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นจะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าความเครียดและค่า Young's modulus ของทั้งสองวิธี

2. การวัดสนามความเครียดโดยใช้วิธีอีไอซี

2.1 หลักการของวิธีอีไอซี

เริ่มต้นจะนำเสนอการวิเคราะห์โดยใช้วิธีอีไอซีสำหรับการวิเคราะห์ในสองมิติ หลักการในการวิเคราะห์จะใช้อัลกอริทึมในการจับคู่ภาพดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นลายจุดบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบ ภาพพื้นผิวของวัสดุก่อนการให้โหลดและภาพพื้นผิวของวัสดุหลังการให้โหลดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันโดยใช้วิธีการค้นหาภาพที่เหมือนกัน ภาพก่อนการให้โหลดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ผิวของวัสดุหรือเรียกว่าภาพไม่เสีรูรูป (undeformed image) ส่วนภาพหลังจากการให้โหลดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ผิวของวัสดุหรือเรียกว่าภาพเสีรูรูป (deformed image) เกณฑ์ในการเปรียบเทียบจะใช้เกณฑ์สหสัมพันธ์ปกติ (normalized cross-correlation criterion) [11] จากการวิเคราะห์บนพื้นฐานของเกณฑ์สหสัมพันธ์ปกตินี้จะหาค่าสนามการกระจัดบนพื้นผิวของวัสดุที่สนใจซึ่งมีความแม่นยำของการกระจัดคือหนึ่งพิกเซล (pixel) แต่อย่างไรก็ตามในการเพิ่มความแม่นยำที่ดีกว่าคือความแม่นยำที่น้อยกว่าหนึ่งพิกเซล สามารถทำได้โดยใช้อัลกอริทึมที่เรียกว่าซัพพิกเซลอัลกอริทึม

งานวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์ของซัพพิกเซลอัลกอริทึมที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีการนิวตันราฟสัน [8] เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้กับการวัดการกระจัดและความเครียด อัลกอริทึมนี้สร้างจากสมมุติฐานที่ว่า การกระจัดจะประมาณค่าจากอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง (first-order Taylor series expansion) สำหรับการวิเคราะห์ในระนาบจุดซัพเซต (subset points) ที่อยู่ตำแหน่ง (x, y) ของภาพไม่เสีรูรูปจะถูกเชื่อมโยงเข้ากับตำแหน่ง (\tilde{x}, \tilde{y}) ของภาพเสีรูรูปโดยใช้สมการดังนี้

$$\tilde{x} = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (1)$$

$$\tilde{y} = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

เมื่อ u และ v คือการกระจัดของจุดศูนย์กลางซัพเซตในแกน x และ y ตามลำดับ ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของ ซัพเซตไปที่ตำแหน่ง (x, y)

คือ Δx และ Δy ซัพเซตจัตุรัสสามารรถที่จะยืดออกหรือหดเข้าแสดงได้จากความเครียดตั้งฉาก ($\partial u/\partial x$ และ $\partial v/\partial y$) และความเครียดเฉือน ($\partial u/\partial y$ และ $\partial v/\partial x$) จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้ว่าตัวแปรแมพปิง (mapping parameter) นั้นคือ $u \partial u/\partial x \partial u/\partial y v \partial v/\partial x$ และ $\partial v/\partial y$ ซึ่งมีทั้งหมด 6 ตัว

ภาพดิจิทัลที่ได้จากกล้องดิจิทัลจะถูกเก็บไว้โดยรูปแบบของภาพสีเทา (grayscale image) ภาพนี้จะมีค่าความเข้มของแสงที่จุดพิกเซล ซึ่งมีแฉดสีอยู่ในช่วงสีดำ-สีเทา-สีขาว ค่าความเข้มของแสงของแต่ละพิกเซลถูกเก็บไว้ด้วยจำนวนขนาด 8 บิต ดังนั้นค่าความเข้มของแสงจะอยู่ระหว่าง 0 (สีดำ) ถึง 255 (สีขาว) ในซัพพิกเซลอัลกอริทึมความเข้มของภาพสีเทาจะถูกสร้างขึ้นอีกครั้งโดยใช้ไบคิวบิกสไปร์ (bicubic spline) เพื่อประมาณค่าความเข้มของแสงที่จุดใดๆ ในภาพฟังก์ชันไบคิวบิกสไปร์ $g(x, y)$ แสดงถึงภาพไม่เสีรูรูป ส่วนฟังก์ชันไบคิวบิกสไปร์ $\tilde{h}(\tilde{x}, \tilde{y}, \mathbf{P})$ จะแสดงถึงภาพหลังการเสีรูรูป ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันไบคิวบิกสไปร์ของทั้งคู่ได้ดังนี้

$$g(x, y) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 a_{mn} x^m y^n \quad (3)$$

$$\tilde{h}(\tilde{x}, \tilde{y}, \mathbf{P}) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 b_{mn} \tilde{x}^m \tilde{y}^n \quad (4)$$

โดยค่า a_{mn} และ b_{mn} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสไปร์และ \mathbf{P} เป็นเวกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรแมพปิงในสมการที่ (1) และ (2)

ในการประเมินความเหมือนกันระหว่างซัพเซตของเซตก่อนเสีรูรูปและเซตหลังเสีรูรูป ขนาดของซัพเซต $(2M + 1) \times (2M + 1)$ พิกเซล จะถูกเลือกจากภาพที่ไม่เสีรูรูป เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรแมพปิงค่าสัมประสิทธิ์กำลังสองน้อยที่สุด (least square correlation coefficient) จะถูกนำมาใช้ในการประเมิน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$C = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x, y) - \tilde{h}(\tilde{x}, \tilde{y}, \mathbf{P})]^2}{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x, y)]^2} \quad (5)$$

พิจารณาสมการที่ (5) การหาค่า C ที่น้อยที่สุด เกรเดียนต์ของค่า C ต้องลู่เข้าหาศูนย์ นั่นคือ

$$\nabla C = \left(\frac{\partial C}{\partial P_i} \right)_{i=1, \dots, 6} = 0 \quad (6)$$

วิธีนิวตันกราฟสันถูกนำมาใช้ในการแก้สมการที่ (6) ซึ่งเป็นระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น หลักการของวิธีนิวตันกราฟสันจะใช้อนุกรมเทย์เลอร์เพื่อประมาณหาค่าคำตอบ การประมาณหาค่าคำตอบถัดไปจะหาได้จากการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์รอบ \mathbf{P}_0 ดังนี้

$$[\nabla \nabla C(\mathbf{P}_0)(\mathbf{P} - \mathbf{P}_0)] = -[\nabla C(\mathbf{P}_0)] \quad (7)$$

การหาค่าคำตอบสามารถทำได้โดยการเดาเลือกค่าเวกเตอร์เริ่มต้น \mathbf{P}_0 ในสมการที่ (7) จากการแก้สมการที่ (7) ค่าเวกเตอร์คำตอบโดยประมาณ \mathbf{P} จะสามารถหาได้เพื่อใช้สำหรับการคำนวณวนซ้ำครั้งต่อไป ส่วนค่า $\nabla \nabla C(\mathbf{P}_0)$ คือค่าเกรเดียนต์อันดับสอง หรือเรียกว่า เฮสเซียนเมตริกซ์ (Hessian matrix) การวนซ้ำของวิธีนิวตันกราฟสันสำหรับแก้ระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ จะลู่เข้าหาค่าคำตอบเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขสามข้อ ดังนี้ เงื่อนไขที่หนึ่งเกรเดียนต์ ∇C และ $\nabla \nabla C$ ต้องมีความต่อเนื่องและมีขอบเขตอยู่ใกล้คำตอบ เงื่อนไขที่สองค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเฮสเซียนเมตริกซ์ต้องเข้าใกล้ศูนย์ และเงื่อนไขที่สามการเดาเลือกค่าเวกเตอร์เริ่มต้นต้องใกล้กับคำตอบจริง

โดยทั่วไปแล้ววิธีนิวตันกราฟสันจะนิยมใช้ในการแก้ปัญหาเพราะการคำนวณที่แม่นยำเมื่อเทียบกับเวลาคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณ วิธี Levenberg-Marquardt เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกใช้ ทั้งวิธีนิวตันกราฟสันและวิธี Levenberg-Marquardt มี ข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกัน ทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับวิธีการเดาเลือกค่าเริ่มต้น

การคำนวณลู่เข้าใกล้คำตอบที่ถูกต้องอาจไม่เกิดขึ้นเพราะค่าความเข้มของแสงที่เปลี่ยนแปลงทำให้ยากต่อการเดาเลือกค่าเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการความต่อเนื่องของคำตอบวิธีนิวตันกราฟสันน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า

2.2 การประมาณค่าสนามความเครียด

ถึงแม้ว่าจะสามารถคำนวณหาสนามการกระจัดและสนามความเครียดได้จากอัลกอริทึมในหัวข้อ 2.1 แต่อย่างไรก็ตามการกระจัดและความเครียดที่ได้จะมีสิ่งรบกวน (noise) เช่น สิ่งรบกวนจากการใช้อัลกอริทึมในการคำนวณ (numerical noise) และสิ่งรบกวนจากการทดลอง (experimental noise)

ในการทดสอบทางกลศาสตร์วัสดุ เช่น การทดสอบหาคคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และการวิเคราะห์ความเค้นในโครงสร้าง สนามความเครียดเป็นสิ่งที่ต้องการและสำคัญ เทคนิคการปรับให้เรียบ (smoothing technique) จะช่วยลดสิ่งรบกวนและช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับข้อมูลมากขึ้น มีการนำเสนอเทคนิคนี้จากหลายนักวิจัย แต่ที่นิยมใช้สำหรับดีไอซีคือเทคนิคการปรับให้เรียบโดยวิธีกำลังสองเฉพาะที่ (local least-squares fitting technique) [11] เพราะเป็นเทคนิคที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ เทคนิคนี้เริ่มจากการเลือกหน้าต่างที่มีข้อมูลขนาด $(2m + 1) \times (2m + 1)$ จุด เพื่อใช้คำนวณความเครียดที่จุดตรงกลางของหน้าต่าง สมมติให้หน้าต่างมีขนาดเล็กการกระจายตัวของการกระจัดสามารถประมาณได้ว่าเป็นระนาบเชิงเส้น ดังนั้นฟังก์ชันของการกระจัดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(i, j) = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (8)$$

$$v(i, j) = b_0 + b_1 x + b_2 y \quad (9)$$

เมื่อ $i = -m:m$ และ $j = -m:m$ คือพิกัดเฉพาะที่ (local coordinate) ของหน้าต่างที่จะคำนวณค่า $u(i, j)$ และ $v(i, j)$ คือค่าการกระจัดที่คำนวณได้จากอัลกอริทึมในหัวข้อ 2.1 ค่าคงที่ a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 และ b_2 คือค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามที่ต้องการหา จากนั้นใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares method) จะได้ว่า

$$\mathbf{A}=(\mathbf{M}^T\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^T\mathbf{U} \quad (10)$$

โดย เวกเตอร์ \mathbf{A} คือเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์พหุนาม a_0 , a_1 และ a_2 เมทริกซ์ \mathbf{M} คือเมทริกซ์ที่ประกอบไปด้วยพิกัดเฉพาะที่ และ เวกเตอร์ \mathbf{U} คือเวกเตอร์ค่าการกระจัดของ $u(i, j)$ ในสมการที่ (8) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์พหุนาม b_0 , b_1 และ b_2 สามารถหาค่าโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดดังที่กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกัน

ในการหาค่าความเครียดสามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันการกระจัดสมการที่ (8) และ (9) จะได้ว่า

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_1 \quad (11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_2 \quad (12)$$

โดย ε_x และ ε_y คือค่าความเครียดตั้งฉากในแกน x และ y ตามลำดับ ข้อควรระวังในการใช้วิธีการนี้คือเมื่อให้ขนาดหน้าตัดมีขนาดใหญ่ข้อมูลที่สำคัญในการวัดอาจถูกลบทิ้ง ถ้าหน้าตัดมีขนาดเล็กสิ่งรบกวนจะคงอยู่ ดังนั้นขนาดหน้าตัดควรที่จะถูกเลือกให้เหมาะสมด้วยความระมัดระวังเพื่อจะได้ค่าความเครียดที่ถูกต้อง

3. การตรวจสอบดีไอซีอัลกอริทึมโดยใช้วิธีการจำลองการทดลอง

3.1 การใช้คอมพิวเตอร์จำลองสร้างภาพลายจุด

คอมพิวเตอร์โปรแกรมได้ถูกสร้างจากอัลกอริทึมที่อยู่บนพื้นฐานของซัพพิกเซลอัลกอริทึมในการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ภาพดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นลายจุดแบบสุ่มได้ถูกสร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์หรือเรียกภาพนี้ว่าภาพเสมือน (virtual image) ภาพเสมือนนี้ถูกสร้างขึ้นสาเหตุเพราะการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ในการทดลองจริงทำได้ยากซึ่งภาพเสมือนนี้สามารถที่ทำได้ง่ายกว่า ภาพเสมือนสามารถที่จะกำหนดแบบของลายจุดและขนาดของลายจุดรวมถึงสามารถกำหนดการกระจัดให้กับภาพได้โดยตรง สัญญาณรบกวนที่มาจากกล้องดิจิทัลและการเยื้องศูนย์ของอุปกรณ์จะไม่ถูกรวมในภาพเสมือนนี้ทำ

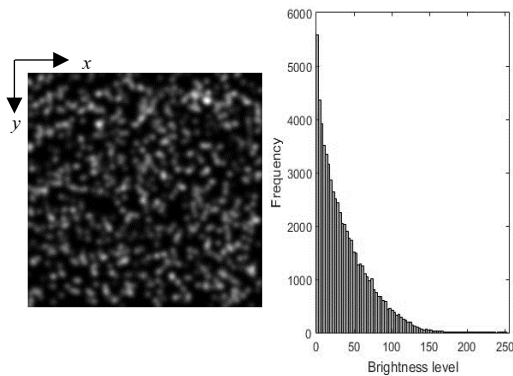
ให้การวัดประสิทธิภาพของดีไอซีอัลกอริทึมเช่น ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มสามารถทำได้ง่ายขึ้น ภาพเสมือนนี้จะประกอบไปด้วยภาพไม่เสีรูป $I_1(x, y)$ และภาพเสีรูป $I_2(x, y)$ สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้

$$I_1(x, y) = \sum_{k=1}^s I_k^0 \exp [-((x - x_k)^2 + (y - y_k)^2) / R^2] \quad (13)$$

$$I_2(x, y) = \sum_{k=1}^s I_k^0 \exp [-((x - x_k - u_0 - \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y)^2 + (y - y_k - v_0 - \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y)^2) / R^2] \quad (14)$$

เมื่อ ค่า s คือจำนวนของจุดทั้งหมด ค่า R คือขนาดของจุด พิกัด (x_k, y_k) คือตำแหน่งพิกัดของแต่ละจุดที่มีการกระจายแบบสุ่ม ค่า I_k^0 คือความเข้มของแสงสูงสุดของแต่ละจุดที่มีการกระจายแบบสุ่ม ค่า u_0 และ v_0 คือค่าการกระจัดแข็งเกร็งที่กำหนดให้กับภาพ (imposed displacement) ในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ ค่า $\partial u / \partial x$ และ $\partial v / \partial y$ คือค่าความเครียดตั้งฉากที่กำหนดให้กับภาพ (imposed normal strain) และ ค่า $\partial u / \partial y$ และ $\partial v / \partial x$ คือความเครียดเฉือนที่กำหนดให้กับภาพ (imposed shear strain)

ภาพเสมือนสามารถสร้างได้โดยแทนพิกัดและค่าตัวแปรลงในฟังก์ชันของสมการที่ (13) และ (14) ซึ่งจะสัมพันธ์กับตารางกริดใน CCD เช่น เซอร์คอมพิวเตอร์โปรแกรมจะสร้างภาพเสมือนตามตัวแปรที่แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีค่าตัวแปร s เท่ากับ 1200 ค่า R เท่ากับ 4 และมีขนาดของภาพเท่ากับ 256×256 พิกเซล ภาพเสมือนสีเทานี้มีค่าความความเข้มของแสงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 การสร้างภาพลายจุดที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างสีดำและสีขาวบนกราฟฮิสโทแกรมและควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของจุดอยู่ระหว่าง 3 ถึง 10 พิกเซล [15]



รูปที่ 1 ภาพเสมือนและฮิสโทแกรมของภาพ

3.2 การวัดความคลาดเคลื่อนของอัลกอริทึมซัพพิกเซล

ในการประเมินความแม่นยำของอัลกอริทึมซัพพิกเซล คอมพิวเตอร์จะทำการจำลองภาพเสมือนโดยกำหนดค่าการกระจัดเชิงกริ่งในแนวแกน x ให้กับภาพและค่าตัวแปรในการสร้างภาพเสมือนจะใช้เหมือนกับรูปที่ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (E) สามารถนิยามได้ดังนี้

$$E = u_{mean} - u_{imp} \tag{15}$$

เมื่อค่า u_{mean} และ u_{imp} แสดงถึงค่าเฉลี่ยของการกระจัดเชิงกริ่งและค่าการกระจัดเชิงกริ่งที่กำหนดให้กับภาพ ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยของการกระจัดเชิงกริ่งสามารถนิยามได้ดังนี้

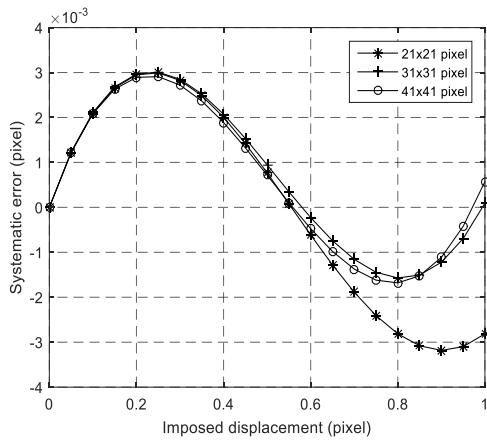
$$u_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \tag{16}$$

เมื่อ u_i คือค่าการกระจัดที่วัดได้และ N คือจำนวนจุดข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมด สำหรับการวัดการกระจายของข้อมูลสามารถทำได้โดยใช้การวัดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (SD) ซึ่งสามารถนิยามได้ดังนี้

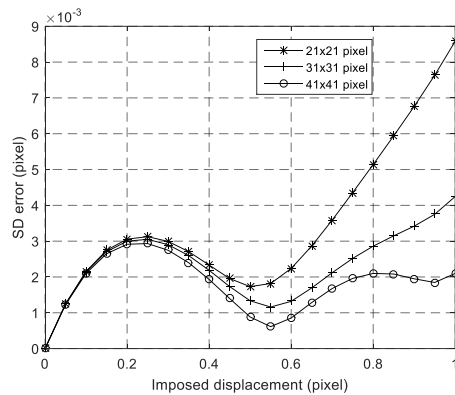
$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - u_{imp})^2} \tag{17}$$

สำหรับการวัดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจะวัดการกระจายตัวของการกระจัด u_i เทียบกับค่าการกระจัดเชิงกริ่งที่กำหนดให้กับภาพ u_{imp}

ภาพเสมือนจำนวน 21 ภาพ ถูกสร้างขึ้นโดยคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของอัลกอริทึมซัพพิกเซล ภาพที่ถูกสร้างขึ้นจะมีการกระจัดที่กำหนดให้ u_{imp} อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 พิกเซล โดยให้การกระจัดเพิ่มขึ้นทีละ 0.05 พิกเซล ในแต่ละภาพ จากนั้นจะใช้อัลกอริทึมซัพพิกเซลคำนวณสนามการกระจัดในแต่ละภาพโดยมีจำนวนจุดที่ถูกคำนวณเท่ากับ 441 จุด หรือ 21×21 จุด ในแต่ละภาพ ขนาดของซัพเซตที่ใช้คำนวณมี 3 ขนาดคือ 21×21 31×31 และ 41×41 พิกเซล จากรูปที่ 2 (ก) แสดงความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของแต่ละซัพเซตที่ใช้ จะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกับกราฟไซน์ (sinusoidal curve) ในช่วงเริ่มต้นของค่าการกระจัดที่กำหนดให้คือตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 พิกเซล กราฟความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของแต่ละซัพเซตมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงปลายของกราฟซัพเซตขนาด 21×21 พิกเซล มีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบมากกว่าซัพเซตอื่น ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของอัลกอริทึมซัพพิกเซลเกิดจากการใช้ฟังก์ชันประมาณค่าการกระจัดและการใช้ไบควบิคสไปร์ประมาณค่าความเข้มของแสง เมื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มในรูปที่ 2 (ข) ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจะแสดงการกระจายของข้อมูลการกระจัดที่วัดได้ ช่วงเริ่มต้นของกราฟมีค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มในแต่ละซัพเซตที่ใกล้เคียงกัน เมื่อการกระจัดที่กำหนดให้มีความมากกว่า 0.5 พิกเซล ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกขนาดของซัพเซต โดยเฉพาะขนาดของซัพเซต 21×21 พิกเซล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากที่สุด ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าการใช้ขนาดของซัพเซตที่น้อยจนเกินไปจะทำให้ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น



(ก)

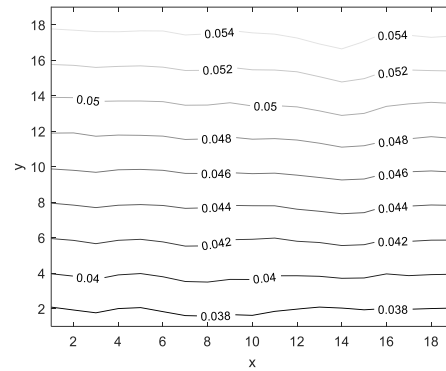


(ข)

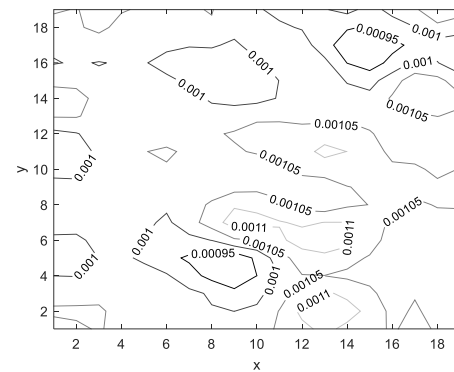
รูปที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนของซัพพิกเซลอัลกอริทึม (ก) ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (ข) ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

ในขั้นตอนต่อไปจะทำการใช้หัวข้อ 2.2 การประมาณค่าสนามความเครียดเพื่อลดสิ่งรบกวนที่ได้จากอัลกอริทึมซัพพิกเซล โดยกำหนดให้ค่าความเครียดตั้งฉากที่ให้กับภาพเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (14) แทนความเครียดที่กำหนดให้ $\partial v / \partial y = 0.001$ เริ่มต้นจากการใช้อัลกอริทึมซัพพิกเซลโดยใช้ซัพเซตขนาด 31×31 พิกเซล คำนวณหาตัวแปรแม่ปึงและมีจำนวนจุดที่ถูกคำนวณ 21×21 จุด จากนั้นจะใช้เทคนิคการปรับให้เรียบโดยมีหน้าต่างคำนวณขนาด 3×3 พิกเซล จะได้จำนวนจุดการกระจัดและความเครียดมีจำนวนเท่ากันคือ 19×19 จุด จากรูปที่ 3 (ก) แสดงค่าสนามการกระจัด v ที่ได้จากการใช้เทคนิคการปรับค่าความเครียดให้เรียบ จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของ

การกระจัดเพิ่มขึ้นตามแนวแกน y ขณะที่การกระจัดจริงควรต้องเป็นเส้นตรงในแนวระดับและมีค่าคงที่ในแต่เส้น ส่วนรูปที่ 3 (ข) แสดงค่าสนามความเครียด $\partial v / \partial y$ ที่ได้จากอนุพันธ์ของฟังก์ชันการกระจัดในรูปที่ 3 (ก) เนื่องจากการกระจัดมีความชันที่ไม่คงที่จึงทำให้ความเครียดที่ได้มีค่าไม่คงที่ตามความชันของการกระจัด โดยความเครียดจะอยู่ระหว่าง 0.00095 ถึง 0.00105 แตกต่างจากค่าความเครียดที่กำหนดให้ $\pm 5\%$



(ก)



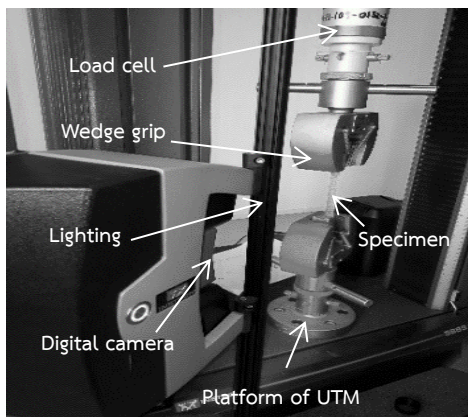
(ข)

รูปที่ 3 การประมาณค่า (ก) สนามการกระจัด v หน่วยเป็นพิกเซล (ข) สนามความเครียด $\partial v / \partial y$

4. การดิงทดสอบวัสดุ

ในหัวข้อนี้จะสังเกตผลการวัดความเครียดจากการดิงทดสอบวัสดุ ผลการวัดความเครียดที่ได้จากวิธีดีไอซีจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดของอุปกรณ์วัดระยะยึดแบบวีดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ (video extensometer) การจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 จะประกอบด้วยสองส่วนคือ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing

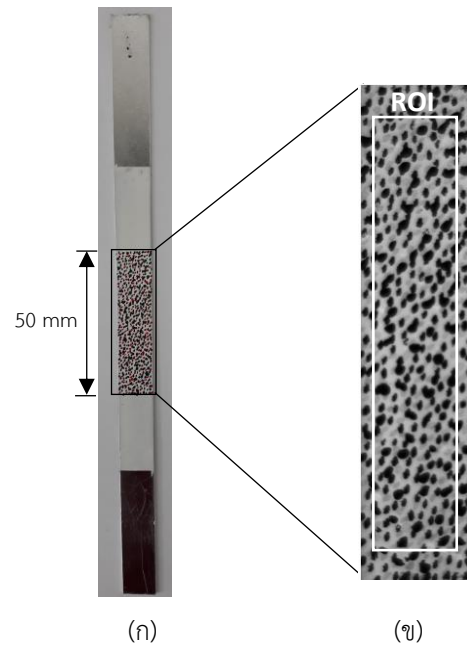
machine, UTM) ยี่ห้อ Instron 5969 และอุปกรณ์การถ่ายภาพ ในส่วนของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์จะประกอบด้วยโหลดเซลล์ที่มีขนาด 5 kN และหัวจับแบบลิ้ม (wedge grip) ส่วนอุปกรณ์ถ่ายภาพจะประกอบด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความละเอียด 2048 × 300 พิกเซล เลนส์มีระยะโฟกัส 35 mm เลนส์โพลาไรซ์เพื่อตัดแสงสะท้อน และอุปกรณ์ให้แสงสว่างสีแดง



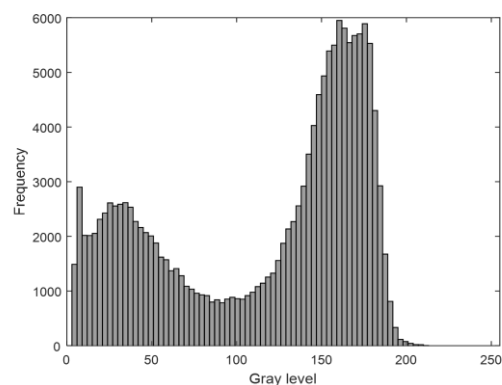
รูปที่ 4 อุปกรณ์การทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบทำจากแผ่นวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยที่มีความหนา 0.5 mm ถูกตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 12.5 mm และความยาว 200 mm การวัดโดยวีดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์จะใช้เวลาความยาวเกจ (gauge length) เท่ากับ 50 mm หลังจากแผ่นอลูมิเนียมถูกตัดตามขนาดแล้วจะต้องนำไปพันสีขาวรองพื้นตรงตำแหน่งที่ต้องการวัดคือส่วนตรงกลางของชิ้นงานตามรูปที่ 5 (ก) การสร้างลายจุดแบบสุ่มสามารถทำได้โดยนำปากกา สีดำ สีแดง และสีน้ำเงินมาแต้มจุดบนชิ้นงานโดยการแต้มจะต้องทำอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน เมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลจะได้ภาพสีเทาตามรูปที่ 5 (ข) จากนั้นกำหนดหน้าต่างที่สนใจ (Region of Interest, ROI) จะได้ภาพขนาด 1050 × 231 พิกเซล นำภาพ ROI นั้นมาสร้างฮิสโทแกรมความเข้มของแสงดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าฮิสโทแกรมจะบ่งบอกถึงความคมชัดของภาพสีเทาและไม่มีมีการสะท้อนของแสงเกิดขึ้น การสร้างภาพลาย

จุดจะต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างสีดำและสีขาวบนฮิสโทแกรม ซึ่งต้องมีการกระจายค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 255 การใช้สีอื่นนอกจากสีดำและสีขาวจะช่วยให้ภาพลายจุดมีการกระจายตัวของความเข้มแสงบนกราฟฮิสโทแกรมที่ดีขึ้นเมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องขาวดำ

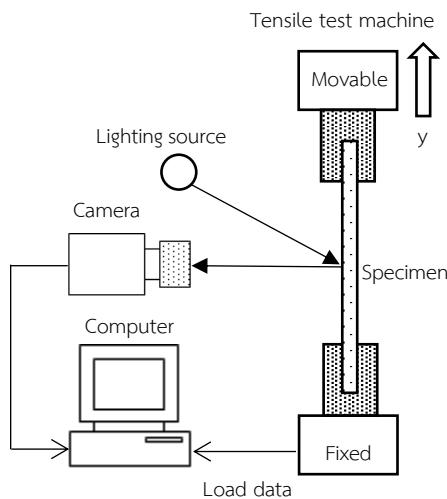


รูปที่ 5 (ก) ชิ้นงานอลูมิเนียม (ข) ภาพลายจุดบนชิ้นงาน



รูปที่ 6 ฮิสโทแกรมของภาพลายจุดบนชิ้นงาน

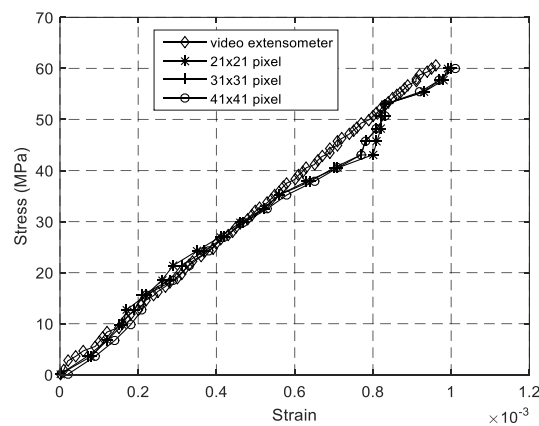
ระหว่างการทำทดสอบดังรูปที่ 7 ชิ้นงานด้านหนึ่งจะถูกยึดไว้และอีกด้านจะเคลื่อนที่ตามหัวจับของเครื่อง เครื่องทดสอบเอนกประสงค์จะดึงชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 1 mm/min กล้องจะถ่ายภาพต่อเนื่องด้วยอัตราเร็ว 10 ภาพ/วินาที ชิ้นงานทดสอบจะถูกวัดค่าความเครียดด้วยอุปกรณ์วัดระยะยืด ยี่ห้อ Instron AVE2 จากนั้น ข้อมูลไหลดจากโหลดเซลล์และความเครียดจากอุปกรณ์วัดระยะยืดจะถูกเก็บเข้าสู่คอมพิวเตอร์ เช่นเดียวกันในการวัดความเครียดโดยวิธีดีไอซีภาพหลายจุดจะถูกถ่ายจากกล้องและอุปกรณ์ให้แสงสว่างชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในอุปกรณ์วัดระยะยืด Instron AVE2 จากนั้นจะนำภาพหลายจุดที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาสนามความเครียด ต่อไป



รูปที่ 7 การดึงทดสอบด้วยวิธีดีไอซีแบบสองมิติ

วิธีดีไอซีจะใช้ในการวัดสนามความเครียดโดยกำหนดขนาดของซับเซตที่ใช้คำนวณมี 3 ขนาดคือ 21×21 31×31 และ 41×41 พิกเซล ทำการคำนวณสนามการกระจัดในแต่ละภาพโดยมีจำนวนจุดที่ถูกคำนวณเท่ากับ 21×21 จุด จากนั้นจะใช้เทคนิคการปรับให้เรียบมีขนาดหน้าต่างคำนวณ 3×3 พิกเซล ทำการคำนวณความเครียดจะได้จำนวนจุดความเครียดทั้งหมด 19×19 จุดต่อหนึ่งภาพ จากนั้นนำค่าความเครียดที่ได้มาหาค่าความเครียดเฉลี่ยเพื่อสร้างกราฟความเค้นต่อไป เนื่องจากค่าสนามความเครียดจริง

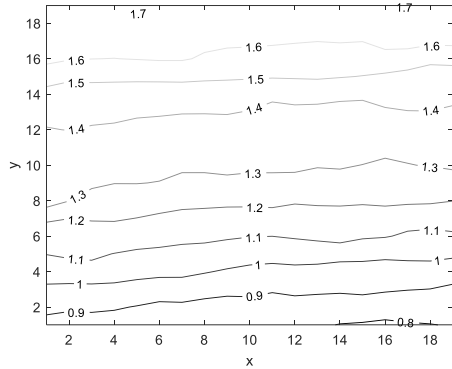
ไม่อาจทราบค่าได้จึงจำเป็นต้องใช้ค่าความเครียดจากวิธีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มาเปรียบเทียบ พิจารณารูปที่ 8 เป็นกราฟความเค้นความเครียดในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นของวัสดุ จะสังเกตได้ว่ากราฟจากวิธีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าวิธีดีไอซี เมื่อความเครียดมีค่าสูงความแตกต่างของทั้งสองวิธีมีค่าเพิ่มขึ้นปัจจัยหนึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงและอีกปัจจัยหนึ่งเกิดจากการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับวิธีนิวตันราฟสัน จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่ายังมอดูลัสซึ่งคำนวณได้จากความชันของกราฟความเค้นความเครียด โดยค่ายังมอดูลัสที่ได้จากกราฟวิธีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มีค่าเท่ากับ 63.72 GPa ค่ายังมอดูลัสที่ได้จากวิธีดีไอซีของซับเซตขนาด 21×21 31×31 และ 41×41 พิกเซล มีค่าเท่ากับ 60.26 60.43 และ 59.97 GPa ตามลำดับ ค่ายังมอดูลัสของซับเซตขนาด 31×31 มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากวิธีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มากที่สุดนั่นคือมีความแตกต่างสมบูรณ์อยู่ที่ 5.16 %



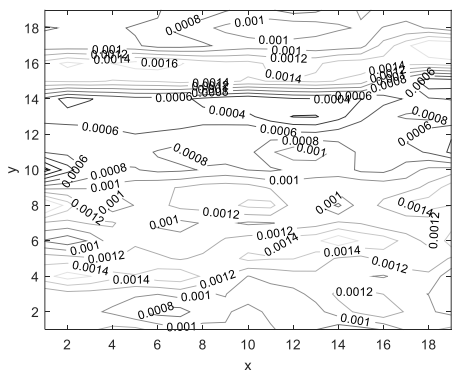
รูปที่ 8 กราฟความเค้นความเครียด

จากกราฟความเค้นความเครียดในรูปที่ 8 ตำแหน่งที่ความเค้นเท่ากับ 60.01 MPa ถูกพิจารณาอีกครั้ง โดยใช้ขนาดของซับเซต 31×31 พิกเซล ทำการคำนวณและใช้เทคนิคการปรับให้เรียบจะได้จำนวนจุดข้อมูล 19×19 จุด จากนั้นนำการกระจัดและความเครียดที่ได้นี้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามการกระจัด v รูปที่ 9 (ก)

จะเห็นได้ว่ามีการกระจายตัวของกระจัดที่ไม่คงที่ หรือมีลักษณะการกระจายตัวแบบ homogeneous deformation น้อยกว่ารูปที่ 3 (ก) ดังนั้นเมื่อความชันของการกระจัดที่ได้ไม่คงที่เป็นผลให้ความเครียดมีความไม่คงที่ตามมาดังรูปที่ 9 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 (ก) สนามการกระจัด v หน่วยเป็นพิกเซล และ (ข) สนามความเครียด dv/dy ที่ความเค้น 60.01 MPa

5. สรุป

ในหัวข้อที่ 3 การจำลองภาพหลายจุดด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการประเมินความคลาดเคลื่อนจากการพัฒนาโปรแกรมอัลกอริทึมซัพพิกเซลที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีนิวตันราฟสัน การประเมินทำให้ทราบว่า การใช้ซัพเซตที่เล็กเกินไปเช่น 21×21 พิกเซล เมื่อการกระจัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ทั้งความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีค่าสูงขึ้น สาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจากหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยหนึ่ง

เกิดจากฟังก์ชันประมาณค่าการกระจัดและความเข้มของแสง การหาฟังก์ชันที่เหมาะสมยังเป็นหัวข้องานวิจัยที่สามารถทำได้ในอนาคต

จากหัวข้อที่ 4 สรุปได้ว่าการสร้างภาพหลายจุดด้วยปากกามีคุณภาพเพียงพอในการวัดสนามความเครียดด้วยวิธีดีไอซี แต่อย่างไรก็ตามการสร้างภาพหลายจุดด้วยปากกาก็มีความแตกต่างจากการสร้างภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในหัวข้อที่ 3 การควบคุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจุดและการกระจายของความเข้มแสงในฮิสโตแกรมของภาพที่ถูกสร้างขึ้นมีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวัด

การสาธิตตั้งขึ้นงานออลูมิเนียม โดยใช้ความเครียดจากวิดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์เป็นเกณฑ์วัดเปรียบเทียบกับวิธีดีไอซี การใช้เทคนิคการปรับให้เรียบเพื่อช่วยลดสิ่งรบกวนซึ่งจะทำให้การกระจัดมีความชันคงที่เหมาะสมในการใช้หาความเครียดต่อไป จากการทดสอบตั้งออลูมิเนียมอัลลอยพบว่ากราฟความเค้นความเครียดที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นเมื่อความเครียดมีค่าสูงทำให้วิธีดีไอซีมีเส้นกราฟที่แตกต่างออกไป สุดท้ายการเปรียบเทียบค่ายังมอดูลัสของออลูมิเนียมอัลลอยที่วัดได้โดยใช้กราฟความเค้นความเครียดจากวิธีดีไอซีและวิดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์พบว่าค่าที่ได้โดยวิธีดีไอซีแตกต่างเล็กน้อยกับวิธีวิดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ จากผลการวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ที่สามารถนำวิธีดีไอซีไปศึกษาวิจัยคุณสมบัติทางกลของออลูมิเนียมอัลลอยและวัสดุชนิดอื่นในอนาคตต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการได้ด้วย การสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] He X, Zhou R, Liu Z, Yang S, Chen K, Li L. Review of research progress and development trend of digital image correlation. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2024; 20(1):81–114.
- [2] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement. *Optics Express*. 2016;24(17):19082-93.
- [3] Sánchez-Arévalo FM, Pulos G. Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials. *Materials Characterization*. 2008;59(11):1572–9.
- [4] Cruz DJ, Shamchi SP, Santos AD, Amaral RL, Tavares PJ, Moreira P. Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation. *Procedia Structural Integrity*. 2020;25:316-23.
- [5] Quanjin M, Rejab MRM, Halim Q, Merzuki MNM, Darus MAH. Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. *Materials Today: Proceedings*. 2020;27:757-63.
- [6] Zhang ZF, Kang YL, Wang HW, Qin QH, Qiu Y, Li XQ. A novel coarse-fine search scheme for digital image correlation method. *Journal of the International Measurement Confederation*. 2006;39(8):710–8.
- [7] Hung PC, Voloshin AS. In-plane strain measurement by digital image correlation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2003;25(3):215-21.
- [8] Vendroux G, Knauss WG. Submicron deformation field measurements: part 2. improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*. 1998;38(2):86-92.
- [9] Réthoré J, Hild F, Roux S. Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2007;196(49-52):5016-30.
- [10] Bing P, Hui-Min X, Bo-Qin X, Fu-Long D. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Measurement science and technology*. 2006;17(6):1615.
- [11] Pan B, Qian K, Xie H, Asundi A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement science and technology*. 2009;20(6):062001.
- [12] Sutton MA, Orteu JJ, Schreier H. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*: Springer Science & Business Media; 2009.
- [13] Schreier HW, Sutton MA. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Experimental mechanics*. 2002;42:303-10.
- [14] Schreier HW, Braasch JR, Sutton MA. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. 2000;39(11):2915-21
- [15] Lecompte D, Smits A, Bossuyt S, Sol H, Vantomme J, Van Hemelrijck D, et al. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and lasers in Engineering*. 2006;44(11):1132-45.

ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค-เศรษฐศาสตร์ของการผลิตกระแสไฟฟ้า จากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

ภาณุพงษ์ สามล¹ จงจิตร์ หิรัญลาภ^{1*} ชัยพร สุภาหิตานุกุล¹ สุมะธ สติตบุญอนันต์¹ และโจเซฟ เคดารี²
ppsmaos@gmail.com¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, chaiporn.sup@gmail.com¹,
sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

Received: October 31, 2024 Revised: December 4, 2024 Accepted: December 20, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค-เศรษฐศาสตร์ ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยออกแบบสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ความกว้าง 0.70 เมตร ความยาว 3.68 เมตร ความสูง 1.55 เมตร ใช้น้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาทดลอง โดยใช้กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก 4 แบบ เพื่อทดลองที่อัตราการไหล 500 ถึง 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่า ชุดกังหันน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า แบบที่ 1 Impulse turbine (3 วัตต์) สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1.27 วัตต์ ในขณะที่กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า แบบที่ 2 Pelton turbine (50 วัตต์) สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อัตราการไหล 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 10.35 วัตต์ โดยกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า แบบที่ 3 Water wheel turbine (100 วัตต์) สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อัตราการไหล 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.37 วัตต์ ขณะที่กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 4 Impulse turbine (100 วัตต์) ไม่สามารถทำงานได้ในช่วงอัตราการไหลที่ทดลอง และจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมขนาด 29 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เลือกติดตั้งชุดผลิตไฟฟ้า ขนาด 1 กิโลวัตต์ มีระยะคุ้มทุนที่ 1.3 ปี ดังนั้นงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้น้ำจากโรงบำบัดน้ำเสีย เป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ ในทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ และสามารถนำไปใช้พิจารณา ศึกษา เพื่อเป็นแนวทางในการใช้น้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไฟฟ้า และปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ระบบบำบัดน้ำเสีย แบบจำลองขนาดเล็ก กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

Techno-economic feasibility study of electricity generation from industrial wastewater treatment system

Phanupong Samol¹, Jongjit Hirunlabh^{1*}, Chaiporn Supahitanukul¹, Sumate Sathibunanan¹,
and Joseph Khedari²
ppsmaos@gmail.com¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, chaiporn.sup@gmail.com¹,
sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

²Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi University

Received: October 31, 2024 Revised: December 4, 2024 Accepted: December 20, 2024

Abstract

This paper reports a techno-economic feasibility study of electricity generation from an industrial wastewater treatment system. First, a small model of an electrical generation power system, 0.70 m. width, 3.68 m. length, and a height of 1.55 m. was designed and assembled. Four Micro hydro turbine generators were tested at flow rates ranging from 500 to 2,000 LPH similar to effluent from industrial wastewater treatment plants. Experimental results showed that type 1 impulse turbine (3 watts) can generate electricity of 1.27 Watts at a maximum flow rate of 1,000 LPH. Whereas type 2 Pelton turbine (50 watts) can generate maximum electricity of 10.35 Watts at a flow rate of 1,300 LPH. Type 3 Water wheel turbine (100 watts) can generate maximum electricity of 0.32 Watts at a flow rate of 2,000 LPH while type 4 Impulse turbine (100 watts) cannot operate within the experimental flow rate range. Then, an economic analysis of electricity production from the wastewater treatment system at a flow rate of 29 m³/h found that installing a 1 kW power generating set has a payback period of 1.3 years. Therefore, this research demonstrated that generating electrical current using wastewater from treatment plant is technically and economically viable option and deserves consideration. This study can be used as a guideline for using industrial wastewater treatment systems to produce electricity and improve plant sustainability.

