

FRONTIERS IN ENGINEERING INNOVATION RESEARCH

แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม



ISSN 3056-9273 (Online)

Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2567

ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2567

ปีที่ **22** ฉบับที่ **1** เดือน มกราคม - มิถุนายน **2567**

ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2567

ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2567

สารบัญ

การผลิตไม้เทียมจากผงไม้พาเลทผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำรีไซเคิล Producing Artificial Wood from Pallet Wood Powder Mixed with High-Density Polyethylene from Recycled Water Bottles โดย : กิตติพันธ์ บุญโตสัตระกูล อธิธิ ผลิตศิริ วิภาดา เทพจันทร์ และกิตติพงษ์ สุวิโร	1
การศึกษาการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำจากปลายท่อส่งน้ำของการประปา ก่อนไหลลงถังเก็บน้ำใต้ดิน A Study of Hydroelectric Power Generation from the End of a Water Supply Pipe before Flowing into an Underground Water Tank โดย : พงษ์พันธ์ พรหมพิพัทธ์ วรวิทย์ สุวรรณเรือง และพิเชฐ มีสัจจ	9
คอนกรีตพูนผสมเศษเสาคอนกรีตอัดแรง Porous Concrete Mixed with Crumbs of Prestressed Concrete Pile โดย : จริญญา เจริญเนตรกุล ประชุม คำพูน เปรมณัช ชุมพร้อม และอรุณ ลูกจันทร์	17
ระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Prepaid Water Consumption System Via RFID Controlled by Microcontroller โดย : อธิระพล เหมือนขาว สุรินทร์ แห่งมงาม ชัชชัย ทองจันทร์ และจิตติณัฐ ฉายประเจียด	27
การวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์ด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรมของเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบฟาร์มเพื่อการพาณิชย์ จังหวัดกาฬสินธุ์ Utilizing an Activity-Based Costing System to Analyze the Logistical Expenses of Commercial Lobster Farms Kalasin District โดย : รัชฎา แต่งภูเขียว สวลี อุดรา ปิยณัฐ โตอ่อน และณัฐนันท์ นิตสิริ	38
การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิสไตรีน The Engineering Properties and Heat Transfer of Concrete Block Mixed with Polystyrene โดย : ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล และประชุม คำพูน	49
การวิเคราะห์ปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย An Analysis of Coarse Aggregate Content of Hardened Concrete using Image Processing โดย : ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์	58
ศึกษาการใช้น้ำร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกแบบติดตั้งและไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อนฝังดิน The Study of using Hot Water from the Solar-Exposed Water Pipeline for the Electricity Generation from the Thermoelectric Sets with and without the Underground Heatsink Unit โดย : อติรุจ สุริณารินทร์ ชัยยศ ดำรงกิจโกศล และปรีดา จันทวงษ์	69

อิทธิพลของอะลูมิเนียมผสมที่ส่งผลต่อขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตที่ผ่านกระบวนการกัดขึ้นรูป CNC 81 The Influence of Aluminum Alloy Effects on Freeform and Geometry after the CNC Milling Process. โดย : บดินเดช จูมมณี พัทธระ กัญจนกาญจน์ เฉลิม ขุนเอียด รวิณธ์ธนต์ ทิพย์เสนา และวรรณนิศา นุชคุ้ม	
บล็อกปูพื้นลานตากผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวม ใช้เถ้าขาน้อยแบบหยาบแทนที่หินฝุ่น 93 บางส่วน และใช้เถ้าขาน้อยแบบละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน Flooring Blocks for Drying Agricultural Products by using Quarry Rock as Aggregate with Coarse Bagasse Ash Partially Replace Quarry Rock and Fine Bagasse Ash Partially Replace Cement โดย : ประชุม คำพุ่ม และเกียรติสุตา สมนา	
การออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบโดยขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ 103 Optimum Design of Plane Steel Truss using Whale Optimization Algorithm โดย : สิทธิศักดิ์ อันสนั่น อศนัย ทาภา และเรืองรุชต์ ชีระโรจน์	
การวางแผนการผลิตด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีศึกษาท่อเหล็กที่เป็นส่วนประกอบ 115 ช่วงล่างของรถยนต์ Production Planning using Mathematical Modeling Methods a Case Study of Steel Pipes of a Car's Suspension โดย : รวิณธ์ธนต์ ทิพย์เสนา เอกวิศว์ สงเคราะห์ สุภัทรา หมูป่ารัง วรรณนิศา นุชคุ้ม พัทธระ กัญจนกาญจน์ และบดินเดช จูมมณี	



แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

คณะกรรมการจัดทำวารสาร แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

รศ. ดร. เข็มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ. ดร. ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ. ดร. กันวรัช พลุประทุม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ. ดร. อารังรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ. ณรงค์ บวบทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ. ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ. ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร. สุมนมัลย์ เนียมกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร. ศิริชัย แดงเฒ	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. ขวลิติ แสงสวัสดิ์	33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผศ. ดร. ประภัส 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
Assoc. 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

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม ถึง มิถุนายน 2567 ฉบับนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงชื่อเรื่องของวารสารใหม่ตามคำแนะนำของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) เป็นวารสาร "แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม" โดยการเปลี่ยนแปลงชื่อวารสารในครั้งนี้เพื่อเตรียมความพร้อมในการเข้าสู่การประเมินคุณภาพบทความของวารสารในปี 2569 และเพื่อเข้าสู่ฐานข้อมูล SCOPUS ในอนาคตข้างหน้า

โดยบทความในฉบับนี้ผ่านการพิจารณา และประเมินผลจากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีคุณภาพ จำนวน 3 ท่าน ต่อ 1 บทความ รวมตีพิมพ์ฉบับนี้ทั้งหมด 12 บทความ โดยมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับทางด้าน วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมโลหการ โลจิสติกส์และเทคโนโลยีการขนส่ง และวิศวกรรมพลังงาน

วารสาร แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารนี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีทั้งภายในประเทศและ ต่างประเทศ รวมทั้งพัฒนาศักยภาพ ความรู้ ความคิด สติปัญญาของนักศึกษา และบุคคลอื่นๆที่สนใจ ให้เป็นการพัฒนาที่ยั่งยืน ตลอดไป

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

ผศ. ดร. อาทิตย์ อภิโชติธนกุล	คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ. ดร. ภูเบศร์ พิพิธหิรัญการ	คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ดร. เอกพิสิษฐ์ บรรจงเกลี้ยง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
ผศ. จิตติ หมอรักษา	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผศ. ดร. อรุณี ยศบุตร	คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รศ. ดร. วิมลีน สุขถมยา เหล่าศิริถาวร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ. ดร. สุวัฒน์ รัตนพันธ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
รศ. ดร. สิงหนเดช แต่งจวง	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
ผศ. ดร. ปรัชญา เปรมปรางณ์รัชต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร. วันชัย ยอดสุดใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ. ดร. รังสรรค์ วงศ์จิรัฏฐ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ. ดร. ณัฐดนัย ตันทวีรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
ผศ. ดร. กิตติพงษ์ สุวิโร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. ขวัญชัย จ้อยเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. สุรินทร์ แห่งมงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. ศุภกิต แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร. สนธยา ทองอรุณศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
ผศ. ดร. อภิเสกฐ์ สุวรรณสะอาด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ. ดร. อรรถพล มาลัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ. ดร. ชลัท ทิพาการเกียรติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ. บัญญัติ นิยมवास	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ. ดร. ภาณุ พร้อมพุดธางกูร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ. ดร. นรรัตน์ วัฒนมงคล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ. ดร. สราวุธ จิตงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ผศ. ดร. เกียรติสุดา สมนา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ. ดร. ศตวรรษ หลุณรรพพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย
ผศ. ดร. จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร. มิตี นรารมย์	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ผศ. ดร. กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ. ดร. ทรงวุฒิ เอกวุฒิวงศา	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Peer Reviews

Asst. Prof. Dr Arthit Apichottanakul	Faculty of Technology Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Phubet Phiphithirankarn	Faculty of Technology Udon Thani Rajabhat University
Dr. Aekpisit Banjokkeng	Faculty of Industrial Technology Uttaradit Rajabhat University
Asst. Prof. Thiti Mhoraksa	Faculty of Agro-Industrial Technology Rajamangala University of Technology Tawan-Ok
Asst. Prof. Dr. Arunee Yodbutr	Faculty of Business Administration Maejo University
Assoc. Prof. Dr. Wimalin Laosiritaworn	Faculty of Engineering Chiang Mai University
Asst. Prof. Dr. Suwat Rattanapan	Faculty of Science and Technology Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat
Assoc. Prof. Dr. Singhadej Tangjuank	Faculty of Science and Technology Uttaradit Rajabhat University
Asst. Prof. Dr. Pradya Prempraneerach	Faculty of Engineering Thammasat University
Prof. Dr. Wanchai Yodsudjai	Faculty of Engineering Kasetsart University
Asst. Prof. Dr. Rangsan Wongjeeraphat	Faculty of Engineering Kasetsart University
Asst. Prof. Dr. Natdanai Tantawiroon	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Asst. Prof. Dr. Kittipong Suweero	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Kwanchai Choicharoen	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Surin Ngaemngam	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Kaona Jongwuttanaruk	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Supakit Kawdungta	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna
Dr. Sontaya Tongaroonsri	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Tak
Asst. Prof. Dr. Apised Suwansaard	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Asst. Prof. Dr. Attapole Malai	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Asst. Prof. Dr. Chalot Tipakornkiat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Srivijaya

Peer Reviews

Asst. Prof. Banyat Niyomvas	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Srivijaya
Assoc. Prof. Dr. Panu Promputthangkoon	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Srivijaya
Assoc. Prof. Dr. Norrarat Wattanamongkhon	Faculty of Engineering Burapha University
Assoc. Prof. Dr. Saravut Jaritngam	Faculty of Engineering Prince of Songkla University (Hatyai Campus)
Asst. Prof. Dr. Kiatsuda Somna	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Isan
Asst. Prof. Dr. Sattawat Haruehansapong	Faculty of Engineering and Architecture Rajamangala University of Technology Tawan-Ok Uthen Thawai Campus
Asst. Prof. Dr. Jittiwat Nithikarnjanatharn	Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan
Dr. Miti Nararom	Faculty of Industry and Technology Rajamangala University of Technology Isan Sakon Nakhon Campus
Asst. Prof. Dr. Kanokporn Sripathomswat	College of Industrial Technology King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc. Prof. Dr. Songwut Egwutvongsa	School of Industrial Education and Technology King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

การผลิตไม้เทียมจากผงไม้ปาเลทผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จากขบวนการรีไซเคิล

กิตติพันธ์ บุญโตสิตรระกูล¹ อธิธิ ผลิตศิริ^{2*} วิภาดา เทพจันทร์² และกิตติพงษ์ สุวีโร³
kittiphan.b@rmutp.ac.th¹, itthi.w@rmutsb.ac.th^{2*}, wiphada.t@rmutsb.ac.th²,
kittipong.s@en.rmutt.ac.th³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: June 5, 2023 Revised: January 24, 2024 Accepted: February 7, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำขวดพลาสติกชนิด HDPE มาผสมกับผงไม้ปาเลทที่ไม่ใช้แล้วสำหรับขึ้นรูปเป็นแผ่นไม้เทียม โดยการออกแบบส่วนผสมของพลาสติกโพลีเอทิลีนชนิด HDPE และผงไม้ปาเลท รวมทั้งหมด 5 อัตราส่วน ขึ้นรูปโดยการบดย่อยพลาสติกชนิด HDPE และไม้ปาเลท ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเบอร์ 60 ตามลำดับ ผสมเศษพลาสติกและผงไม้ปาเลทให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง อัดขึ้นรูปร้อนโดยใช้แรงดัน 1,300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ได้แผ่นไม้เทียมสำหรับนำไปทดสอบแรงดึง แรงกระแทก ความแข็งผิว ความหนาแน่น และการทดสอบการดูดซึมน้ำ จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณของผงไม้ปาเลทที่ผสมมีผลต่อสมบัติของแผ่นไม้เทียมหรือวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรง และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รวมทั้งส่งผลให้คุณสมบัติการรับแรงดึง และแรงกระแทกมีค่าลดลง แผ่นไม้เทียมดังกล่าวทั้ง 5 อัตราส่วน เหมาะกับการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ตกแต่งบ้านและของที่ระลึก

คำสำคัญ: ไม้เทียม ไม้ปาเลท พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

Producing Artificial Wood from Pallet Wood Powder Mixed with High-Density Polyethylene from Recycled Water Bottles

Kittiphan Boontositrakul¹ Itthi Plitsiri^{2*} Wiphada Thepjunthra² and Kittipong Suweero³
kittiphan.b@rmutp.ac.th¹, itthi.w@rmutsb.ac.th^{2*}, wiphada.t@rmutsb.ac.th²,
kittipong.s@en.rmutt.ac.th³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

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

Received: June 5, 2023 Revised: January 24, 2024 Accepted: February 7, 2024

Abstract

The objective of this research aims to mix HDPE plastic bottles with wood pallet wastes to form the artificial wood panels. The mixtures of HDPE polyethylene plastics and pallet woods were designed in five different ratios. The HDPE plastics and pallet woods were crushed through sieve No.4 and No. 60 respectively. The plastic scraps and wood powder are mixed by using a two-roll mixer. The artificial wood panels formed by pressing under hot conditions at 1,300 pounds per square inch and a temperature of 190 degrees Celsius for 5 minutes. The artificial wood panels were tested for tensile strength, impact strength, surface hardness, density, and water absorption. The experimental results indicate that the amount of mixed pallet wood powder affects the properties of the artificial wood panels and composite materials, resulting in an increase in hardness and density, as well as a decrease in tensile properties and impact force. These 5 ratios of artificial wood panels are suitable for the production of home decoration and souvenir products.

Keywords: Artificial wood, Pallet wood, High density polyethylene plastic

1. บทนำ

ปัจจุบันขยะพลาสติกเป็นปัญหาที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ โดยแนวทางหนึ่งที่อาจช่วยลดหรือแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ คือ การนำขยะพลาสติกมาใช้ประโยชน์เป็นไม้เทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (High Density Polyethylene; HDPE) [1-4] เนื่องจากขยะพลาสติกชนิด HDPE เป็นวัสดุที่สามารถนำมารีไซเคิลง่าย มีความแข็งแรง เหนียว ไม่เสีรูปร่าง และคงทนต่อการใช้งาน [5,6] เมื่อนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำไม้เทียมจะทำให้ไม้เทียมที่ได้มีสมบัติดีขึ้นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรง เหนียว ไม่เสีรูปร่างง่าย ทนต่อการกัดกร่อน และทนการเสียดสี

เศษไม้พาเลทเป็นขยะเศษไม้ที่เหลือทิ้งจำนวนมากในอุตสาหกรรมขนส่ง การค้า และ โลจิสติกส์ [7] ไม้พาเลทนิยมผลิตจากไม้ฉำฉา ไม้ยางพารา หรือไม้ก้ามปู เป็นอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรง สามารถรองรับน้ำหนักสิ่งของได้มากถึง 2 ตัน โดยผู้ประกอบการเกือบทั้งหมด ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจ้างรถขนไม้พาเลทไปทิ้ง ตลอดจนค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำขวดพลาสติกชนิด HDPE มาผสมกับผงไม้พาเลทชนิดไม้ยางพาราที่ไม่ใช้แล้วสำหรับขึ้นรูปเป็นแผ่นไม้เทียม ซึ่งจะช่วยพัฒนาระบบรีไซเคิลขยะพลาสติก รวมไปถึงลดปริมาณขยะไม้พาเลท อันจะเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่ชุมชนและเป็นแนวทางการพัฒนาระบบการจัดการขยะเท่ากับศูนย์ (Zero waste) รวมทั้งจะช่วยลดมลภาวะที่เกิดขึ้นจากการกำจัดขยะ

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ ประกอบด้วย ขวดพลาสติกชนิด HDPE พาเลทไม้ชนิดไม้ยางพารา เครื่องบดย่อยพลาสติก เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เครื่อง Injection Machine เครื่อง Compression เครื่องขึ้นน้ำหนัแบบละเอียด (ดิจิตอล) เวอร์เนียสำหรับวัดชิ้นงานทดสอบ เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 638 เครื่องทดสอบแรง

กระแทก (Impact Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 256 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 785 เครื่องวัดความหนาแน่น (Density Test) ตามมาตรฐาน ASTM D792



รูปที่ 1 ขยะขวดพลาสติกชนิด HDPE



รูปที่ 2 พาเลทไม้

3. การออกแบบส่วนผสม

ออกแบบส่วนผสมของพลาสติกโพลีเอทิลีนชนิด HDPE และผงไม้พาเลท โดยการทดลองผสมพลาสติกและผงไม้พาเลท ที่อัตราส่วน 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก จากการสังเกตอัตราส่วนผสม 60:40 พบว่า พลาสติกเริ่มไม่หลอมเข้ากับผงไม้พาเลท จึงนำผลการทดลองดังกล่าวมาออกแบบอัตราส่วนผสม รวมทั้งหมด 5 อัตราส่วน โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมต่อแผ่นของตัวอย่างทดสอบ

อัตรา ส่วนผสม	พลาสติก (กรัม)	ผงไม้พาเลท (กรัม)
95:5	1,824	96
90:10	1,728	192
85:15	1,632	288
80:20	1,536	384
75:25	1,440	480



รูปที่ 4 ผงไม้พาเลทที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60

4. การขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับนำไปทดสอบ

ในการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับนำไปทดสอบ เป็นการผลิตตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดการขึ้นรูปดังนี้

- 1) ล้างทำความสะอาดขวดพลาสติกชนิด HDPE ด้วยแปรงและน้ำสะอาด ก่อนตากแดดจนแห้ง
- 2) บดย่อยขวดพลาสติกชนิด HDPE โดยใส่ขวดพลาสติกลงในเครื่องบดย่อยพลาสติก ผ่านตะแกรงเบอร์ 4



รูปที่ 3 เศษพลาสติกที่บดย่อยผ่านตะแกรง 5 มิลลิเมตร

- 3) คัดแยกพาเลทไม้ โดยการนำตะปูออกจากพาเลทไม้ และตัดไม้พาเลทออกเป็นชิ้นเล็กๆ
- 4) บดย่อยไม้พาเลทด้วยเครื่องบดย่อยจำนวนไม่น้อยกว่า 3 รอบ ผ่านตะแกรงเบอร์ 4
- 5) ทำการร่อนไม้พาเลทอีกครั้ง ผ่านตะแกรงเบอร์ 60

6) ผสมเศษพลาสติกและผงไม้พาเลทให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเริ่มจากการนำเศษพลาสติกกับผงไม้พาเลทมาผสมกันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งให้พลาสติกและผงไม้พาเลทเข้ากัน

7) นำพลาสติกและผงไม้ที่ผสมจนเข้ากันแล้ว ไปใส่ลงในแม่พิมพ์ขนาด 450×450×12 มิลลิเมตร จากนั้นนำแม่พิมพ์เข้าเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน โดยใช้แรงดัน 1,300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ได้แผ่นไม้เทียมสำหรับนำไปทดสอบ



รูปที่ 5 การผสมเศษพลาสติกและผงไม้พาเลท



รูปที่ 6 การอัดแผ่นไม้เทียม



รูปที่ 7 แผ่นไม้เทียมอัตราส่วนต่างๆ ที่อัดขึ้นรูปแล้ว

5. การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นไม้เทียม

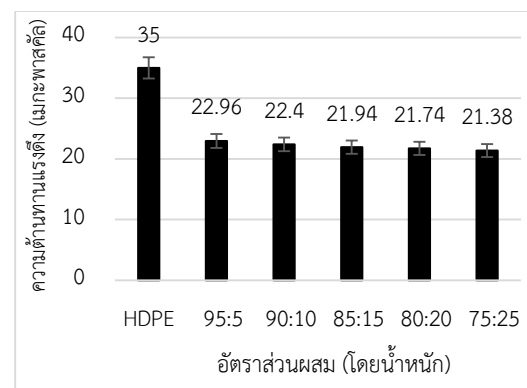
ทดสอบคุณสมบัติของแผ่นไม้เทียม ตามมาตรฐาน ASTM จำนวนอัตราส่วนละ 5 ชิ้นต่อการทดสอบ เพื่อให้ทราบคุณสมบัติสำหรับการนำแผ่นไม้เทียมไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้แก่ การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 638 TYPE 1 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 256 การทดสอบความแข็งผิว (Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 785 การทดสอบความหนาแน่น (Density Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 792 และการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 570

6. ผลการวิจัย

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นไม้เทียมที่ขึ้นรูปจากเศษขยะพลาสติกชนิด HDPE และผงไม้พาเลททั้ง 5 อัตราส่วน สามารถสรุปผลดังต่อไปนี้

6.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

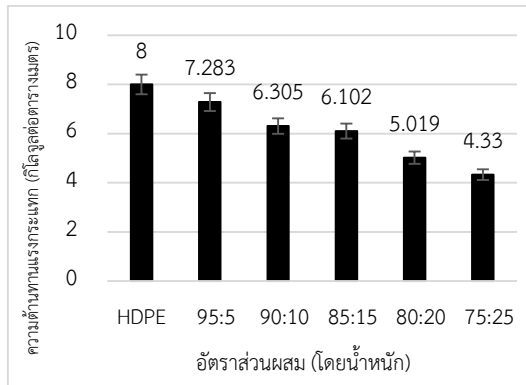
จากรูปที่ 8 พบว่า แผ่นไม้เทียมที่มีปริมาณพลาสติกชนิด HDPE มากที่สุด หรือมีปริมาณผงไม้ น้อยที่สุด (อัตราส่วนผสม 95:5) สามารถรับแรงดึงได้ดีกว่าอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณพลาสติกชนิด HDPE ลดลง ได้แก่ 90:10, 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ เนื่องจากผงไม้ที่ผสมลงในพลาสติกชนิด HDPE มีลักษณะเป็นผง ทำให้ไม่สามารถช่วยรับแรงดึงได้ดังเช่นไม้ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว [8] นอกจากนี้ผงไม้ยังมีส่วนทำให้ความต้านทานแรงดึงของพลาสติกชนิด HDPE ลดลง



รูปที่ 8 ความต้านทานแรงดึงของแผ่นไม้เทียม

6.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

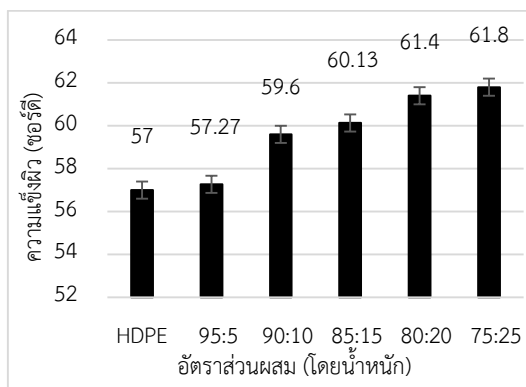
เมื่อนำแผ่นไม้เทียมทั้ง 5 อัตราส่วน ไปทดสอบความต้านทานแรงกระแทก พบว่า นอกจากแผ่นไม้เทียมที่มีปริมาณผงไม้ น้อยที่สุด (อัตราส่วน 95:5) จะรับแรงดึงได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ที่ผสมผงไม้ ในปริมาณที่มากกว่าแล้ว แผ่นไม้เทียมอัตราส่วน ดังกล่าวยังสามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าแผ่นไม้เทียมอัตราส่วนที่มีปริมาณผงไม้มากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติในการรับแรงดึงของวัสดุจำพวกพลาสติกที่ดีหรือไม่ดี จะมีผลโดยตรงทำให้คุณสมบัติในการรับแรงกระแทกที่ดีหรือไม่ดีเช่นเดียวกัน [9]



รูปที่ 9 ความต้านทานแรงกระแทกของแผ่นไม้เทียม

6.3 ผลการทดสอบความแข็งผิว

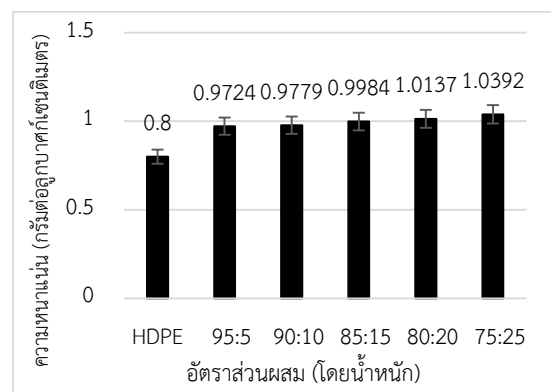
การทดสอบความแข็งที่ผิวของแผ่นไม้เทียมทั้ง 5 อัตราส่วน เป็นการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Durometer Shore D โดยใช้แท่งเหล็กชุบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 - 1.4 มิลลิเมตร ปลายหัวกดเป็นรูปกรวยมุม 30 องศา รัศมีปลาย 0.1 มิลลิเมตร พบว่า ผงไม้ที่ผสมลงในแผ่นไม้เทียมมีผลต่อค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้น โดยแผ่นไม้เทียมอัตราส่วน 75:25 มีความแข็งมากกว่าอัตราส่วน 80:20 85:15 90:10 และอัตราส่วน 95:5 มีความแข็งต่ำที่สุด ตามลำดับ เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าพลาสติกชนิด HDPE [10] เมื่อผสมผงไม้ลงไปจึงทำให้แผ่นไม้เทียมมีความแข็งผิวเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 10 ความแข็งผิวของแผ่นไม้เทียม

6.4 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ในส่วนของการวัดความหนาแน่นของแผ่นไม้เทียมที่ผสมผงไม้ทั้ง 5 อัตราส่วน พบว่า ปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นโดยตรง โดยแผ่นไม้เทียมอัตราส่วน 75:25 มีความหนาแน่นมากกว่าแผ่นไม้เทียมอัตราส่วน 80:20 85:15 90:10 และอัตราส่วน 95:5 มีความหนาแน่นน้อยที่สุดตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีช่องว่างมากกว่าพลาสติก HDPE เมื่อนำมาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน จึงทำให้ช่องว่างผงไม้ยุบและสามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นให้แก่แผ่นไม้เทียมดังกล่าวได้ [11-12] แม้ว่าผงไม้พาเลทหรือผงไม้ยางพาราจะมีความหนาแน่น 0.64 ถึง 0.74 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าพลาสติกชนิด HDPE ที่มีความหนาแน่น 0.80 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 11 ความหนาแน่นของแผ่นไม้เทียม

6.5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากการนำแผ่นไม้เทียมที่มีส่วนผสมของพลาสติกชนิด HDPE และผงไม้พาเลท ทั้ง 5 อัตราส่วน ไปทดสอบการดูดซึมน้ำโดยการแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า แผ่นไม้เทียมทั้ง 5 อัตราส่วน ไม่มีการดูดซึมน้ำ หรือมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0 เนื่องจากแผ่นไม้เทียมดังกล่าวใช้พลาสติกชนิด HDPE ซึ่งมีคุณสมบัติทนน้ำในการหุ้มผงไม้พาเลทที่มีคุณสมบัติการดูดซึมน้ำได้ทั้งหมด ทำให้แผ่นไม้เทียมทั้ง 5 อัตราส่วน ไม่มีการดูดซึมน้ำดังกล่าว [13-14]

7. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณของผงไม้พาเลทที่ผสมมีผลต่อสมบัติของแผ่นไม้เทียมหรือวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรง และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รวมทั้งส่งผลให้คุณสมบัติการรับแรงดึง และแรงกระแทกมีค่าลดต่ำลง แผ่นไม้เทียมดังกล่าวจึงเหมาะกับการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงไม่มากนัก เช่น กล่องใส่นามบัตร กรอบรูป วัสดุกรุผนังภายใน โดยสามารถนำไปผลิตได้ทุกอัตราส่วน และเมื่อพิจารณาจากวัตถุดิบประสมแล้ว อัตราส่วน 75:25 จะเป็นแผ่นไม้เทียมอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากใช้ปริมาณผงไม้พาเลทมากที่สุด ในขณะที่แผ่นไม้เทียมยังคงมีลักษณะและคุณสมบัติที่ดี ซึ่งเป็นการนำพลาสติกชนิด HDPE กลับมาใช้ใหม่ รวมไปถึงการช่วยลดมลภาวะทางอากาศและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการกำจัดไม้พาเลท

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2565 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lazrak C, Kabouchi B, Hammi M, Famiri A, Ziani M. Structural study of maritime pine wood and recycled high-density polyethylene (HDPEr) plastic composite using Infrared-ATR spectroscopy, X-ray diffraction, SEM and contact angle measurements. *Case Studies in Construction Materials*. 2019;10, e00227.
- [2] Lei Y, & Wu Q. Wood plastic composites based on microfibrillar blends of high density polyethylene/poly (ethylene terephthalate). *Bioresource technology*. 2010;101(10):3665-71.
- [3] Aranda-García F. J, González-Pérez M. M, Robledo-Ortíz J. R, Sedano-de la Rosa C, Espinoza K, Ramírez-Arreola D. E. Influence of processing time on physical and mechanical

properties of composite boards made of recycled multilayer containers and HDPE. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2020;22:2020-8.

[4] Papo M, Corona B. Life cycle sustainability assessment of non-beverage bottles made of recycled High Density Polyethylene. *Journal of Cleaner Production*. 2022;378:134442.

[5] Deepanya W, Suweero K. Rubber tile products mixed with plastic waste from industrial factories. *Journal of Community Development and Life Quality*. 2016;4(3):451-60. (in Thai)

[6] Lei Y, Wu Q, Clemons C. M. Preparation and properties of recycled HDPE/clay hybrids. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007;103(5):3056-63.

[7] Sirisan P, Poonsang P, Saithongkam W, Prommaphong A. The development of a multi-purpose table set model from transportation wood. *PSRU Journal of Industrial Technology and Engineering*. 2020;2(1);76-87. (in-Thai)

[8] Kerprasit P, Weeranukul P, Weeranukul I, Suweero K, Muangprab K. Development of particleboard from northern black wattle tree bark for using as decorative materials. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2021;19(1):125-35. (in Thai)

[9] Vincent PI. A correlation between critical tensile strength and polymer cross-sectional area. *Polymer*. 1972;13(1):558-60.

[10] González J, Barba A, Flores E, Cervantes J. Methodology for the obtaining in materials consisted of plastic -wood and his characterization with the hardness test. *International Journal of Engineering Innovation & Research*. 2013;2(4):314-8.

- [11] Chetsingh B. Basic Wood Utilization. Bangkok: Bureau of Forest Management and Forest Products Research, Royal Forest Department; 2004. (in Thai)
- [12] Sekaluvu L, Tumutegereize P, Kiggundu N. Investigation of factors affecting the production and properties of maize cob-particleboards. *Waste Biomass Valor.* 2014; 5(1):27–32.
- [13] Zhang X, Bo X, Wang R. Study on mechanical properties and water absorption behaviour of wastepaper fibre/ recycled polypropylene composites. *Polymers & Polymer Composites.* 2013;21(6):395-402.
- [14] Faherty KF, Williamson TG. Wood engineering and construction handbook. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.

การศึกษาการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำจากปลายท่อส่งน้ำของการประปา ก่อนไหลลง ถังเก็บน้ำใต้ดิน

พงษ์พันธ์ พรหมพิพัต¹ วรวิทย์ สุวรรณเรือง^{1*} และพิเชฐ มีสัจจ²

phongphan.pro@neu.ac.th¹, worr6543@gmail.com^{1*}, phichet.mee@neu.ac.th²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Received: July 10, 2023 Revised: May 11, 2024 Accepted: May 14, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานเหลือทิ้งของการไหลของน้ำที่ปลายท่อ ก่อนไหลลงสู่ถังเก็บน้ำใต้ดิน จากการวัดความดันที่ปลายท่อส่งน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีค่าเฉลี่ยที่ 1.0 bar ซึ่งชุดผลิตไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นกังหันน้ำแบบเพลตัน (Pelton Turbine) มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานน้ำให้เป็นพลังงานกล ออกแบบให้ขนาดรัศมีของใบพัดเท่ากับ 150 mm และจำนวนของแผ่นรับน้ำ (Bracket) รูปทรงครึ่งวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 mm จำนวน 12 แผ่น และส่วนที่ 2 ได้นำเอามอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) ขนาด 340 W มาเปลี่ยนหน้าที่ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง เนื่องจากความดันน้ำขณะที่ไหลในแต่ละช่วงเวลาจะไม่คงที่ การทดสอบจะเริ่มตั้งแต่ 08.30 น. ไปจนถึง 17.30 น. เว้นระยะห่างทุกๆ 30 นาทีในการเก็บข้อมูล จากการวัดค่าพลังงานของน้ำ พบว่าความดันน้ำ ณ จุดปลายท่อเฉลี่ยเท่ากับ 13.5 mH₂O อัตราการไหลของน้ำเฉลี่ยผ่านหัวฉีดเท่ากับ 7.57×10^{-4} m³/s และกำลังงานเฉลี่ยที่ได้จากพลังงานน้ำเท่ากับ 99.2 W ในส่วนของพลังงานไฟฟ้าวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ 14.20 Vdc กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 Adc กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 11.6 W และความสามารถในการผลิตไฟฟ้าสะสมในช่วงเวลา 9 ชั่วโมงได้เท่ากับ 64.20 Wh เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และกำลังงานที่พลังงานน้ำส่งเข้าสู่ชุดผลิตไฟฟ้ามาคำนวณหาประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าจะได้เฉลี่ยเท่ากับ 11.55 %

คำสำคัญ: ชุดผลิตไฟฟ้า กังหันน้ำแบบเพลตัน พลังงานน้ำ

A Study of Hydroelectric Power Generation from the End of a Water Supply Pipe before Flowing into an Underground Water Tank

Phongphan Promphiphak¹ Woravut Suwanrueng^{1*} and Pichet Meesat²
phongphan.pro@neu.ac.th¹, worr6543@gmail.com^{1*}, phichet.mee@neu.ac.th²

¹ Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University

² Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University

Received: July 10, 2023 Revised: May 11, 2024 Accepted: May 14, 2024

Abstract

This research examines hydro-energy generation from residual pressure at the end of the water supply pipe before it flows down to be stored in an underground water tank. It can be converted into electrical energy. From measuring the pressure at the end of a diameter 2-inch water pipe, the average pressure value is 1.0 bar. The researcher designed and built a simple hydroelectric power generation set in this study. The power generation set consists of 2 main parts: the first part is a Pelton turbine that converts water energy into mechanical energy. The Pelton turbine was designed a radius of impeller equal to 150 mm and the number of brackets in a hemispherical shape with a diameter of 65 mm, 12 pieces. The second part uses a 340 W permanent magnet synchronous electric motor (PMSM) to transform the function into a direct generator. Due to the water pressure while flowing unstable, the test will start from 8:30 a.m. to 5:30 p.m. with a 30 minute interval between data collection. From the water energy measurement, the average water pressure at the end of the tube was 13.5 mH₂O, the average water flow through the nozzle was 7.57x10⁻⁴ m³/s, and the average water power was 99.2 W. In terms of electrical energy, the average voltage was 14.20 Vdc, the average current was 0.82 Adc, the average power was 11.6 W, and the cumulative power generation capacity over 9 hours was 64.20 Wh. When taken to find the efficiency of the power generation system, it was equal to 11.55 percent.

Keywords: Electric generator set, Pelton turbine, Hydro energy

1. บทนำ

แหล่งผลิตน้ำประปาในแต่ละท้องถิ่น จะทำการส่งน้ำประปาเข้าท่อส่งน้ำที่ต้นทางด้วยเครื่องสูบน้ำ แรงดันสูงร่วมกับถังเก็บน้ำสูง [1] แล้วลำเลียงน้ำไปจ่ายให้ตามบ้านเรือนหรือสถานประกอบการต่างๆ ซึ่งความดันที่ใช้ส่งน้ำประปาจากท่อส่งน้ำต้นทางจะมีค่าสูงกว่าความดันที่จุดปลายทางท่อส่งน้ำเพื่อให้มั่นใจว่าการส่งจ่ายน้ำจะสามารถส่งไปได้ทั่วถึงทุกจุด เมื่อน้ำประปาถูกส่งมาถึงปลายทาง ณ จุดของผู้ใช้น้ำ ความดันน้ำภายในท่อจะต้องมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1 -1.5 bar [2]

ดังนั้น สำหรับผู้ใช้น้ำที่ใช้วิธีนำเอาน้ำประปามาพักเก็บไว้ที่ถังเก็บน้ำใต้ดินขนาดใหญ่ก่อน แล้วจึงค่อยนำน้ำไปใช้ เมื่อถึงเวลาที่ต้องการใช้น้ำจริงในกรณีแบบนี้ความดันน้ำที่จุดปลายทางท่อส่งน้ำประปาก่อนที่น้ำจะไหลลงสู่ถังเก็บน้ำจึงถือว่าเป็นความดันที่เสียทิ้ง ซึ่งจากการตรวจวัดความดันที่จุดปลายทางท่อส่งน้ำ ณ ถังเก็บน้ำสำรองใต้ดินของมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น พบว่าค่าความดันน้ำเฉลี่ย ณ จุดปลายทางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว อยู่ที่ 1.0 bar จึงทำให้กลุ่มผู้ทำวิจัยสนใจที่จะนำเอาแรงดันน้ำที่เหลือตรงจุดปลายทางน้ำดังกล่าวมาทำการศึกษาเพื่อจะใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า [3] สำหรับชุดผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำทางกลุ่มผู้วิจัยได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นเอง โดยการสร้างเป็นกังหันน้ำแบบเพลตัน (pelton turbine) อย่างง่าย ใช้หัวฉีดน้ำ (nozzle) จำนวน 1 หัวฉีด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูรับน้ำเข้าเท่ากับ 30 mm และรูส่งน้ำออกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm พร้อมถ่วงรับน้ำ (bracket) ที่ติดไว้กับกังล้อของกังหันน้ำ จำนวน 12 ใบ เพื่อใช้เป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ได้นำเอามอเตอร์ของเครื่องซักผ้าแบบขับตรงมาดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ความเร็วรอบต่ำในการผลิตไฟฟ้า ส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำมาพักเก็บไว้ในแบตเตอรี่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 Vdc ก่อนที่จะนำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปใช้งาน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบและสร้างชุดผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ

จากการวัดค่าความดันน้ำที่จุดปลายทางท่อส่งน้ำประปาก่อนที่จะปล่อยน้ำลงเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใต้ดินพบว่ามีความดันเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 bar ในขณะที่ท่อส่งน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 นิ้ว เมื่อนำค่าทั้งสองไปคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำที่ไหลออกจากท่อ จึงทำให้ผู้วิจัยเลือกนำเอาชุดต้นกำลังขับเคลื่อนที่ใช้พลังงานน้ำแบบกังหันน้ำเพลตันขนาดเล็ก ดังรูปที่ 1 มาขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าให้หมุน เพราะกังหันน้ำแบบนี้มีขนาดไม่ใหญ่และใช้ปริมาณน้ำในการผลิตต้นโบพัดของกังหันน้ำไม่มาก [4] ออกแบบให้รัศมีของกังล้อเท่ากับ 150 มม. ส่วนถ่วงรับน้ำเป็นรูปครึ่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. มีจำนวน 12 ใบ และสร้างใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำมาจากมอเตอร์เครื่องซักผ้าแบบขับตรงไม่ผ่านสายพาน เพราะเป็นมอเตอร์เชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) ที่สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้โดยตรงไม่ต้องมีวงจรควบคุมมาช่วยเพิ่มเติมอีก และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่รอบการหมุนต่ำประมาณ 200 rpm ไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ดังรูปที่ 2 [5]

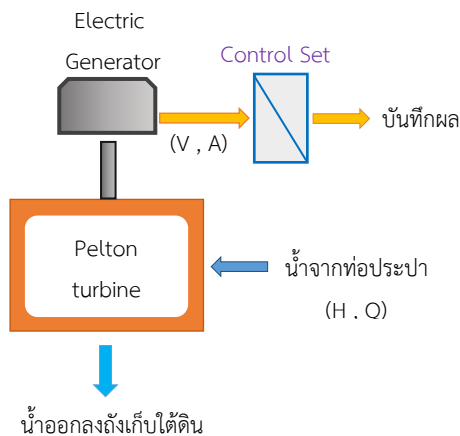


รูปที่ 1 ใบพัดของกังหันน้ำแบบเพลตันที่สร้างขึ้นเองอย่างง่าย



รูปที่ 2 มอเตอร์เชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM)

สำหรับการออกแบบชุดผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบกังหันน้ำเพลตันและชุดวงจรควบคุมการผลิตไฟฟ้า(control set) ที่ประกอบด้วย bridge rectifier ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง โหลดไฟฟ้ากระแสตรง และมิเตอร์อ่านค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งได้แสดงแผนผังการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ไว้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของชุดผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ

หลักการทำงานของชุดผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ เริ่มจากปล่อยให้ น้ำที่มีความดันเหลือจากท่อประปาไหลเข้ากังหันน้ำเพลตัน ผ่านหัวฉีดน้ำไปกระทบกับถ้วยรับน้ำที่ติดอยู่กับกังล้อกังหันน้ำ ทำให้กังล้อหมุนส่งแรงบิดผ่านเพลลาขับที่ต่อร่วมกับแกนเพลลาของชุดผลิตไฟฟ้า (electric generator) หมุนพาขดลวดที่อยู่บน โรเตอร์ (rotor) เคลื่อนตัดผ่านแม่เหล็กถาวรที่ติดอยู่กับ สเตเตอร์ (stator) ทำให้เกิดการผลิตไฟฟ้าแบบกระแสสลับส่งออกไปยังชุดวงจรควบคุมการผลิตไฟฟ้า ส่วนน้ำประปาที่ไปกระทบกับถ้วยรับน้ำแล้ว จะไหลออกตามท่อที่เตรียมไว้ลงไปเก็บที่ถังเก็บน้ำใต้ดิน

2.2 วิธีทดสอบ

ในการวิจัยนี้ ณ จุดที่ทดสอบได้ทำการปรับเปลี่ยนแนวการติดตั้งของท่อส่งน้ำประปาก่อนที่จะเข้าถังเก็บน้ำใต้ดินให้สามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ชุดทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำที่จัดสร้างขึ้นได้ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การปรับเปลี่ยนแนวท่อส่งน้ำที่จะส่งเข้าเครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ

2.2.1 กำลังงานที่ได้จากความดันของน้ำประปาส่งให้หัวฉีดซึ่งหาได้จากสมการที่ (1)

$$P_{in} = \rho g Q H \quad (1)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังงานที่ได้จากความดันของน้ำประปาส่งให้หัวฉีด (W)

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3) ที่อุณหภูมิ 25-30 °C

Q คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านหัวฉีด (m^3/s)

H คือ หัวน้ำรวมภายในท่อส่งน้ำประปาที่จุดก่อนเข้าหัวฉีด (mH_2O)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

2.2.2 กำลังไฟฟ้าที่เครื่องผลิตไฟฟ้าผลิตได้ เนื่องจากชุดใบกังหันน้ำส่งกำลังผ่านเพลลาขับร่วมกันโดยตรงกับเพลลาขับของเครื่องผลิตไฟฟ้า ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2)

$$P_{out} = VI \quad (2)$$

เมื่อ P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องผลิตไฟฟ้าผลิตได้ (W)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องผลิตไฟฟ้า (A)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องผลิตไฟฟ้า (V)

2.2.3 เนื่องจากขณะที่กังหันน้ำทำงาน จะมีกำลังที่สูญเสียไปในส่วนต่างๆ เช่น กำลังสูญเสียทางกล กำลังสูญเสียทางศาสตร์ และการสูญเสียจากเครื่องผลิตไฟฟ้า [6] ดังนั้น การคำนวณหาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (η) หาได้จากสมการที่ (3)

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \quad (3)$$

2.2.4 ในการทำงานของเครื่องผลิตไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา จะขึ้นกับปริมาณและความดันของน้ำที่ส่งเข้าหัวฉีดที่มีขนาดไม่คงที่ ดังนั้นความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจึงไม่คงที่ ซึ่งหาได้จากสมการที่ (4)

$$W_e = P_{out}t \quad (4)$$

เมื่อ W_e คือ ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า (W.h)

t คือ เวลาที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า (s)

3. ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

การทดสอบการเปลี่ยนพลังงานน้ำที่มีความดันน้ำที่เหลือในท่อจากการจ่ายน้ำประปา ณ จุดปลายท่อส่งก่อนส่งน้ำเข้าไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใต้ดิน สถานที่ทดสอบได้ทำการทดสอบภายในมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีการเก็บกักน้ำไว้ในถังเก็บน้ำประปาใต้ดินก่อนที่จะใช้เครื่องสูบขึ้นไปเก็บไว้บนถังเก็บน้ำสูง (tower tank) อีกทีเพื่อจ่ายไปยังจุดใช้น้ำ สำหรับการทดสอบจะทำการเก็บผลการทดสอบ 2 ส่วน คือ 1) ค่าพลังงานน้ำจากท่อประปาที่จ่ายเข้าสู่ชุดกังหันน้ำและ 2) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ทำการติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำและมาตรวัดอัตราการไหลแบบอุลตราโซนิกไว้ที่ท่อน้ำขนาด 2 นิ้ว ณ จุดก่อนที่น้ำจะไหลเข้าหัวฉีด แสดงดังรูปที่ 5 แล้วคำนวณหาพลังงานน้ำจากท่อประปาที่จ่ายเข้าสู่ชุดกังหันน้ำ ผลการวัดค่าพลังงานน้ำจากท่อส่งน้ำของการประปาที่ไหลออกจากหัวฉีดน้ำเข้าไปปลั๊กก๊อกของ

กังหันน้ำแบบเพลดัน พบว่า ความดันน้ำเฉลี่ยที่จุดก่อนเข้าหัวฉีดเท่ากับ 13.5 mH₂O และปริมาณของอัตราการไหลน้ำเฉลี่ยที่ออกจากหัวฉีด 7.57×10^{-4} m³/s และกำลังงานเฉลี่ยที่ส่งออกจากหัวฉีดคำนวณได้เท่ากับ 99.2 Watts ซึ่งได้แสดงผลการวัดและการคำนวณไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 5 ติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำและมาตรวัดอัตราการไหลที่ตำแหน่งก่อนจ่ายน้ำเข้าหัวฉีด

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานน้ำจากท่อประปาที่ไหลออกจากหัวฉีดน้ำไปปลั๊กก๊อกกังหันน้ำที่เก็บข้อมูลได้ในช่วงเวลา 08.30 น. ถึง 17.30 น.