Keywords: Wastewater treatment plants, Small model, Micro hydro turbine generators

1. บทนำ

ปัจจุบันการขยายตัวของชุมชน เศรษฐกิจ สังคม มีเพิ่มมากขึ้น การเกิดขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีมากขึ้นตาม ซึ่งส่งผลให้มีการใช้น้ำ และพลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้เกิดน้ำเสียในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ “น้ำเสีย” ที่เกิดขึ้นก่อนที่โรงงานอุตสาหกรรมจะปล่อยสู่สาธารณะจะต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียให้ได้คุณภาพ ตามข้อกำหนดของนิคมอุตสาหกรรมและทางหน่วยงานราชการ ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมเองก็ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสีย [1] กระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ตามลักษณะและสมบัติของน้ำเสีย แต่ละโรงงานที่แตกต่างกัน ตามวิศวกรผู้ออกแบบ เช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ชีวภาพ หรือ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี การบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นระบบอะไร ล้วนแล้วแต่ใช้พลังงานและทรัพยากรทั้งสิ้น ซึ่งเป็นผลทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสีย มีต้นทุนในการบำบัดที่สูง และจัดเป็นเรื่องที่สำคัญต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ในขณะเดียวกันโลกเองก็กำลังเผชิญกับวิกฤตพลังงาน อย่างต่อเนื่องจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

วิศวกร นักวิจัย นักสิ่งแวดล้อม รวมทั้งโรงงานอุตสาหกรรม ได้พยายามหาพลังงานทดแทนมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน [2] เช่น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้กับกังหันตีน้ำ การนำแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียมาใช้ผลิตไฟฟ้า [3] ที่เรียกว่าระบบไบโอแก๊ส เป็นต้น แต่แนวความคิดการนำน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อได้พลังงานมาใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น จึงเป็นแนวคิดใหม่ ที่ได้พลังงานจากระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นการอนุรักษ์พลังงาน และเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำน้ำเสียที่ผ่านจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ของโรงงานอุตสาหกรรม มาผลิตไฟฟ้า [4,5] โดยการนำกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro hydro turbine generator) ทำการทดสอบ [6,7] โดยการสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก และ

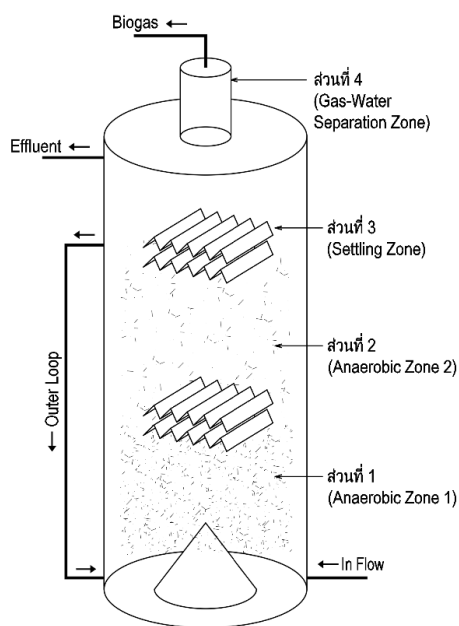
ประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ IC reactor ขนาด 29 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ของโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทผลิตอาหาร โดยใช้กังหันผลิตไฟฟ้าที่มีตามท้องตลาด เพื่อเป็นแนวทางใหม่ ในการนำน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเพื่อนำไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้ ได้พลังงานเพิ่มขึ้นจากในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย [8] หรือกระบวนการอื่น ๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมเอง เพื่อลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียให้กับโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นการช่วยส่งเสริมภาพลักษณ์ขององค์กรในทางที่ดีทั้งในด้านมีความรับผิดชอบต่อสังคม เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้และพัฒนาในเชิงธุรกิจต่อไป

2. ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ IC reactor

ปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียแบบ IC reactor เป็นที่นิยมใช้บำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเบียร์ อุตสาหกรรมการทำกระดาษ และอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตอาหาร ซึ่งหลักการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ IC reactor เป็นระบบที่มีทิศทางการไหลของน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยการออกแบบถังปฏิกรณ์จะมีความสูงประมาณ 16-25 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5-12 เมตร ซึ่งเป็นถังที่มีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อพื้นที่หน้าตัดสูง ในระบบจะแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก โดยส่วนที่ 1 (Anaerobic zone 1) และ ส่วนที่ 2 (Anaerobic zone 2) เป็นส่วนการย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่การย่อยสลายสารอินทรีย์และการเกิดก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะเกิดในส่วนที่ 1 คือล่างสุดของถังปฏิกรณ์มากที่สุด เนื่องจากน้ำเสียที่เข้าระบบมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง เมื่อปริมาณก๊าซมีการสะสมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ก๊าซจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนสุดของระบบ และมีการดึงเอาน้ำเสียขึ้นมาด้วย เมื่อน้ำเสียไหลไปถึงส่วนบน น้ำเสียและก๊าซชีวภาพจะแยกตัวออกจากกัน โดยน้ำเสียส่วนหนึ่งจะไหลกลับลงไปตามล่างของระบบ เพื่อทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสีย ทำให้

น้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าความเข้มข้นน้อยลงและเป็นการหมุนเวียนน้ำกลับภายในระบบ จึงเรียกระบบนี้ว่าเป็นถึงปฏิกิริยาแบบหมุนเวียนภายใน (Internal circulation) ส่วนน้ำเสียที่ไหลผ่านส่วนที่ 2 จะไหลขึ้นต่อไปยังส่วนที่ 3 คือ ส่วนตกตะกอน (Settling zone) ซึ่งทำหน้าที่แยกตะกอนจุลินทรีย์และน้ำออกจากกัน และส่วนที่ 4 (Gas water separation Zone) ซึ่งอยู่บนสุดของถังปฏิกิริยา ทำหน้าที่แยกก๊าซออกจากน้ำ [9] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ IC Reactor

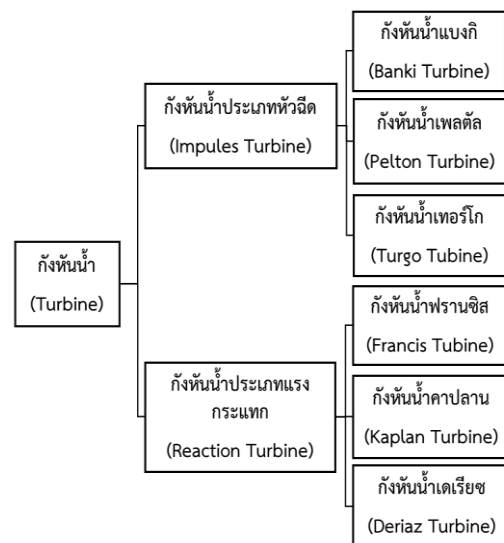
2.2 กังหันน้ำ (Water turbine)

ส่วนประกอบที่สำคัญของการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำได้แก่ กังหันน้ำ โดยมีหลักการคือการหมุนของใบพัดของกังหันที่เกิดจากการไหลของน้ำ ทำให้แกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ที่ยึดติดกับกังหันหมุนตามไปด้วย เป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปกังหันน้ำ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ [10] ดังนี้

2.2.1. กังหันน้ำประเภทหัวฉีด (Impulse turbine) หรือ กังหันน้ำแบบแรงกระแทก [4] กังหันน้ำชนิดนี้นิยมใช้กับ อ่างเก็บน้ำ หรือ เขื่อนที่มีเฮดน้ำสูง (High head) เพราะจำเป็นต้องอาศัยการ

ไหลของน้ำที่มีความแรงสูง น้ำที่ไหลลงมาจากที่สูง โดยท่อจะถูกลดขนาดลงก่อนจะถึงหัวฉีด (Nozzles) น้ำจากหัวฉีดจะกระทบใบพัดของกังหันน้ำด้วยความแรงและความเร็วสูง เป็นผลทำให้ใบพัดของกังหันน้ำเกิดการหมุน การควบคุมอัตราการไหลของน้ำและความเร็วของใบพัดกังหันน้ำ ทำโดยปรับขนาดของรูหัวฉีด [11] กังหันน้ำประเภทนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามรูปที่ 2

2.2.2. กังหันน้ำประเภทแรงกระแทก (Reaction turbine) เป็นกังหันน้ำที่ใช้แรงดันของน้ำในการทำให้ ใบพัดของกังหันหมุน โดยการหมุนของใบพัดกังหันน้ำ เกิดจากความต่างของระดับน้ำด้านท้ายและด้านหน้าของกังหัน โดยน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างใบพัดเต็มทุกช่องของกังหันน้ำพร้อมกัน ทำให้ตัวกังหันจมน้ำทั้งหมด กังหันน้ำแบบแรงกระแทกเหมาะสำหรับการใช้กับแหล่งน้ำที่มีเฮดน้ำต่ำถึงปานกลาง ที่นิยมใช้จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ประเภทของกังหันน้ำ

2.3 กำลังที่ได้จากกังหันน้ำ (Turbine power output, P_{out})

การทดสอบหาค่าพลังงานไฟฟ้า (Generator test) ได้มาจากการวัดค่าภาระทางไฟฟ้าและจากสมการ (1) ดังนี้

$$P_{out} = IV; \text{ วัตต์} \quad (1)$$

โดยที่

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

กำลังงานที่ผลิตได้จากกังหันน้ำสามารถอ่านได้โดยตรงจากวัตต์มิเตอร์

2.4 ประเภทของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุดในตัวนำนั้น ๆ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current; AC) เป็นกระแสไฟฟ้า ที่มีทิศทางการไหลกลับไปกลับมาตลอดเวลาอย่างสม่ำเสมอ และมีทิศทางการไหลจากขั้วบวกไปขั้วลบ จากขั้วลบไปขั้วบวก ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม

2. ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current; DC) เป็นการไหลของกระแสไฟฟ้า ที่มีทิศทางการไหลทางเดียวเสมอ กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วบวกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้า แล้วไหลกลับสู่ขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยจะไม่มีกระแสย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า

2.5 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ระยะเวลาคืนทุน(Payback Period; PP) เป็นการคำนวณว่า การลงทุนจะใช้ระยะเวลาเท่าไร ที่จะสามารถทำให้กระแสเงินสดสะสมสุทธิ ที่ติดลบจากการลงทุน ให้กลับมามีค่าเป็นบวก หรือที่เรียกว่า ระยะเวลาถอนทุน ระยะเวลาคืนทุน (PP) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ในการประเมินความเป็นไปได้และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของการลงทุนของโครงการ อย่างง่าย และมีความซับซ้อนไม่มาก เพื่อเป็นการตรวจสอบเบื้องต้นที่มีความรวดเร็ว และมีความเหมาะสมกับโครงการที่มีจำนวนเงินลงทุนไม่มาก ระยะเวลาคืนทุนมีสูตรคำนวณ ดังนี้ [12]

$$PB = TC/AB \quad (2)$$

โดยที่

PP คือ ระยะเวลาคืนทุน

TC คือ ต้นทุนทั้งหมด

AB คือ ผลประโยชน์เฉลี่ยต่อปี

3 วิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินการออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่

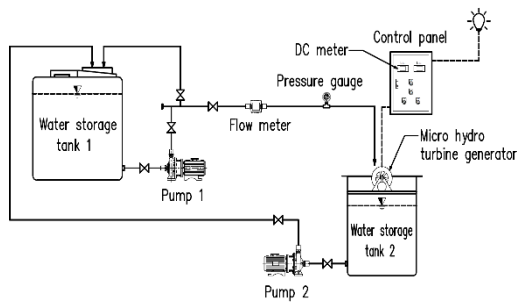
3.1 การศึกษาข้อมูลและประมวลเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1. ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติ ลักษณะประเภท ที่เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำเสีย
2. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพลังน้ำ
3. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
4. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

3.2 ออกแบบผังขั้นตอนแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการดำเนินการออกแบบผังขั้นตอนการผลิตไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม (รูปที่ 3) ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน ดังนี้

1. ถังเก็บน้ำ (Water storage tank) จำนวน 2 ใบ
2. ปั๊มสูบน้ำ (Pump) จำนวน 2 เครื่อง
3. ชุดวัดอัตราการไหล (Flow meter) จำนวน 1 ชุด
4. เกจวัดแรงดัน (Pressure gauge) จำนวน 1 ชุด
5. ชุดผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก (Micro hydro turbine generator)
6. ตู้ควบคุมไฟฟ้าติดตั้ง DC meter

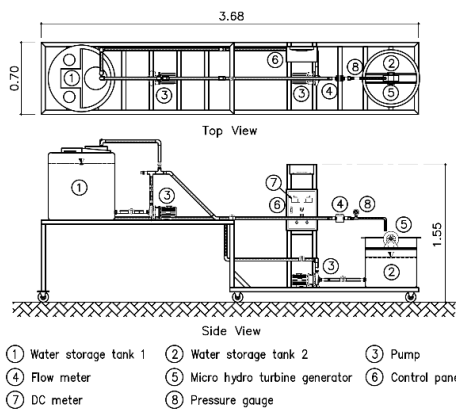


รูปที่ 3 ผังขั้นตอนการทำงานชุดทดลอง

หลักการทำงานของแบบจำลองมีดังนี้ ถึงเก็บน้ำใบที่ 1 (Water storage Tank 1) ทำหน้าที่เก็บน้ำที่ใช้ในการทดลอง ปั๊มสูบน้ำเครื่องที่ 1 (Pump 1) ทำหน้าที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำใบที่ 1 ไปยังชุดวัดอัตราการไหล (Flow meter) ตามอัตราการไหลที่ต้องการ โดยการปรับวาล์ว จากนั้นน้ำจะไหลผ่านไปยังชุดกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าทำให้เกิดการผลิตไฟฟ้า และไหลไปสู่ถังเก็บน้ำใบที่ 2 (Water storage Tank 2) โดยปั๊มสูบน้ำเครื่องที่ 2 (Pump 2) จะทำหน้าที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำใบที่ 2 กลับไปยังถังเก็บน้ำใบที่ 1 เพื่อเป็นการเวียนน้ำกลับมาใช้ในการทดสอบ

3.3 การออกแบบแบบจำลองการโดยใช้โปรแกรม AutoCAD

จากผังขั้นตอนแบบจำลอง ได้ทำการออกแบบรายละเอียดแบบจำลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้โปรแกรม AutoCAD (รูปที่ 4) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง

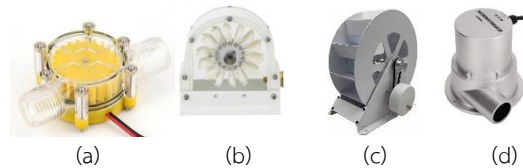


รูปที่ 4 แบบรายละเอียดแบบจำลอง

3.4 สร้างชุดทดสอบกังหันสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

จากรายละเอียดจากการออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD (รูปที่ 4) ทำการสร้างแบบจำลองขนาด ความกว้าง 0.70 เมตร ความยาว 3.68 เมตร ความสูง 1.55 เมตร (รูปที่ 6) และใช้กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก 4 แบบ (รูปที่ 5) ในการทดสอบ ซึ่งมีสมบัติ ดังนี้

- a) กังหันแบบที่ 1 คือ Impulse turbine (3 วัตต์) ขนาด 4.8 ซม. X 3.0 ซม.
- b) กังหันแบบที่ 2 คือ Pelton turbine (50 วัตต์) ขนาด 9.6 ซม. X 29 ซม.
- c) กังหันแบบที่ 3 คือ Water wheel turbine (100 วัตต์) ขนาด 30 ซม. X 10 ซม.
- d) กังหันแบบที่ 4 คือ Impulse turbine (100 วัตต์) ขนาด 15 ซม. X 15 ซม.



รูปที่ 5 กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 6 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบที่ 1 ในชุดทดลอง
2. นำน้ำที่ผ่านจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งมีสารปนเปื้อนเหลืออยู่ มาใช้ในการทดสอบ

3. ทำการทดลองที่อัตราการไหล 500 ถึง 2000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยเพิ่มอัตราการไหล ครั้งละ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยการปรับวาล์ว

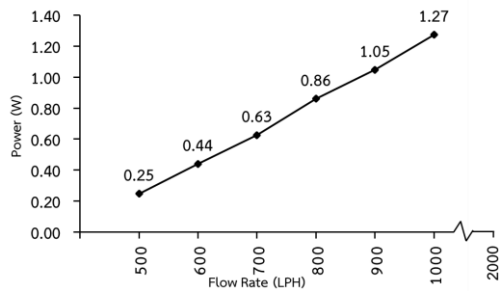
4. ทำการบันทึกข้อมูล กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ทุก ๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

5. ทำการเปลี่ยนชุดกังหันผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นแบบที่ 2,3,4 ตามลำดับ และทำการทดลองตามข้อ 2-4 ตามลำดับ

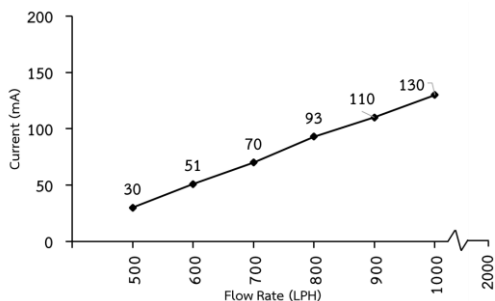
4. ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 ผลการทดลองแบบจำลอง

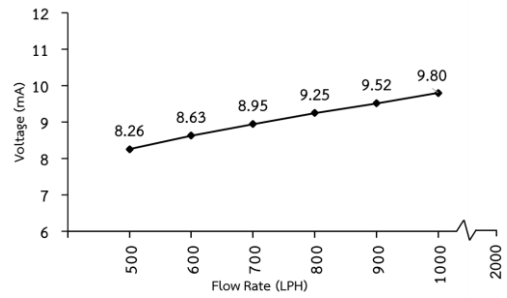
การทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำขนาดเล็ก (Micro hydro turbine generator) แบบที่ 1,2,3 ได้ผล ตามรูปที่ 7-18 ส่วนแบบที่ 4 ไม่สามารถวัดผลได้ในช่วงที่ทำการทดลอง



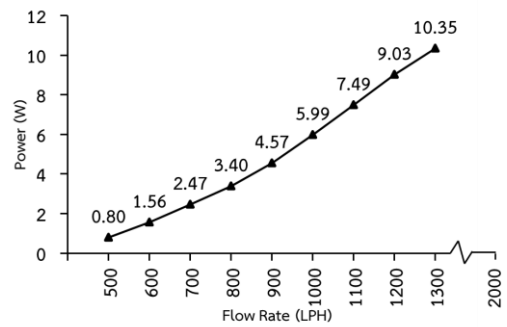
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 1



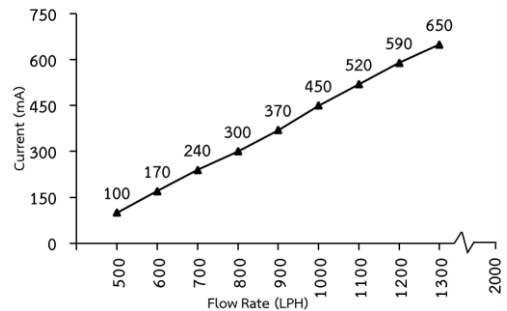
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 1



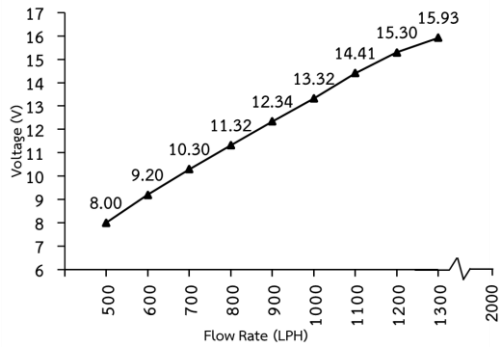
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 1



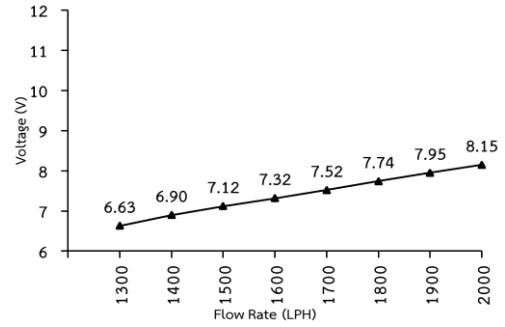
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 2



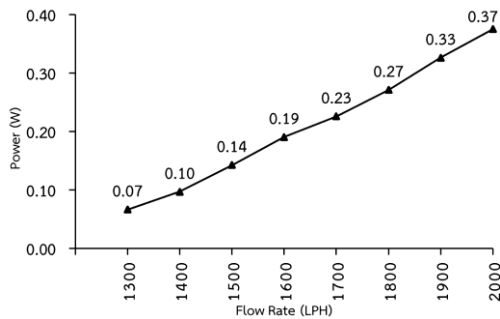
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 2



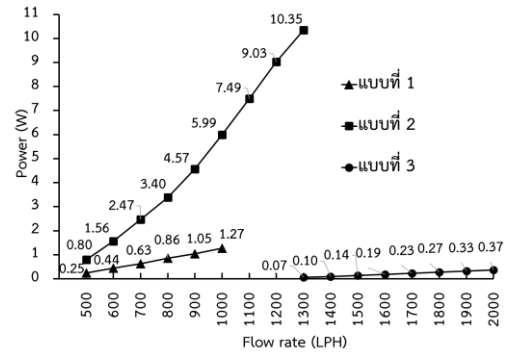
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 2



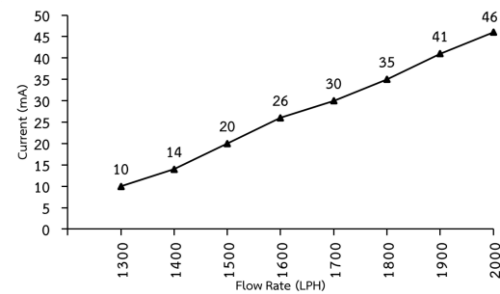
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 3



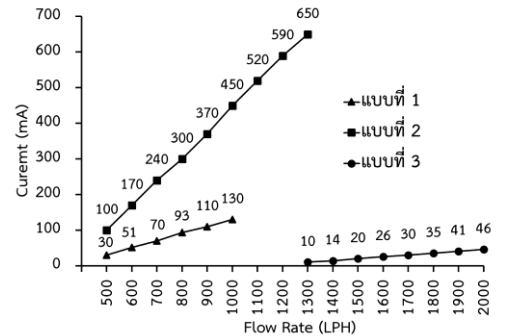
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 3



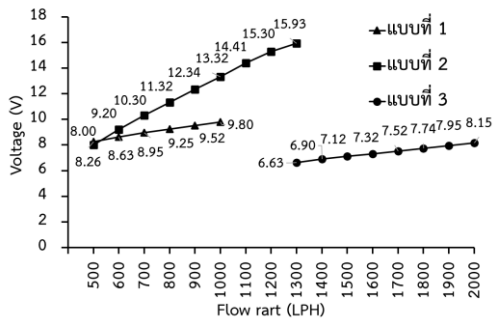
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแต่ละแบบ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบที่ 3



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแต่ละแบบ



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์อัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแต่ละแบบ

4.2 ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้ผลดังนี้

ตารางที่ 1 สมบัติ และราคา กังหันผลิตไฟฟ้า Pelton จากผู้ผลิต

รุ่น	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	เฮด (เมตร)	อัตราการไหล (ลบ.ม.ต่อชั่วโมง)	ราคา (บาท)
1.0 kW	220	7-15	18 – 28.8	13,500
1.5 kW		7-20	36 - 43.2	12,000
2.0 kW		10-25	54 - 72	17,500
3.0 kW		10-30	54 - 108	25,586

ตารางที่ 2 ราคาติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า

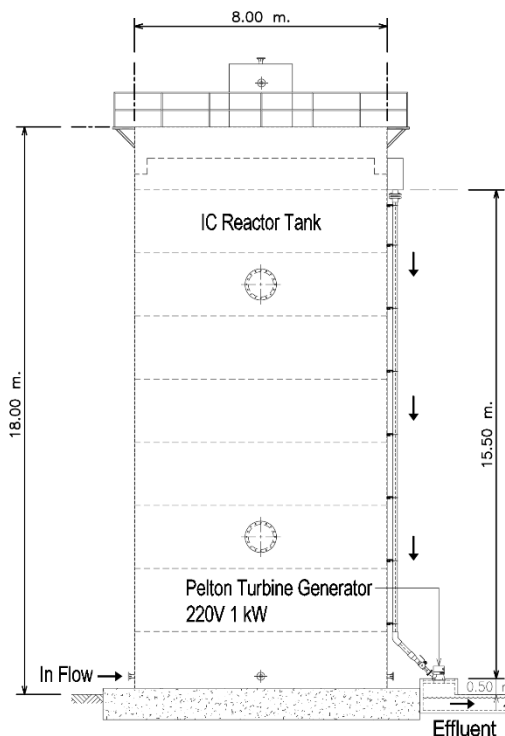
ลำดับที่	รายการ	ราคา(บาท)
1	กังหันน้ำ Pelton รุ่น 1 kW	13,500
2	ท่อและอุปกรณ์	15,000
3	ค่าแรงติดตั้ง	15,000
รวมค่าใช้จ่าย		43,500

ประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร แบบ IC reactor ที่มีความสามารถบำบัดน้ำเสีย 29 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือ 29,000 ลิตรต่อชั่วโมง ขนาดถังเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เมตร ความสูง 18.0 เมตร จากตารางที่ 1 เลือกใช้ กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า Pelton ขนาด 1 kW ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในช่วงอัตราการไหลที่ 18 ถึง 28.8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และเฮด

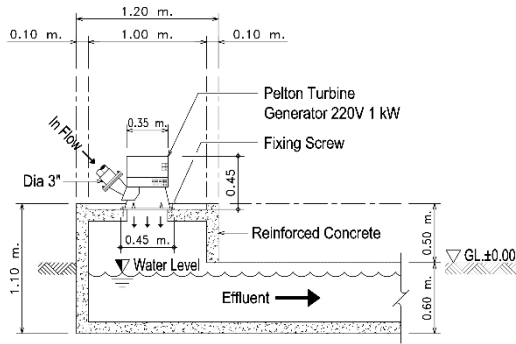
(Head) 7 ถึง 15 เมตร ทำการติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าที่ระดับพื้นทางจากระดับน้ำออก 15.5 เมตร ในแนวตั้ง (รูปที่ 19) ติดตั้งตามแบบและรายละเอียดตามรูปที่ 20 โดยระบบบำบัดน้ำเสียทำงานตลอด 24 ชั่วโมง คิดประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันน้ำ 70 % (คำแนะนำผู้ผลิต)

ดังนั้น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ = (กำลังไฟฟ้า × เวลา)/1000 = (700 × 24)/1000 เท่ากับ 16.8 หน่วยต่อวัน หรือ 504 หน่วยต่อเดือน คิดเป็นค่าไฟฟ้า = (504×4.1,839) + (504) + vat 7% เท่ากับ 2,760 บาทต่อเดือน หรือ 33,120 บาทต่อปี

ประเมินความเป็นไปได้และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แบบคืนทุน ซึ่งค่าใช้จ่ายในการติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาด 1 kW เท่ากับ 43,500 บาท (ตารางที่ 2) จากสมการที่ 2 ระยะเวลาคืนทุน (PP) = 43,500/33,120 เท่ากับ 1.3 ปี



รูปที่ 19 ตำแหน่งติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า Pelton



รูปที่ 20 รายละเอียดการติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า

5. ผลสรุป และข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการข้างต้น สามารถสรุปผล และข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผล

กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ชนิดที่ 1 Impulse turbine (3 วัตต์) สามารถผลิตไฟฟ้าในช่วงอัตราการไหล 500 ถึง 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ได้กำลังไฟฟ้า 1.27 วัตต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9.80 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 130 มิลลิแอมป์ ชนิดที่ 2 Pelton turbine (50 วัตต์) สามารถผลิตไฟฟ้าในช่วงอัตราการไหล 500 ถึง 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง ผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่อัตราการไหล 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง ได้กำลังไฟฟ้า 10.35 วัตต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15.93 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 650 มิลลิแอมป์ ชนิดที่ 3 Water wheel turbine (100 วัตต์) สามารถผลิตไฟฟ้าในช่วงอัตราการไหล 1,300 ถึง 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง ผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดคือที่อัตราการไหล 2000 ลิตรต่อชั่วโมง ได้กำลังไฟฟ้า 0.37 วัตต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 8.15 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 46 มิลลิแอมป์ และ ชนิดที่ 4 Impulse turbine (100 วัตต์) ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ทำการทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขของการทดลอง สรุปได้ว่า กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิดที่ 2 สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดและเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้า

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้า จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ IC reactor ขนาด 29 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ของโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า Pelton ขนาด 1

กิโวลต์ต์ พบว่ามีระยะคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 1.3 ปี

ดังนั้นงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า โดยใช้ น้ำจากโรงบำบัดน้ำเสียเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ในทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ สามารถนำไปใช้ พิจารณา ศึกษ เป็นแนวทางในการใช้น้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไฟฟ้าและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความยั่งยืน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การนำกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro hydro turbine generator) มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบบบำบัดน้ำเสีย ควรมีการศึกษา วิจัยเพิ่มเติมให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มาก ในอัตราการไหลที่น้อย และเฮด(head) ที่ต่ำ เพื่อพัฒนาให้สามารถประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ และภาครัฐ ควรให้การสนับสนุนส่งเสริมให้มีการศึกษา วิจัย พัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสียให้มากขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกข้อกำหนด หรือกำหนดแผนพัฒนา ต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ทีมช่าง บริษัท เอโอ เอส เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์ สร้างแบบจำลอง และ สนับสนุนด้วยดีเสมอมา งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Molinos-Senante M, Maziotis A. Evaluation of energy efficiency of wastewater treatment plants: The influence of the technology and aging factors. *Applied Energy*. 2022;310:118535
- [2] Banadda N, Kiyingi D. Generation of electricity from sewage. *The Open Renewable Energy Journal*. 2014;7:13-20.

- [3] Gandiglio M, Lanzini A, Soto A, Leone P, Santarelli M. Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants through co-digestion and fuel cell systems. *Frontiers in Environmental Science*. 2017;5:70.
- [4] Zhang QF, Uria Martinez R, Saulsbury B. Technical and economic feasibility assessment of small hydropower development in the Deschutes river basin. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States); 2013.
- [5] Elbatran AH, Yaakob OB, Ahmed YM, Shabara HM. Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;43:40-50.
- [6] Elbatran AH, Abdel-Hamed MW, Yaakob OB, Ahmed YM, Ismail MA. Hydro power and turbine systems reviews. *Jurnal Teknologi*. 2015;74(5).
- [7] Kaewrattanasripho P. Simulation of the generating electricity from water turbines using the LabVIEW. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*. 2022;21(2):117-25.
- [8] Sabia G, Petta L, Avolio F, Caporossi E. Energy saving in wastewater treatment plants: a methodology based on common key performance indicators for the evaluation of plant energy performance, classification and benchmarking. *Energy Conversion and Management*. 2020;220:113067.
- [9] Lhaochai S, Neeratanaphan L. The efficiency of up-flow anaerobic sludge blanket and Internal circulation wastewater treatment systems, *KKU Res. J*. 2011;16(8):981-92. (in Thai)
- [10] Cobb BR, Sharp KV. Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renewable energy*. 2013;50:959-64.
- [11] Williamson SJ, Stark BH, Booker JD. Performance of a low-head pico-hydro Turgo turbine. *Applied Energy*. 2013;102:1114-26.
- [12] Termkla R, Matthujak A, Sriveerakul T. Development of a low-cost heat pipe solar thermal collector. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2021;19(1):35-46.

การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น

ธันยาภรณ์ คงสินชัย¹ จงจิตร หิรัญลาภ^{1*} ชัยพร สุภาหิตานุกุล¹ สุมเมธ สติตบุญอนันต์¹ และโจเซฟ เคดารี²
joyhuns@hotmai.com¹, jongjit.hirunlabh@hotmai.com^{1*}, chaiporn.sup@gmail.com¹,
sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

Received: November 1, 2024 Revised: December 4, 2024 Accepted: December 20, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น โดยออกแบบและสร้างแบบจำลองการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก ใช้กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดมาทำการทดสอบที่อัตราการไหล 300 ถึง 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง จำลองระบบให้คล้ายกับการระบายน้ำทิ้งของหอหล่อเย็นจากโรงไฟฟ้า โดยการจ่ายน้ำ ให้กับกังหันน้ำ ในแนวตั้งที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร ผลการทดลอง พบว่า กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า แบบ Impulse turbine สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1.05, 1.07 และ 1.15 วัตต์ ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร ตามลำดับ กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า แบบ Pelton turbine สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อัตราการไหล 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 10.11, 10.37 และ 10.4 วัตต์ ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร ตามลำดับ และกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า แบบ Water wheel turbine สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อัตราการไหล 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.57, 0.68 และ 0.83 วัตต์ ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขที่ทดสอบ พบว่า กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ประเภท Pelton turbine เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งผลงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากน้ำทิ้งระบายของหอหล่อเย็นในโรงไฟฟ้าได้

คำสำคัญ: หอหล่อเย็น น้ำระบายจากหอหล่อเย็น โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ กังหันน้ำ

Investigation of using blowdown of cooling tower to generate electricity

Thanyaporn Kongsinchai¹, Jongjit Hirunlabh^{1*}, Chaiporn Supahitanukul¹, Sumate Sathibunanan¹,
and Joseph Khedari²

joyhuns@hotmail.com¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, chaiporn.sup@gmail.com¹,
sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

²Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi University

Received: November 1, 2024 Revised: December 4, 2024 Accepted: December 20, 2024

Abstract

This paper reports an investigation of using blowdown of cooling tower to generate electricity. To this end, a small model of an electric power system was designed and assembled. Three micro hydro turbine generators available in the market were tested at flowrate ranging from 300 to 2000 liter/hour similar to blowdown of cooling tower from power plant. The vertical head of water supplied to the turbines was varied 1, 1.5, and 2 m. Experimental data indicated that impulse turbine generator type can generate electricity at a maximum flowrate of 1000 liter/hour, with a power output of 1.05, 1.07, and 1.15 watts at head of 1, 1.5 and 2 m respectively. Pelton turbine can generate electricity at a maximum flowrate of 1300 liter/hour, with a power output of 10.11, 10.37, and 10.4 watts at head of 1, 1.5 and 2 m, respectively. Finally, water wheel turbine can generate electricity at a maximum flowrate of 2000 liter/hour, with a power output of 0.57, 0.68, and 0.83 watts at head of 1, 1.5 and 2 m, respectively. Under test conditions, Pelton turbine is the most suitable to produce electricity following the proposed concept. The research output can be used as a guideline for using blowdown of cooling tower from power plants to produce electricity.

Keywords: Cooling tower, Blowdown water, Natural gas power plant, Water turbine.

1. บทนำ

โรงไฟฟ้า หรือโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ใช้หอหล่อเย็น (Cooling Tower) เพื่อกระจายความร้อน น้ำที่ระบายความร้อนจากหอหล่อเย็นแล้ว จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบ และส่วนหนึ่งจะถูกระบายออก (Blowdown water) เพื่อรักษาคุณภาพน้ำในระบบให้คงที่ น้ำทิ้งที่หอหล่อเย็นระบายออก เป็นน้ำที่ต้องระบายทิ้ง เพื่อรักษาคุณภาพน้ำของระบบหล่อเย็น เนื่องจากมีการหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน ด้วยหอหล่อเย็นหลายรอบ ทำให้น้ำระบายความร้อน มีปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) สูงขึ้น จนอาจทำให้เกิดตะกอน และการอุดตันในเส้นท่อได้ เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องระบายน้ำหล่อเย็นบางส่วน ซึ่งส่วนใหญ่โรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย จะมีการปล่อยน้ำระบายทิ้งจากหอหล่อเย็นลงบ่อพักของสวนอุตสาหกรรม คลอง หรือแม่น้ำ ดังแสดงในตารางที่ 1 ข้อมูลปริมาณน้ำระบายจากหอทำความเย็น เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ สนใจที่จะนำน้ำระบายทิ้งจากหอหล่อเย็น ก่อนที่จะลงบ่อพัก กลับมาใช้ประโยชน์ โดยใช้กังหันน้ำ มาผลิตไฟฟ้า เพื่อได้พลังงาน [1] เป็นการอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังช่วยให้บริษัทหรือองค์กรมีภาพลักษณ์ที่ดี รวมถึงด้านความรับผิดชอบต่อสังคม และเป็นแนวทางในการพัฒนาเชิงธุรกิจต่อไป [2]

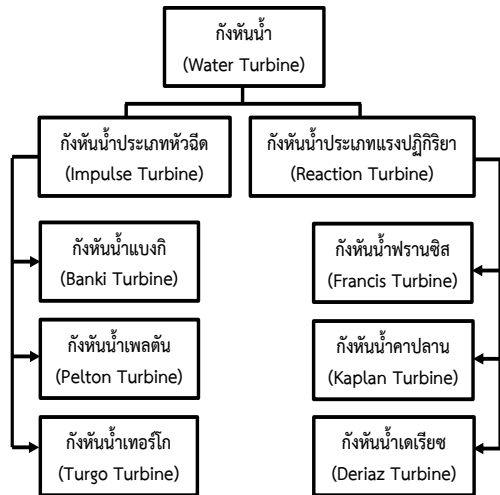


รูปที่ 1 น้ำระบายจากหอหล่อเย็นของโรงไฟฟ้า ก๊าซธรรมชาติแห่งหนึ่งในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปริมาณ 614.16 ลบ.ม./วัน

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำระบายจากหอหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าต่าง ๆ [3]

โรงไฟฟ้า	ปริมาณน้ำระบายทิ้งจากหอทำความเย็น (ลบ.ม./วัน)
โครงการโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2	10,785
โครงการโรงไฟฟ้าอุทัย	7,004
โครงการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำระบบโคเจนเนอเรชัน จังหวัดปทุมธานี	469
โครงการโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ บริษัท อมตะ บี.กริม เพาเวอร์ (ระยอง) 5 จำกัด	687.84
โครงการไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 2	61,994
โครงการโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ บางกะดี 2	640.8

งานวิจัยของ Phongsin [4] ได้จำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมปั๊มน้ำ เพื่อให้ได้อัตราการไหล และความดันน้ำตามต้องการไปทำให้กังหันน้ำเกิดการหมุน ซึ่งต่อเพลาร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีหลอดไฟเป็นโหลดทางไฟฟ้า ทำการควบคุม และแสดงผลด้วยโปรแกรมแลปวิว ซึ่งได้ผลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยค่ากำลังน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 266.67 วัตต์ ค่ากำลังกังหันน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 51.13 วัตต์ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 41.17 วัตต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะออกแบบและจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำ โดยจำลองการปล่อยน้ำที่อัตราการไหล 300-2,000 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความสูง (Head) 3 ระดับ ดังนี้ 1, 1.5, และ 2 เมตร โดยทั่วไปหอหล่อเย็นมีท่อระบายน้ำทิ้งอยู่ที่ 1-2 เมตร จึงทำการทดลองที่ความสูง 3 ระดับข้างต้น จากนั้นปล่อยน้ำผ่านกังหันน้ำ 3 ชนิด ได้แก่ Impulse turbine, Pelton turbine และ Water wheel turbine ทำการบันทึกข้อมูล กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ที่อัตราการไหล และระดับความสูงต่าง ๆ ของกังหันน้ำแต่ละชนิด



รูปที่ 2 ประเภทของกังหันน้ำ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ข้อมูลที่นำมาศึกษา

งานวิจัยนี้ เป็นการนำข้อมูลปริมาณน้ำระบายทิ้งของหอหล่อเย็นจากโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติแห่งหนึ่ง ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา กำลังการผลิตไฟฟ้า 112 เมกะวัตต์ มีอัตราการระบายน้ำ blowdown จากหอทำความเย็นอยู่ที่ 614.14 ลูกบาศก์เมตร/วัน โดยความสูงของปลายท่อ อยู่สูงจากระดับน้ำในบ่อพักน้ำ 1.5 เมตร (รูปที่ 1)

2.2 ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 หอหล่อเย็น (Cooling tower) เป็นอุปกรณ์กำจัดความร้อน โดยใช้น้ำถ่ายเทความร้อนจากกระบวนการทิ้งสู่ชั้นบรรยากาศผ่านการระเหย มีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ หอหล่อเย็น บั้มหมุนเวียน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน น้ำจะไหลผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะดูดซับความร้อน จากนั้นน้ำจะถูกกระจายไปที่ด้านบนของหอหล่อเย็น โดยอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านน้ำร้อน ทำให้น้ำส่วนหนึ่งระเหยไป ความร้อนจะถูกถ่ายโอนจากกระแสน้ำไปยังกระแสลม ทำให้อุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น 100% จากนั้นอากาศร้อนนี้จะถูกระบายออกสู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดกระแสไอน้ำ น้ำที่ระบายความร้อนจากอ่างจะถูกสูกลับผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน และหมุนเวียนเป็น Cycle ต่อไป [5]

2.2.2 น้ำระบายจากหอหล่อเย็น (Blowdown water) เป็นน้ำที่ต้องระบายทิ้งเพื่อรักษาคุณภาพน้ำของระบบหล่อเย็น

2.2.3 กังหันน้ำ (Water turbine) เป็นเครื่องจักรที่แปลงพลังงานการเคลื่อนตัวของน้ำให้เป็นพลังงานกลหรือไฟฟ้า ส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ มีการถ่ายโอนพลังงานจากการเคลื่อนย้ายน้ำไปยังเพลลาหมุนที่มีใบพัดหรือแผ่นจานหมุน (โรเตอร์) ติดตั้งอยู่ กังหันน้ำจะถูกกระทบด้วยแรงของน้ำ ทำให้เกิดการหมุนที่มีความเร็วรอบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความดันน้ำที่ไหลกระทบใบกังหัน ส่งผลให้เกิดการหมุนของเพลลา กังหันน้ำมีหลายชนิด การนำไปใช้งานแต่ละชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน [6]

กังหันน้ำ แบ่งตามหลักการทำงานทางฟิสิกส์ ได้เป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้ กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยา และกังหันน้ำประเภทหัวฉีด (รูปที่ 2)

กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยา (Reaction turbine) แรงดันของน้ำจะเปลี่ยนไปตามการเคลื่อนที่ผ่านใบพัดของกังหัน กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยาต่างกับกังหันน้ำประเภทหัวฉีด ตรงที่ใช้แรงดันน้ำโดยตรงเพื่อเคลื่อนใบพัด แทนที่จะอาศัยการแปลงแรงดันน้ำเป็นพลังงานจลน์ซึ่งหมายความว่ากังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยาจะต้องจุ่มลงในน้ำ กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยาจะนำมาใช้บริเวณเสดของน้ำต่ำ ได้แก่ เสดระดับต่ำ (<30 เมตร/ 98 ฟุต) และเสดระดับกลาง (30-300 เมตร/ 98-984 ฟุต) [6]

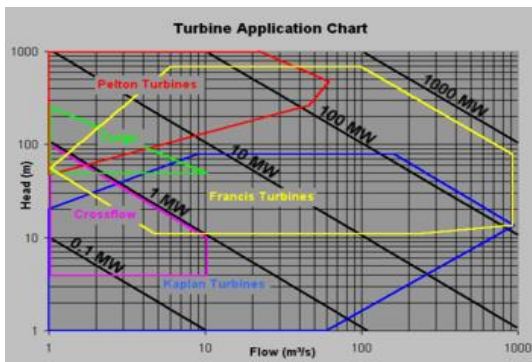
กังหันน้ำประเภทหัวฉีด (Impulse turbine) ตัวกังหันทำงานที่ความดันบรรยากาศ ประกอบด้วยหัวฉีดเจ็ทหรือชุดหัวฉีดที่ส่งน้ำไปยังใบพัดของกังหัน เมื่อน้ำกระทบใบพัด ความเร็วจะเปลี่ยน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมโดยออกแรงกับใบพัดของกังหัน กังหันน้ำประเภทหัวฉีดไม่จำเป็นต้องจมอยู่ในน้ำ ส่วนใหญ่นำมาใช้บริเวณเสดของน้ำสูง (>300 เมตร/ 984 ฟุต) [6]

การออกแบบและการใช้งาน

ในการเลือกใช้กังหันน้ำ สำหรับพื้นที่หลัก ๆ จะพิจารณาจากไฮดรอลิกเฮด รวมถึงอัตราการไหลของน้ำ โดยส่วนใหญ่ กังหันน้ำประเภทหัวฉีดจะนำมาใช้ในบริเวณเฮดน้ำสูง และกังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยาจะนำมาใช้ในบริเวณเฮดน้ำต่ำ [6]

ตารางที่ 2 ชนิดของกังหันตามระดับของเฮด [6]

ชนิดของกังหัน	Head = ระดับเฮด ในหน่วยเมตร
กังหันวงล้อ	0.2 < Head < 4
กังหันสกรูของอาร์คิมิดีส	1 < Head < 10
กังหันเทอร์โก	15 < Head < 300
กังหันฟรานซิส	10 < Head < 350
กังหันเพลตัน	50 < Head < 1300



รูปที่ 3 แผนผังแสดงการออกแบบกังหันน้ำ [6]

2.2.4 กำลังไฟฟ้าได้จากกังหันน้ำ

(Turbine power output, P_{out})

การทดสอบหากำลังไฟฟ้า (Generator test) ได้มาจากการวัดค่าภาระทางไฟฟ้าและจากสมการ (1) ดังนี้

$$P_{out} \text{ (วัตต์)} = IV \quad (1)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

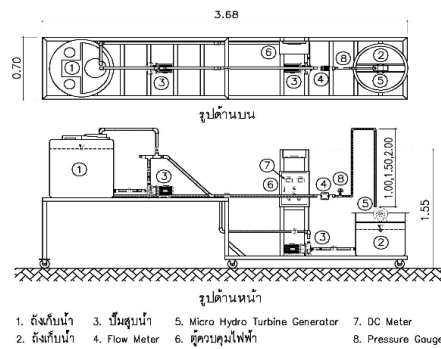
(โวลต์)

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันน้ำ

สามารถอ่านได้โดยตรงจากวัตต์มิเตอร์

2.3 ออกแบบชุดทดลองผลิตไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม AutoCAD มีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 7 ส่วน ดังนี้

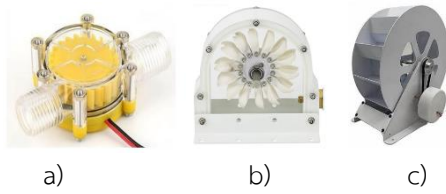
- 2.3.1 ถังเก็บน้ำเสียจำนวน 2 ใบ
- 2.3.2 บั้มสูบน้ำเสียจำนวน 2 ชุด
- 2.3.3 ชุดวัดอัตราการไหล
- 2.3.4 ชุดผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
- 2.3.5 ตู้ควบคุม
- 2.3.6 DC Meter
- 2.3.7 Pressure Gauge



รูปที่ 4 การออกแบบแบบจำลองการผลิตไฟฟ้า พลังงานน้ำด้วยโปรแกรม AutoCAD

หลักการทำงาน โดยจำลองการปล่อยน้ำที่อัตราการไหล 300-2,000 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความสูง (Head) 3 ระดับ คือ 1, 1.5 และ 2 เมตร ผ่านกังหันน้ำ 3 ชนิด ดังนี้ Impulse turbine [7], Pelton turbine และ Water wheel turbine ทำการบันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหล และระดับความสูงต่าง ๆ [8] ของกังหันน้ำแต่ละชนิด ดังนี้

- a) กังหันน้ำแบบที่ 1 คือ Impulse turbine 3 วัตต์ ขนาด 4.8 ซม. x 3.0 ซม.
- b) กังหันน้ำแบบที่ 2 คือ Pelton turbine 50 วัตต์ ขนาด 9.6 ซม. x 29 ซม.
- c) กังหันน้ำแบบที่ 3 คือ Water wheel turbine 100 วัตต์ ขนาด 30 ซม. x 15 ซม.



รูปที่ 5 ประเภทของกังหันน้ำ



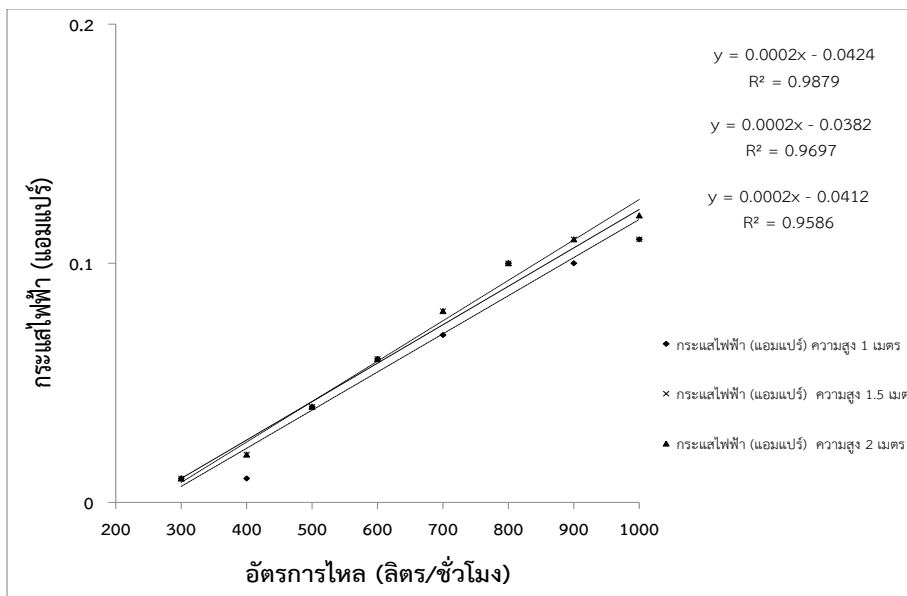
รูปที่ 6 ทิศทางการไหลของน้ำ



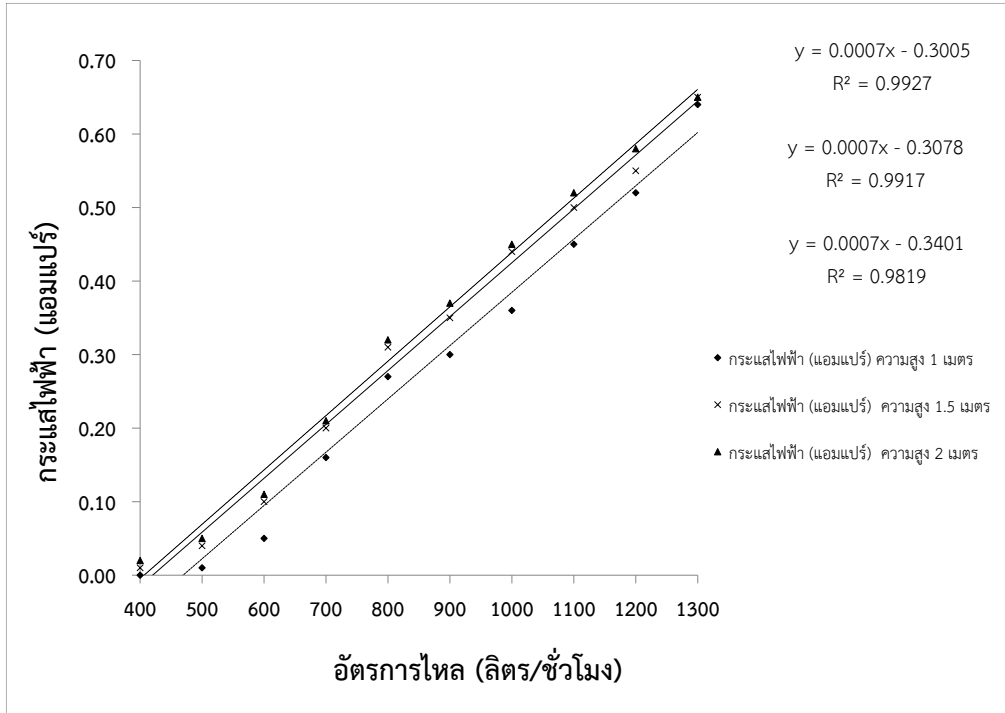
รูปที่ 7 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

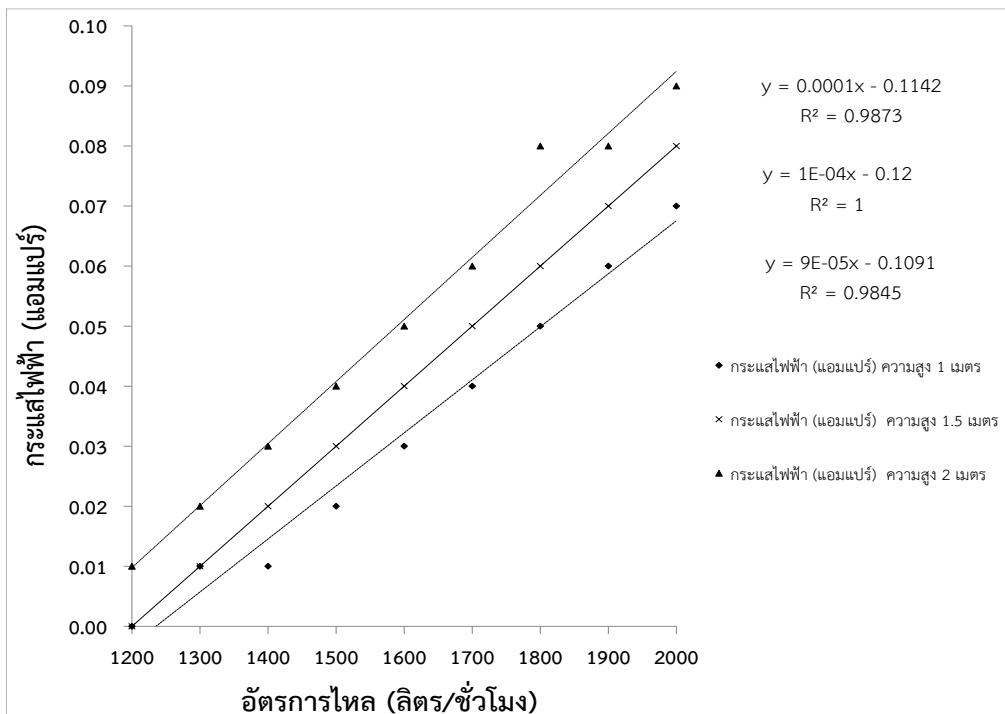
จากการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าได้ผลการทดลอง ตามกราฟด้านล่างนั้น แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ blowdown กับกระแสไฟฟ้า (รูปที่ 8, 9 และ 10) อัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้า (รูปที่ 11, 12 และ 13) และอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้า (รูปที่ 14, 15 และ 16) ของกังหันน้ำประเภท Impulse turbine, Pelton turbine และ Water wheel turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร เนื่องจากเงื่อนไขในการติดตั้ง ทั้ง 3 กรณี พบว่า การเพิ่มอัตราการไหล ทำให้กระแสไฟฟ้าและปริมาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สำหรับรูปแบบที่ 1 กังหันน้ำชนิด Impulse turbine ความสูงไม่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนรูปแบบที่ 2 เป็นกังหันน้ำชนิด Pelton turbine และรูปแบบที่ 3 เป็นกังหันน้ำชนิด Water wheel turbine ความสูงมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าและปริมาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ควรพิจารณาวิธีการเพิ่มเติม เพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดที่เหมาะสมในการใช้น้ำ blowdown ผลิตกระแสไฟฟ้า [9]



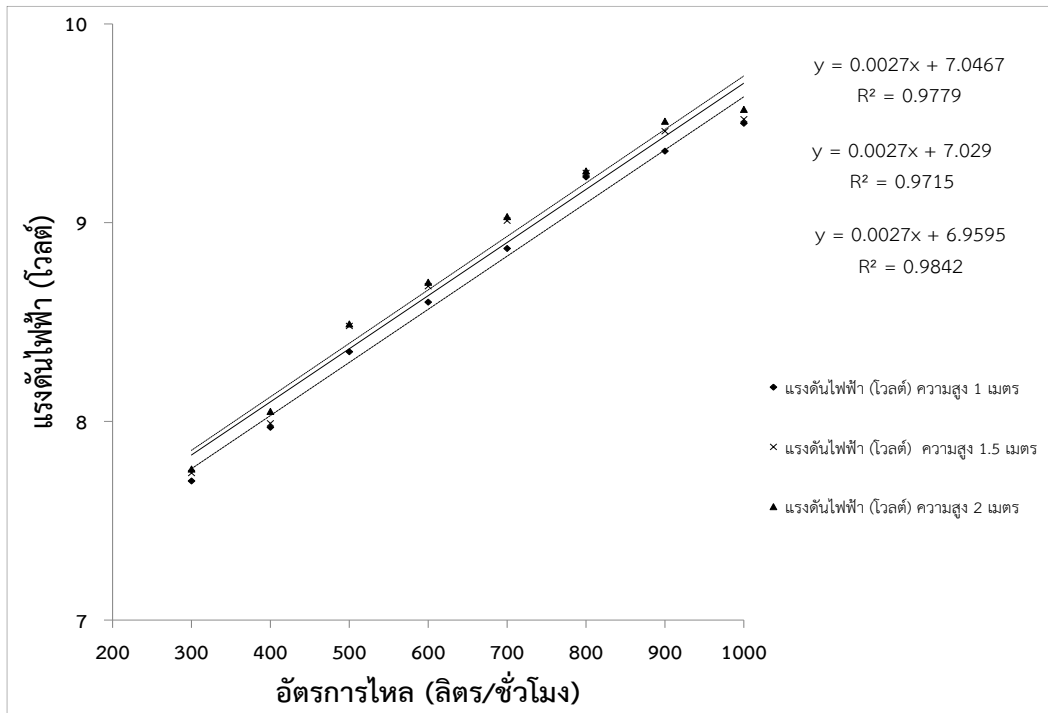
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำแบบ Impulse turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



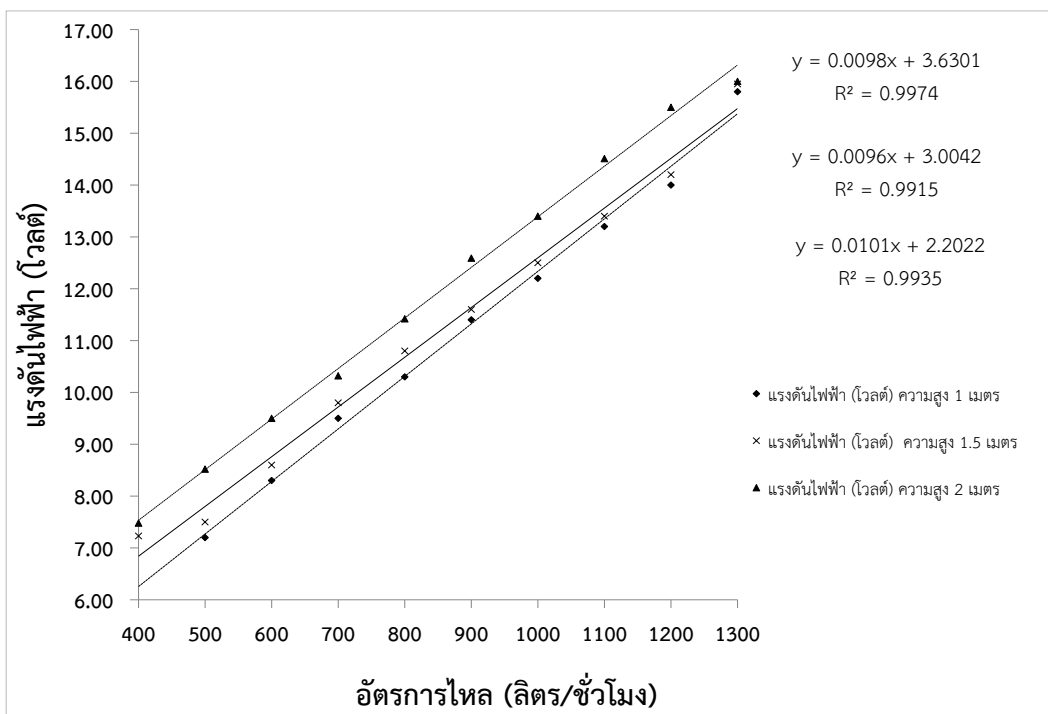
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำแบบ Pelton turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



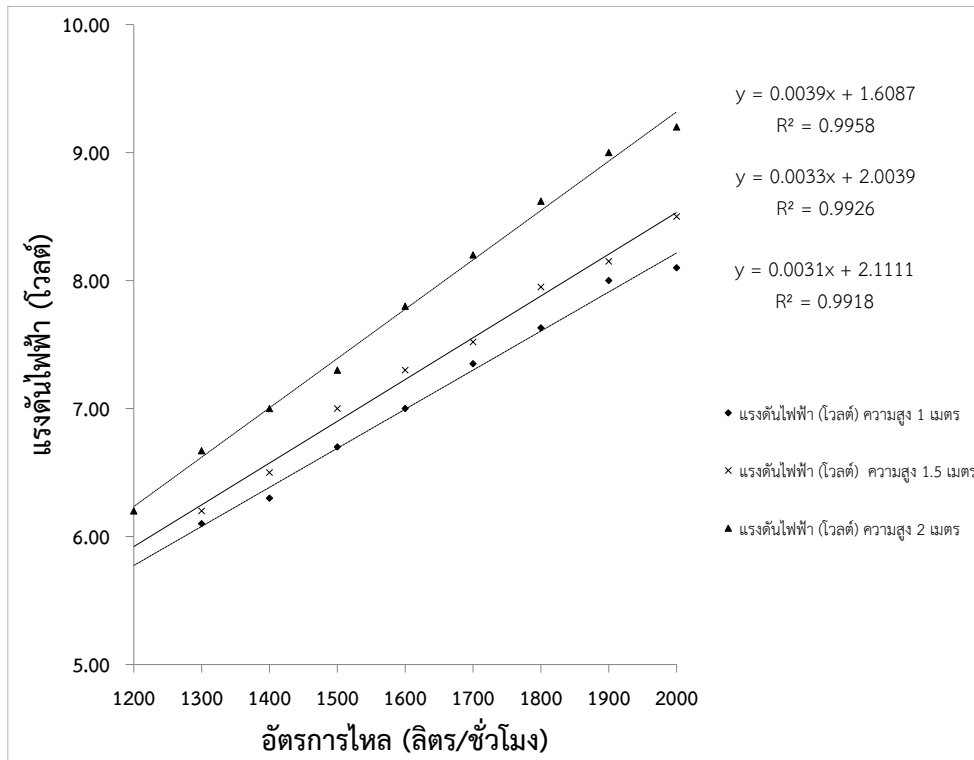
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำแบบ Water wheel turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



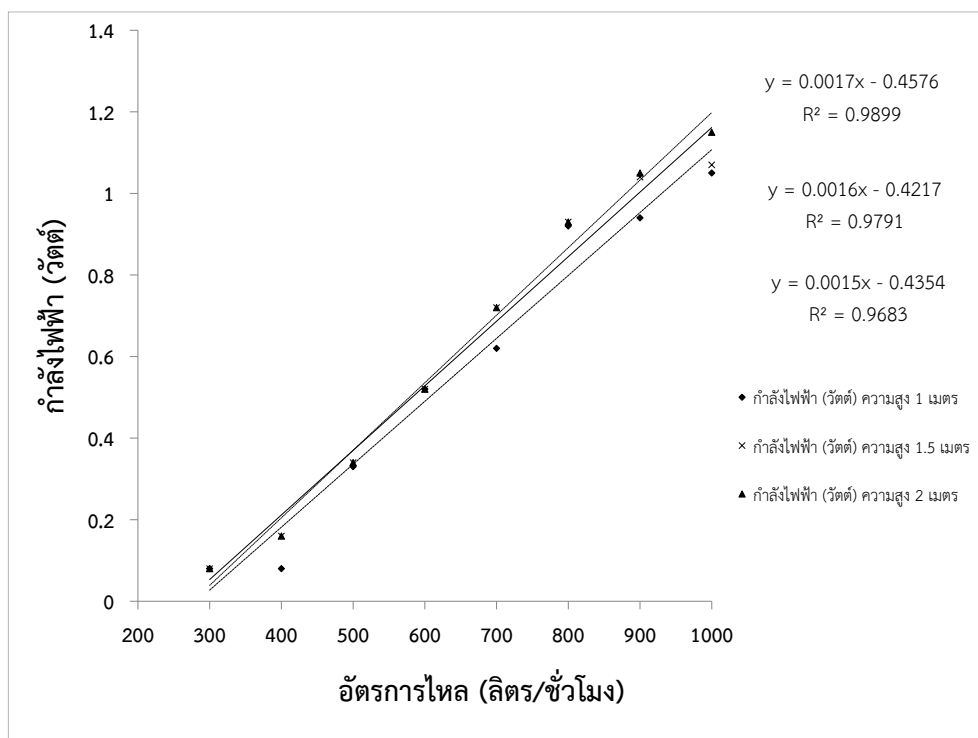
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าไฟฟ้าของกังหันน้ำแบบ Impulse turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



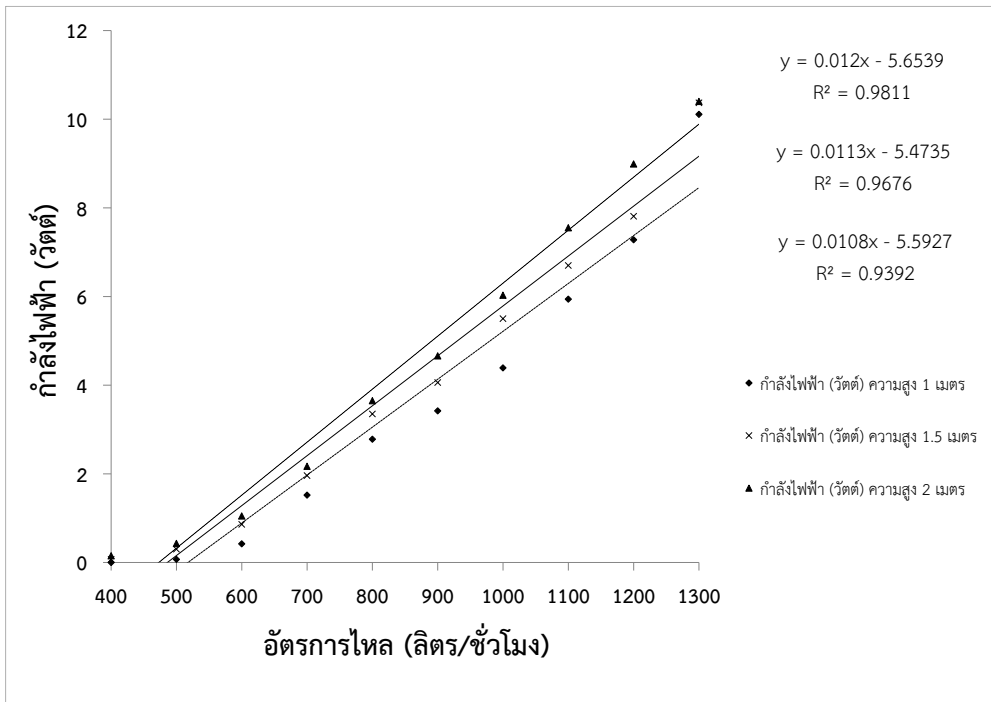
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันน้ำแบบ Pelton turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



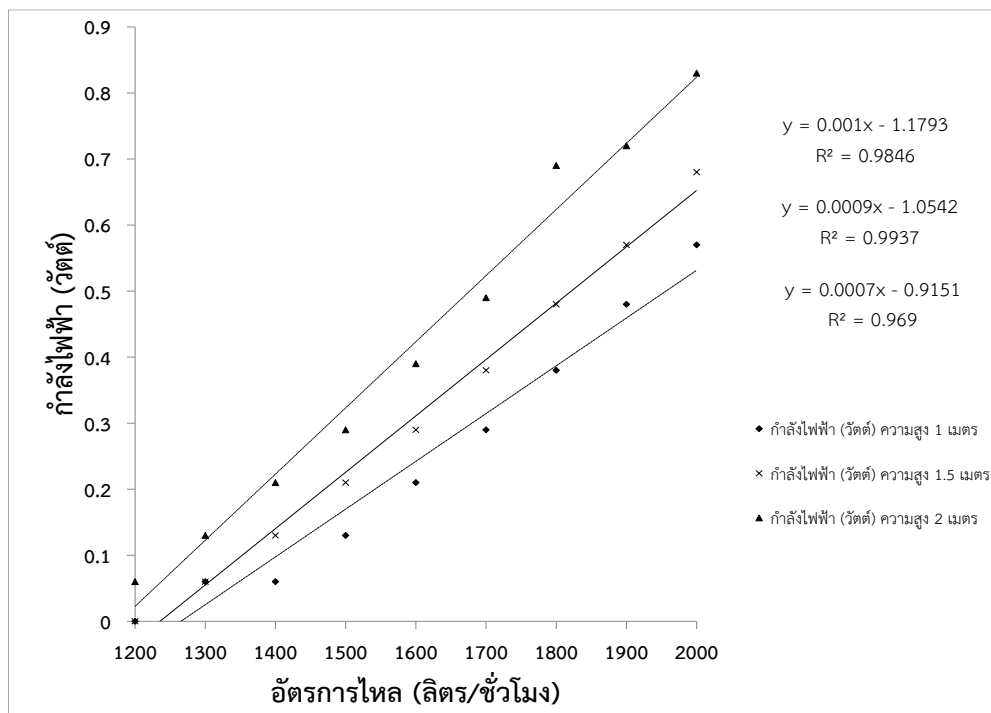
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันน้ำแบบ Water wheel turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าของกังหันน้ำแบบ Impulse turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าของกังหันน้ำ
แบบ Pelton turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าของกังหันน้ำ
แบบ Water wheel turbine ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร

4. สรุปผลการศึกษา

การทดลองมีการติดตั้งกังหันน้ำ 3 รูปแบบ เพื่อนำน้ำ blowdown ส่งผ่านท่อไปยังกังหันน้ำ แต่ละชนิด กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบ Impulse turbine สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 1.05, 1.07 และ 1.15 วัตต์ ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร ตามลำดับ กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบ Pelton turbine สามารถผลิตไฟฟ้าได้

สูงสุด ที่อัตราการไหล 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 10.11, 10.37 และ 10.4 วัตต์ ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร ตามลำดับ และกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าแบบ Water wheel turbine สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่อัตราการไหล 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.57, 0.68 และ 0.83 วัตต์ ที่ความสูง 1, 1.5 และ 2 เมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้ตามชนิดของกังหันน้ำ

ชนิดของกังหันน้ำ	อัตราการไหลสูงสุด (ลิตรต่อชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (วัตต์)		
		ความสูง 1 เมตร	ความสูง 1.5 เมตร	ความสูง 2 เมตร
1. Impulse turbine	1,000	1.05	1.07	1.15
2. Pelton turbine	1,300	10.11	10.37	10.4
3. Water wheel turbine	2,000	0.57	0.68	0.83

ภายใต้เงื่อนไขที่ทดสอบ พบว่า กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าประเภท Pelton turbine นั้น เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันน้ำประเภทอื่น ซึ่งผลงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นในโรงไฟฟ้าได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณ บริษัทเอโอเอส เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) ทีมช่าง และเจ้าหน้าที่ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์สร้างแบบจำลอง และสนับสนุนตลอดมา งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Uchiyama T, Honda S, Okayama T, Degawa T. A feasibility study of power generation from sewage using a hollowed pico-hydraulic turbine. Engineering. 2016;2(4):510-7.

[2] Bousquet C, Samora I, Manso P, Rossi L, Heller P, Schleiss AJ. Assessment of hydropower potential in wastewater systems and application to Switzerland. Renewable energy. 2017;113:64-73.

[3] Division of environmental impact assessment development. Office of natural resources and environmental policy and planning. [Internet]. 2024 [cited 2024 Oct 17]. Availability From: <https://eia.onep.go.th>

[4] Kaewrattanasripho P. Simulation of the generating electricity from water turbines using the LabVIEW. Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST). 2022;21(2):117-25.

[5] Pomchaloempong P. Cooling tower. [Internet]. 2024 [cited 2024 Apr 19]. Availability From: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6132/cooling-tower-หอทำความเย็น>

- [6] Wikipedia. Water turbine. [Internet]. 2024 [cited 2024 Aug 26]. Availability From: https://th.wikipedia.org/wiki/water_turbine
- [7] Cobb BR, Sharp KV. Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renewable energy*. 2013;50:959-64.
- [8] Walker T, Duquette J. Performance evaluation of a residential building-based hydroelectric system driven by wastewater. *Sustainable Cities and Society*. 2022;79:103694.
- [9] Williamson SJ, Stark BH, Booker JD. Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. *Renewable Energy*. 2014;61:43-50.

การประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงสำหรับการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

ไพโรจน์ ทองประศรี^{1*} และธาม สุทธิ¹
pairote@eng.srcku.acth¹, tham.su@ku.th¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

Received: July 23, 2024 Revised: December 6, 2024 Accepted: December 24, 2024

บทคัดย่อ

ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงเป็นเทคโนโลยีสำหรับการจำลองฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำที่มีความน่าเชื่อถือสูง โดยไม่ต้องสร้างระบบจริงทำให้ประหยัดต้นทุน และช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบ บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงรุ่น HIL404 สำหรับระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ระบบประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อร่วมกับวงจรกระดัดแรงดันโดยการปรับค่าตัวจลกรทำงานให้เหมาะสมเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้กับโหลด วิธีการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในฮาร์ดแวร์เสมือนจริงถูกสร้างจากโปรแกรม Matlab/Simulink ผ่านฟังก์ชัน fmi ซึ่งเป็นวิธีการที่ลดความซับซ้อน แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 261 V ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,300 W ถูกนำมาใช้สำหรับเก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิ และค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมคือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิ ส่วนผลลัพธ์ที่ต้องการคือค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด บทความนี้ได้ทดสอบและวิเคราะห์หาฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1 ชั้นซ่อนและแบบ 2 ชั้นซ่อน ผลที่ได้พบว่าฟังก์ชันที่เหมาะสมคือ Linear ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละสัมบูรณ์ของแบบ 1 ชั้นซ่อนมีค่า 31.114 ส่วนแบบ 2 ชั้นซ่อนมีค่า 8.248 โดยโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นซ่อนมีเกณฑ์การพยากรณ์ค่อนข้างแม่นยำ นอกจากนี้บทความได้ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน กับวิธีการรบกวนและสังเกต โดยใช้ชุดข้อมูล 1,200 ข้อมูล โหลดเป็นความต้านทาน 45 Ω ผลทดสอบที่ได้ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อนเกิดค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดสูงกว่าแบบวิธีการรบกวนและสังเกตเล็กน้อยและสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถูกต้อง

คำสำคัญ: ฮาร์ดแวร์เสมือนจริง โครงข่ายประสาทเทียม แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ฟังก์ชันการแปลง การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

Application of hardware-in-the-loop for maximum power tracking of solar panels using artificial neural network

Pairote Thongprasri^{1*} and Tham Sutthi¹
pairote@eng.srcku.acth^{1*}, tham.su@ku.th¹

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus

Received: July 23, 2024 Revised: December 6, 2024 Accepted: December 24, 2024

Abstract

Hardware-in-the-Loop (HIL) is a technology for simulating hardware in a highly reliable iterative manner without the need to create a physical system, which reduces costs and shortens system development time. This paper presents the application of the HIL404 model for the maximum power point tracking (MPPT) system of solar panels using an artificial neural network (ANN) method. The system includes solar panels connected to a boost converter, which adjusts the optimal duty cycle to supply maximum power to the load. The ANN model, created in Matlab/Simulink through the fmi function, simplifies the simulation process. Data on solar radiation, temperature, and voltage were collected from seven DXP72-Z-330 solar panels with a voltage rating of 261 V at a maximum power of 2,300 W over one week to train the feedforward ANN using backpropagation. The training dataset consists of solar radiation intensity and temperature, with the target output being the system voltage that maximizes power. The paper evaluates the optimal transfer function for single-layer and two-layer hidden neural networks. Results indicate that the Linear function is most effective, with a mean absolute percentage error of 31.114 for the single-layer model and 8.248 for the two-layer model, showing the two-layer network to be more accurate. Additionally, the paper compares the performance of the MPPT system using both ANN models with the perturb and observe (P&O) method on a dataset of 1,200 data points. The load is a 45-ohm resistor. The test results show that the two-layer hidden neural network's MPPT system produced slightly higher power at the load than the P&O method and was able to accurately track the maximum power.

Keywords: Hardware-in-the-loop, Artificial neural network, Solar panel, Transfer function, Maximum power tracking

1. บทนำ

วิธีการหรือระบบที่ได้ถูกคิดค้นหรือถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยต่างๆ โดยทั่วไปถูกนำเสนอผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือโปรแกรมที่เกี่ยวข้องเพื่อลดต้นทุนทางปฏิบัติ จำเป็นต้องสร้างระบบหรือฮาร์ดแวร์ขึ้นมาเพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง ซึ่งทำให้มีต้นทุนและต้องใช้เวลา ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงเป็นเทคโนโลยีสำหรับการจำลองฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำ (hardware-in-the-loop) สามารถช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการพัฒนาระบบ ประหยัดต้นทุนสำหรับกระบวนการออกแบบระบบต่างๆ โดยไม่ต้องสร้างระบบจริง มีการจำลองตามเงื่อนไขการทำงาน ความผิดพลาด และสภาพแวดล้อมในสถานะต่างๆ ทำให้สามารถทดสอบระบบได้อย่างครอบคลุม โดยมีส่วนเชื่อมต่อซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำงานง่าย มีความน่าเชื่อถือสูง จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงถูกใช้เป็นที่แพลตฟอร์มด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เฉพาะทางสำหรับการจำลองและทดสอบระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [1] การใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงในระบบการประจุและการจัดการแบตเตอรี่ ซึ่งมีการออกแบบการควบคุมแบบเรียนรู้ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการเข้าถึงสำหรับการจัดการแบตเตอรี่ [2] ใน [3] ได้มีการนำเสนอแพลตฟอร์มฮาร์ดแวร์เสมือนจริงของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบปรับเปลี่ยนอัตโนมัติได้หลายพอร์ต เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ เทคนิคการควบคุมใหม่สำหรับการเชื่อมต่อระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้เหตุการณ์ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้ถูกนำเสนอใน [4] โดยใช้การควบคุมแบบ PI ซึ่งได้รับการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องผ่านฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีแหล่งกำเนิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ [5] และค่าความชื้นในอากาศที่สูงขึ้น [6] ซึ่งส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้า ความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [7] เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่กับที่ เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking: MPPT) ถูกนำมาใช้เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดตามช่วงเวลาของวัน [8] การติดตาม

กำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบวิธีการรบกวนและสังเกต (perturb and observe: P&O) เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน หลักการคือหาจุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อน เพื่อนำมาวิเคราะห์ว่าควรเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของระบบ ข้อด้อยคือปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในสภาวะคงตัว [9] เทคนิคการเพิ่มความนำ (incremental conductance : IC) สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ โดยการนำแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมาคำนวณ และเปรียบเทียบซ้ำ ๆ กับค่าอ้างอิงแบบทันที (real time) วิธีนี้มีความซับซ้อนและใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต [10] โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network: ANN) คือ โมเดลทางคณิตศาสตร์ชนิดหนึ่งที่สามารถรวบรวมและเรียนรู้ข้อมูลผ่านกระบวนการเรียนรู้ (learning process) พร้อมกับนำสิ่งที่เรียนรู้นั้นมาปรับเปลี่ยนค่าด้วยการประมวลผล เพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาเฉพาะด้าน กระบวนการดังกล่าวนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นของคำตอบที่ต้องการ ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาโดยอ้างอิงหลักการทำงานจากระบบประสาทในสมองของมนุษย์ ที่มีเซลล์ประสาท จุดที่ใช้ประสานประสาทที่เป็นการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาทด้วยรูปแบบแขนงรับสัญญาณ โครงข่ายประสาทเทียมนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น ใช้ในการประมวลผลการทำงานของระบบรถยนต์ไร้คนขับ หรือใช้เพื่อตรวจสอบข้อมูล จำแนกผลิตภัณฑ์ เป็นต้น การใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถเรียนรู้การทำงานที่ซับซ้อนได้ ทำให้พยากรณ์จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำ มีความรวดเร็วในการติดตาม [11][12] เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกบังแสงบางส่วน โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ variable step size ถูกนำเสนอใน [13] ซึ่งมีสมรรถนะดีกว่า เมื่อทดสอบเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink วิธีการปรับแรงดันอ้างอิงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมใน [14] เมื่อสภาพบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว สามารถกำหนดจุดทำงานที่เหมาะสม ซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี IC และ P&O โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink แอปพลิเคชัน GUI ถูกนำเสนอ [15] เป็นเครื่องมือทางการศึกษาสำหรับอธิบายและวิเคราะห์เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ง่ายต่อผู้เริ่มต้นศึกษา วิธีการออกแบบ

ระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบ P&O ดั้งเดิมมุ่งเน้นเฉพาะทิศทางภายใต้สถานะแบบไดนามิก ในขณะที่ประสิทธิภาพแบบสถิตจะต่ำ แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ [16] นำเสนอวิธีการหาประสิทธิภาพแบบสถิตและแบบไดนามิกใน [17] นำเสนออัลกอริทึมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้เทคนิค P&O ร่วมกับตัวควบคุมพีซีลอจิก ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสีอย่างรวดเร็วโดยไม่ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์เพิ่มเติม เมื่อจุดการทำงานถึงสถานะคงที่ที่สามารถหยุดการรบกวนเทียมใดๆ ทำให้การสูญเสียพลังงานลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมแบบเดิม อัลกอริทึมของ GMPPT แบบสองขั้นตอนใหม่ใน [18] นำเสนอสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้จุดสุ่มตัวอย่างน้อยกว่า GMPPT แบบอื่นๆ ทำให้ช่วยลดทั้งเวลาและการสูญเสียพลังงานที่เกี่ยวข้องในการติดตาม ตัวควบคุมที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายนำเสนอนใน [19] เพื่อลดความต้องการในการคำนวณเกี่ยวกับวิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบเดิม โดยประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมถูกพิสูจน์ผ่านการทดลองบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

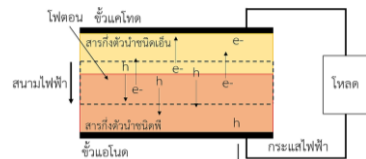
เพื่อลดต้นทุนการสร้างฮาร์ดแวร์ บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงรุ่น HIL404 ในระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมผ่านฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสม แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง ซึ่งมีที่กักแรงดัน 261 V ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,300 W ถูกนำมาใช้สำหรับเก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิ และค่าแรงดันไฟฟ้า สำหรับใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม สมรรถนะของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งใช้ฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสมแบบ 1 ชั้นซ่อน และแบบ 2 ชั้นซ่อน ได้ถูกตรวจสอบโดยเปรียบเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต

2. ระบบผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า กระบวนการนี้เรียกว่า "โฟโตโวลตาอิก" ซึ่งใช้วัสดุซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์จนกลายเป็นแผ่นซิลิกอนบริสุทธิ์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์คือ

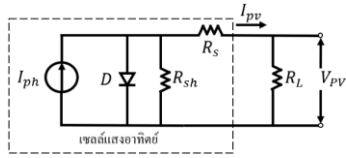
เมื่อมีรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นเซลล์ รังสีอาทิตย์ที่ประกอบด้วยโฟตอนจะทำให้เกิดประจุบวกและอิเล็กตรอน ประจุบวกจะถูกส่งไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ส่วนประจุลบจะถูกส่งไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อประจุสะสมจนถึงจุดที่มีพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนสามารถก้าวข้ามแรงดึงดูดของอะตอมและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ผลที่ได้คือสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า กระบวนการนี้ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ครบวงจร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานของรอยต่อพีเอ็น

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอด I_{ph} คือกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ความเข้มรังสีอาทิตย์ในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้า ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าาลดลง 0.5 % เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเฉลี่ยทุกๆ 1 °C ความเข้มรังสีอาทิตย์ มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้า เมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้นกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นตาม ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนไดโอดแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพีเอ็น โดยกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (I_{pv}) คือความแตกต่างระหว่างกระแส I_{ph} และกระแสไดโอด (I_D) ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แทนด้วยความต้านทาน R_s และ R_{sh}

แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง ดังรูปที่ 3 ใช้สำหรับเก็บข้อมูลเพื่อนำไปสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 วงจรสมมุติของเซลล์แสงอาทิตย์



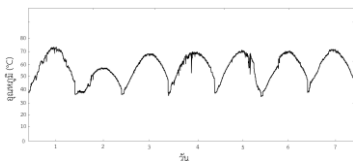
รูปที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

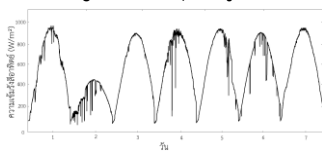
รุ่น DXP72-Z-330	พิกัด
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax)	330 (W)
จำนวนเซลล์ต่อแผง	72 (Ncell)
แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Vmp)	37.4 (V)
กระแสไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Imp)	8.83 (A)
แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Voc)	45.8 (V)
กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร (Isc)	9.28 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Voc	-0.32 (%/°C)
ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Isc	0.05 (%/°C)



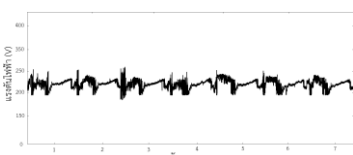
รูปที่ 4 Solar IV Full PV System Analyzer



รูปที่ 5 ค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 6 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์

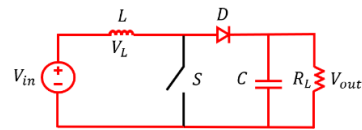


รูปที่ 7 ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 4 แสดงเครื่องมือวัด Solar IV Full PV System Analyzer ใช้สำหรับเก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิและค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ระหว่างวันที่ 18 ถึง 24 กันยายน 2566 เวลา 07:00 น. ถึง 17:00 น. ซึ่งผลของค่าอุณหภูมิ ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 ตามลำดับ

2.2 วงจรยกระดับแรงดัน

วงจรยกระดับแรงดันที่ใช้ดังแสดงรูปที่ 8 ข้อดีคือลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบกำหนดเงื่อนไขดังนี้ แรงดันอินพุตระบบ 261 V (แผงเซลล์อาทิตย์ 7 แผงต่ออนุกรมกัน) แรงดันเอาต์พุตกำหนดที่ 320 V (อ้างอิงเมื่อนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ 220 V_{AC}) ค่าอัตราระลอกคลื่น 1% กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 2,300 W ความถี่การสวิตช์ 20,000 Hz ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย ตัวต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 45Ω ตัวเหนี่ยวนำ (L) เท่ากับ $136\ \mu H$ และตัวเก็บประจุเท่ากับ $20\ \mu H$ โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องดังนี้



รูปที่ 8 วงจรยกระดับแรงดัน

$$V_{out} = \left(\frac{1}{1-D} \right) V_{in} \quad (1)$$

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2)$$

$$C = \frac{D}{Rf \left(\frac{\Delta V_{out}}{V_o} \right)} \quad (3)$$

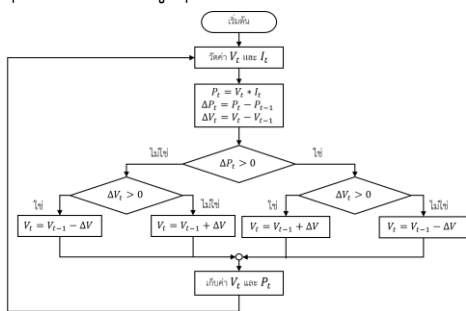
โดยที่ f คือความถี่การสวิตช์ (Hz) D เป็นวัฏจักรทำงาน และ $\left(\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} \right)$ หมายถึงอัตราระลอกคลื่น

3. เทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

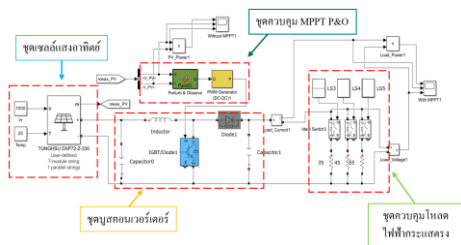
3.1 วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต

วิธีการรบกวนและสังเกตเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากใช้เทคนิคการคำนวณที่มีความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้หลักการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์

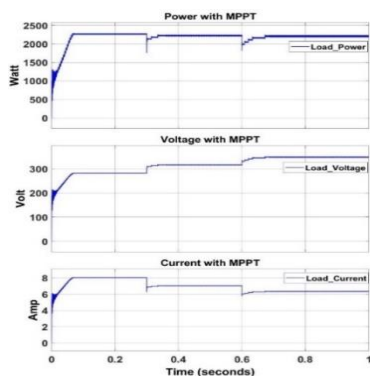
แสดงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบัน (P_t) กับคาบเวลาก่อน (P_{t-1}) เพื่อนำมาวิเคราะห์ประกอบการตัดสินใจว่าจะเพิ่มหรือลดวัฏจักรทำงาน (duty cycle: D) ของวงจรยกระดับแรงดัน ดังแสดงผังการทำงานในรูปที่ 9 ที่คาบเวลาปัจจุบัน เมื่อแรงดันไฟฟ้า ΔV_t และกำลังไฟฟ้า ΔP_t มีค่าเป็นบวกหรือลบทั้งคู่ บ่งบอกว่าระบบมีความสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีแนวโน้มเข้าใกล้จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในทางตรงกันข้ามถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแล้วทำให้กำลังไฟฟ้าน้อยลง แสดงว่ามีการออกจากจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 9 แพงผังการทำงานวิธี P&O



รูปที่ 10 แบบจำลอง MPPT วิธีกร P&O



รูปที่ 11 ผลจำลองการทำงาน MPPT วิธี P&O

แบบจำลองการทำงานการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกตรูปที่ 10 ทดสอบการทำงานโดยสร้าง

จากโปรแกรม Matlab/Simulink กำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 1,000 W/m² และอุณหภูมิ 25 °C ปรับโหลด 3 ระดับ ดังนี้ ที่ช่วงเวลา 0 ถึง 0.3 วินาที ความต้านทาน 35Ω ช่วงเวลาที่ 0.3 ถึง 0.6 วินาที ความต้านทาน 45Ω และ ช่วงเวลาที่ 0.6 ถึง 1 วินาที ความต้านทาน 55Ω วัดค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสของโหลดความต้านทาน

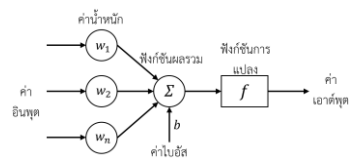
ผลจำลองการทำงานรูปที่ 11 เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงระบบได้ปรับวัฏจักรทำงานของวงจรยกระดับแรงดัน ส่งผลให้ได้แรงดันของระบบที่เหมาะสมทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มีค่า 2,250 W งานวิจัยนี้วิธีการรบกวนและสังเกตถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอ

3.2 วิธีการการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

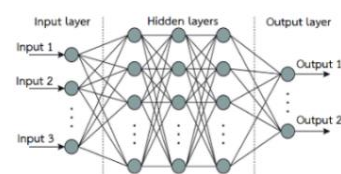
เซลล์ประสาทเทียมใช้วิธีการประมวลผลผลลัพธ์ทางด้านคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 12 ประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลอินพุต 2) ค่าน้ำหนัก 3) ฟังก์ชันผลรวม และ 4) ฟังก์ชันการแปลง ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้จาก

$$f(x) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (4)$$

- โดยที่ x_i คือ ค่าอินพุตของข้อมูล
- w_i คือ ค่าน้ำหนัก
- b คือ ค่าไบอัส
- n คือ จำนวนค่าอินพุตของข้อมูล



รูปที่ 12 โครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียม



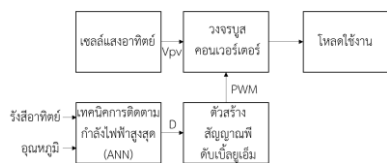
รูปที่ 13 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

โครงข่ายประสาทเทียมรูปที่ 13 ประกอบด้วยเซลล์ประสาทเทียมจำนวนมากที่เชื่อมต่อกันเป็นชั้นข้อมูลต่างๆ ดังนี้ ชั้นอินพุตเป็นชั้นแรกที่ได้รับข้อมูลเข้าสู่ระบบ ชั้นซ่อนอยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลโดยใช้ค่าน้ำหนัก ค่าไบอัส และฟังก์ชันการแปลง ในส่วนสุดท้ายคือชั้นเอาต์พุตเป็นชั้นรวมผลจากชั้นซ่อนเพื่อแปลงเป็นค่าผลลัพธ์ใช้งาน

ฟังก์ชันการแปลงเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งนำความไม่เป็นเชิงเส้นมาคำนวณเพื่อจับคู่ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างข้อมูล งานวิจัยนี้ได้ทดสอบเพื่อเลือกฟังก์ชันที่เหมาะสมจากฟังก์ชันการแปลง 5 ประเภท ต่อไปนี้

- i. ฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้น (linear activation function: Linear) คำนวณผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักข้อมูลอินพุตและไม่มีค่าการแปลงใดๆ เพิ่มเติมในเชิงคณิตศาสตร์
- ii. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid activation function: Sigmoid) จับคู่ความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุตในช่วง 0 ถึง 1 เอาต์พุตมีลักษณะคล้ายกับความน่าจะเป็น
- iii. ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (hyperbolic tangent activation function: Tanh) คล้ายฟังก์ชันซิกมอยด์แต่มีช่วงค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 และมีความสมมาตรรอบจุดกำเนิด
- iv. ฟังก์ชันเส้นตรงแบบแก้ไข (rectified linear unit activation function: ReLU) แทนค่าข้อมูลอินพุตเชิงลบทั้งหมดด้วย 0 และคงค่าบวกไว้ไม่เปลี่ยนแปลง กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1 สำหรับข้อมูลบวก และเป็นเส้นแนวนอนที่ค่า 0 สำหรับข้อมูลลบ

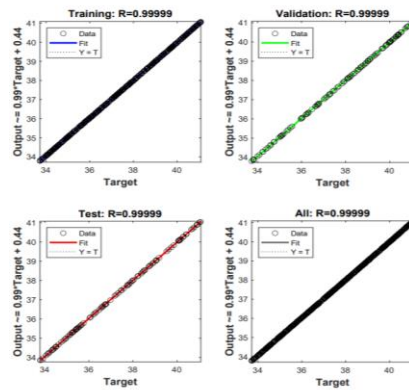
v. ฟังก์ชันแบบเรเดียลเบซิส (radial basis activation function: RBF) อินพุตอยู่ห่างจากค่าเฉลี่ยส่งผลให้ค่าเอาต์พุตลดลงตามเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ ซึ่งมีจุดทำงานอยู่ในช่วง 0 ถึง 1



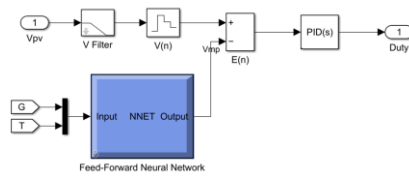
รูปที่ 14 บล็อกไดอะแกรมการทำงานวิธี ANN

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นแบบ 1 ชั้นซ่อนหรือ 2 ชั้นซ่อน ซึ่งแต่ละชั้นซ่อนมีจำนวน 10 เซลล์ ลักษณะการ

ทำงานแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า (feedforward) ใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (backpropagation) บทความนี้ได้ทำการทดสอบหาฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสมจากฟังก์ชันการแปลง 5 รูปแบบ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละสัมบูรณ์ชุดข้อมูลสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม คือค่าความเข้มข้นสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับค่าผลลัพธ์ที่ต้องการคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้สูงสุดที่โหลดของวงจรยกระดับแรงดันโดยการปรับวัฏจักรทำงานให้เหมาะสม ดังรูปที่ 14