เวลา (น.)	พลังงานน้ำจากท่อประปาที่จ่ายเข้าสู่ชุดกังหันน้ำ				
	H (m)	ΔP (psig)	V_n (m/s)	$Q \times 10^{-4}$ (m ³ /s)	P_{in} (W)
08.30	15.5	-	-	-	-
09.00	15.5	-	-	-	-
09.30	14.8	-	-	-	-
10.00	14.1	11.6	12.65	7.95	109.5
10.30	13.9	11.4	12.53	7.87	106.8
11.00	13.7	11.1	12.39	7.78	104.1
11.30	13.6	11.0	12.30	7.73	102.7
12.00	13.6	10.9	12.26	7.70	102.3
12.30	13.5	10.8	12.23	7.68	101.3
13.00	13.5	10.8	12.21	7.67	101.2
13.30	13.0	-	-	-	-
14.00	12.7	-	-	-	-
14.30	11.2	-	-	-	-
15.00	11.7	8.2	10.62	6.67	76.3
15.30	10.7	6.8	9.68	6.08	63.6
16.00	14.0	11.5	12.61	7.92	108.3

ตารางที่ 1 (ต่อ)

เวลา (น.)	พลังงานน้ำจากท่อประปาที่จ่ายเข้าสู่ชุดกังหันน้ำ				
	H (m)	ΔP (psig)	V_n (m/s)	$Q \times 10^{-4}$ (m ³ /s)	P_{in} (W)
16.30	13.8	11.3	12.50	7.85	105.8
17.00	13.8	11.2	12.42	7.80	105.2
17.30	13.6	10.9	12.29	7.72	102.5
ค่าเฉลี่ย	13.5	10.6	12.05	7.57	99.2

หมายเหตุ : ค่า H คือ ความดันน้ำในท่อ โดยวัดในสภาวะอยู่นิ่ง ก่อนที่จะไหลเข้าหัวฉีด ΔP คือ ค่าความดันน้ำแตกต่างระหว่าง ก่อนไหลเข้าและไหลออกหัวฉีด V_n คือ ความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าหัวฉีดซึ่งวัดจากเครื่องวัดการไหลอุลตราโซนิก และส่วนที่เว้นว่างไม่มีข้อมูลเป็นสภาวะที่ถังเก็บน้ำใต้ดินมีน้ำเต็ม จึงหยุดการจ่ายน้ำเข้าสู่ถังเก็บใต้ดิน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของชุดผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำที่สร้างขึ้น จะผลิตไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อส่งจ่ายไปใช้งาน ดังนั้น การทดสอบหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทดสอบเป็น 2 วิธี คือ 1) นำเอาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 Vdc แล้ววัดค่าอัตราการผลิตไฟฟ้า หรือ 2) นำเอาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จ่ายให้กับหลอดไฟชนิดแอลอีดี (LED) ชนิดที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดกำลังไฟฟ้า 9 W จำนวน 2 หลอดที่ต้องจอร์จนานไว้ แล้ววัดค่าอัตราการผลิตไฟฟ้า ส่วนชุดวัดค่าทางไฟฟ้าที่ชุดผลิตไฟฟ้าผลิตได้แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจากการทดสอบ พบว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้เท่ากับ 11.6 W รอบการหมุนเฉลี่ย (η_m) ของแกนกังล้อของกังหันน้ำเท่ากับ 229 rpm และค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมรวมที่ผลิตได้ตลอด 9 ชั่วโมง เท่ากับ 64.2 Wh ซึ่งได้แสดงผลการวัดและการคำนวณตามตารางที่ 2

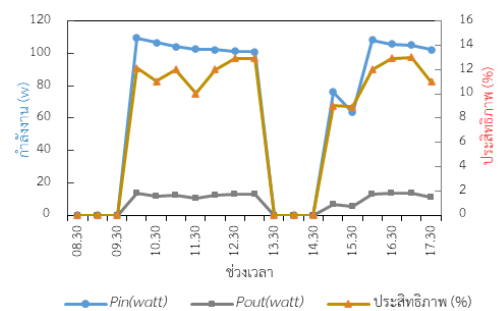


รูปที่ 6 ชุดวัดและแสดงผลค่าทางไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลา 08.30น.ถึง17.30น.

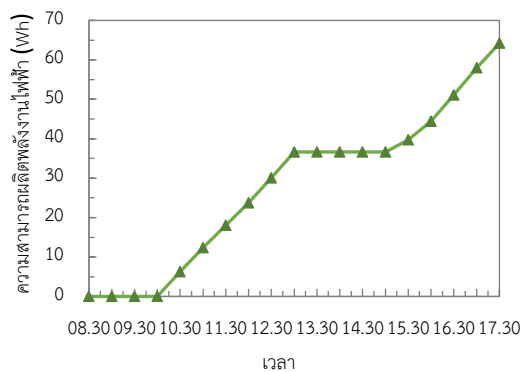
เวลา (น.)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้า					ประสิทธิภาพ (%)
	Vdc (V)	Idc (A)	P_{out} (W)	W_e (Wh)	n (rpm)	
08.30	-	-	-	-	-	-
09.00	-	-	-	-	-	-
09.30	-	-	-	-	-	-
10.00	14.80	0.90	13.3	0.00	238	12.15
10.30	14.32	0.82	11.8	6.28	231	11.05
11.00	14.53	0.86	12.5	12.36	234	12.01
11.30	13.38	0.77	10.3	18.06	216	10.03
12.00	14.47	0.85	12.3	23.71	233	12.02
12.30	14.70	0.89	13.1	30.06	237	12.93
13.00	14.70	0.89	13.1	36.61	237	12.94
13.30	-	-	-	-	-	-
14.00	-	-	-	-	-	-
14.30	-	-	-	-	-	-
15.00	12.63	0.55	6.9	36.61	204	9.04
15.30	12.39	0.46	5.7	39.76	200	8.96
16.00	14.68	0.88	13.0	44.43	237	12.00
16.30	14.85	0.92	13.7	51.10	239	12.95
17.00	14.85	0.92	13.7	57.95	239	13.02
17.30	14.30	0.79	11.3	64.20	231	11.02
ค่าเฉลี่ย	14.20	0.82	11.6	-	229	11.55

เมื่อนำค่าของกำลังที่ได้จากพลังงานน้ำส่งให้กังล้อของกังหันน้ำแบบเพลตันใช้หมุนแกนเพลลาขับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้มาหาค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 7 ค่าของกำลังงานที่ได้จากพลังงานน้ำ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ และค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

ได้เท่ากับ 11.55 % ได้แสดงผลไว้ดังรูปที่ 7 และความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมได้ตลอดช่วงการทดสอบ 9 ชั่วโมง ได้เท่ากับ 64.20 Wh ที่ความเร็วรอบการหมุนเฉลี่ย (n_{av}) ของแกนเพลาชับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 229 rpm แสดงไว้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมได้ตลอดช่วงการทดสอบ 9 ชั่วโมง

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษานำเอาพลังงานน้ำจากท่อส่งน้ำของการประปาที่มีความดันเหลือ ณ จุดปลายท่อก่อนที่จะไหลลงสู่ถังเก็บน้ำใต้ดินมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ชุดผลิตไฟฟ้าที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นอย่างง่าย พบว่า พลังงานน้ำ ณ จุดปลายท่อส่งน้ำของการประปามีค่าความดันเฉลี่ยเท่ากับ $13.5 \text{ mH}_2\text{O}$ และอัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ $7.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ สามารถให้พลังงานทางกลเฉลี่ย 99.2 W เมื่อนำไปใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 14.20 Vdc ค่ากระแสไฟฟ้าที่ส่งไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ได้เท่ากับ 0.82 Adc หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับ 11.6 W และความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมได้ตลอดช่วงการทดสอบ 9 ชั่วโมง ได้เท่ากับ 64.20 Wh ที่ความเร็วรอบการหมุนเฉลี่ยของแกนเพลาชับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 229 rpm และเมื่อนำเอาค่ากำลังงานที่ได้จากพลังงานน้ำกับกำลังไฟฟ้าที่ชุดผลิตไฟฟ้าผลิตได้มาหาค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้เท่ากับ 11.55 %

เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการผลิตไฟฟ้าสะสมและค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้มีค่าไม่ถึง 50 % ถือว่ามีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานน้ำที่ส่งเข้าไปให้ชุดผลิตไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาติดตั้งไว้ในชุดผลิตไฟฟ้านั้น ได้ดัดแปลงเอามอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) มาเปลี่ยนหน้าที่ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้จะมีปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์คงที่ ถ้าจะให้เครื่องสามารถผลิตไฟฟ้าสะสมได้มากขึ้นจะต้องทำให้แกนแม่เหล็กหมุนตัดผ่านขดลวดทองแดงได้เร็วเพิ่มขึ้นหรือเลือกเอามอเตอร์ประเภทอื่น เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส เป็นต้น มาทำวิจัยนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ได้ส่งเสริมทุนในการทำวิจัยและอนุญาตให้ใช้สถานที่ทำวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่สนับสนุนให้ใช้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Provincial Waterworks Authority. Basic knowledge of water supply systems. [Internet]. 2019 [cited 2023 Jun 10]; 20. Available from: https://training.pwa.co.th/uploads/files/Document/7_KM.pdf. (in Thai)
- [2] Charoenchim C, Ruangsumraj T, Surasaranwong T, Charut P, Pornprommin A, Raksajit W. Pressure and water quality analysis in residential property using pump tank system. Proceedings of 58th Kasetsart University Annual Conference; 2020 Feb 5-7; Bangkok. Bangkok: Office of the University Library, Kasetsart University; 2020. P. 296-302.

- [3] Saniso E, Chaidana H. Development of simple low head pico-hydropower generator. Journal of Yala Rajabhat University. 2014; 9(1):31-42.
- [4] John F. Douglas, Janusz M. Gasiorek, John A. Swaffield Lynne B. Jack. Fluid mechanics. 5th ed. England. Pearson Prentice Hall; 2005.
- [5] Phupradubsin R. Technologies related to electric vehicles: electric motors. NECTEC [Internet]. 2022 [cited 2023 Jun 10]; p. 1-10. Available from:<https://www.nectec.or.th/news/public.html> (in Thai)
- [6] Husain Z, Abdullah Z, Alimuddin Z. Basic fluid mechanics and hydraulic machines. Hyderabad. BS Publications; 2008.

คอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง

จรรณู เจริญเนตรกุล¹ ประชุม คำพุด^{2*} เปรมณัช ชุมพร้อม¹ และอรุณ ลูกจันทร์¹
charoon.c@rmutsv.ac.th¹, prachoom_k@rmutt.ac.th^{2*}, premmanat.c@rmutsv.ac.th¹,
arun.l@rmutsv.ac.th¹

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: December 16, 2023 Revised: March 2, 2024 Accepted: April 22, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมาผสมเป็นมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตพูน เปรียบเทียบสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การไหลผ่านของน้ำ และการขัดสีของคอนกรีต โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของซีเมนต์เพสต์ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 40, 42, 44, 46 และ 48 ของน้ำหนักเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ให้ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของซีเมนต์เพสต์ทำให้คอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่การขัดสีของคอนกรีต การไหลผ่านของน้ำ มีค่าลดลง พบว่าที่ CB-44 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ผสมซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 44 ของน้ำหนักเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงสามารถรับกำลังอัดได้ 138.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการไหลผ่านของน้ำอยู่ที่ 1.03 เซนติเมตรต่อวินาที และการขัดสีของคอนกรีตเพียง 5.00 กรัม มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตพูนกับโครงการที่เป็นลานจอดรถยนต์ส่วนบุคคลได้

คำสำคัญ: คอนกรีตพูน เศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง การไหลผ่านของน้ำ การขัดสีของคอนกรีต

Porous Concrete Mixed with Crumbs of Prestressed Concrete Pile

Charoon Charoennetkul¹, Prachoom Khamput^{2*}, Premmanat Chumprom¹ and Arun Lukjan¹
charoon.c@rmutsv.ac.th¹, prachoom_k@rmutt.ac.th^{2*}, premmanat.c@rmutsv.ac.th¹,
arun.l@rmutsv.ac.th¹

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

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

Received: December 16, 2023 Revised: March 2, 2024 Accepted: April 22, 2024

Abstract

The purpose of this project is to study the use of crumbs of prestressed concrete pile to mix into coarse aggregates in the production of porous concrete to compare various properties by modifying the volume of cement paste that was binding materials in the ratio of 40, 42, 44, 46 and 48 percent of the prestressed pile weight to know the suitable ratio for use. The result of the properties of porous concrete mixed with crumbs of prestressed pile is a coarse aggregate material was found that when the volume of cement paste was increased get porous concrete mixed with crumbs of prestressed pile has compression was increased but the attrition of concrete and water flow was decreased which found that CB-44, which is the ratio of cement paste 44 percent of the weight of prestressed concrete pile and able to handle a maximum compressive strength of 138.47 kilograms per square centimeter. The water flow test is 1.03 centimeters per second and the resulting test of attrition of concrete was 5.00 grams. Suitable for use in perforated concrete projects that are private car parks.

Keywords: Porous concrete, Crumbs of prestressed concrete pile, Water flow, Attrition of concrete

1. บทนำ

คอนกรีตพรุน (Porous Concrete) คือ คอนกรีตมวลเบาชนิดหนึ่งที่มีลักษณะพิเศษจากคอนกรีตทั่วไป คือภายในเนื้อคอนกรีต มีรูพรุนและโพรงที่ต่อเนื่องปริมาณมาก ซึ่งยอมให้อากาศหรือน้ำไหลผ่านได้ คอนกรีตพรุนมีน้ำหนักที่เบาและกำลังต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป ในต่างประเทศ เช่น อังกฤษ อเมริกาและญี่ปุ่น มีการนำคอนกรีตพรุน มาใช้งานก่อสร้างมากกว่า 40 ปี [1] ลักษณะทั่วไปของคอนกรีตพรุนคือ คอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียด หรือมีในปริมาณเล็กน้อย จะอยู่ในส่วนผสมของเพสต์ โดยเพสต์นี้จะทำหน้าที่เชื่อมประสานมวลรวมหยาบ เข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นคอนกรีตพรุนจึงประกอบด้วย 3 ส่วน โดยส่วนแรกคือ มวลรวมหยาบที่มีขนาดไม่ต่อเนื่อง (Open Grade) หรือขนาดเดียว (Single Grade) ได้แก่ หิน กรวด มวลรวมรีไซเคิล หรือวัสดุอื่น ๆ มีปริมาณร้อยละ 60-70 โดยปริมาตร ส่วนที่สอง คือส่วนที่เป็นเพสต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ และน้ำเป็นหลัก แต่อาจมีส่วนผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำพิเศษ สารผสมเพิ่ม (Admixture) หรือวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) เข้าไปเล็กน้อย คอนกรีตพรุน มีปริมาณเพสต์ 15-25 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และส่วนสุดท้าย คือโพรงช่องว่าง (Pore Size) ของคอนกรีตพรุนที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้

จากงานวิจัย บล็อกปูถนนคอนกรีตพรุน พบว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 หรือ ร้อยละ 22 โดยน้ำหนักหิน และส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) 0.40 ซีเมนต์เพสต์จะเคลือบผิวมวลรวมได้ดี เหมาะที่นำมาผลิตขึ้นรูปบล็อกปูถนนคอนกรีตพรุน [2] ในส่วนของการศึกษาบล็อกคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ น้ำ หินกรวด และกะลาปาล์ม น้ำมัน พบว่าบล็อกคอนกรีตพรุนมีค่ากำลังต้านทานแรงอัด อัตราการซึมผ่านของน้ำ และความหนาแน่นตามมาตรฐาน ACI522R-10 โดยค่าการนำความร้อนและความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกะลาปาล์มลดลง ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกะลาปาล์ม [3]

เสาะเสริม ทำหน้าที่ในถายน้ำหนักของตัวอาคารลงสู่ดิน จากการเก็บข้อมูลปี 2564 พบว่าการจำหน่ายเสาะเสริมคอนกรีตอัดแรงเฉลี่ยปีละประมาณ 1,036,402 ตัน มีหัวเสาะเสริมที่ถูกตัดทิ้งคิดเป็นร้อยละ 15 – 30 ของจำนวนเสาะเสริมโดยปริมาตร ซึ่งหัวเสาะเสริมที่ถูกตัดทิ้งเหล่านี้ส่วนใหญ่ก็จะถูกฝังกลบในบริเวณก่อสร้าง อาจจะมีผลกระทบต่อ การซ่อมแซมหรือต่อเติมอาคารในภายหลัง

คณะวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเศษเสาะเสริมที่เหลือใช้มาประยุกต์ใช้และพัฒนาทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยนำเศษหัวเสาะเสริมที่ถูกตัดทิ้งมาย่อยแล้วผสมกับซีเมนต์เพสต์ ผลิตเป็นคอนกรีตพรุนผสมเศษเสาะเสริมคอนกรีตอัดแรง ทดสอบกำลังรับแรงอัด การไหลผ่านของน้ำ การขัดสีของคอนกรีต เพื่อวิเคราะห์นำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นการนำวัสดุก่อสร้างที่เหลือใช้ ลดการทำลายป่า เป็นการรักษาสสิ่งแวดล้อมอีกทาง

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษเสาะเสริมมาใช้งานคอนกรีตพรุน
- 2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ กำลังอัด ค่าการไหลผ่าน และการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของคอนกรีตพรุน
- 2.3 เพื่อพิจารณาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

3. วิธีการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเริ่มจาก การออกแบบส่วนผสม การทดสอบคอนกรีตพรุนผสมเศษเสาะเสริมคอนกรีตอัดแรง โดยการนำเศษเสาะเสริมคอนกรีตอัดแรงผสมกับซีเมนต์เพสต์ในปริมาณร้อยละ 40, 42, 44, 46 และ 48 โดยน้ำหนักของเศษเสาะเสริมคอนกรีตอัดแรง ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.40 หล่อขึ้นรูปโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด การไหลผ่านของน้ำที่อายุ 28 วัน และแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด

15×15×15 เซนติเมตร นำไปทดสอบการสูญเสีย น้ำหนักจากการขัดสีของคอนกรีต โดยมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

3.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตพรุน

นำเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมาย่อย ร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 3/8 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำสะอาด โดยใช้น้ำประปา

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1) ชุดทดสอบการขัดสีของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 944-99 [4] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดทดสอบการขัดสี

2) ชุดทดสอบการไหลผ่านของน้ำ [5] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดทดสอบการไหลผ่านของน้ำ

3) ชุดทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 [6] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบกำลังอัด

4) อุปกรณ์อื่น ๆ เช่นเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.01 กรัม เครื่องมือวัดความยาวที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

3.2 ขั้นตอนการศึกษา

3.2.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตพรุน

ใช้ในการทดสอบใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 40, 42, 44, 46 และ 48 ของน้ำหนักมวลรวมหยาบ (เศษเส้าเข็มอัดแรง) และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ร้อยละ 0.40 ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตพรุนสำหรับหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก

ส่วนผสม	มวลรวมหยาบ (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
CB-40	19,200	7,680	3,072
CB-42	19,200	8,064	3,226
CB-44	19,200	8,448	3,379
CB-46	19,200	8,832	3,533
CB-48	19,200	9,216	3,686

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมคอนกรีตพรุนสำหรับหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์

ส่วนผสม	มวลรวมหยาบ (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
CB-40	16,500	6,600	2,640
CB-42	16,500	6,930	2,772
CB-44	16,500	7,260	2,904
CB-46	16,500	7,590	3,036
CB-48	16,500	7,920	3,168

หมายเหตุ : CB คือคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มอัดแรงขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 3/8

3.2.2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตพูน

ใช้เศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงนำมาย่อย ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/8 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ทดสอบหาสมบัติเบื้องต้น และหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้งานจริง ซึ่งมีวิธีหล่อดังนี้

1) นำเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง มาย่อยและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/8 เป็นมวลรวมหยาบ ดังรูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำสะอาดตามอัตราส่วนที่ออกแบบ



รูปที่ 4 เศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง

2) นำเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ปูนซีเมนต์ และน้ำที่เตรียมไว้ตามอัตราส่วน มาผสมรวมกัน โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีต เทส่วนผสมจนเต็มแบบหล่อคอนกรีต กระทุ้งคอนกรีตให้แน่น แล้วใช้เกรียงเหล็กแต่งผิวด้านบนของตัวอย่างคอนกรีตพูนเพื่อให้ขอบด้านบนของตัวอย่างคอนกรีตพูนให้เรียบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 5 บ่มทิ้งไว้ในแบบ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5 เทคอนกรีตพูนลงในแบบหล่อคอนกรีต

3) หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อคอนกรีตด้านข้างออกเพื่อนำตัวอย่างคอนกรีตพูนออกจากแบบหล่อนำแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน เพื่อรักษาความชื้นของคอนกรีตพูนให้มีความชื้นมากพอที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์

4) เมื่อแช่น้ำคอนกรีตพูนครบ 7 วัน นำคอนกรีตพูนมาห่อด้วยฟิล์มยืดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในเนื้อคอนกรีตดังรูปที่ 6 แล้วนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 6 คอนกรีตพูนที่ห่อด้วยฟิล์ม

3.3.3 การทดสอบสมบัติ

นำตัวอย่างคอนกรีตพูนมาทดสอบกำลังอัด การไหลผ่านของน้ำ และน้ำหนักที่สูญเสียจากการซัดสี โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน ตามมาตรฐาน ASTM C3. [6] โดยทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน 14 วัน และที่อายุ 28 วัน

2) ทดสอบการไหลผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตพูน [5] ตามรูปที่ 7 และคำนวณค่าการไหลผ่านของน้ำดังสมการที่ 1



รูปที่ 7 ชุดทดสอบการไหลผ่านของน้ำ

$$k = \left(\frac{aL}{At} \right) \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

โดยที่ k = ค่าการไหลผ่านของน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที)

a = พื้นที่หน้าตัดของท่อเครื่องมือทดสอบ (ตารางเซนติเมตร)

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

L = ความสูงตัวอย่าง (เซนติเมตร)

t = ระยะเวลาในการทดลอง (วินาที)

h_1, h_2 = ระดับน้ำขึ้นต้นและขั้นสุดท้าย (เซนติเมตร)

3) ทดสอบการขัดสีของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 944-99 โดยมีชุดทดสอบดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ชุดทดสอบการขัดสีของคอนกรีต

4. ผลและวิจารณ์ผล

จากการศึกษากรรมวิธีการผลิต ออกแบบ ส่วนผสม การทดสอบสมบัติของคอนกรีตพูนแล้ววิเคราะห์การนำไปใช้ประโยชน์ โดยกำหนดให้อัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบมี 5 อัตราส่วน คือ CB-40, CB-42, CB-44, CB-46 และ CB-48 ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1 สมบัติของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านการย่อยใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมหยาบ

1) เสาเข็มขนาด $0.30 \times 0.30 \times 10.00$ เมตร และมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 350 กก./ซม.²

2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) มีค่าเท่ากับ 2.36

3) เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Percent Absorption) มีค่าเท่ากับ 3.61 %

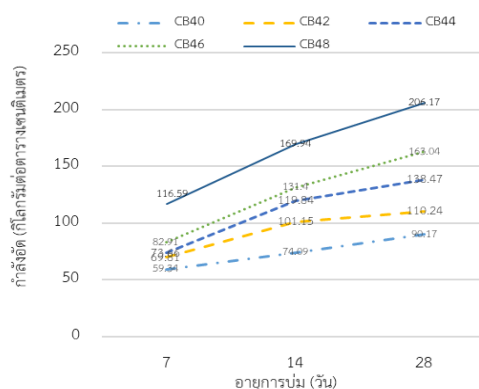
4) โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) มีค่าเท่ากับ 6.94

5) เปอร์เซ็นต์การสึกกร่อน (Percent Abrasion) มีค่าเท่ากับ 40.01% โดยทดสอบหาค่าความต้านทานการสึกกร่อนด้วยเครื่องทดสอบลอสแอนเจลีส์ (Abrasion Test by Los Angeles Machine) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสึกกร่อนตามมาตรฐานของวัสดุมวลรวมหยาบ ที่นำมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตพูน ซึ่งกำหนดให้มีค่าการสึกกร่อนไม่เกิน 50% แสดงว่าเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่ได้จากการย่อยเส้าเข็มเป็นมวลรวมหยาบที่ดีในการผลิตคอนกรีต

4.2. ผลการทดสอบสมบัติของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง

จากการทดลองนำเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมาใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนวัสดุธรรมชาติในการผลิตคอนกรีตพูน และนำคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง มาทดสอบสมบัติ ได้ผลการทดสอบดังนี้

1) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน มีผลการทดสอบ ดังรูปที่ 9

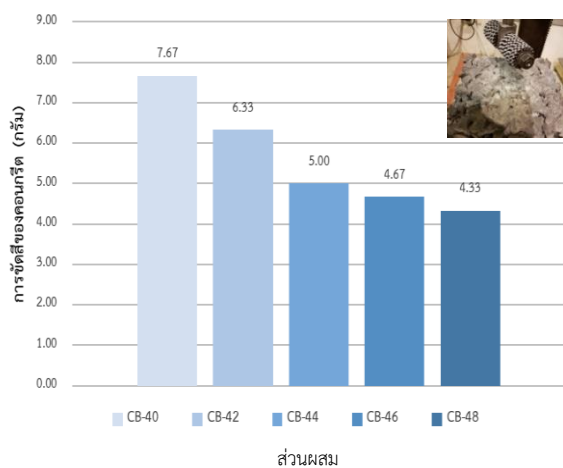


รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงที่มีอายุ 7, 14 และ 28 วัน

จากรูปที่ 9 ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้น เพราะเมื่อทำการบ่มคอนกรีตในน้ำจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ และเมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน พบว่าการเพิ่มปริมาณของซีเมนต์ที่มากขึ้นก็จะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นด้วย

2) ผลการทดสอบการขัดสีของคอนกรีต

จากผลการทดสอบการขัดสีของคอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน มีผลการทดสอบ ดังรูปที่ 10



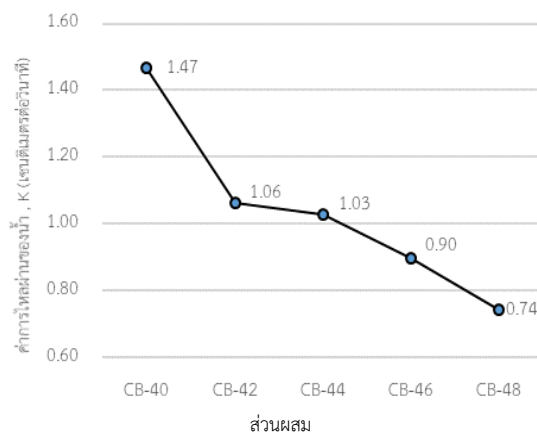
รูปที่ 10 การขัดสีของคอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง

จากรูปที่ 10 ผลการทดสอบการขัดสีของคอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง มีค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีอยู่ระหว่าง 4.33 – 7.67 กรัม โดยค่าการสูญเสียน้ำหนักจะแปรผันตามปริมาณของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานคือ CB-40, CB-42, CB-44, CB-46 และ CB-48 มีค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีเท่ากับ 7.67, 6.33, 5.00, 4.67 และ 4.33 กรัม ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของซีเมนต์เพสต์ จะทำให้คอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรงมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีลดลง เนื่องจากซีเมนต์เพสต์และเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง มีการผสมกันมากขึ้น จากตัวอย่าง

CB-48 ทำให้ทราบว่า น้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีที่ได้ทำการทดสอบจะเป็นส่วนของซีเมนต์เพสต์ที่มีการหลุดลอกออกไปจากก้อนตัวอย่างคอนกรีตพูนมากกว่าเศษเสาชี้มนที่เป็นมวลรวมหยาบในก้อนตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ที่ต่างกัน ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนผสมต่ำ จะทำให้เศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรงที่เป็นมวลรวมหยาบมีการหลุดลอกออกมากกว่าส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์

3) ผลการไหลผ่านน้ำของคอนกรีตพูน

จากผลการทดสอบการไหลผ่านน้ำของคอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน แสดงได้ ดังรูปที่ 11

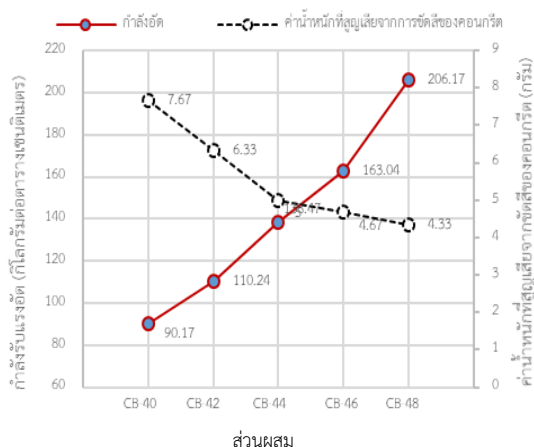


รูปที่ 11 ค่าการไหลผ่านน้ำของคอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง

จากรูปที่ 11 ผลการทดสอบการไหลผ่านน้ำของคอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรง มีค่าการไหลผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.74 – 1.47 เซนติเมตรต่อวินาที โดยค่าการไหลผ่านของน้ำจะแปรผันตามปริมาณของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน คือ CB-40, CB-42, CB-44, CB-46 และ CB-48 มีค่าการไหลผ่านของน้ำเท่ากับ 1.47, 1.06, 1.03, 0.90 และ 0.74 เซนติเมตรต่อวินาทีตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากขึ้นจะทำให้คอนกรีตพูนผสมเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรงมีค่าการไหลผ่านของน้ำลดลงเนื่องจากซีเมนต์เพสต์และเศษเสาชี้มนคอนกรีตอัดแรงมีการผสมกันมากขึ้นและทำให้ช่องว่างมีปริมาณน้อยลง

4) การเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังอัดคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงและค่าการขีดสีของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง

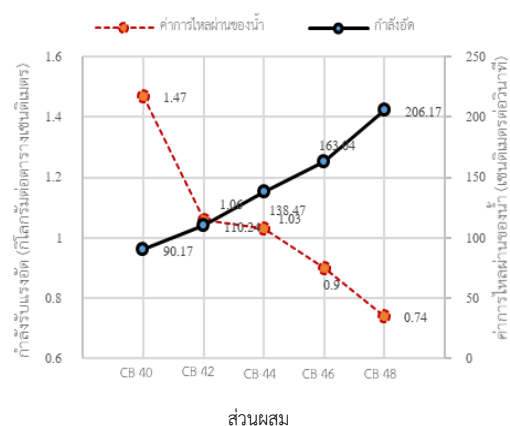
จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังอัดคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน และการขีดสีของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน มีผลการทดสอบ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดกับค่าการขีดสีของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง

จากรูปที่ 12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขีดสีของคอนกรีตพูน พบว่าเมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขีดสีของคอนกรีตมีปริมาณลดลงและมีค่าแปรผันตามปริมาณของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานคือ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขีดสีจะมีค่าลดลงตามลำดับ

5) การเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน และค่าการไหลผ่านของน้ำคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน มีผลการทดสอบดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดกับค่าการไหลผ่านของน้ำ

จากรูปที่ 13 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการไหลผ่านของน้ำของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน พบว่าเมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการไหลผ่านของน้ำมีปริมาณลดลง และมีค่าแปรผันตามปริมาณของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานคือ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นแต่ค่าการไหลผ่านของน้ำจะมีค่าลดลงตามลำดับ

6) การวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้งาน

จากการศึกษาด้านกำลังรับแรงอัด พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมีค่าแปรผันตามสัดส่วนของซีเมนต์เพสต์ต่อเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง กล่าวคือ ถ้ามีปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้คอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเพราะซีเมนต์เพสต์และเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงผสมกันได้มากขึ้น ในส่วนการขีดสีของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขีดสีของคอนกรีต จะมีค่าแปรผันตามสัดส่วน ซีเมนต์เพสต์ต่อเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง กล่าวคือ ถ้ามีปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้คอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขีดสีลดลง และการไหลผ่านของน้ำของคอนกรีตพูนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง

พบว่าค่าการไหลผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง จะมีค่าแปรผันตามสัดส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง กล่าวคือ ถ้ามีปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง มีค่าการไหลผ่านของน้ำลดลง เนื่องจากซีเมนต์เพสต์และเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงผสมกันมากขึ้น ทำให้มีช่องว่างระหว่างเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงลดน้อยลง

จากการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง พบว่าตัวอย่างคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างการทดสอบที่ CB-48 สามารถรับกำลังอัดได้มากที่สุด ถ้าพิจารณาอัตราการสูญเสียน้ำหนักจากการซัดสีของคอนกรีต พบว่าตัวอย่างคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ตัวอย่างการทดสอบที่ CB-48 มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด และการไหลผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงพบว่าตัวอย่างคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง ตัวอย่างการทดสอบที่ CB-40 มีค่าการไหลผ่านของน้ำได้ดีที่สุด

จากผลการทดลองสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงจะเห็นว่า คอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงและค่าต้านทานการซัดสีคอนกรีตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตพรุนทั่วไป แต่ความสามารถในการไหลผ่านของน้ำค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตพรุนทั่วไป จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่มีการรับน้ำหนักไม่สูงนัก และระบายน้ำในปริมาณที่ไม่เยอะจนเกินไป เช่น การทำบล็อกทางเดินในสวน พื้นที่สำหรับจัดสวน พื้นที่ซีกล่าง ที่จอดรถยนต์ส่วนบุคคล เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานจริงเพื่อทำเป็นที่จอดรถส่วนบุคคลโดย ACI 522 [1] กล่าวว่าคอนกรีตพรุนโดยทั่วไปมีค่าอัตราการไหลผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.14-1.22 ซม./วินาที มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 30-307 กก./ซม.² และจากพื้นคอนกรีตพรุนของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด [7] ได้ให้ค่ากำลังอัดสำหรับพื้นที่หล่อด้วยคอนกรีตพรุนคือ 140 กก./ซม.² (ทรงกระบอก) ซึ่งพบว่าที่ CB-44 ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยคือ 138.47 กก./ซม.²

เป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน มีค่าการไหลผ่านของน้ำ 1.03 ซม./วินาที และค่าการซัดสีของคอนกรีต 5 กรัม ที่ไม่เลือก CB-48 ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงถึง 206.17 กก./ซม.² แต่มีค่าการไหลผ่านของน้ำ 0.74 ซม./วินาที ซึ่งถือว่าน้อย จากการสรุปผลการทดสอบที่ได้ จึงเลือก CB-44 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งานจริง และได้นำอัตราส่วน CB-44 ทำการก่อสร้างที่จอดรถ ทดลองการใช้งานจริง ทดสอบการไหลผ่านของน้ำของที่จอดรถส่วนบุคคล พบว่าสามารถใช้ได้จริงตามที่สรุปไว้ ดังรูปที่ 14, 15 อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง พบว่ายังสามารถนำไปใช้กับงานถนนที่การจราจรไม่หนาแน่นมาก พื้นสนามเทนนิส คาดผิวคลองระบายน้ำ คอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่ไม่ต้องการให้น้ำซัง เป็นต้น นอกจากนี้ความพรุนในเนื้อคอนกรีตยังช่วยเพิ่มการดูดซับเสียง ระบายความร้อนได้ดี จึงถือได้ว่าคอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 14 พื้นคอนกรีตทั่วไปและพื้นคอนกรีตพรุน



รูปที่ 15 แปลงทดลองใช้งานจริง

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาทดลองผลิตคอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1 เศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง สามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตพรุนได้ ทำให้คอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง มีคุณสมบัติสามารถรับแรงอัดได้ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีตพรุนทั่วไป และค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีคอนกรีตมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่ามีความทนต่อการเกิดการขัดสีของวัสดุ แต่ค่าการไหลผ่านของน้ำมีค่าค่อนข้างต่ำ เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในงานที่ไม่ต้องการรับน้ำหนักมากเท่าคอนกรีตทั่วไป เช่น การทำที่จอดรถส่วนบุคคล เป็นต้น

5.2 คอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง มีสมบัติในการรับกำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตพรุนทั่วไป เพราะเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง มีช่องว่างภายในน้อย และมีความสามารถในการรับกำลังอัดสูง

5.3 คอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง จะมีค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีของคอนกรีตน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตพรุนทั่วไป ซึ่งค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีของคอนกรีตจะมีค่าลดลงสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้น เพราะเมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพสต์ทำให้ช่องว่างในก้อนตัวอย่างลดลงและซีเมนต์เพสต์ผสมกับเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรงมากขึ้น

5.4 คอนกรีตพรุนผสมเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง จะมีการไหลผ่านของน้ำได้ต่ำกว่าคอนกรีตพรุนทั่วไป เนื่องจากเศษเส้าเข็มคอนกรีตอัดแรง มีช่องว่างภายในน้อยและมีคุณสมบัติดูดซึมน้ำน้อยจึงทำให้มีโพรงช่องว่างในก้อนตัวอย่างน้อยกว่าคอนกรีตพรุนทั่วไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และหน่วยวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] American Concrete Institute (ACI). ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, USA. 2010.
- [2] Hirun, Y.et al. Porous concrete paving block. In Annual Concrete 4. 2009, Ubon Ratchathani: Thailand Concrete Association. 13-18. (in Thai)
- [3] Chuamuangphan T.et al. Development of Permeable Pavement Concrete Block from Gravel and Oil Palm Shells. Journal of Creative environment diagnosis Faculty of Architecture Khon Kaen University 2022;21(1):69-82. (in Thai)
- [4] American Society for Testing and Materials, (ASTM). ASTM C944, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.
- [5] Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete [Internet]. 2015 [cited 2022 Apr. 16]. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/S198341952015000300002>.
- [6] American Society for Testing and Materials, (ASTM). ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [7] CPAC Porous Concrete [Internet]. 2020 [cited 2024 Feb. 28]. Available from: <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0145>.

ระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

ธีระพล เหมือนขาว¹ สุรินทร์ แหวมงาม^{1*} ชัชชัย ทองจันทร์¹ และ จิตติณัฐ ฉายประเจียด¹
theerapol.m@en.rmutt.ac.th¹, surin.n@en.rmutt.ac.th¹, dewzadspider@gmail.com¹,
Jittinat0241@gmail.com¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: February 8, 2024 Revised: April 9, 2024 Accepted: April 30, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และมีการแจ้งเตือนผู้ใช้น้ำผ่านหลอดแอลอีดีสำหรับหอพักหรืออพาร์ทเมนต์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่ออำนวยความสะดวกให้กับเจ้าของหอพักหรืออพาร์ทเมนต์ ไม่ต้องบันทึกค่าปริมาณการใช้น้ำในแต่ละห้องและลดปัญหาการเสียค่าปรับของผู้พักอาศัยกรณีจ่ายค่าน้ำล่าช้า โดยระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนเครื่องเติมเงินเข้าบัตร RFID และส่วนเครื่องควบคุมการใช้น้ำ ซึ่งการทำงานของระบบนั้นจะใช้บัตร RFID เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างเครื่องเติมเงินเข้าบัตรและส่วนควบคุมการใช้น้ำ โดยระบบนี้จะต้องทำการเติมเงินลงบัตร RFID และนำบัตรนี้มาทาบกับส่วนควบคุมการใช้น้ำ เพื่อเปิดระบบให้สามารถใช้น้ำได้ ประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอถูกทดสอบโดยทำการทดสอบการทำงานของระบบทั้งระบบ ตั้งแต่การเติมเงินลงบัตร การนำบัตรไปเปิดระบบเพื่อใช้น้ำ จนกระทั่งระบบปิดการใช้น้ำเมื่อเงินในระบบหมด พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอถูกทดสอบโดยการเปรียบเทียบการใช้น้ำผ่านระบบที่นำเสนอกับการใช้น้ำผ่านมิเตอร์น้ำทั่วไป โดยทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ผ่านระบบควบคุมที่นำเสนอมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่ใช้ผ่านมิเตอร์น้ำทั่วไป

คำสำคัญ: ระบบควบคุมการใช้น้ำ เติมน้ำ อาคิโน อาร์เอฟไอดี

Prepaid Water Consumption System Via RFID Controlled by Microcontroller

Theerapol Muankhaw¹, Surin Ngaemngam^{1*}, Chatchai Thongchan¹, Jittinat Chaiprachiad¹
theerapol.m@en.rmutt.ac.th¹, surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, dewzadspider@gmail.com¹,
Jittinat0241@gmail.com¹

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

Received: February 8, 2024 Revised: April 9, 2024 Accepted: April 30, 2024

Abstract

This research presents a prepaid water consumption system via RFID controlled by a microcontroller with a notification through an LED lamp for dormitories or apartments. The objective of this study is to facilitate dormitory or apartment owners no need to record water consumption in individual rooms and reduce issues related to tenants facing fines due to late payment of water bills. The system is composed of two parts: the prepaid machine and the water consumption control machine. The operation of the system uses RFID cards as an intermediary for communication between the prepaid machine and the water consumption control machine. It is required to top up money on the RFID card and place this card on the water consumption control machine to turn on the system and to use the water for any purpose. The efficiency of the proposed system was tested by testing the operation of the whole system starting from topping-up money into RFID cards, placing the cards on the water consumption control machine, and turning off the system when the system has no money. The experimental results found that the system can be used correctly. Moreover, the efficiency of the system was tested by comparing water consumption through the proposed water consumption control system with a general water meter by testing it 5 times. The experimental results found that the water consumption from the proposed system was equal to the water consumption from a general water meter.

Keywords: Water consumption control system, Top up money, Arduino, RFID

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำระบบการจ่ายเงินก่อนหรือระบบเติมเงิน (prepaid) มาใช้ในชีวิตประจำวันในหลากหลายรูปแบบเช่น ระบบการเติมเงินในโทรศัพท์เคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังได้นำระบบการจ่ายเงินก่อน หรือ ระบบเติมเงินทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้งานกับระบบควบคุมต่าง ๆ มากมายเพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้งาน ประดิษฐ์ ลักษณะฮาร์ดแวร์ [1] เสนอระบบมิเตอร์แบบจ่ายก่อนโดยใช้สมาร์ตการ์ดเพื่อใช้กับระบบการเก็บเงินของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์และบัตรสมาร์ตการ์ด บัณฑิต แก้วศรี [2] เสนอระบบชำระเงินค่าไฟฟ้าแบบล่วงหน้าด้วยเครื่องสมาร์ตการ์ด กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์แบบรีโมทข้อมูลผ่านโครงข่ายคู่สายเช่า ธานีวิทย โปริยเจริญ และ ธนาภัทร์ เทศสวัสดิ์ [3] เสนอระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเติมเงินผ่าน RFID ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาการให้เจ้าหน้าที่ทำการเดินจดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน และเพื่อแก้ปัญหาข้อร้องเรียนว่าบางครั้งเจ้าหน้าที่ไม่ได้ไปจดเองแต่ใช้วิธีการประมาณการจากเดือนที่ผ่านมาทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้า เช่นเดียวกับการใช้น้ำในปัจจุบันขั้นตอนการเรียกชำระค่าการใช้น้ำสำหรับหอพัก ห้องเช่าต่าง ๆ จะใช้วิธีการคือให้เจ้าหน้าที่ทำการจดมิเตอร์การใช้น้ำจากมิเตอร์น้ำ และนำมาคำนวณหาค่าการใช้น้ำในแต่ละเดือน จากที่ผ่านมาพบว่าการใช้เจ้าหน้าที่เดินจดค่าการใช้น้ำ บางเดือนเจ้าหน้าที่ไม่ได้ไปจดเองแต่ใช้วิธีการประมาณการจากเดือนที่ผ่านมาทำให้เกิดความเสียหายต่อเจ้าของหอพักหรือห้องเช่าและผู้ใช้ น้ำ และในแต่ละเดือนมีผู้ใช้ น้ำจำนวนมากไม่จ่ายค่าน้ำให้กับ เจ้าของหอพัก บ้านเช่าตามกำหนดเวลา ดังนั้นเพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกและแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น การเติมเงินผ่านบัตรเพื่อใช้น้ำ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับ เจ้าของหอพัก ห้องเช่า รวมถึงผู้ใช้น้ำด้วย ปัจจุบันมีมาตรวัดน้ำอัตโนมัติจำหน่ายตามท้องตลาดแล้ว โดยสามารถอ่านข้อมูลการใช้น้ำได้อัตโนมัติ โดยการส่งสัญญาณผ่านคลื่นวิทยุ Radio frequency (RF) ลดเวลาและ

ความผิดพลาดในการตรวจสอบค่าน้ำได้ [4] งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และมีการแจ้งเตือนผู้ใช้น้ำผ่านหลอดแอลอีดีเมื่อปริมาณน้ำที่ยังคงใช้ได้ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนเครื่องเติมเงินเข้าบัตรและส่วนเครื่องควบคุมการใช้น้ำ ซึ่งการทำงานของระบบนั้นจะใช้บัตร RFID เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างเครื่องเติมเงินเข้าบัตรและส่วนควบคุมการใช้น้ำ โดยระบบนี้จะต้องทำการเติมเงินลงบัตร RFID และนำบัตรนี้มาทาบบกับส่วนควบคุมการใช้น้ำ เพื่อเปิดระบบให้สามารถใช้น้ำได้

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 มิเตอร์น้ำ

มิเตอร์น้ำ (Water meter) [5] หรือ มาตรวัดน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณของน้ำที่ใช้ โดยให้น้ำไหลผ่านอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คำนวณปริมาตรและส่งค่าที่ได้ไปที่หน้าปัดซึ่งมีหลักการคำนวณและแปลงอัตราส่วนที่คำนวณได้เพื่อแสดงผลเป็นค่าที่ทำให้ผู้ใช้สามารถอ่านได้เป็นสากล เช่น ปริมาตรเป็นลิตร เป็นลูกบาศก์เมตร เป็นต้น มาตรวัดน้ำหรือมิเตอร์น้ำจะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คำนวณปริมาตรที่แตกต่างกันอยู่ภายใน เมื่อน้ำไหลผ่านอุปกรณ์การวัดจะหมุน หรือคำนวณตามปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่าน อุปกรณ์การวัดจะมีการเชื่อมต่อกับแกนหมุนตัวเลข หรือส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุดแสดงผลเพื่อจะแสดงค่าของปริมาณน้ำที่หน้าปัด หรือส่งสัญญาณออกไปสู่ภายนอกหรือที่เรียกว่า AMR METER แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 มาตรวัดน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค [5]

2.2 Arduino UNO R3

บอร์ด Arduino UNO R3 [6] ดังแสดงดังรูปที่ 2 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กที่สามารถนำไปเชื่อมต่อเพื่อสั่งการเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เป็นการนำชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่าง ๆ มาใช้ร่วมกันในภาษา C ซึ่งภาษา C นี้เป็นลักษณะเฉพาะ คือ มีการเขียนไลบรารีของ Arduino ขึ้นมาเพื่อให้การทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกัน สามารถใช้งานโค้ดตัวเดียวกันได้ สาเหตุหลักที่ทำให้ Arduino เป็นนิยมมาก เป็นเพราะซอฟต์แวร์ที่ใช้งานร่วมกันสามารถโหลดได้ฟรี และตัวบอร์ดทดลองมีราคาถูก



รูปที่ 2 บอร์ด Arduino UNO R3 [6]

2.3 เครื่องวัดอัตราการไหล

เครื่องวัดอัตราการไหล [7] ดังแสดงดังรูปที่ 3 โดยทำหน้าที่ในการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านภาชนะ เช่น ท่อ ที่สามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัดปริมาตรและเทียบกับเวลาที่ของไหลนั้นไหลผ่านมาได้ เครื่องวัดอัตราการไหล โดยปกติจะไม่สามารถวัดค่าได้แบบตรง ๆ แต่จะอาศัยการวัดค่าความเร็วของการเคลื่อนที่จากของไหล ซึ่งเกิดจากค่าความดันจาก 2 จุด ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลจากของไหล ถ้าหากความดันฝั่งใดมีความดันที่มากกว่า จะดันให้ของไหลนั้น ไหลไปยังฝั่งที่มีความดันต่ำกว่า และนำค่าความเร็วมาคูณกับพื้นที่หน้าตัด ก็จะได้เป็นค่าอัตราการไหลออกมา ในงานวิจัยนี้เครื่องวัดอัตราการไหลถูกนำไปใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำและส่งข้อมูลเข้าโปรแกรมเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Water flow sensor model YF-S201 ที่มี working range 1-30 L/min



รูปที่ 3 เครื่องวัดอัตราการไหล [7]

2.4 Radio Frequency Identification

ระบบ Radio Frequency Identification (RFID) [8] ดังแสดงในรูปที่ 4 จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ 2 ส่วน คือส่วนแรกทรานสปอนเดอร์หรือแท็ก โดยแท็กจะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ เอาไว้ และส่วนที่สองเครื่องสำหรับอ่าน/เขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ในงานวิจัยนี้บัตร RFID ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างเครื่องเติมเงินเข้าบัตร และเครื่องควบคุมการใช้น้ำ



รูปที่ 4 RFID [8]

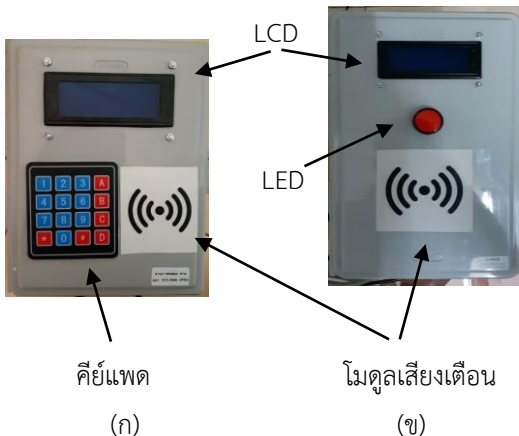
3. การออกแบบระบบควบคุมการใช้น้ำ

3.1 ระบบควบคุมการใช้น้ำ

แผนผังระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่านบัตร RFID แสดงดังรูปที่ 5 โดยระบบที่นำเสนอจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนเครื่องเติมเงินเข้าบัตร RFID และ ส่วนเครื่องควบคุมการใช้น้ำ สำหรับเครื่องเติมเงินเข้าบัตรและเครื่องควบคุมการใช้น้ำที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 6

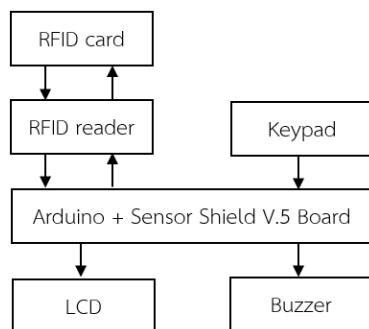


รูปที่ 5 แผนผังการควบคุมการทำงานของระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID

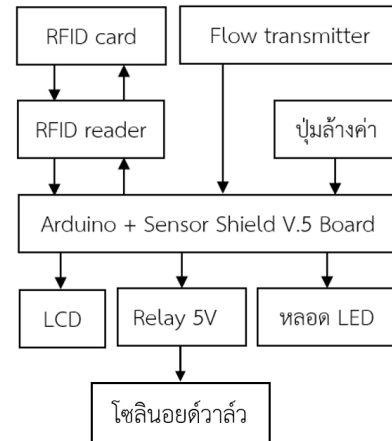


รูปที่ 6 ระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID (ก) เครื่องเติมเงินเข้าบัตร (ข) เครื่องควบคุมการใช้น้ำ

แผนผังการควบคุมสำหรับเครื่องเติมเงินเข้าบัตรดังแสดงในรูปที่ 7 ประกอบด้วยโมดูล RFID Reader ทำหน้าที่อ่านบัตรและเขียนบัตร คีย์แพด (Keypad) เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมการเติมเงินและล้างข้อมูลในบัตร RFID จอ LCD ใช้สำหรับแสดงผลค่าต่าง ๆ โมดูลเสียงเตือน (Buzzer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ผู้ใช้งานทราบการใช้งานผ่านเสียง โดยการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ จะควบคุมโดย Arduino



รูปที่ 7 แผนผังการควบคุมสำหรับเครื่องเติมเงินเข้าบัตร

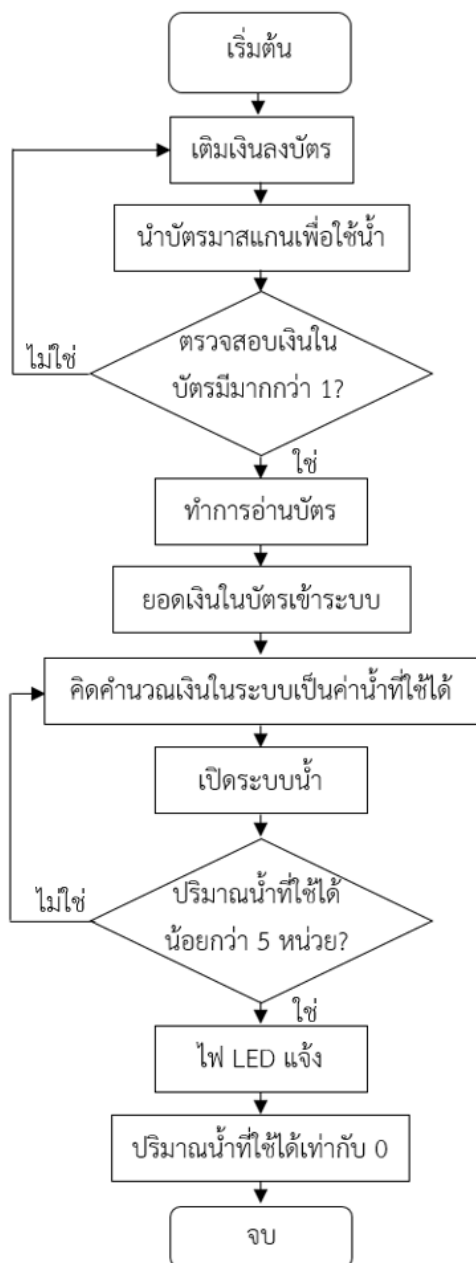


รูปที่ 8 แผนผังการควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมการใช้น้ำ

รูปที่ 8 แสดงแผนผังการควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมการใช้น้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สำหรับอ่านบัตรและนำข้อมูลไปคิดคำนวณค่าน้ำ ในส่วนของการอ่านบัตรนี้ จะมีส่วนที่ทำหน้าที่เหมือนกับส่วนที่เติมเงินลงบัตรอยู่ก็คือ RFID Reader ซึ่งทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด Arduino โดยในด้านของอินพุตจะประกอบด้วย ปั๊มล้างค่าหน่วยความจำถาวร ซึ่งจะเป็นการล้างข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในบัตร RFID ซึ่งจะใช้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนผู้ใช้น้ำและเครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำเพื่อนำมาใช้คำนวณ เป็นต้น ต่อมาในส่วนของเอาต์พุตจะประกอบไปด้วย จอแสดงผล LCD ซึ่งใช้แสดงค่าอัตราการไหลของน้ำ, ค่าน้ำ, ยูนิตของน้ำ และปริมาณของน้ำที่สามารถใช้ได้ ในส่วนของรีเลย์จะใช้สำหรับเปิด-ปิด โซลินอยด์วาล์ว โดยเมื่อจำนวนเงินในระบบหมด ปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้เป็นศูนย์ Arduino จะส่งสัญญาณมาที่รีเลย์เพื่อให้โซลินอยด์วาล์วปิดการจ่ายน้ำ และหลอด LED ใช้สำหรับแจ้งเตือนเมื่อค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้เหลือน้อยกว่าที่กำหนด

3.2 ขั้นตอนการใช้งาน

ขั้นตอนการใช้งานระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID ที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนผังขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมการใช้น้ำ

จากรูปที่ 9 เจ้าของอาคารจะต้องทำการเติมเงินเข้าบัตรก่อน ซึ่งการเติมเงินจะนำบัตร RFID ไปทาบบนที่เครื่องเติมเงิน จากนั้นเจ้าของอาคารจะทำการป้อนจำนวนเงินตามที่คุณค้าต้องการ โดยการเติมเงินจะเติมขึ้นต่าหนึ่งบาท เมื่อป้อนจำนวนเงินเสร็จแล้วจึงกดปุ่ม “A” ที่คีย์แพดเพื่อยืนยันจำนวนเงิน และรอนจนกว่าข้อความที่จอ LCD จะขึ้น “Complete” ซึ่งแสดงว่ายอดเงินได้ถูกเติมลงไปนบัตรแล้ว ในการตรวจสอบ

ยอดเงิน สามารถทำได้โดยกดปุ่ม “C” ที่คีย์แพด จากนั้นนำบัตร RFID ไปทาบบนที่เครื่องเติมเงิน ที่หน้าจอล CD จะปรากฏยอดเงิน ปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้ และเลขบัตร RFID จากนั้นผู้ค้าจะนำบัตรมาสแกนที่ห้องพักเพื่อเปิดระบบและใช้น้ำภายในห้อง และเมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้เหลือน้อยกว่า 5 ลิตร จะทำให้หลอดไฟ LED แฉงเตือนผู้ค้าให้ทำการเติมเงิน ไมเช่นนั้นจะไม่สามารถใช้น้ำได้ ซึ่งในการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ไป ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับข้อมูลมาจากเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (water flow sensor) ซึ่งมีหน่วยเป็น L/min คูณกับเวลาเป็นนาที่ และคูณกับค่าปรับเทียบเพื่อให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้ไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินโดยผ่าน RFID จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ โดยจะเริ่มตั้งแต่ทดสอบการเติมเงินลงนบัตร RFID การนำบัตรไปเปิดระบบควบคุมการใช้น้ำ จนกระทั่งระบบจะปิดอัตโนมัติ เมื่อค่าปริมาณของน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าเท่ากับ 0 และในการทดสอบจะทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำวัดได้จากมิเตอร์น้ำทั่วไกับค่าที่วัดได้จากระบบควบคุมการใช้น้ำที่นำเสนอ ในการทดสอบนี้จะกำหนดหน่วยของน้ำเป็นลิตรและกำหนดให้ค่าน้ำลิตรละ 10 บาท โดยผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

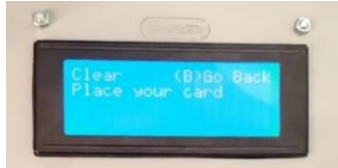
4.1 ทดสอบการเติมเงิน, การตรวจสอบยอดเงิน และการเคลียร์เงินภายในบัตร ตัวอย่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 – 13 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 10 ข้อความแสดงเมื่อทำการเติมเงินเข้านบัตรจำนวน 300 บาท



รูปที่ 11 ข้อความแสดงเมื่อตรวจสอบจำนวนเงินในบัตรเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 12 การเข้าสู่ขั้นตอนการล้างจำนวนเงินในบัตร



รูปที่ 13 ล้างจำนวนเงินในบัตรเรียบร้อยแล้ว

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการเติมเงิน, การตรวจสอบยอดเงินและการเคลียร์เงินภายในบัตร

ครั้งที่	จำนวนเงินที่เติม (บาท)	จำนวนเงินที่เช็ค (บาท)	จำนวนเงินที่เคลียร์ (บาท)	ยอดเงินคงเหลือ (บาท)
1	300	300	300	0
2	600	600	600	0
3	900	900	900	0
4	1200	1200	1200	0
5	1500	1500	1500	0
6	1800	1800	1800	0
7	2100	2100	2100	0
8	2400	2400	2400	0
9	2700	2700	2700	0
10	3000	3000	3000	0

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 10 -13 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเติมเงินตามจำนวนเงินที่กำหนด จำนวนเงินที่เติมลงในบัตรมีค่าเท่ากับจำนวนเงินที่แสดงบนหน้าจอ และเมื่อทำการล้างข้อมูลในบัตร จำนวนเงินในบัตรจึงมีค่าเท่ากับ 0 บาท ดังนั้นการทดสอบจึงไม่มีความผิดพลาดแต่อย่างใด

4.2 ทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้น้ำจนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้น้ำจนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ

ครั้งที่	ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ระบบเปิด	LED ติด	เติมเงินใหม่	LED ดับ	ระบบปิด
1	5	✓	✓	✓	✓	✓
2	5	✓	✓	✓	✓	✓
3	5	✓	✓	✓	✓	✓
4	5	✓	✓	✓	✓	✓
5	5	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ :

ระบบเปิด หมายถึง สามารถใช้น้ำได้

LED ติด แสดงถึง เงินในระบบใกล้หมดและค่าปริมาณน้ำที่ใช้ได้มีค่าน้อยกว่า 5 ลิตร

เติมเงินใหม่ หมายถึง เติมเงินเข้าไปในบัตร RFID และนำบัตรนี้มาทาบกับส่วนควบคุมการใช้น้ำเพื่อให้ค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าไม่น้อยกว่า 1 ลิตร

LED ดับ แสดงถึง ค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าเท่ากับ 0

ระบบปิด หมายถึง ไม่สามารถใช้น้ำได้

ผลการทดสอบจากตารางที่ 2 พบว่าระบบสามารถทำงานได้ถูกต้อง โดยตัวอย่างการทำงานของระบบตั้งแต่เริ่มใช้น้ำ จนจบกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 14 – 18

รูปที่ 14 เมื่อค่าปริมาณน้ำที่ใช้ได้มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าหนึ่งลิตรระบบเปิดอัตโนมัติ และเมื่อค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าห้าลิตร ดังแสดงในรูปที่ 15 หลอดไฟ LED จะติดเพื่อเป็นการแจ้งเตือนเมื่อค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่า 5 ลิตร ให้ทำการเติมเงินเข้าระบบใหม่ โดยเมื่อเติมเงินเรียบร้อยแล้ว ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 16 เมื่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับห้าลิตรขึ้นไป หลอดไฟ LED จะดับ ดังแสดงในรูปที่ 17 และ เมื่อค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าเป็น 0 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 18 ระบบควบคุมจะทำการสั่งให้ระบบปิด



รูปที่ 14 ค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าหนึ่งลิตร ระบบเปิดอัตโนมัติ



รูปที่ 15 ค่าปริมาณน้ำในระบบที่สามารถใช้ได้มีค่าน้อยกว่าห้าลิตร หลอด LED ติด



รูปที่ 16 การเติมเงินเข้าระบบขณะกำลังใช้น้ำ



รูปที่ 17 ค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับห้าลิตร หลอด LED ดับ



รูปที่ 18 ค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้มีค่า 0 ลิตร

4.3 ทดสอบและวัดค่าปริมาณน้ำจากมิเตอร์น้ำและจากระบบควบคุมการใช้น้ำที่สร้างขึ้น โดยทำ

การบันทึกหน่วยเริ่มต้นจากมิเตอร์น้ำก่อนทำการใช้น้ำ และหลังการใช้น้ำ ตัวอย่างการทดสอบการใช้น้ำผ่านมิเตอร์น้ำแสดงดังรูปที่ 19 – 22 และ ตัวอย่างการทดสอบการใช้น้ำผ่านระบบควบคุมการใช้น้ำที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 23 – 28 ในการทดสอบครั้งนี้ ทำการเติมเงินลงในบัตรจำนวน 120 บาท ทำให้สามารถใช้น้ำได้ 12 ลิตร (กำหนดอัตราค่าน้ำลิตรละ 10 บาท) ดังแสดงในรูปที่ 25 และ 26 และผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง แสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 19 ค่าตัวเลขจากมิเตอร์น้ำเริ่มต้นที่ 278 ลิตร



รูปที่ 20 เติมน้ำลงในถังในปริมาณ 12 ลิตร



รูปที่ 21 หลังจากใช้น้ำไป 12 ลิตร ค่าตัวเลขจากมิเตอร์น้ำมีค่า 290 ลิตร



รูปที่ 22 หลังจากใช้น้ำไป 12 ลิตร ค่าปริมาณน้ำในถังลดลงเป็น 0 ลิตร



รูปที่ 23 ค่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้ในระบบ เท่ากับ 0 ลิตร



รูปที่ 24 เต็มน้ำลงในถังในปริมาณ 12 ลิตร



รูปที่ 25 เต็มเงินลงในบัตรเป็นจำนวน 120 บาท เพื่อให้ใช้น้ำได้ 12 ลิตร



รูปที่ 26 ค่าปริมาณน้ำที่ใช้ได้หลังจากเติมเงิน สามารถ ใช้น้ำได้เท่ากับ 12 ลิตร



รูปที่ 27 หลังจากใช้น้ำไป 12 ลิตร ค่าปริมาณน้ำในถัง ลดลงเป็น 0 ลิตร



รูปที่ 28 ค่าปริมาณน้ำคงเหลือที่แสดงในระบบที่ สามารถใช้ได้มีค่าเท่ากับ 0 ลิตร

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบบันทึกค่าปริมาณน้ำที่ได้จากมิเตอร์น้ำทั่วไปและจากระบบควบคุมการใช้น้ำที่นำเสนอ

ครั้งที่	ค่าปริมาณน้ำที่ได้จากมิเตอร์น้ำ (ลิตร)			ค่าปริมาณน้ำที่ได้จากระบบควบคุมการใช้น้ำที่นำเสนอ (ลิตร)			% ค่าความผิดพลาด
	หน่วยที่เริ่มต้น	หน่วยที่ครบกำหนด	ปริมาณน้ำที่ใช้ไป	หน่วยที่เริ่มต้น	หน่วยที่ครบกำหนด	ปริมาณน้ำที่ใช้ไป	
1	278	290	12	0	12	12	0
2	290	302	12	0	12	12	0
3	302	314	12	0	12	12	0
4	314	326	12	0	12	12	0
5	326	338	12	0	12	12	0

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์น้ำ หน่วยที่เริ่มต้นคือ 278 ลิตร และทำการใช้น้ำต่อเนื่อง จนครบกำหนดมีค่า 290 ลิตร จะเห็นว่าปริมาณน้ำที่ใช้ไปมีค่าทั้งหมด 12 ลิตร และค่าที่อ่านได้จากระบบควบคุมการใช้น้ำที่นำเสนอ หน่วยที่เริ่มต้นคือ 0 ลิตร และทำการใช้น้ำอย่างต่อเนื่อง จนถึงเหลือค่าปริมาณน้ำที่ยังสามารถใช้ได้เท่ากับ 0 ลิตร จะเห็นว่าค่าปริมาณน้ำที่ใช้ไปมีค่าทั้งหมด 12 ลิตร จากการเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำที่อ่านได้จากมิเตอร์น้ำและค่าที่อ่านได้จากระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินที่สร้างขึ้นมามีค่าตรงกัน

5. วิเคราะห์และสรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมการใช้น้ำแบบเติมเงินผ่าน RFID ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการแจ้งเตือนผู้ใช้น้ำผ่านหลอดแอลอีดีสำหรับหอพักหรืออพาร์ทเมนต์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่ออำนวยความสะดวกให้กับเจ้าของหอพักหรืออพาร์ทเมนต์ที่ไม่ต้องบันทึกค่าปริมาณการใช้น้ำในแต่ละห้องและลดปัญหาการการเสียค่าปรับของผู้อาศัยกรณีจ่ายค่าน้ำล่าช้า การทำงานของระบบจะทำการทดสอบการเติมเงินลงในบัตร RFID การเช็คยอดเงินจากบัตร RFID การเคลียร์จำนวนเงินในบัตร RFID และการทดสอบการสำรองค่าน้ำในระบบเมื่อไฟฟ้าดับ พบว่าระบบสามารถทำงานได้ถูกต้องตั้งแต่ขั้นตอนการเติมเงินเข้าบัตรจนถึงและระบบปิดการใช้น้ำในกรณีที่จำนวนเงินในบัตรหมด

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการและสำเร็จไปได้ด้วยดีทั้งนี้เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณธนาวิทย์ โปรรเจริญ คุณธนภัทร์ เทศสวัสดิ์ คุณกัณท์เอนก ทุมแก้ว คุณประวี ภู่อินทร์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ข้อมูลต่าง ๆ ในการทำวิจัยและทางผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pradit L. 2005. The development of prepaid meter [master's thesis]. Faculty of Industrial Education and technology: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2005. (in Thai)
- [2] Bundit K. 2006. Remote data smart card kilo watt-hour meter on leased line network [master's thesis]. Faculty of Engineering: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang; 2006. (in Thai)
- [3] Thanavit P, and Thanapat T. 2020 Prepaid Electric Energy Consumption System via RFID controlled by Arduino Uno R3 [Bachelor's thesis] Faculty of Engineering: Rajamangala University Of Technology Thanyaburi; 2020 (in Thai)
- [4] Sanwa. Water meter [Internet] 2021 [cited 2022 Nov 12].Available from: <https://www.sanwa.co.th> (in Thai)
- [5] Euro-oriental trading co., ltd. [Internet] 2017 [cited 2022 Nov 12].Available from: <https://www.eurooriental.co.th/-types-of-water-meter/> (in Thai)
- [6] Artit Pirohmki, Arduino UNO R3. [Internet] 2017 [cited 2022 Nov 15].Available from: <http://dd4toew.blogspot.com/2017/05/arduino-uno-r3.html> (in Thai)
- [7] Petro-Instruments Corp., Ltd., Flow meter. [Internet] 2020 [cited 2022 Dec 20].Available from: <https://www.pico.co.th/?names=blog&files=flow-meter-measurement> (in Thai)

[8] Wachrakorn Nhootong, et all, Radio Frequency Identification (RFID) [Internet] 2020 [cited 2022 Aug 12]. Available from: <http://www.lampangtc.ac.th/mnfile/branch5/file/knowledge/RFID.pdf> (in Thai)

การวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์ด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรม ของเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบฟาร์มเพื่อการพาณิชย์ จังหวัดกาฬสินธุ์

รัชฎา แต่งภูเขียว^{1*} สวลี อุตรา¹ ปิยณัฐ โตอ่อน¹ และณัฐนันท์ นิตสิริ¹

ratchada.ta@ksu.ac.th^{1*}, savalee.ut@ksu.ac.th¹, piyanat.tn@ksu.ac.th¹, nattanani.is@ksu.ac.th¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และเทคโนโลยีขนส่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Received: November 5, 2023 Revised: February 28, 2024 Accepted: April 3, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาต้นทุนโลจิสติกส์ของกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบฟาร์มเพื่อการพาณิชย์ในจังหวัดกาฬสินธุ์ด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-Based Costing: ABC) ซึ่งทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการลงพื้นที่ทำการสำรวจและสัมภาษณ์ โดยใช้แบบสอบถาม และการสัมภาษณ์เชิงลึกกับเกษตรกรกลุ่มตัวอย่างที่เลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพื่อการพาณิชย์ จำนวน 500 ราย และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ต้นทุนฐานกิจกรรม ผลการศึกษาพบว่า กิจกรรมหลักในการปฏิบัติงานของเกษตรกรที่เลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพื่อการพาณิชย์ ประกอบไปด้วย 3 กิจกรรมหลัก คือ 1. กิจกรรมการเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์กุ้ง 2. กิจกรรมการเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง 3. กิจกรรมการจำหน่าย สำหรับต้นทุนฐานกิจกรรมในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามพบว่าต้นทุนรวมของการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเท่ากับ 71,650 บาทต่อไร่ ซึ่งกิจกรรมหลักที่มีต้นทุนสูงที่สุด คือ กิจกรรมการเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์กุ้งต้นทุนรวมเท่ากับ 41,100 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 57.36 อันดับที่สอง คือ กิจกรรมการเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง มีต้นทุนรวมเท่ากับ 23,400 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 32.66 และอันดับสาม กิจกรรมการจำหน่าย 7,150 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 9.98

คำสำคัญ: กุ้งก้ามกราม ต้นทุนฐานกิจกรรม ต้นทุนโลจิสติกส์

Utilizing an Activity-Based Costing System to Analyze the Logistical Expenses of Commercial Lobster Farms Kalasin District

Ratchada Taengphukieo^{1*}, Savalee Uttra¹, Piyanat To-on¹ and Nattanan Nitisiri¹
ratchada.ta@ksu.ac.th^{1*}, savalee.ut@ksu.ac.th¹, piyanat.tn@ksu.ac.th¹, nattanan.is@ksu.ac.th¹

¹ Department of Logistics Engineering and Transportation Technology Faculty of Engineering and Industrial Technology Kalasin University

Received: November 5, 2023 Revised: February 28, 2024 Accepted: April 3, 2024

Abstract

The objective of this research is to analyze the logistics costs linked to a range of commercial farm-based prawn aquaculture operations in the Kalasin province through the utilization of an activity-based costing system. Activity-Based Costing (ABC) is an information gathering method that utilizes interviews and field surveys. Activity-based costs were computed using information gathered through questionnaires and in-depth interviews with a sample of 500 farmers who intentionally cultivate gigantic freshwater prawns for commercial gain. According to the findings of the study, commercial cultivators of giant freshwater prawns engage predominantly in the following three activities: 1. Pond preparation and shrimp reproduction; 2. Raising and management activities during raising; and 3. Sales. In regard to the fundamental activity costs of mollusk cultivation. It was determined that the total cost per rai to produce enormous freshwater crustaceans was 71,650 baht. Preparing rearing ponds and conducting shrimp reproduction constitutes the primary activity that incurs the maximum cost. 57.36% of the entire cost per rai is comprised of 41,100 baht. The second component consists of raising and management activities. The overall expense per rai amounts to 23,400 baht, which represents 32.66 percent of the total cost. The third-ranked selling activity is valued at 7,150 baht per rai, which accounts for 9.98 percent.