รูปที่ 15 ผลประเมินของ ANN



รูปที่ 16 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การสร้างแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำนวนรอบการฝึกสอนสามารถกำหนดได้มากที่สุด 2,000 รอบ และค่าความผิดพลาดของเป้าหมายอยู่ที่ 0.01 เมื่อการฝึกสอนถึงจำนวนรอบหรือค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ ความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมพิจารณาได้ในรูปที่ 15 สำหรับรูปที่ 16 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับปรับค่าวัฏจักรทำงานของวงจรยกระดับแรงดัน

4. ฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

ฮาร์ดแวร์เสมือนจริงที่ใช้งานเป็นของบริษัท Typhoon ดังรูปที่ 17 ประกอบด้วย 1) HIL scada ใช้ออกแบบกราฟฟิกเชื่อมต่อติดตามและควบคุมการทำงาน 2) Schematic

editor ใช้ ออกแบบวงจรและระบบ และ 3) Waveform generator ใช้สำหรับออกแบบและจำลองแบบทันเวลา

รูปที่ 18 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างซอฟต์แวร์และ hardware-in-the-loop รุ่น 404 สามารถแสดง ผลและสั่งงาน ผ่านหน้าต่าง HIL scada ได้ ดังแสดงรูปที่ 19

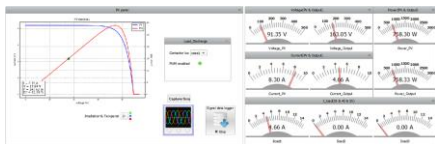


รูปที่ 17 โปรแกรมใช้งานผลิตภัณฑ์ Typhoon

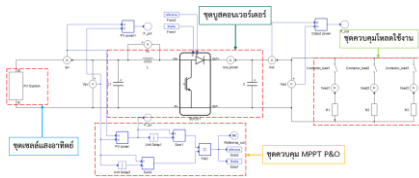


รูปที่ 18 การเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกับซอฟต์แวร์

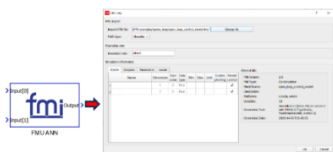
การสร้างแบบจำลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี ควบคุมและสังเกต สามารถสร้างบน Schematic editor ได้ โดยตรงเนื่องจากไม่มีความซับซ้อน โดยใช้หลักการเดียวกับ โปรแกรม Matab/Simulink ดังรูปที่ 20 ประกอบด้วย ชุดเซลล์ แสงอาทิตย์ วงจรยกระดับแรงดัน ชุดควบคุม P&O (สร้างจาก C function) และชุดควบคุมโพลต



รูปที่ 19 HIL Scada

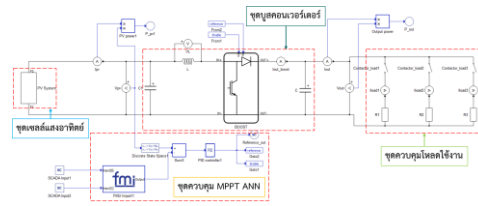


รูปที่ 20 แบบจำลอง MPPT วิธี P&O



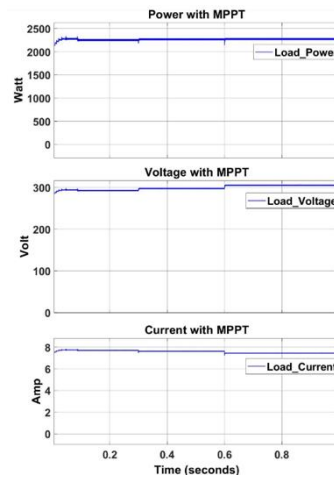
รูปที่ 21 ฟังก์ชัน fmi

เนื่องจากการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม บนฮาร์ดแวร์เสมือนจริงโดยตรง มีความยุ่งยากและซับซ้อน ทางเลือกที่ดีคือสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมใน โปรแกรม Matlab/Simulink แล้วส่งถ่ายไปยัง Schematic editor ผ่านฟังก์ชัน fmi (functional mock-up Interface) ดัง รูปที่ 21 แบบ จำลองติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้โครงข่าย ประสาทเทียมรูปที่ 22 มีส่วนประกอบคล้ายวิธีการควบคุมและ สังเกต ต่างกันที่ส่วนชุดควบคุมเปลี่ยนใช้ ANN แทน



รูปที่ 22 แบบจำลอง MPPT วิธี ANN

จำนวนอินพุตที่ใช้ทดสอบ 240 ชุดข้อมูล โดย กำหนดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 1,000 W/m² และอุณหภูมิ 25 °C คงที่ทั้ง 240 ชุดข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบ 2 ชั้นซ่อน สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 ใช้ฟังก์ชัน Linear และชั้นซ่อนที่ 2 ใช้ฟังก์ชัน Sigmoid โดยปรับโพลต 3 ระดับดังนี้ ที่ช่วงเวลา 0 ถึง 0.3 วินาที ความต้านทาน 35 Ω ช่วงเวลาที่ 0.3 ถึง 0.6 วินาที ความต้านทาน 45 Ω และช่วงเวลาที่ 0.6 ถึง 1 วินาที ความต้านทาน 55 Ω ผลการทดสอบรูปที่ 23 พบว่าเมื่อโพลตมีการเปลี่ยนแปลงระบบทำการปรับเปลี่ยนแรงดันให้เหมาะสม ทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มีค่าเท่ากับ 2,247 W



รูปที่ 23 ผลการทำงานของ MPPT วิธี ANN 2 ชั้นซ่อน

5. ผลการทดลองบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริง

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละสัมบูรณ์ (mean absolute percent error: %MAPE) เป็นวิธี การวัดความแม่นยำเชิงประสิทธิภาพ โดยการคำนวณร้อยละความผิดพลาดในการพยากรณ์ของข้อมูลเป้าหมาย ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างค่าเป้าหมายและค่าเอาต์พุต ค่า %MAPE สามารถหาได้จากสมการ (5) เกณฑ์สำหรับการพยากรณ์มีดังนี้

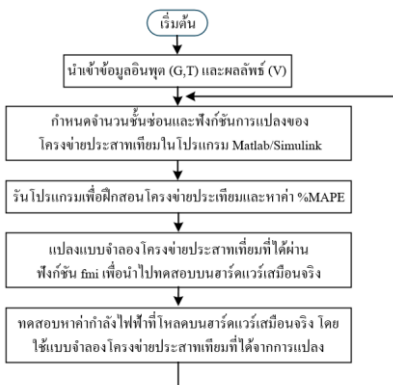
- i. ค่า %MAPE น้อยกว่า 10 หมายถึงการพยากรณ์ค่อนข้างแม่นยำ
- ii. ค่า %MAPE อยู่ระหว่าง 10-20 หมายถึงการพยากรณ์ใช้ได้ดี
- iii. ค่า %MAPE อยู่ระหว่าง 20-50 หมายถึงการพยากรณ์พอใช้
- iv. ค่า %MAPE มากกว่า 50 หมายถึงการพยากรณ์ไม่แม่นยำ

$$\%MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|x_i - y_i|}{|x_i|} \right) \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ n คือจำนวนของข้อมูล y_i เป็นค่าเป้าหมาย และ x_i คือค่าจริงของข้อมูลหรือค่าเอาต์พุต

ฟังก์ชันการแปลงเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม ลำดับถัดไปทำการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสม

ข้อมูลสำหรับสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกเก็บระหว่างวันที่ 18 ถึง 24 กันยายน 2566 ตั้งแต่เวลา 07:00 ถึง 17:00 น. ทุก 30 วินาที โดยมีชุดข้อมูลสะสมเป็นจำนวน 8,400 ข้อมูลตลอด 1 สัปดาห์



รูปที่ 24 วิธีหาจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลง

การทดสอบเพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลง โดยมีขั้นตอนทำงานดังรูปที่ 24 ดังนี้ เลือกใช้ข้อมูล 1 วัน (ชุดข้อมูล 1,200 ข้อมูล) พิจารณาจากความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุดตลอดวัน ค่าอินพุตที่ใช้คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (G) และอุณหภูมิ (T) ส่วนค่าเอาต์พุตหรือผลลัพธ์ที่ต้องการคือ แรงดันไฟฟ้า (V) กำหนดชั้นซ่อนเป็นแบบ 1 ชั้นซ่อน หรือแบบ 2 ชั้นซ่อน แต่ละชั้นซ่อนมีจำนวน 10 เซลล์ ส่วนฟังก์ชันการแปลงมี 5 รูปแบบ ได้แก่ Linear, Sigmoid, Tanh, ReLU และ RBF โดยจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลงกำหนดตามตารางที่ 2 และ 3 ลำดับถัดไปทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียมและหาค่า %MAPE ผ่านโปรแกรม Matlab/ Simulink บันทึกค่าสำหรับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จะถูกแปลงผ่านฟังก์ชัน fmi เพื่อทดสอบบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริงโดยใช้แบบจำลองในรูปที่ 22 จำลองการทำงานโดยกำหนดโหลดคงที่ 45 Ω บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โหลดสูงสุดลงตารางที่ 2 และ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนและฟังก์ชันการแปลงทำให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเปลี่ยน ซึ่งกระบวนการวนซ้ำตามผังการทำงาน

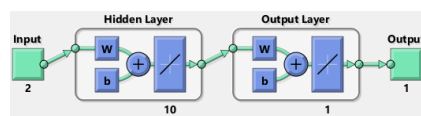
ผลตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน ฟังก์ชันการแปลง Linear ค่า %MAPE มีค่า 31.114 ดังรูปที่ 25 (ก) และมีโครงสร้างดังรูปที่ 25 (ข)

```

1 % DATA
2 I = [0; 1;]; % INPUT
3 T = V; % TARGET
4
5 % Change hidden layer and functions
6 net=nnf(minmax([-1,1]),['tansig','purelin'],'train');
7
8 % To find MSE
9 net = init(net);
10 net.trainParam.show = -1;
11 net.trainParam.epoch = 100;
12 net.trainParam.goal = 1e-3;
13 net=train(net,I,T);
14 [net,tr] = train(net,I,T);
15
16 % To find MSE
17 outputs = net(I);
18 trainIndtr=trainInd;
19 trainTargets = T(:,trainInd);
20 trainOutputs = netgetf(trainInd);
21 trainErrors = trainTargets-trainOutputs;
22 trainPerformance = perform(net,trainTargets,trainOutputs);
23 mse_error = abs(trainErrors);
24 mse_ab = sum(abs_error)/length(abs_error);
25 MSE @ (sum(abs_error)/length(abs_error));
26

```

(ก) ค่า %MAPE 31.114



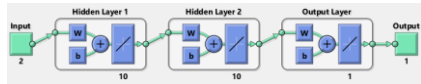
ข) ฟังก์ชันการแปลงแบบ Linear

รูปที่ 25 โครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน

```

1 % Data
2 I = [5; 7]; % INPUT
3 T = 9; % TARGET
4
5 % Change hidden layer and functions
6 net=netff('tansig','tansig','purelin','purelin','trainlm');
7
8 % To find MAPE
9 net = init(net);
10 net.trainParam.show = 1;
11 net.trainParam epochs = 100;
12 net.trainParam.goal = 1e-12;
13 net=train(net,I,T);
14 [net,tr] = train(net,I,T);
15
16 % To find MAPE
17 outputs = net(I);
18 trainError = trainlog;
19 trainInputs = I(:,trainInd);
20 trainTargets = T(:,trainInd);
21 trainOutputs = outputs(:,trainInd);
22 trainErrors = trainTargets - trainOutputs;
23 trainPerformance = perform(net,trainTargets,trainOutputs);
24 ab_error = abs(trainErrors);
25 ab_error_divide = ab_error/trainTargets;
26 MAPE = (sum(ab_error_divide)*100)/1200;
27
Command Window
MAPE =
9.2480
    
```

(ก) ค่า %MAPE 8.248



ข) ฟังก์ชันการแปลงเป็นแบบ Linear ทั้ง 2 ชั้นซ่อน รูปที่ 26 โครข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน

ผลตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อนที่มี ฟังก์ชันการแปลง Linear ค่า %MAPE มีค่า 8.248 ดังรูปที่ 26 (ก) โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 26 (ข)

```

1 % Data
2 I = [5; 7]; % INPUT
3 T = 9; % TARGET
4
5 % Change hidden layer and functions
6 net=netff('tansig','tansig','purelin','purelin','trainlm');
7
8 % To find MAPE
9 net = init(net);
10 net.trainParam.show = 1;
11 net.trainParam epochs = 100;
12 net.trainParam.goal = 1e-12;
13 net=train(net,I,T);
14 [net,tr] = train(net,I,T);
15
16 % To find MAPE
17 outputs = net(I);
18 trainError = trainlog;
19 trainInputs = I(:,trainInd);
20 trainTargets = T(:,trainInd);
21 trainOutputs = outputs(:,trainInd);
22 trainErrors = trainTargets - trainOutputs;
23 trainPerformance = perform(net,trainTargets,trainOutputs);
24 ab_error = abs(trainErrors);
25 ab_error_divide = ab_error/trainTargets;
26 MAPE = (sum(ab_error_divide)*100)/1200;
27
Command Window
MAPE =
10.360
    
```

(ก) ค่า %MAPE 10.360



ข) ฟังก์ชันการแปลง Tanh และ Linear รูปที่ 27 โครข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน

ผลตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อนที่มี ฟังก์ชันการแปลง Tanh และ Linear มีค่า %MAPE เท่ากับ 10.360 โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 27 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ MPPT วิธี ANN 1 ชั้นซ่อน

รูปแบบ	ฟังก์ชัน	%MAPE	ค่ากำลังไฟสูงสุด (W)
1	Linear	31.114	1,592.430
2	Sigmoid	31.189	1,590.697
3	Tanh	31.696	1,578.988
4	ReLU	31.227	1,589.830
5	RBF	31.189	1,590.697

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ MPPT วิธี ANN 2 ชั้นซ่อน

รูปแบบ	ฟังก์ชัน		%MAPE	ค่ากำลังไฟสูงสุด (W)
	ชั้นซ่อน1	ชั้นซ่อน2		
1	Linear	Linear	8.248	2,121.029
2	Linear	Sigmoid	8.443	2,116.515
3	Linear	Tanh	8.318	2,119.409
4	Linear	ReLU	8.336	2,119.000
5	Linear	RBF	10.360	2,072.200
6	Sigmoid	Linear	10.360	2,072.200
7	Sigmoid	Sigmoid	10.495	2,069.086
8	Sigmoid	Tanh	10.383	2,071.682
9	Sigmoid	ReLU	10.293	2,073.750
10	Sigmoid	RBF	10.559	2,067.591
11	Tanh	Linear	10.360	2,072.200
12	Tanh	Sigmoid	10.338	2,072.719
13	Tanh	Tanh	10.338	2,072.718
14	Tanh	ReLU	10.383	2,071.682
15	Tanh	RBF	10.315	2,073.236
16	ReLU	Linear	10.360	2,072.200
17	ReLU	Sigmoid	10.338	2,072.719
18	ReLU	Tanh	10.338	2,072.719
19	ReLU	ReLU	10.315	2,073.236
20	ReLU	RBF	10.293	2,073.750
21	RBF	Linear	10.342	2,072.622
22	RBF	Sigmoid	10.582	2,067.069
23	RBF	Tanh	10.360	2,072.200
24	RBF	ReLU	10.360	2,072.200
25	RBF	RBF	10.383	2,071.682

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริงของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1 ชั้นซ่อน เมื่อใช้ฟังก์ชัน Linear เป็นฟังก์ชันสำหรับการแปลงได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,592.430 W แต่เมื่อพิจารณาค่า %MAPE เท่ากับ 31.114 อยู่ในเกณฑ์การพยากรณ์พอใช้

การทดสอบบนฮาร์ดแวร์เสมือนจริงของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นซ่อน แต่ละชั้นซ่อนปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการแปลง 5 รูปแบบ ดังนั้นจะเกิดฟังก์ชันจับคู่กัน 25 รูปแบบ ผลการทดสอบตารางที่ 3 ค่าที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,121.029 W และ %MAPE มีค่า 8.248 อยู่ในเกณฑ์การพยากรณ์ค่อนข้างแม่นยำ โดยฟังก์ชันการแปลงทั้ง 2 ชั้นซ่อน คือ Linear

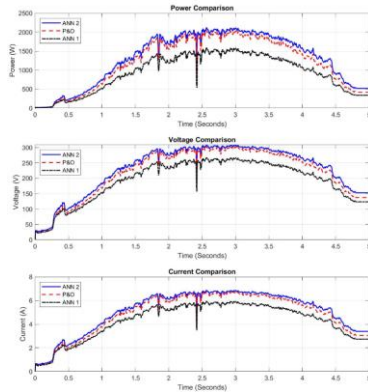
จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมในระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เป็นแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า ใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ มี 2 ชั้นซ่อน โดยทั้ง 2 ชั้นซ่อนใช้ฟังก์ชันการแปลง Linear

ทดสอบเปรียบเทียบระบบติดตามกำลังสูงสุดวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน ฟังก์ชันการแปลง Linear (ANN1) และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน ทั้ง 2 ชั้นซ่อนใช้ฟังก์ชันการแปลง Linear (ANN2) กำหนดสถานะและเงื่อนไขดังนี้

i. ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เลือกใช้ 1 วัน (ชุดข้อมูล 1,200 ข้อมูล) พิจารณาจากความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุดตลอดวัน

ii. กำหนดโหลดคงที่ 45 Ω

ทดสอบการทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 แบบ ได้แก่ P&O, ANN1 และ ANN2 นำผลการทดสอบวาดรูปกราฟของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสของโหลด



รูปที่ 28 ผลการทำงาน MPPT วิธี P&O, ANN1 และ ANN2

ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 28 ซึ่งวิธี ANN2 สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เช่นเดียวกับวิธี P&O แต่กำลังไฟฟ้าที่ได้สูงกว่าเล็กน้อย ส่วน ANN1 ระบบติดตามกำลังไฟฟ้าคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากใช้ชั้นซ่อนไม่เหมาะสม ทำให้ค่า %MAPE สูง

6. สรุปผล

เพื่อลดต้นทุนการสร้างระบบหรือฮาร์ดแวร์ บทความนี้แนะนำการประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์เสมือนจริง รุ่น HIL404 ในระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น DXP72-Z-330 ต่ออนุกรมกัน 7 แผง พิกัดแรงดัน 261 V ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,300 W โดยมีทดสอบการใช้แบบจำลอง 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน โดยเลือกใช้ฟังก์ชัน 5 รูปแบบ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อเกณฑ์การพยากรณ์

โดยได้ฟังก์ชันที่เหมาะสมคือ Linear ทั้งแบบ 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน แต่แบบจำลอง 2 ชั้นซ่อนให้ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละสมบูร์มต่ำกว่าแบบ 1 ชั้นซ่อน ซึ่งมีค่า %MAPE ที่ 8.248 เกณฑ์การพยากรณ์ค่อนข้างแม่นยำ

วิธีการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทในฮาร์ดแวร์เสมือนจริงถูกสร้างจากโปรแกรม Matlab/ Simulink ผ่านฟังก์ชัน fmi ผลของเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน และ 2 ชั้นซ่อน กับวิธีการรบกวนและสังเกต ผลทดสอบที่ได้ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดถูกต้องเช่นเดียวกับวิธีการรบกวนและสังเกต แต่เกิดค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดสูงกว่าแบบวิธีการรบกวนและสังเกตเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะที่ได้สูงกว่าเล็กน้อย

ข้อเด่นของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถูกต้อง มีความน่าเชื่อถือซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบ ข้อด้วยชุดข้อมูลที่ใช้สอนต้องมีจำนวนมากเพียงพอ โดยพิจารณาจากผลของค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละสมบูร์ม และการกำหนดฟังก์ชันการแปลงและชั้นซ่อนต้องเหมาะสม ในการทดสอบถ้าใช้โครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน ฟังก์ชันการแปลง Linear ค่าของ %MAPE สูงถึง 31.114 ส่งผลให้เกณฑ์พยากรณ์อยู่ในระดับพอใช้ นอกจากผลการทดสอบที่นำเสนอผู้วิจัยได้ทดสอบเพิ่มชั้นซ่อนสูงกว่า 2 ชั้นซ่อน ผลที่ได้ค่าของ %MAPE สูงกว่าแบบจำลอง 2 ชั้นซ่อนเช่นเดียวกัน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือสำหรับใช้ทดลองจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Goni O, Sanchez A, Todorovich E, Castro AD. Resolution analysis of switching converter models for hardware-in-the-loop. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014;10(2):1162-70.
- [2] Park S, Moura S, Lee K. Integration of hardware and software for battery Hardware-in-the-Loop toward battery

- artificial Intelligence. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024;10(1): 888-900.
- [3] Debnath S, Xia Q, Dong Z, Marthi PRV, Marti S, Kondabathini A. Control system of multi-port autonomous reconfigurable solar power plant (MARS) & HIL platforms for design. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2024;15(3):1423-34.
- [4] Rodriguez-Contreras SF, Salgado-Herrera NM, Robles M, Rodriguez-Rodriguez JR, Gonzalez-Cabrera N, Santoyo-Anaya MA. Photovoltaic energy conversion system integrated into unbalanced distribution electrical networks through hardware in the loop. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2022;10(15):5614-25.
- [5] Mishra S, Ziar H, Isabella O, Zeman M. Selection map for PV module installation based on shading tolerability and temperature coefficient. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2019;9(3):872-80.
- [6] Burduhos BG, Visa I, Duta A, Neagoe M. Analysis of the conversion efficiency of five types of photovoltaic modules during high relative humidity time periods. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2018;8(6):1716-24.
- [7] Khoo YS, Nobre A, Malhotra R, Yang D, Ruther R, Reindl T, et al. Optimal orientation and tilt angle for maximizing in-plane solar irradiation for PV applications in Singapore. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014;4(2):647-53.
- [8] Dallago E, Liberale A, Miotti D, Venchi G. Direct MPPT algorithm for PV sources with only voltage measurements. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015;30(12):6742-50.
- [9] Salman S, Ai X, Wu Z. Design of a P&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2018;3(3):1-8.
- [10] Sera D, Mathe L, Kerekes T, Spataru SV, Teodorescu R. On the perturb and observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2013;3(3):1070-8.
- [11] Ali M, Tariq M, Lodi KA, Chakraborty RK, Ryan MJ, Alamri B, et al. Robust ANN-based control of modified PUC-5 inverter for solar PV applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021;57(4):3863-76.
- [12] Yap KY, Sarimuthu CR, Lim JMY. Artificial intelligence based MPPT techniques for solar power system: a review. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020;8(6):1043-59.
- [13] Kiran SR, Basha CHH, Singh VP, Dhanamjayulu C, Prusty BR, Khan B. Reduced simulative performance analysis of Variable step size ANN based MPPT techniques for partially shaded solar PV systems. *IEEE Access*. 2022;10:48875-89.
- [14] Yilmaz M, Celikel R, Gundogdu A. Enhanced photovoltaic systems performance: anti-windup PI controller in ANN-based ARV MPPT method. *IEEE Access*. 2023;11:90498-09.
- [15] Kayisli K, Caglayan RZ, Colak I. PV-MPPT Lab: A GUI-based education tool for MPPT techniques. *IEEE Transactions on Education*. 2024;67(3):453-61.
- [16] Runze L, Zhu Y, Yang Y. Robust design of perturb & observe maximum power point tracking for photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024; 60(4):6547-58.
- [17] Alhusseini H, Niroomand M, Dehkordi BM. A fuzzy-based adaptive P&O MPPT algorithm for PV systems with fast tracking and Low oscillations under rapidly irradiance change conditions. *IEEE Access*, 2024;12:84374-86.
- [18] Ye SP, Liu YH, Pai HY, Sangwongwanich A, Blaabjerg F. A novel ANN-based GMPPT method for PV systems under complex partial shading conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024;15(1):328-38.
- [19] Bana PR, Arco SD, Amin M. ANN-based robust current controller for single-stage grid-connected PV with embedded Improved MPPT scheme. *IEEE Access*. 2024;12:100251-62.

การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดผสมเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง สาकुเสริมแรงด้วยเส้นใยใบสับปะรด

ศรียุดา จันศิริ¹ จงจิตร์ หิรัญลาภ¹ สุเมธ สติตบุญอนันต์^{1*} ชัยพร สุภาหิตานุกุล¹ และโจเซฟ เคดารี²
srisuda.j@ptu.ac.th¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, sumezt_k@yahoo.com¹
chaiporn.sup@gmail.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

Received: October 30, 2024 Revised: December 10, 2024 Accepted: December 20, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการผลิตและวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล ทางความร้อน และต้นทุนวัสดุของคอมโพสิต PLA/TPS และ PLA/TPSW โดยเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) ผลิตจากแป้งสาकुและใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอรอล ขณะที่ (TPSW) ใช้น้ำร่วมกับกลีเซอรอล ปริมาณ TPS และ TPSW ถูกกำหนดไว้ที่ 0%, 5%, 10%, 15%, และ 20% โดยน้ำหนัก ผสมกับ PLA และ PALF ที่ 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, และ 10% โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า PLA/TPS มีดัชนีการหลอมไหลและความหนาแน่นสูงกว่า แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการไหล เพื่อการขึ้นรูปที่ดีกว่าและความหนาแน่นที่เหมาะสม นอกจากนี้ PLA/TPS ยังมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างที่เชื่อมขวาง (Cross-link) ด้วยกรดซิตริกของ TPSW ขณะที่การรีโทเกรเดชันทำให้การดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากความแข็งและความเปราะที่เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของ PLA/TPS ดีกว่า โดยการเพิ่มปริมาณ PALF ส่งผลให้ความต้านทานต่อการดึงและแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการกระจายแรงที่ดีขึ้น ในขณะที่ PLA/TPSW แสดงการปรับปรุงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการกระจายของเส้นใยไม่สม่ำเสมอและการตกผลึกซ้ำซ้อน แม้ว่า PALF ที่เพิ่มขึ้นจะลดความแข็งแรงดึงในทั้งสองคอมโพสิต แต่การลดลงใน PLA/TPSW ชัดเจนกว่า การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (SEM) ชี้ให้เห็นถึงปัญหาในการยึดเกาะและการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่ดี ส่งผลให้เกิดปัญหา Fiber pull-out ในสมบัติทางความร้อน การเติม PALF 10% ใน PLA/TPSW ช่วยเพิ่มอุณหภูมิการตกผลึก (Tc) และเปอร์เซ็นต์การตกผลึก (% Crystallization) ในขณะที่ PLA/TPS มีผลน้อยกว่า โดยรวม PLA/TPS แสดงสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีกว่า โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีการเติม PALF 10 %wt เมื่อ PLA/TPS:PALF (10%) ถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ จะมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ทำให้เหมาะสำหรับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ โดยมีอุณหภูมิการใช้งานสูงสุดไม่เกิน 50 °C

คำสำคัญ: เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เส้นใยใบสับปะรด กรดโพลิแลคติก การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ สมบัติทางกายภาพทางกลและทางความร้อน

Development of bio-composite material from polylactic acid blended with thermoplastic from sago starch and reinforced with pineapple leaf fiber

Srisuda Junsiri¹, Jongjit Hirunlabh¹, Sumate Sathibunanan^{1*}, Chaiporn Supahitanukul¹,
and Joseph Khedari²

srisuda.j@ptu.ac.th¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, sumezt_k@yahoo.com¹
chaiporn.sup@gmail.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

²Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi University

Received: October 30, 2024 Revised: December 10, 2024 Accepted: December 20, 2024

Abstract

This study analyzes the effects of pineapple leaf fiber (PALF) content on the physical, mechanical, and thermal properties of PLA/TPS and PLA/TPSW composites and material cost. Thermoplastic starch (TPS) is derived from sago starch with glycerol as a plasticizer, while TPSW incorporates water with glycerol. The proportions of TPS and TPSW were set at 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by weight, combined with PLA and PALF at 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% by weight. Results show that PLA/TPS exhibits higher melt flow index and density, indicating better flowability and suitable density. Additionally, PLA/TPS has slightly higher water absorption due to the cross-linked structure of TPSW, while retrogradation reduces water absorption due to increased rigidity and brittleness. The mechanical properties of PLA/TPS are higher with increased PALF content. This significantly enhances resistance to bending and impact due to improved stress distribution, while PLA/TPSW shows minor improvements because of uneven fiber distribution and recrystallization. Increased PALF content reduces tensile strength in both composites. This reduction is more pronounced in PLA/TPSW, as SEM analysis indicates poor adhesion and fiber distribution leading to fiber pull-out. In thermal properties, adding 10% PALF to PLA/TPSW enhances crystallization temperature (T_c) and crystallinity percentage, with lesser effects observed in PLA/TPS. Finally, PLA/TPS demonstrates better physical and mechanical properties, especially with 10% PALF and exhibits the lowest material costs, PLA/TPS composite at PALF (10%) can be molded via injection machine into cups, making it suitable for commercial development with a maximum service temperature not exceeding 50 degrees Celsius.

Keywords: Thermoplastic starch, Pineapple leaf fiber, Polylactic acid, Reinforced biocomposites, Physical mechanical and thermal properties.

1. บทนำ

การใช้พลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ในการผลิตบรรจุภัณฑ์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความต้องการจากอุตสาหกรรมและผู้บริโภค [1] ส่งผลให้เกิดปริมาณขยะพลาสติกมหาศาลที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง ขยะพลาสติกเหล่านี้ใช้เวลาย่อยสลายกว่า 450 ปี ทำให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก การพัฒนาพลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติได้รับการส่งเสริมเพื่อบรรเทาปัญหานี้ แม้ว่าต้นทุนการผลิตจะยังสูงอยู่ก็ตาม [2]

พอลิแลกติกแอซิด (PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น แป้งหรือกรดแลคติก มีสมบัติการย่อยสลายตามธรรมชาติ [3] กระบวนการผลิตเริ่มจากการสกัดแป้งจากวัสดุต่าง ๆ เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด หรืออ้อย เพื่อผลิตกรดแลคติก โดยหมักด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน จากนั้นกรดแลคติกจะถูกพอลิเมอไรเซชันแบบพอลิคอนเดนเซชันเพื่อสร้าง PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [4] เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ (TPS) เป็นวัสดุที่ได้จากแป้งซึ่งหลอมขึ้นรูปได้เมื่อถูกความร้อน จึงเป็นวัสดุชีวภาพทางเลือกที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5] แป้งดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีพันธะไฮโดรเจนและความเป็นผลึกสูง ทำให้หลอมขึ้นรูปยากเพื่อแก้ไขปัญหานี้ TPS ผลิตจากแป้งธรรมชาติที่ผ่านการแปรสภาพด้วยพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ซึ่งช่วยลดความเป็นผลึกและทำให้หลอมได้ง่ายขึ้น [6] เส้นใยสับปะรด (Pineapple Fiber) เป็นวัสดุธรรมชาติที่สกัดจากใบของต้นสับปะรด ซึ่งมีสมบัติทางกลที่โดดเด่น โดยมีค่าความแข็งแรง (Tensile Strength) อยู่ในช่วง 200-600 MPa ความยืดหยุ่น (Elasticity) ระหว่าง 3.5-5.5 GPa และมีความหนาแน่น (Density) ประมาณ 1.3-1.5 g/cm³ [7] วัสดุคอมโพสิตชีวภาพ (Bicomposite Materials) คือวัสดุที่ประกอบจากวัสดุชีวภาพ โดยมีวัสดุฐานเป็น

พลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต หรือเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และวัสดุเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยสับปะรด [8] เส้นใยปอ หรือเส้นใยผักตบชวา ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน การรวมกันนี้ทำให้วัสดุคอมโพสิตชีวภาพมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และช่วยลดการใช้วัสดุจากปิโตรเคมีและปัญหาขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9]

งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยสับปะรดต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ รวมถึงต้นทุนทางวัสดุ โดยมีเป้าหมายในการลดต้นทุนของ PLA ผ่านการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาเรซและเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาเรซนี้ผลิตจากการพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) ของแป้งโดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) และน้ำ พร้อมการตัดแปลงโครงสร้างแป้งแบบเชื่อมขวาง (Cross-link) ด้วยกรดซิตริก

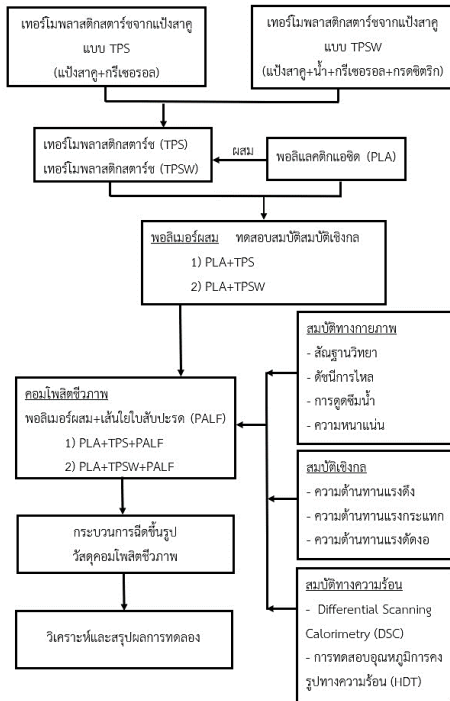
2. ระเบียบวิธีวิจัย

ศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA/TPS และ PLA/TPSW โดยเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ ซึ่งผลิตจากแป้งสาคูและใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในขณะที่ TPSW จะใช้น้ำร่วมกับกลีเซอรอล เพื่อทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ปริมาณ TPS และ TPSW ถูกกำหนดไว้ที่ 0%, 5%, 10%, 15%, และ 20% โดยน้ำหนัก โดยจะถูกผสมกับ PLA และเส้นใยสับปะรด (PALF) ที่มีปริมาณ 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, และ 10% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการตัดแปลงโครงสร้างแป้งแบบเชื่อมขวาง (Cross-link) ด้วยกรดซิตริกของ TPSW เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใย PALF ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกลทางความร้อน และศึกษาต้นทุนวัสดุของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัย



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1.2 วัสดุและสารเคมี

การศึกษาใช้แป้งสาคุจากวิสาหกิจชุมชน สาคุบ้านกะโสม จังหวัดนครศรีธรรมราช PLA รุ่น 3251D จาก Nature Work LLC (USA) และเส้นใยโปลิอะเรต (PALF) จากวิสาหกิจชุมชนบ้านคาคา จังหวัดราชบุรี สารเคมีที่ใช้ได้แก่กลีเซอรอลจาก Fisher Scientific UK Ltd. (> 99% AR grade) น้ำกลั่นจาก RCI Labscan Ltd. โซเดียมไฮดรอกไซด์จาก LOBA Chemie PVT Ltd. (98% AR grade) กรดไฮโดรคลอริกจาก LOBA Chemie PVT Ltd. (35.4% AR grade) และกรดซิติริกจาก Quality Reagent Chemical นิวซีแลนด์ (99.5% AR grade)

2.1.3 ขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช แบบ (TPS)

การเตรียม TPS จากแป้งสาคุใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยเริ่มอบแป้งที่ 60 °C เวลา 24 hr ผสมแป้ง 70 g กับกลีเซอรอล 30 g ที่ 250 r/min นาน 5 min แล้วเก็บในโถดูดความชื้น

24 hr หลังจากนั้นบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งที่ 120 °C เป็นเวลา 2 min ก่อนขึ้นรูปด้วยการขึ้นรูปแบบอัดที่อุณหภูมิ 120 °C แรงดัน 60 ton นาน 1 min ระบายความร้อน 30 s และบดให้มีขนาด 1-3 mm แล้วเก็บในถุง PE

2.1.4 ขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช แบบ (TPW)

การเตรียม TPSW ใช้วิธี Cross Link โดยผสมแป้งสาคุ 10 g กับน้ำ 100 g ในชามสแตนเลส ตั้งในอ่างน้ำร้อนที่ 90 °C เวลา 15 min เติมกรดซิติริก 10% โดยน้ำหนักแป้ง ที่ 90 °C เป็นเวลา 20 min ปรับ pH เป็นต่างด้วย 1 M (NaOH) จนค่า pH เท่ากับ 11 เติมกลีเซอรอล 30% ที่ 90 °C เวลา 10 min ปรับ pH เป็นกลางด้วย 1 M (HCl) เเทลงในแม่พิมพ์ อบที่ 80 °C เวลา 24 hr บดลดขนาด 1-3 mm และเก็บในถุง PE

2.1.5 ขั้นตอนการผลิตพอลิเมอร์ผสมของ PLA/TPS และ PLA/TPSW

การผลิตพอลิเมอร์ผสม PLA กับ TPS และ TPSW ใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 เริ่มจากอบ PLA TPS และ TPSW ที่ 70 °C เป็นเวลา 4 hr จากนั้นผสมที่อุณหภูมิ 160-180 °C ด้วยความเร็ว r/min เป็นเวลา 2.5 min โดยมี TPS และ TPSW ในอัตราส่วน 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก แล้วฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ

2.1.6 ขั้นตอนการผลิตวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ

การผลิตวัสดุคอมโพสิตชีวภาพเริ่มด้วยการอบ PLA, TPS, TPSW ที่ 70 °C และ PALF ที่ 80 °C เป็นเวลา 4 hr จากนั้นผสมแห้ง PLA/TPS และ PLA/TPSW กับ PALF ในสัดส่วน 0-10 %wt ด้วยเครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบเหวี่ยงที่ 60 r/min นาน 5 min แล้วนำไปผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่ 160-180 °C เป็นเวลา 2.5 min คอมปาวด์ที่ได้ถูกรีดและตัดเป็นชิ้นเล็ก 1-2 mm ก่อนนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ที่ 160-180 °C ความเร็วฉีด 50 cm³/min แรงดัน 700 bar ส่วนผสมแสดงในตารางที่ 1

2.2 ขั้นตอนวิเคราะห์ทดสอบ

2.2.1 การทดสอบสัณฐานวิทยา

การทดสอบสัณฐานวิทยาตามมาตรฐาน ISO 16700:2016 เริ่มด้วยการตัดตัวอย่างขนาด $120 \times 10 \times 4$ mm แช่ไนโตรเจนเหลว ติดบนแผ่นคาร์บอน และเคลือบทองคำในสุญญากาศ 20-30 min จากนั้นวิเคราะห์ด้วย SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410 LV ที่การขยาย 350 และ 1,000 เท่าที่แรงดันไฟฟ้า 10 kV

2.2.2 การทดสอบดัชนีการไหล

การทดสอบดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 เริ่มจากบดชิ้นงานเป็นผงและชั่งน้ำหนัก 8 g ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบ ใส่ die, piston และตัวอย่าง ควบคุมเวลาใส่ 1 min รอ preheat 4-6 min ใส่ตุ้มน้ำหนักบน piston ให้พลาสติกไหลจาก die เป็นเวลา 10 s พักชิ้นงาน 30 min แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณ MFI

2.2.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM D570 ประเมินความสามารถในการดูดซึมน้ำของพลาสติก โดยเริ่มจากการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 hr แล้วชั่งน้ำหนักก่อนการดูดซึมน้ำ จากนั้นแช่ชิ้นทดสอบในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 hr หลังจากนั้นนำชิ้นจากน้ำและเช็ดให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักหลังการดูดซึมน้ำ

2.2.4 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D792 เริ่มจากการผลิตชิ้นงานสี่เหลี่ยมหนา 4 mm น้ำหนัก 12-13 g ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานในอากาศ และจุ่มในน้ำกลั่น บันทึกน้ำหนักขณะอยู่ในน้ำ และคำนวณความถ่วงจำเพาะเพื่อหาค่าความหนาแน่น

2.2.5 การทดสอบความทนแรงดึง

การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 527 ใช้เครื่อง Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ผลิตชิ้นงานดัมเบลล์ขนาด $10 \times 170 \times 4$ mm ตั้งค่าทดสอบที่ความยาวอ้างอิง 50 mm และความเร็ว 5

mm/min ใช้เครื่อง UTM รุ่น Hounsfield H50KS บันทึกความเค้น-ความเครียด และพล็อตกราฟเพื่อคำนวณ Young's modulus และ % Elongation at break

2.2.6 การทดสอบความทนแรง

กระแทก

การทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ISO 180 ใช้เครื่อง Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ผลิตชิ้นงานขนาด $10 \times 80 \times 4$ mm จากนั้นบากตัววี 45° และพักที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมงก่อนทดสอบด้วยเครื่อง Izod Impact Tester รุ่น CEST 6542 โดยปล่อยตุ้มน้ำหนักตกกระทบและบันทึกค่าพลังงานเพื่อคำนวณความทนแรงกระแทก

2.2.7 การทดสอบความทนแรง

ดัดงอ

การทดสอบความทนแรงดัดตามมาตรฐาน ISO 179 Type 1 ใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ผลิตชิ้นงานขนาด $12.7 \times 63.5 \times 3.17$ mm จากนั้นใช้เครื่อง UTM รุ่น Hounsfield H50KS โดยกดแรงที่จุดกึ่งกลาง และจุดรองรับห่างจากกึ่งกลาง 16 เท่าของความหนา ทดสอบจนแตกหักหรือเปลี่ยนรูป บันทึกข้อมูล

2.2.8 การทดสอบ DSC

การทดสอบสมบัติทางความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D3418 ใช้ประเมินจุดหลอมเหลว (T_m) และสมบัติการตกผลึกของ PLA และคอมโพสิตชีวภาพโดยใช้ถาดอะลูมิเนียมสำหรับ ตัวอย่างและอ้างอิง ให้ความร้อนที่อัตรา 20 °C/min เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงความร้อนและระบุ T_m , T_g และสมบัติการตกผลึก

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอมโพสิตชีวภาพ PLA/TPS: PALF และ PLA/TPSW: PALF

สูตร	อัตราส่วนผสม (%wt)	รหัสตัวอย่าง	พอลิแลคติกแอซิด (%wt)	เทอร์โมพลาสติกสตาติค (%wt)				เส้นใยไบสับปะรด (PALF) (%wt)
				แป้งสาเก	กลีเซอรอล	น้ำ	กรดซิตริก	
PLA	100	A	100.00	-	-	-	-	-
TPS	100	B	-	70.00	30.00	-	-	-
TPSW	100	C	-	8.77	2.63	87.72	0.88	-
PLA/TPS: PALF	100 : 0	D2-0	90.00	7.69	2.31	-	-	0
	98 : 2	D2-2	88.20	7.54	2.26	-	-	2
	96 : 4	D2-4	86.40	7.38	2.22	-	-	4
	94 : 6	D2-6	84.60	7.23	2.17	-	-	6
	92 : 8	D2-8	82.80	7.08	2.12	-	-	8
	90 : 10	D2-10	81.00	6.92	2.08	-	-	10
PLA/TPSW: PALF	100 : 0	E2-0	90.00	0.88	0.26	8.77	0.09	0
	98 : 2	E2-2	88.20	0.86	0.26	8.60	0.09	2
	96 : 4	E2-4	86.40	0.84	0.25	8.42	0.08	4
	94 : 6	E2-6	84.60	0.82	0.25	8.25	0.08	6
	92 : 8	E2-8	82.80	0.81	0.24	8.07	0.08	8
	90 : 10	E2-10	81.00	0.79	0.24	7.89	0.08	10

2.2.9 การทดสอบ HDT

การทดสอบ HDT ตาม ASTM D648-01 ใช้ชิ้นงานขนาด 127 × 13 × 3 mm และเครื่อง HDT แบบดัดงอ 3 จุดควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำมันซิลิโคน โดยตั้งอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 2 °C/min และใช้ความดัน 0.455 MPa หรือ 1.82 MPa ขึ้นอยู่กับประเภทการทดสอบ จากนั้นบันทึกอุณหภูมิเมื่อชิ้นงานโก่งตัว 0.25 mm เพื่อประเมินสมบัติทางความร้อนของวัสดุ

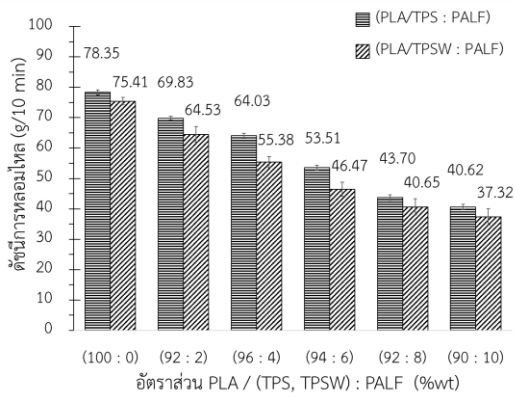
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพบว่า ความต้านทานแรงดึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดย PLA บริสุทธิ์ (รหัส A) มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 52.35 MPa ขณะที่ TPS (รหัส B) และ TPSW (รหัส C) อยู่ที่ 28.14 MPa และ 24.32 MPa ตามลำดับ ในอัตราส่วน PLA/TPS 80:20 (รหัส D4) และ PLA/TPSW 80:20 (รหัส E4) ความต้านทานแรงดึงลดลงเหลือ 30.59 MPa และ 34.39 MPa เนื่องจาก

การไม่เข้ากันระหว่างเฟส ส่วนอัตราส่วน 90:10 ของ PLA/TPS (รหัส D2) มีความต้านทาน 45.56 MPa และ PLA/TPSW (รหัส E2) มีความต้านทาน 39.98 MPa สูงกว่าค่าเฉลี่ยของ TPSW บริสุทธิ์ ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วน 90:10 เพื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยไบสับปะรด 0-10% PALF

3.1 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหล

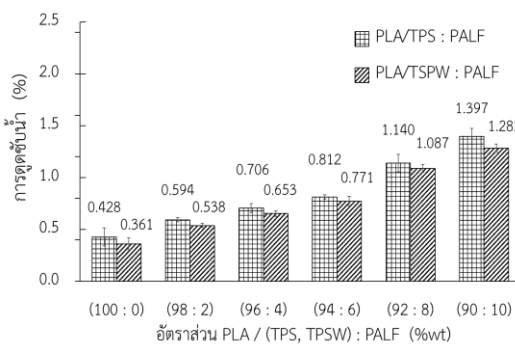
การเติมเส้นใยไบสับปะรด (PALF) ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ของ PLA/TPS และ PLA/TPSW ลดลง เนื่องจากเส้นใยเพิ่มความหนืดโดยไปขัดขวางการไหลและทำให้การเคลื่อนที่ของโซ่พอลิเมอร์ยากขึ้น ค่า MFI ของ PLA/TPS ลดจาก 78.35 g/10 min (D2-0) เป็น 40.62 g/10 min (D2-10) และ PLA/TPSW ลดจาก 75.41 g/10 min (E2-0) เป็น 37.32 g/10 min (E2-10) การลดลงมากขึ้นใน PLA/TPSW เกิดจากโครงสร้างที่แข็งและหนาแน่นของ TPSW ขัดขวางการกระจายตัวของเส้นใย PALF นอกจากนี้ การลดค่า MFI ช่วยเพิ่มเวลาการตกผลึก