Keywords: Lobster, activity base cost, Logistics costs

1. บทนำ

กุ้งก้ามกราม หรือ กุ้งก้ามคราม (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Macrobrachium rosenbergii*) กุ้งน้ำจืดชนิดหนึ่ง อยู่ในวงศ์ Palaemonidae พบได้ทั่วพื้นที่เขตร้อนและกึ่งเขตร้อนของอินโด-แปซิฟิกจากอินเดียไปยังเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และทางตอนเหนือของออสเตรเลีย มีเปลือกสีเขียวอมสีฟ้าหรือม่วง ก้ามยาวมีสีครามหรือม่วงเข้ม ตลอดทั้งก้ามมีปุ่มตะปุ่มตะป่ำ โดยธรรมชาติจะอยู่ในแม่น้ำลำคลอง ในประเทศไทยพบแทบทุกจังหวัดในภาคกลางและภาคใต้ โดยพบทั้งในน้ำจืดและน้ำกร่อย วางไข่ในน้ำกร่อยที่เค็มจัด อาหารได้แก่ไส้เดือน, ตัวอ่อนของลูกน้ำ ปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในจังหวัดต่าง ๆ แถบภาคกลางของไทย เช่น สุพรรณบุรี, นครปฐม, ฉะเชิงเทรา เป็นต้น โดยที่กุ้งก้ามกรามชนิดที่พบในประเทศไทย ใช้ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *M. dacqueti* ส่วนชนิดที่ใช้ชื่อว่า *M. rosenbergii* เป็นชนิดที่พบในภูมิภาคปาปัวนิวกินี แต่ปัจจุบันถือว่าเป็นชนิดเดียวกันหรือเป็นชื่อพ้อง [1]

สำหรับจังหวัดกาฬสินธุ์กุ้งก้ามกรามถือว่าเป็นสัตว์เศรษฐกิจอันดับหนึ่งและเป็นอาหารขึ้นชื่อของจังหวัดกาฬสินธุ์ ความโด่งดังของกุ้งก้ามกรามในจังหวัดกาฬสินธุ์ ได้รับการยอมรับว่าเป็นแหล่งกุ้งคุณภาพดีของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เกษตรกรมีการรวมกลุ่มแปลงใหญ่ มีพื้นที่เพาะเลี้ยงรวมกว่า 8,000 ไร่ ผลผลิต 1,200 ตันต่อปี ส่วนใหญ่อยู่ในอำเภอเมือง อำเภอยางตลาด และอำเภอยางน้อย ได้รับน้ำจากคลองชลประทานเขื่อนลำปาว ทำให้สามารถเลี้ยงกุ้งได้ตลอดปี ใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงประมาณ 4-6 สำหรับ อุตสาหกรรมที่ทำให้ “กุ้งก้ามกรามกาฬสินธุ์” แตกต่างจากที่อื่น ทั้งด้านการผลิต คือ 1. บ่อเลี้ยงกุ้งเป็นดินร่วนปนทราย แตกต่างจากภาคกลางที่เป็นดินเลน 2. แหล่งน้ำเพียงพอจากเขื่อนลำปาว 3. มีความสะอาดของต้นน้ำ 4. เป็นแหล่งผลิตกุ้งก้ามกรามใหญ่ที่สุดในภาคอีสาน 5. ผลิตด้วยระบบเกษตรปลอดภัย (GAP) 6. ใช้จุลินทรีย์ชีวภาพเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ใช้สารเคมีในทุกขั้นตอนการผลิต จึงทำให้กุ้งก้ามกรามกาฬสินธุ์เป็นที่นิยมของผู้บริโภค [2]

ต้นทุนโลจิสติกส์ (Logistics Cost) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความสำเร็จของธุรกิจ ในยุคที่มีการจัดการซัพพลายเชน การผลิต และการขนส่งสินค้า การจัดการที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดต้นทุนทั้งหมดในกระบวนการธุรกิจ โดยจะเห็นได้ว่าในยุคโลกาภิวัตน์หลายธุรกิจจะให้ความสำคัญกับรายละเอียดการปฏิบัติงานเพื่อลดต้นทุน ซึ่งระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-Based Costing) หรือระบบ ABC เป็นเครื่องมือในการบริหารงานในลักษณะการดำเนินงานฐานคุณค่า (Value-Based Management) ซึ่งเชื่อมโยงการบริหารระดับองค์กรลงสู่ระบบการปฏิบัติงานประจำวัน โดยพิจารณาหน้าที่ความรับผิดชอบ ของแต่ละหน่วยงานตลอดทั้งกิจการ (Cross-Functional) ในลักษณะที่มองกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กรเป็นภาพรวม (Integrated View) สำหรับการประยุกต์ใช้ต้นทุนฐานกิจกรรมในภาคการเกษตรยังมีไม่มาก แม้ว่ากิจกรรมในภาคการเกษตรมีหลายกิจกรรมที่ซับซ้อนและสามารถนำระบบต้นทุนฐานกิจกรรมมาใช้เก็บข้อมูลต้นทุนให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นกว่าปัจจุบัน สำหรับเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของจังหวัดกาฬสินธุ์ประสบปัญหาจากสถานการณ์แพร่ระบาดของโรคติดเชื้อโควิด-19 ที่ผ่านมา ส่งผลให้ตลาดต่างๆ ในหลายพื้นที่ และร้านอาหารที่รับซื้อปิดตัวลง ทำให้กุ้งก้ามกรามไม่สามารถส่งไปขายได้ตามปริมาณปกติ และต้องเลี้ยงไว้นานขึ้นทำให้สิ้นเปลืองและแบกรับค่าใช้จ่ายในเรื่องอาหารกุ้ง ซึ่งเกษตรกรไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาด้านต้นทุนเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดยการนำหลักการระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-Based Costing: ABC) มาใช้เพื่อให้เกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามทราบต้นทุนที่แท้จริงในแต่ละกิจกรรมและสามารถควบคุมต้นทุนให้ลดลงได้ตามกิจกรรมหรือตามขั้นตอนกระบวนการเลี้ยง ซึ่งจะสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงและหาทางในการลดต้นทุนของกิจกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (Non Value-Added Activity) เพื่อให้เกษตรกรทราบต้นทุนที่แท้จริงและนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพทั้งในด้านรายได้และทราบต้นทุนการผลิตของกระบวนการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กุ้งก้ามกราม

กุ้งก้ามกราม ชื่อสามัญ Giant Freshwater Prawn, Freshwater Prawn, Giant River Prawn และ Malayan Prawn ชื่อวิทยาศาสตร์ Macrobrachium rosenbergi (De man, 1879) กุ้งชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเอเชียใต้ ได้แก่ อินเดีย บังคลาเทศ ไปจนถึงเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ไทย พม่า เวียดนาม เขมร มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ตลอดจนบางส่วนของโอเชียเนียและหมู่เกาะแปซิฟิก บางแห่ง แต่ในปัจจุบันได้ถูกนำไปเลี้ยงอย่างแพร่หลายในภูมิภาคอื่นที่มีภูมิอากาศแบบเขตร้อน เช่น ในทวีปอเมริกา เป็นต้น การแพร่กระจายถิ่นกำเนิดอยู่ในเอเชียใต้ เช่น บังคลาเทศ อินเดีย ไปจนถึง เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ไทย พม่า เวียดนาม เขมร มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และบางส่วนของหมู่เกาะแปซิฟิก ในประเทศไทยพบทั่วไปในแหล่งน้ำจืดที่มีทางติดต่อกับทะเล ในภาคเหนือ พบใน ม. เมย ซึ่งเป็นสาขาของแม่น้ำสาละวิน ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แม่น้ำเจ้าพระยา, ท่าจีน, แม่น้ำคลอง, บางปะกง, ปรานบุรี, นครนายก, จันทบุรี, เวฬุ, ระยอง, ตราด ส่วนภาคใต้พบในแม่น้ำหลังสวน, ตาปี, กระบุรี, ตรัง, ปัตตานีและทะเลสาบสงขลา ฤดูผสมพันธุ์วางไข่กุ้งก้ามกรามผสมพันธุ์วางไข่ได้ตลอดปี ถ้าอุณหภูมิน้ำสูงกว่า 21 องศาเซลเซียส โดยวางไข่ได้ปีละ 4 - 5 ครั้ง วงจรชีวิตการสืบพันธุ์เมื่อถึงฤดูผสมพันธุ์แม่กุ้งที่ผสมพันธุ์แล้วจะเดินทางมาสู่บริเวณปากแม่น้ำหรือบริเวณน้ำกร่อย หลังจากวางไข่แล้ว ลูกกุ้งจะล่องลอยไปตามกระแสน้ำและใช้เวลา 15 - 40 วัน จนวิวัฒนาการเป็นกุ้งวัยรุ่น (post larva) แล้วจึงอพยพเข้าไปเจริญเติบโตในน้ำจืด จนมีอายุประมาณ 5 เดือน จึงพร้อมจะผสมพันธุ์วางไข่ได้ [3]

2.2 ต้นทุนโลจิสติกส์

ต้นทุนโลจิสติกส์ หมายถึง ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการกิจกรรมโลจิสติกส์ของผู้ประกอบการ ต้นทุนทางด้านโลจิสติกส์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 6 ประเภท ดังนี้

1) ต้นทุนการขนส่ง (Transportation Cost) ต้นทุนที่เกิดจากกิจกรรมการขนส่งและบริการซึ่งต้นทุนเหล่านี้ยังผันแปรไปตามปริมาณการขนส่ง น้ำหนัก ระยะทาง จุดหมายปลายทาง รวมไปถึงวิธีการขนส่งที่ก่อให้เกิดต้นทุนที่แตกต่างกัน

2) ต้นทุนคลังสินค้า (Warehousing Cost) ต้นทุนที่เกิดจากกิจกรรมภายในคลังสินค้าและการจัดเก็บสินค้า การถ่ายโอนข้อมูลในคลังสินค้า การเลือกสถานที่ตั้ง เช่น โรงงาน คลังสินค้า ซึ่งจะแปรผันไปตามชนิดและปริมาณของสินค้า

3) ต้นทุนในการเก็บรักษาสินค้าคงคลัง (Inventory Carrying Cost) ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรักษาสินค้าคงคลัง ซึ่งจะผันแปรไปกับปริมาณของสินค้าคงคลังและทำให้เกิดต้นทุนด้านต่าง ๆ

4) ต้นทุนการบริหาร (Administration Cost) เกิดจากกิจกรรมหลัก 3 ประเภท คือ

4.1) ระดับการให้บริการ (Customer Service Level) เป็นเงินที่จ่ายไปเพื่อสนับสนุนการบริการลูกค้า เช่น ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการทำให้คำสั่งซื้อสมบูรณ์

4.2) ต้นทุนกระบวนการสั่งซื้อและระบบสารสนเทศ (Order Processing and Information Costs) ได้แก่ ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสั่งซื้อ การกระจายการติดต่อสื่อสาร และการพยากรณ์อุปสงค์

4.3) ต้นทุนปริมาณ (Lot Quantity Cost) ซึ่งโดยหลักการแล้วจะขึ้นอยู่กับปริมาณสินค้าที่จัดซื้อจัดหาและผลิต

5) ต้นทุนกระบวนการจัดการคำสั่งซื้อและข้อมูลข่าวสาร

6) ต้นทุนขนาดและปริมาณในการสั่งซื้อหรือส่งผลิต[4]

2.3 ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity Based Costing)

ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity Based Costing) หรือระบบ ABC เป็นเครื่องมือในการบริหารงานในลักษณะการบริหารงานฐานคุณค่า (Value-Based Management) ซึ่งเชื่อมโยงการบริหารระดับองค์กรสู่ระบบการปฏิบัติงานประจำวัน

โดยพิจารณาหน้าที่ความรับผิดชอบของแต่ละหน่วยงานตลอดทั้งกิจการ (Cross-Functional) ในลักษณะที่มองกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กรเป็นภาพรวม

จุดประสงค์สำคัญของ ABC คือ การให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้บริหารในการเข้าใจพฤติกรรมต้นทุน (Cost Behavior) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในองค์กร ทำให้ทราบว่าอะไรเป็นปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนกิจกรรมต่าง ๆ เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยระบุกิจกรรมขององค์กร ต้นทุนกิจกรรม และตัวผลักดันต้นทุน (Cost Driver) อันจะเป็นประโยชน์ต่อการคำนวณต้นทุนการผลิตหรือบริการและใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพทางด้านต้นทุนและการพัฒนากิจกรรมต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความสูญเปล่าหรือกิจกรรมที่ไม่เพิ่มค่า ขั้นตอนการคำนวณต้นทุนฐานกิจกรรม ABC แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

1) การกำหนดกิจกรรมในสถานปฏิบัติงานเป้าหมาย ซึ่งต้องพิจารณาในรายละเอียดให้ครบถ้วน

2) คำนวณหาต้นทุนของปัจจัยหรือทรัพยากร (Input) ที่ใช้ในกิจกรรมโลจิสติกส์ทั้งหมด โดยใช้เอกสารทางบัญชีต่าง ๆ คำนวณแยกตามแต่ละปัจจัยเพื่อหาต้นทุนว่าแต่ละส่วนค่าใช้จ่ายเท่าใด ทั้งนี้ข้อมูลเหล่านี้จะต้องปรากฏในเอกสารจึงควรขอความร่วมมือจากแผนกบัญชีและแผนกอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการเก็บข้อมูล

3) นำต้นทุนของทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละด้านที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 2 มากระจายตามแต่ละกิจกรรมตามจำนวนครั้งที่ปฏิบัติงานจริงโดยไม่มีข้อกำหนดตายตัวว่าควรกระจายต้นทุนทรัพยากรไปในกิจกรรมใดเป็นจำนวนเท่าใด จำแนกเป็นกิจกรรมย่อยหรือมองเป็นกิจกรรมใหญ่ และจะต้องมีความเหมาะสมตามสภาพการณ์จริงจริงขององค์กร เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้ผู้วิเคราะห์ก็จะได้ข้อมูลต้นทุนของกิจกรรมทั้งหมด

4) การนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณต้นทุนรายกิจกรรม

5) เก็บรวบรวมข้อมูล ปริมาณงานของแต่ละกิจกรรม ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งของการปฏิบัติกิจกรรมนั้น ๆ สิ่งที่ต้องสังเกต คือ หน่วยของแต่ละกิจกรรมที่จะแตกต่างกัน โดยปกติหน่วยงานที่มีการบันทึกข้อมูลใน

ลักษณะนี้น้อยมาก ส่วนใหญ่จะต้องเข้าไปเก็บข้อมูลปริมาณการปฏิบัติงานจริงในสถานที่ปฏิบัติงาน

6) คำนวณต้นทุนต่อหน่วยของกิจกรรม โดยนำต้นทุนรวมของแต่ละกิจกรรมมาหารด้วยปริมาณการปฏิบัติงาน [5]

กานติมา อัมศรี ทำการวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์ด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรมของผู้ประกอบการแพกิ้ง โดยใช้ตลาดทะเลไทย สหกรณ์พัฒนาประมงมหาชัย จังหวัดสมุทรสาครเป็นพื้นที่ศึกษา ประชากรที่ศึกษา คือผู้ประกอบการแพกิ้ง เป็นสมาชิกชมรมผู้ค้ากุ้งสมุทรสาครในตลาดทะเลไทย วิธีการศึกษาใช้การวิจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เพื่อเข้าสัมภาษณ์ผู้ประกอบการแพกิ้งที่ให้ความร่วมมือ ซึ่งมีจำนวน 25 รายหรือคิดเป็นร้อยละ 55 ของประชากรที่ศึกษา ผลการศึกษาพบว่า ต้นทุนโลจิสติกส์ตามระบบต้นทุนฐานกิจกรรมในภาพรวมมีค่าเท่ากับ 309,118 บาทต่อเดือนโดยต้นทุนที่สูงที่สุดในกิจกรรมการบรรจุภัณฑ์และบรรจุหีบห่อ มีต้นทุนทั้งสิ้น 132,392.45 บาทต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 42.83 รองลงมาคือกิจกรรมการจัดการวัตถุดิบ มีต้นทุนทั้งสิ้น 114,895.30 บาทต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 37.17 และสุดท้ายคือกิจกรรมการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบ มีต้นทุนทั้งสิ้น 61,830.24 บาทต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 20 ข้อเสนอแนะในการวิจัยคือ การกำหนดหน้าที่ให้กับคนงานแต่ละคนให้ชัดเจนและนำเครื่องจักรหรืออุปกรณ์เข้ามาใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดต้นทุนในการดำเนินงานระยะยาว [6]

บังอร บังใบและกัญญารัตน์ กลีบประยูร ทำการวิเคราะห์ต้นทุนและรายได้จากผลผลิตของการลงทุนเลี้ยงกุ้งก้ามกรามวิธีการเลี้ยงแบบเดี่ยวและการเลี้ยงแบบผสมผสานของเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามและเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลตอบแทนระหว่างการลงทุนเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบเดี่ยวและวิธีการเลี้ยงแบบผสมผสานผลการศึกษาพบว่า การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระหว่างวิธีการเลี้ยงเดี่ยวกับวิธีการเลี้ยงแบบผสมผสานมีต้นทุนและรายได้จากผลผลิตและจำหน่ายการลงทุนเลี้ยงกุ้งขาววิธีการเลี้ยงแบบเดี่ยวประกอบด้วยต้นทุน

คงที่ต่อปีเท่ากับ 38,602.37 บาท ต้นทุนแปรผันต่อปีเท่ากับ 300,285.00 บาทและมีรายได้จากผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 810,000.00 บาท สำหรับเกษตรกรผู้ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามวิธีการเลี้ยงแบบผสมผสานมีต้นทุนการผลิตประกอบด้วยต้นทุนคงที่ต่อปีเท่ากับ 38,543.44 บาท ต้นทุนแปรผันต่อปีเท่ากับ 238,885.00 บาท มีรายได้จากผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 812,500.00 บาท นอกจากนี้ยังพบว่า เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามวิธีการเลี้ยงแบบเดี่ยวมีอัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Return on Investment : ROI) เท่ากับ 84.81% ซึ่งน้อยกว่าวิธีการเลี้ยงแบบผสมผสานที่มีอัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Return on Investment : ROI) เท่ากับ 92.56% [7]

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาต้นทุนโลจิสติกส์ของกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบฟาร์มเพื่อการพาณิชย์ในจังหวัดกาฬสินธุ์ด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-Based Costing: ABC) และเป็นแนวทางในการลดต้นทุน คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการดังนี้

3.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data)

เก็บข้อมูลทั่วไปของเกษตรกรโดยการลงพื้นที่จริง ทำการสัมภาษณ์และสอบถาม กลุ่มตัวอย่าง 500 ราย เพื่อให้ทราบขั้นตอนการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

3.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data)

เก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนการวิเคราะห์ต้นทุนเพื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์

3.3 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่เลี้ยงกุ้งก้ามกรามมีจำนวนทั้งหมด 1,114 ราย คำนวณกลุ่มตัวอย่างที่ค่าความเชื่อมั่น 95% ได้ 399 ราย คณะผู้วิจัยเลือกใช้กลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 500 ราย

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

แบบสอบถามในการสัมภาษณ์เกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพื่อการพาณิชย์จังหวัดกาฬสินธุ์ มีการเก็บข้อมูลดังนี้

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ประกอบด้วย เพศ อายุ ระดับการศึกษาสูงสุด ประสบการณ์เลี้ยงกุ้ง ขนาดพื้นที่ในการเลี้ยงกุ้ง

ตอนที่ 2 ต้นทุนในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบฟาร์มเพื่อการพาณิชย์ต่อพื้นที่ 1 ไร่

3.5 วิเคราะห์ข้อมูล ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามที่รวบรวมมา ได้ข้อมูลดังนี้

- ข้อมูลพื้นฐานเกษตรกร
- วิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์ด้วยระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-Based Costing: ABC)

4. ผลการวิจัย

4.1 วิเคราะห์ต้นทุนการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามโดยใช้ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม

จากผลการศึกษาเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในจังหวัดกาฬสินธุ์ สามารถวิเคราะห์กิจกรรมการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพื่อการพาณิชย์ โดยมีกิจกรรมหลักทั้งหมด 3 กิจกรรม คือ 1.การเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์ลูกกุ้ง 2. การเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง 3. การจำหน่าย โดยทั้ง 3 กิจกรรมหลักจะประกอบไปด้วยกิจกรรมย่อยทั้งสิ้น 9 กิจกรรมย่อย รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงกิจกรรมหลักและกิจกรรมย่อยของการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

4.2 วิเคราะห์และระบุกิจกรรม

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์พบว่า กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของเกษตรกรในจังหวัดกาฬสินธุ์ มีกิจกรรมหลัก 3 กิจกรรม คือ 1.การเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์ลูกกุ้ง 2. การเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง 3.การจำหน่าย โดยทั้ง 3 กิจกรรมหลักประกอบไปด้วยกิจกรรมย่อยทั้งสิ้น 9 กิจกรรม รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กิจกรรมหลักและกิจกรรมย่อยในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของเกษตรกรในจังหวัดกาฬสินธุ์

กิจกรรมหลัก	กิจกรรมย่อย
1.การเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์ลูกกุ้ง	1.1 พื้นที่ในการเลี้ยง 1.2 ขุดบ่อ/ไถพรวนพื้นบ่อ 1.3 หวานวัสดุปูนฆ่าเชื้อในบ่อและตากบ่อ 7 วัน 1.4 เติมน้ำในบ่อ (ระดับน้ำ 1.2 - 1.5 เมตร) 1.5 พันธุ์ลูกกุ้ง
2.การเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง	2.1 อาหารกุ้ง 2.2 การดูแลรักษา (โรค/ศัตรู) 2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเลี้ยง
3.การจำหน่าย	3.1 การจับและคัดขนาดกุ้ง 3.2 ขนส่งเพื่อการจำหน่าย

4.3 ต้นทุนทั้งหมดจำแนกตามทรัพยากรที่ใช้ และกำหนดเกณฑ์การกระจายต้นทุน

ผู้วิจัยได้นำรายการใช้ทรัพยากรโดยประมาณมาจำแนกออกเป็น 5 ประเภท คือ ด้านบุคคล ด้านพื้นที่ ด้านเครื่องจักรอุปกรณ์ วัสดุใช้งานสิ้นเปลือง และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ สำหรับเกณฑ์การกระจายต้นทุนใช้เวลาในการปฏิบัติงาน พื้นที่ในการปฏิบัติงานและร้อยละการทำงานมาเป็นเกณฑ์ในการกระจายต้นทุน ทำ

การรวบรวมต้นทุนการใช้ทรัพยากรในการปฏิบัติงานของเกษตรกร และการกำหนดเกณฑ์การกระจายต้นทุนแสดงดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 แสดงต้นทุนการใช้ทรัพยากรของเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในจังหวัดกาฬสินธุ์และเกณฑ์การกระจายต้นทุนต่อพื้นที่บ่อเลี้ยง พบว่าประเภททรัพยากรด้านบุคคล มีต้นทุนค่าแรงงานรายวัน 3,300 บาทต่อไร่ ซึ่งค่าแรงรายวันต่อไร่ที่เกิดขึ้นมาจากค่าจ้างจับและคัดขนาดกุ้ง 7 คน คนละ 200 บาท สำหรับกรณีที่มีการขุดลอกจะมีค่าจ้างขุดเหมาจ่าย 1,500 บาท และค่าแรงหวานวัสดุฆ่าเชื้อ 1 คน ราคา 300 บาท กรณีที่มีลูกจ้างประจำจะเหมาจ่าย 5,000 บาท/เดือน ด้านพื้นที่ กรณีเป็นพื้นที่ของตนเองจะไม่มีค่าใช้จ่าย ส่วนพื้นที่เช่ามีค่าใช้จ่าย 5,000 บาทต่อไร่ ด้านเครื่องจักร-อุปกรณ์ มีต้นทุนเครื่องตีน้ำ 1 ชุด ราคา 12,000 บาท ค่าเครื่องสูบน้ำและท่อสูบน้ำ 1 ชุด ราคา 3,000 บาท ค่าตาข่าย 1,250 บาท ค่าอุปกรณ์กรองน้ำ 800 บาท ค่าแหวน 3,400 บาท และค่าตะกร้า/เข่งใช้สำหรับจับและคัดกุ้ง พื้นที่ 1 ไร่ ใช้ 5 ใบ เป็นเงินทั้งหมด 600 บาท ด้านวัสดุใช้งานสิ้นเปลือง ค่าวัสดุฆ่าเชื้อในบ่อ (ปูนขาว) พื้นที่ 1 ไร่ ใช้ทั้งหมด 4 กระสอบ ราคากระสอบละ 125 บาท เป็นเงินทั้งหมดเท่ากับ 500 บาท ค่าอาหารกุ้งเล็ก 1,000 บาท/ไร่ ค่าอาหารกุ้งโต 3,200 บาท/ไร่ ค่าวิตามินแร่ธาตุ 200 บาท/ไร่ ค่าพันธุ์ลูกกุ้ง 30,000 บาท/ไร่ และอื่น ๆ มีต้นทุนค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2,000 บาท/ไร่ ค่าโทรศัพท์เท่ากับ 500 บาท/ไร่

ตารางที่ 2 ต้นทุนการใช้ทรัพยากรของเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในจังหวัดกาฬสินธุ์และเกณฑ์การกระจายต้นทุนต่อพื้นที่บ่อเลี้ยง

ประเภททรัพยากร			ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อหน่วย (บาท)	จำนวนหรือปริมาณที่ใช้เฉลี่ย	ค่าใช้จ่ายต่อพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้ง (1 ไร่)	เกณฑ์การกระจายต้นทุน
ด้านบุคคล	ลูกจ้างรายวัน	หว่านวัสดุฆ่าเชื้อในบ่อเลี้ยงกุ้ง	300	1 คน	300	พื้นที่การปฏิบัติงาน
		จ้างชุดลอกบ่อเดิม	1,500	1 ไร่	1,500	พื้นที่การปฏิบัติงาน
		จับและคัดขนาดกุ้ง	200	7 คน	1,400	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	ลูกจ้างรายเดือน		5,000	1 คน	5,000	เวลาปฏิบัติงาน
ด้านพื้นที่	พื้นที่ของตนเอง		-	-	-	-
	พื้นที่เช่า		5,000	1 ไร่	5,000	พื้นที่การปฏิบัติงาน
เครื่องจักรอุปกรณ์	เครื่องต้นน้ำ		12,000	1 ชุด	12,000	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	เครื่องสูบน้ำและท่อสูบน้ำ		3,000	1 ชุด	3,000	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	ตาข่าย		1,250	1 เครื่อง	1,250	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	อุปกรณ์กรองน้ำ (ตาข่ายในสไลด์, ผ้าขาวบาง, ฯลฯ)		800	1 ม้วน	800	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	แหอวน		850	4 ปาก	3,400	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	ตะกร้า/เข่ง		120	5 ใบ	600	พื้นที่การปฏิบัติงาน
วัสดุใช้งานสิ้นเปลือง	วัสดุฆ่าเชื้อในบ่อ (ปูนขาว)		125	4 กระสอบ	500	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	อาหารกุ้งเล็ก		40	25 กระสอบ	1,000	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	อาหารกุ้งโต		800	4 กระสอบ	3,200	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	วิตามินแร่ธาตุ		200	1 ขวด	200	พื้นที่การปฏิบัติงาน
	พันธุ์ลูกกุ้ง		0.30	100,000 ตัว	30,000	พื้นที่การปฏิบัติงาน
อื่นๆ	ค่าไฟฟ้า		2,000	1 ไร่	2,000	% การทำงาน
	ค่าโทรศัพท์		500	1 ไร่	500	% การทำงาน

4.4 การกระจายต้นทุนตามกิจกรรม

การวิเคราะห์การกระจายต้นทุนตามกิจกรรม มีกิจกรรมย่อยทั้งหมด 10 กิจกรรม คือ 1) พื้นที่ในการเลี้ยง 2) ชุดบ่อ/ไถพรวนพื้นบ่อ 3) หว่านวัสดุปูนฆ่าเชื้อในบ่อและตากบ่อ 4) เติมน้ำในบ่อ 5) พันธุ์ลูกกุ้ง 6) อาหารกุ้ง 7) การดูแลรักษา 8) เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเลี้ยง 9) การจับและคัดขนาดกุ้ง 10) การขนส่งเพื่อการจำหน่าย โดยมีค่าใช้จ่ายด้านทรัพยากรทั้งหมด 5 ประเภท รายละเอียดแสดงดังในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าใช้จ่ายในแต่ละกิจกรรมย่อยต่อพื้นที่ 1 ไร่ มีค่ารายจ่ายรวมเท่ากับ 71,650 บาท กิจกรรมย่อยที่มีค่าใช้จ่ายมากที่สุดคือ พันธุ์ลูกกุ้ง มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 30,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 41.87 รองลงมาเป็นอุปกรณ์ในการเลี้ยง มี

ค่าใช้จ่ายเท่ากับ 12,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 16.75 การดูแลรักษา มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 7,200 บาท คิดเป็นร้อยละ 10.05 การจับคัดขนาดกุ้ง มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 6,650 บาท คิดเป็นร้อยละ 9.28 พื้นที่ในการเลี้ยง มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 5,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 6.98 อาหารกุ้งมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 4,200 บาท คิดเป็นร้อยละ 5.86 กิจกรรมเติมน้ำในบ่อมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 3,800 บาท คิดเป็นร้อยละ 5.30 ชุดบ่อ/ไถพรวนพื้นบ่อมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 1,500 บาท คิดเป็นร้อยละ 2.09 หว่านวัสดุปูนฆ่าเชื้อมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 800 บาท คิดเป็นร้อยละ 1.12 และการขนส่ง มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 500 บาท คิดเป็นร้อยละ 0.70

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การกระจายต้นทุนตามกิจกรรมต่อพื้นที่ 1 ไร่

ค่าใช้จ่าย		กิจกรรมย่อย										รวม (บาท)
		พื้นที่ ในการ เลี้ยง	ชุดบ่อ/ โดพรวน พื้น	หวาน วัสดุปูน ฆ่าเชื้อ	เติมน้ำ ในบ่อ	พันธุ์ ลูกกุ้ง	อาหาร กุ้ง	การ ดูแล รักษา	อุปกรณ์ ในการ เลี้ยง	จับคัด ขนาด กุ้ง	การ ขนส่ง	
ค่าใช้จ่าย ด้าน บุคลากร	ค่าจ้างรายวัน		1,500	300						1,400		3,200
	ค่าจ้างราย เดือน							5,000				5,000
ค่าใช้จ่าย ด้านพื้นที่	พื้นที่ตนเอง	-										0
	พื้นที่เช่า	5,000										5,000
ค่าใช้จ่าย ด้าน เครื่องจักร อุปกรณ์	เครื่องต้นน้ำ								12,000			12,000
	เครื่องสูบน้ำ และท่อสูบน้ำ				3,000							3,000
	ตาชั่ง									1,250		1,250
	อุปกรณ์กรอง				800							800
	แหอวน									3,400		3,400
	ตะกร้า/เชิง									600		600
วัสดุใช้งาน หรือ วัสดุ สิ้นเปลือง	วัสดุฆ่าเชื้อใน บ่อ			500								500
	อาหารกุ้งเล็ก						1,000					1,000
	อาหารกุ้งโต						3,200					3,200
	วิตามินแร่ธาตุ							200				200
	พันธุ์ลูกกุ้ง					30,000						30,000
อื่นๆ	ค่าไฟฟ้า							2,000				2,000
	ค่าโทรศัพท์										500	500
ค่าใช้จ่ายตามกิจกรรมย่อย		5,000	1,500	800	3,800	30,000	4,200	7,200	12,000	6,650	500	71,650
ค่าใช้จ่ายตามกิจกรรมย่อย %		6.98	2.09	1.12	5.30	41.87	5.86	10.05	16.75	9.28	0.70	100.00

4.5 ต้นทุนรวมทั้งหมดของแต่ละกิจกรรม

จากตารางที่ 4 คำนวณต้นทุนรวมของกิจกรรมหลักทั้ง 3 กิจกรรม พบว่าต้นทุนรวมของเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเท่ากับ 71,650 บาทต่อไร่ ซึ่งกิจกรรมหลักที่มีต้นทุนสูงที่สุด คือ กิจกรรมการเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์ลูกกุ้งต้นทุนรวมเท่ากับ 41,100 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 57.36 ลำดับที่สอง คือ

กิจกรรมการเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง มีต้นทุนรวมเท่ากับ 23,400 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 32.66 ลำดับที่สาม คือ กิจกรรมการจำหน่ายมีต้นทุนรวมเท่ากับ 7,150 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 9.98 ตามลำดับกิจกรรมที่มีต้นทุนสูงที่สุดถึงน้อยที่สุด

ตารางที่ 4 ต้นทุนรวมทั้งหมดของกิจกรรมหลัก

กิจกรรมหลัก	ต้นทุนการใช้ทรัพยากร					ต้นทุนรวม (บาท/ไร่)	ร้อยละ
	บุคลากร	พื้นที่	เครื่องจักร อุปกรณ์	วัสดุใช้งาน	อื่น ๆ		
การเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์ลูกกุ้ง	1,800	5,000	3,800	30,500	-	41,100	57.36
การเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง	5,000	-	12,000	4,400	2,000	23,400	32.66
การจำหน่าย	1,400	-	5,250	-	500	7,150	9.98
รวม	8,200	5,000	21,050	34,900	2,500	71,650	100.00

4.6 ปริมาณงานและต้นทุนต่อหน่วย

สำหรับการคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วย โดยใช้ปริมาณงานที่เกิดขึ้นมาเป็นข้อมูลในการคำนวณ โดยคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยได้จากสูตร รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5

$$\text{ต้นทุนต่อหน่วย} = \text{ต้นทุนทั้งหมดของกิจกรรม} / \text{ปริมาณการปฏิบัติงาน} \quad (1)$$

ตารางที่ 5 ปริมาณงานและต้นทุน/หน่วย/ปี

กิจกรรมย่อย	ต้นทุนทั้งหมดของกิจกรรม	ปริมาณงานเฉลี่ยต่อครั้งต่อปี	หน่วย	ต้นทุนหน่วย
1.1 พื้นที่ในการเลี้ยง	60,000	12	เดือน	5,000
1.2 การขุดบ่อ/ไถพรวนพื้นบ่อ	1,500	1	ครั้ง	1,500
1.3 หว่านวัสดุปูนฆ่าเชื้อในบ่อและตากบ่อ	600	2	ครั้ง	300
1.4 เติมน้ำในบ่อ	3,000	1	ครั้ง	3,000
1.5 การซื้อพันธุ์ลูกกุ้ง	60,000	2	ครั้ง	30,000
2.1 การให้อาหารกุ้งเล็ก	1,000	25	กระสอบ	40
2.2 การให้อาหารกุ้ง	3,200	4	กระสอบ	800
2.3 การดูแลรักษา (โรค/ศัตรู)	24,000	12	ครั้ง	2,000
2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเลี้ยง	12,000	1	ครั้ง	12,000
3.1 การจับและคัดขนาดกุ้ง	13,300	2	ครั้ง	6,650
3.2 ขนส่งเพื่อการจำหน่าย	2,000	4	ครั้ง	500

จากตารางที่ 5 พบว่าต้นทุนต่อหน่วยที่มีมูลค่าสูงที่สุด คือ การซื้อพันธุ์ลูกกุ้ง มีต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 30,000 บาทต่อครั้ง เนื่องจากราคาพันธุ์ลูกกุ้งในแต่ละปีราคาจะแตกต่างกันตามความต้องการของลูกค้า รองลงมาคือ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเลี้ยง มีต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 12,000 บาทต่อครั้ง ส่วนใหญ่จะเป็นลงทุนในครั้งแรก พอปีถัดไปอุปกรณ์บางอย่างสามารถใช้ของเดิมได้ และอันดับที่สาม คือ กิจกรรมการจับและคัดขนาดกุ้ง มีต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 6,650 บาทต่อครั้ง เพราะในการคัดจับและคัดขนาดกุ้งต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์เท่านั้นถึงจะเลือกคัดกุ้งได้ตามขนาดที่ตลาดต้องการ

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-Based Costing : ABC) ในเกษตรกรเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพื่อการพาณิชย์ จังหวัดกาฬสินธุ์ พบว่าต้นทุนโลจิสติกส์ มีต้นทุนรวมของการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเท่ากับ 71,650 บาทต่อไร่/ครั้ง ซึ่งกิจกรรมหลักที่มีต้นทุนสูงที่สุด คือ กิจกรรมการเตรียมบ่อเลี้ยงและพันธุ์กุ้ง มีต้นทุนรวมเท่ากับ 41,100 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 57.36 อันดับที่สอง คือ กิจกรรมการเลี้ยงและการจัดการระหว่างเลี้ยง มีต้นทุนรวมเท่ากับ 23,400 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 32.66 และอันดับสาม กิจกรรมการจำหน่าย 7,150 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 9.98 นอกจากนี้ยังพบว่า เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามในพื้นที่ 1 ไร่ มียอดขายโดยประมาณ 125,000 บาท/ไร่/ครั้ง คิดอัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Return on Investment :

ROI) ได้เท่ากับ 74.46% ซึ่งผลการวิจัยครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ บังอร บังใบและกัญญารัตน์ ที่พบว่าอัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Return on Investment : ROI) เท่ากับ 84.81% ซึ่งน้อยกว่าวิธีการเลี้ยงแบบผสมผสานที่มีอัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Return on Investment : ROI) เท่ากับ 92.56%

สำหรับต้นทุนฐานกิจกรรมเริ่มเป็นที่ยอมรับและแพร่หลายมากขึ้น หากธุรกิจใดที่ให้ความสำคัญกับการบริหารกิจกรรมของธุรกิจ สามารถใช้เป็นกลยุทธ์ในการบริหารจัดการได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบต้นทุนที่แท้จริงและบริหารจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

งานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์เพื่อการบริหารจัดการที่ยั่งยืนของกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามในพื้นที่ จ.กาฬสินธุ์ นี้ ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ทีมผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ และสำนักงานประมงจังหวัดกาฬสินธุ์ที่อนุเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน รวมทั้งกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเลี้ยงกุ้งก้ามกรามจังหวัดกาฬสินธุ์ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

8. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Lobster from wikipedia free Encyclopedia. [Internet] [cited 2023 june 12]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/Lobster> (In Thai)
- [2] Kalasin Agriculture Gather information on lobster farming over the past 50 years and submit it as a GI product [Internet]. [cited 2023 september 12]. Available from: <https://www.thairath.co.th/news/local/northeast/2706543> (In Thai)
- [3] Lobster Blog [Internet]. [cited 2023 june 26]; Available from: <https://www4.fisheries.go.th/doffile/fkey/ref18567> (In Thai)

[4] Dachpongpa Pa. Logistics cost analysis of speing onion fields by activity base costing system: a case study of spring onion farmers in nakhonphanom province. [master's thesis]. Phthum Thani: RMUTT; 2018. (In Thai)

[5] Onsanit Sa. Analysis of logistics cost reduction by activity base costing system (ABC) case study: johnson controls and summit integrated company limited. [master's thesis]. Chonburi: Sripatum University Chonburi Campus; 2011. (In Thai)

[6] Imsri KT, Saengadsapaviriya Jk. Logistics costs of the shrimp processing industry with the activity cost base system [master's thesis]. Chiang Mai: Mae Jo University; 2012 (In Thai)

[7] Bangbai B, kleebrayoon K. Comparison of costs and returns of investment in shrimp farming between monoculture and Polyculture Farming. Journal of Industrial Business Administration. 2020;2(1):4-20. (In Thai)

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสม ขี้เถ้าปลาคาร์พโพลีไทรอิน

ทวิศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล¹ และประชุม คำพุ่ม^{2*}

thaweesak.run@rmutr.ac.th¹, prachoom_k@rmutt.ac.th^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล

² หน่วยงานวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: November 9, 2023 Revised: January 17, 2024 Accepted: February 1, 2024

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสมขี้เถ้าปลาคาร์พโพลีไทรอินแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ที่อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : หินปูน เท่ากับ 1 : 2 : 6 โดยน้ำหนัก ใช้น้ำในสัดส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม และการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีต ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วัน และค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อก ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของขี้เถ้าปลาคาร์พโพลีไทรอินร้อยละ 15 ให้คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมดีที่สุด มีความหนาแน่นเฉลี่ย เท่ากับ 2,258.72 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย เท่ากับร้อยละ 6.49 และค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 มีค่าเท่ากับ 50.10, 53.16 และ 53.73 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.58-2560 ชนิดไม่รับน้ำหนัก การทดสอบการถ่ายเทความร้อน 60 นาที โดยใช้ไฟสปอตไลท์ให้ความร้อน T1(ฝั่งปล่อยความร้อน) มีอุณหภูมิเริ่มต้น 35 °C เริ่มบันทึกค่า T2 (ฝั่งรับความร้อน) บันทึกค่าอุณหภูมิต่างระหว่าง T1-T2 โดยอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 35-70 °C ผลการทดสอบค่าการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกที่ผสมขี้เถ้าปลาคาร์พโพลีไทรอินร้อยละ 15 มีค่าการนำความร้อน เท่ากับ 3.368 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ค่าการต้านทานความร้อน เท่ากับ 0.021 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อก เท่ากับ 48.116 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน การใช้ขี้เถ้าปลาคาร์พโพลีไทรอินแทนที่ทรายร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเป็นไปในทางที่ดีอีกทั้งยังเป็นแนวทางในการจัดการนำขี้เถ้าปลาคาร์พมาใช้ในการใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างที่ต่อยอดได้ในเชิงพาณิชย์ในอนาคต

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อก โพลีไทรอิน การถ่ายเทความร้อน

The Engineering Properties and Heat Transfer of Concrete Block Mixed with Polystyrene

Thaweesak Rungsakthaweekul¹ and Prachoom Khamput^{2*}
thaweesak.run@rmutr.ac.th¹ and prachoom_k@rmutt.ac.th^{2*}

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Wangklaikangwon Campus

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

Received: November 9, 2023 Revised: January 17, 2024 Accepted: February 1, 2024

Abstract

Study of engineering properties and heat transfer of concrete blocks mixed with plastic waste. Polystyrene replaces sand in the ratios of 0, 5, 10, and 15 percent. The mixing ratio of cement: sand: rock dust is equal to 1: 2: 6 by weight. Water is used in the proportion of 10 percent of the total weight of the mixture. To study engineering properties and heat transfer of concrete Percent absorption value at 7 days and compressive strength of concrete blocks at 7, 14, and 28 days of incubation. Studies have shown that a ratio of 15 percent to polystyrene waste gives the best engineering properties. It has an average density value of 2,258.72 kg/m³. The average water absorption value was equal to 6.49 percent and the average compressive strength at curing ages 7, 14, and 28 were equal to 50.10, 53.16, and 53.73 kg/cm², respectively, which values were by TIS 58-2017 standards, non-stick type. Bear weight 60-minute heat transfer test using a heat spotlight. T1 (heat emitting side) has an initial temperature of 35 °C. Start recording values. T2 (heat receiving side) records the temperature difference between T1-T2, with the temperature between 35-70 °C. The heat transfer test results of concrete blocks mixed with 15 percent polystyrene plastic waste had a thermal conductivity equal to 3.368 W/m.k. The thermal resistance value is 0.021 m².k/W. and the heat transfer coefficient of the concrete block is 48.116 W/m².k. Using polystyrene plastic waste instead of 15 percent sand results in good heat transfer values and is also a guideline for managing plastic waste to be used as construction materials. that can be developed commercially in the future

Keywords: Concrete block, Polystyrene, Heat transfer

1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีความเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เรารับรู้แต่ประโยชน์ของพลาสติก และไม่ตระหนักถึงผลกระทบของพลาสติกต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ระบบนิเวศธรรมชาติ และสภาพภูมิอากาศ พลาสติกกลายเป็นปัญหาจากการที่เราใช้พลาสติกอย่างฟุ่มเฟือย และจากการสืบค้นสถิติทั่วโลกมีแนวโน้มที่ปริมาณการใช้พลาสติกยังคงมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกมีเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ในปัจจุบันการรณรงค์เพื่อลดปริมาณขยะพลาสติกนี้จะมีเพิ่มมากขึ้น แต่การจัดการกับขยะพลาสติกยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ [1] รวมถึงปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่มีแนวโน้มที่รุนแรงมากขึ้น จะเห็นได้จากภาวะโลกร้อน (Global Warming) หรือภาวะอุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate Change) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2021)

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนา การเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ และการขยายตัวของประชากรเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดความต้องการในการก่อสร้างด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งคอนกรีตบล็อกเป็นส่วนหนึ่งของงานก่อสร้างที่ได้รับความนิยมและแพร่หลายในการสร้างบ้านพัก รวมไปถึงที่อยู่อาศัยต่างๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้งานได้ง่าย มีความสะดวก รวดเร็ว และสวยงาม [2] นอกจากนั้นยังสามารถก่อสร้างได้ด้วยตัวเอง และทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างได้มากกว่าการก่อสร้าง ซึ่งคอนกรีตบล็อกมีส่วนผสมของทราย ในการใช้ทรายปริมาณเพิ่มมากขึ้นนั้น จะส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษของสิ่งแวดล้อมตามมาอีกด้วย

ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญ จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาการนำขยะพลาสติกประเภทพอลิโอสไตรีน ซึ่งมีคุณสมบัติเด่น คือ มีความแข็งแรงมาก ไม่ยืดหยุ่น เปราะ ไม่ดูดความชื้น และที่สำคัญเป็นฉนวน จึงนำพลาสติกประเภทนี้มาทดแทนทราย เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ทราย เพื่อทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของ

คอนกรีตบล็อก เป็นการใช้ประโยชน์จากการนำขยะพลาสติกและลดภาวะสิ่งแวดล้อม

2. วัตถุประสงค์

ในวิจัยนี้จึงมีความสนใจการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิโอสไตรีน เพื่อนำขยะพลาสติกมาทดแทนทราย รวมไปถึงการพัฒนาให้ได้บล็อกคอนกรีตสำเร็จรูปผสมขยะพลาสติกที่มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม [3]

2.1 เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกมาตรฐานกับคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิโอสไตรีน

2.2 เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกมาตรฐานกับคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิโอสไตรีน

2.3 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ทรายด้วยขยะพลาสติกพอลิโอสไตรีน

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ในกระบวนการดำเนินงานวิจัยซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิโอสไตรีน วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา ทีพีไอ ตามมาตรฐาน ASTM C 150 2) มวลรวมละเอียด ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ค้างเบอร์ 100 3) หินฝุ่นผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ค้างเบอร์ 100 และ 4) พลาสติกพอลิโอสไตรีนค้ำตะแกรงเบอร์ 16 และ 30

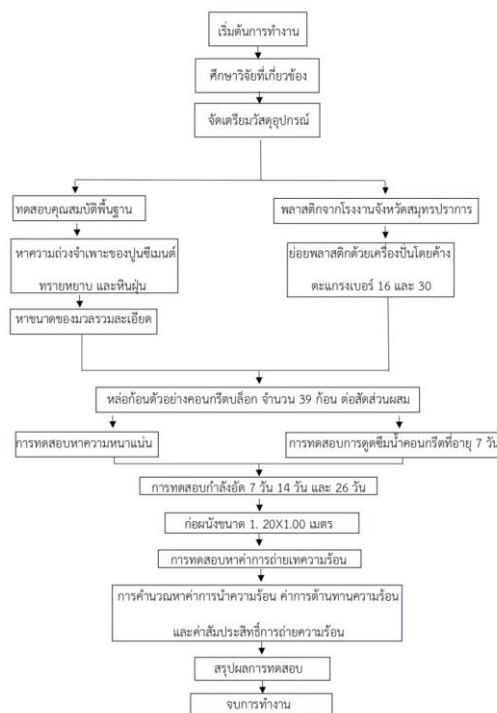
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ประกอบด้วยอุปกรณ์ 1) เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด ขนาด 2,000 กิโลนิวตัน รุ่น STS-C902V 2) เครื่องทดสอบการถ่ายเทความร้อน รุ่น CENTER 306 3) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนและชุดตะแกรงร่อน 4) เครื่องบดหิน รุ่น VE Wegter 5) เครื่องปั่นเอนกประสงค์ 6) ไฟส่องป้ายโฆษณา รุ่น Veto Flood Light (สปอร์ตไลท์ LED 400 วัตต์) 7)

เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกและ 8) ตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 100 ± 5 องศาเซลเซียส

3.3 กระบวนการดำเนินการวิจัย

กระบวนการดำเนินงานวิจัยด้วยการนำขยะพลาสติกชนิดพอลิโพรไพลีนมาแทนที่มวลละเอียดเพื่อหาค่าคุณสมบัติของการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด และการถ่ายเทความร้อนโดยขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกขนาด $39 \times 19 \times 7$ เซนติเมตร โดยมีผังกระบวนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

1) การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตบล็อก

อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 2 : 6 โดยมีพลาสติกพอลิโพรไพลีน เพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างที่ต้องทดสอบสำหรับคอนกรีตบล็อกขนาด $39 \times 19 \times 7$ เซนติเมตร รายละเอียดของสัดส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกผสมด้วยพลาสติก

สูตร	สัดส่วนโดยปริมาตร	สัดส่วน (ร้อยละ)			
		ปูน	ทราย	หินฝุ่น	PS
CBS _{1.0}	1: 2: 6	1.00	2.00	6.00	0.00
CBps _{0.05}	1: 2: 6	1.00	1.95	6.00	0.05
CBps _{0.10}	1: 2: 6	1.00	1.90	6.00	0.10
CBps _{0.15}	1: 2: 6	1.00	1.85	6.00	0.15

2) การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ

2.1) ขั้นตอนการเตรียมพลาสติกพอลิโพรไพลีน มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมพลาสติกพอลิโพรไพลีน

2.2) ขั้นตอนการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อก มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 การขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกคอนกรีต

3) การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐาน ดังต่อไปนี้

3.1) การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(Specific Gravity of Portland Cement) ตามมาตรฐาน ASTM C 188

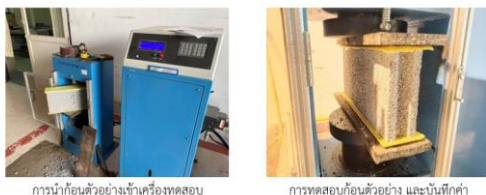
3.2) การหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 128

3.3) การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียด และพลาสติกพอลิไธรีน ตามมาตรฐาน ASTM C 33 [4]

3.4) การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก (Water Absorption) ตามมาตรฐาน ASTM C 128 [5, 6]

3.5) การทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อก

3.6) การทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อก (Compressive Strength Test) [7] มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 4 ดังต่อไปนี้



การนำก้อนตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ

การทดสอบก้อนตัวอย่าง และบันทึกค่า

รูปที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก

3.7) การทดสอบหาค่าการถ่ายเทความร้อน มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 5 ดังต่อไปนี้



การก่อผนัง ขนาด 1.20 X 1.00 เมตร

การทำทรงจตุรัสกลางของผนัง

ติดตั้งเครื่องThermocoupleกับผนัง โดย T1 อยู่ด้านหน้าผนัง และ T2 อยู่ด้านหลังผนังและวัดความร้อน

รูปที่ 5 การทดสอบหาค่าการถ่ายเทความร้อน

5. ผลการทดลอง

จากการดำเนินงานตามกระบวนการศึกษาในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการแทนที่ทรายด้วยขยะพลาสติกพอลิไธรีน คอนกรีตบล็อกที่ใช้ในการทดสอบใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ : ทราย : หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 2 : 6 และใช้น้ำในสัดส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งใช้พลาสติกแทนที่ทรายในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน สามารถสรุปผลการศึกษาในแต่ละคุณสมบัติ ได้ดังต่อไปนี้

1) การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(Specific Gravity of Portland Cement) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 มีค่าเท่ากับ 3.13

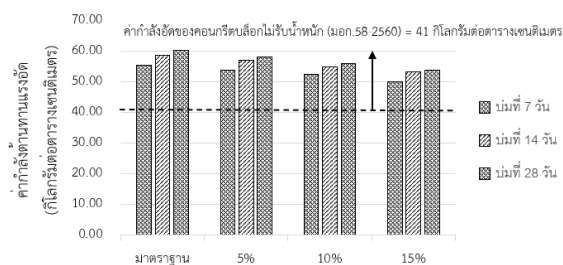
2) การหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและพลาสติกพอลิไธรีน ตามมาตรฐาน ASTM C 128 มีค่าเท่ากับ 2.65 และ 2.61 ตามลำดับ

3) การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียด และพลาสติกพอลิไธรีน ตามมาตรฐาน ASTM C 33 โดยความละเอียดของมวลรวมสามารถได้จากค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) มวลรวมละเอียดที่เหมาะสมในการใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 2.30 - 3.20 ซึ่งค่าน้อยแสดงถึงความละเอียดกว่า จากการทดสอบวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวม 2 ชนิด ได้แก่ ทราย และพลาสติกพอลิไธรีน พบว่าค่า F.M. มีค่าเท่ากับ 2.75 และ 2.78 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงความละเอียดมากและค่า F.M. ของพลาสติก PS มีค่าใกล้เคียงกับ F.M. ของทราย

4) การทดสอบหาการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก โดยการใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย [8] ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นอบแห้งเฉลี่ยและการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกที่ระยะเวลา 7 วัน ในอัตราส่วนผสมที่ 0, 5, 10, และ 15 ตามลำดับ พบว่าค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอบแห้งเท่ากับ 2,340.53, 2,326.34, 2,290.32 และ 2,258.72 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 6.79, 6.68, 6.57 และ 6.49 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 642-97

5) ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นอบแห้งเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกที่ระยะเวลา 7 วัน ในอัตราส่วนผสมที่ 0, 5, 10, และ 15 ตามลำดับ พบว่าค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอบแห้งเท่ากับ 2340.53, 2326.34, 2290.32 และ 2258.72 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [9]

6) การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อก โดยใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ และมีอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน จะให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.44, 53.75, 52.46 และ 50.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 14 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.64, 56.97, 54.78 และ 53.16 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60.18, 55.93, 55.93 และ 53.73 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ [10] ดังแสดงในรูปที่ 6



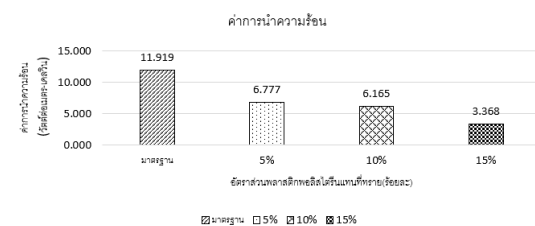
รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อก โดยใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย

7) การคำนวณหาค่าการนำความร้อน ค่าความต้านทานความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน การทดสอบการถ่ายเทความร้อน [6] โดยใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 เป็นการทดสอบในช่วงระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และระยะเวลาในการทดสอบการถ่ายเทความร้อน ตั้งแต่เวลาที่แรก ถึง 60 นาที โดยจะเก็บอุณหภูมิอยู่ในช่วงระยะเวลา 5 นาที คือเวลาที่ 28 ถึง 32 เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเสร็จแล้วทำการให้ความร้อนโดยใช้ไฟสปอตไลท์ทิ้งไว้ให้ T1(ฝั่งปล่อยความร้อน) มีอุณหภูมิถึง 35°C แล้วเริ่มบันทึกค่า แล้ว T2 (ฝั่งรับ

ความร้อน) บันทึกค่าอุณหภูมิต่างระหว่าง T1-T2 และทำการคำนวณผลที่ได้ดังนี้

7.1) ค่าการนำความร้อน

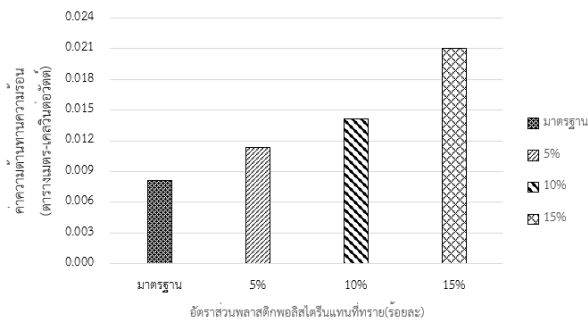
จากการทดสอบการถ่ายเทความร้อน โดยใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ โดยใช้ก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 11.919 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน เมื่อนำพลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5 จะมีค่าการนำความร้อน เท่ากับ 6.777 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และอัตราส่วนร้อยละ 10 จะมีค่า เท่ากับ 6.165 วัตต์ต่อเมตร-เคลวินและอัตราส่วนร้อยละ 15 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 3.368 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน

7.2) ค่าการต้านทานความร้อน

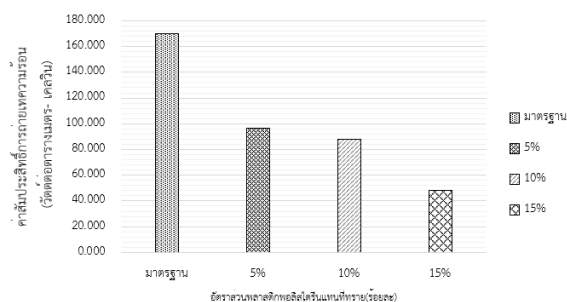
ค่าการต้านทานความร้อนของคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.008 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ เมื่อนำพลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5 จะมีค่าการนำความร้อน เท่ากับ 0.011 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ และอัตราส่วนร้อยละ 10 จะมีค่า เท่ากับ ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ และอัตราส่วนร้อยละ 15 มีค่าที่มากที่สุด เท่ากับ 0.021 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ [11, 12] ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการทดสอบค่าการต้านทานความร้อน

7.3) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

จากการทดสอบการถ่ายเทความร้อนโดยใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยใช้ก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกมาตรฐานมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 170.266 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน เมื่อนำพลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5 จะมีค่าการนำความร้อนที่ค่าเท่ากับ 96.818 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน และอัตราส่วนร้อยละ 10 จะมีค่า เท่ากับ 88.069 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน และอัตราส่วนร้อยละ 15 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 48.116 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน [13] ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

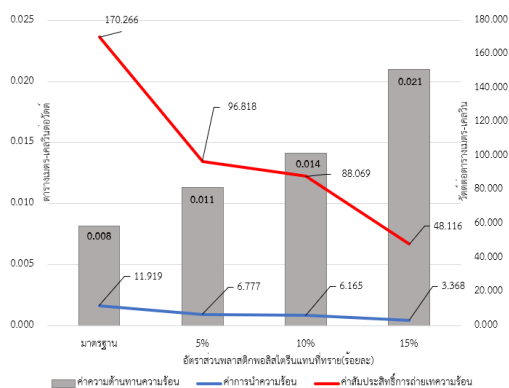
ผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ในเวลาการทดสอบในช่วงเวลา 5 นาที โดยใช้พลาสติกพอลิไธรีน

แทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ค่าการนำความร้อนมีค่าเท่ากับ 11.919, 96.777, 6.165 และ 3.368 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

6. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิไธรีนแทนที่มวลรวมละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 เมื่อเพิ่มการแทนที่ของขยะพลาสติกพอลิไธรีนที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอบแห้งและค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดมีค่าน้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีค่าน้อยลงตามกัน และเมื่อเพิ่มการแทนที่ของขยะพลาสติกพอลิไธรีนที่เพิ่มมากขึ้น [14]

ซึ่งจะเห็นได้ว่าคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมพลาสติกพอลิไธรีนมีค่ามากที่สุด และคอนกรีตบล็อกที่ผสมพลาสติกพอลิไธรีนมีค่าน้อยลงตามลำดับ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกเข้าไปในส่วนผสม ซึ่งค่าการนำความร้อนนั้นบ่งบอกถึงความสามารถในการยอมให้ความร้อนไหลผ่านตัวเอง ซึ่งค่าน้อยก็ยิ่งดี ค่าความต้านทานความร้อนของคอนกรีตบล็อก โดยใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 มีค่าเท่ากับ 0.008, 0.0011, 0.014 และ 0.021 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมพลาสติกพอลิไธรีนมีค่ามากที่สุด และคอนกรีตบล็อกที่ผสมพลาสติกพอลิไธรีนมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกเข้าไปในส่วนผสม ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนยิ่งมากจะยิ่งดี และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อก โดยใช้พลาสติกพอลิไธรีนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 มีค่าเท่ากับ 170.266, 96.818, 88.069 และ 48.116 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมพลาสติกพอลิไธรีน มีค่ามากที่สุด และคอนกรีตบล็อกที่ผสมพลาสติกพอลิไธรีนมีค่าน้อยลงตามลำดับ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกเข้าไปในส่วนผสม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีค่าน้อยจะยิ่งดี [15] ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อน ค่าต้านทานความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

จะเห็นได้ว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าต่ำมากยิ่งขึ้น จากการทดสอบครั้งนี้ การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยขยะพลาสติกโฟมในทรายร้อยละ 15 จะมีค่าที่ดีที่สุด ซึ่งจะบอกถึงการทนทานต่อความร้อนได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน

7. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม และการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกโฟมในทรายแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1) การนำทรายมาใช้ผสมในกระบวนการทดสอบควรจะใช้ขนาดคละที่เท่ากับขนาดคละของพลาสติกโฟมในทราย เพราะอาจจะทำให้ค่าการทดสอบมีความเป็นไปได้อีกมากกว่า และสามารถนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกันได้

2) การทดสอบการถ่ายเทความร้อน ควรให้ความระมัดระวังในการทดสอบ เช่น สถานที่ก่อผนัง แรงลม เวลาในการทดสอบ รวมทั้งความร้อนของตัวให้ความร้อน เพราะอิทธิพลเหล่านี้จะส่งผลให้ค่าของการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนได้

3) การทดสอบการถ่ายเทความร้อน แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยขยะพลาสติกโฟมในทรายร้อยละ 15 ดีที่สุด แต่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน ซึ่งค่าที่ได้

ยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานด้านทนแรงอัด จึงสามารถเพิ่มอัตราส่วนในการแทนที่มวลรวมละเอียดได้

4) คอนกรีตบล็อกสามารถนำมาทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเพิ่มเติมได้ เช่น การทดสอบการไหลผ่านของเสียง

8. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงนักศึกษาและอาจารย์ในสาขาวิศวกรรมโยธา ที่ช่วยเสียสละเวลาและองค์ความรู้ในการสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และอาจารย์ประชุม คำพุ่ม ผู้ร่วมวิจัยที่ทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Pollution Control Department. Academic publications Roadmap Plastic Waste Management. Ministry of Natural Resources and Environment. 2021. (in Thai)
- [2] Paopongpaiboon K, Boonserm K, Chindaprasit P, Horsakulthai V. The effect of organic solvent patios on mechanical properties and thermal conductivity of walkway block from waste foam residue. The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage. 2019;30(4):121-32. (in Thai)
- [3] Thai Industrial Standard (TIS). TIS no. 58-2560 Hollow non-loadbearing concrete masonry units. Ministry of Industry (Thailand), 2017.
- [4] Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM Standard. West Conshohocken, PA, [Internet]. 2019. Available from: www.astm.org: ASTM International. 2019.

- [5] Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. ASTM Standard. West Conshohocken, PA, [Internet]. 2019, Available from: www.astm.org: ASTM International, 2014.
- [6] Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM Standard. West Conshohocken, PA, [Internet]. 2019, Available from: www.astm.org: ASTM International, 2013.
- [7] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in. [or 50-mm] Cube Specimens. ASTM Standard. West Conshohocken, PA, [Internet]. 2019. Available from: www.astm.org: ASTM International, 2020.
- [8] Aljerf L. Effect of thermal-cured hydraulic cement admixtures on the mechanical properties of concrete. *Intercom-International Ceramic Review*, 2015;64(8):346-56.
- [9] Madhu G, Bhunia H, Bajpai P. K, and Chaudhary V. Mechanical and morphological properties of high-density polyethylene and polylactide blends. *Journal of Polymer Engineering*, 2014;34(9):813-21.
- [10] Wang R, Meyer C. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*. 2012;34(9):975–81.
- [11] Suwansaard A, Kongpun T, Khemkhao M. Properties of mortar composites from plastic waste. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2021;25(1):59-70.
- [12] Suwansaard A, Kongpun T, Khemkhao M. Properties of mortars mixed with polystyrene and hemp fiber wastes. *Applied Science and Engineering Progress*, 2022;15(1):1-11.
- [13] Solomon A, Hemalatha G. Experimental investigation of insulated concrete form (ICF) wall panels under quasi-static cyclic load. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2018;8(2):84-8.
- [14] Kaya A, KAR F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials*. 2016;15(105):572-8.
- [15] Bahij S, Omary S, Feugeas F, Faqiri A. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste–A review. *Waste Management*. 2020;113:157-75.

การวิเคราะห์ปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์^{1*}thidaporn@eng.buu.ac.th^{1*}¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received: September 6, 2023 Revised: December 6, 2023 Accepted: February 1, 2024

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย เพื่อนำมาช่วยตรวจสอบสัดส่วนผสมของคอนกรีต ขั้นตอนในการศึกษาเริ่มจากการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม., รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. และรูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 15 ซม. ยาว 15 ซม. สูง 15 ซม. โดยใช้มวลรวมหยาบหรือหินคละที่มีขนาดโตสุดของมวลรวม $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $1\frac{1}{2}$ นิ้ว มาผสมคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.40, 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก กำหนดให้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (s/a) เท่ากับ 0.44 โดยปริมาตร จากนั้นจึงใช้วิธีการถ่ายภาพหน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัด สัดส่วนผสม และอายุที่แตกต่างกันไป แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบจากภาพถ่าย ผลการวิจัย พบว่า ผลการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งแล้วของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ทั้งหน้าตัดทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบขนาดโตสุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว อย่างมีนัยสำคัญ และขนาดของตัวอย่างหน้าตัดคอนกรีตทรงกระบอกที่แตกต่างกันส่งผลต่อการวิเคราะห์และมีความคลาดเคลื่อนต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์สูงขึ้นไปมีแนวโน้มให้ผลความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นเช่นกัน และตัวอย่างคอนกรีตที่อายุแตกต่างกันให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ปริมาณมวลรวมหยาบ วิธีการทางภาพถ่าย

An Analysis of Coarse Aggregate Content of Hardened Concrete using Image Processing

Thidaporn Chuosavasdi^{1*}

thidaporn@eng.buu.ac.th^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Received: September 6, 2023 Revised: December 6, 2023 Accepted: February 1, 2024

Abstract

The study aims to develop a method for the analysis of coarse aggregate content of hardened concrete using image processing. The developed method was applied to estimate the coarse aggregate content of hardened concrete prepared in the laboratory with a known mix design in order to verify its efficiency. The concrete samples were prepared in three different sizes with two types of cylindrical shapes and one type of cubic shape. Coarse aggregates with maximum sizes of $\frac{3}{4}$ inch and $1\frac{1}{2}$ inches were used in the concrete mixture. The 0.40, 0.50, and 0.60 by weight water-to-cement ratios (w/c), and the 0.44 by volume of fine aggregate-to-aggregate ratio (s/a) were used for mixing. Subsequently, cross-sectional images of the concrete samples with each mix proportion and age were prepared to determine the coarse aggregate content. The analytical result of coarse aggregate content with maximum sizes of $\frac{3}{4}$ inch yields a lower margin of error than $1\frac{1}{2}$ inches. The analytical results indicated that the maximum size of coarse aggregate significantly affects the analysis of the coarse aggregate content of hardened concrete with both cylinder-and cube-shaped of concrete samples. Additionally, the analysis demonstrates that increasing the water-to-cement ratio leads to higher variability in the results indicating that higher water content contributes to increased discrepancies. Moreover, both the age and the different cylindrical size of the concrete sample insignificantly affect analysis of the coarse aggregate concrete of hardened concrete.

Keywords: Hardened concrete, Coarse aggregate content, Image analysis

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความคงทน แข็งแรง มีความสามารถในการต้านทานน้ำและต้านทานไฟที่ดี สามารถก่อสร้างให้มีรูปร่างลักษณะและขนาดได้ตามความต้องการ ราคาไม่สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้าง ส่วนผสมของคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างคอนกรีตจึงอาจจำเป็นต้องทำการพิสูจน์และวิเคราะห์หาสาเหตุซึ่งอาจมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อม วัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตไม่ได้คุณภาพ สัดส่วนผสมไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ หรือวิธีการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน การวิเคราะห์สัดส่วนผสมจึงเป็นหนึ่งข้อมูลสำคัญที่จำเป็นต่อการพิจารณาหาสาเหตุความเสียหายดังกล่าวและสามารถช่วยลดการเกิดความขัดแย้งระหว่างผู้รับเหมากับผู้ผลิตคอนกรีต

มวลรวมหยาบหรือหินเป็นวัสดุหลักชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้ในการทำคอนกรีต ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปจะถือว่า หินเป็นวัสดุเฉื่อยไม่มีการทำปฏิกิริยาในคอนกรีตแต่หินก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นกัน และมักถูกใช้เป็นส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักมากที่สุด ในคอนกรีต หินจึงเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญใน สัดส่วนผสมของคอนกรีต ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการ เสนอวิธีการหามวลรวมของคอนกรีตไว้ซึ่งเป็นวิธีการ ทดสอบทางเคมี [1] จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากชนิดของมวลรวมและชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ในคอนกรีตมีส่วนประกอบแตกต่างกัน ส่งผลให้การ วิเคราะห์มีความยุ่งยากมากขึ้นหรือเกิดความผิดพลาด ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไม่มีข้อมูลของชนิดมวลรวม และวัสดุประสานที่ใช้ หรือบางการศึกษาจะสามารถหา ปริมาณมวลรวมซึ่งประกอบด้วยทั้งมวลรวมหยาบและ มวลรวมละเอียด [2] แต่ไม่ได้แยกหาเฉพาะปริมาณของ มวลรวมละเอียดหรือมวลรวมหยาบ และยังไม่มี งานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับวิธีการหาปริมาณมวล รวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

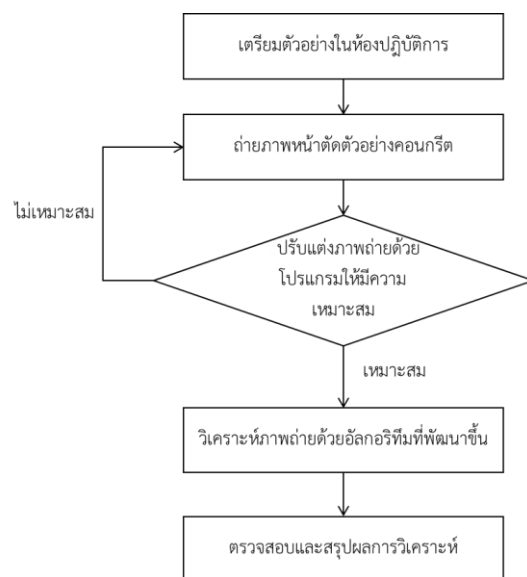
วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการทาง ภาพถ่าย (Image Processing) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยม นำมาใช้ในการตรวจสอบเหตุการณ์ต่าง ๆ และมีการ

นำมาใช้ในการตรวจสอบสภาพคอนกรีต เพื่อวิเคราะห์ รอยแตกร้าว [3] ตรวจสอบรอยแตกร้าว [4] ลักษณะ การแตกร้าว [5] การประเมินความเสื่อมสภาพ เนื่องจากการแตกร้าว [6] การประเมินคุณสมบัติของ คอนกรีตทั้งทางด้านกำลัง [7] หรือนำมาใช้ในการ แยกตัวของคอนกรีต [8] และมีการนำไปประยุกต์ เทคนิคนี้ในการศึกษาหรือตรวจสอบคุณสมบัติของมวล รวม เช่น การกระจายตัวของมวลรวม [9] การศึกษา รูปทรงของเม็ดหิน [10] การประมาณปริมาณกองหิน จากภาพ 2 มิติ [11] ประเมินขนาดคละจากภาพถ่าย [12] เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาปริมาณมวล รวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทาง ภาพถ่าย โดยพิจารณาผลกระทบด้านขนาดใหญ่มากที่สุดของ มวลรวมหยาบ อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ ขนาดหน้า ตัดคอนกรีตที่แตกต่างกัน รูปทรงตัวอย่างที่แตกต่างกัน และที่อายุแตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางและพัฒนาไปสู่ การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ต่อไป

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิธีการหาปริมาณมวลรวมหยาบใน คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มีแผนการดำเนินการทดสอบดัง แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 วัสดุและสัดส่วนผสม

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มวลรวมซึ่งมีขนาดละเอียดอยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM C33 [13] โดยมวลรวมละเอียดเป็นทรายหยาบผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.9 และมวลรวมหยาบเป็นหินปูนขนาดโตสุดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $1\frac{1}{2}$ นิ้ว โมดูลัสความละเอียดเท่า 6.7 และ 7.4 ตามลำดับ อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (s/a) เท่ากับ 0.44 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) คือ 0.40, 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบที่ 2 ช่วงอายุ คือ 7 วัน และ 28 วัน สัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	ตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	ขนาดโตสุดของมวลรวม (นิ้ว)	รูปทรงตัวอย่าง	อายุ (วัน)
1	W40S44M1CL10E	0.40	$\frac{3}{4}$	CL10	7
2	W40S44M1CL15E			CL15	7
3	W40S44M1CL10L			CL10	28
4	W40S44M1CU15L			CU15	28
5	W40S44M2CL10L		$1\frac{1}{2}$	CL10	28
8	W50S44M1CL10E	0.50	$\frac{3}{4}$	CL10	7
9	W50S44M1CL15E			CL15	7
10	W50S44M1CL10L			CL10	28
11	W50S44M1CU15L			CU15	28
12	W50S44M2CL10L		$1\frac{1}{2}$	CL10	28
13	W50S44M2CU15L	0.60	$\frac{3}{4}$	CU15	28
14	W60S44M1CL10E			CL10	7
15	W60S44M1CL15E			CL15	7
16	W60S44M1CL10L			CL10	28
17	W60S44M1CU15L			CU15	28
18	W60S44M2CL10L		$1\frac{1}{2}$	CL10	28

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีต

ลำดับ	ตัวอย่าง	สัดส่วนผสม (กก/ลบ.ม.)			
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)
1	W40S44M1CL10E	436	174	749	995
2	W40S44M1CL15E	436	174	769	1,018
3	W40S44M1CL10L	436	174	749	995

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีต(ต่อ)

ลำดับ	ตัวอย่าง	สัดส่วนผสม (กก/ลบ.ม.)			
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)
4	W40S44M1CU15L	436	174	749	995
5	W40S44M2CL10L	436	174	749	995
8	W50S44M1CL10E	382	191	749	995
9	W50S44M1CL15E	382	191	769	1,018
10	W50S44M1CL10L	382	191	749	995
11	W50S44M1CU15L	382	191	749	995
12	W50S44M2CL10L	382	191	749	995
13	W50S44M2CU15L	382	191	749	995
14	W60S44M1CL10E	340	204	749	995
15	W60S44M1CL15E	340	204	769	1,018
16	W60S44M1CL10L	340	204	749	995
17	W60S44M1CU15L	340	204	749	995
18	W60S44M2CL10L	340	204	749	995

หมายเหตุ : CL10 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.

CL15 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

CU15 รูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 15 ซม. ยาว 15 ซม. สูง 15 ซม.

M1 ขนาดโตสุดของมวลรวมคือ $\frac{3}{4}$ "

M2 ขนาดโตสุดของมวลรวมคือ $1\frac{1}{2}$ "

S สัดส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a)

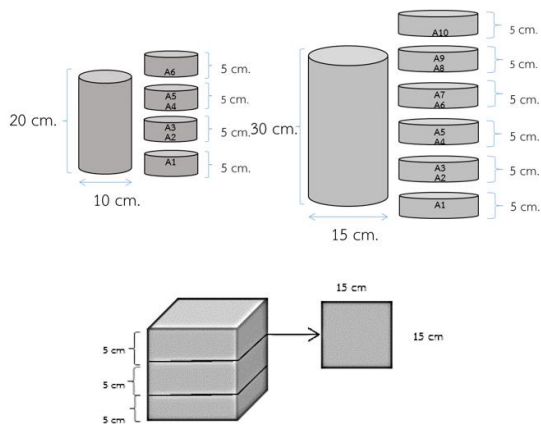
W สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c)

E ตัวอย่างอายุ 7 วัน

L ตัวอย่างอายุ 28 วัน

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ในขั้นตอนนี้เป็นการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ประกอบด้วย 1) ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร 2) ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และ 3) ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (Cube) ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ทำการบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องจนครบระยะเวลากำหนดแล้วจึงนำก้อนตัวอย่างไปตัดให้มีขนาดความหนาประมาณ 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อนำไปทำการทดสอบวิธีการทางภาพถ่าย (Image Processing) ต่อไป

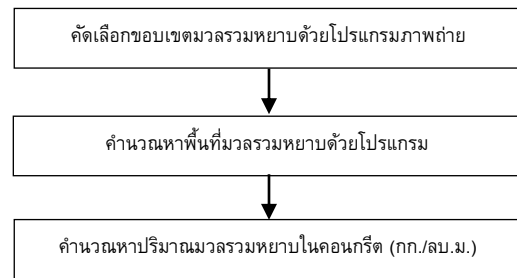


รูปที่ 2 การตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์

เมื่อทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จึงทำการถ่ายภาพแต่ละหน้าตัดของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร ทำการถ่ายภาพหน้าตัดทั้งหมด 6 รูป ต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง และตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร ทำการถ่ายภาพหน้าตัดทั้งหมด 10 รูปภาพต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ทำการถ่ายภาพหน้าตัดทั้งหมด 4 รูปภาพต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ซึ่งหน้าตัดของตัวอย่างที่ผิวด้านล่างสุดและผิวด้านบนสุดไม่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากหน้าตัดตัวอย่างที่ผิวด้านบนและด้านล่างไม่ได้มีการตัดผ่านเม็ดหินที่เรียงกระจายตัวกันในเนื้อคอนกรีต

2.3 การทดสอบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

หลังจากทำการบันทึกภาพถ่ายของหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตและตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายว่า มีความเหมาะสมแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการทดสอบและคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยอัลกอริทึมเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายที่พัฒนาขึ้นไว้แล้ว โดยมีภาพรวมขั้นตอนการคำนวณปริมาณมวลรวมแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบ

ในขั้นตอนการคัดเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบด้วยโปรแกรมภาพถ่ายนั้น ภาพที่นำมาใช้ต้องมีความละเอียดและความสว่างของภาพที่เหมาะสม ภาพชัดทั่วทั้งภาพและผิวน้ำตัวอย่างมีความสว่างเสมอกัน เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์กระบวนการทางภาพถ่าย (Image Processing) ในลำดับต่อไป และมีขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำภาพถ่ายไปปรับแต่งด้วยโปรแกรมทางภาพถ่าย โดยในการปรับแต่งขั้นแรกนั้น ต้องทำการครอบตัดภาพให้มีความกว้างและความยาวเท่ากับก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4

ขั้นตอนที่ 2 ปรับขนาดของภาพให้มีขนาดสัมพันธ์กับขนาดของก้อนตัวอย่างเพื่อให้สเกลของภาพและก้อนตัวอย่างนั้นตรงกัน

ขั้นตอนที่ 3 ปรับแต่งเพิ่มเติมให้เห็นขอบเขตของหินที่ชัดเจน เพื่อให้ง่ายต่อการเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบในก้อนตัวอย่างด้วยโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 5

ขั้นตอนที่ 4 ทำการเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบ โดยพิจารณาเลือกอ้างอิงจากขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ตาม ASTM C33 [13]

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อเลือกมวลรวมหยาบที่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าวในภาพจนครบถ้วนแล้ว จะทำการเปลี่ยนรูปภาพเป็นสีขาวดำ ดังแสดงดังรูปที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 บันทึกรูปภาพขาวดำเป็นไฟล์รูปภาพสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณพื้นที่ต่อไป



รูปที่ 4 ภาพถ่ายตัวอย่างก่อนทดสอบ

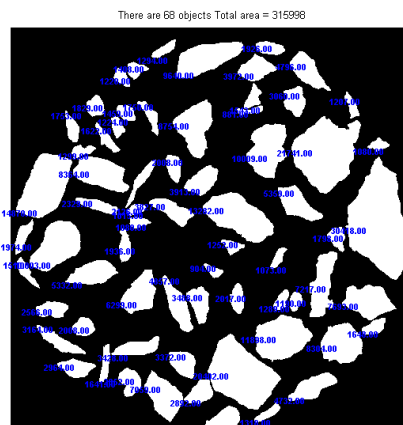


รูปที่ 5 ภาพถ่ายตัวอย่างหลังปรับแต่งเพิ่มเติม



รูปที่ 6 ภาพตัวอย่างขาวดำที่ผ่านการคัดเลือกขอบเขตของมวลรวมหยาบ

ภาพตัวอย่างขาวดำที่ได้ถูกนำมาคำนวณวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบโดยใช้โปรแกรมที่สามารถคำนวณหาพื้นที่สีขาวจากภาพถ่าย โดยใช้อัลกอริทึมให้ตัวโปรแกรมทำการวิเคราะห์หาพื้นที่พิกเซลเล็ก ๆ สีขาวในภาพถ่ายขาวดำ แล้วจึงแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปของจำนวนพิกเซลของมวลรวมหยาบทั้งหมดในภาพดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพตัวอย่างที่ทำการหาพื้นที่ของมวลรวมหยาบ

การคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบสามารถคำนวณจากผลสัดส่วนโดยพื้นที่ของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกระบวนการทางภาพถ่าย แล้วจึงทำการแปลงเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ โดยวิเคราะห์ตามหลักการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1356 [14] ซึ่งเป็นวิธีการหาปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยวิธีการนับจำนวนจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ (Microscopical Point-count)

หลังจากได้ปริมาตรของมวลรวมหยาบแล้วจึงนำมาคูณด้วยความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบได้เป็นปริมาณมวลรวมหยาบออกมา ผลคำนวณที่ได้แสดงเป็นค่าปริมาณน้ำหนักกิโลกรัมต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$W_G = (A_G/A_C) \times SG_C \times 1000 \quad (1)$$

โดย W_G คือ น้ำหนักมวลรวมหยาบ (kg/m^3)

A_G คือ พื้นที่มวลรวมหยาบบนหน้าตัด (cm^2)

A_C คือ พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต (cm^2)

SG_C คือ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

ในการทดลองนี้ทำการคำนวณทุกภาพหน้าตัดในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายของข้อมูลทางสถิติด้วยค่ามาตรฐาน (Z-Score) โดยพิจารณาในช่วง ± 1 และตัดข้อมูลที่เกินขอบเขต

±1 ออก ต่อมาจึงนำผลที่พิจารณามาเฉลี่ยได้เป็นผลการคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบที่ได้จากการวิเคราะห์ และคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับปริมาณมวลรวมหยาบที่ออกแบบผสมจริง ดังสมการที่ (2)

$$Err\% = (W_{GT} - W_{GD}) \times 100 / W_{GD} \quad (2)$$

โดย W_{GT} คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณมวลรวมหยาบจากการวิเคราะห์ (kg/m^3)

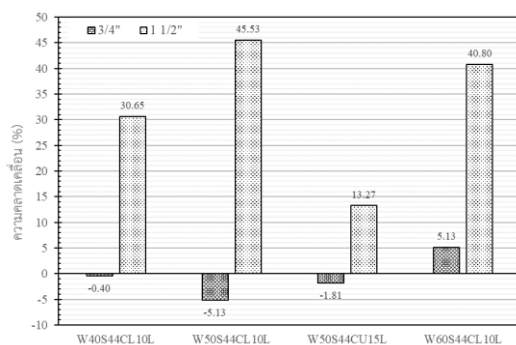
W_{GD} คือ ปริมาณมวลรวมหยาบผสมจริง (kg/m^3)

$Err\%$ คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบของขนาดใหญ่มากที่สุดของมวลรวมหยาบ

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ใช้ขนาดมวลรวมหยาบที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด ¾ นิ้วอยู่ในช่วง -5.13% ถึง +5.13% และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด 1½ นิ้วอยู่ในช่วง +13.27% ถึง +45.53%

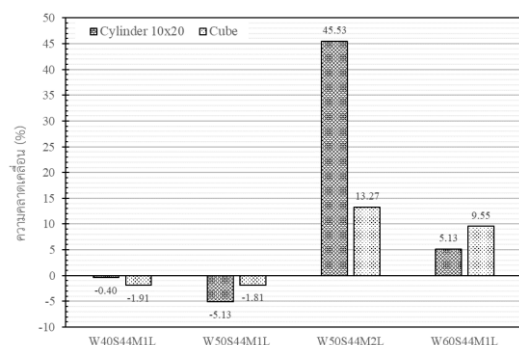


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่มากที่สุดต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด ¾ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ ส่วนตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด 1½ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนสูงกว่าในทุกส่วนผสม อาจเป็นผลจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยการตัดแบ่งเป็นช่วง ๆ ละ 5 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงขนาดของมวลรวมใหญ่สุด 1½ นิ้ว มากกว่า อีกทั้ง มวลรวมขนาดใหญ่อาจมีผลให้มวลรวมจมสู่ด้านล่างได้ จึงทำให้ภาพหน้าตัดตัวอย่างที่ได้มีแนวโน้มสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ของอนุภาคมวลรวมหยาบอาจเกิดพื้นที่ที่ซ้ำซ้อนกัน ดังนั้น ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อการหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายน้อยองเห็นได้ชัดและอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 ผลกระทบของรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ตัวอย่างมีรูปทรงหน้าตัดที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีรูปทรงหน้าตัดกลมอยู่ในช่วง -5.13% ถึง +45.53% และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีรูปทรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง -1.91% ถึง +13.27%

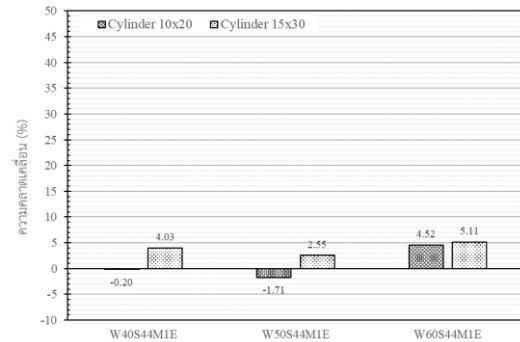


รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตทั้งแบบรูปทรงหน้าตัดทรงกลมและรูปทรงหน้าตัดทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนในช่วงไม่เกิน $\pm 10\%$ ส่วนผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อน $+13.27\%$ และ $+45.53\%$ แสดงให้เห็นว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่า อาจเนื่องจากผลกระทบของขนาดของมวลรวมใหญ่สุด นอกจากนี้ตัวอย่างหน้าตัดทรงกลมที่ถูกตัดแบ่งเป็นก้อนทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 10x20 เซนติเมตร ทำให้มีจำนวนหน้าตัดตัวอย่างมากกว่าตัวอย่างหน้าตัดทรงสี่เหลี่ยมที่ถูกตัดแบ่งเป็นก้อนทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15 เซนติเมตร จึงอาจทำให้แนวโน้มสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบคลาดเคลื่อนสะสมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างแบบรูปทรงหน้าตัดกลมและรูปทรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีผลความคลาดเคลื่อนที่ไม่สัมพันธ์กันอย่างชัดเจนและอย่างมีนัยสำคัญว่ารูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตมีผลกระทบต่อการหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้

3.3 ผลกระทบของขนาดหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ตัวอย่างมีขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตรอยู่ในช่วง -1.71% ถึง $+4.52\%$ และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 เซนติเมตรอยู่ในช่วง $+2.55\%$ ถึง $+5.11\%$

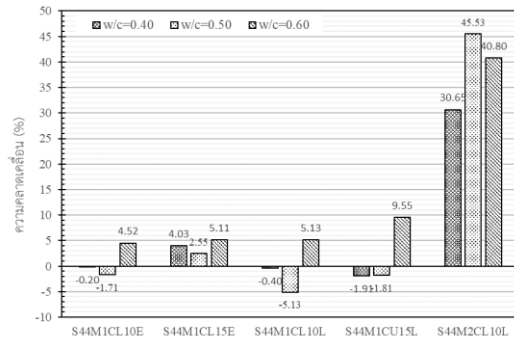


รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 เซนติเมตร ในทุกส่วนผสม ผลการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า ขนาดหน้าตัดมีผลกระทบต่อการหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้เพียงเล็กน้อย

3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 อยู่ในช่วง -1.91% ถึง $+30.65\%$, -5.13% ถึง $+45.53\%$ และ $+4.52\%$ ถึง $+40.80\%$ ตามลำดับ

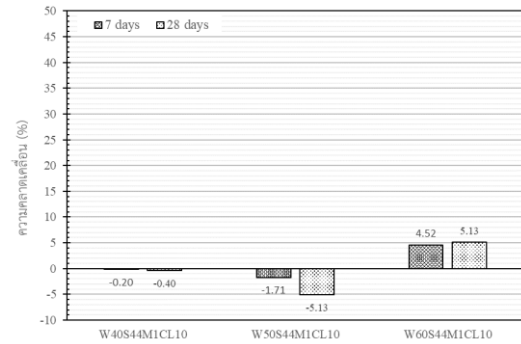


รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 มีผลการคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเกือบทุกส่วนผสม ในทางกลับกันจะเห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.60 มีผลความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเกือบทุกส่วนผสม อาจเนื่องจากมีปริมาณน้ำในส่วนผสมสูงคอนกรีตจึงมีความชื้นเหลวมากกว่าทำให้มวลรวมหยาบเกิดการจมตัวลงสู่ด้านล่างได้ง่าย จึงทำให้มีความหนาแน่นของพื้นที่มวลรวมหยาบของชิ้นตัวอย่างส่วนล่างสูง สอดคล้องกับภาพถ่ายหน้าตัดตัวอย่างที่พบว่า บริเวณหน้าตัดด้านล่างจะมีสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบมากกว่าด้านบน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ดังนั้น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่อ การหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ อย่างมีนัยสำคัญ

3.5 ผลกระทบของอายุคอนกรีต

จากภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุแตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน อยู่ในช่วง -1.71% ถึง +4.52% และ -5.13% ถึง +5.13% ตามลำดับ



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีอายุต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 วัน ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ในทุกส่วนผสม เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางภาพถ่ายเป็นการวิเคราะห์ทางกายภาพ โดยคำนวณจากพื้นที่ของหินซึ่งยังคงเดิมเมื่ออายุจะเปลี่ยนไป

4. สรุปผล

จากการศึกษาการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่ายสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การศึกษาผลกระทบของขนาดที่ใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบที่มีขนาดแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อ การทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ เหมาะสำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

2. การศึกษาผลกระทบของรูปทรงของตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของตัวอย่างที่ต่างกันไม่มีผลกระทบต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุดเท่ากับ $\frac{3}{4}$ นิ้ว

3. การศึกษาผลกระทบของขนาดหน้าตัดที่มีขนาดแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดหน้าตัดมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ เมื่อใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุดเท่ากับ $\frac{3}{4}$ นิ้ว

4. การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้อาจเป็นผลมาจากความชื้นเหลือในมวลคอนกรีต โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ หากอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณมวลรวมหยาบที่หาได้จากวิธีการทางภาพถ่ายนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5. การศึกษาผลกระทบของอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอายุของคอนกรีตที่ต่างกัน ไม่มีผลกระทบต่อการศึกษาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการเป็นไปได้ในเบื้องต้นถึงการนำวิธีการทางภาพถ่ายมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว อาจจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมทั้งปัจจัยที่ได้ศึกษาไว้เบื้องต้นนี้และผลกระทบด้านอื่นเพิ่มเติม เช่น ขนาดของหิน ชนิดของหิน สีของหิน เป็นต้น เพื่อให้ครอบคลุมมากขึ้น รวมทั้งพัฒนาให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผ่านมหาวิทยาลัยบูรพา งบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 สัญญาเลขที่ 131/2561 งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยวิจัย นายปิธิพัฒน์ ล้วนธนเศรษฐ์ และนายพันธุ์คุปต์ เปรียบปาน และขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] British standards institution. BS1881:Part24 Methods for analysis of hardened concrete. BSI. 1988.
- [2] Jung MS, Shin MC and Ann KY. Fingerprinting of a concrete mix proportion using the acid neutralisation capacity of concrete matrices. Construction and building materials. 2012; 26(1):65-71.
- [3] Ringot E and Bascoul A. About the analysis of microcracking in concrete. Cement and concrete composites. 2001;23(2-3):261-6.
- [4] Ammouche A, Riss J, Breyse D, and Marchand J. Image analysis for the automated study of microcracks in concrete. Cement and concrete composites. 2001;23(2-3):267-78.
- [5] Valenca J, Dias-da-Costa D, and Julio ENBS. Characterization of concrete cracking during laboratorial tests using image processing. Construction and building materials. 2012; 28(1):607-15.
- [6] Alida M, Saveria M and Stella Eleonora P. Evaluation of the early-age-shrinkage of fiber reinforced concrete (FRC) using image analysis methods. Construction and building materials. 2015;101:596-601.
- [7] Celalettin B, Bekir C, Semsettin K, and Serkan Ismail U. Assessment of concrete compressive strength by image processing technique. Construction and building materials. 2012;37:526-32.
- [8] Barbosa FS, Beaucour AL, Farage MCR and Ortola S. Image processing to the analysis of segregation in lightweight aggregate concretes. Construction and building materials. 2011;25 (8):3375-81.

- [9] Mora CF, Kwan AKH and Chan HC. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and concrete research*. 1998;28(6):921-32.
- [10] Kwan AKH, Mora CF, and Chan HC. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and concrete research*. 1999;29(9):1403-10.
- [11] Larry B, Ken C, and John Z. Estimation of limestone particle mass from 2 D images. *Power technology*. 2003;132(2-3):184-9.
- [12] Barbosa FS, Farage MCR, Beaucour AL, and Ortola S. Evaluation of aggregate gradation in lightweight concrete via image analysis. *Construction and building materials*. 2012;29:7-11.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM C33. Standard specification for concrete aggregates. ASTM International. 2003.
- [14] American Society for Testing and Materials. ASTM C1356 Standard test method for determination of phases in portland cement clinker by microscopical point-count procedure. ASTM International. 1996.

ศึกษาการใช้ความร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจาก เทอร์โมอิเล็กทริกแบบติดตั้ง และไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อนฝังดิน

อดิรุจ สุรินารินทร์^{1*} ชัยยศ ดำรงกิจโกศล¹ และปรีดา จันทวงษ์¹

adiruj.surinarin@gmail.com^{1*}, chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th¹, preedac@kmutnb.ac.th¹

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

Received: February 22, 2024 Revised: May 7, 2024 Accepted: May 14, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งสะสมพลังงานความร้อนของน้ำภายในท่อส่งน้ำที่วางไว้เหนือพื้นดินเพื่อใช้ส่งน้ำรดพืช-ผักช่วงเช้าและเย็น โดยในช่วงกลางวันท่อส่งน้ำจะได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ทำให้น้ำภายในท่อส่งน้ำมีอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ โดยชุดทดสอบจะประกอบด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำภายในท่อส่งน้ำซึ่งเป็นท่อเหล็กกล่องจำนวน 2 ชุด กว้าง 76.20 มิลลิเมตร สูง 76.20 มิลลิเมตร ยาว 152.40 มิลลิเมตร หนา 1.8 มิลลิเมตร ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกรุ่น SP1848-27145 ชุดละ 2 โมดูลต่ออนุกรมกันทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้าเข้ากับภาระทางไฟฟ้าค่าความต้านทาน 10 โอห์ม ท่อเหล็กกล่องทั้ง 2 ชุดจะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนโฟมกันความร้อน และถูกบังแดดเพื่อไม่ให้ท่อเหล็กกล่องได้รับพลังงานความร้อนจากแหล่งอื่น ท่อเหล็กกล่องชุดแรกจะติดตั้งครีระบายความร้อนไว้ใต้พื้นดินทำหน้าที่ระบายความร้อนให้เทอร์โมอิเล็กทริก ส่วนท่อเหล็กกล่องชุดที่สองจะไม่ติดตั้งครีระบายความร้อน และประกอบท่อเหล็กกล่องทั้ง 2 ชุดขนานกันโดยเชื่อมต่อกับท่อส่งน้ำพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ท่อ HDPE) พร้อมทั้งบันทึกแรงดันทางไฟฟ้าและอุณหภูมิทุก ๆ 15 นาทีตั้งแต่เวลา 09:00 น. – 17:00 น. ผลการวิจัยพบว่าท่อเหล็กกล่องที่ติดตั้งครีระบายความร้อนไว้ใต้พื้นดินสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 404.12 มิลลิโวลต์ ซึ่งสูงกว่าท่อเหล็กกล่องที่ไม่ได้ติดตั้งครีระบายความร้อนที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 60.16 มิลลิโวลต์ ที่มีความเข้มแสงสว่างของแสงอาทิตย์ที่ 132,000 ลักซ์

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก ผลิตไฟฟ้า ความร้อน พลังงานความร้อน โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง

The Study of using Hot Water from the Solar-Exposed Water Pipeline for the Electricity Generation from the Thermoelectric Sets with and without the Underground Heatsink Unit

Adiruj Surinarin^{1*}, Chaiyot Damrongkijkosol¹ and Preeda Chantawong¹
adiruj.surinarin@gmail.com^{1*}, chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th¹, preedac@kmutnb.ac.th¹

¹ Energy Engineering Technology Program, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok

Received: February 22, 2024 Revised: May 7, 2024 Accepted: May 14, 2024

Abstract

This article had the objective to study the electricity generation from the water heat energy storage in the water pipeline laid above the ground for watering plant and vegetables in the morning and in the evening. During the day the water pipeline would get the energy from the sunlight, causing the water in the pipeline have high temperature - the useless thermal energy. The experimental sets consisted of the thermal exchange equipment of the water in the pipeline in the forms of 2 sets of the steel box pipe 76.20 mm. wide, 76.20 mm. high, 152.40 mm. long, and 1.8 mm. thick. Each set was installed with 2 thermoelectric Model SP1848-27145 connected in series, functioning to generate electricity with the 10-ohm electrical resistance load. Both steel box pipe sets were enclosed with the thermal foam insulator and shaded, so that they would not receive the thermal energy from the other sources. The first set was installed with the heatsink fin underground to cool the thermoelectric, but the second set was not. Both sets were assembled in parallel by connecting with the High-Density Polyethylene water pipe and the electrical voltage and temperature were recorded every 15 minutes from 9 a.m. – 5 p.m. The research result found that the steel box pipe with the heatsink fin underground could generate the maximum electricity at 404.12 mV., higher than 60.16 mV. of the steel box pipe without the heat sink fin, at the solar density at 132,000 lux.

Keywords: Thermoelectric, Electricity generation, Heat, Thermal energy, High-density polyethylene

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากสถิติของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน พบว่าการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยในปี 2565 มีปริมาณทั้งสิ้น 197,209 กิกะวัตต์ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากปี 2564 คิดเป็นร้อยละ 3.53 [1] โดยแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สะสมเดือน ตุลาคม 2566 พบว่า ประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงประเภทก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน (รวมลิกไนต์) เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงเพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 60.21 และ 19.31 ตามลำดับ [2] ซึ่งการใช้แหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นทำให้แหล่งพลังงานเชื้อเพลิงลดลง ดังนั้นการแสวงหาตลอดจนการวิจัยและพัฒนาแหล่งพลังงานหมุนเวียนต่าง ๆ เพื่อลดความต้องการในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานสะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง ซึ่งจากการสำรวจและเก็บข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทยโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตรจึงทำให้ได้รับแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดทั้งปี ทำให้มีการใช้ประโยชน์จากปริมาณความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ 5.05 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน [3] โดยพลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถแบ่งรูปแบบในการนำไปใช้ได้เป็น 2 รูปแบบคือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบรังสี เช่น การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบพลังงานความร้อน เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน การอบแห้งจากพลังงานความร้อน การทำความร้อนและความเย็นจากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ทางตรง และพลังงานแสงอาทิตย์

สามารถก่อให้เกิดแหล่งพลังงานหมุนเวียนลักษณะอื่น ๆ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล เป็นต้น

โดยประเทศไทยจัดอยู่ในประเทศเกษตรกรรมที่มีจำนวนประชากรในภาคเกษตรมากถึง 25 ล้านคน หรือคิดเป็นร้อยละ 40 ของประชากรทั้งหมด [4] มีพื้นที่เกษตรกรรมในปี 2562 รวม 149.25 ล้านไร่ จากพื้นที่ทั้งหมด 320.696 ล้านไร่ [5] เกษตรกรจึงมีความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของพืช (ผัก) ซึ่งถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก โดยส่วนมากเกษตรกรจะทำการวางท่อส่งน้ำพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ท่อ HDPE) ไว้เหนือพื้นดิน ซึ่งท่อส่งน้ำพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะมีลักษณะเป็นท่อพลาสติกสีดำ มีความเหนียว ความยืดหยุ่นสูง สามารถผลิตเป็นม้วน และมีความยาวหลายเมตร ทำให้สามารถโค้งงอได้ ตลอดจนสามารถทนความร้อนได้สูง จึงทำให้เกษตรกรส่วนใหญ่เลือกใช้ท่อส่งน้ำพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวางท่อส่งน้ำไว้เหนือพื้นดินเพื่อสะดวกแก่การซ่อมแซมบำรุงรักษา โดยเกษตรกรจะให้น้ำแก่พืชในช่วงเวลาเช้า และช่วงเวลาเย็นเท่านั้น ซึ่งในช่วงเวลากลางวัน เกษตรกรจะไม่ให้น้ำแก่พืชเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้พื้นผิวดิน และน้ำภายในท่อส่งน้ำมีอุณหภูมิสูง จึงไม่เหมาะแก่การให้น้ำพืชในช่วงเวลาดังกล่าว

งานวิจัยนี้ ผู้ทำการวิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำให้น้ำภายในท่อส่งน้ำพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ท่อ HDPE) ที่ใช้ทำการเกษตรมีอุณหภูมิที่สูง เป็นพลังงานที่ถูกสร้างขึ้น และไม่นำพลังงานความร้อนสะสมนี้ไปใช้ประโยชน์ในช่วงเวลากลางวันมาผลิตไฟฟ้า โดยได้ทำการออกแบบท่อเหล็กกล่องเพื่อเป็นชุดทดสอบเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก-เจนเนอเรเตอร์ (T_{EG} ซึ่งต่อไปจะเรียกเทอร์โมอิเล็กทริก) 2 ชุด โดยชุดทดสอบที่ 1 จะเป็นท่อเหล็กกล่องที่ติดตั้งครีบบระบายความร้อนฝังไว้ใต้พื้นดินเพื่อเป็นแหล่งรับความร้อนที่สะดวกที่สุดของเทอร์โมอิเล็กทริก ส่วนชุดทดสอบที่ 2 จะเป็นท่อเหล็กกล่องไม่ติดตั้งครีบบระบาย

ความร้อน โดยวางเทอร์โมอิเล็กทริกไว้เหนือพื้นดิน ใช้อากาศ และพื้นผิวดินเป็นแหล่งรับความร้อนจาก เทอร์โมอิเล็กทริก

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการใช้ความร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกแบบติดตั้ง และไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อนผิวดิน มีความจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎี บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านต่าง ๆ โดยสามารถแบ่งหัวข้อเพื่อศึกษาดังต่อไปนี้

- 2.1 แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า
- 2.2 พลังงานแสงอาทิตย์
- 2.3 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.4 อุณหภูมิในดิน
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยจะกล่าวถึงหลักการตลอดจนถึงการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

2.1 แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

ไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากการให้พลังงานกับอิเล็กตรอนอิสระ เมื่ออิเล็กตรอนอิสระได้รับพลังงานจะเกิดการเคลื่อนที่ไปตามตัวนำนั้น ๆ หากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นจำนวนมากก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรปิด ซึ่งโดยทั่วไปไฟฟ้าสามารถกำเนิดได้จาก 1) การเสียดสีจากการนำวัตถุ 2 ชนิดที่ต่างกันมาขัดสีกัน ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าในวัตถุทั้ง 2 ชนิด จึงก่อให้เกิดเป็นไฟฟ้าสถิต 2) เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีโดยการนำโลหะ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โลหะทั้ง 2 ชนิดก็จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กตรอนจากโลหะด้านหนึ่งจะถูกดูดเข้าไปยังโลหะอีกด้านหนึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน 3) ไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อน เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการนำเอาแท่งแผ่นโลหะต่างกัน 2 ชนิดโดยให้ปลายด้านหนึ่งของโลหะทั้ง 2 ชนิดเชื่อมต่อกัน และปลายอีกด้านของโลหะทั้ง 2 ชนิดแยกออกจากกัน เมื่อให้ความร้อนที่ปลายของโลหะทั้ง 2 ชนิดที่เชื่อมต่อกัน จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจึงทำให้เกิดการไหล

ของกระแสไฟฟ้า 4) ไฟฟ้าที่เกิดจากรังสีของแสงอาทิตย์ โดยอาศัยสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดคือ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) โดยที่สารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะมีประจุเป็นบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะมีประจุเป็นลบ อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้คือ เซลล์แสงอาทิตย์ 5) ไฟฟ้าที่เกิดจากแรงกดดัน จะอาศัยการเคลื่อนไหวของแผ่นไดอะแฟรมทำให้ขดลวดเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการนี้คือ ไมโครโฟน 6) ไฟฟ้าที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็ก หรือการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นตามหลักการของไมเคิล ฟาราเดย์

โดยไฟฟ้าสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 2 ชนิด คือ 1) ไฟฟ้าสถิต เป็นการเก็บสะสมประจุทางไฟฟ้า และจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อถึงเวลาที่เหมาะสม และ 2) ไฟฟ้ากระแส คือการไหลของอิเล็กตรอนภายในตัวนำในวงจรไฟฟ้าปิด จะถูกแบ่งเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลไปในทางเดียวกันตลอดเวลา และไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นการไหลของกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ทางไฟฟ้าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาอยู่ตลอดเวลา

2.2 พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่มีแสงสว่างในตัวเอง และเป็นศูนย์กลางในระบบสุริยะ ดวงดาวทุกดวงรวมถึงโลกจะโคจรรอบดวงอาทิตย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วง วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์จะไม่เป็นวงกลม ดังนั้น ระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จึงมีค่าไม่เท่ากัน ณ เวลาใด ๆ โดยเฉลี่ยประมาณ 1.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีระยะห่างจากโลกประมาณ 1.49×10^{11} เมตร ดวงอาทิตย์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.39×10^9 เมตร ใหญ่กว่าโลก 109 เท่า เปรียบเสมือนวัตถุดำที่ปลดปล่อยพลังงานเป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของแสงคลื่นสั้น และคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีอุณหภูมิประสิทธิภาพที่ขึ้นโพโตสเฟียร์ประมาณ 5,777 เคลวิน

(5,503.85 องศาเซลเซียส) เปรียบได้เหมือนเตาปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชั่นของก๊าซ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากดวงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวหลายชนิด โดยมีค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ประมาณ 1,367 วัตต์ต่อตารางเมตร ในลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเร็วประมาณ 300,000 เมตรต่อวินาที รังสีที่แผ่มายังพื้นผิวโลกจะแบ่งได้เป็นรังสีตรงคือ

- 1) รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และตกลงบนผิวรับแสง มีทิศทางที่แน่นอนในเวลาใดเวลาหนึ่ง
- 2) รังสีกระจาย คือรังสีของดวงอาทิตย์ที่ถูกสะท้อนจากชั้นบรรยากาศและวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินแสงก่อนที่จะตกกระทบกับผิวรับแสง และ
- 3) รังสีรวม คือผลรวมของรังสีตรง และรังสีกระจาย ที่ตกกระทบผิวรับแสง โดยการวัดพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดรังสีรวม รังสีตรง รังสีกระจาย และเครื่องบันทึกผลการวัดเป็นการเก็บข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุดในการประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์โดยเฉลี่ยที่ตกกระทบที่ผิวโลกซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เช่น ไพราเนอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดค่ารังสีรวม ปกติจะใช้วัดบนพื้นราบ และอาจประยุกต์ใช้วัดรังสีกระจายได้ ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ และเครื่องบันทึกแตรเป็นอุปกรณ์วัดจำนวนชั่วโมงที่มีแดด [6]

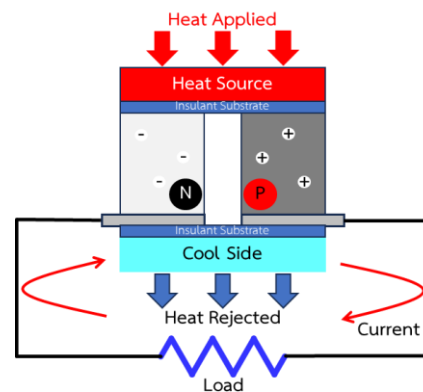
จากข้างต้นจะทราบได้ว่า ดวงอาทิตย์แผ่รังสีในลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มของรังสีที่เป็นพลังงานความร้อน ดังนั้น มนุษย์จึงได้นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบของพลังงานความร้อน และพลังงานแสงโดยตรง หรือในทางอ้อมก็สามารถนำมาใช้ในรูปแบบของพลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานน้ำ เป็นต้น เมื่อพิจารณาการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์จะพบว่า สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานในรูปแบบของพลังงานความร้อน และในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า

2.3 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) เป็นคำศัพท์ที่เกิดจากคำว่า “เทอร์โม” ที่มีความหมายว่า ความร้อน กับคำว่า “อิเล็กทริก” ที่มีความหมายว่า

ไฟฟ้า ดังนั้น เทอร์โมอิเล็กทริก จึงเป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางกลับกัน ก็สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนได้โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก กล่าวคือวัสดุที่สามารถแปรผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า และแปรผันกระแสไฟฟ้าเป็นความร้อนได้โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในวัสดุ

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) ผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดคือ สารกึ่งตัวนำชนิด พี (P-Type) จะมีช่องว่างที่เรียกว่าโฮล (Hole) มีประจุเป็นบวกมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ที่มีอิเล็กตรอนมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดลบ เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างจุด 2 จุด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จึงเกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขึ้น ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะเรียกว่าปรากฏการณ์ซีเบค [7] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานความร้อนได้โดยนำเทอร์โมอิเล็กทริกหลาย ๆ เซลล์ เชื่อมต่อวงจรร่วมกันทางไฟฟ้าในรูปแบบของวงจรอนุกรม วงจรรวม หรือวงจรผสม เพื่อให้ได้ขนาดแรงดัน และกระแสไฟฟ้า ได้ตามวัตถุประสงค์ที่นำไปใช้ประโยชน์

2.4 อุณหภูมิในดิน

เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกมีความจำเป็นจะต้องมีการระบายความร้อนออกจาก

หน้าสัมผัส การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิของดินจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งอุณหภูมิในผิวดินนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับเมฆ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ช่วงระยะเวลาของกลางวัน สีของดิน ความชื้นของผิวดิน ฯลฯ ซึ่งความชื้นของผิวดินนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการช่วยลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผิวดิน และความลึกที่เพิ่มขึ้น 100 มิลลิเมตร จะทำให้อุณหภูมิในดินมีการเปลี่ยนแปลง 0.5 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับฤดูกาล โดยพบว่า ดินในประเทศไทยจะมีอุณหภูมิความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างช่วงฤดูร้อนกับฤดูหนาวอยู่ที่ 5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในดินจะมีค่าเฉลี่ยต่อปีมากกว่า 22 องศาเซลเซียส จากความลึก 500 มิลลิเมตร สำหรับดินที่มีการระบายน้ำที่ดี [8]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เชษฐา [9] ได้พัฒนาต้นแบบการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกและใช้สาร CaMnO_3 จำนวน 1 โมดูล ร่วมกับการรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาใช้สารกักเก็บความร้อนเป็นสารเอทิลีนไกลคอลผสมรวมกับน้ำ พบว่า สารกักเก็บความร้อนเมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านรางพาราโบลาสามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงถึง 155.8 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 5 วัน โดยมีอุณหภูมิมีสภาพแวดล้อมอยู่ที่ 37.5 องศาเซลเซียส และเมื่อนำสารกักเก็บความร้อนมาต่อเข้ากับเทอร์โมอิเล็กทริกที่สังเคราะห์จากสาร CaMnO_3 และระบายความร้อนด้วยอากาศพบว่า สามารถผลิตความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าได้ 9.38 มิลลิโวลต์ และ 0.436 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ และเมื่อนำเทอร์โมอิเล็กทริกที่สังเคราะห์จากสาร CaMnO_3 จำนวน 100 โมดูล มาต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมโดยใช้วิธีการระบายความร้อนด้วยอากาศพบว่า สามารถผลิตความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 277.53 มิลลิโวลต์ และ 1.75 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ เป็นระยะเวลานาน

วัชร [10] ได้ศึกษาการระบายความร้อนทิ้งของเครื่องปรับอากาศโดยเปรียบเทียบระหว่างการระบายความร้อนทิ้งด้วยอากาศโดยใช้พัดลม กับการระบายความร้อนทิ้งด้วยการดัดแปลงท่อน้ำยาทำความเย็น (ท่อคอนเดนเซอร์) ฝังไว้ใต้ดินพบว่า ประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบระบายความร้อนทิ้งด้วยการ

ดัดแปลงท่อน้ำยาทำความเย็นฝังไว้ใต้ดินดีกว่าระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ผลจากงานวิจัย และทฤษฎีที่กล่าวถึง ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดนำความร้อนที่ได้จากน้ำภายในท่อส่งน้ำที่วางสัมผัสกับแสงอาทิตย์ ผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริก และให้เทอร์โมอิเล็กทริกระบายความร้อนด้วยวิธีการฝังดินเพื่อผลิตไฟฟ้าจึงมีความเป็นไปได้

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการศึกษาการใช้ความร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกแบบติดตั้ง และไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อนฝังดิน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนของน้ำภายในท่อส่งน้ำที่วางไว้เหนือพื้นดิน ซึ่งมีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัยเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

3.1 ออกแบบชุดทดสอบแลกเปลี่ยนความร้อน

3.2 บันทึกผลการทดสอบ

ซึ่งกระบวนการดำเนินการวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะเลือกใช้ท่อส่งน้ำพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ท่อ HDPE) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สามารถรับแรงดันได้ 600 กิโลปาสกาล (PN6) ชั้น 80 (PE80) ในการกักเก็บความร้อน เนื่องจากเป็นท่อส่งน้ำที่เกษตรกรนิยมใช้ซึ่งทนต่อแสงอาทิตย์ และสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย

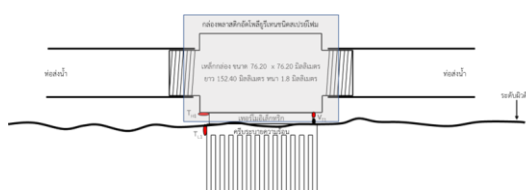
3.1 ออกแบบชุดทดสอบแลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบชุดทดสอบอุปกรณ์ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำภายในท่อส่งน้ำเพื่อสามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก โดยได้ออกแบบชุดทดสอบไว้เป็น 2 ชุดทดสอบดังนี้

ชุดทดสอบที่ 1 จะประกอบด้วยท่อเหล็กกล่อง มีความกว้าง 76.20 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ความยาว 152.40 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ความสูง 76.20 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) และความหนา 1.8 มิลลิเมตร เชื่อมปิดหัวท้ายด้วยท่อเหล็กกลมขนาด 40 มิลลิเมตร ($1\frac{1}{2}$ นิ้ว) ความยาว 101.60 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ทั้ง 2 ด้าน และติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 2 โมดูล ต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า ส่วนอีกด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกจะติดตั้ง

ครีบบระบายความร้อน โดยระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสองด้านจะทาซิลิโคนระบายความร้อนไว้ ด้านที่ติดกับท่อเหล็กกล่องจะทำหน้าที่นำความร้อนจากท่อเหล็กกล่องไปยังเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตไฟฟ้า และอีกด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกจะติดครีบบระบายความร้อน มีหน้าที่ระบายความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริกสู่ครีบบระบายความร้อน โดยซิลิโคนระบายความร้อนจะทำหน้าที่ลดช่องว่างของอากาศระหว่างอุปกรณ์ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

นำชุดทดสอบที่ 1 ที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกและครีบบระบายความร้อนใส่ในกล่องพลาสติกกันน้ำ โดยเจาะรูด้านล่างกล่องพลาสติกให้มีขนาดเท่ากับครีบบระบายความร้อนเพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริก และครีบบระบายความร้อนอยู่ภายนอกกล่องพลาสติกทำหน้าที่ระบายความร้อน หลังจากนั้นทำการติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (Type K) จำนวน 2 ตัวโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคตัวที่ 1 (T_{H1}) จะติดตั้งกับท่อเหล็กกล่องโดยใช้เทปกาวกันความร้อนช่วยในการยึดติด และเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค ตัวที่ 2 (T_{L1}) จะติดตั้งกับครีบบระบายความร้อน ใช้เทปอลูมิเนียมช่วยปิดช่องว่างระหว่างท่อเหล็กกล่องที่ติดตั้งครีบบระบายความร้อนกับกล่องพลาสติก และใช้สเปรย์โฟลียูรีเทนพ่นภายในกล่องพลาสติกแล้วปิดฝาเพื่อให้โฟลียูรีเทนพ่นทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนไม่ให้อุณหภูมิภายนอกระบบมีผลต่องานวิจัย หลังจากนั้นนำชุดทดสอบที่ 1 ไปติดตั้งบริเวณสนามกีฬากลางแจ้งโดยให้ครีบบระบายความร้อนอยู่ภายใต้พื้นดินโดยมีความลึกที่ 25.4 มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับความหนาของครีบบระบายความร้อนเพื่อเป็นแหล่งรับความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใต้พื้นดินจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดทดสอบที่ 1 ท่อเหล็กกล่องติดตั้งครีบบระบายความร้อนอยู่ใต้พื้นดิน (มุมมองด้านข้าง)

ชุดทดสอบที่ 2 จะประกอบด้วยท่อเหล็กกล่องที่มีความกว้าง 76.20 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ความยาว 152.40 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ความสูง 76.20 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) และความหนา 1.8 มิลลิเมตร เชื่อมปิดหัวท้ายด้วยท่อเหล็กกลมขนาด 40 มิลลิเมตร ($1\frac{1}{2}$ นิ้ว) ความยาว 101.60 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ทั้ง 2 ด้าน และติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 2 โมดูล ต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า โดยระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกกับท่อเหล็กกล่องจะทาซิลิโคนระบายความร้อนไว้ เพื่อทำหน้าที่นำความร้อนจากท่อเหล็กกล่องไปยังเทอร์โมอิเล็กทริก โดยซิลิโคนระบายความร้อนจะทำหน้าที่ลดช่องว่างของอากาศระหว่างอุปกรณ์ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

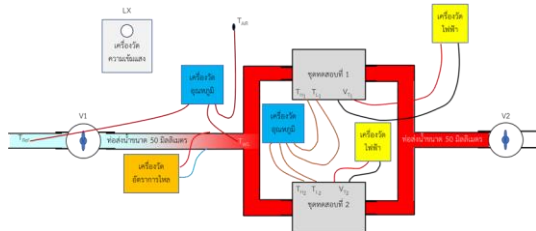
นำชุดทดสอบที่ 2 ที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกใส่ในกล่องพลาสติกกันน้ำโดยเจาะรูด้านล่างกล่องพลาสติกให้มีขนาดเท่ากับเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ภายนอกกล่องพลาสติกทำหน้าที่ระบายความร้อน หลังจากนั้นทำการติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเคจำนวน 2 ตัว โดยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ตัวที่ 1 (T_{H2}) จะติดตั้งกับท่อเหล็กกล่องโดยใช้เทปกาวกันความร้อนช่วยในการยึดติด และเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ตัวที่ 2 (T_{L2}) จะติดตั้งกับเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่งด้านนอกกล่องพลาสติก ใช้เทปอลูมิเนียมช่วยปิดช่องว่างระหว่างท่อเหล็กกล่องกับกล่องพลาสติก และใช้สเปรย์โฟลียูรีเทนพ่นภายในกล่องพลาสติกแล้วปิดฝาเพื่อให้โฟลียูรีเทนพ่นทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนไม่ให้อุณหภูมิภายนอกระบบมีผลต่องานวิจัย หลังจากนั้นนำชุดทดสอบที่ 2 ไปติดตั้งบริเวณสนามกีฬากลางแจ้งโดยวางชุดทดสอบฝั่งที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกอยู่เหนือพื้นดิน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดทดสอบที่ 2 ท่อเหล็กกล่องไม่ติดตั้งครีบบระบายความร้อน (มุมมองด้านข้าง)

3.2 บันทึกผลการทดสอบ

ติดตั้งชุดทดสอบที่ 1 (ติดตั้งระบายความร้อนฝั่ดิน) และชุดทดสอบที่ 2 (ไม่ติดตั้งระบายความร้อน) เข้ากับระบบส่งน้ำในลักษณะขนานดังรูปที่ 4



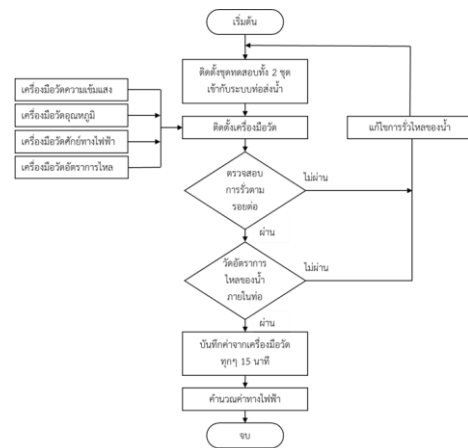
รูปที่ 4 ตำแหน่งติดตั้งตัวตรวจวัด และตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย (มุมมองด้านบน)

การติดตั้งชุดทดสอบทั้ง 2 ชุด จะถูกติดตั้งเชื่อมต่อเข้ากับระบบท่อส่งน้ำใต้ดิน (T_{Ref}) เพื่อใช้เป็นแหล่งน้ำป้อนเข้าระบบทดสอบ และใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิงกับท่อส่งน้ำที่ใช้ทำการวิจัย โดยชุดทดสอบทั้ง 2 ชุด จะถูกติดตั้งไว้เหนือพื้นดิน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องมือ และชุดทดสอบการใช้น้ำร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก

ขั้นตอนดำเนินการทดสอบมีรายละเอียดรายการเครื่องมือวัด ความถี่ในการบันทึกข้อมูล ตามขั้นตอนดังรูปที่ 6 โดยจะทดสอบ และบันทึกผลในช่วงเวลา 09:00 น. ถึง 17:00 น.