รูปที่ 2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหลของคอมโพสิต

3.2 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำ

การเพิ่มปริมาณเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (PALF) ทำให้ PLA/TPS และ PLA/TPSW ดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น โดย PLA/TPS ดูดซับน้ำมากกว่า PLA/TPSW ในทุกตัวอย่าง ตัวอย่าง D2-0 เริ่มที่ 0.428% และเพิ่มเป็น 1.397% ใน D2-10 ส่วน E2-0 เริ่มที่ 0.361% และเพิ่มเป็น 1.283% ใน E2-10 การดูดซับน้ำเกิดจากโครงสร้างรูพรุนและหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเส้นใย PLA/TPSW ดูดซับน้ำน้อยลงจากกระบวนการรีโทรเกรดชันของแป้ง ซึ่งทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งแข็งและหนาแน่นขึ้น อัตราการดูดซับน้ำของ PLA/TPS ที่มี PALF 10 %wt ยังคงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ไม่เกิน 2.0 %



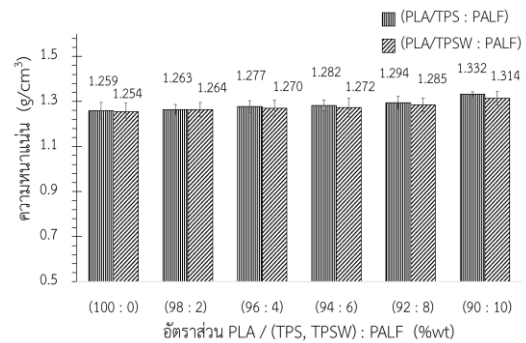
รูปที่ 3 การทดสอบการดูดซับน้ำของคอมโพสิต

3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น

PLA/TPS และ PLA/TPSW ที่ไม่มีการเติมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (PALF) มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันที่ 1.256 g/cm³ และ 1.254 g/cm³ ตามลำดับ

โดย PLA/TPS มีความหนาแน่นสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากไม่มีการเกิดรีโทรเกรดชัน ใน TPS ซึ่งช่วยให้โครงสร้างวัสดุมีความสม่ำเสมอ ขณะที่ PLA/TPSW ที่ผ่านกระบวนการรีโทรเกรดชัน ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลแป้งใหม่ ส่งผลให้โครงสร้างแข็งและเปราะมากขึ้น จึงมีความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย

การเติมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (PALF) ที่มีความหนาแน่นประมาณ 1.5 g/cm³ ใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ใน PLA/TPS ความหนาแน่นเพิ่มจาก 1.259 g/cm³ (D2-0) เป็น 1.332 g/cm³ (D2-10) และใน PLA/TPSW จาก 1.254 g/cm³ (E2-0) เป็น 1.314 g/cm³ (E2-10) การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจาก PALF ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น โดย PLA/TPS ที่ผสม PALF 10 %wt มีความหนาแน่นสูงสุดตามที่แสดงในรูปที่ 4



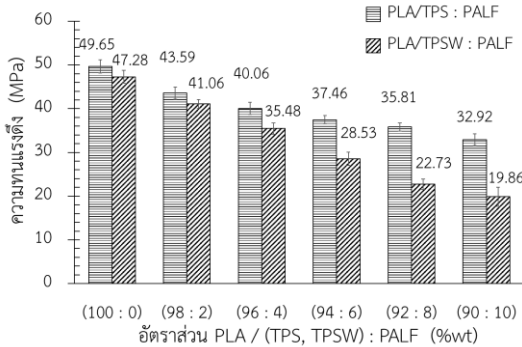
รูปที่ 4 การทดสอบความหนาแน่นของคอมโพสิต

3.4 ผลการทดสอบความทนแรงดึง

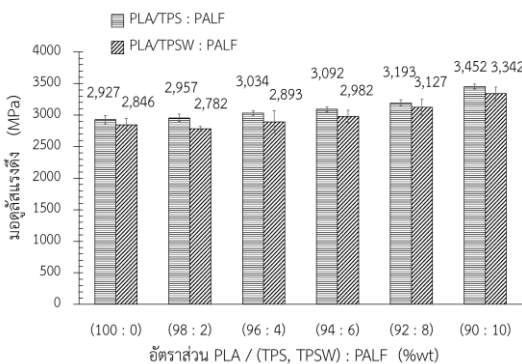
PLA/TPS มีความทนต่อแรงดึงสูงกว่า PLA/TPSW ที่ 49.65 MPa และ 47.28 MPa ตามลำดับ เนื่องจากกลีเซอรอลใน TPS ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและการยึดเกาะกับ PLA ส่วน TPSW เกิดรีโทรเกรดชันทำให้วัสดุแข็งและเปราะ [10] การเพิ่ม PALF 10 %wt. ใน PLA/TPS ลดค่าความทนแรงดึงจาก 49.65 MPa เป็น 32.92 MPa เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยไม่ดี ผลการวิเคราะห์ SEM ยืนยันการกระจายตัวและการหลุดของเส้นใยเป็นสาเหตุหลัก [11] สำหรับ PLA/TPSW (E2-10) ที่มีการ

เติม PALF 10 %wt ค่าโมดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 3,342 MPa แสดงให้เห็นว่าเส้นใยช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตาม PLA/TPSW ยังคงมีค่าโมดูลัสต่ำกว่า PLA/TPS ที่ผสม PALF เนื่องจากการเกิดริโพรเกรเดชันในแป้งและการตกผลึกซ้ำใน TPSW ทำให้วัสดุแข็งและเปราะมากขึ้น แสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

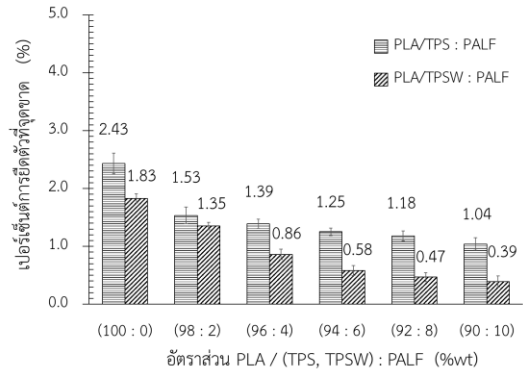
การวิเคราะห์การยึดตัวที่จุดขาดพบว่า PLA/TPS (D2-0) มีค่าการยึดตัว 2.43% สูงกว่า PLA/TPSW (E2-0) ที่ 1.83% ความยืดหยุ่นดึกกว่าของ PLA/TPS เกิดจากการเจลาติไนซ์ การเพิ่ม PALF 10% โดยน้ำหนักใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ทำให้ค่าการยึดตัวลดลงเหลือ 1.04% และ 0.39% ตามลำดับในรูปที่ 7 เนื่องจาสมบัติการยึดตัวต่ำของ PALF และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ การวิเคราะห์ SEM ยืนยันถึงปัญหาการกระจายตัวและการหลุดของเส้นใย ซึ่งลดประสิทธิภาพการเชื่อมต่อทางกลของวัสดุ ในรูปที่ 8



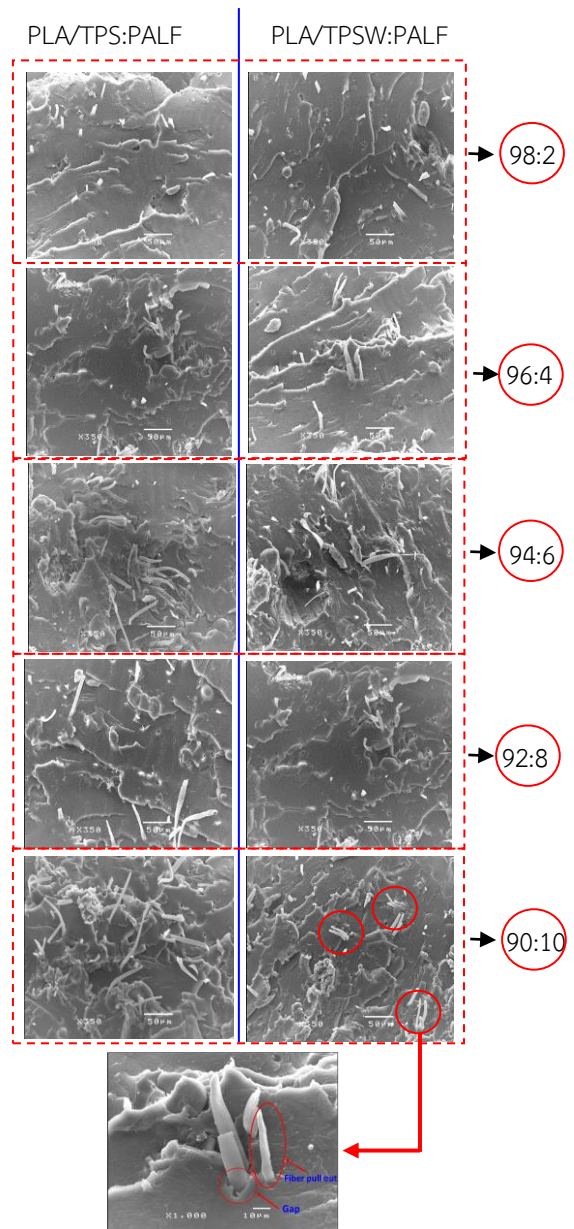
รูปที่ 5 ค่าความทนแรงดึงของคอมโพสิตชีวภาพ



รูปที่ 6 โมดูลัสแรงดึงของคอมโพสิตชีวภาพ



รูปที่ 7 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดของคอมโพสิตชีวภาพ

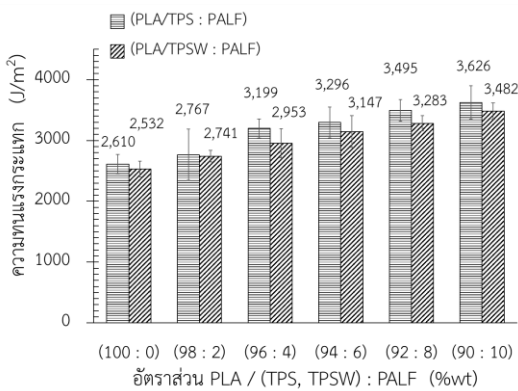


รูปที่ 8 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (SEM)

3.5 ผลการทดสอบความทนแรงกระแทก

PLA/TPS (D2-0) มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA/TPSW (E2-0) โดยมีค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) 2,610 J/m² และ 2,532 J/m² ตามลำดับ เนื่องจาก TPSW มีการใช้ทั้งน้ำและกลีเซอรอลทำให้เกิดการตกผลึกช้าและวัสดุมีความแข็งและเปราะมากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของ TPSW ใน PLA ไม่ดีเท่า TPS ที่ใช้กลีเซอรอลอย่างเดียว

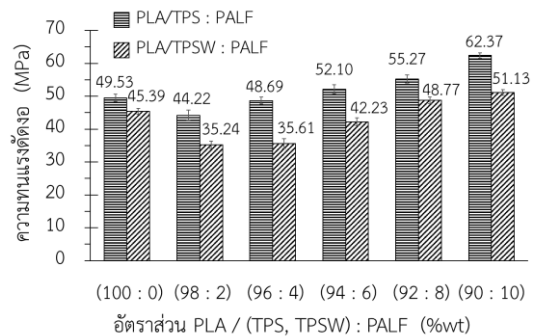
การเพิ่มปริมาณเส้นใยไบสับปะรด (PALF) 10 %wt ใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ส่งผลให้ค่า Impact Strength ของทั้งสองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดย PLA/TPS ที่มี PALF (D2-10) เพิ่มขึ้นเป็น 3,626 J/m² ขณะที่ PLA/TPSW ที่มี PALF (E2-10) เพิ่มขึ้นเป็น 3,482 J/m² การเพิ่ม PALF ช่วยให้วัสดุทนทานต่อแรงกระแทกดีขึ้น เนื่องจากเส้นใยดูดซับและกระจายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงป้องกันการแพร่กระจายของรอยแตกในคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่า Impact Strength ใน PLA/TPSW ยังคงต่ำกว่า PLA/TPS เนื่องจากเจลาตินในเซชัน ใน TPSW ทำให้วัสดุแข็งและเปราะมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกระจายแรงและการดูดซับแรงกระแทกลดลง แม้จะมีการเติมเส้นใย เพื่อเพิ่มการเชื่อมต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ PLA/TPS ที่ผสม PALF 10 %wt มีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงสุด [12] แสดงในรูปที่ 9



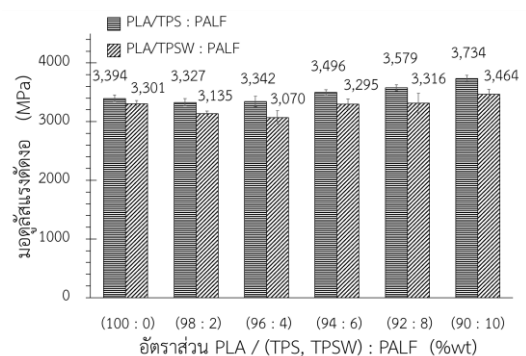
รูปที่ 9 ค่าความทนแรงกระแทกของคอมโพสิตชีวภาพ

3.6 ผลการทดสอบความทนแรงดัดงอ

PLA/TPS (D2-0) มีค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus สูงกว่า PLA/TPSW (E2-0) เนื่องจาก TPS กระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับ PLA ขณะที่ TPSW เกิดริโทเกรเดชันทำให้แปงตกผลึกและวัสดุเปราะมากขึ้น การเพิ่มเส้นใยสับปะรด (PALF) 10 %wt ใน PLA/TPS (D2-10) ทำให้ค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus เพิ่มขึ้นเป็น 62.37 MPa และ 3,734 MPa ตามลำดับ เนื่องจาก PALF ช่วยถ่ายเทแรงและป้องกันการแตกหัก ส่วน PLA/TPSW (E2-10) มีค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus เพิ่มขึ้นเป็น 51.08 MPa และ 3,464 MPa แต่ยังคงต่ำกว่า PLA/TPS เนื่องจากกระบวนการริโทเกรเดชันในแปง ที่ทำให้วัสดุเปราะและการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอ การศึกษา SEM พบว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใย PALF ใน PLA/TPS สอดคล้องกับทิศทางการรับแรงดัดงอ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดัดงอและทำให้ PLA/TPS ทนทานกว่าวัสดุ PLA/TPSW แสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 ค่าความทนแรงดัดงอของคอมโพสิตชีวภาพ



รูปที่ 11 ค่ามอดูลัสแรงดัดงอของคอมโพสิตชีวภาพ

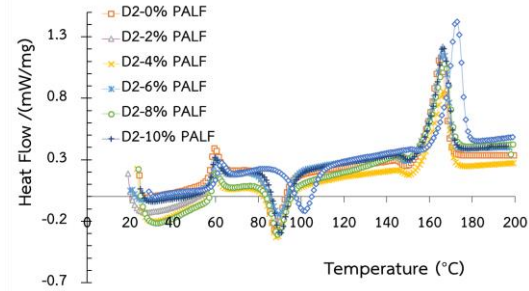
3.7 ผลการทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การศึกษาผลกระทบของ TPS และ TPSW ที่ผสมกับ PLA แสดงให้เห็นความแตกต่างในสมบัติของวัสดุ โดย PLA/TPSW (E2-0) มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) สูงกว่า PLA/TPS (D2-0) ที่ 16.77% และ 18.02% ตามลำดับ แม้อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (T_c และ T_m) ของ PLA/TPS จะสูงกว่า โดยค่า T_c และ T_m ของ PLA/TPS (D2-0) คือ 83.40 °C และ 167.20 °C ขณะที่ PLA/TPSW (E2-0) คือ 82.27 °C และ 165.10 °C การเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้จากน้ำใน TPSW ทำหน้าที่เป็น nucleating agent ช่วยกระตุ้นกระบวนการตกผลึก

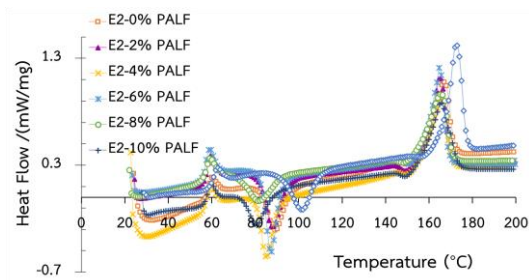
ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงแก้ว (T_g) ใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ค่อนข้างคงที่ โดยใน PLA/TPS ค่า T_g ลดลงจาก 58.20 °C ใน D2-0 เป็น 58.00 °C ใน D2-2 ขณะที่ PLA/TPSW ลดลงจาก 57.70 °C ใน E2-0 เป็น 57.10 °C ใน E2-2 แสดงว่าเส้นใย PALF ไม่มีผลกระทบต่อ T_g แต่ช่วยเพิ่มความเคลื่อนไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์

อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดย PLA/TPS ค่า T_c เพิ่มจาก 85.40 °C ใน D2-0 เป็น 90 °C ใน D2-10 และ PLA/TPSW ค่า T_c เพิ่มจาก 82.27 °C ใน E2-0 เป็น 89.20 °C ใน E2-10 การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจากเส้นใย PALF ที่ทำหน้าที่เป็น nucleating agent ช่วยเร่งกระบวนการตกผลึก

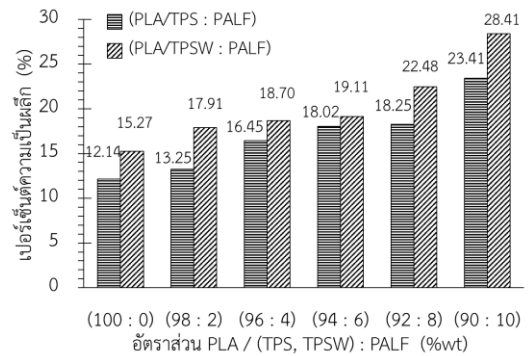
อุณหภูมิลอมเหลว (T_m) ของ PLA/TPS ลดลงเล็กน้อยจาก 167.20°C ใน D2-0 เป็น 166.40°C ใน D2-10 ขณะที่ PLA/TPSW คงที่ที่ประมาณ 165.60°C แสดงให้เห็นว่าเส้นใย PALF ไม่มีผลต่อการลอมเหลวของวัสดุ ค่า % Crystallinity ของ PLA/TPS เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยลดลงก่อนเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ในทางกลับกัน PLA/TPSW แสดงการตกผลึกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบขึ้นของโมเลกุลพอลิเมอร์จากการเติม PALF การวิเคราะห์ DSC แสดงในรูปที่ 12-14



รูปที่ 12 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย DSC แสดงค่า T_g , T_c และ T_m ของระบบ PLA/TPS:PALF



รูปที่ 13 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย DSC แสดงค่า T_g , T_c และ T_m ของระบบ PLA/TPSW:PALF

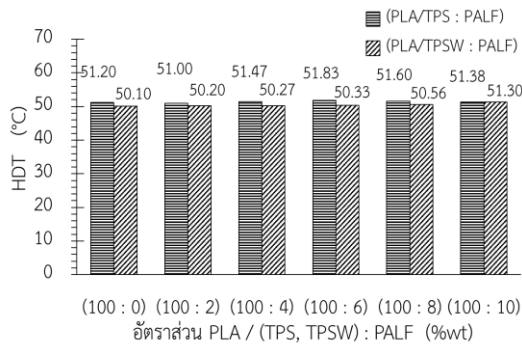


รูปที่ 14 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของคอมโพสิตชีวภาพ

3.8 ผลการทดสอบ Heat Distortion Temperature (HDT)

ผลการทดลองพบว่าค่าความทนความร้อนสูงสุด (HDT) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) บริสุทธิ์อยู่ที่ 53.73 °C การเติมเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ (TPS) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (TPSW) พร้อมกับการเพิ่มเส้นใยไบสัปเกรด (PALF) ทำให้ค่า HDT เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 50.10 °C

ถึง 51.83 °C โดยความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่มีและไม่มีเส้นใยมีนัยสำคัญน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า TPS, TPSW และปริมาณเส้นใย PALF ไม่มีผลกระทบต่อค่า HDT อย่างมีนัยสำคัญ[12] แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การวิเคราะห์ HDT ของคอมโพสิตชีวภาพ

4. การศึกษาต้นทุนการผลิตถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ้วยคอมโพสิตชีวภาพจากราคาจำหน่ายวัตถุดิบ พบว่า PLA มีราคา 175 THB/kg แป้งสาคุ 20 THB/kg กลีเซอรอล 32 THB/kg น้ำกลั่น 18 THB/kg กรดซิตริก 42 THB/kg และเศษเส้นใยใบสับปะรด 17 THB/kg

จากอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 1 สำหรับการผลิต PLA 100% ต้นทุนรวมวัตถุดิบอยู่ที่ 99.0 บาทต่อ 10 ชิ้น ขณะที่ PLA/TPS และ PLA/TPSW อยู่ที่ 84.0 THB และ 85.0 THB ตามลำดับ

การใช้ไฟฟ้าสำหรับ PLA (100 %wt.) คือ 10.25 kWh, PLA/TPS (90:10 %wt.) 11.3 kWh, และ PLA/TPSW (90:10 %wt.) 12 kWh ซึ่งมีต้นทุนไฟฟ้าที่ 43 THB, 47 THB, และ 50 THB ตามลำดับ

ต้นทุนค่าแรงงานสำหรับ PLA (100 %wt.) อยู่ที่ 23 THB, PLA/TPS (90:10 %wt.) 27 THB, และ PLA/TPSW (90:10 %wt.) 47 Baht การวิเคราะห์ต้นทุนรวมการผลิตต่อ 10 ชิ้น พบว่า PLA 100% มีต้นทุนรวมสูงสุดที่ 165 THB, PLA/TPS (90:10) ที่ 158 THB, และ PLA/TPSW (90:10) สูงสุดที่ 182 THB โดย PLA/TPS (90:10) มีต้นทุนต่ำที่สุดต่อชิ้นที่ 15.8 THB ขณะที่ PLA/TPSW (90:10) มีต้นทุนสูงสุดที่ 18.2 THB เนื่องจากการใช้วัสดุเสริม

และกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนกว่า ถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ แสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ PLA/TPS 10% PALF

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลของปริมาณเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของคอมโพสิต PLA/TPS และ PLA/TPSW โดย TPS ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และ TPSW ใช้น้ำร่วมกับกลีเซอรอล ผลพบว่า PLA/TPS มีดัชนีการหลอมไหล (MFI) 78.35 g/10 min และความหนาแน่น 1.256 g/cm³ ในขณะที่ PLA/TPSW มี MFI 75.41 g/10 min และความหนาแน่น 1.254 g/cm³ PLA/TPS มีการดูดซึมน้ำสูงกว่า เนื่องจาก TPSW แข็งและเปราะจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน แต่ทั้งสองสูตรยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือไม่เกิน 2.0%

ในด้านสมบัติเชิงกล PLA/TPS มีความทนแรงดึง 49.65 MPa และความทนแรงกระแทก 2,610 J/m² สูงกว่า PLA/TPSW ที่ 47.28 MPa และ 2,532 J/m² ตามลำดับ ความทนต่อแรงดัดงอของ PLA/TPS เพิ่มขึ้นจาก 49.53 MPa เป็น 62.37 MPa เมื่อเพิ่ม PALF ในขณะที่ PLA/TPSW เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 45.38 MPa เป็น 51.08 MPa การเติม PALF ลดค่าความทนแรงดึงในทั้งสองคอมโพสิต โดย PLA/TPSW มีการลดลงที่ชัดเจนกว่า

สำหรับสมบัติทางความร้อน การเติม PALF 10% ใน PLA/TPSW รักษาค่า T_g ที่ 58 °C และเพิ่มค่า T_c ในทั้งสองระบบ ซึ่งบ่งชี้ว่า PALF กระตุ้นการตกผลึกส่งผลให้ % Crystallinity ของ PLA/TPSW เพิ่มขึ้นชัดเจน ขณะที่ PLA/TPS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยรวม PLA/TPS แสดงสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีกว่า PLA/TPSW โดยเฉพาะใน

ตัวอย่างที่เติม PALF 10% และมีต้นทุนการผลิตต่ำสุดที่ 15.8 บาทต่อชิ้น ทำให้ PLA/TPS เหมาะสำหรับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณมหาวิทยาลัยปทุมธานี ที่สนับสนุนทุนการศึกษา ระดับปริญญาเอก และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ให้อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Chu J, Yin X, He M, Ouyang W, Lin C, Liu X. Substance flow analysis and environmental release of antimony in the life cycle of polyethylene terephthalate products. *Journal of Cleaner Production*. 2021;291:125252.

[2] Wang Y, Hu T, Zhang W, Lin J, Wang Z, Lyu S, Tong H. Biodegradation of polylactic acid by a mesophilic bacteria *Bacillus safensis*. *Chemosphere*. 2023;318:137991.

[3] Yu J, Xu S, Liu B, Wang H, Qiao F, Ren X, Wei Q. PLA bioplastic production: From monomer to the polymer. *European Polymer Journal*. 2023;193:112076.

[4] Mistry AN, Kachenchart B, Wongthanoj A, Somwangthanoj A, Luepromchai E. Rapid biodegradation of high molecular weight semi-crystalline polylactic acid at ambient temperature via enzymatic and alkaline hydrolysis by a defined bacterial consortium. *Polymer Degradation and Stability Journal*. 2022;202:110051.

[5] Qin Q, Yang Y, Yang C, Zhang L, Yin H, Yu F, Ma J. Degradation and adsorption behavior of biodegradable plastic PLA under conventional weathering conditions. *Sci Total Environ*. 2022; 842:156775.

[6] Pulgarin HLC, Caicedo C, López EF. Effect of surfactant content on rheological, thermal, morphological and surface properties of thermoplastic starch (TPS) and polylactic acid (PLA) blends. *Heliyon*. 2022;8(10).

[7] Sayeed MMM, Sayem ASM, Haider J, Akter S, Habib MM, Rahman H, Shahinur S. Assessing mechanical properties of jute, kenaf, and pineapple leaf fiber-reinforced polypropylene composites: Experiment and modelling. *Polymers*. 2023;15:830.

[8] Suteja J, Firmanto H, Soesanti A, Christian C. Properties investigation of 3D printed continuous pineapple leaf fiber-reinforced PLA composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022;35(11):2052-61.

[9] Chotiprayon P, Chaisawad B, Yoksan R. Thermoplastic cassava starch/poly (lactic acid) blend reinforced with coir fibres. *International journal of biological macromolecules*. 2020;156 :960-8.

[10] Srithep Y, Hongkhaum N, Takhot P. Characterization of bioplastics poly (lactic acid) blended with thermoplastic starch. *RMUTP Research Journal*. 2020;14(2):98-109

[11] Kongsong P, Hokking S, Wiwasuk A, Masae M. The mechanical properties of thermoplastic starch/poly (lactic acid) blends filled with durian peel ash. *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*. 2021; 13(2):357-68. (in Thai)

[12] Manshor M, Anuar H, Aimi MN, Fitrie MA, Nazri WW, Sapuan S, et al. Mechanical, thermal and morphological properties of durian skin fibre reinforced PLA biocomposites. *Materials & Design*. 2014;59:279-86.

ระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน

ธีระพล เหมือนขาว¹ สุรินทร์ แห่งมงาม^{1*} มาโนช ประชา² พชรพล กาญจนเวโรจน์¹ และนันท์พัทธ์ ธนัญญ์สุกุล¹
therapol.m@en.rmutt.ac.th¹, surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, manoch.p@en.rmutt.ac.th²,
1163104003624@mail.rmutt.ac.th¹, 1163104005496@mail.rmutt.ac.th¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: November 29, 2024 Revised: December 24, 2024 Accepted: December 25, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน โดยระบบประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ระบบเติมเงินออนไลน์ ซึ่งผู้ใช้จะสแกน QR Code เพื่อเข้าสู่ระบบเติมเงินออนไลน์ เลือกจำนวนเงินที่ต้องการ และอัปโหลดหลักฐานการชำระเงินเมื่อกดส่งข้อมูล ข้อมูลจะถูกส่งไปยังส่วนของเครื่องควบคุมการใช้น้ำผ่านระบบออนไลน์ และในส่วนของเครื่องควบคุมการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำ สามารถแจ้งเตือนการเติมเงินเข้าสู่ระบบ เพื่อเปิดระบบการใช้น้ำ แจ้งเตือนอัตราการไหลของน้ำ ยอดเงินคงเหลือ แจ้งเตือนเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้ใกล้หมด และแจ้งเตือนเมื่อระบบปิดผ่านแอปพลิเคชัน อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบ อัตราการไหลของน้ำ ยอดเงินคงเหลือและปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้ ผ่านหน้าจอ LCD ประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอถูกทดสอบโดยทำการทดสอบการทำงานของระบบทั้งระบบ ตั้งแต่การเติมเงินผ่าน QR Code ระบบควบคุมการใช้น้ำทำงานจนกระทั่งระบบปิดการใช้น้ำเมื่อเงินในระบบหมด พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง สามารถส่งข้อความต่างๆ ไปยังผู้ใช้น้ำผ่านแอปพลิเคชันและแสดงข้อมูลต่างๆ ผ่านทางหน้าจอ LCD นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบค่าปริมาณการใช้น้ำผ่านมิเตอร์น้ำทั่วไปกับปริมาณการใช้น้ำผ่านระบบควบคุมการใช้น้ำที่สร้างขึ้น โดยทำการทดสอบการใช้น้ำปริมาณ 5 ลิตร (5×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร) จำนวน 10 ครั้ง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 1.48

คำสำคัญ: การใช้น้ำแบบเติมเงิน ระบบเติมเงินออนไลน์ เครื่องควบคุมการใช้น้ำ การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน การตรวจสอบการใช้น้ำ

Prepaid water consumption control system via online top-up system and notification through line application

Theerapol Muankhaw¹, Surin Ngaemngam^{1*}, Manoch Pracha², Pacharapol Kanjanawerot¹ and Nantapat Thananatthasakul¹
theerapol.m@en.rmutt.ac.th¹, surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, manoch.p@en.rmutt.ac.th²,
1163104003624@mail.rmutt.ac.th¹, 1163104005496@mail.rmutt.ac.th¹

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

²Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: November 29, 2024 Revised: December 24, 2024 Accepted: December 25, 2024

Abstract

This research proposes a prepaid water consumption control system that integrates an online top-up feature with notifications via the LINE application. The system consists of two main components: an online top-up platform, where water consumers scan a QR code, select the desired amount, upload proof of payment, and send the data to the water consumption control unit; and the water consumption control unit, which sends notifications to water consumers through LINE about top-ups, water flow rates, remaining balances, low water availability, and system shutdowns. Water consumers can also monitor water flow rates, account balances, and available water volumes on an LCD screen. The system's performance was tested across all functionalities, from QR code-based top-ups to water consumption control and automatic shutdown when the balance is depleted. The system operated accurately, effectively sending LINE notifications and displaying data on the LCD. Additionally, a comparison of water consumption readings between a standard water meter and the developed system, using 5 liters (5×10^{-3} cubic meters) of water over ten trials, showed a measurement error of 1.48%.

Keywords: Prepaid water consumption, Online top-up system, Water consumption control system, LINE application notifications, Water consumption monitoring.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบการจ่ายเงินล่วงหน้าหรือระบบเติมเงิน (prepaid) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันในหลากหลายรูปแบบ เช่น ระบบเติมเงินสำหรับโทรศัพท์มือถือ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้กับระบบควบคุมการใช้ไฟฟ้า ธานีวิทย โปรเจเจริยู และธานีภัทร์ เทศสวัสดิ์ [1] ได้พัฒนาระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินโดยใช้เทคโนโลยี RFID เพื่อลดความจำเป็นในการให้เจ้าหน้าที่เดินตรวจสอบค่าพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน และช่วยลดปัญหาการประเมินค่าไฟฟ้าแบบประมาณการ ซึ่งอาจสร้างความเสียหายแก่ผู้ใช้ไฟฟ้า สุรินทร์ แห่งมงาม และคณะ [2] ได้นำเสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินที่ผสานระบบเติมเงินออนไลน์เข้ากับการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยระบบประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ เครื่องเติมเงิน และ เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ในส่วนของเครื่องเติมเงินมีหน้าที่ในการเติมเงินเข้าสู่บัญชีผู้ใช้ไฟฟ้า โดยข้อมูลการเติมเงินจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าผ่านระบบออนไลน์ ส่วนเครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งรับผิดชอบการจัดการและควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้สามารถแจ้งเตือนข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนเงินที่เติมและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ผ่านแอปพลิเคชันไลน์ เพื่อเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการใช้งาน นอกจากนี้แล้วยังมีการนำระบบการเติมเงินไปประยุกต์ใช้กับระบบการใช้น้ำ ซึ่งปัจจุบันตามอาคารบ้านเรือนมีการใช้น้ำประปาทั่วๆไป จึงมีการเก็บค่าบริการในการใช้น้ำ โดยน้ำประปาที่ใช้นั้นจะเป็นการประปานครหลวงจ่ายให้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ส่วนจังหวัดที่เหลือจะดูแลโดยการประปาส่วนภูมิภาค ในการคิดค่าบริการน้ำ ตามบ้านพักที่อยู่อาศัยจะมีอัตราค่าบริการน้ำตามปริมาณการใช้น้ำ มีการกำหนดขั้นต้นในการใช้น้ำฟรีและจะคิดอัตราค่าบริการ น้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้น้ำ แต่ในบางที่ของหอพักหรือคอนโด จะเป็นการคิดค่าบริการแบบคงตัวหรือคงที่ มีการกำหนดค่าบริการในการใช้น้ำไว้อยู่แล้ว ให้ผู้พักอาศัยจ่ายค่าน้ำตามตัวเลขจากมิเตอร์ที่ได้ติดตั้งไว้แต่ละห้อง บางที่นั่นผู้พักอาศัยจะไม่ได้เห็น

มิเตอร์น้ำเองทำให้ไม่รู้ว่าเราใช้น้ำไปมากน้อยแค่ไหน แต่จะมีพนักงานเดินจดค่ามิเตอร์น้ำ นำมาคำนวณและแจ้งจำนวนหน่วยที่เราใช้ไป ซึ่งจะไม่สามารถทราบได้ว่าตัวเลขที่ได้มานั้นถูกต้องหรือไม่ โดยน้ำหนึ่งหน่วยที่ใช้จะเท่ากับหนึ่งพันลิตรหรือหนึ่งลูกบาศก์เมตร โดยผู้พักอาศัยจะต้องจ่ายตามวันเวลาที่กำหนดไว้ หากลืมชำระค่าน้ำหรือจ่ายล่าช้าเกินกำหนดก็จะเสียค่าปรับที่แพงในกรณีที่ไม่ยอมจ่ายค่าน้ำ เจ้าของที่พักก็จะทำการตัดการจ่ายน้ำ ทำให้ต้องเสียเวลาในการดำเนินการเรื่องเพื่อที่จะได้ใช้น้ำต่อ ชีระพล และ คณะ [3] นำเสนอระบบการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมด้วย ARDUINO R3 ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อต้องการที่จะใช้น้ำจะต้องเติมผ่านบัตร RFID ที่ควบคุมโดย Arduino R3 แต่หากเราลืมบัตรหรือทำบัตรหายก็จะไม่สามารถเติมเงินเพื่อที่จะใช้น้ำได้ อีกทั้งบัตร RFID ยังสามารถอ่านและใช้เติมเงินได้กับทุกห้องพักโดยไม่มีกรแยกห้อง ซึ่งอาจจะมีการปลอมแปลงบัตรเกิดขึ้น และการแจ้งเตือนยังมีแค่การแสดงผ่านจอ LCD หน้าตู้เพียงอย่างเดียวหากไม่ได้ไปดูหน้าตู้ก็จะไม่รู้ปริมาณน้ำที่ใช้ได้หรือยอดเงินที่เหลืออยู่ หากยอดเงินหมดจะทำให้ไม่สามารถใช้งานน้ำได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์ แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยระบบนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ ระบบเติมเงินออนไลน์ และ เครื่องควบคุมการใช้น้ำ ในส่วนของระบบเติมเงินออนไลน์ ผู้ใช้สามารถสแกน QR Code เพื่อเข้าสู่แพลตฟอร์มเลือกจำนวนเงินที่ต้องการเติม และอัปโหลดหลักฐานการชำระเงิน เมื่อดำเนินการเสร็จสิ้น ข้อมูลจะถูกส่งไปยังเครื่องควบคุมการใช้น้ำผ่านระบบออนไลน์ สำหรับส่วนของเครื่องควบคุมการใช้น้ำ จะมีการแจ้งเตือนเกี่ยวกับการเติมเงินเพื่อเปิดใช้งานระบบ รวมถึงแจ้งเตือนอัตราการใช้ของน้ำ ยอดเงินคงเหลือ การแจ้งเตือนเมื่อยอดเงินใกล้หมด และการปิดระบบ ทั้งหมดนี้เป็นการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถตรวจสอบอัตราการไหลของน้ำ ยอดเงินคงเหลือ และปริมาณน้ำที่ใช้ได้ผ่านหน้าจอ LCD

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มิเตอร์น้ำ

มิเตอร์น้ำ เป็นตัวช่วยในการคำนวณการใช้น้ำ มีเครื่องภายในไว้วัดปริมาณการใช้น้ำ เมื่อน้ำไหลผ่าน มิเตอร์ อุปกรณ์ภายในจะหมุนตามปริมาณน้ำที่ไหล ผ่านไป อุปกรณ์การวัดจะเชื่อมต่อกับแกนหมุนตัวเลข เพื่อบอกปริมาณน้ำที่ใช้ไป [4] สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ สำหรับเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ใช้ไปกับเครื่องควบคุม การใช้น้ำที่สร้างขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 มิเตอร์น้ำ

2.2 เซนเซอร์วัดอัตราการไหล

เซนเซอร์วัดอัตราการไหล เป็นเครื่องมือวัดที่ ทำหน้าที่ในการวัดปริมาตร หรือ อัตราการเคลื่อนที่ ของไหล ผ่านภาชนะที่สามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัด ปริมาตร และ เทียบกับเวลาที่ของไหลนั้นไหลผ่านมา ได้ [5] งานวิจัยนี้ใช้สำหรับวัดค่าอัตราการไหลของน้ำ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เซนเซอร์วัดอัตราการไหล

2.3 Node MCU ESP32

Node MCU ESP32 เป็นอุปกรณ์ไมโครคอน-โทรลเลอร์ ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าในการทำงาน 2.6V ถึง 3V รองรับการเชื่อมต่อ WIFI ในตัว มีแรมในตัว 512KB

ภาษาที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคือ ภาษาซี [6] สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ควบคุมและเชื่อมต่อระหว่าง การเติมเงินกับเครื่องควบคุมการใช้น้ำและส่งการแจ้งเตือน ไปยังแอปพลิเคชันไลน์ แสดงดังรูปที่ 3

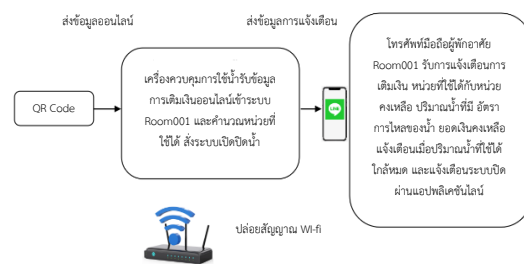


รูปที่ 3 Node MCU ESP32

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การทำงานโดยรวมของระบบควบคุม การใช้น้ำแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และ แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์

ภาพรวมการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 4 โดยระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ระบบเติมเงิน ออนไลน์โดยสแกนผ่าน QR Code และเครื่องควบคุม การใช้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยจะต้องมีการเติมเงิน เข้าระบบโดยการสแกนผ่าน QR Code และข้อมูลการ เติมเงินจะถูกส่งผ่านระบบออนไลน์ไปยังเครื่องควบคุม การใช้น้ำ จากนั้นเครื่องควบคุมการใช้น้ำจะส่งข้อมูล อัตราการไหลของน้ำ ยอดเงินคงเหลือ และปริมาณน้ำที่ สามารถใช้ได้ ไปยังผู้ใช้ผ่านแอปพลิเคชันไลน์



รูปที่ 4 ภาพรวมการทำงานของระบบ



รูปที่ 5 (ก) QR Code เติมเงิน
(ข) เครื่องควบคุมการใช้น้ำ

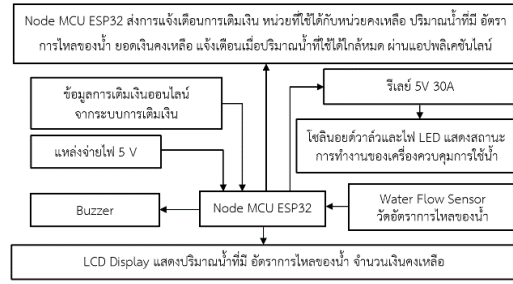
ส่วนที่ 1 การเติมเงินเข้าระบบ ผ่าน QR Code ระบบเติมเงินประมวลผลและส่งข้อมูลไปยังเครื่องควบคุมการใช้น้ำรับข้อมูล ผ่านระบบออนไลน์ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนผังการควบคุมของระบบการเติมเงิน

จากรูปที่ 6 ผู้ใช้น้ำจะเข้าสู่ระบบการเติมเงิน โดยการสแกน QR Code เมื่อทำการกรอกข้อมูลและกดส่งข้อมูล ข้อมูลจะถูกบันทึกไว้ใน google sheet และส่งรูปภาพหลักฐานการเติมเงินเข้าไปยัง google sheet ข้อมูลจำนวนเงินที่เลือกไว้จะถูกจัดเก็บใน google sheet จากนั้นข้อมูลการเติมเงินจะถูกส่งไปยัง Node MCU ESP32 ที่ติดตั้งในระบบควบคุมการใช้น้ำในขณะเดียวกันจะส่งการแจ้งเตือนต่าง ๆ ไปยังแอปพลิเคชันไลน์

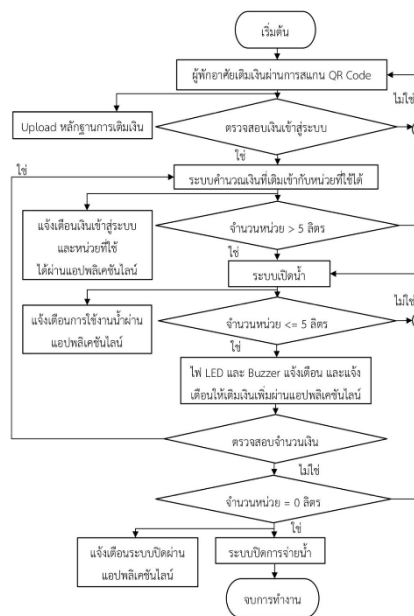
ในส่วนที่ 2 เป็นส่วนควบคุมการใช้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยประกอบไปด้วย Node MCU ESP32 ที่รับข้อมูลการเติมเงินออนไลน์เข้ามาและทำการประมวลผลและส่งข้อมูลการแจ้งเตือนต่าง ๆ Water Flow Meter Sensor ทำการวัดข้อมูลอินพุตค่าต่าง ๆ ของน้ำ ส่วนทางด้านเอาต์พุตประกอบด้วย LCD Display แสดงผลค่าต่างๆ ออกมา เช่น จำนวนเงิน ปริมาณที่มี อัตราการไหลของน้ำ เป็นต้น และไฟ LED, Buzzer จะแจ้งเตือนเมื่อปริมาณของน้ำที่สามารถใช้ได้ใกล้หมด



รูปที่ 7 แผนผังการควบคุมการใช้น้ำ

3.2 ขั้นตอนการใช้งานระบบ

ขั้นตอนการทำงานของระบบการใช้น้ำแสดงดังรูปที่ 8. โดยเริ่มจากผู้ใช้งานทำการเติมเงินโดยสแกนผ่าน QR Code เพื่อเข้าสู่หน้าระบบเติมเงินออนไลน์ทำการเติมเงินและอัปเดตหลักฐานการเติมเงินเข้าสู่ระบบ ระบบจะตรวจสอบจำนวนเงินและคิดคำนวณจำนวนเงินกับหน่วยที่ใช้ได้ ส่งการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชันไลน์ ถ้าปริมาณน้ำมากกว่า 5 ลิตร ระบบจะเปิดหากปริมาณน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 ลิตร หลอดไฟแอลอีดีและบัสเซอร์จะแจ้งเตือน และระบบจะแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ให้เติมเงินเพิ่มและเมื่อมีการเติมเงินเพิ่มสถานะการทำงานของหลอดไฟแอลอีดีและบัสเซอร์จะหยุดทำงาน หากไม่มีการเติมเงินเพิ่มและปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้เท่ากับ 0 ลิตร ระบบจะปิดการจ่ายน้ำและทำการแจ้งเตือนผ่านทางแอปพลิเคชันไลน์ว่าระบบการใช้น้ำถูกปิดแล้ว



รูปที่ 8 แผนผังขั้นตอนการทำงานของระบบการใช้น้ำ

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

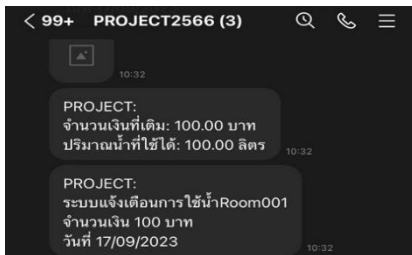
ทำการทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มต้นใช้งานจนครบวงจรแบบอัตโนมัติ และเปรียบเทียบปริมาณที่ใช้ไประหว่างมิเตอร์น้ำทั่วไปกับระบบควบคุมที่สร้างขึ้นมา โดยมีการทดสอบดังนี้

4.1 ทดสอบการเติมเงินเข้าระบบโดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ทดสอบการเติมเงินเพิ่มของระบบ โดยทำการเติมเงินครั้งละ 100 บาท

ครั้งที่	ยอดคงเหลือ	ยอดเติมเพิ่ม	ยอดคงเหลือล่าสุด	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	0	100	100	0
2	100	100	200	0
3	200	100	300	0
4	300	100	400	0
5	400	100	500	0
6	500	100	600	0
7	600	100	700	0
8	700	100	800	0
9	800	100	900	0
10	900	100	1000	0

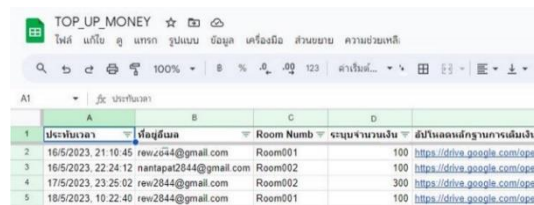
จากผลการทดสอบตารางที่ 1 พบว่าระบบสามารถเติมเงินเพิ่มได้ โดยไม่พบค่าความคลาดเคลื่อนในการเติมเงินเพิ่มของระบบ โดยตัวอย่างการทดสอบการเติมเงินเพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งตัวอย่างแจ้งเตือนการเติมเงินเข้าสู่ระบบผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ตัวอย่างข้อมูลการใช้น้ำของ ROOM001 ผ่าน Google Sheet ตัวอย่างข้อมูลหลักฐานการเติมเงินเข้าสู่ระบบผ่าน Google Sheet และ ตัวอย่างหลักฐานการเติมเงินเข้าสู่ระบบแสดงดังรูปที่ 9 – 12



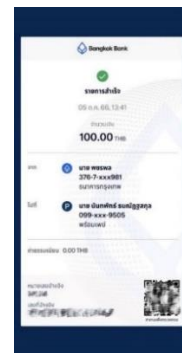
รูปที่ 9 ตัวอย่างแจ้งเตือนการเติมเงินเข้าสู่ระบบผ่านแอปพลิเคชันไลน์

ROOM001				
DATE & TIME	Flow Rate	Remain	Volume	
7/9/2023, 19:59:56	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:00:04	Remain	100	100	
7/9/2023, 20:00:12	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:00:20	Remain	200	200	
7/9/2023, 20:00:28	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:00:36	Remain	300	300	
7/9/2023, 20:00:44	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:00:52	Remain	400	400	
7/9/2023, 20:01:00	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:01:08	Remain	500	500	
7/9/2023, 20:01:16	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:01:24	Remain	600	600	
7/9/2023, 20:01:32	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:01:40	Remain	700	700	
7/9/2023, 20:01:48	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:01:56	Remain	800	800	
7/9/2023, 20:02:04	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:02:12	Remain	900	900	
7/9/2023, 20:02:20	Top_up	100	100	
7/9/2023, 20:02:28	Remain	1000	1000	

รูปที่ 10 ตัวอย่างข้อมูลการใช้น้ำของ ROOM001 ผ่าน Google Sheet



รูปที่ 11 ตัวอย่างข้อมูลหลักฐานการเติมเงินเข้าสู่ระบบผ่าน Google Sheet



รูปที่ 12 ตัวอย่างหลักฐานการเติมเงินเข้าสู่ระบบ

4.2 ทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้น้ำจนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยตัวอย่างการทำงานของระบบ แสดงดังรูปที่ 13 – 16 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 13 เติมเงินเข้าสู่เครื่องควบคุมการใช้น้ำ 100 บาท



รูปที่ 14 เครื่องพร้อมใช้งาน



รูปที่ 15 ปริมาณน้ำที่สามารถใช้น้อยกว่า 5 ลิตร (ไฟแจ้งเตือนจะกะพริบ)



รูปที่ 16 ไฟแจ้งเตือนติดค้างเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้เท่ากับ 0 ลิตร

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ครั้งที่	เปิดระบบ	Buzzer ทำงาน	หลอดไฟแสดงสถานะการทำงาน			ปิดระบบ
			ติด	ดับ	กะพริบ	
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ :

เปิดระบบ หมายถึง สามารถใช้งานน้ำได้

Buzzer ทำงาน หมายถึง ส่งเสียงแจ้งเตือน

ปิดระบบ หมายถึง ไม่สามารถใช้งานน้ำได้เมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้เท่ากับ 0

จากผลการทดสอบตารางที่ 2 จากการทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้น้ำจนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

4.3 ทดสอบระบบการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้น้ำผ่านแอปพลิเคชันไลน์เมื่อผู้ใช้น้ำทำการเติมเงิน แจ้งเตือนระหว่างการใช้น้ำ แจ้งเตือนเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้น้อยกว่า 5 ลิตร และแจ้งเตือนปริมาณการใช้น้ำที่สามารถใช้ได้เป็น 0 และระบบการใช้น้ำถูกปิด โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนจากระบบควบคุมเมื่อมีการเติมเงินเข้าระบบ ปริมาณน้ำที่สามารถใช้น้อยกว่า 5 ลิตร และเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้หมดผ่านทางแอปพลิเคชันไลน์

ครั้งที่	จำนวนเงิน	แจ้งเตือนยอดการเติมเงิน	แจ้งเตือนระหว่างการใช้งานระบบ	แจ้งเตือนยอดเงินคงเหลือ 5×10^{-3} ลบ.ม.	แจ้งเตือนปิดระบบ
1	100	✓	✓	✓	✓
2	300	✓	✓	✓	✓
3	500	✓	✓	✓	✓
4	1000	✓	✓	✓	✓
5	2000	✓	✓	✓	✓

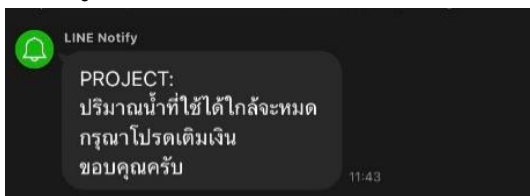
จากผลการทดสอบตารางที่ 3 การทดสอบการแจ้งเตือนของแอปพลิเคชันไลน์ เมื่อมีการเติมเงินเข้าระบบ ปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้น้อยกว่า 5 ลิตร และเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้หมด พบว่าระบบทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยตัวอย่างการแจ้งเตือนแสดงดังรูปที่ 17-20



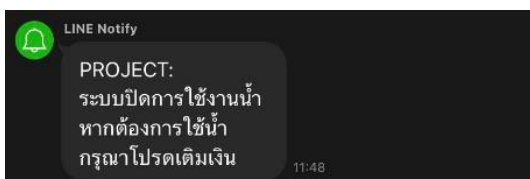
รูปที่ 17 แจ้งเตือนจำนวนเงินเข้าสู่ระบบ 100 บาท



รูปที่ 18 แจ้งเตือนระหว่างการใช้งานน้ำ



รูปที่ 19 แจ้งเตือนเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้ น้อยกว่า 5 ลิตร



รูปที่ 20 แจ้งเตือนเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้หมด

4.4 ทดสอบและวัดค่าปริมาณน้ำจากมิเตอร์น้ำทั่วไปและจากระบบควบคุมการใช้น้ำที่สร้างขึ้น ทำการบันทึกหน่วยเริ่มต้นจากมิเตอร์น้ำก่อนทำการใช้น้ำ และหลังการใช้น้ำ โดยตัวอย่างการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 21 -26 และผลการทดสอบเปรียบเทียบการค่าปริมาณน้ำที่ใช้ไประหว่างมิเตอร์น้ำทั่วไปกับระบบควบคุมการใช้น้ำที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 4 โดยการทดสอบนี้กำหนดให้ค่าน้ำราคาถูกละ 1 บาท



รูปที่ 21 ค่าปริมาณน้ำที่วัดได้จากเครื่องควบคุมที่สร้างขึ้น เริ่มต้น 100 ลิตร



รูปที่ 22 ค่าตัวเลขจากมิเตอร์น้ำเริ่มต้นที่ 485 ลิตร



รูปที่ 23 ปริมาณน้ำเริ่มต้นในถังประมาณ 20 ลิตร



รูปที่ 24 หลังจากใช้น้ำไป 5 ลิตร ค่าตัวเลขจากมิเตอร์
น้ำมีค่า 490 ลิตร



รูปที่ 26 หลังจากใช้น้ำไป 5 ลิตร ค่าปริมาณน้ำในถัง
จาก 20 ลิตร ลดลงเป็น 15 ลิตร



รูปที่ 25 ค่าปริมาณน้ำที่วัดได้จากเครื่องควบคุมที่สร้าง
ขึ้น หลังจากใช้ไป 5 ลิตร คงเหลือ 95.10 ลิตร

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำที่ใช้ไประหว่างมิเตอร์น้ำทั่วไปกับระบบควบคุมการใช้น้ำที่สร้างขึ้น

ครั้งที่	ค่าปริมาณน้ำที่วัดจากมิเตอร์น้ำ (ลบ.ม.)			ค่าปริมาณน้ำที่วัดจากระบบควบคุม (ลบ.ม.)		%ความคลาดเคลื่อน
	หน่วยเริ่มต้น (ลบ.ม.)	หน่วยที่กำหนด (ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำที่ใช้ไป (ลบ.ม.)	หน่วยที่กำหนด 5 ลิตร (ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำที่ใช้ไป (ลบ.ม.)	
1	0.435	0.440	5×10^{-3}	5×10^{-3}	5.08×10^{-3}	1.6
2	0.440	0.445	5×10^{-3}	5×10^{-3}	4.89×10^{-3}	2.2
3	0.445	0.450	5×10^{-3}	5×10^{-3}	5.03×10^{-3}	0.6
4	0.450	0.455	5×10^{-3}	5×10^{-3}	4.90×10^{-3}	2
5	0.455	0.460	5×10^{-3}	5×10^{-3}	4.86×10^{-3}	2.8
6	0.460	0.465	5×10^{-3}	5×10^{-3}	4.97×10^{-3}	0.6
7	0.465	0.470	5×10^{-3}	5×10^{-3}	4.95×10^{-3}	1
8	0.470	0.475	5×10^{-3}	5×10^{-3}	4.95×10^{-3}	1
9	0.475	0.480	5×10^{-3}	5×10^{-3}	5.05×10^{-3}	1
10	0.485	0.490	5×10^{-3}	5×10^{-3}	4.97×10^{-3}	2
เฉลี่ยรวม					4.958×10^{-3}	1.48%

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำโดยทดสอบครั้งละ 5 ลิตร (5×10^{-3} ลบ.ม.) และทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 1.48

5. วิเคราะห์และสรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่านระบบเติมเงินออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ระบบที่นำเสนอนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนของระบบเติมเงินโดยการสแกน QR Code เข้าสู่ Google Forms เพื่อทำการเติมเงิน ข้อมูล

การเติมเงินจะถูกส่งไปยังเครื่องควบคุมการใช้น้ำ เพื่อเปิดใช้งานระบบ ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จะทดสอบการแปลงจำนวนเงินที่เติมเป็นปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้ ทดสอบการเติมเงินเพิ่มจากยอดคงเหลือ หากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมิเตอร์ทั่วไปกับระบบควบคุมน้ำที่สร้างขึ้นมา พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 1.48 (ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากความ คลาดเคลื่อนของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยตามข้อมูลของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำที่ใช้มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5) ทดสอบการแจ้งเตือนของแอปพลิเคชันไลน์ เมื่อมีการเติมเงินเข้าระบบ ค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้เหลือน้อยกว่า 5 ลิตร (5×10^{-3} ลบ.ม.) และเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้สามารถใช้ได้เป็นศูนย์ พบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ซึ่งระบบควบคุมการใช้น้ำที่นำเสนอนี้ เป็นเพียงต้นแบบระบบควบคุมการใช้น้ำที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ยังไม่ได้นำไปติดตั้งและใช้งานในสถานที่จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการและสำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณชัชชัย ทองจันทร์ และ คุณจิตติณัฐ ฉายประเจียด นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ข้อมูลต่าง ๆ ในการทำวิจัยและทางผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Thanavit P, Thanapat T. Prepaid electric energy consumption system via RFID controlled by arduino uno R3 [Bachelor's thesis]. Pathumthani: Faculty of Engineering: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2020. (in Thai)

[2] Ngaemngam S, Thangpreecharparnich N, Muankhaw T, Tubtongdee S, Toomkaew K, Phuin P. Prepaid electric energy consumption system via online top-up system and a notification through LINE application. *Frontiers in Engineering Innovation Research*. 2021;19(2):43-52.

[3] Muankhaw T, Ngaemngam S, Thongchan C, Chaiprachiad J. Prepaid water consumption system via RFID controlled by microcontroller. *Frontiers in Engineering Innovation Research*. 2024;22(1):27-37.

[4] Euro-oriental trading co., ltd. [Internet] 2020 [cited 2023 Nov 12]. Available from: <https://www.eurooriental.co.th/-types-of-water-meter/> (in Thai)

[5] Petro-Instruments Corp., Ltd., Flow meter. [Internet] 2020 [cited 2023 Dec 26]. Available from: <https://www.pico.co.th/?names=blog&files=flow-meter-measurement> (in Thai)

[6] ArtronShop, Node MCU ESP32, . [Internet] 2021 [cited 2023 Dec 26]. Available from: <https://www.artronshop.co.th/> (in Thai)

ผลของพารามิเตอร์ควบคุมก๊าซไอเสียของการคาร์บอนในเซชันชีวมวลร่วมกับ ขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านบั่วสำหรับการดูดกลืน

ไพโรจน์ จันทร์แก้ว¹ อภิรักษ์ ชัดวิลาส¹ อนุรัตน์ เทวตา¹ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล¹ และสำรวม โกศลานันท์^{2*}
phairoac@rmutl.ac.th¹, aphirak@rmutl.ac.th¹, a_tevata@rmutl.ac.th¹,
chakkraphan@rmutl.ac.th¹, sumroum_k@rmutt.ac.th^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: September 9, 2024 Revised: December 23, 2024 Accepted: December 25, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ควบคุมก๊าซไอเสียประกอบด้วยอุณหภูมิและความเร็ว
ก๊าซไอเสียของการคาร์บอนในเซชันชีวมวลร่วมกับขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านบั่ว สำหรับการดูดกลืน เครื่องผลิต
ถ่านดูดกลืนถูกสร้าง สำหรับควบคุมสภาวะขนาด $50 \times 45 \times 35 \text{ cm}^3$ สามารถทดสอบฝักบัว 6 ฝัก ก๊าซไอเสียถูกผลิต
จากเตาเผาขนาด 100 liter และถูกเพิ่มอุณหภูมิ โดยใช้ขดลวดความร้อนและเตาเผาที่มีการติดตั้งพัดลมที่สามารถ
ควบคุมความเร็วอากาศเข้าเตาเผาได้ ในการทดลองใช้ฝักบัวมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 86.19 ± 1.67 มาตรฐานเปียกและ
ผลิตเป็นถ่านจนมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 0 มาตรฐานเปียก โดยใช้ตัวแปรควบคุม คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 200, 250
และ 300°C และความเร็วก๊าซไอเสีย 1.22, 1.74 และ 2.27 m/s พบว่า อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 200, 250 และ 300°C
ใช้เวลาผลิตถ่านดูดกลืน 120, 100 และ 60 นาที ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิก๊าซไอเสียคงที่และเพิ่มความเร็วก๊าซไอเสีย
ใช้เวลาผลิตถ่านดูดกลืนเท่ากัน เนื่องจากวัตถุดิบไม่ได้สัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง ซึ่งวัตถุดิบจะถูกบรรจุไว้ในตู้วัตถุดิบ
อีกชั้นหนึ่ง สำหรับป้องกันไม่ให้บั่วเกิดการลุกไหม้จนเปลี่ยนสภาพเป็นเถ้า ส่งผลให้ไอเสียไหลเข้ามาในตู้บ่มฝักผิว
ผนังด้านนอกของตู้ใส่วัตถุดิบ ดังนั้นลักษณะการอบแห้งจึงเป็นการอบด้วยการแผ่รังสีความร้อนทำให้ผลการอบแห้ง
ขึ้นอยู่กับตัวแปรอุณหภูมิเพียงตัวแปรเดียว จากนั้นทำการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) และอัตราการใช้
พลังงานจำเพาะ พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) มีค่าสูงขึ้น
และทำให้อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งที่สภาวะ 300°C ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s มี
ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุด $1176.32 \pm 21.562 \text{ mg/g}$

คำสำคัญ: ฝักบัว ถ่านดูดกลืน ก๊าซไอเสีย

Flue gas control parameter effects of biomass carbonization with heating coil on the production of lotus charcoal for odor absorption

Phairoach Chunkaew¹, Aphirak Khadwilard¹, Anurat Tevata¹,
Chakkraphan Thawongmyingsakul¹ and Sumroum Kosalanun^{2*}
phairoac@rmutl.ac.th¹, aphirak@rmutl.ac.th¹, a_tevata@rmutl.ac.th¹,
chakkraphan@rmutl.ac.th¹, sumroum_k@rmutt.ac.th^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: September 9, 2024 Revised: December 23, 2024 Accepted: December 25, 2024

Abstract

This research aimed to study the effects of flue gas control parameters including flue gas temperature and flue gas velocity of biomass carbonization with heating coil on the production of lotus charcoal for odor adsorption. The odor absorbing charcoal machine had a drying chamber of $50 \times 45 \times 35 \text{ cm}^3$ which could contain 6 pods. Hot smoke was generated from a 100 liter kiln. Next, the hot smoke was increased temperature by using a heater before entering the drying chamber. At the kiln, a fan was installed for blowing the air to the kiln. The fan could control the speed for adjusting the air to the kiln. Experiment, the lotus had an initial moisture content of $86.19 \pm 1.67 \%$ wet basis and was dried to the final moisture content of 0% wet basis. The control variables were smoke temperatures of 200, 250 and 300°C and smoke velocities of 1.22, 1.74 and 2.27 m/s. It was found that at flue gas temperatures of 200, 250 and 300°C , the production time for odor absorber was 120, 100 and 60 min, respectively, but at constant flue gas temperature and increasing flue gas velocity, the production time for odor absorber was the same because the raw materials did not come into direct contact with the flue gas. The raw materials were packed in another layer of the raw material cabinet to prevent the lotus from burning and turning into ash so the exhaust gas touched the outer wall surface of the raw material cabinet. Therefore, the drying method was a heat radiation drying method and the drying result was to depend on only one temperature variable. An iodine adsorption and a specific energy consumption were studied. It was found that increasing the temperatures and the velocities of hot smoke, the iodine adsorption and the specific energy consumption were increased. At 300°C with the flue gas velocity 2.27 m/s had the maximum iodine adsorption value of $1176.32 \pm 21.562 \text{ mg/g}$.

Keywords: Lotus, Odor absorbing charcoal, Flue gas

1. บทนำ

เนื่องจากจังหวัดตาก บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก มีหนองน้ำที่มีบัวหลวงอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นหนองน้ำสาธารณะขนาดใหญ่ในเขต ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก มีเนื้อที่ 1,000 กว่าไร่ [1] นอกจากนี้ มีพื้นที่บัวหลวงตามหนองน้ำธรรมชาติที่หนองจรเข้ ตำบลยกกระบัตร อำเภอสสามเงา จังหวัดตาก มีพื้นที่ 1,200 ไร่ [2] บัวเหล่านั้น เมื่อถึงฤดูกาลออกดอกก็จะมีดอกบัวอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อดอกบัวบานเต็มที่ก็จะกลายเป็นฝักบัวให้ชาวบ้านได้ลงไปเก็บฝักบัว เพื่อเอาเมล็ดบัวมาขายได้ตลอดทั้งปี พบว่า ยังมีฝักบัวที่เหลือจากชาวบ้านเก็บอยู่เป็นจำนวนมากทำให้ฝักบัวเหล่านั้นแห้งเฉาไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์และเกิดการเน่าเสีย ทำให้มีกลิ่นเหม็นเป็นมลพิษทางอากาศและมลพิษทางสิ่งแวดล้อม การผลิตถ่านดูดกลิ่นจากบัวไม่เพียงช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับพืชน้ำอย่างบัว แต่ยังเป็นกระบวนการที่ส่งเสริมความยั่งยืน โดยใช้วัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมอย่างคุ้มค่า ช่วยลดของเสียและสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการดูแลคุณภาพอากาศและน้ำ นอกจากนี้ ยังลดของเสียและสร้างรายได้ใหม่ให้ชุมชน ถ่านดูดกลิ่น จากงานวิจัยของ [3] ใช้ผลจากเป็นวัสดุหลัก ซึ่งมีการออกแบบมาใน 2 รูปแบบ คือ ก้อนถ่านจากผลจากจากนั้นนำไปบรรจุในบรรจุภัณฑ์ถุงตาข่ายเป็นถ่านดูดกลิ่นและถ่านจากผลจากผ่าซีก จากนั้น นำไปบดผสมกับกาวแป้งเปียกขึ้นรูปเป็นก้อนถ่านดูดกลิ่น เนื่องจากปัญหา คือ ผลไม้มีความเปราะบาง เมื่อได้รับความร้อนสูงก็จะเกิดการแตกหักและกลายเป็นซี้ได้ง่าย แต่หากเผาเป็นถ่านไม่สมบูรณ์จะมีกลิ่นของผลไม้อยู่ ปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับกลิ่นก็จะน้อย รวมไปถึงบรรจุภัณฑ์ที่เป็นปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำถ่านผลไม้ดูดกลิ่น เช่น [4] การทำถ่านมังคุดดูดกลิ่น จากการทดลองพบว่า หากช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้สูง 300 ถึง 400°C ลักษณะทางกายภาพของมังคุดในระหว่างการเผาไหม้จะกลายเป็นเถ้าถ่านก่อนที่จะกลายเป็นถ่าน ในขณะที่ถ้าช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำกว่า 200°C มังคุดถูกเปลี่ยนเป็นถ่านบางส่วน ดังนั้น เงื่อนไขการทดลอง

ที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านมังคุดดูดกลิ่นด้วยเตาชีวมวลขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัย คือ อุณหภูมิช่วงการเผาไหม้ควรอยู่ระหว่าง 200 ถึง 300 °C โดยลักษณะทางกายภาพของถ่านมังคุดดูดกลิ่นใกล้เคียงกับมังคุดก่อนนำไปเป็นถ่าน และ [5] ได้พัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวทดสอบ โดยใช้สารเคมีได้ค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเท่ากับ 390 mg/g นอกจากนี้ [6] ได้วิจัยไปบัวมาตัดแปลงเป็นคาร์บอนประยุกต์ใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนไนโตรเจน ดังนั้น จึงมีแนวคิดในการนำฝักบัวมาใช้ประโยชน์โดยการนำมาทำเป็นถ่านดูดกลิ่น เพราะฝักบัวมีเส้นใยมากจะทำให้ไม่เกิดการแตกหักง่ายและเมื่อกลายเป็นถ่านจะมีรูพูนมาก มีรูพรุนที่แตกต่างจากถ่านปกติทั่วไป จึงเหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นถ่านดูดกลิ่น งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียของการคาร์บอนในเข้ชั้นชีวมวลร่วมกับขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านดูดกลิ่นจากบัว โดยเป้าหมายให้ถ่านดูดกลิ่นจากบัวมีคุณสมบัติตาม [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านดูดซับกลิ่น-ถ่านหิน (มผช. 180/2546)

2. กรอบแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บัวหลวงเป็นดอกไม้ที่คนไทยคุ้นเคยกันเป็นอย่างดี บัวหลวงมีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า ปทุมชาติ บัวหลวงเป็นไม้ล้มลุก มีลำต้นใต้ดินแบบเหง้าและไหล ใบเป็นใบเดี่ยวรูปกลม เมื่อยังอ่อนจะลอยปริ่มน้ำ ส่วนใบแก่แผ่ใบจะโผล่พ้นน้ำ รูปใบเกือบกลมขนาดใหญ่ ใบมีสีเขียว ผิวใบมีนวล ก้านใบแข็งและมีหนาม ก้านใบจะติดตรงกลางแผ่นใบ ดอก เป็นดอกเดี่ยวขนาดใหญ่ชูสูงพ้นผิวน้ำ มีทั้งดอกทรงป้อมและแหลม กลีบดอกมีทั้งชนิดกลีบซ้อนและไม่ซ้อน กลีบดอกสีขาว สีชมพูหรือสีเหลืองแล้วแต่ละชนิดพันธุ์ ดอกบัวหลวงเริ่มบานตั้งแต่อ่อนเช้าและหุบลงในช่วงพลบค่ำ พอรุ่งเช้าวันใหม่ เมื่อดอกบัวตูมได้รับแสงอาทิตย์ก็จะบานอีกครั้ง ดอกมีกลิ่นหอม เมื่อเริ่มเป็นผล รูปทรงรี สีเขียวนวล มีจำนวนมากฝังอยู่ในส่วนที่เป็นรูปกรวย เมื่ออ่อนมีสีเหลือง เมื่อผลแก่จะขยายใหญ่ขึ้นมีสีเทาอมเขียวเรียกว่า ฝักบัว [8]

ผลิตภัณฑ์สำหรับถ่านดูดกลิ่นสามารถนำถ่าน มาดให้มีความละเอียดตามต้องการ อาจเติมสมุนไพร ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลิ่น เช่น ชา สะเดา บรจุนใน ภาชนะบรรจุหรืออัดเป็นรูปทรงต่าง ๆ อาจแต่งสีหรือ ได้จากการนำผลไม้หรือส่วนต่าง ๆ ของพืช มาเผาในที่ อับอากาศจนกลายเป็นถ่าน โดยยังคงรูปทรงผลไม้หรือ ส่วนต่าง ๆ ของพืชไว้เช่นเดิม ถ่านดูดกลิ่นมีหลากหลาย รูปแบบ แต่ที่กำลังได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน คือ ถ่านผลไม้ มีคุณสมบัติสามารถดูดกลิ่นได้ดี รูปทรง สวยงามและใช้เป็นเครื่องประดับตกแต่ง การผลิตถ่าน ผลไม้เกิดจากการนำภูมิปัญญาท้องถิ่นที่มีการสืบทอด มาตั้งแต่อดีต โดยนำผลไม้ชนิดต่าง ๆ มาเผาจนเป็น ถ่านที่ยังคงรูปทรงผลไม้ไว้เหมือนเดิม

การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) [9] มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่าน ดูดกลิ่น ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AWWA B604 ซึ่งเป็นวิธี เดียวกันกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัม มันต์ เทียบเคียงได้กับการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AST M D4607-94 ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

- อบถ่านที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 hr. แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

- ชั่งและบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ใส่ในขวด รูปชมพู่ขนาด 250 ml ที่มีฝาปิด

- เติมน้ำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (hydroc hloric) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 ml แกว่งขวดเบา ๆ เพื่อให้ผงถ่านชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 s เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟอร์ (sulfur)

- เติมน้ำสารละลายไอโอดีน (iodine) ความ เข้มข้น 0.10 normal ปริมาตร 100 ml ปิดฝาและ เขย่าแรง ๆ 30 s

- กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วย กระดาษกรองโดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่ง กรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยขวด รูปชมพู่ขนาด 125 ml

- เติมน้ำสารละลาย 50 ml

- ค่อย ๆ เปิดบิวเรต (burette) ให้สารละ ายโซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) ความ

เข้มข้น 0.10 normal ลงในขวดรูปชมพู่จนกระทั่งได้ สารละลายสีเหลือง

- เติมน้ำแบ่ง 2 ถึง 3 หยด จนได้สารละลายสี น้ำเงิน

- ค่อย ๆ เปิดบิวเรต (burette) ใส่ขวดรูป ชมพู่ต่อจนได้สารละลายสีไม่มีสีและบันทึกปริมาตร โซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) ที่ใช้

การคำนวณการดูดซับไอโอดีน (iodine) ของ ถ่านดูดกลิ่นจากฝักบัว ดังสมการที่ (1)

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (1)$$

เมื่อ

X คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine), mg/g

DF คือ ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (Dilution-Factor), -

DF คือ $\frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนเริ่มต้น} - \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรไอโอดีนที่เหลือ}}$

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate), ml

M คือ น้ำหนักถ่าน, g

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate), normal, -

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (iodine), normal, -

$A = 12693 N_2$

$B = 126.93 N_1$

การคำนวณหาความชื้นของถ่านดูดกลิ่นจาก ฝักบัว ดังสมการที่ (2)

$$M_f = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

M_f คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, % Wet Basis

w คือ มวลวัสดุเปียก, g

d คือ มวลวัสดุแห้ง, g

การคำนวณอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ของถ่านดุกกลั่นจากฝักบัว ดังสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_{f-t}}{M_{f-0}} \quad (3)$$

เมื่อ

- MR คือ อัตราส่วนความชื้น, -
- M_{f-t} คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, % Wet Basis
- M_{f-0} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ, % Wet Basis

การคำนวณอัตราการใช้พลังงานของระบบ อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) [10] ซึ่งเป็น ปริมาณ ของ พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจาก วัสดุของถ่านดุกกลั่นจากฝักบัว ดังสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{\sum[(2.6 \times 3.6)(E_h + E_f) + (M_w)(LHV)]}{W_{out}} \quad (4)$$

เมื่อ

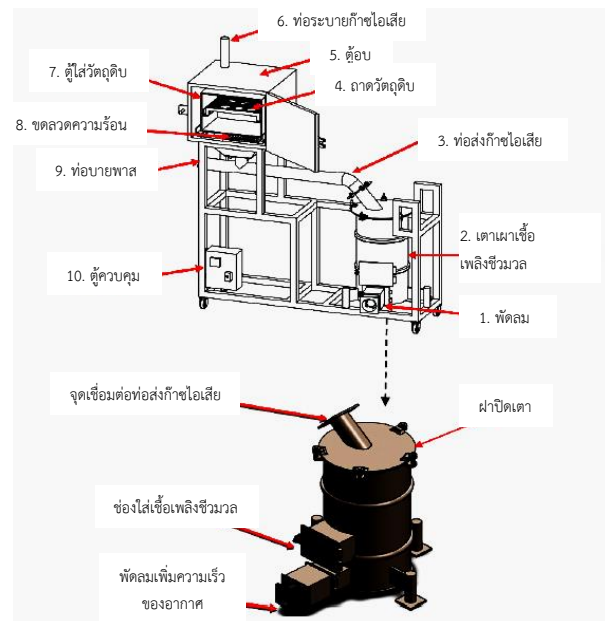
- SEC คือ อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ, MJ/kg
- E_h คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของ ขดลวดความร้อน, kWh
- E_f คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของพัด ลมตั้งแต่เริ่มจนถึงเวลาใด ๆ, kWh
- M_w คือ มวลของไม้, kg
- LHV คือ ค่าความร้อนต่ำ, kJ/kg
- 2.6 คือ ค่าคงที่สำหรับเปลี่ยนรูปพลังงาน เป็นฐานเดียวกับไม้, -
- 3.6 คือ ค่าคงที่สำหรับเปลี่ยนหน่วยจาก kWh เป็น MJ
- W_{out} คือ ปริมาณน้ำที่ออก, kg

3. วิธีการวิจัย

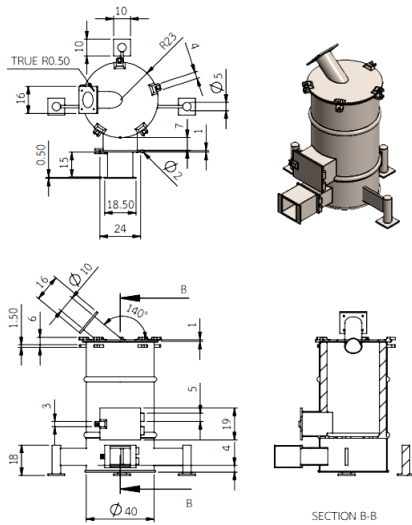
3.1 การสร้างเครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว โดยใช้ก๊าซไอเสีย

เครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว โดยใช้ก๊าซไอเสียมีส่วนประกอบหลัก ๆ พัดลม สำหรับใช้ควบคุม

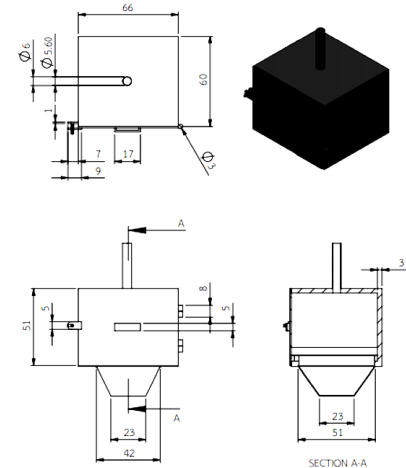
ความเร็วก๊าซไอเสีย สำหรับใช้ทดสอบเตาเผาเชื้อเพลิง ชีวมวลมีหน้าที่สร้างก๊าซไอเสียให้ได้อุณหภูมิระดับหนึ่ง ซึ่งการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลให้เปิดฝาช่องใส่เชื้อเพลิง หลังจากนั้นทำการปิดฝาช่องใส่เชื้อเพลิง ท่อส่งก๊าซไอเสีย ถาดวัตถุดิบ ตู้อบ ท่อระบายก๊าซไอเสีย ตู้ใส่ วัตถุดิบซึ่งเป็นฝักบัวชั้นใน ขดลวดความร้อนเป็น อุปกรณ์ช่วยเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซไอเสียให้ได้สภาวะที่ ต้องการ สำหรับท่อบายพาส (bypass) ใช้ระบายก๊าซ ไอเสียทิ้งขณะที่อุณหภูมิที่ออกจากเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล สูงเกินสภาวะที่ใช้งาน ตู้ควบคุมใช้ปรับตั้ง ควบคุม อุณหภูมิและความเร็วของก๊าซไอเสีย ซึ่งสามารถ ควบคุมอุณหภูมิก๊าซไอเสีย 3 ระดับ คือ 200, 250 และ 300 °C โดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิการทำงานของ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (magnetic contactor) สำหรับตัดและต่อกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดความร้อน ทำงาน และสามารถปรับความเร็วก๊าซไอเสียได้ 3 ระดับ คือ สูง กลางและต่ำ โดยใช้ดริมเมอร์ (dremmer) ปรับ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (motor) ที่ขับพัดลม ซึ่งส่วน ประกอบของเครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว โดยใช้ก๊าซไอเสีย ดังรูปที่ 1 และวงจรไฟฟ้าของเครื่องผลิตถ่านดุกกลั่น จากบัว โดยใช้ก๊าซไอเสีย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัวโดยใช้ก๊าซไอเสีย

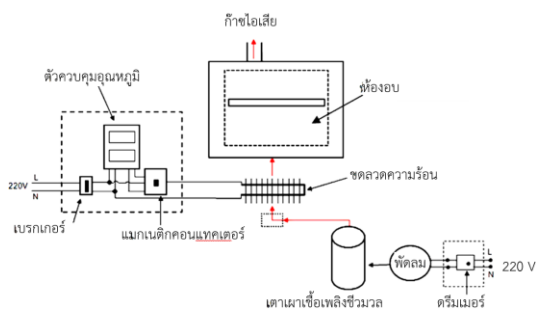


รายละเอียดเตาเผา



รายละเอียดตุ๋น

รูปที่ 1 เครื่องผลิตถ่านตุ๋นจากบัวโดยใช้ก๊าซไอเสีย (ต่อ)



รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานและวงจรไฟฟ้าของเครื่องผลิตถ่านตุ๋นจากบัวโดยใช้ก๊าซไอเสียและตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิเครื่องวัดกิโลวัตต์ฮาวมิเตอร์

3.2 ศึกษาผลตัวแปรควบคุมโดยแปรค่าอุณหภูมิและความเร็วของก๊าซไอเสียต่อคุณสมบัติของถ่านตุ๋นจากบัวและอัตราการใช้พลังงานจำเพาะ

ตัวแปรที่ศึกษา โดยควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ 200, 250 และ 300 °C และความเร็วของก๊าซไอเสียที่ 1.22, 1.74 และ 2.27 m/s โดยทำการทดสอบอยู่ 9 การทดสอบ ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ รวมทั้งหมด 27 การทดสอบ

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ ฝักบัวสดจำนวน 6 ฝัก หาได้จากหนองน้ำบริเวณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ใช้ฝักบัวสดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 56.5 mm มีค่าความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 86.19±1.67 (Wet Basis) ดังรูปที่ 3 เชื้อเพลิงชีวมวล ใช้ไม้ยูคาลิปตัส (eucalyptus) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 60 ถึง 80 mm และมีความยาว 25 mm โดยไม้ยูคาลิปตัส (eucalyptus) มีค่าความร้อนสูง คือ 17.6 MJ/kg [11] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ฝักบัวสด

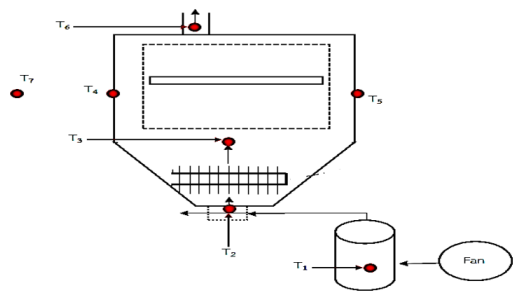


รูปที่ 4 ไม้ยูคาลิปตัส (eucalyptus)

3.4 เครื่องมือตรวจวัดสำหรับเก็บข้อมูล

1. เครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น TM-1947SD แบบ 4 ช่อง (channels) แสดงผลอุณหภูมิบนหน้าจอพร้อมกันทั้ง 4 ช่อง (channels) ใช้งานกับเทอร์โมคัปเปิลประเภท K (thermocouple Type K) ฟังก์ชันบันทึกข้อมูลด้วยการ์ด SD (SD card) (รองรับ SD card 1-16 GB) ตำแหน่งการติดตั้ง ดังรูปที่ 5
2. เครื่องชั่งดิจิตอล (digital) สำหรับชั่งน้ำหนักผักบวบและไม้ยูคาลิปตัส 1500 g × 0.1 g, 3000 g × 0.2 g ยี่ห้อ LGCN-1530
3. เครื่องวัดความเร็วรุ่น AMF028 ตรวจวัดความเร็วของอากาศก่อนเข้าเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล
4. เครื่องวัดกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh meter) ใช้ตรวจวัดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า
5. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (infra red) รุ่น LEGA LT-760GX (with thermocouple Type K) ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิในเตาชีวมวล

เนื่องจากเป้าหมาย คือ การควบคุมอุณหภูมิในตู้อบ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ศึกษา ดังนั้นผลการตรวจวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งอื่นจึงไม่ได้แสดงผลในบทความนี้



โดย T_1 คือ อุณหภูมิเตาชีวมวล, T_2 คือ อุณหภูมิก่อนเข้าตู้อบ, T_3 คือ อุณหภูมิในตู้อบ, T_4 คือ อุณหภูมิผนังตู้อบด้านซ้าย, T_5 คือ อุณหภูมิผนังตู้อบด้านขวา, T_6 คือ อุณหภูมิหลังออกตู้อบ, T_7 คือ อุณหภูมิบรรยากาศภายนอก

รูปที่ 5 ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของเครื่องผลิตถ่านดูกลิ้งจากบวบโดยใช้ก๊าซไอเสียของการคาร์บอนเนชันชีวมวลร่วมกับขดลวดความร้อน

3.5 ขั้นตอนการทดสอบและเก็บข้อมูล

จุดไฟที่เตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล เปิดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ สำหรับควบคุมอุณหภูมิที่ก๊าซไอเสียตามที่ต้องการ โดยเปิดให้ระบบทำงานประมาณ 30 ถึง 40 min และเก็บข้อมูลทุก ๆ 30 min จนผักบวบสดกลายเป็นถ่านหลังจากหยุดเครื่องแล้วให้เปิดตู้อบแห้งให้นำถ่านดูกลิ้งจากผักบวบไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 hr. สำหรับตรวจสอบความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบและนำถ่านดูกลิ้งจากผักบวบไปหาคุณสมบัติของถ่านดูกลิ้งจากบวบ โดยการวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

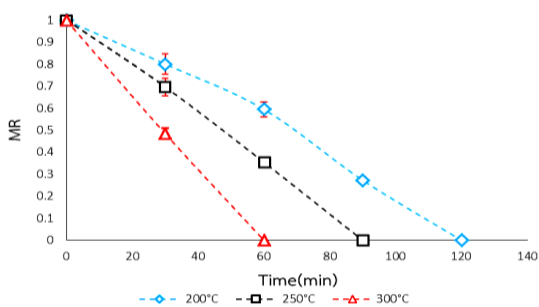
คำนวณอัตราส่วนความชื้นตาม ดังสมการที่ (3) คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) ตาม ดังสมการที่ (1) และคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานจำเพาะตาม ดังสมการที่ (4)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

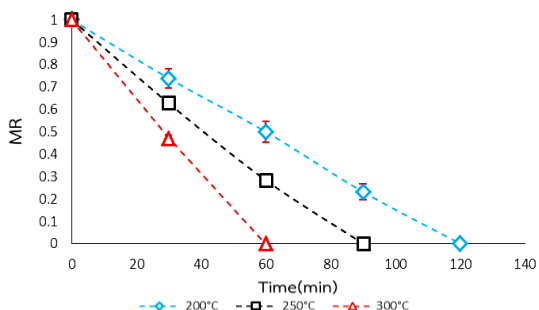
4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของถ่านดูกลิ้งจากผักบวบ

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของถ่านดูกลิ้งจากผักบวบที่อบเป็นถ่าน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาที่ใช้ในการอบผลของอุณหภูมิ พบว่า เมื่อในช่วงเวลา 0 ถึง 30 min ที่อุณหภูมิ 300°C มีอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงมากที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิสูงที่สุดที่ใช้ในการทดลองจึงทำให้น้ำระเหยออกจะผักบวบได้มาก ใช้เวลา 60 min ที่อุณหภูมิ 250°C ใช้เวลา 90 min และที่อุณหภูมิ 200°C ใช้เวลา 120 min ดังนั้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการลดของอัตราส่วนความชื้นลดลง ซึ่งผลของอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งถ่านอัดแท่ง [12] ส่วนความเร็วก๊าซไอเสีย เมื่อเพิ่มขึ้นมีผลให้อัตราส่วนความชื้นลดลงไวขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบความชันของเส้นกราฟในช่วง 30 นาที แรกของความเร็วก๊าซไอเสีย 1.22 m/s และ 2.27 m/s ซึ่งอยู่ในช่วงที่บวบยังมีความชื้นสูง แต่หากพิจารณาไปจนถึงความชื้นสุดท้ายไม่มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการลดของอัตราส่วนความชื้น ดังรูปที่

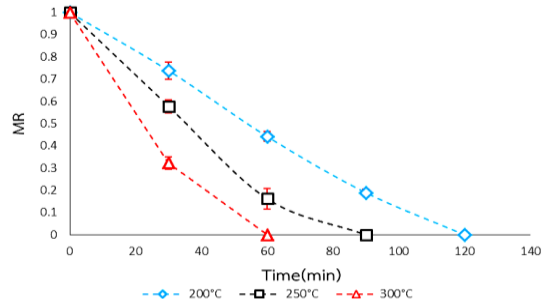
6 ถึง รูปที่ 8 เนื่องจากขีดจำกัดของดริมเมอร์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (motor) ที่ขับพัดลม จึงทำให้ช่วงความเร็วที่ใช้ต่างกันไม่มากพอและช่วงการเก็บข้อมูลก็ห่างกัน 30 นาที และวัตถุบิไม่ได้สัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง เนื่องจากถูกออกแบบไว้ในห้องอบอีกชั้นหนึ่ง สำหรับป้องกันไม่ให้เกิดการลุกไหม้จนเปลี่ยนสภาพเป็นถ่าน ส่งผลให้ไอเสียไหลเข้ามาในตู้อบจะสัมผัสผิวผนังด้านนอกของตู้ใส่วัตถุบิ ดังนั้นลักษณะการอบแห้งจึงเป็นการอบด้วยการแผ่รังสีความร้อนทำให้ผลการอบแห้งขึ้นอยู่กับตัวแปรอุณหภูมิเพียงตัวแปรเดียว ซึ่งอุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาผลิตถ่านดุกกลิ้ง ดังนั้นลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียไปยังวัตถุบิจึงเป็นลักษณะการแผ่รังสีความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิเป็นตัวแปรหลัก ซึ่งใช้เวลาสั้นลงเมื่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของวัตถุบิ (MR) ที่ช่วงเวลาใด ๆ ของอุณหภูมิ 200, 250 และ 300°C โดยใช้ความเร็วก๊าซไอเสีย 1.22 m/s



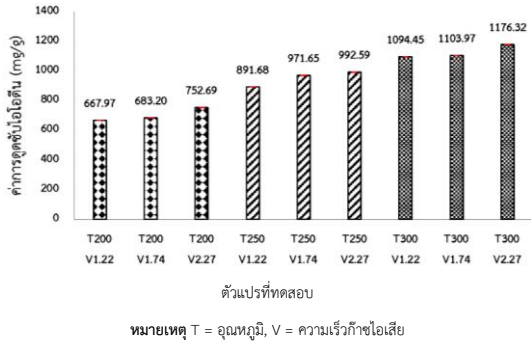
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของวัตถุบิ (MR) ที่ช่วงเวลาใด ๆ ของอุณหภูมิ 200, 250 และ 300°C โดยใช้ความเร็วก๊าซไอเสีย 1.74 m/s



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของวัตถุบิ (MR) ที่ช่วงเวลาใด ๆ ของอุณหภูมิ 200, 250 และ 300°C โดยใช้ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s

4.2 ผลการทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) ของถ่านดุกกลิ้งจากฝักบัว

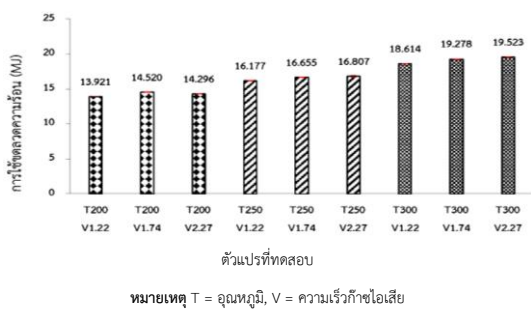
จากการทดลองการหาค่าการดูดซับค่าไอโอดีน (iodine) ของถ่าน พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) ที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อให้ความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) มีค่าเพิ่มขึ้นและที่ความเร็วก๊าซไอเสียเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้น ผลของอุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) เพิ่มขึ้น สภาวะที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุด คือ ที่อุณหภูมิ 300°C และความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s ดังรูปที่ 9 เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความเร็วสูง ดังนั้น อัตราความร้อนที่ส่งไปยังฝักบัวจึงสูงตามส่งผลให้น้ำเปลี่ยนจากเฟสเหลวเป็นเฟสไอได้ไว ซึ่งส่งผลโดยตรงกับถ่านบิเกิดรูพรุนในโครงสร้าง จึงทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสอดคล้องกับงานวิจัย [13] การผลิตถ่านจากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุด ด้วยวิธีใช้ไอน้ำความร้อนสูงและวิธีชุบด้วยซิงค์คลอไรด์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้นตามด้วยเช่นกัน



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) เทียบกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.3 การใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน

การใช้ขดลวดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิให้มีความคงที่ หลังจากที่ได้รับก๊าซไอเสียจากเตาเผาชีวมวล ซึ่งได้อุณหภูมิไม่คงที่จึงจำเป็นต้องใช้ขดลวดความร้อน ซึ่งการใช้ขดลวดความร้อนถ้าต้องการอุณหภูมิที่สูงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนจะสูงขึ้นตาม เนื่องจากอุณหภูมิสูงต้องการความร้อนมาก จึงทำให้มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนมากและที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อให้ความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นนั้นค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 10

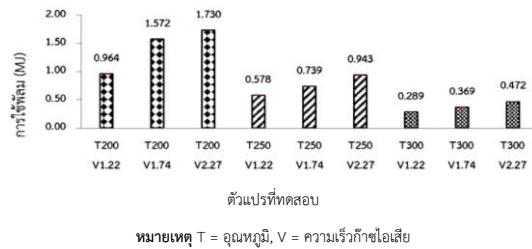


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบการใช้ขดลวดความร้อนกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.4 การใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลม

การใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลม พบว่า ผลที่ทำให้การใช้ไฟฟ้าของพัดลมเพิ่มขึ้นนั้น คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบของแต่ละอุณหภูมิที่ 200°C มีค่าการใช้

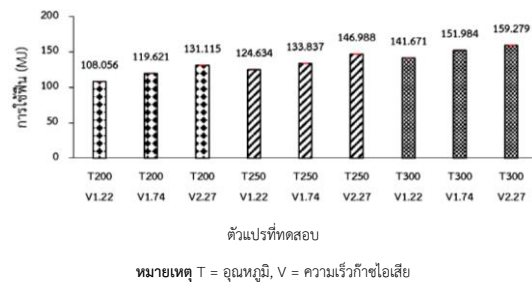
พลังงานไฟฟ้าของพัดลมมาก เนื่องจากมีระยะเวลาที่ใช้ในการอบมากที่สุดที่ 120 min และผลของความเร็วก๊าซไอเสียที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ค่าการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบการใช้พัดลมกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.5 การใช้ฟืน

การใช้ฟืนเพื่อผลิตก๊าซไอเสีย หมายถึง ก๊าซไอเสียสำหรับใช้กับฝักบัว ซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้ปริมาณฟืนที่ไม่เท่ากัน โดยปริมาณการใช้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองชนิด คือ อุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียที่ใช้ในการอบ เช่น ถ้าต้องการอุณหภูมิที่สูงจะใช้ปริมาณฟืนที่มากขึ้นและหากใช้ความเร็วก๊าซไอเสียมากขึ้นจะทำให้ฟืนนั้นหมดไวขึ้น จึงต้องใช้ปริมาณฟืนที่มากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 12

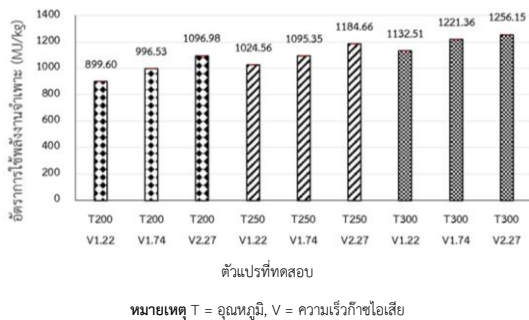


รูปที่ 12 การเปรียบเทียบการใช้ฟืนกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.6 อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ

อัตราการใช้พลังงานจำเพาะในการ ศึกษาผลตัวแปรควบคุมในการผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว พบว่า

เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอัตราการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น ผลกระทบหลัก คือ การใช้พลังงานฟืน ร่องลงมา คือ การใช้ขดลวดความร้อนและน้อยที่สุด คือ การใช้พลังงานพัดลม ดังรูปที่ 13 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง โดยอบแห้งเนื้อหมูแดดเดียวที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 °C และความเร็วมวลภายในห้องอบแห้ง 1.0, 3.0 และ 6.0 m/s พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วมวลส่งผลให้อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น [14]



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานจำเพาะกับตัวแปรที่ทดสอบ

5. สรุป

การผลิตถ่านดุกกลิ้งจากฝักบัว โดยใช้ผลตัวแปรควบคุม 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิและความเร็วของก๊าซไอเสีย จากการทดสอบผลตัวแปรควบคุมในการผลิตถ่านดุกกลิ้งจากฝักบัว โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 °C ความเร็วของก๊าซไอเสีย 1.22, 1.74 และ 2.27 m/s พบว่า

- เมื่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการลดของอัตราส่วนความชื้นลดลง ซึ่งอุณหภูมิก๊าซไอเสีย 200, 250 และ 300 °C ใช้เวลาผลิตถ่านดุกกลิ้ง 120, 100 และ 60 นาที ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิคงที่และเพิ่มความเร็วใช้เวลาผลิตถ่านดุกกลิ้งเท่ากันเนื่องจากวัตถุดิบไม่ได้สัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง

- เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นทำให้ค่าไอโอดีนมีค่าสูงขึ้น

- เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเมื่อคำนวณสัดส่วนการใช้พลังงานพลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน พลังงานไฟฟ้าของพัดลมและการใช้ฟืนที่สภาวะที่ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุดที่ 300 °C ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s ได้สัดส่วนร้อยละ 10.89, 0.26 และ 88.84 ตามลำดับ

- ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุดที่ 300 °C ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s มีค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงถึง 1176.32±21.562 mg/g ซึ่งมีค่าสูงใกล้เคียงกับผงถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทศา จังหวัดระนอง ที่ใช้อุณหภูมิ 600 °C ใช้เวลา 2 hr. ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) 1,247 mg/g [15]

- งานครั้งต่อไป ควรวิจัยการผลิตถ่านดุกกลิ้งจากส่วนประกอบอื่น ๆ ของบัว เช่น ดอก ใบและก้านใบ เป็นต้น และควรทดสอบโดยให้ส่วนประกอบบัวสัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง ทั้งนี้ก็ต้องหาจุดสภาวะที่ถ่านบัวเกิดเป็นถ่านหากก๊าซไอเสียมีปริมาณออกซิเจนเจือปนจนเพียงพอที่จะเกิดการลุกไหม้ของถ่านบัวได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่เอื้ออำนวยสถานที่ในการจัดเก็บข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mai Ngam Subdistrict Municipality. Nong Bua Public Park of Nong Luang. [Internet]. [28 November 2024]; Available from: Online., <https://www.maingam.go.th/trv-otp-detail?page=4&id=730> (In Thai)
- [2] Boonyang K. Developing grassroot economy by creating value of royal lotus of communities in Yokkrabat Subdistrict, Samngao District, Tak Province. *Academy Journal of Northern*. 2023;10 (2):27-43.