รูปที่ 6 ขั้นตอนดำเนินการทดสอบการผลิตไฟฟ้า

บันทึกค่าความเข้มของแสงจะใช้เครื่องมือวัดค่าความเข้มของแสงสว่าง (LX) ที่ใช้ชื่อ ดิจิคอน (DIGICON) เป็นเครื่องหมายทางการค้า รุ่น LX-73 เพื่อวัดความเข้มของแสงอาทิตย์บริเวณสถานที่ทำการวิจัย เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของอุณหภูมิภายในท่อส่งน้ำ

บันทึกค่าทางอุณหภูมิจะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (Type K) ร่วมกับอุปกรณ์ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ชื่อเท็นมาร์ส (TENMARS) เป็นเครื่องหมายทางการค้า รุ่น TM-747D แบบ 4 ช่องการแสดงผล เพื่อใช้อ่านค่าอุณหภูมิตามจุดวัดจำนวน 7 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 คือ 1) T_{Ref} เป็นตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำในท่อส่งน้ำใต้ดินภายในสถานที่ทำการวิจัยเพื่อเป็นแหล่งน้ำป้อนส่งให้กับท่อส่งน้ำที่ใช้ทำการวิจัย 2) T_{WS} เป็นตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำในท่อส่งน้ำที่ใช้ทำการวิจัย 3) T_{AIR} เป็นตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศบริเวณสถานที่ทำการวิจัย 4) T_{H1} เป็นตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของท่อเหล็กกล่องที่ติดตั้งอยู่ในชุดทดสอบที่ 1 5) T_{L1} เป็นตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของครีระบายความร้อนที่อยู่ใต้พื้นดินโดยถูกติดตั้งอยู่ในชุดทดสอบที่ 1 6) T_{H2} เป็นตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของท่อเหล็กกล่องที่ติดตั้งอยู่ในชุดทดสอบที่ 2 7) T_{L2} เป็นตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกด้านที่สัมผัสพื้นดิน ถูกติดตั้งอยู่ในชุดทดสอบที่ 2

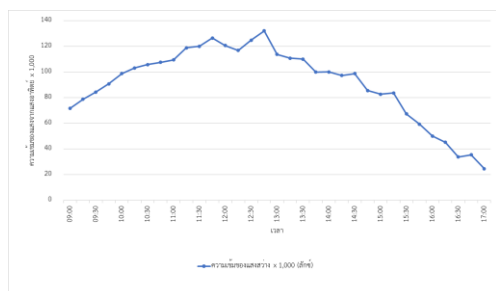
บันทึกค่าทางไฟฟ้าโดยจะใช้เครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้าดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ที่ใช้ชื่อ ฟลัก (Fluke) เป็นเครื่องหมายทางการค้า รุ่น 289 โดยจะวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 2 โมดูลต่ออนุกรมทางไฟฟ้าตกคร่อมภาระทางไฟฟ้าค่าความต้านทาน 10 โอห์มของชุดทดสอบทั้ง 2 ชุด ดังรูปที่ 4 คือ 1) V_{T1} เป็นตำแหน่งตรวจวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของชุดทดสอบที่ 1 2) V_{T2} เป็นตำแหน่งตรวจวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของชุดทดสอบที่ 2

จากการทดสอบการศึกษาการใช้ความร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกแบบติดตั้ง และไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อนผิวดินพบว่า ชุดทดสอบที่ 1 (ติดตั้งระบายความร้อนผิวดิน) สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าชุดทดสอบที่ 2 (ไม่ติดตั้งระบายความร้อน)

4. ผลการทดสอบ

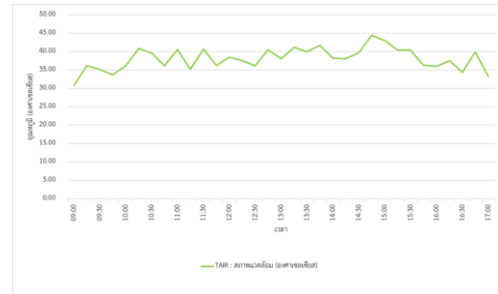
งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานความร้อนสะสมของน้ำภายในท่อส่งน้ำที่ถูกวางไว้เหนือพื้นดินสำหรับให้น้ำแก่พืชช่วงเวลาเช้าและ ช่วงเวลาเย็น โดยจะทดสอบและบันทึกผลในช่วงเวลา 09:00 น. ถึง 17:00 น. ของวันที่มีค่าความเข้มของแสงอาทิตย์มากที่สุด

ซึ่งจากการเก็บข้อมูลจะเลือกพิจารณาข้อมูลของการวัดความเข้มของแสงอาทิตย์ที่สูงสุด ณ เวลา 12:45 น. อยู่ที่ 132,000 ลักซ์ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความเข้มของแสงจากแสงดวงอาทิตย์

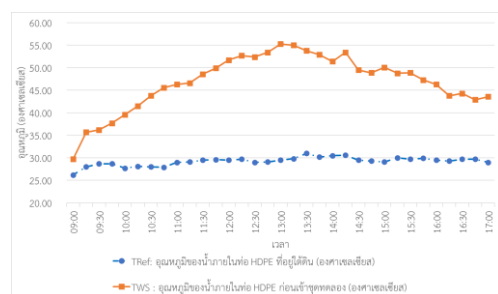
ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (T_{AIR}) สูงสุด 44.40 องศาเซลเซียส ที่เวลา 14:45 น. เป็นไปตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 อุณหภูมิสภาพแวดล้อม

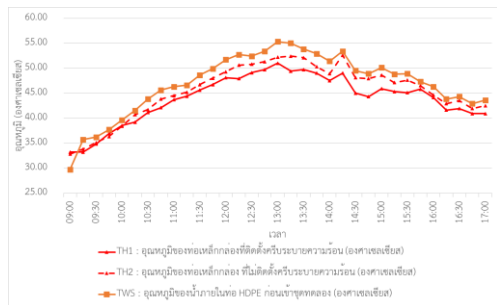
ความเข้มของแสงอาทิตย์ (LX) และอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (T_{AIR}) เป็นการวัด และบันทึกค่าของสถานที่ที่ทำการวิจัยกลางแจ้ง ไม่มีเงาบังตัวตรวจวัด มีลมพัดผ่านตามสภาพจริง

อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของน้ำป้อน (T_{Ref}) ในท่อส่งน้ำที่ถูกติดตั้งฝังอยู่ใต้ดินมีความลึกอยู่ที่ 250 มิลลิเมตร กับอุณหภูมิของน้ำภายในท่อส่งน้ำพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ท่อ HDPE) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (T_{WS}) ที่ใช้ทำการวิจัยพบว่า อุณหภูมิของน้ำภายในท่อส่งน้ำพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (T_{WS}) วางอยู่เหนือพื้นดินได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้น้ำภายในท่อมีอุณหภูมิที่ 55.30 องศาเซลเซียส แตกต่างกับอุณหภูมิของน้ำป้อน (T_{Ref}) อยู่ที่ 25.80 องศาเซลเซียส ณ เวลา 13:00 น. ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 อุณหภูมิระหว่างน้ำภายในท่อส่งน้ำใต้ดินกับน้ำภายในท่อส่งน้ำก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ

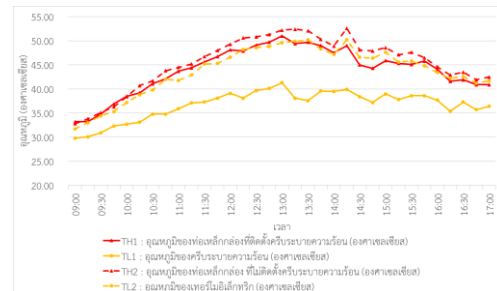
เมื่อน้ำภายในท่อส่งน้ำ (T_{WS}) ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยตรง ทำให้อุณหภูมิของน้ำภายในท่อส่งน้ำมีอุณหภูมิสูง อุณหภูมิของน้ำภายในท่อส่งน้ำจะถูกถ่ายเทพลังงานความร้อนไปยังชุดทดสอบที่ 1 (T_{H1} ติดตั้งครีบบระบายความร้อนฝั่งดิน) และ ชุดทดสอบที่ 2 (T_{H2} ไม่ติดครีบบระบายความร้อน) จะพบว่า อุณหภูมิของน้ำภายในชุดทดสอบทั้ง 2 ชุด มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เนื่องจากชุดทดสอบที่ 1 (T_{H1}) ได้ติดตั้งครีบบระบายความร้อนฝั่งใต้พื้นดินจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าชุดทดสอบที่ 2 (T_{H2}) ที่ไม่ติดครีบบระบายความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำภายในชุดทดสอบที่ 1 (T_{H1}) ต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำภายในชุดทดสอบที่ 2 (T_{H2}) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 อุณหภูมิระหว่างท่อส่งน้ำ (T_{WS}) กับชุดทดสอบที่ 1 (T_{H1}) และชุดทดสอบที่ 2 (T_{H2})

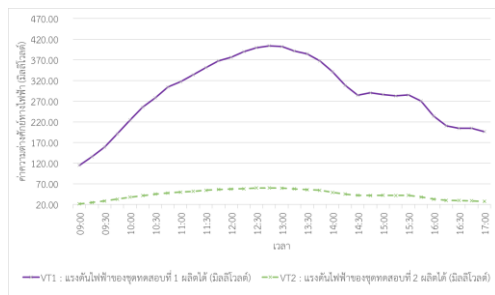
ผลการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์ของชุดทดสอบที่ 1 ที่ติดตั้งครีบบระบายความร้อนฝั่งดินพบว่าอุณหภูมิระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกที่ติดกับท่อเหล็กกล่อง (T_{H1}) กับครีบบระบายความร้อน (T_{L1}) ในช่วงเวลา 09:00 น. มีค่าของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปพบว่าน้ำในท่อส่งน้ำมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ความร้อนของน้ำในท่อส่งน้ำถูกถ่ายเทไปยังท่อเหล็กกล่อง (T_{H1}) ทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น อุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกก็จะถูกถ่ายเทไปยังครีบบระบายความร้อนที่ฝังอยู่ใต้ดิน (T_{L1}) จึงทำให้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า และในขณะเดียวกันอุณหภูมิของท่อเหล็กกล่องของชุดทดสอบที่ 2 (T_{H2}) ถูกถ่ายเทความร้อนไปยัง

เทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่ได้ติดตั้งครีบบระบายความร้อน (T_{L2}) จึงทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกระบายความร้อนได้ไม่ดี จึงทำให้อุณหภูมิท่อเหล็กกล่องของชุดทดสอบที่ 2 (T_{H2}) มีค่าใกล้เคียงกับหน้าสัมผัสของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่ได้ติดตั้งครีบบระบายความร้อน (T_{L2}) ดังรูปที่ 11



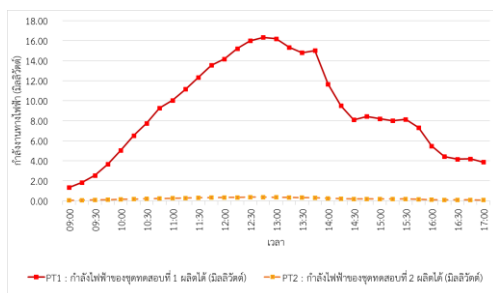
รูปที่ 11 อุณหภูมิระหว่างท่อเหล็กกล่องชุดทดสอบที่ 1 และชุดทดสอบที่ 2 ของเทอร์โมอิเล็กทริก

ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้จะแปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างหน้าสัมผัสทั้ง 2 ด้านของเทอร์โมอิเล็กทริก คือเมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกมีผลต่างระหว่างหน้าสัมผัสของอุณหภูมิต่ำ จะทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้ต่ำ และเมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกมีผลต่างระหว่างหน้าสัมผัสของอุณหภูมิสูง จะทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้สูงเช่นกัน เมื่ออุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 1 ระหว่างท่อเหล็กกล่อง (T_{H1}) กับครีบบระบายความร้อนฝั่งดิน (T_{L1}) มีความแตกต่างกันทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสูงสุดที่ (V_{T1}) 404.12 มิลลิโวลต์ และอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 2 ระหว่างท่อเหล็กกล่อง (T_{H2}) กับหน้าสัมผัสของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่ติดครีบบระบายความร้อน (T_{L2}) มีความใกล้เคียงกันทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสูงสุดที่ (V_{T2}) 60.16 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 12



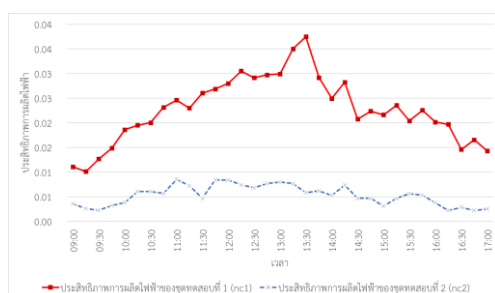
รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของ
ชุดทดสอบที่ 1 (V_{T1}) และ ชุดทดสอบที่ 2 (V_{T2})

เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตกคร่อมค่าความต้านทานในวงจรปิดได้ ดังนั้น สามารถนำมาคำนวณกำลังงานทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เปรียบเทียบกำลังงานทางไฟฟ้าของชุดทดสอบ
ที่ 1 และชุดทดสอบที่ 2

ซึ่งจากการทดสอบ และบันทึกอุณหภูมิ จะพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของชุดทดสอบทั้ง 2 ชุด ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของชุดทดสอบ

ดังนั้น เมื่อนำค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้จากชุดทดสอบที่ 1 (ติดครีบบระบายความร้อนฝั่งดิน) และชุดทดสอบที่ 2 (ไม่ติดครีบบระบายความร้อน) มาเปรียบเทียบกับพบว่า เทอร์โมอิเล็กทริกของชุดทดสอบที่ 1 (ติดครีบบระบายความร้อนฝั่งดิน) มีการระบายความร้อนได้ดีกว่า เทอร์โมอิเล็กทริกของชุดทดสอบที่ 2 (ไม่ติดครีบบระบายความร้อน) จึงทำให้ชุดทดสอบที่ 1 (ติดครีบบระบายความร้อนฝั่งดิน) สามารถผลิตค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่าชุดทดสอบที่ 2 (ไม่ติดครีบบระบายความร้อน)

5. วิเคราะห์ และผลการทดสอบ

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษาการใช้น้ำร้อนจากท่อส่งน้ำที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกแบบติดตั้ง และไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อนฝั่งดิน โดยใช้ท่อส่งน้ำพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ท่อ HDPE) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สามารถรับแรงดันได้ 600 กิโลปาสกาล (PN6) ชั้น 80 (PE80) ที่เกษตรกรใช้ส่งน้ำทำการเกษตร โดยวางอยู่เหนือพื้นดิน จึงทำให้น้ำภายในท่อส่งน้ำมีอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ในช่วงกลางวัน พลังงานความร้อนเหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งเกษตรกรไม่นำพลังงานความร้อนสะสมจากน้ำในท่อส่งน้ำมาใช้ประโยชน์ ผู้วิจัยจึงได้นำความร้อนสะสมจากน้ำภายในท่อส่งน้ำมาผลิตไฟฟ้า โดยออกแบบชุดทดสอบเป็น 2 ชุด ชุดทดสอบที่ 1 จะติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งติดครีบบระบายความร้อนฝั่งดิน ส่วนชุดทดสอบที่ 2 จะติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งไม่ได้ติดครีบบระบายความร้อน แล้วนำชุดทดสอบทั้ง 2 ชุด เชื่อมต่อเข้ากับระบบน้ำโดยให้ท่อส่งน้ำวางไว้เหนือพื้นดิน

จากการทดสอบพบว่า ชุดทดสอบที่ 1 (ติดครีบบระบายความร้อนฝั่งดิน) สามารถผลิตค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 404.12 มิลลิโวลต์ ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 132,000 ลักซ์ โดยมีอุณหภูมิของน้ำในท่ออยู่ที่ 53.40 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากชุดทดสอบที่ 2 (ไม่ติดครีบบระบายความร้อน) ที่สามารถผลิตค่าความต่างศักย์

ทางไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 60.16 มิลลิโวลต์ เนื่องจากชุดทดสอบที่ 1 (ติดตั้งระบายความร้อนฝั่งดิน) สามารถถ่ายเทความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริกไปยังครีระบายความร้อนที่ฝังอยู่ใต้ดินที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า จึงทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างหน้าสัมผัสทั้ง 2 ของเทอร์โมอิเล็กทริกดีกว่าชุดทดสอบที่ 2 (ไม่ติดตั้งระบายความร้อน) ที่เทอร์โมอิเล็กทริกถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวดินเท่านั้น จึงทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมได้ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของชุดทดสอบที่ 1 ดีกว่าชุดทดสอบที่ 2 ด้วย

หากต้องการค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้น ก็สามารถเพิ่มจำนวนของเทอร์โมอิเล็กทริก และวิธีการเชื่อมต่อวงจรทางไฟฟ้ารวมถึงการเลือกวิธีการระบายความร้อนที่เหมาะสม ก็จะสามารถทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้ตามความต้องการ ซึ่งเกษตรกรสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ เช่น เครื่องไถแม่ลง, การต่อวงจรชาร์จต่าง ๆ เป็นต้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] EPPO: Energy Policy and Planning office. Energy Status 2022 [Internet]. c2003- [cited 2023 Nov 19]. Available from: [https://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/energy-status/year?orders\[publishUp\]=publishUp&issearch=1](https://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/energy-status/year?orders[publishUp]=publishUp&issearch=1)

[2] EGAT: Electricity Generating Authority of Thailand. Proportion of fuel use to produce electrical energy in EGAT's system [Internet]. 2023 Oct - [cited 2023 Oct 31]. Available from: <https://www.egat.co.th/home/statistics-fuel-usage>

[3] DEDE: Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Handbook for development and investment in renewable energy production set 2. Solar energy [Internet]. 2011 Jan [cited 2023 Nov 24]; 7. Available from: https://oldwww.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf

[4] Duangnirat B. Agriculture a choice a way to survive [Internet]. 2020 [cited 2023 Feb 18]; Available from: <https://www.depa.or.th/th/article-view/agriculture-alternative-way-of-survival>

[5] Office of the Permanent Secretary for Ministry of Agriculture and Cooperatives. Summary of important agricultural and cooperative statistics information [Internet]. 2020 Apr 24 [cited 2023 Feb 18]; Available from: <https://www.opsmoac.go.th/nakhonsithammarat-dwl>

[6] Hirunlabh J. Solar Energy of Thermal Processes. 1st ed. Academic Textbook and Media Development Office: Bangkokthonburi University; 2015. (in Thai)

[7] Seetawan T. Thermoelectric Technology. 1st ed. Chulalongkorn University Press: Chulalongkorn University; 2015. (in Thai)

[8] Chaengphi C. Soil Climate. Academic documents Ministry of Agriculture and Cooperatives. 1987 Dec; 88:2-9. (in Thai)

[9] Ruttanapun C. Development of small thermoelectric generator prototype in model of electric producing from heat source of concentrated solar thermal with thermal storage media. Smart Materials Research and Innovation Unit KMITL. 2018;1:34-55. (in Thai)

[10] Permchart W. Feasibility study of using ground as a heat sink of condensing unit of air conditioner in thailand. Research of Energy Technology KMUTT. 1998;1:18-46. (in Thai)

อิทธิพลของอะลูมิเนียมผสมที่ส่งผลต่อขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิต ที่ผ่านกระบวนการกัดขึ้นรูป CNC

บดินเดช จูมณี¹ พัชนะ กัญจนกาญจน์¹ เฉลิม ขุนเอียด¹ รวิณธ์ธนต์ ทิพย์เสนา^{2*} และวรรณนิศา นุชคุ้ม³
brodindech.j@rmutsb.ac.th¹, patchara.k@rmutsb.ac.th¹ chalerk.k@rmutsb.ac.th¹
rawintanath.t@rmutsb.ac.th^{2*} and wannisa.nu@rmuti.ac.th³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

³ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Received: December 7, 2023 Revised: May 17, 2024 Accepted: May 27, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษา อิทธิพลวัสดุที่แตกต่างกันของอะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรด ได้แก่ Al5058, Al6061, Al6063, Al7075 ที่ส่งผลต่อขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตหลังกระบวนการกัดขึ้นรูป (CNC) ซึ่งกำหนดความเร็วรอบในการตัดเฉือน รอบ/นาที (RPM) และอัตราป้อนของโต๊ะงาน มิลลิเมตร/นาที (mm/min) ที่เท่ากัน และ เครื่องมือในการตัดเฉือน (Cutting Tool) ที่ใช้ตัดเฉือน ก็เป็นชนิดเดียวกัน คือ (Carbide Endmill TiAlN-COATED) พร้อมเปลี่ยน เครื่องมือในการตัดเฉือน ทุกครั้งที่ทำการเปลี่ยน เกรดอะลูมิเนียมและทำการตรวจวัดขนาดโดยเครื่องสแกนประเภท Structured Light Scanner (SLS) แบบไม่สัมผัสชิ้นงานยี่ห้อ (GOM ATOS) ซึ่งนำไฟล์ (Point Clouds) ที่ได้จากการสแกนของอะลูมิเนียม ทั้ง 4 เกรด เทียบกับไฟล์ 3 มิติ (CAD File) เดิม เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลวัสดุที่แตกต่างกันของอะลูมิเนียมหลังกระบวนการตัดเฉือน (Machining) ซึ่งการวัดขนาดอะลูมิเนียมเกรด Al7075 หลังกระบวนการตัดเฉือนทั้ง 8 ตำแหน่ง มีค่าใกล้เคียงกับไฟล์ 3 มิติ เดิมมากที่สุด ซึ่งตำแหน่งทรงกลมที่ 1, 2, 3 (Spherer1, 2, 3) มีค่าเท่ากับ 20.000, 20.000, 7.500 mm. ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 1, 2, 3 (Diameter 1, 2, 3) มีค่าเท่ากับ 47.506, 5.000, 7.500 mm. ตำแหน่งกรวยที่ 1 (Cone1) มีค่าเท่ากับ 5.017 mm. และ อนุภาคกรวยที่ 1 (Angle 1) ที่ค่าเท่ากับ 20.556 mm.

คำสำคัญ: เครื่องมือในการตัดเฉือน กระบวนการตัดเฉือน ไฟล์ 3 มิติ สแกนนิ่ง

The Influence of Aluminum Alloy Effects on Freeform and Geometry after the CNC Milling Process.

Brodindech Joommanee¹, Patchara Kunjanakarn¹, Chalerm Khunead¹

Rawintanath Thipsena^{2*} and Wannisa Nutkhum³

brodindech.j@rmutsb.ac.th¹, patchara.k@rmutsb.ac.th¹, chalerm.K@rmutsb.ac.th¹

rawintanath.t@rmutsb.ac.th^{2*} and wannisa.nu@rmuti.ac.th³

¹Department of Tool and Die Engineering, Tool and Die Technology Center (TDTC), Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Manufacturing Engineering Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

Received: December 7, 2023 Revised: May 17, 2024 Accepted: May 27, 2024

Abstract

This research study Influence of different material of Al5058, Al6061, Al6063, and Al7075 on the freeform and geometry after the CNC milling process. The cutting speed (RPM) and table feed rate (mm/min) are determined equivalent and the cutting tool remains the same, which is a (Carbide Endmill TiAlN-COATED). It is necessary to change the cutting tool for every grade of aluminum. Then, Dimensions have been measured using a Structured Light Scanner (SLS), specifically the GOM ATOS, which is a non-contact type of scanner. Point cloud files from the aluminum 4 grade have been compared with the original CAD. To compare the influence of different materials after the machining process, the size measurements of Al7075 grade aluminum at all 8 locations after machining are kept as close to the original 3D file as possible. The dimensions of spheres 1, 2, and 3 are 20.000 mm, 20.000 mm, and 7.500 mm, respectively. The diameters of spheres 1, 2, and 3 are 47.506 mm, 5.000 mm, and 7.500 mm, respectively. The dimension of cone 1 is 5.017 mm, and the angle 1 measures 20.556 mm.

Keywords: Cutting tool, Machining, File 3D, Scanning

1. บทนำ

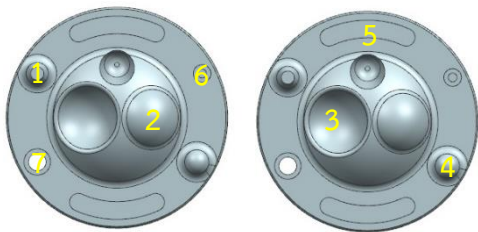
ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ในปัจจุบันมีความหลากหลายของวัสดุที่ใช้ในการผลิตและรูปทรงของชิ้นส่วนที่มีความอิสระซับซ้อน (Freeform) ซึ่งการวัดขนาดของรูปทรงอิสระดังกล่าวเป็นไปด้วยความยากลำบากและมีข้อจำกัดในด้านเครื่องมืออุปกรณ์ และอิทธิพลวัสดุที่ส่งผลต่อขนาดชิ้นส่วนนั้นๆ การวัดขนาดชิ้นงานในปัจจุบันคือพื้นฐานที่สำคัญในการผลิตสมัยใหม่ เป็นข้อกำหนดเพื่อให้แน่ใจว่าผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนนั้นๆมีคุณภาพ และกระบวนการตัดเฉือนยังเป็นส่วนสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนที่เป็นโลหะซึ่งส่งผลโดยตรงรูปทรงความแม่นยำหลังกระบวนการผลิต [1] ซึ่งมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้กระบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน [2] แนวโน้มล่าสุดในอุตสาหกรรมการผลิตได้มุ่งเน้นเทคนิคการวัดโดยวัดบนเครื่องจักรซึ่งลดข้อบกพร่องและข้อผิดพลาดหลังกระบวนการผลิตและลดการใช้ทรัพยากรให้น้อยที่สุด การวัดบนเครื่องจักร ชิ้นส่วนยังวางอยู่บนเครื่องแต่กระบวนการตัดเฉือนหยุดลง [3] วิธีการวัดบนเครื่องจักรยังไม่เพียงพอ เพียงแต่เป็นการช่วยตรวจสอบข้อบกพร่องเท่านั้น แต่ยังไม่สามารถระบุสาเหตุที่แท้จริงของข้อผิดพลาดได้ โดยวิธีการเปรียบเทียบแบบ ไฟล์ 3 มิติ ระหว่าง ไฟล์คลาวด์พอยต์และไฟล์ (3D Modeling) เป็นการวัดผลเพื่อรวบรวมข้อมูลกระบวนการมากกว่าข้อมูลผลิตภัณฑ์ซึ่งช่วยควบคุมคุณภาพและเพิ่มประสิทธิภาพ [4]

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา คอมพิวเตอร์ช่วยในการตรวจสอบ Computer Aided Inspection (CAI) ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยใช้ซอฟต์แวร์มาตรวิทยาคู่กับการวัดแบบ Coordinate Measuring Machine (CMM) แม้ว่าความละเอียดจาก (3D Scanning) ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับ (CMM) ได้ แต่ในปัจจุบันการวัดแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน เพิ่มความรวดเร็วในการวัดด้วยการเพิ่มจำนวนจุดของ ไฟล์คลาวด์พอยต์ โดยมีความคลาดเคลื่อนของการวัดชิ้นส่วนอยู่ที่ระดับ 1 μm หรือ 0.001 mm ดังนั้นจึงนิยมการวัดแบบเปรียบเทียบไฟล์ 3 มิติ ชิ้นส่วนที่มีรูปร่างอิสระซับซ้อน [5]

มีการศึกษาเปรียบเทียบการวัดขนาดรูปทรงอิสระด้วยเครื่องสแกนทั้งหมด 4 ประเภทได้แก่ Laser Line Scanner (LLS), Structured Light Scanner (SLS), Photogrammetric Scanning System With Rotary Table (PSSRT) และ Aser Acanning Arm (LSA) เพื่อเปรียบเทียบขนาดความคลาดเคลื่อนของเครื่องสแกนแต่ละประเภท หาข้อบกพร่องพร้อมจุดดีจุดด้อย และมีความสนใจในการศึกษาความแตกต่างของวัสดุและสีที่ส่งผลต่อขนาดรูปร่างของชิ้นงานนั้นๆ [6] นอกจากการเปรียบเทียบการวัดขนาดจากเครื่องสแกนแต่ละประเภทยังมีการเปรียบเทียบข้อแตกต่างข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดของ ซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการวัดขนาด ทั้งหมด 6 ซอฟต์แวร์ได้แก่ 3D Reshaper V.7.1, Geomagic Qualify V.12, GOM Inspect V.7.5, Point Master V.5.3.3, Poly works Inspector V.12, Rapid Form XOV2 [7-8] การเปรียบเทียบอิทธิพลความเข้มข้นของแสงจากเครื่องสแกน Structured Light Scanner (SLS) ที่ส่งผลต่อการคลาดเคลื่อนของการวัดขนาดชิ้นงาน [9] เปรียบเทียบการวัดขนาดรูปทรงเรขาคณิตที่ต่างกันโดยใช้ CMM, Optical Scanner, Computed Tomography 3D [10] การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการแปลงไฟล์คลาวด์พอยต์หรือไฟล์ดิจิทัลและความแม่นยำ [11] แต่เป็นการทดสอบอะลูมิเนียมเพียงชนิดเดียว ในทางตรงกันข้ามชนิดของอะลูมิเนียมที่มีอยู่หลากหลายในท้องตลาด เช่น Al5058, Al6061, Al6063 และ Al7075 ตามลำดับ

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นไม่มีบทความใดให้ความสำคัญในเรื่องอิทธิพลของวัสดุอะลูมิเนียมหลังกระบวนการผลิต เกี่ยวเนื่องจากความหลากหลายของอะลูมิเนียมและการเพิ่มขึ้นของชนิดอะลูมิเนียมที่นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนเครื่องมือและแม่พิมพ์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของวัสดุอะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรด ได้แก่ Al5058, Al6061, Al6063 และ Al7075 ตามลำดับ ที่แตกต่างกัน ซึ่งอะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรดสามารถหาได้ในประเทศและเป็นที่นิยมนำมาเป็นชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ในหลากหลายอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมการออกแบบและผลิต

อุปกรณ์การจับยึดซึ่งมีการเปลี่ยนรูปแบบอย่างรวดเร็วในปัจจุบันจึงทำให้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุทดแทนในตระกูลเหล็กเนื่องจากง่ายต่อการตัดเฉือนใช้เวลาในการตัดเฉือนน้อย เพื่อเข้าใจถึงผลกระทบของวัสดุที่แตกต่างกัน ต่อขนาดหลังกระบวนการผลิตของอะลูมิเนียม ทำให้สามารถเลือกใช้อะลูมิเนียมให้มีความเหมาะสมกับงานที่ต้องการและเป็นการเพิ่มความแม่นยำในการทำอุปกรณ์จับยึดและชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ พร้อมควบคุมค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตลดต้นทุนเพิ่มมูลค่า



1. Cone1, 2. Sphere 1, 3. Sphere 2, 4. Sphere 3
5. Diameter 1, 6. Diameter 2, 7. Diameter 3

รูปที่ 1 ชิ้นงาน 3D จุดที่ต้องการเช็คขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิต เส้นผ่านศูนย์กลาง กรวยทรงกลม

2. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบการวัดขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตหลังกระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัด 3 แกน ดังรูปที่ 1 ได้ทำการออกแบบชิ้นงานให้มีรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิต พร้อมออกแบบ เส้นทางเดินของพูล (Tool pate) ความเร็วรอบในการตัดเฉือน รอบ/นาที และอัตราป้อนของโต๊ะงาน มิลลิเมตร/นาที ที่เท่ากัน และ เครื่องมือในการตัดเฉือนที่ใช้ในการตัดเฉือน ก็เป็นชนิดเดียวกัน คือ (Carbide Emdmill TiAlN-COATED)

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

อะลูมิเนียม 4 เกรด Al 5058, Al 6061, Al 6063, Al 7075 พร้อมเปลี่ยนเครื่องมือในการตัดเฉือน ทุกครั้งที่ทำการเปลี่ยน เกรดอะลูมิเนียม

เมื่อทำการตัดเฉือนเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการเก็บข้อมูลทางกายภาพของอะลูมิเนียมแต่ละเกรดด้วยเครื่องสแกน จากการเปรียบเทียบเครื่องสแกนทั้งหมด 4 ประเภท Laser Line Scanner (LLS), Structured Light Scanner (SLS), Photogrammetric Scanning System With Rotary Table (PSSRT) และ Aser Acanning Arm (LSA) ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องสแกนประเภท Structured Light Scanner (SLS) ให้ค่าที่มีความเที่ยงตรงมากที่สุด [5] จึงเลือกเครื่องสแกนประเภท Structured Light Scanner (SLS) ในขั้นตอนการปฏิบัติเลือกใช้เครื่องสแกนเนอร์ที่ใช้แสงสีน้ำเงิน (Blue light) [6] แบบไม่สัมผัสชิ้นงานยี่ห้อ (GOM ATOS) รุ่น (Optical Measuring Techniques โดยใช้เลนส์ขนาด 200 X 200 mm³ ในการทดลองครั้งนี้ ส่วนไฟล์ที่ได้จากการสแกนคือ STL (Stereolithography) เพื่อทำการเปรียบเทียบขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตหลังกระบวนการตัดเฉือน

2.2 ขั้นตอนการสแกน



รูปที่ 2 อะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรดหลังผ่านกระบวนการตัดเฉือน

นำอะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรดทำการตัดเฉือนขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด 3 แกน ตามรูปที่ 2 ทำการสแกนชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นด้วยเครื่องสแกน (GOM ATOS) การสแกนจะใช้ประโยชน์จากวัตถุที่มีอยู่แล้ว การสร้างวัตถุอื่นคล้ายกับวัตถุที่มีอยู่แล้วโดยอาศัยการได้รับข้อมูลทางกายภาพจากวัตถุนั้นๆ [12] รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างขนาดของวัตถุที่สแกน ขึ้นรูปกับเทคโนโลยีที่สามารถบันทึกได้และข้อมูลเกี่ยวกับสีหรือการสะท้อนกลับของแสงในวัตถุนั้นๆ ข้อมูลที่ได้จากการสแกนเรียกว่า (Point Clouds) [13] จุดมุ่งหมายหลักวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse engineering) คือการเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องที่ได้รับจากแบบจำลองเป็นแบบจำลองที่ต่อเนื่องโดยกำหนดตามพื้นผิวของชิ้นงานโดยปกติข้อมูลจะแสดงเป็นจุด (X Y Z) ซึ่งคือรูปแบบไฟล์ดิจิทัลลักษณะสุ่ม [14] ระบบการสแกนแบบ (3D Optical Scanning) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการเปรียบเทียบ [15-17] ระหว่างไฟล์ (3D Modeling) กับ ไฟล์ (Point Clouds) จากเครื่องสแกน เพื่อวัดความแตกต่างของ ไฟล์ 3 มิติที่ได้ทำการออกแบบพร้อมเก็บข้อมูลทางกายภาพหลังผ่านกระบวนการตัดเฉือน

ตารางที่ 1 ขนาดทรงกลม,เส้นผ่านศูนย์กลาง,ขนาดองศาทรงกรวยของชิ้นงานจากไฟล์ 3 มิติ ก่อนกระบวนการตัดเฉือน

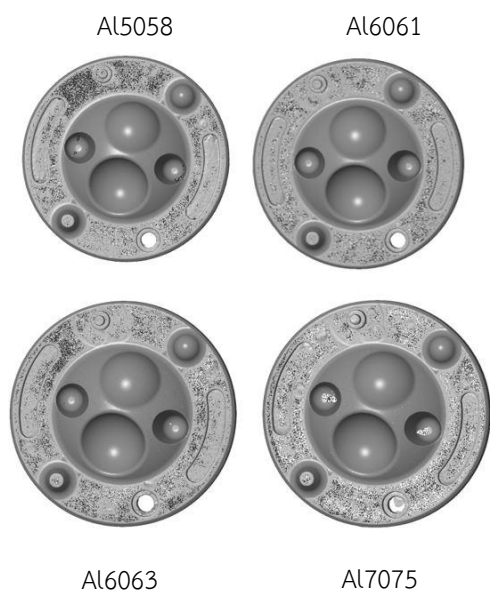
ขนาดทรงกลม (Sphere)	Radius (mm)
Sparer1	20.000
Sphrer2	20.000
Sphrer3	7.500
เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter)	Radius (mm)
Diameter1	47.500
Diameter2	5.000

Diameter3	7.500
องศาทรงกรวย (Cone)	Radius (mm)
Cone1	5.000
Angle	20.556



รูปที่ 3 การสร้างจุดอ้างอิงที่มีตำแหน่งเดียวกันและจำนวนเท่ากันก่อนทำการ (Scanning)

โดยกำหนดจำนวน ไฟล์ (Point Clouds) ที่ได้จากเครื่องสแกนของอะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรดให้มีจำนวนเท่ากันคือ 300,000 Point ดังรูปที่ 4 และกำหนดจุดอ้างอิงที่มีตำแหน่งเดียวกันจำนวนจุดอ้างอิงเท่ากัน ดังรูปที่ 3 เพื่อความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดขนาดโดยพื้นผิวชิ้นงานก่อนการสแกนไม่ได้พ่นหรือเคลือบสารใดเพื่อวิเคราะห์ข้อจำกัดของวัสดุนั้นๆ



รูปที่ 4 ไฟล์ (Point Clouds) ที่ได้จากเครื่องสแกนของ อะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรด 300,000 Point

3. ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลระหว่างไฟล์ (3D Modeling) กับ ไฟล์ (Point Clouds) มีการใช้อย่างแพร่หลายในการเปรียบเทียบ [10,15-17] การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ด้วยซอฟต์แวร์ GOM inspect software ซึ่งความไม่แน่นอนของเครื่องสแกนแบบ (Optical scanner) คำนวณตามวิธีการของ PUMA [17] ประกอบไปด้วยส่วนประกอบดังนี้

Uc ข้อผิดพลาดจากการสอบเทียบ

Up ข้อผิดพลาดจากการวัด

Ub ข้อผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

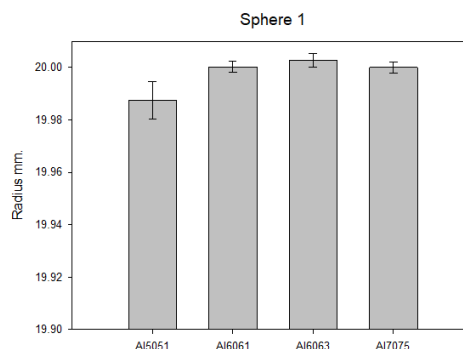
Uw ข้อผิดพลาดจากการแปรปรวนจากการติดตั้ง

$$U = K * \sqrt{U_c^2 + U_p^2 + U_b^2 + U_w^2} \dots (1)$$

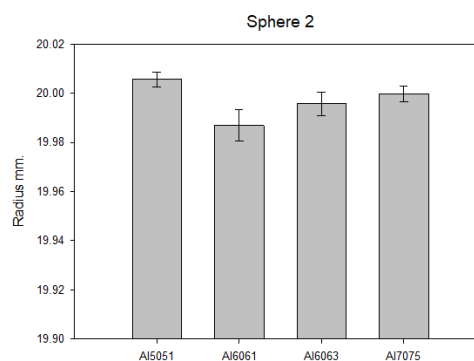
K ปัจจัยครอบคลุมตั้งค่าเป็น 2 สำหรับช่วงความเชื่อมั่น 95 %

3.1 การวัดขนาดทรงกลม

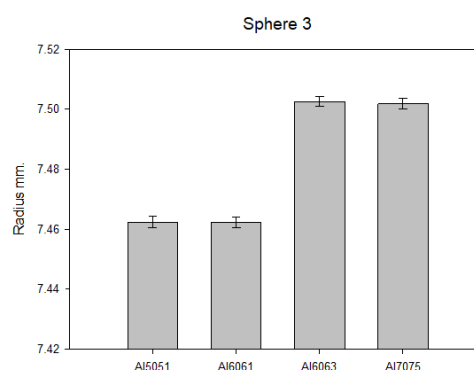
1) ผลการวัดขนาดทรงกลม ในรูปที่ 5-7 แสดงให้เห็นถึงค่าที่ได้จากการวัดขนาดทรงกลม ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด เมื่อเทียบกับขนาดไฟล์ 3 มิติ ก่อนกระบวนการตัดเฉือน



รูปที่ 5 การวัดขนาดทรงกลม Sphere 1 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด



รูปที่ 6 การวัดขนาดทรงกลม Sphere 2 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด



รูปที่ 7 การวัดขนาดทรงกลม Sphere 3 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด

ซึ่ง AL5058 แสดงให้เห็นถึงค่า Error หลังกระบวนการตัดเฉือนมากที่สุดในการวัดขนาดทรงกลม Sphere 1, Sphere 2, Sphere 3 ซึ่ง AL7075 ให้ค่าการวัดหลังกระบวนการตัดเฉือนมีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับขนาดไฟล์ 3 มิติ ก่อนกระบวนการตัดเฉือนมากที่สุด ในส่วนการวัดขนาดทรงกลม ซึ่งการวัดขนาดทรงกลมและกรวย ไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดพื้นฐานเช่น เวอร์เนียคาลิเปอร์ หรือไมโครมิเตอร์จึงใช้วิธีดังกล่าว

2) ผลการทดสอบเชิงสถิติของการวัดขนาดทรงกลม จากนั้นนำข้อมูล Sphere 1, Sphere 2 และ Sphere 3 ทำการทดสอบทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังรูปที่ 8-10

WORKSHEET 1
One-way ANOVA: resp versus Sphere 1

Method

Null hypothesis All means are equal
Alternative hypothesis Not all means are equal
Significance level $\alpha = 0.05$
Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Sphere 1	4	AI5051, AI6061, AI6063, AI7075

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sphere 1	3	0.000718	0.000239	14.04	0.000
Error	16	0.000273	0.000017		
Total	19	0.000991			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0041292	72.47%	67.30%	56.98%

รูปที่ 8 การทดสอบทางสถิติ Sphere 1

WORKSHEET 1
One-way ANOVA: resp 2 versus Sphere 2

Method

Null hypothesis All means are equal
Alternative hypothesis Not all means are equal
Significance level $\alpha = 0.05$
Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Sphere 2	4	AI5051, AI6061, AI6063, AI7075

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sphere 2	3	0.000933	0.000311	14.98	0.000
Error	16	0.000332	0.000021		
Total	19	0.001266			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0045580	73.74%	68.82%	58.97%

รูปที่ 9 การทดสอบทางสถิติ Sphere 2

WORKSHEET 1
One-way ANOVA: resp 3 versus Sphere 3

Method

Null hypothesis All means are equal
Alternative hypothesis Not all means are equal
Significance level $\alpha = 0.05$
Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Sphere 3	4	AI5051, AI6061, AI6063, AI7075

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Sphere 3	3	0.007962	0.002654	884.64	0.000
Error	16	0.000048	0.000003		
Total	19	0.008010			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0017321	99.40%	99.29%	99.09%

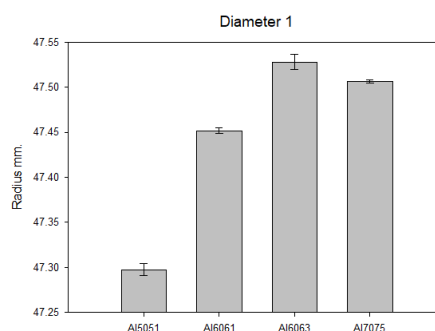
รูปที่ 10 การทดสอบทางสถิติ Sphere 3

จากการทดสอบทางสถิติ ของข้อมูล Sphere 1, Sphere 2 และ Sphere 3 พบว่า ค่า P-Value =

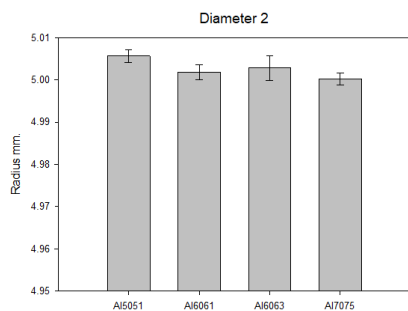
0.000 น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้น ชนิดของเกรตอะลูมิเนียม ส่งผลต่อการวัดขนาดทรงกลม Sphere 1, Sphere 2 และ Sphere 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่า ชนิดของอะลูมิเนียมมีผลต่อ Sphere 1, Sphere 2 และ Sphere 3 ตามลำดับ แต่อะลูมิเนียมชนิด AL7075 มีผลที่ดีกว่าชนิดอื่นๆ เพราะโครงสร้างของวัสดุมีความแข็งแรงสูงทนการสึกหรอและทนการกัดกร่อนได้ดีคือคุณลักษณะเด่นของอะลูมิเนียมชนิดนี้ [18] และหากจะพิจารณาเพียงทรงกลมอย่างเดียวอาจจะไม่สมบูรณ์จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อไป

3.2 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

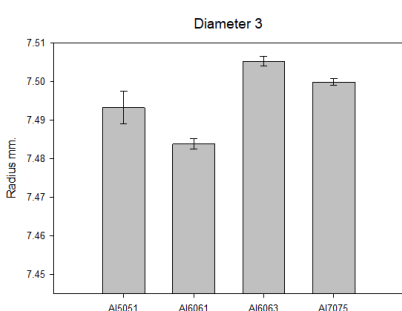
1) ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ในรูปที่ 11-13 แสดงให้เห็นถึงค่าที่ได้จากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอะลูมิเนียม แต่ละเกรต เมื่อเทียบกับขนาดไฟล์ 3 มิติ ก่อนกระบวนการตัดเฉือน ในส่วนของ Diameter 1 กับ Diameter 2 AL5058 แสดงให้เห็นถึงค่า Error หลักกระบวนการตัดเฉือนมากที่สุด ซึ่ง AL7075 แสดงความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับขนาดไฟล์ 3 มิติ ก่อนกระบวนการตัดเฉือนมากที่สุด ส่วน Diameter 3 AL6063 แสดงให้เห็นถึงค่า Error หลักกระบวนการตัดเฉือนมากที่สุด และ AL7075 แสดงถึงความเที่ยงตรงหลังกระบวนการตัดเฉือนมากที่สุดในส่วนของ Diameter 3 แสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 11 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Diameter 1 ของ อะลูมิเนียม แต่ละเกรต

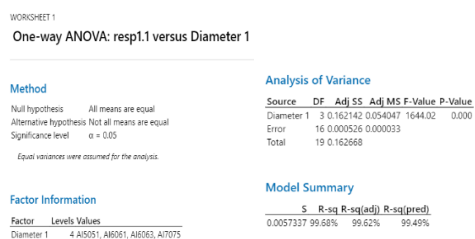


รูปที่ 12 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Diameter 2 ของ อะลูมิเนียม แต่ละเกรด