- [3] Pianjing P, Punyakhom P, Prapreud W, Kitprathang N, Phromsat Ph, Wites J. Development of odor absorbed charcoal lump product from nipa palm fruit. Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology). 2023;18(2):14-29. (In Thai)
- [4] Kengkhetwit C. Investigation of the effect of burning temperature range on physical changes and iodine value in mangosteen odor adsorbing charcoal. [master's thesis]. Bangkok: Mahanakorn University of Technology; 2014. (In Thai)
- [5] Sinsaard A. Development of activated charcoal from a coconut shell kiln. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal. 2017;10(2):95-108. (In Thai)
- [6] Li Q, Liu S, Wang L, Chen F, Shao J, Hu X. Efficient nitrogen doped porous carbonaceous CO₂ adsorbents based on lotus leaf. Journal of Environmental Sciences. 2021;103:268-78.
- [7] Thai Industrial Standards Institute. Community Product Standard for Odor-Absorbing Charcoal (M P Ch. 180/2003) [Internet]. 2013 [24 July 2024]; Available from: <https://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/standard1.php> (In Thai)
- [8] Buaklee A. Design and fabrication of lotus leaves cutting machine. [master's thesis]. Pathum Thani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2018. (In Thai)
- [9] Rattanapan S, Pengchaem P, Kongsun P. Preparation and characterization of mangosteen peel activated carbon. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports (AJSTR). 2014;17(3):13-21. (In Thai)
- [10] Chunkaew P, Tavata A, Khadwilard A, Sriudom Y. Bananas drying performance with a developed hot air dryer using waste heat from charcoal production process. RMUTP Research Journal. 2018;12(1):147-58. (In Thai)
- [11] Chunkaew P, Khadwilard A, Thawonngamyingsakul C. Drying bananas with a modified hot air dryer using waste heat from a 200 liter kiln. Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal). 2017;10(3):1-12.
- [12] Congpupa P, Tapie O, Saadchom P. Effect of drying temperatures on charcoal briquettes drying using a combined solar energy and far-infrared radiation dryer, and a far-infrared radiation dryer. RMUTP Research Journal Sciences and Technology. 2016;10(1):77-93. (In Thai)
- [13] Niamsewak P. Comparison of adsorption capacity of activated carbon obtained from different production methods and materials. Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal. 2010;2(2):11-18. (In Thai)
- [14] Somsila P, Buntham E, Homjumba T. Development of a dryer using biomass as fuel. PSRU Journal of Industrial Technology and Engineering. 2022;4(1):107-24.
- [15] Yoomee P. Preparation of high surface area activated charcoal from wood charcoal powder using a dry chemical activation process. KKU Science Journal. 2015;43(4):788-98.

การออกแบบและพัฒนาผนังเปลือกอาคารเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลอเนกประสงค์

จรัส รุ่งเรืองสรการ¹ จงจิตร หิรัญลาภ¹ ชัยพร สุภาหิตานุกุล^{1*} สุมเมธ สติชัยบุญอนันต์¹ และโจเซฟ เคดารี²
charlpn2001@gmail.com¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com¹, chaiporn.sup@gmail.com¹,
sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพมหานครบุรี

Received: November 14, 2024 Revised: December 23, 2024 Accepted: December 25, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ดำเนินการพัฒนาผนังเปลือกอาคาร (facade) โดยการออกแบบติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์แบบโมดูลอเนกประสงค์เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบและติดตั้ง โดยมุ่งเน้นไปที่การสร้างความทันสมัยของผนังเปลือกอาคาร พร้อมทั้งการประเมินประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์และประสิทธิภาพในการลดความร้อนของอาคารงาน โดยผนังเปลือกอาคารประกอบด้วยผนังด้านนอกเป็นแผ่นคอมโพสิตและติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 150 วัตต์ ผนังด้านข้างและด้านหลังทำด้วยแผ่นคอมโพสิตและติดตั้งโคมไฟขนาดมาตรฐานต่อโมดูล 1.20 x 2.40 x 0.35 เมตร มีการติดตั้งโมดูลหันไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ มีการออกแบบเปรียบเทียบการเจาะช่องเปิดและปิดช่องเปิดของโมดูล และทำการตรวจวัดผลเป็นระยะเวลา 120 วัน ค่าความร้อนที่ส่งผ่านรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิที่ร้อนได้รับการระบายความร้อนด้วยความเร็วลมภายในโมดูล และค่าการผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ในผนังเปลือกอาคารแบบเจาะช่อง ผลิตไฟฟ้าได้ 0.3017 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งมากกว่าของผนังเปลือกอาคารแบบไม่เจาะช่อง ซึ่งผลิตไฟฟ้าได้ 0.27792 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน โดยค่าการผลิตกระแสไฟฟ้าจะผันแปรไปตามอุณหภูมิ กล่าวคือวันที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าความร้อนที่ส่งผ่านรังสีอาทิตย์สูงและมีค่าการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สูงตามไปด้วย ทั้งนี้อุณหภูมิของโมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศมีค่าน้อยกว่าโมดูลที่ไม่เจาะช่องระบายอากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของทั้ง 2 โมเดลอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียส ดังนั้นการออกแบบสำหรับผนังเปลือกอาคารร่วมกับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์และการเจาะช่องระบายอากาศ แบบโมดูลอเนกประสงค์นี้ เป็นแนวทางเลือกใหม่ในการออกแบบภายนอกของอาคารที่อยู่อาศัยอย่างยั่งยืน ในการผลิตพลังงานสะอาดและช่วยลดความร้อนของผนังอาคาร

คำสำคัญ: นวัตกรรมอาคารเขียว ผนังเปลือกอาคารระบายอากาศ การลดการสะสมความร้อน

Design and development of a multi-purpose modular solar cell facade

Charan Rungruengsorakarn¹, Jongjit Hirunlabh¹, Chaiporn Suphahitanukool^{1*}, Sumate Sathibunanan¹
and Joseph Khedari²

charlpn.2001@gmail.com¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com¹, chaiporn.sup@gmail.com^{1*},
sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khadari@hotmail.com²

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

²Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi University

Received: November 14, 2024 Revised: December 23, 2024 Accepted: December 25, 2024

Abstract

This research focuses on the development of building facades by designing and installing multifunctional modular solar panels to facilitate assembly and installation. The aim is to modernize the building facade while evaluating the efficiency of electricity production from the solar panels and the effectiveness of heat reduction in the building. The building facade consists of an outer wall made of composite panels with 150-watt solar panels installed. The side and rear walls are made of composite panels and insulated with standard foam insulation for the module, measuring 1.2 meters wide, 2.4 meters long, and 0.3 meters high. The modules are installed facing southwest. A comparative design was made for opening and closing the module openings, and measurements were taken over a period of 120 days. The heat flux transmitted through solar radiation was measured, along with the temperature and electricity production from the solar panels. The results of the efficiency tests for electricity production from solar energy in the perforated facade showed an average of 0.3017 kilowatt-hours per day, which is higher than the average of 0.27792 kilowatt-hours per day for the non-perforated facade. The electricity production varies with temperature; on hotter days, the heat flux transmitted through solar radiation is higher, resulting in increased electricity production from solar energy. Additionally, the temperature of the ventilated modules is significantly lower than that of the non-ventilated modules, with a maximum temperature difference of 2 degrees Celsius between the two modules. Therefore, the design of the building facade, combined with the installation of solar panels and the ventilation openings of this multifunctional module, represents a new approach to the sustainable exterior design of residential buildings, contributing to clean energy production and reducing heat in building walls.

Keywords: Green building innovation, Ventilation facade, Heat gain reduction

1. บทนำ

Facade เป็นคำฝรั่งเศส ที่หมายถึงโฉมหน้า ปัจจุบันมีความหมายที่ครอบคลุมส่วนที่เกี่ยวข้องกับอาคารทั้งหมด เช่น หน้าต่าง กันสาด ชายคา ระเบียง ช่องเปิดต่าง ๆ รวมถึง สิ่งสิ่งตกแต่งปลีกย่อยอื่น ๆ เช่น เสาพอกลายปูน บัวประดับผนัง รูปปั้น และประติมากรรม ซึ่งในภาษาสถาปัตยกรรมเราจะเรียกสิ่งเหล่านี้ว่า “เปลือกอาคาร” และเป็นงานด้านสถาปัตยกรรมที่ผ่านกระบวนการการคิดการออกแบบในเชิงลึกมาอย่างถี่ถ้วนจนเกิดเป็นหน้าตาของอาคารโดยทั่วไปมีเปลือกอาคารอยู่ 2 ประเภทคือ 1). เปลือกอาคารทึบ (Opaque facade) ซึ่งส่วนใหญ่สร้างจากชั้นของวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น อิฐ หิน แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป แผ่นโลหะหุ้มฉนวน และโครงเหล็กที่ขึ้นรูปเย็บ เปลือกอาคารทึบอาจรวมถึงช่องเปิดหรือหน้าต่างที่เจาะไว้ด้วย และ 2) เปลือกอาคารกระจก (Glazed facade) เช่น ผนังม่านหรือด้านอาคารร้านค้า ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยวัสดุกระจกที่โปร่งใสหรือโปร่งแสงและส่วนประกอบโครงเหล็ก สมบัติของเปลือกอาคารที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ได้แก่ การอนุญาตให้แสงธรรมชาติเข้าสู่อาคาร การป้องกันความร้อนจากแสงแดดที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้ามาในอาคาร การเก็บความร้อนภายในมวลของผนัง การป้องกันการถ่ายเทความร้อนผ่านการปรับปรุงฉนวน การป้องกันอากาศหรือความชื้นไม่ให้ผ่านเข้ามาทางด้านอาคาร และการอนุญาตให้มีการระบายอากาศตามธรรมชาติเพื่อทำให้ภายในอาคารเย็นลง สมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศเป็นอย่างมาก รวมถึงฟังก์ชันของอาคาร รูปแบบการใช้งาน การหันหน้าไปทางทิศทาง และภาระของอุปกรณ์ [1] เปลือกผนังอาคารเป็นแนวในการป้องกันระหว่างพื้นที่อาคารกับสภาพแวดล้อมภายนอก โดยทำให้ผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารมีความสะดวกสบายทั้งในด้านอุณหภูมิ การมองเห็น และเสียง ดังนั้นการใช้ผนังอาคารควรเป็นแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารนั้น ๆ และใช้พลังงานน้อยที่สุด เพื่อให้บรรลุประสิทธิภาพสูงนี้ [2] การออกแบบเปลือกผนังอาคารมีบทบาทสำคัญ เนื่องจากประกอบกับการสร้างอัตลักษณ์เฉพาะตัวที่สวยงามให้กับอาคาร การ

ตกแต่งเปลือกอาคารแบบ “ห่อหุ้มทั้งผนัง” (Cladding facade) ด้วยวัสดุที่มีความสวยงาม แข็งแรง และทนทานต่อสภาพอากาศ [3] การตกแต่งเปลือกอาคารด้วยการผสมผสานวัสดุที่หลากหลาย เป็นการออกแบบที่ท้าทาย เน้นความแปลกใหม่ จะเลือกวัสดุที่คล้ายกัน หรือแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงเลยก็ได้ นักออกแบบส่วนใหญ่เข้าใจถึงอิทธิพลของเปลือกผนังอาคารในการสร้างความแตกต่างระหว่างอาคารและทางสถาปัตยกรรม จึงให้ความสำคัญในการออกแบบเปลือกอาคาร เท่ากับองค์ประกอบอื่น ๆ ทางด้านสถาปัตยกรรม ตั้งแต่ยุคโบราณจนถึงยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม การเปลี่ยนแปลงของวัสดุและเทคนิคการก่อสร้าง เช่น การใช้เหล็กและกระจก ทำให้อาคารมีความโปร่งเบาและความสวยงามมากขึ้น ในยุคปัจจุบันการออกแบบผนังเปลือกอาคาร ได้วิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องไม่เพียงแต่เน้นความงามและสุนทรียศาสตร์ แต่ยังมีมุ่งเน้นการใช้งานที่ยั่งยืน ประหยัดพลังงาน และตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งนวัตกรรมทางเทคโนโลยี ช่วยให้การออกแบบเปลือกอาคารสามารถปรับตัวตามสภาพอากาศและการใช้งานของอาคารได้ดีขึ้น [2,3] ทำให้เปลือกอาคารกลายเป็นส่วนสำคัญในการสร้างอาคารที่มีความสวยงาม ประหยัดพลังงาน และยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม [4,5,6,7] ดังนั้นการออกแบบเปลือกผนังอาคารจึงมีบทบาทสำคัญ เนื่องจากนักออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรหลายอย่าง เช่น การเป็นฉนวนความร้อน การใช้แสงธรรมชาติ การป้องกันแสงแดด การสะท้อนแสง เสียง และคุณภาพอากาศภายในอาคาร เพื่อออกแบบด้านอาคารสำหรับสภาพแวดล้อมภายในที่ยั่งยืน [1] เช่น การนำประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบยั่งยืนและยังคงประโยชน์ในการลดความร้อนภายในอาคาร จึงเป็นแนวทางในการศึกษารายนี้

2. วัตถุประสงค์

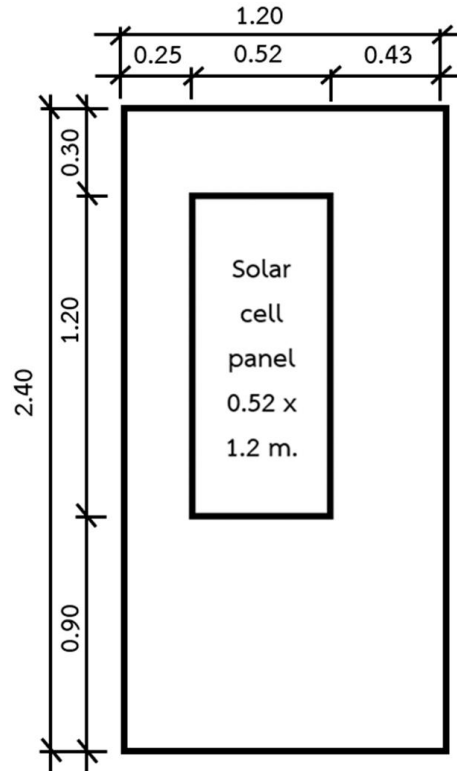
2.1 ศึกษาการออกแบบ สร้าง เพื่อพัฒนาของผนังเปลือกอาคาร (facade) เซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลอเนกประสงค์

2.2. ศึกษาประสิทธิภาพและประเมินความเป็นไปได้ของผนังเปลือกอาคาร (facade) เซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลอเนกประสงค์

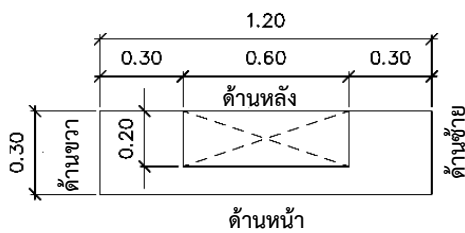
3. วิธีการดำเนินการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างผนังเปลือกอาคาร (facade) เซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลอเนกประสงค์ ในการศึกษานี้ ใช้วัสดุแผ่นคอมโพสิตหนา 0.6 มิลลิเมตร ภายในกรุด้วยโฟมทั้ง 3 ด้าน มีความหนา ด้านละ 0.05 เมตร แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 0.52 x 1.2 เมตร ยี่ห้อ Full Solar, Solar Module Type สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 150 watt , Short Circuit Current 8.74 A, Open Circuit Voltage 22.7 V

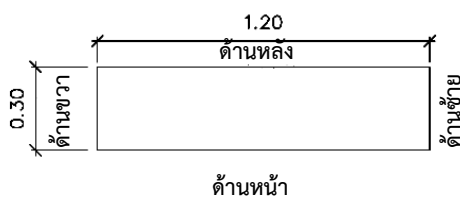
3.2 ผนังเปลือกอาคาร (facade) ศึกษา 2 รูปแบบ โดยแบบที่ 1 ได้ออกแบบผนังเปลือกอาคาร แบบไม่เจาะช่อง (Modular Solar Cell Facade, MSF) ขนาดกว้าง 1.2 เมตร ยาว 2.4 เมตร สูง 0.3 เมตร และแบบที่ 2 ผนังเปลือกอาคารแบบเจาะช่อง (Modular Vented Solar Cell Facade, MSF-V) ขนาดกว้าง 1.2 เมตร ยาว 2.4 เมตร สูง 0.3 เมตร มีขนาดของช่องเจาะ 0.04 x 0.24 เมตร จำนวน 11 ช่อง และอีกหนึ่งช่อง มีขนาดของช่องเจาะ 0.06 x 1.5 เมตร โดยรูปที่ 1 และ 2 แสดงผนังเปลือกอาคาร (facade) ที่ใช้ศึกษาการออกแบบและสร้างโมดูลทั้ง 2 แบบไม่เจาะช่อง (MSF) และแบบเจาะช่อง (MSF-V)



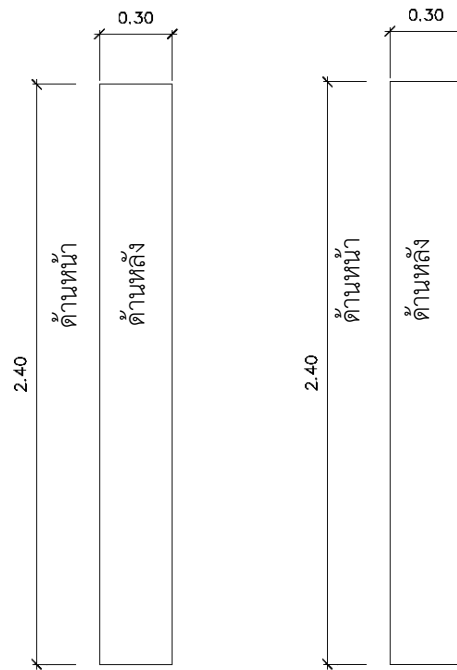
ค) ด้านหน้า



ก) ด้านบน



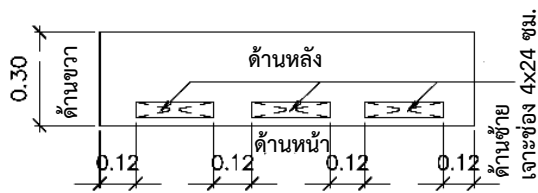
ข) ด้านล่าง



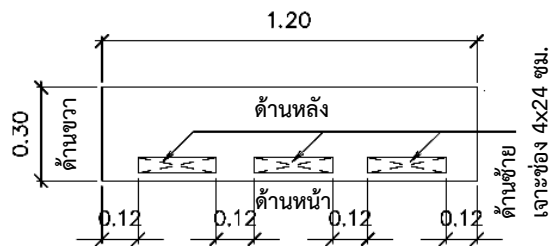
ง) ด้านซ้าย

จ) ด้านขวา

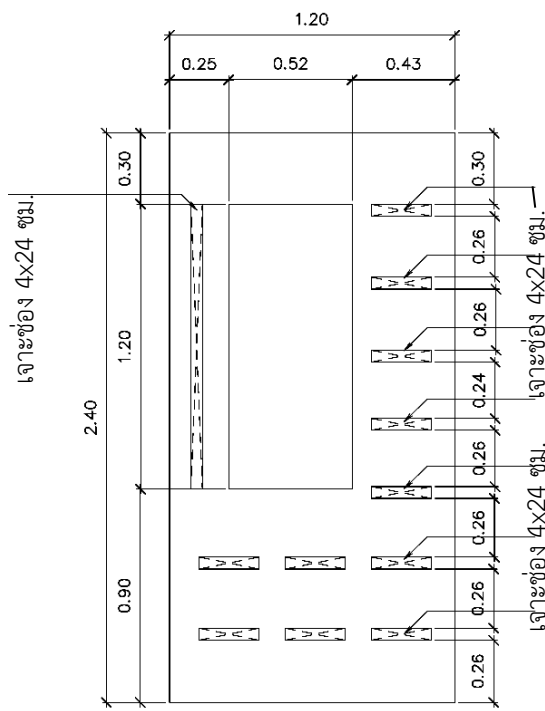
รูปที่ 1 ผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบไม่เจาะช่อง (MSF) ที่ใช้ศึกษาการออกแบบและสร้างโมดูล



ก) ด้านบน



ข) ด้านล่าง



ค) ด้านหน้า

รูปที่ 2 ผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบเจาะช่อง (MSF-V) ที่ใช้ศึกษาการออกแบบและสร้างโมดูล

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

- เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ
- เซนเซอร์วัดการไหลของความร้อน
- เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน

- เซนเซอร์วัดการแผ่รังสีอาทิตย์
- สายเทอร์โมคัปเปิลชนิดแคลมป์ทรานสดิวเซอร์
- และเครื่องบันทึกข้อมูลแบบไร้กระดาษ

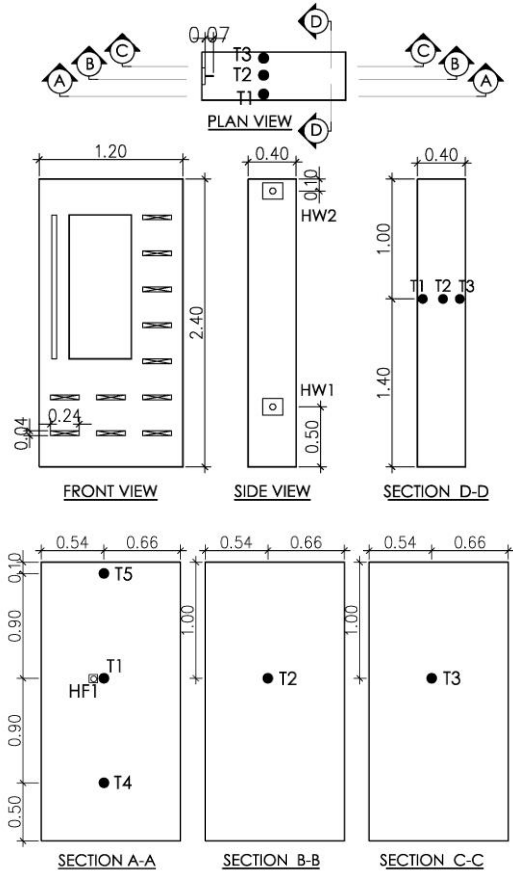
การติดตั้งตำแหน่งเครื่องมือวัดของ MSF-V โดยกำหนดตัวแปรของตำแหน่งวัดค่าของ MSF-V ดังนี้

- T₁ อุณหภูมิของ (facade) ที่ด้านหลังแผ่นโซลาร์เซลล์
- T₂ อุณหภูมิของ (facade) ที่ช่องอากาศ
- T₃ อุณหภูมิของ (facade) ที่ผนังโพนั (แทนผนังอาคาร)
- T₄ อุณหภูมิของ (facade) ที่ผนังคอมโพสิต (ตำแหน่งด้านล่าง)
- T₅ อุณหภูมิของ (facade) ที่ผนังคอมโพสิต (ตำแหน่งด้านบน)
- HF₁ ความร้อนที่ด้านหลังแผ่นโซลาร์เซลล์
- HW₁ ความเร็วลมที่ตำแหน่งด้านล่าง
- HW₂ ความเร็วลมที่ตำแหน่งด้านบน

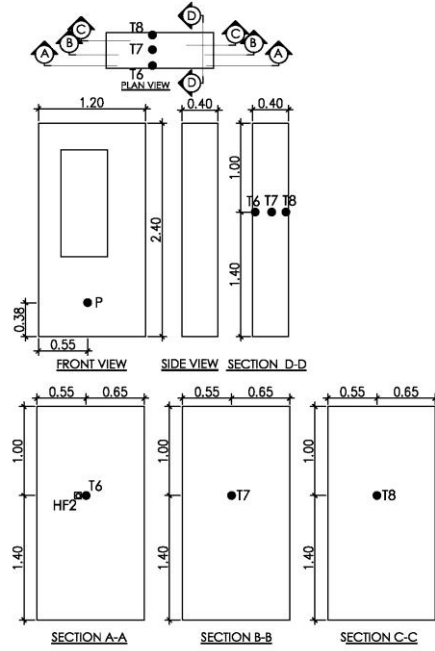
การติดตั้งเครื่องมือของ MSF โดยกำหนดตัวแปรของ ตำแหน่งวัดค่าของ MSF ดังนี้

- T₆ อุณหภูมิของ (facade) ที่ด้านหลังแผ่นโซลาร์เซลล์
- T₇ อุณหภูมิของ (facade) ที่ช่องอากาศ
- T₈ อุณหภูมิของ (facade) ที่ผนังโพนั (แทนผนังอาคาร)
- HF₂ คือ วัดความร้อนที่ด้านหลังแผ่นโซลาร์เซลล์
- P รังสีอาทิตย์ที่ผนังคอมโพสิตภายนอกอาคาร
- TA อุณหภูมิภายนอกอาคาร ติดตั้งด้านนอกที่ด้านข้างของโมดูล
- HA ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกอาคาร ติดตั้งด้านนอกที่ด้านข้างของโมดูล

โดยรูปที่ 3 และ 4 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องวัดของผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบเจาะช่อง MSF-V และแบบไม่เจาะช่อง MSF



รูปที่ 3 ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องวัดของผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบเจาะช่อง MSF-V



รูปที่ 4 ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องวัดของผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบไม่เจาะช่อง MSF

3.4 ติดตั้งผนังจำลองของ (facade) ทั้ง 2 รูปแบบ โดยติดตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี ความสูงจากระดับพื้นดิน 4.0 เมตร พร้อมติดตั้งเครื่องมือวัด เพื่อเก็บข้อมูลการทดสอบ



รูปที่ 5 การติดตั้งผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบไม่เจาะช่อง (MSF) และแบบเจาะช่อง (MSF-V) ทิศตะวันตกเฉียงใต้ของอาคาร

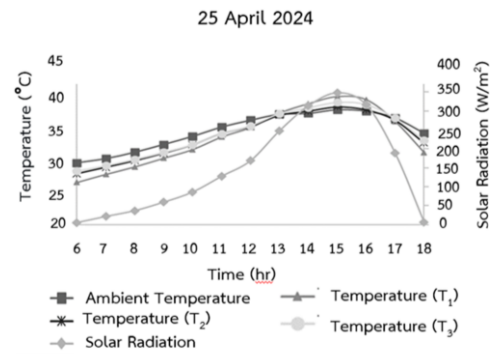
4. ผลการศึกษาการออกแบบและสร้างโมดูล

การวิจัยนี้ได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล เป็นระยะเวลา 4 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2567 โดยในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอ ผลการวิจัยภายใต้ 2 สภาวะ กรณีที่ 1 ทดสอบในวันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2567 ซึ่งเป็นวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และกรณีที่ 2 ทดสอบในวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2567 ซึ่งเป็นวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก มีฝนตกบาง ช่วงเวลา เพื่อเปรียบเทียบผลของวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์ แตกต่างกัน โดยพิจารณาผลการศึกษาดังรายละเอียด ต่อไปนี้

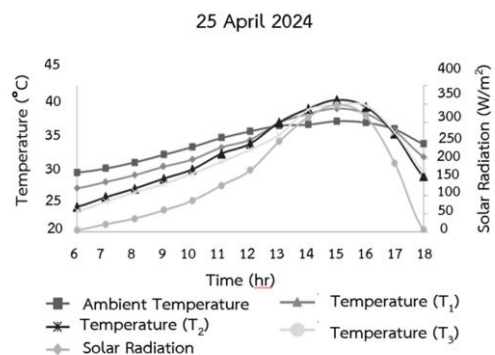
4.1 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วงเวลาที่รังสี อาทิตย์สูงสุด 14:00 ถึง 15:00 น. ข้อมูลแสดงให้เห็น ว่าในช่วงเวลาที่รังสีอาทิตย์สูงสุด โดยเฉพาะระหว่าง 14:00 ถึง 15:00 น. โดยกรณี MSF นั้น อุณหภูมิที่จุด T_7 ในโมดูลสูงกว่าที่จุด T_6 บ่งชี้ว่าการระบายอากาศที่ ไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการสะสมความร้อน ส่งผลให้ อุณหภูมิในบางส่วนของโมดูลสูงขึ้น ความร้อนที่สะสมที่ จุด T_7 บ่งบอกถึงความไม่สมดุลของความร้อนอย่างมี นัยสำคัญ เนื่องจากการไหลของอากาศ ที่ไม่เพียงพอ ทำให้บางส่วนของโมดูล มีการเก็บกักความร้อนมากขึ้น ดังรูปที่ 5

ในทางตรงกันข้ามในกรณี MSF-V จะแสดง รูปแบบความร้อนที่แตกต่างกัน ในช่วงแรกเมื่ออุณหภูมิ ภายนอกต่ำ อุณหภูมิที่จุด T_1 จะต่ำกว่าที่จุด T_2 และ ตำแหน่ง T_3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิที่จุด T_1 มีการ ระบายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิภายนอกสูงขึ้นที่ตำแหน่ง T_1 กลายเป็นจุด ที่ร้อนที่สุด จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการ ระบายอากาศภายใน หรือเจาะช่องที่ออกแบบอย่างดี เพื่อระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิภายนอก สูงขึ้น ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับช่วงเวลา 15.00 น.ของวันที่ 25 เมษายน 2567 อุณหภูมิสูงสุด ภายในผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบ MSF-V



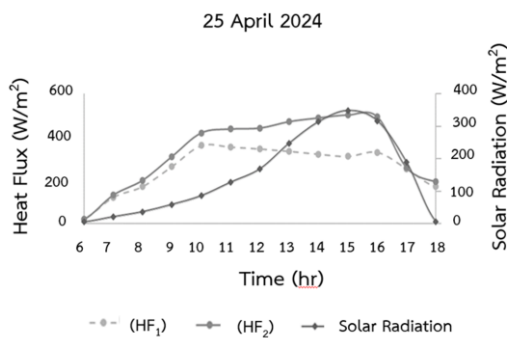
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับช่วงเวลา 15.00 น.ของวันที่ 25 เมษายน 2567 อุณหภูมิสูงสุด ภายในผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบ MSF

4.2 ความร้อน (Heat Flux)

HF_1 จุดวัดความร้อนที่ด้านหลังแผงโซลาร์ เซลล์ของ MSF-V

HF_2 จุดวัดความร้อนที่ด้านหลังแผงโซลาร์ เซลล์ของ MSF

ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า MSF จะมีค่าความ ร้อนที่สูงกว่า MSF-V แสดงให้เห็นว่าการเจาะช่อง ระบายอากาศของโมดูล มีผลต่อค่าความร้อนของแผง โซลาร์เซลล์ ซึ่งค่าความร้อนของแผงโซลาร์เซลล์จะ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ เมื่อความร้อน ของแผงโซลาร์เซลล์ยิ่งสูงมาก จะส่งผลให้ประสิทธิภาพ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ลดลง

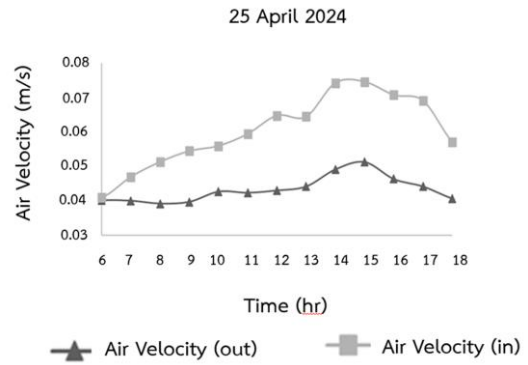


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับช่วงเวลาของวันที่ 25 เมษายน 2567 ช่วงเวลา 15.00 น. ความร้อนด้านหลังแผ่นโซลาร์เซลล์ของโมดูลอเนกประสงค์สูงสุด

4.3 ความเร็วของอากาศ

ความแปรผันของความเร็วอากาศขาเข้าแสดงให้เห็นว่าความเร็วของอากาศที่เข้ามาใน MSF-V มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน โดยมีความเร็วสูงสุด ที่บันทึกได้ระหว่างเวลา 14:00 น. ถึง 15:00 น. เป็นช่วงเวลาที่สูงสุดนี้ น่าจะตรงกับช่วงเวลาที่มีการรังสีอาทิตย์สูงสุดทำให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น และการเคลื่อนไหวของอากาศภายในโมดูลสูงขึ้นเกิดเป็นไหลของอากาศแบบธรรมชาติเพื่อลดความร้อนของแผงโซลาร์เซลล์ และป้องกันการสะสมความร้อนภายในโมดูล การแลกเปลี่ยนอากาศอย่างต่อเนื่องนี้ช่วยควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร ทำให้โมดูลมีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากขึ้น

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าการออกแบบผนังเปลือกอาคารแบบเจาะช่อง MSF-V เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศ ด้วยการใช้ประโยชน์จากรูปแบบการไหลของอากาศตามธรรมชาติ การออกแบบอาคาร สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารได้อย่างมาก ดังรูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับช่วงเวลา



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับช่วงเวลาของวันที่ 25 เมษายน 2567 ช่วงเวลา 15.00 น. ความเร็วลมเข้า 0.05 เมตรต่อวินาที และความเร็วลมออก 0.07 เมตรต่อวินาที ช่วยระบายอากาศภายในโมดูลอเนกประสงค์

4.4 กระแสไฟฟ้า

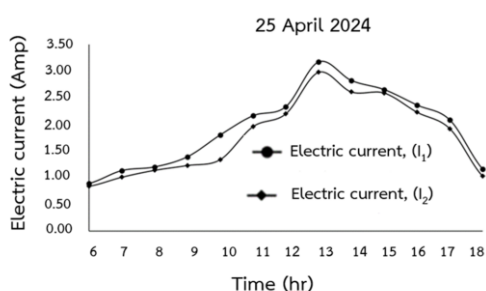
การวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าในผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบ MSF-V และ MSF ประสิทธิภาพของโมดูลพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้ามีความสัมพันธ์อย่างมากกับการออกแบบ โดยเฉพาะในเรื่องของการระบายอากาศผลการวิจัย แสดงให้เห็นว่าโมดูลแบบ MSF-V ผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า MSF ดังรูปที่ 10

ผลกระทบของการระบายอากาศต่ออุณหภูมิการระบายอากาศและการระบายความร้อนที่ดีขึ้น MSF-V ผลกระทบของการระบายอากาศต่ออุณหภูมิการระบายอากาศและการระบายความร้อนที่ดีขึ้น MSF-V ช่วยให้อากาศไหลเวียนได้ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่การระบายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลของการระบายความร้อนนี้มีความสำคัญ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานอาทิตย์เป็นไฟฟ้ามักจะลดลง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า MSF-V มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสูงกว่า เนื่องจากการกระจายความร้อนได้ดี

ทฤษฎีการจัดการความร้อน การจัดการความร้อนในระบบโฟโตโวลตาอิก ทฤษฎีการจัดการความร้อนในระบบโฟโตโวลตาอิกเสนอว่า การรักษาอุณหภูมิการทำงานที่ต่ำกว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์

แสงอาทิตย์ได้ เมื่อแผงโซลาร์เซลล์เย็นลง พวกมันสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้น ข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับการพบว่า MSF-V ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าเนื่องจากความสามารถในการรักษาอุณหภูมิที่ต่ำกว่า MSF

การพาความร้อนและการไหลของกระแสไฟฟ้า บทบาทของการพาความร้อน หลักการของการพาความร้อน มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์นี้ เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านโมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศ มันจะนำความร้อนส่วนเกินออกไป ส่งผลให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง กระบวนการนี้เพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยา Photovoltaic (PV) ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความเร็วของอากาศที่ออกจากโมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศสอดคล้องกับความเร็วของอากาศที่เข้ามา ซึ่งมีความสำคัญต่อการรักษาการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลิตกระแสไฟฟ้ากับช่วงเวลาของวันที่ 25 เมษายน 2567 แบบ MSF-V ผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า MSF

จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2567 ซึ่งเป็นวันที่มีอุณหภูมิสูงสุดของช่วงการทดลอง 120 วัน แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างโมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศ T₁ กับโมดูลที่ไม่เจาะช่องระบายอากาศ T₆ โดยใช้ข้อมูลจากอุณหภูมิของอากาศ (ambient temperature) และการแผ่รังสีอาทิตย์ (solar radiation) สามารถสรุปและอภิปรายได้อย่างละเอียดดังนี้

5. อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการศึกษาอุณหภูมิระหว่าง MSF-V (T₁) กับ MSF (T₆) โดยใช้ข้อมูลจากอุณหภูมิของอากาศ (ambient temperature) และการแผ่รังสีอาทิตย์ (solar radiation) สามารถสรุปและอภิปรายได้อย่างละเอียด ดังนี้

การวิเคราะห์อุณหภูมิของอากาศ (ambient temperature) อุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารเริ่มต้นที่ประมาณ 18 องศาเซลเซียส ที่เวลา 8:00 น. จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 37 องศาเซลเซียส ที่เวลา 15:00 น. และคงตัวในระดับนี้ จนถึงเวลาประมาณ 18:00 น. ซึ่งแสดงถึงความร้อนในสภาพแวดล้อมที่มีการแผ่รังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลานี้ อุณหภูมิอากาศมีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีอาทิตย์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อความร้อนภายในโมดูลทั้งสองแบบ รังสีอาทิตย์ (solar radiation) รังสีอาทิตย์เริ่มต้น ที่ประมาณ 50 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 8:00 น. จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุด ที่ประมาณ 160 วัตต์ต่อตารางเมตร ในช่วงเวลา 13:00 น. และคงที่ในระดับนี้ จนถึงประมาณ 15:00 น. หลังจากนั้นลดลงจนถึงระดับประมาณ 140 วัตต์ต่อตารางเมตร เวลา 18:00 น. รังสีอาทิตย์สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในโมดูลทั้งสองแบบ โดยโมดูลที่ไม่เจาะช่องมีการเพิ่มอุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าตามรังสีอาทิตย์

การเปรียบเทียบระหว่างโมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศ T₁ กับโมดูลที่ไม่เจาะช่องระบายอากาศ T₆ ซึ่งโมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศ T₁ เริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 22 องศาเซลเซียส ที่เวลา 8:00 น. จากนั้นอุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่จุดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 36 องศาเซลเซียส ที่เวลา 15:00 น. หลังจากนั้นอุณหภูมิในโมดูลลดลงเล็กน้อยและคงที่ในระดับนี้ไปจนถึงสิ้นสุดการวัดในเวลา 18:00 น. ในโมดูลที่ไม่เจาะช่องระบายอากาศ T₆ เริ่มต้นที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับ T₁ ที่ 22 องศาเซลเซียส แต่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงกว่า T₁ เล็กน้อย อุณหภูมิสูงสุดของ T₆ อยู่ที่ประมาณ 37 องศาเซลเซียส เวลา 15:00 น. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของ T₁ ประมาณ 1 องศา

เซลเซียส หลังจากนั้นอุณหภูมิของ T_6 ค่อย ๆ ลดลง และคงที่ในระดับเดียวกับ T_1 ที่ประมาณ 36 องศาเซลเซียส ในเวลา 18:00 น.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบายความร้อน MSF-V (T_1) แสดงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ช้ากว่า MSF ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีกว่า ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของ T_1 ต่ำกว่า T_6 อยู่ประมาณ 1 องศาเซลเซียส ใน MSF (T_6) มีการสะสมความร้อนมากกว่าเล็กน้อย ส่งผลให้มีอุณหภูมิภายในสูงกว่าช่วงบ่าย ซึ่งเป็นผลจากการที่อากาศภายในไม่สามารถถ่ายเทออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากับ MSF-V

โมดูลแบบ MSF และ MSF-V มีการสะสมความร้อนจากรังสีแสงของดวงอาทิตย์ใกล้เคียงกัน แต่ MSF-V (T_1) สามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าทำให้อุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลาที่มิรังสีอาทิตย์สูงอยู่ที่ประมาณ 36 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่า MSF (T_6) ที่มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 37 องศาเซลเซียส การระบายความร้อนในโมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศแสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทความร้อนภายในที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ทำให้การสะสมความร้อนน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในไม่เพิ่มขึ้นเท่ากับ MSF โมดูลที่เจาะช่องระบายอากาศ (T_1) มีการระบายความร้อนได้ดีกว่า MSF-V (T_6) อย่างชัดเจน ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้ในสถานะที่มีอุณหภูมิภายในต่ำกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ที่พบว่า (facade) ที่ระบายความร้อนได้ดี หรือ มีอุณหภูมิต่ำสามารถผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้มากกว่า (facade) ในสภาพแวดล้อมที่ระบายอากาศได้น้อยหรือมีอุณหภูมิสูง [8] ดังนั้นการออกแบบโมดูลที่เจาะช่องอากาศ (MSF-V) จึงมีการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ดีกว่าการออกแบบโมดูลที่ไม่เจาะช่องอากาศ (MSF) [2] โดยการอ้างอิงงานวิจัยพบว่าช่องอากาศมีความลึกมากใน ระบบเปลือกอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ จะเพิ่มการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้เพิ่มขึ้น [8]

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จากพลังงานที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ใน MSF-V (I_1) กับ MSF (I_2)

และคำนวณการทดแทนค่าไฟฟ้าตามอัตราค่าไฟประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย แบบ MSF-V (I_1) วัตต์ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อวัน เท่ากับ 0.3017 กิโลวัตต์-ชั่วโมง คุณ 2.3488 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง เท่ากับ 0.708 บาท ซึ่งประมาณการค่าไฟฟ้าต่อเดือน จะได้ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อเดือน เท่ากับ 0.708 บาทต่อวัน คุณ 30 วัน เท่ากับ 21.24 บาท

แบบ MSF (I_2) วัตต์ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อวัน เท่ากับ 0.27792 กิโลวัตต์-ชั่วโมง คุณ 2.3488 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง เท่ากับ 0.652 บาท ซึ่งประมาณการค่าไฟฟ้าต่อเดือน จะได้ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อเดือน เท่ากับ 0.652 บาทต่อวัน คุณ 30 วัน เท่ากับ 19.56 บาท

วิเคราะห์เชิงพาณิชย์ การใช้แผงโซลาร์เซลล์ในที่อยู่อาศัยเพื่อทดแทนพลังงานไฟฟ้าจากระบบสาธารณูปโภคสามารถลดค่าไฟฟ้าได้บ้าง แต่การประหยัดที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ความสามารถในการผลิตพลังงานและการใช้พลังงานในที่อยู่อาศัยโดยรวม แม้ว่าค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้อาจดูเล็กน้อยสำหรับครัวเรือนหนึ่ง แต่ถ้ามีการใช้โซลาร์เซลล์ในหลายครัวเรือนหรือนำมาใช้ในธุรกิจขนาดใหญ่ก็สามารถลดค่าใช้จ่ายในระยะยาวได้แผนผังเปลือกอาคารยุคใหม่ตอบโจทย์ความต้องการของสถาปนิกในยุคปัจจุบันคือสวยงามแข็งแรงทันสมัย ติดตั้งรวดเร็วกันไฟประหยัดพลังงานและรักษ์โลก

6. สรุปผลการศึกษา

ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่าง ผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบเจาะช่องกับผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบไม่เจาะช่อง เมื่อวันที่ 25 เมษายน 2567 ซึ่งโมดูลทั้งสองแบบได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ในระดับที่ใกล้เคียงกันแต่ผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบเจาะช่องสามารถลดการสะสมความร้อนภายในได้ดีกว่าส่งผลให้สามารถรักษาอุณหภูมิภายในให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าและเสถียรมากกว่า นั่นคือผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบเจาะช่อง สามารถลดอุณหภูมิภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้ดีกว่าผนังเปลือกอาคาร (facade) แบบไม่เจาะช่อง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยปทุมธานีที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการดำเนินการศึกษา ขอขอบคุณบริษัท ชันซีร์ จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษา และขอขอบคุณบริษัท โคพลา(ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Aksamija A. Sustainable facades: Design methods for high-performance building envelopes : John Wiley & Sons; 2013.
- [2] Bezaatpour J, Gholizadeh T, Bezaatpour M, Ghaebi H. Energy performance and wind exposure of windward, lateral, and leeward high-rise photovoltaic facades. *Journal of Building Engineering*. 2024;110956.
- [3] Thateenaranon P, Amornkitbamrung M, Hirunlabh J, Khedari J, Waewsak J. Full-scale field investigation of a bio-climatic house under Thailand tropical climate. *Building and Environment*. 2017;126:54-67.
- [4] Ratanachotinun J, Kasayapanand N, Hirunlabh J, Visitsak S, Teekasap S, Khedari J. Technical and economical assessment of energy-saving roof and wall construction in Thailand. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2016;39(1):1-11
- [5] Ananacha T, Puangsombut W, Hirunlabh J, Khedari J. Field investigation of the thermal performance of a Thai modern façade wall. *International Journal of Ventilation*. 2013;12(3):223-34
- [6] Atmaja TD. Façade and rooftop PV installation strategy for building integrated photo voltaic application. *Energy Procedia*. 2013;32:105-14

[7] Yoon SD, Vuthy S, Choi HS. Design of solar modules for building façades at educational facilities in Korea. *Energies*. 2021;14(9):2441.

[8] Barone G, Vardopoulos I, Attia S, Vassiliades C. Optimizing energy-efficient building renovation: Integrating double-skin façades with solar systems in the Mediterranean landscape. *Energy Reports*. 2024;12:2933-45.

การพัฒนาปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่

อรุณยุพา บัวทรัพย์¹ จงจิตร หิรัญลาภ^{1*} ชัยพร สุภาหิตานุกุล¹ สุเมธ สถิตบุญอนันต์¹ และโจเซฟ เคดารี²
 arunyupa.b@ptu.ac.th¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, chaiporn.sup@gmail.com¹,
 sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

Received: November 5, 2024 Revised: December 20, 2024 Accepted: December 23, 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ ปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์มีประสิทธิภาพอย่างยิ่งในสภาพอากาศชื้นและร้อน และจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อสูงและกว้าง แต่ไม่ลึกมาก เนื่องจากสัดส่วนเหล่านี้จะเพิ่มพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ได้สูงสุด และเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับอากาศภายในปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ นิยามของคำว่าขนาดใหญ่ในการสร้างปล่องรังสีอาทิตย์ หมายถึง ปล่องรังสีอาทิตย์ที่มีความสูง สามารถนำโมดูลที่สร้างขึ้นต่อกันขึ้นไปให้มีความสูงขนาดใหญ่ได้ โดยมุ่งเน้นการใช้งานกับอาคารในแนวตั้ง การทดลองใช้โครงสร้างที่หันหน้าไปทางทิศใต้ขนาด 0.40 x 0.30 เมตร สูง 4.60 เมตร โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน จำนวน 4 แผง แต่ละแผง มีกำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 17.5 โวลต์ มีการวัดประสิทธิภาพทางความร้อนและไฟฟ้า ที่ผลิตได้จากแต่ละแผง ผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิของอากาศภายในปล่องรังสีอาทิตย์สูงสุด ที่ระดับความสูง 3.40 เมตร โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 34.15 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์สูงสุด อยู่ที่ 45.10 องศาเซลเซียส ที่ระดับความสูง 3.40 เมตร ในด้านการผลิตไฟฟ้า แผงโซลาร์เซลล์ ที่อยู่ตำแหน่งต่ำสุดที่ระดับ 1.20 เมตร ผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุด ที่ 5.43 วัตต์ ในเวลา 15.00 นาฬิกา เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผงอื่น ๆ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในปล่องรังสีอาทิตย์ วัดได้ที่ 0.97 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลา 12.00 นาฬิกา จากผลทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในอาคาร เพื่อผลิตไฟฟ้า ลดความร้อน และช่วยในการระบายอากาศ

คำสำคัญ: ปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ การระบายอากาศแบบธรรมชาติ โซลาร์เซลล์แนวตั้ง

Development of large scale photovoltaic solar chimney

Arunyupa Buasap¹, Jongjit Hirunlabh^{1*}, Chaiporn Supahitanukul¹, Sumate Sathibunanan¹,
and Joseph Khedari²

arunyupa.b@ptu.ac.th¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, chaiporn.sup@gmail.com¹,
sumezt_k@yahoo.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

²Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi University

Received: November 5, 2024 Revised: December 20, 2024 Accepted: December 23, 2024

Abstract

The objective of this research is to study, design, and build a large solar cell chimney aimed to be applied for buildings. Solar chimneys are particularly effective in climates that are humid and hot. They are most efficient when they are tall and wide, but not very deep, as these proportions both maximise the surface area that can absorb solar radiation and maximise the surface area in contact with the air inside the chimney. Definition of the word "large" in the construction of a solar chimney "Large" refers to a solar chimney shaft with significant height. Modules can be assembled together to achieve considerable heights, with a focus on application in vertical buildings. An experimental south facing setup 0.40 x 0.30 meters with a height of 4.60 meters was built. It uses four amorphous silicon solar cell panels, each rated at 12 watts and 17.5 volts. Thermal performance and electricity generated by each panel were measured. The results of the study show that the air temperature inside the chimney reached its highest value at 3.40 meters, with a peak temperature of 34.15 degrees Celsius. The temperatures of solar cell panels were the highest reaching 45.10 degrees Celsius at 3.40 meters height. In terms of electricity production, the lowest solar cell panel located generated the highest output, producing 5.43 watts at 3:00 p.m. due to its lower temperature compared to other panels. The average air velocity inside the chimney was measured at 0.97 meters per second at noon. These advantages clearly demonstrated that large scale solar photovoltaic building is an interesting option to apply in buildings for electricity generation, heat gain reduction and ventilation.

Keywords: Photovoltaic solar chimney, Natural ventilation, Vertical solar cell

1. บทนำ

การเติบโตของสังคมเมืองในประเทศไทย ก่อให้เกิดการสร้างอาคารสูงจำนวนมาก ซึ่งนำไปสู่การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้โครงสร้างของอาคารสูงในการสร้างปล่องรังสีอาทิตย์ และติดตั้งแผ่นโซลาร์เซลล์ร่วมกับปล่องในลักษณะเป็นแนวตั้งขนานกับตัวโครงสร้างของอาคาร เพื่อใช้ประโยชน์พื้นที่อาคาร และเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

ปล่องรังสีอาทิตย์หรือปล่องความร้อน (Solar Chimney) เป็นอุปกรณ์ ที่ช่วยทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศได้ดีอีกชนิดหนึ่งด้วยวิธีทางธรรมชาติ โดยภายในปล่องความร้อน อากาศจะลอยตัวสูงขึ้นจนพื้นปล่องและทำให้เกิดการไหลของอากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นหลักการถ่ายเทความร้อน เมื่ออากาศได้รับพลังงานความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนจะทำให้มีอุณหภูมิสูงและลอยตัวขึ้นตามธรรมชาติโดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า [1]

จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้อง [2-5] เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาปล่องรังสีอาทิตย์ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าใช้ในอาคาร [6] ปล่องรังสีอาทิตย์ในฐานะระบบพลังงานหมุนเวียนที่เชื่อถือได้ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นจากวิศวกร ความท้าทายหลักของการออกแบบปล่องรังสีอาทิตย์คือการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยต้นทุนที่ต่ำที่สุด จากการทบทวนวรรณกรรมที่ได้รับและจำแนกปัจจัยที่มีอิทธิพลสำคัญ 13 ประการ ออกเป็นสี่กลุ่มได้แก่ การกำหนดค่าเงื่อนไขการติดตั้ง การใช้วัสดุ และสภาพแวดล้อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน แนะนำให้ใช้ปล่องไฟแสงอาทิตย์ที่มีช่องสูงและรังสีดวงอาทิตย์ที่เป็นไปได้ช่องว่างของโพรง 0.2 ถึง 0.3 เมตรทางเข้าและทางออกเท่ากัน อัตราส่วนความสูงต่อช่องว่างประมาณ 10 มุมเอียง 45 ถึง 60 องศา

(สำหรับปล่องไฟแสงอาทิตย์บนหลังคาโดยพิจารณาจากละติจูด) การเปิดห้องอย่างเหมาะสม กระจกสองชั้นหรือสามชั้น ขนาด 5 เซนติเมตร ผนังฉนวนหนา และตัวดูดซับแสงอาทิตย์ที่มีความสามารถในการดูดซับและปล่อยรังสีได้มากขึ้น [7] การระบายอากาศและทำความสะอาดในอาคารด้วยระบบแสงแดด โดยศึกษาหาแนวทางการออกแบบระบบเพื่อการระบายอากาศที่ดีที่สุดด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) ทำการจำลองการไหลผ่านระบบปล่องแสงแดดเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการระบายอากาศ พบว่า ทุกตัวแปรต่างมีอิทธิพลต่ออัตราการระบายอากาศทั้งสิ้น โดยเฉพาะการบานตัวของช่องอากาศซึ่งพบว่า เพียงให้ช่องอากาศทำมุมบานออก 6 องศาสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ถึงร้อยละ 30 [8] ความร้อนของปล่องกระจกระบายอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (Glazed Solar Cells Chimneys Walls, GSCW) ประกอบด้วยบานกระจกสองชั้นที่มีชั้นอากาศและช่องเปิดอยู่ที่ด้านล่าง (บานกระจกด้านข้างห้อง) และที่ด้านบน (บานกระจกด้านข้างโดยรอบ) ต้นแบบของ GSCW ถูกรวมเข้ากับผนังด้านใต้ของห้องเล็ก ๆ ขนาด 2.8 ลูกบาศก์เมตร มีขนาดตั้งนี้ สูง 0.74 เมตร กว้าง 0.50 เมตร และช่องว่างอากาศ 0.10 เมตร ขนาดของช่องเปิดคือ 0.05×0.5 เมตร ด้วยกระจกใสที่มีความหนา 6 มม. การวัดสนามความเร็วระบุว่าอัตราการไหลของอากาศเหนี่ยวนำอยู่ที่ประมาณ 0.13 ถึง 0.28 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังนั้นในการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นข้อตกลงที่สมเหตุสมผล ดังนั้น แบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นจึงใช้ได้และสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบ GSCW ได้

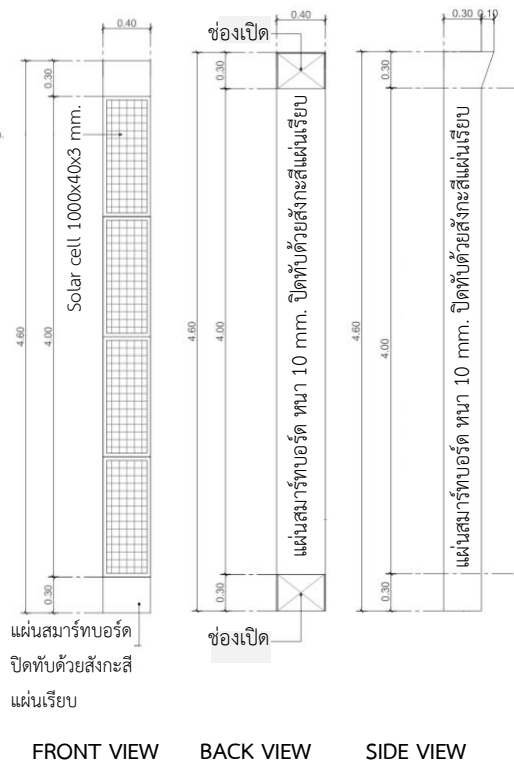
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

2.1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่

2.2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ที่พัฒนาขึ้น

3. วิธีการดำเนินการศึกษา

3.1 ออกแบบปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ (ดังรูปที่ 1) โดยใช้แผ่นสเมิร์ฟอ์คหนา 10 มิลลิเมตร ปิดทับด้วยแผ่นสังกะสีแผ่นเรียบหนา 0.18 มิลลิเมตร ใช้แผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 400 x 1000 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผง ขนาด 12 วัตต์ 17.5 โวลต์ ชนิด Amorphous silicon ตัวปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์มีช่องเปิดด้านบนและด้านล่างซึ่งอยู่ด้านหลังของตัวปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ ขนาด 0.30 x 0.40 เมตร ติดตั้งในแนวตั้งขนานกับตัวผนังอาคารทางทิศใต้ของอาคาร 3 (วิศวกรรมโยธา-เทคนิคการแพทย์) มหาวิทยาลัยปทุมธานี สูงจากระดับพื้นดิน 4.0 เมตร

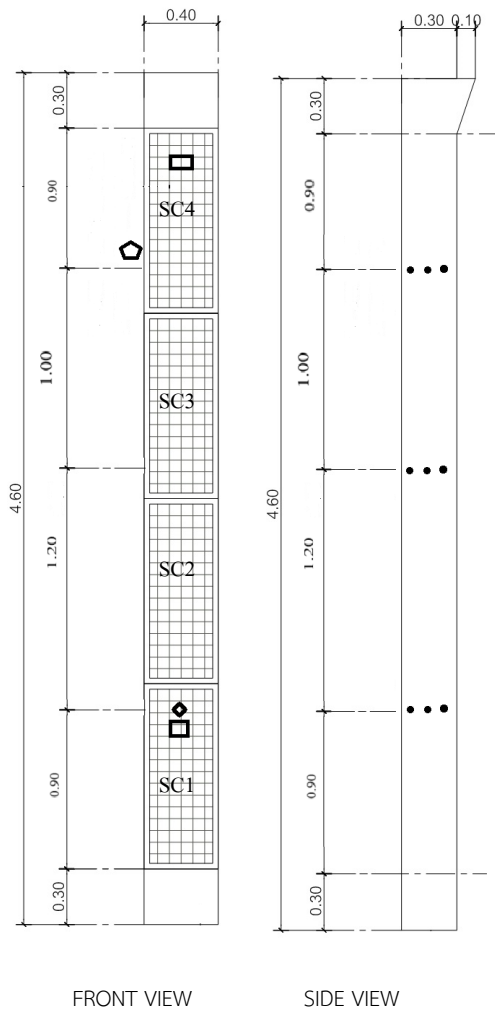


รูปที่ 1 รูปแบบและขนาดของปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่



รูปที่ 2 การติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ ทางทิศใต้ของอาคาร

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย 1) วัดค่าอุณหภูมิโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K 2) วัดความร้อนไหลผ่านโดย standard heat flux sensor ยี่ห้อ FluxTeq รุ่น PHFS-OEM ช่วงการวัดประมาณ -50 องศาเซลเซียส ถึง 120 องศาเซลเซียส 3) ค่าความเข้มแสงของรังสีอาทิตย์การวัดด้วย pyranometer ยี่ห้อ RIKA รุ่น RK200-03 (ช่วงการวัด 0 ถึง 2,000 วัตต์ต่อตารางเมตร) 4) วัดค่าความเร็วอากาศ (Air Velocity) ยี่ห้อ eyc - tech รุ่น FTS140 Hot Wire Air Velocity Transmitter ช่วงการวัด 0 ถึง 20 เมตรต่อวินาที 5) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Ambient Temperature and Humidity) ยี่ห้อ Rika รุ่น RK330-01 ค่าช่วงอุณหภูมิ -40 – 60 องศาเซลเซียส ค่าช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 ถึง 100 6) วัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ โดยใช้เครื่องมือวัดแคลมป์มิเตอร์ยี่ห้อ Tenmars รุ่น TM-1104 7) บันทึกข้อมูลในเครื่องบันทึกข้อมูล (Data recorder) ยี่ห้อ Supmea รุ่น SUP-RN3000 กำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือ ดังรูปที่ 3



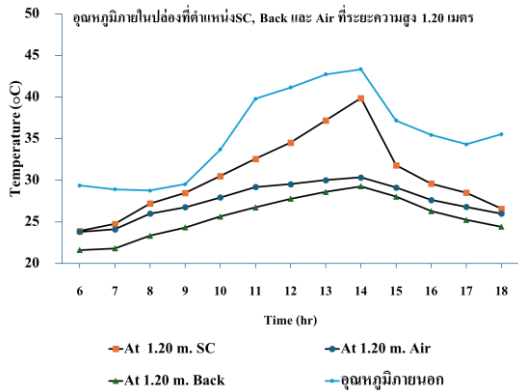
รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด (•) อุณหภูมิของอากาศ, (◻) ค่ารังสีอาทิตย์, (◊) ความร้อนไหลผ่าน และ(□) ความเร็วลม

4. ผลการทดสอบ

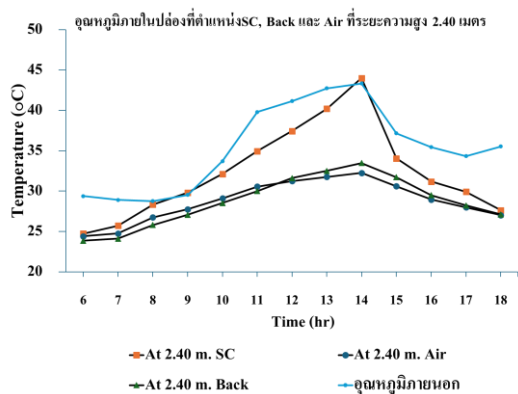
4.1 ทำการวัดอุณหภูมิภายในปล่องรังสีอาทิตย์ จำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ หลังแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งจะแสดงอักษรย่อในกราฟ (SC), อากาศภายในปล่อง ซึ่งจะแสดงอักษรย่อในกราฟ (Air) และ ผนังภายในปล่องซึ่งจะแสดงอักษรย่อในกราฟ (Back) โดยแบ่งเป็นตามระยะความสูงของปล่อง 1.20 เมตร ดังรูปที่ 4 2.40 เมตร ดังรูปที่ 5 และ 3.40 เมตร ดังรูปที่ 6

จากผลการทดสอบพบว่า อุณหภูมิหลังแผงโซลาร์เซลล์มีค่าอุณหภูมิมากกว่าอากาศภายในปล่องและผนังภายในปล่อง ในทุกตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด

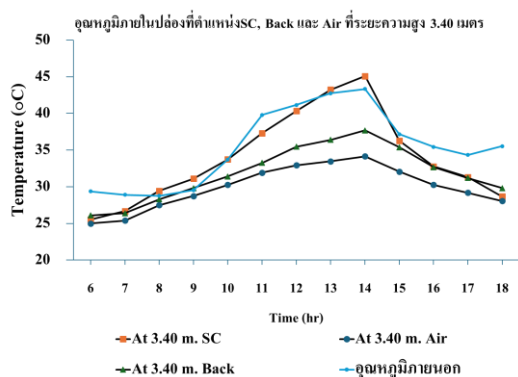
เนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์รับรังสีอาทิตย์โดยตรง และแปลงพลังงานเป็นกระแสไฟฟ้าส่งผลให้แผงโซลาร์เซลล์มีความร้อนสูงสุด แนวโน้มค่าอุณหภูมิภายในปล่องรังสีอาทิตย์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายนอกเมื่ออุณหภูมิภายนอกสูงขึ้น อุณหภูมิภายในปล่องก็สูงขึ้นเช่นเดียวกัน อุณหภูมิหลังแผงโซลาร์เซลล์มีสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศภายในปล่องและผนังภายในปล่อง เนื่องจากปัจจัยหลักๆ ดังนี้ 1) การดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์: แผงโซลาร์เซลล์ออกแบบมาเพื่อดูดซับพลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อนำมาแปลงเป็นไฟฟ้า แต่พลังงานแสงที่ได้รับมีบางส่วนที่ถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนแทนไฟฟ้า ทำให้แผงมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะในวันที่มีแสงแดดจัด 2) วัสดุของแผงโซลาร์เซลล์: แผงโซลาร์เซลล์มักทำจากวัสดุที่มีการนำความร้อนได้ดี เช่น ซิลิกอน ซึ่งทำให้ความร้อนสะสมที่พื้นผิวของแผงสูงขึ้น ความร้อนที่สะสมนี้จะทำให้หลังแผงมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ที่ไม่ได้รับแสงโดยตรง 3) การระบายความร้อนที่จำกัด: แผงโซลาร์เซลล์มีพื้นที่ติดตั้งที่แน่นและอยู่ด้านนอกทำให้ระบายความร้อนได้น้อยกว่าอากาศภายในปล่องที่มีการไหลเวียน ซึ่งสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่า นอกจากนี้ ผนังภายในปล่องก็ไม่ได้รับพลังงานแสงโดยตรง ทำให้สะสมความร้อนได้น้อยกว่า และ 4) การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) เมื่อแผงโซลาร์เซลล์ดูดซับแสงแดด ความร้อนที่สะสมในแผงจะค่อยๆ แผ่กระจายออกไปโดยรอบ ส่งผลให้บริเวณด้านหลังแผงมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า หลังแผงโซลาร์เซลล์มีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศและผนังในปล่อง เนื่องจากการดูดซับแสงอาทิตย์ที่เข้มข้น วัสดุที่นำความร้อนสูง และการระบายความร้อนที่จำกัด



รูปที่ 4 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในปล่องที่ตำแหน่ง SC, Back และ Air ที่ระยะความสูง 1.20 เมตร



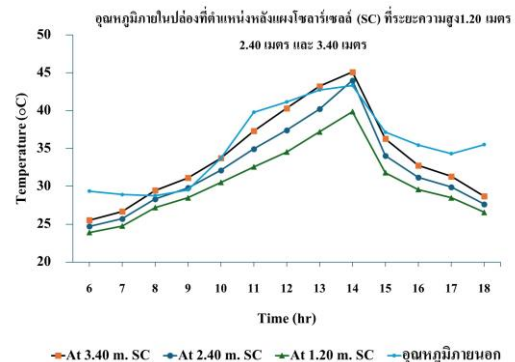
รูปที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในปล่องที่ตำแหน่ง SC, Back และ Air ที่ระยะความสูง 2.40 เมตร



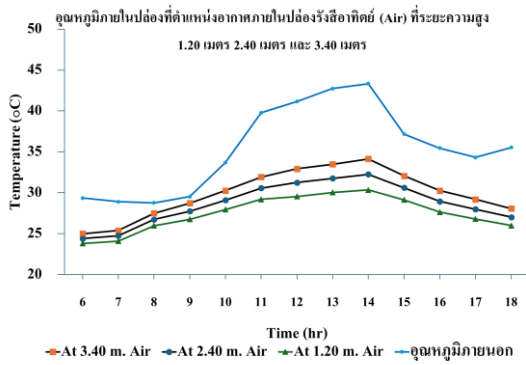
รูปที่ 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในปล่องที่ตำแหน่ง SC, Back และ Air ที่ระยะความสูง 3.40 เมตร

4.2 ทำการวัดอุณหภูมิภายในปล่องรังสีอาทิตย์ ที่ตำแหน่ง 1.20 เมตร 2.40 เมตร และ 3.40 เมตร โดยเปรียบเทียบตำแหน่งความสูงที่แตกต่างกัน ในสภาวะตำแหน่งหลังแผงโซลาร์เซลล์ (SC), อากาศภายในปล่อง (Air) และ ผนังภายในปล่อง (Back) ดังรูปที่ 7 8 และ 9 ตามลำดับ

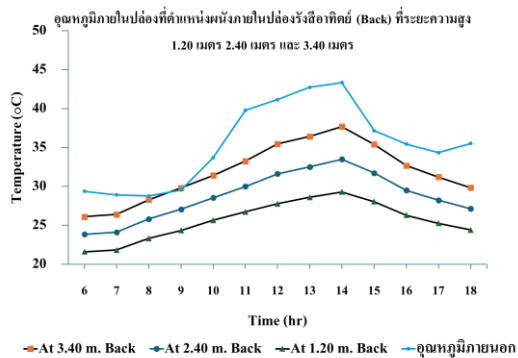
จากผลการทดสอบพบว่า อุณหภูมิหลังแผงโซลาร์เซลล์ที่ตำแหน่งหลังแผงโซลาร์เซลล์ (SC) มีค่าสูงที่สุด และในตำแหน่งความสูงที่ 3.40 เมตร มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่งความสูง 2.40 เมตร และ 1.20 เมตร ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้ง 3 ตำแหน่ง อุณหภูมิของอากาศภายในปล่องมีค่าต่ำที่สุด ที่ตำแหน่งความสูง 3.40 เมตร มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่งความสูง 2.40 เมตร และ 1.20 เมตร เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการการลอยตัวของอากาศ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในปล่องที่ตำแหน่ง หลังแผงโซลาร์เซลล์ (SC) ที่ระยะความสูง 1.20 เมตร 2.40 เมตร และ 3.40 เมตร



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในปล่องที่ตำแหน่งอากาศภายในปล่องรังสีอาทิตย์ (Air) ที่ระยะความสูง 1.20 เมตร 2.40 เมตร และ 3.40 เมตร



รูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในปล่องที่ตำแหน่งผนังภายในปล่องรังสีอาทิตย์ (Back) ที่ระยะความสูง 1.20 เมตร 2.40 เมตร และ 3.40 เมตร

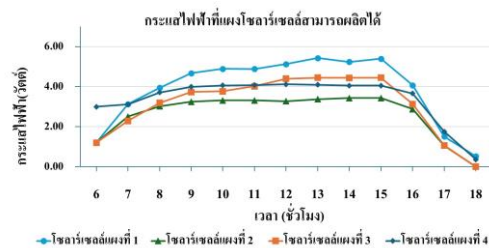
4.3 การผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ แต่ละแผ่น เมื่อเปรียบเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์ แต่ละแผ่นที่ 1 2 3 และ 4 พบว่า โซลาร์เซลล์แผ่นที่ 1 สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงที่สุด โดยสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 5.5 วัตต์ เนื่องจากมีการนำอากาศจากภายนอกมาระบายความร้อน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ โดยมีผลกระทบดังนี้

1) ลดทอนแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากโซลาร์เซลล์จะลดลง เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในโซลาร์เซลล์

(เช่น ซิลิกอน) จะตอบสนองต่อความร้อนได้ไม่ดี หากอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าก็ลดลงตามไปด้วย

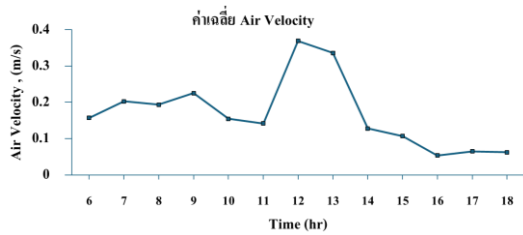
2) ลดทอนประสิทธิภาพโดยรวม โซลาร์เซลล์จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่ออยู่ในสภาพอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส สำหรับทุก ๆ 1 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิสูงขึ้นจากค่ามาตรฐานนี้ ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์จะลดลงประมาณร้อยละ 0.3 ถึง 0.5 ขึ้นอยู่กับชนิดของแผง

3) การผลิตกระแสไฟฟ้า (Current) ในขณะที่ยังแรงดันไฟฟ้าลดลง กระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของกระแสนี้มักไม่เพียงพอที่จะชดเชยแรงดันที่ลดลง ทำให้การผลิตไฟฟ้าโดยรวมลดลง สรุปคือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้โซลาร์เซลล์ผลิตไฟฟ้าได้น้อยลง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าลดลงและประสิทธิภาพโดยรวมลดลง



รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์แต่ละแผง

4.4 ความเร็วของอากาศภายในปล่องรังสีอาทิตย์ พบว่าในช่วงเวลา 12.00 นาฬิกา มีค่าความเร็วของอากาศสูงที่สุด 0.97 เมตรต่อวินาที ค่าความเร็วของอากาศมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิภายนอกของอากาศ เมื่ออากาศสูงขึ้นค่าความเร็วของอากาศภายในปล่องก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศภายในปล่องรังสีอาทิตย์

5. สรุป

ผลการศึกษาเพื่อออกแบบและสร้างปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ โดยสร้างปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาด 0.40×0.30 เมตร สูง 4.60 เมตร ซึ่งตัวของปล่องรังสีอาทิตย์ที่พิจารณาว่าเป็นขนาดใหญ่พิจารณาจากความสูงของตัวปล่องรังสีอาทิตย์ในการศึกษาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน จำนวน 4 แผง พบว่าอุณหภูมิสูงสุดบริเวณหลังแผงโซลาร์เซลล์ (SC) และในตำแหน่ง 3.40 เมตร แผงโซลาร์เซลล์ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงที่สุดในแผ่นที่ 1 กระแสไฟฟ้า 5.5 วัตต์ และค่าความเร็วอากาศเฉลี่ยภายในปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์แปรผันตามค่าความร้อน เมื่อความร้อนในปล่องหรืออากาศภายในปล่องเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอากาศจะลดลง ในการนำไปใช้งานการสร้างปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์สามารถช่วยระบายความร้อนแผงโซลาร์เซลล์ได้ ส่งผลให้แผงโซลาร์เซลล์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์ยังช่วยในการระบายความร้อนของอาคารหรือห้องที่ต้องการได้ โดยปล่องรังสีอาทิตย์โซลาร์เซลล์เป็นลักษณะการติดตั้งในแนวตั้งจึงสะดวกและเหมาะสมในการนำไปติดตั้งยังตัวอาคารหรือพื้นที่เสา โครงสร้างในแนวตั้ง เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการใช้พื้นที่ของอาคารอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยปทุมธานีที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษา และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินการศึกษา ขอขอบคุณบริษัท ชันชีร์ จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ ในการศึกษา และ ขอขอบคุณบริษัท โคพลา(ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Somsila P, Kumdee C, Teeboonma U. Factors affecting air conditioning inside winter dwelling. Proceedings of the 8th Rajamangala Surin Conference; 2016 Dec 22-23 ; Rajamangala University of Technology Isan Surin campus, Surin. Thailand; 2016.
- [2] Sripisuttitham S, Bunnag T, Chantawong P. Investigation of thermal performance of photovoltaic roof solar collector with phase change material. Journal of Energy and Environment Technology. 2021;8(1):11-21.
- [3] Khedari J, Rachapradit N, Hirunlabh J. Field study of performance of solar chimney with air-conditioned building. Energy. 2003;28(11): 1099-114.
- [4] Thantong P, Khedari J, Chantawong P. Study of solar-PCM walls for domestic hot water production under the tropical climate of Thailand. Materials Today: Proceedings. 2018;5 (7):14880-5.
- [5] Khedari J, Boonsri B, Hirunlabh J. Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. Energy and buildings. 2000;32(1):89-93.

- [6] Shi L, Zhang G, Yang W, Huang D, Cheng X, Setunge S. Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;88:223-38.
- [7] Tongbai P. Ventilation and cooling in building using solar chimney system. [dissertation]. Nakhonratchasima: Suranaree University of Technology; 2015.
- [8] Chantawong P, Ungkoon Y, Suptawon W, Maiteejit C, Sangartid T. Study of a solar cells chimney wall with house model under hot humid climate of Bangkok. *Journal of Energy and Environment Technology*. 2014;1(1):11-9.

รูปแบบบทความสำหรับ วารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

ปรกช สิริสุวัฒน์^{1*} สุมนมัลย์ เนียมกลาง² และกุลยา สารีชีวิน³
porakoch.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, sumonman.n@en.rmutt.ac.th², kullaya.s@en.rmutt.ac.th³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม ผู้ส่งบทความต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำส่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสิทธิ์การส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

Manuscript preparation guidelines for the papers submitted to frontiers in engineering innovation research

Porakoch Sirisuwan^{1*}, Sumonman Niamlang² and Kullaya Saricheewin³
porakoch.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, sumonman.n@en.rmutt.ac.th², kullaya.s@en.rmutt.ac.th³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Frontiers in Engineering Innovation Research (FEIR). Authors are required to strictly follow the guideline provided here, otherwise, the manuscript will be returned for proper correction before to be reviewed by two referees who are specialists in that fields. If no completed on this step your manuscript will be rejected and cannot be considered again. So that an abstract should have had only one paragraph. Both Thai and English.

Keywords: Submission procedure, Manuscript format, Font size, Font style, Blank line

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title)
2. ชื่อผู้เขียน/อีเมล (Author, E-mail)
3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation)
4. บทคัดย่อ (Abstract)
5. คำสำคัญ (Keywords)
6. บทนำ (Introduction)
7. เนื้อหา (Text)
8. สรุป (Conclusion)
9. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)
(Acknowledgements)
10. เอกสารอ้างอิง (References)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

คำแนะนำทั่วไป

2.1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title) มีทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ควรสั้นและกระชับแต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่องสื่อความหมายชัดเจนไม่ควรใช้คำย่อ และวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

2.2. ชื่อผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) และผู้เขียนร่วม (Co-Author) มีทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ใส่หมายเลขลำดับ (ตัวยก) เรียงตามลำดับความสำคัญ โดยใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ผู้เขียนหลักถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก)

2.2.1 E-mail ผู้เขียนเรียงตามลำดับชื่อผู้เขียนและ ใส่เครื่องหมาย (*) ถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก) ของผู้เขียนหลัก

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อคัด (Abstract) เป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอจริงๆ ควรเขียนให้สั้น และกระชับ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) ให้ระบุไม่เกิน 3-5 คำ

2.6. บทนำ (Introduction) ส่วนนำจะเป็นส่วนที่ผู้เขียนจงใจให้ผู้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย และข้อมูลทางวิชาการ

2.7. เนื้อหา (Text) บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

2.7.1 การเขียนหน่วยต่างๆ

หน่วยในเนื้อหาจะต้องใช้เป็นรูปแบบเดียวกันทั้งฉบับ

ตารางที่ 1 การตั้งค่าน้ำกระดาษ

ระยะขอบ	เซนติเมตร
บน (Top)	3
ล่าง (Bottom)	2
ซ้าย (Left)	3
ขวา (Right)	3
ระยะห่างคอลัมน์	1

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะพิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรรูปแบบ "TH SarabunPSK"

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
ชื่อเรื่อง	18	กึ่งกลาง	ตัวหนา
ชื่อผู้เขียน อีเมล	14	กึ่งกลาง	ปกติ
ที่อยู่ผู้เขียน	12	ชิดซ้าย	ปกติ
บทย่อคัด	14	ชิดซ้าย	ปกติ
ชื่อหัวข้อ, หัวข้อย่อย	14	ชิดซ้าย	ตัวหนา
เนื้อความ	14	กระจายแบบไทย	ปกติ

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะพิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรแบบ “TH SarabunPSK” (ต่อ)

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
คำบรรยายประกอบรูปและตาราง	14	กึ่งกลาง	ปกติ
สมการต่างๆ (Cambria Math)	12	กึ่งกลาง	ตัวเอียง

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม เยื้องบรรทัดแรกของย่อหน้าใช้ 1 แท็บ หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.2 การจัดทำรูปภาพ

รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม. เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมมิให้ความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ(กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายใต้ภาพ

คำบรรยายใต้ภาพห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่น ห้ามเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง..” ที่ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 ตัวอย่าง.....”



รูปที่ 1 ตัวอย่าง....

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนูโลมให้ใช้ได้ รูปภาพควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพ เป็นต้น และเพื่อความ

สวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด และไม่มีเส้นกรอบรูป

2.7.3 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง *ควรใช้ตัวพยัญชนะเอียง*แสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

$$a + b = c \tag{1}$$

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.7.4 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำบรรยายเหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1 บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7.5 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว บทความไม่ควรจะมีความยาวน้อยกว่า 8 หน้า และยาวไม่เกิน 12 หน้า กระดาษ A4

2.7.6 กรณีบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

2.7.7 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางระบบออนไลน์ ของวารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt>



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งบทความวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

- Word
- PDF

● แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความ

เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารแนวหน้า

วิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม มายังระบบออนไลน์ และกรุณาจัดส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความทางอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th มายังกองบรรณาธิการวารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ครบถ้วน จึงจะถือว่าการส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางระบบออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความมายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

3. สรุป (Conclusion)

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูง ผ่านการพิจารณาได้ง่ายขึ้น และหากไม่มีการแก้ไขบทความกลับภายในระยะเวลา 3 เดือน หลังจากได้รับบทความกลับคืน บทความนั้นจะถูกยกเลิกการพิจารณาโดยอัตโนมัติ และไม่รับพิจารณาบทความใดๆ ของผู้เขียนนั้น เป็นระยะเวลา 1 ปี นับตั้งแต่วันครบกำหนดการส่งบทความกลับคืน

4. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณข้อมูลจาก TCI และผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

5. เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงเอกสารใช้ระบบ (Vancouver Style) เรียงตามลำดับ 1,2,3 ตามการใช้งาน โดยใส่ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] เป็นต้น แล้วรวบรวมไปเขียนอ้างอิง ตามรูปแบบวารสารกำหนด

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงผู้เขียนต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ ในกรณีแหล่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมาจากแหล่งอ้างอิงภาษาไทย เช่น ตำราไทย วารสารไทย เป็นต้น ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บด้านท้ายชื่อภาษาต้น เช่น (in Thai) ทั้งนี้ผู้เขียนบทความควรใช้แหล่งอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับกันตามเกณฑ์สากล

ตัวอย่าง (Example)

[1] Charoennetku C, Khamput P, Chumprom P, Lukjan A. Porous concrete mixed with crumbs of prestressed concrete pile. *Frontiers in Engineering Innovation Research*. 2024;22(1):17-26.

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

(เครื่องหมายหมายถึง เว้นวรรค 1 ระยะ)

รูปแบบบทความวารสาร

(Articles in Journals)

[2] Author.\Article Title.\Journal Title.\ Year of Publication;Volume(Issue Number):Pagintion.

ตัวอย่าง(Example)

[3] Nanthasamroeng N. Application of center of risk gravity in the location analysis for a sitting of emergency medical service vehicles. *Journal of Engineering RMUTT*. 2011;9(2):21-9. (in Thai)

**รูปแบบหนังสือและเอกสารเฉพาะเรื่อง
(Books and Other Monographs)**

[4] Author.\Title.\Edition.\Place of Publication:
\Publisher;\Year of Publication.

[5] Author.\Title\[dissertation or master's
thesis].\Place of Publication:\University;\Year of
Publication.

ตัวอย่าง(Example)

[6] Murray PR, Rosenthal KS, Kobayashi GS,
Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St.
Louis(MO): Mosby; 2002.

[7] Borkowski MM. Infant sleep and feeding: a
telephone survey of Hispanic Americans
[dissertation]. Mount Pleasant (MI): Central
Michigan University; 2001.

**รูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์
(Electronic Material)**

[8] Author.\Article Title.\Journal Title.\[Internet] .\
Year of Publication\[cited YYMMDD] ;Volume
(Issue Number):page numbers.\Availability From:\
URL

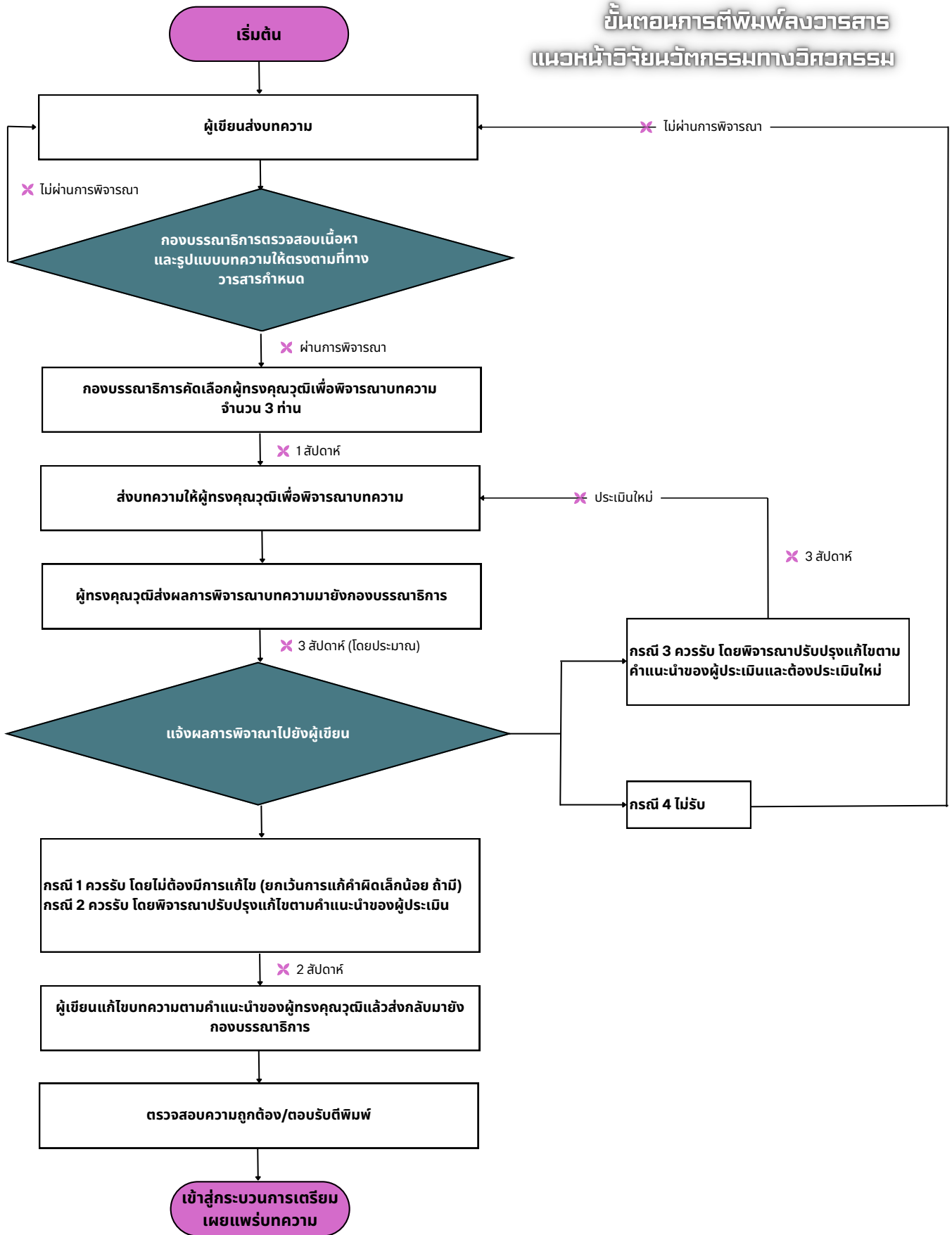
ตัวอย่าง(Example)

[9] Annas GJ. Resurrection of a stem-cell funding
barrier--Dickey-Wicker in court. N Engl J Med
[Internet]. 2010 [cited 2011 Jun 15];363:1687-9.
Available from: <http://www.nejm.org/doi/pdf/10.1056/NEJMp1010466>

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ใน
รูปแบบ Word ได้ที่

<https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwmeIUTtRwHH3HEFLFuVZXsIOPV>

ขั้นตอนการตีพิมพ์ผลงาน
แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม



ในกรณี 2 และ 3 หลังจากบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิฯ แล้ว ผู้เขียนควรพิจารณาการ และส่งบทความกลับมาในระยะเวลาที่กำหนดหากล่าช้าเกิน 90 วัน (นับจากวันแจ้งแก้ไข) กองบรรณาธิการขอแจ้งไม่รับพิจารณาบทความโดยอัตโนมัติ และผู้เขียนไม่สามารถส่งบทความเข้าสู่ระบบได้เป็น ระยะเวลา 1 ปี (เนื่องจากมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการประเมินบทความ และขาดความต่อเนื่องในการพิจารณาบทความจากผู้ทรงคุณวุฒิฯ)

หมายเหตุ รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆ เพิ่มเติม



สมาชิกเลขที่

.....

ใบสมัครสมาชิกวารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสาร แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม..... ปี	1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท	(สำหรับบุคคลทั่วไป)
	80 บาท	(สำหรับนักศึกษา)
ต่ออายุสมาชิก ปี	1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท	(สำหรับบุคคลทั่วไป)
	80 บาท	(สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาร ส่งจ่าย

ตั๋วแลกเงิน ไปรษณีย์ ส่งจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมเขียน

ชื่อ-นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาบัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

วารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3493 <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt>

e-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

ข้าพเจ้า นาย นาง นางสาว อื่นๆ (โปรดระบุ).....

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

อาจารย์ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

โทรศัพท์ที่ทำงาน..... โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

การตรวจสอบ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน

ระบบออนไลน์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt> เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามที่ระบุไว้ในบทความ
จริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณา
ตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

TECHNICAL ARTICLE FORM
FOR PUBLISHING ON FRONTIERS IN ENGINEERING INNOVATION RESEARCH

Title Mr. Ms. Others (Please specify).....

Name-Surnames

Academic Positions (Please specify) Professor Associate Professor Assistant

Professor Lecturer Others (Please specify).....

Address (for Contact).....

.....

.....

Office Phone Number..... Mobile Phone Number.....

Fax Number..... E-mail.....

Name of Article:.....

.....

.....

Submission Checklist Already register and submit the manuscripts on

<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt>

The days of Online Submission.....

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article.

In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the FRONTIERS IN ENGINEERING INNOVATION RESEARCH.

Sign

(.....)

...../...../.....



FRONTIERS IN ENGINEERING INNOVATION RESEARCH

FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
39 MOO 1, RANGSIT-NAKHONNAYOK RD. (KLONG6), THANYABURI PATHUMTHANI
12110 TEL./FAX : 0 2 549 3493
E-MAIL : ENJOURNAL@EN.RMUTT.AC.TH