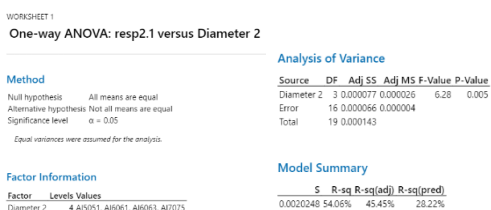


รูปที่ 13 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Diameter3 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด

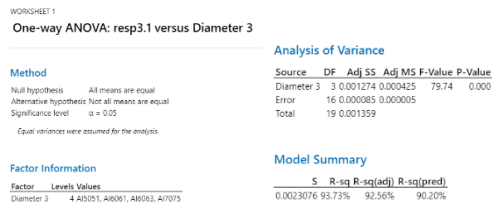
2) ผลการทดสอบเชิงสถิติของการวัดขนาดทรงกลม จากนั้นนำข้อมูล Diameter 1 ,Diameter 2 และ Diameter 3 ทำการทดสอบทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังรูปที่ 14-16



รูปที่ 14 การทดสอบทางสถิติ Diameter 1



รูปที่ 15 การทดสอบทางสถิติ Diameter 2

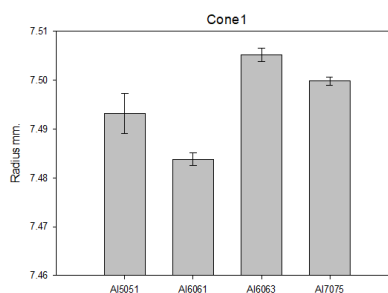


รูปที่ 16 การทดสอบทางสถิติ Diameter 3

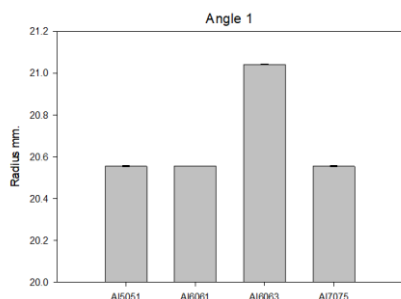
จากการทดสอบทางสถิติ ของ Diameter 1 ,Diameter 2 และ Diameter 3 พบว่า ค่า P-Value = 0.000 น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้น ชนิดของ เกรดอะลูมิเนียม ส่งผลต่อการวัดขนาด Diameter 1 ,Diameter 2 และ Diameter 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าลักษณะของการวัดไม่ว่าจะทรงกลมและเส้นผ่านศูนย์กลาง AI7075 มีผลที่ดีกว่าอย่างชนิดอื่นๆ เพราะว่า วัสดุมีโครงสร้างทดการกัดกร่อนแข็งแรงสูงและทนต่อการสึกหรอ [18] ในทางตรงกันข้ามหากพิจารณาเพียงทรงกลมและเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นในงานอุตสาหกรรมยังมีการทำงานที่วัดขนาดที่มีความซับซ้อนเล่นทางกรวยและมุมต่างๆ

3.3 การวัดขนาดกรวยและมุม

1) ผลการวัดขนาดกรวยและมุม ในรูปที่ 17-18 แสดงให้เห็นถึงค่าการวัดขนาดกรวย Cone 1 และ Angle 1 ของอะลูมิเนียม แต่ละเกรด ซึ่ง AI6063 หลังกระบวนการตัดเฉือน แสดงให้เห็นค่า Error มากที่สุดในทางกลับกัน AI7075 แสดงขนาดหลังกระบวนการตัดเฉือนที่ดีที่สุด

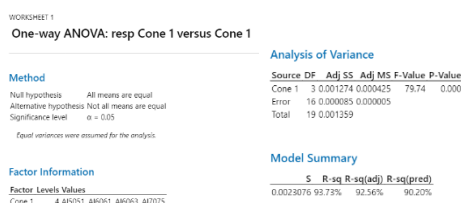


รูปที่ 17 การวัดขนาดกรวย Cone 1 ของอะลูมิเนียมแต่ละเกรด



รูปที่ 18 การวัดขนาดของสกรวย Angle ของ Al แต่ละเกรด

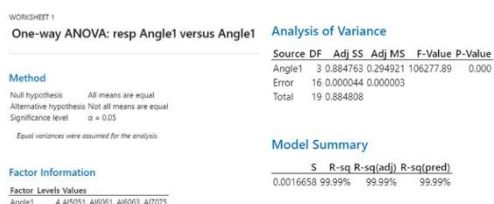
2) ผลการทดสอบเชิงสถิติของขนาดกรวยและมุม จากนั้นนำข้อมูล Cone 1 ทำการทดสอบทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 การทดสอบทางสถิติ Cone 1

จากการทดสอบพบว่า ค่า P-Value = 0.000 น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้น ชนิดของเกรดอะลูมิเนียม ส่งผลต่อการวัดขนาด Cone 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากนั้นนำข้อมูล Angle 1 ทำการทดสอบทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 การทดสอบทางสถิติ Angle 1

จากการทดสอบพบว่า ค่า P-Value = 0.000 น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้น ชนิดของเกรดอะลูมิเนียม ส่งผลต่อการวัดขนาด Angle 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

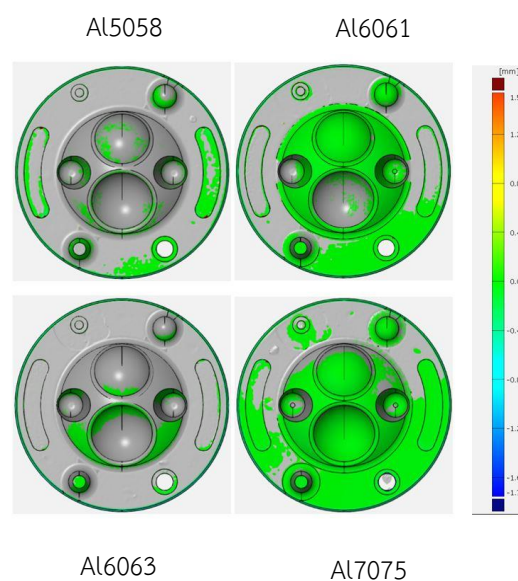
จากผลการทดลองทั้งหมดอาจกล่าวได้ชนิดของอะลูมิเนียมนี้มีผลต่อ 1) Sphere 1, 2) Sphere 2, 3) Sphere 3, 4) Diameter 1, 5) Diameter 2, 6) Diameter 3, 7) Cone และ 8) Angle ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ โดย Al7075 ให้ผลที่ดีที่สุด

4. อภิปรายผล

อิทธิพลวัสดุที่แตกต่างกันของอะลูมิเนียมเกรด Al5058, Al6061, Al6063, Al7075 ส่งผลอย่างมากต่อขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตหลังกระบวนการตัดเฉือน จากการตรวจสอบโดยเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงสูง พบว่าการวัดขนาดโดยเปรียบเทียบไฟล์ 3 มิติก่อนกระบวนการตัดเฉือนกับไฟล์ Point Clouds หลังกระบวนการตัดเฉือนที่ได้จากเครื่องสแกนให้ผลที่เที่ยงตรงแม่นยำเพราะไม่เกิดการสัมผัสกับชิ้นงาน จากรูปที่ 5 แสดงการวัดขนาดทรงกลม Sphere1 ของอะลูมิเนียมแต่ละเกรด ซึ่ง Al7075 ให้ผลการวัดที่ดียิ่งเมื่อเทียบกับไฟล์ 3 มิติ เดิมคือ R 20.000 mm. และผลการวัดที่ได้คือ R 20.000 mm. ส่วน Al5058 แสดงผลการวัดที่แย่ที่สุดคือ 19.987 mm. จากรูปที่ 6 แสดงการวัดขนาดทรงกลม Sphere2 ของอะลูมิเนียมแต่ละเกรด ซึ่ง Al7075 ให้ผลการวัดที่ดียิ่งเมื่อเทียบกับไฟล์ 3 มิติ เดิม ซึ่ง ไฟล์ CAD R 20.000 mm. ผลที่วัดได้คือ R 20.000 mm. Al6061 แสดงผลการวัดที่แย่ที่สุดคือ R 19.985 mm. จากรูปที่ 7 แสดงการวัดขนาดทรงกลม Sphere3 ของอะลูมิเนียมแต่ละเกรด ซึ่ง Al7075 ให้ผลการวัดที่ดียิ่งที่สุดคือ R 7.500 mm. เทียบกับไฟล์ 3 มิติ เดิมคือ R 7.500 mm. ส่วนการแสดงผลการวัดที่แย่ที่สุดคือ Al5051, Al6061 คือ R 7.462 mm. จากรูปที่ 11 แสดงการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Diameter1 ของอะลูมิเนียมแต่ละเกรด ซึ่ง Al7075 ให้ผลการวัดที่ดียิ่งที่สุดคือ R 47.506 mm. เมื่อเทียบกับไฟล์ CAD เดิม

คือ R 47.500 mm. ส่วน AL5058 ให้ผลการวัดที่แคบที่สุดคือ R 47.297 mm. จากรูปที่ 12 แสดงการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Diameter2 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด ซึ่ง AL7075 ให้ผลการวัดที่แม่นยำที่สุด R 5.000 mm. เมื่อเทียบกับไฟล์ 3 มิติ เดิม ส่วน AL5058 ให้ผลการวัดที่แคบที่สุดคือ R 5.006 mm. จากรูปที่ 13 แสดงการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Diameter 3 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด ซึ่ง AL7075 ให้ผลการวัดที่แม่นยำที่สุดคือ R 7.500 mm. ส่วน AL6063 ให้ผลการวัดที่แคบที่สุดคือ R 7.486 mm. จากรูปที่ 17-18 แสดงการวัดขนาดกรวย Cone 1 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรดและการวัดขนาดดองศากรวย Angle 1 ของ อะลูมิเนียมแต่ละเกรด ซึ่ง AL7075 ให้ผลการวัดที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับไฟล์ 3 มิติเดิม

จากเปรียบเทียบขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตของ อะลูมิเนียมหลังกระบวนการตัดเฉือนด้วยการเก็บข้อมูลทางกายภาพของแต่ละเกรดด้วยเครื่องสแกนประเภท Structured Light Scanner (SLS) แบบไม่สัมผัสชิ้นงานยี่ห้อ (GOM ATOS) แล้วนำไฟล์ Point Clouds ที่ได้มาเปรียบเทียบกับไฟล์ 3 มิติ ก่อนกระบวนการตัดเฉือน ผลพบว่า อิทธิพลของวัสดุที่แตกต่างกันส่งผลต่อขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงทางเรขาคณิตเห็นได้อย่างชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 21 AL5058 แสดงการเปรียบเทียบ Point Clouds กับไฟล์ 3 มิติว่าขนาดหลังกระบวนการตัดเฉือน Error ค่อนข้างมาก เนื่องจากสีเขียวเกิดขึ้นน้อย ซึ่งต่างจาก AL6061 AL7075 ที่พบสีเขียวจำนวนมาก เมื่อพบสีเขียวจำนวนมากแสดงว่าไฟล์ Point Clouds มีค่าใกล้เคียงกับไฟล์ 3 มิติ หรือมีค่าที่ Error ± 0.001 mm. ซึ่ง AL7075 หลังกระบวนการตัดเฉือน มีค่าใกล้เคียงกับไฟล์ต้นแบบหรือไฟล์ 3 มิติมากที่สุด



รูปที่ 21 การเปรียบเทียบไฟล์ 3 มิติ ก่อนทำการ ตัดเฉือนกับไฟล์ Point Clouds ของอะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรดหลังกระบวนการตัดเฉือน

5. สรุปผล

อิทธิพลของวัสดุอะลูมิเนียมหลังกระบวนการกัดขึ้นรูป (CNC) 3 แกน โดยกำหนดความเร็วรอบรอบ/นาที และอัตราป้อนโต๊ะงาน มิลลิเมตร/นาที ที่เท่ากัน พร้อมเครื่องมือในการตัดเฉือนชนิดเดียวกัน ซึ่งอิทธิพลของวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียมมีผลต่อขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตหลังกระบวนการตัดเฉือน โดยผลการวัดขนาดอะลูมิเนียมเกรด AL7075 หลังกระบวนการตัดเฉือนทั้ง 8 ตำแหน่ง มีค่าใกล้เคียงกับไฟล์ 3 มิติ เดิมมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของวัสดุอะลูมิเนียมชนิดนี้ทนการกัดกร่อนต่อการสึกหรอและโครงสร้างมีความแข็งแรงสูง [18] ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์และเลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียม ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์แม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงและความละเอียดสูง ที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานในด้านขนาดรูปทรงอิสระและรูปทรงเรขาคณิตหลังกระบวนการตัดเฉือน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และ
สถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
สุวรรณภูมิ และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือเครื่องจักร

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Barcelos M.B, De Almeida D.T, Tusset F, Scheuer C.J. Performance analysis of conventional and high-feed turning tools in machining the thermally affected zone after plasma arc cutting of low carbon manganese-alloyed steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;115:18-39

[2] Paisan T, Siricai T, Phanphong K, Prajak A. The influence of cutting tool geometry in a dry turning operation of carbon steel (S50C) in automotive parts production. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2019;17(2):163-71. (in-Thai)

[3] Quinsat Y, Dubreuil L, lartigue C. A novel approach for in-situ detection of machining defects. *The International Journal of Advanced Manufacturing*. 2017;90:1625-38.

[4] Kiraci E, Franciosa P, Turley G.A, Olifent A, Attridge A, Williams M. Moving towards In-lineMetrology: evaluation of a laser radar System for In-line dimensional inspectionfor automotive assembly systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing*. 2017;91: 69–78.

[5] Savio E, De Chiffre L, Schmitt R. Metrology of freeform shaped parts *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2007;56(2):810–30.

[6] Guerraa M.G, Lavecchiaa F, Maggipintob G, Galantucci L.M. Measuring techniquesuitable for verification and repairing of industrial components: A *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2019;27:114–23.

[7] Susana M, Eduardo C, Sara G, Joaquín B. New procedure for qualification of structured light 3d scanners using an optical Feature-based gauge. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018;110:193–206

[8] Minetola P, Iuliano L, Calignano F. A customer oriented methodology for reverse engineering software selection in the computer aided inspection scenario. *Computers in Industry*. 2015;67:54–71.

[9] Li F, Stoddart D, Zwierzaka I. A performance test for a fringe projection scanner in various ambient light conditions. In: *Procedia CIRP*. 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 2017;62:400-4.

[10] Gapinska B, Wieczorowska M, Marciniak-Podsadna L, Dybala B, Ziolkowskib G. Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D. *International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Procedia Engineering*. 2014;69:255-62.

[11] Ramos Barbero B, Santos Ureta E. Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design*. 2011;43:188-206.

[12] Paulic M, et al. Reverse engineering of parts with optical scanning and additive manufacturing. *International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Procedia Engineering*. 2014;69: 795–803.

- [13] Tóth T, Živčák J. A comparison of the outputs of 3D scanners. International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Science Direct Procedia Engineering. 2014;69:393-401.
- [14] Chen F, Brown G.M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. Optical Engineering. 2000;39: 10-22.
- [15] Intwala A.M, Magikar A. A review on process of 3D model reconstruction. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) and Electronic Technologies. 2016;2851-5.
- [16] Geng Z, Bidanda B. Review of reverse engineering systems–current state of the art. Virtual and Physical Prototyping. 2017;12:161-72.
- [17] EN ISO 14253-3:2011. Geometrical product specifications (GPS)-inspection by measurement of workpieces and measuring equipment–part 3: guidelines for achieving agreements on measurement uncertainty state-ments. 2011.
- [18] Guan-fei XIAO, Ju-fu JIANG, Ying WANG, Ying-ze LIU, Ying ZHANG, Bao-yong GUO, Zhen HE, Xi-rui XIAN. Microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy part formed by semi-solid thixoextrusion. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 2023;33:3235-49.

บล็อกปูพื้นลานตากผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวม ใช้เถ้าขานอ้อยแบบ หยาบแทนที่หินฝุ่นบางส่วน และใช้เถ้าขานอ้อยแบบละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

ประชุม คำพุ่ม^{1*} และเกียรติสุดา สมณา²

prachoom_k@rmutt.ac.th^{1*} and kiatsuda.so@rmuti.ac.th²

¹ หน่วยงานวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Received: May 23, 2024 Revised: June 12, 2024 Accepted: June 17, 2024

บทคัดย่อ

ปัจจุบันหินฝุ่นและเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีจำนวนมากซึ่งต้องการนำไปเพิ่มมูลค่า งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำหินฝุ่นทดแทนทรายทั้งหมดในการผลิตคอนกรีต โดยใช้เถ้าขานอ้อยแบบหยาบแทนที่หินฝุ่นบางส่วน และใช้เถ้าขานอ้อยแบบละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน กำหนดส่วนผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก: เถ้าขานอ้อยแบบละเอียด (ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325): เถ้าขานอ้อยแบบหยาบ (ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างตะแกรงเบอร์ 325): หินฝุ่น เท่ากับ 1: 0: 0: 5, 0.85: 0.15: 0.05: 4.95, 0.85: 0.15: 0.10: 4.90, 0.85: 0.15: 0.15: 4.85, 0.85: 0.15: 0.20: 4.80, และ 0.85: 0.15: 0.25: 4.75 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กำหนดอัตราส่วนน้ำ: ปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.4 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดบล็อกปูพื้นเป็น 2 แบบ คือ บล็อกปูพื้นขนาด 30 x 30 x 5 เซนติเมตร ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น และบล็อกปูพื้นรูปคคกริขนาด 11.5 x 22.5 x 6 เซนติเมตร ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.827-2565 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ผลการทดสอบพบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยแบบหยาบแทนที่หินฝุ่นในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้านแรงอัด ความต้านแรงดัด และความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ส่วนการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเถ้าขานอ้อยอัตราส่วน 0.85: 0.15: 0.25: 4.75 และคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเถ้าขานอ้อยอัตราส่วน 0.85: 0.15: 0.20: 4.80 สามารถผสมปริมาณเถ้าขานอ้อยได้มากที่สุด ที่บล็อกปูพื้นยังมีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด เมื่อนำไปใช้ทำลานตากผลผลิตทางการเกษตร จึงควรใช้เถ้าขานอ้อยแบบละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเท่านั้น

คำสำคัญ: คอนกรีตผสมเสร็จ เถ้าขานอ้อย เถ้าชีวมวล ความต้านแรงอัด การดูดซึมน้ำ

Flooring Blocks for Drying Agricultural Products by using Quarry Rock as Aggregate with Coarse Bagasse Ash Partially Replace Quarry Rock and Fine Bagasse Ash Partially Replace Cement

Prachoom Khamput^{1*} and Kiatsuda Somna²

prachoom_k@rmutt.ac.th^{1*} and kiatsuda.so@rmuti.ac.th²

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

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

Received: May 23, 2024 Revised: June 12, 2024 Accepted: June 17, 2024

Abstract

Currently, quarry rock and bagasse ash are waste materials in many industrial factories that need to be added to add value. The objective of this research is to study the use of quarry rock as a replacement for all sand in concrete production. The coarse bagasse ash partially replaced some of the quarry rock, and fine bagasse ash partially replaced cement. The ratio of hydraulic cement ingredients: fine bagasse ash (size passes through sieve number 325): coarse bagasse ash (size through sieve number 8 and remaining through sieve number 325): quarry rock equal to 1: 0: 0: 5, 0.85: 0.15: 0.05: 4.95, 0.85: 0.15: 0.10: 4.90, 0.85: 0.15: 0.15: 4.85, 0.85: 0.15: 0.20: 4.80, and 0.85: 0.15: 0.25: 4.75 by weight, respectively. The water: cement ratio (w/c) was kept at 0.4 by weight. There are two types of floor block compactor: 30 x 30 x 5 centimeters, properties tested according to TIS 378-2531 standards regarding concrete floor tiles and a crooked dagger-shaped floor paving block, size 11.5 x 22.5 x 6 centimeters, properties tested according to TIS 827-2565 standards regarding interlocking concrete floor paving blocks. The results showed that the compressive strength increased when coarse bagasse ash was used instead of quarry rock while bending strength and density tended to decrease. For water absorption, there is a tendency to increase. Concrete floor tiles mixed with bagasse ash at a ratio of 0.85: 0.15: 0.25: 4.75 and interlocking concrete blocks for floors mixed with bagasse ash with a ratio of 0.85: 0.15: 0.20: 4.80 provided the highest amount of bagasse ash. The flooring blocks still meet the required standard criteria. When used to dry agricultural products, fine bagasse ash should be used to replace only part of the cement.

Keywords: Ready mixed concrete, Bagasse ash, Biomass ash, Compressive strength, Water absorption

1. บทนำ

ปัญหาขยะของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมปัจจุบันเป็นปัญหาใหญ่ที่ต้องเร่งแก้ไข เนื่องจากเป็นสาเหตุของปัญหาต่าง ๆ อาทิ ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหาโลกร้อน ปัญหาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นต้น ซึ่งของเสียอุตสาหกรรมจัดได้ว่าเป็นมลพิษชนิดหนึ่งที่เกิดจากโรงงาน ของเสียอุตสาหกรรมมีทั้งชนิดที่เป็นของเสียไม่อันตรายและเป็นของเสียอันตรายขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมจากการที่มีโรงงานเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ปริมาณของเสียอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันการจัดการของเสียอุตสาหกรรมมีทางเลือกมากกว่าในอดีต เนื่องจากมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการกำจัด ซึ่งของเสียที่ไม่อันตรายจะนิยมนำไปเพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อสอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับผู้ประกอบการและชุมชนบริเวณพื้นที่โดยรอบของโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย

หินฝุ่นจากเหมืองหินเป็นของเหลือทิ้งที่มีมูลค่าต่ำ ซึ่งเหลือจากกระบวนการบดย่อยและแยกขนาดหิน ซึ่งเป็นหินขนาดเล็กไม่สามารถนำไปใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากมีฝุ่นผงหินขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก หินฝุ่นมีปริมาณมากถึงร้อยละ 20-40 ของจำนวนหินก่อสร้างทั้งหมด ขึ้นอยู่กับเครื่องจักรในการผลิตของแต่ละเหมืองหิน ปัจจุบันหินฝุ่นนำไปจำหน่ายในราคาถูกประมาณตันละ 70 บาท หินฝุ่นใช้เป็นวัสดุถมที่ดินหรือใช้เป็นมวลรวมในการผลิตอิฐบล็อก และยังมีหินฝุ่นเหลือทิ้งในเหมืองหินที่ไม่สามารถจำหน่ายได้ถือเป็นจำนวนมากที่รอดำเนินการ

ส่วนเถ้าขานอ้อยนั้นได้มาจากขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล โดยใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงานและจำหน่ายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ทำให้มีปริมาณเถ้าขานอ้อยจำนวนมากที่ได้จากการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจึงเกิดเป็นของเสียที่เป็นภาระของ โรงไฟฟ้าต้องนำไปกำจัด ซึ่งหากไม่มีการจัดการกำจัดที่ดีก็จะเกิดเป็นมลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นมลพิษทางอากาศ

งานวิจัยที่ผ่านมามีการนำหินฝุ่นมาใช้ประโยชน์เป็นมวลรวมทดแทนทรายบางส่วนในงานคอนกรีตซึ่งการใช้หินฝุ่นในปริมาณที่เหมาะสมช่วยให้คอนกรีตมีความต้านแรงอัดได้มากขึ้นกว่าคอนกรีตที่ผสมทรายปกติ [1-5] และมีงานที่สามารถใช้หินฝุ่นแทนทรายได้ทั้งหมดอีกด้วย ส่วนเถ้าขานอ้อยที่นำไปบดให้ละเอียดเท่ากับปูนซีเมนต์ก็สามารถใช้เป็นวัสดุป่อโซลันแทนที่ปูนซีเมนต์ได้บางส่วน [6-10]

ในงานวิจัยนี้ มีความสนใจที่จะนำทั้งหินฝุ่นและเถ้าขานอ้อยมาเป็นส่วนผสมเข้าด้วยกันในคอนกรีตสำหรับผู้ประกอบการทำเป็นลานตากผลิตผลทางการเกษตรให้กับชุมชนที่ขาดแคลนลานตาก โดยทำเป็นลักษณะของบล็อกปูพื้นที่สามารถปูพื้นใช้งานและรื้อเก็บได้หลังจากเลิกใช้งานแล้ว

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุและเครื่องมือ

วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [11] ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ ไม่เสื่อมคุณภาพหรือเปียกชื้น มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.94

2) หินฝุ่น จากโรงโม่หินปราจีนบุรี จังหวัดสระแก้ว มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.72 การดูดซึมน้ำ 1.17 ค่าโมดูลัสความละเอียด 3.40 โดยน้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละสะสมของหินฝุ่นแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าหินฝุ่นจะอยู่นอกขอบเขตของมาตรฐานมวลรวมละเอียด (ASTM C33) ไปทางมวลหยาบกว่าทรายเล็กน้อย และลักษณะขยายหินฝุ่นแสดงดังรูปที่ 2

3) เถ้าขานอ้อย จากโรงงาน บริษัท น้ำตาลสระบุรี จำกัด จังหวัดลพบุรี การเก็บตัวอย่างดังรูปที่ 3 ลักษณะขยายเถ้าขานอ้อยดังรูปที่ 4 เถ้าขานอ้อยมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.17 การเตรียมเถ้าขานอ้อยแบบละเอียดทำการบดด้วยเครื่องและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ด้วยวิธีการร่อนผ่านน้ำแล้วนำไปตากให้แห้ง ส่วนการเตรียมเถ้าขานอ้อยแบบหยาบทำการบดด้วยเครื่องผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างตะแกรงเบอร์ 325

4) น้ำประปา

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

วิจัย ประกอบด้วย

1) เครื่องบดย่อยวัสดุเข้าขานอ้อย

2) เครื่องผสมคอนกรีต

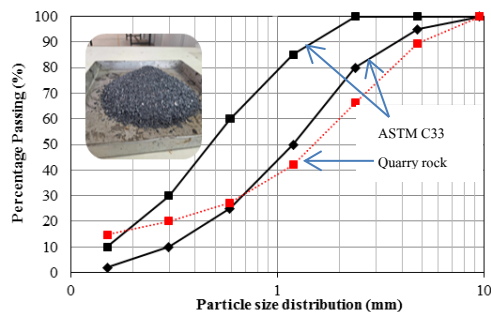
3) เครื่องอัดบล็อกปูพื้นติดตั้งแบบอิฐตัว

หนอนและแบบกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น

4) เครื่องทดสอบการรับแรงอัดและแรงดัด

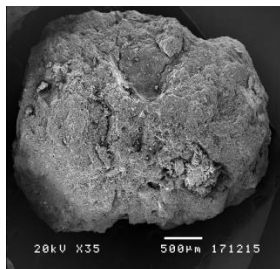
5) อุปกรณ์ทดสอบสมบัติด้านความหนาแน่น

การดูดซึมน้ำ



รูปที่ 1 น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละผสมของ

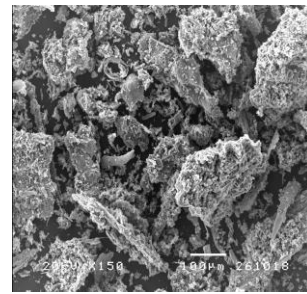
หินฝุ่น จาก บริษัท ปราจีนบุรี เหมือนหิน จำกัด



รูปที่ 2 ลักษณะของหินฝุ่นขนาดขยาย 35 เท่า



รูปที่ 3 การเก็บตัวอย่างเข้าขานอ้อย



รูปที่ 4 เข้าขานอ้อยก่อนบดย่อยขนาดขยาย 150 เท่า

2.2 การกำหนดอัตราส่วนผสม

กำหนดส่วนผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก:

เข้าขานอ้อยแบบละเอียด: เข้าขานอ้อยแบบหยาบ:
หินฝุ่น เท่ากับ 1: 0: 0: 5, 0.85: 0.15: 0.05: 4.95,
0.85: 0.15: 0.10: 4.90, 0.85: 0.15: 0.15: 4.85,
0.85: 0.15: 0.20: 4.80, และ 0.85: 0.15: 0.25: 4.75
โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กำหนดอัตราส่วนน้ำ:
ปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.4 โดยน้ำหนัก รายละเอียด
แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต (โดยน้ำหนัก)

สัญลักษณ์	ปูน ซีเมนต์	เข้า ขานอ้อย (ละเอียด)	เข้า ขานอ้อย (หยาบ)	หิน ฝุ่น	น้ำ
Control	1	0	0	5	0.4
B/C 0.05	0.85	0.15	0.05	4.95	0.4
B/C 0.10	0.85	0.15	0.10	4.90	0.4
B/C 0.15	0.85	0.15	0.15	4.85	0.4
B/C 0.20	0.85	0.15	0.20	4.80	0.4
B/C 0.25	0.85	0.15	0.25	4.75	0.4

หมายเหตุ B คือ กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น (ทดสอบการรับแรงดัด)

C คือ คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (ทดสอบการรับแรงอัด)

2.3 การขึ้นรูปตัวอย่างบล็อกปูพื้น

ผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนในตารางที่ 1
ในเครื่องผสมคอนกรีตแบบกระทะ โดยชั่งน้ำหนักวัสดุ
แล้วเทลงในเครื่องผสมจากนั้นทยอยเติมน้ำที่ใส่น้อย
จนให้ส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน นำส่วนผสมไปขึ้น
รูปตัวอย่างบล็อกปูพื้นด้วยเครื่องอัดบล็อกปูพื้นแบ่ง
ออกเป็น 2 ขนาดด้วยกัน คือ (1) บล็อกปูพื้นขนาด 30
x 30 x 5 เซนติเมตร เรียกว่า กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น

ดังรูปที่ 5 และ (2) บล็อกปูพื้นรูปคดกริช (อิฐตัวหนอน) ขนาด 11.5 x 22.5 x 6 เซนติเมตร เรียกว่าคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ดังรูปที่ 6 โดยขึ้นรูปอัตราส่วนละ 30 ตัวอย่าง นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อกปูพื้นออกจากแบบ จากนั้นนำไปบ่มในที่ร่มสภาพอากาศปกติตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อทำการทดสอบสมบัติตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 5 บล็อกปูพื้นขนาด 30 x 30 x 5 เซนติเมตร



รูปที่ 6 บล็อกปูพื้นรูปคดกริช (อิฐตัวหนอน)
ขนาด 11.5 x 22.5 x 6 เซนติเมตร

2.4 การทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก. และการทดสอบใช้งานจริง

การทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก. มีข้อกำหนดการเลือกผลการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละอัตราส่วนผสม ได้เลือกผลการทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ไม่เกิน 0.50 มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด

ทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก. โดยบล็อกปูพื้นขนาด 30 x 30 x 5 เซนติเมตร ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น [12] และบล็อกปูพื้นรูปคดกริช (อิฐตัวหนอน) ขนาด 11.5 x 22.5 x 6 เซนติเมตร ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.827-2565 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น [13]

โดยความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนความต้านแรงดัด (รูปที่ 7) และความต้านแรงอัด (รูปที่ 8) ทดสอบที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน การคำนวณค่าความต้านแรงดัดแสดงดังสมการที่ 1 และความต้านแรงอัดแสดงดังสมการที่ 2



รูปที่ 7 ทดสอบความต้านแรงดัด

การคำนวณความต้านแรงดัด

$$F = \frac{3Pl}{2bt^2} \quad (1)$$

เมื่อ F = ความต้านแรงดัดตามขวาง (เมกะพาสคัล)
 P = แรงกดที่กระทำกระเบื้องแตกหัก (นิวตัน)
 l = ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3}$ ของความยาว (มิลลิเมตร)
 b = ความกว้างของกระเบื้องตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
 t = ความหนาของกระเบื้องตัวอย่าง (มิลลิเมตร)



รูปที่ 8 ทดสอบความต้านแรงอัด

การคำนวณความต้านแรงอัด

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

เมื่อ σ = ความต้านแรงอัด (เมกะพาสคัล)
 P = แรงกดที่ทำให้ชิ้นส่วนเกิดการวิบัติ (นิวตัน)
 A = พื้นที่รับแรงอัด (ตารางมิลลิเมตร)

การทดสอบใช้งานจริง ทำการทดสอบการปูพื้นด้วยบล็อกปูพื้นทั้งสองแบบ เพื่อตรวจสอบการใช้งานว่าสามารถทำการปูพื้นได้เหมือนกับบล็อกปูพื้นที่จำหน่ายตามท้องตลาดหรือไม่ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การทดสอบปูพื้นในพื้นที่จริง

จากนั้นวัดอุณหภูมิที่ผิวหน้าของบล็อกปูพื้นหลังจากปูพื้นในสถานที่จริงแล้ว มาเปรียบเทียบกับบล็อกปูพื้นปกติตามท้องตลาด เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาข้อดีของการตากผลผลิตทางการเกษตรเนื่องจากบล็อกปูพื้นที่มีอุณหภูมิผิวหน้าสูงกว่าส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรแห้งเร็วขึ้น

เกณฑ์ข้อกำหนดตามมาตรฐาน มอก. ของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นและคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน มอก. ของบล็อกปูพื้น

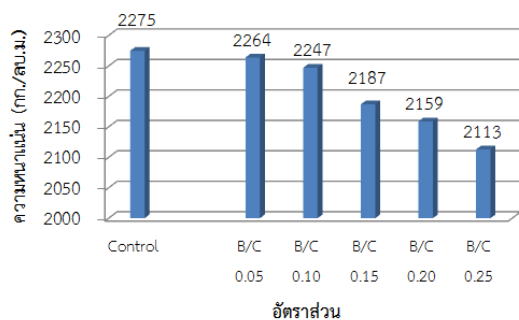
คุณสมบัติตามมอก.	กระเบื้องคอนกรีตปูพื้นมอก.378-2531	คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมอก.827-2565
ลักษณะทั่วไป	คอนกรีตเนื้อแน่น ไม่แตกร้าว ไม่บิ่น สีของผิวหน้าต้องสม่ำเสมอ	คอนกรีตเนื้อแน่น ไม่แตกร้าว ไม่บิ่น สีของผิวหน้าต้องสม่ำเสมอ
ความกว้าง x ความยาว (มม.)	ความกว้างหรือความยาว ค่าความคลาดเคลื่อน +3/-0	ไม่เกิน 295 ± 2
ความหนา (มม.)	1/10 x ความยาวของกระเบื้อง แต่ต้อง > หรือ = 20 ค่าความคลาดเคลื่อน +3	60 – 100 ± 3 > 100 ± 4
ความหนาชั้นผิวหน้า (มม.)	-	> หรือ = 5 มม.
ความต้านแรงดัด	แต่ละก้อนต้อง > หรือ = 2.5 เมกะพาสคัล - ค่าเฉลี่ยต้อง > หรือ = 3.0 เมกะพาสคัล	
ความต้านแรงอัด	-	แต่ละก้อนต้อง > หรือ = 35 เมกะพาสคัล ค่าเฉลี่ยต้อง > หรือ = 40 เมกะพาสคัล
การดูดซึมน้ำ	ไม่เกิน 10%	ไม่เกิน 5%

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะทั่วไปของบล็อกปูพื้น

บล็อกปูพื้นทั้งสองแบบมีลักษณะทั่วไปที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. ทุกอัตราส่วน คือ เมื่อตรวจพินิจแล้วพบว่า คอนกรีตบล็อกปูพื้นมีเนื้อแน่น ไม่แตกร้าว ไม่บิ่น มีความเรียบ ขอบได้ฉาก สีของผิวหน้าสม่ำเสมอ

3.2 ความหนาแน่นของบล็อกปูพื้น



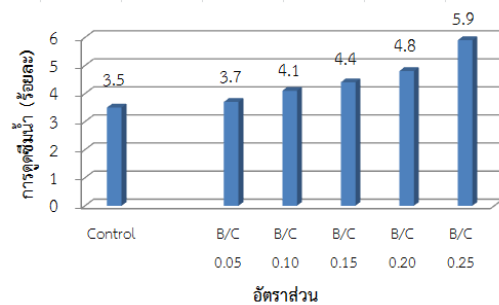
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 28 วัน พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตควบคุมมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 2,275 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อมีสัดส่วนของเถ้าขาน้อยแบบหยาบเพิ่มมากขึ้นและหินฝุ่นลดลง ความหนาแน่นของบล็อกปูพื้นมีค่าลดลงตามลำดับจนกระทั่งตัวอย่าง B/C 0.25 ให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดเท่ากับ 2,113 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากเถ้าขาน้อยแบบหยาบมีความหนาแน่นน้อยกว่าหินฝุ่น เมื่อผสมในปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้บล็อกปูพื้นมีความหนาแน่นลดลง

3.3 การดูดซึมน้ำของบล็อกปูพื้น

การดูดซึมน้ำของบล็อกปูพื้น แสดงดังรูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 28 วัน พบว่า คอนกรีตควบคุมมีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด มีค่าร้อยละ 3.5 และเมื่อผสมเถ้าขาน้อยแบบหยาบในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำมากขึ้นตามลำดับ และมีค่าดูดซึมน้ำสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ

5.9 ที่ตัวอย่าง B/C 0.25 เมื่อเทียบกับมาตรฐาน มอก.378-2531 ที่กำหนดค่าการดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 10 พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อนำไปเทียบกับมาตรฐาน มอก.827-2565 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ที่กำหนดค่าการดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 5 พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์คือ ตัวอย่าง B/C 0.20 ทั้งนี้การดูดซึมน้ำที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าขาน้อยมากขึ้น เนื่องจากเถ้าขาน้อยแบบหยาบมีอนุภาคที่เป็นรูหลายเหลี่ยมไม่แน่นอนประกอบกับมีพื้นที่ผิวขรุขระและมีรูพรุนสูง [14] ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้เมื่ออนุภาคของเถ้าขาน้อยแทรกตัวเข้าในระหว่างอนุภาคของคอนกรีตมีผลให้น้ำคอนกรีตเกิดช่องว่างขึ้นภายใน จึงส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำได้มากขึ้น

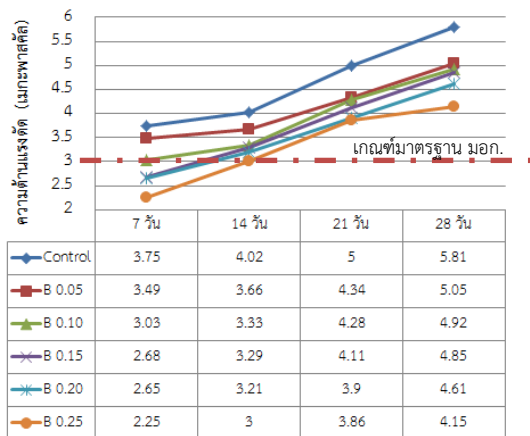


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 28 วัน

3.4 ความต้านแรงดัดของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น

ความต้านแรงดัดของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น ทำการทดสอบที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 12 พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มนานมากขึ้น ความต้านแรงดัดของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่เป็นคอนกรีตควบคุมให้ค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดเท่ากับ 5.81 เมกะพาสคัล ที่อายุ 28 วัน เมื่อมีการใช้เถ้าขาน้อยแบบหยาบและหินฝุ่นแทนที่มวลรวมในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดัดมีแนวโน้มลดลงซึ่งแปรผันตรงกับความหนาแน่นที่วัดได้ค่าความ

หนาแน่นต่ำจะมีความแข็งแรงน้อยลง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.378-2531 ที่กำหนดให้ความต้านแรงดัดแต่ละแผ่นต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะพาสคัล และมีค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 3 เมกะพาสคัล พบว่าความต้านแรงดัดมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ทุกอัตราส่วนที่อายุ 28 วัน และ ตัวอย่าง B0.05 และ B0.10 สามารถใช้งานได้ตั้งแต่อายุ 7 วัน แสดงให้เห็นว่าเถ้าขานอ้อยแบบหยาบร่วมกับหินฝุ่นในปริมาณที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมปกติในการผลิตกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นได้

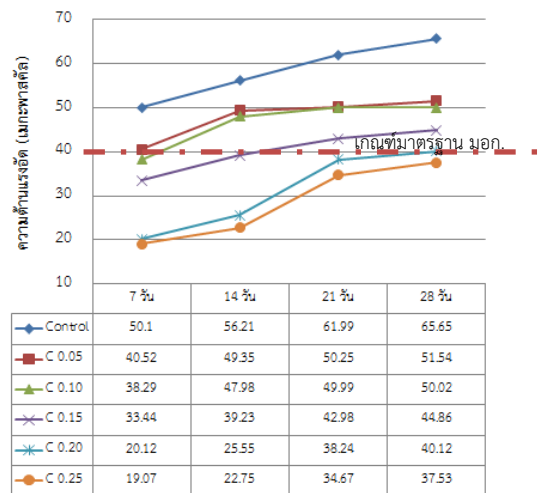


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดและอายุการบ่มที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.5 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทำการทดสอบที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 13 พบว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นความต้านแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับ [15] โดยคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตัวอย่างควบคุมให้ค่าความต้านแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 50.10 และ 65.65 เมกะพาสคัล ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อใช้เถ้าขานอ้อยแบบหยาบร่วมกับหินฝุ่น พบว่าความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีแนวโน้มลดลง โดยความต้านแรงอัดบางส่วนของตัวอย่างคอนกรีตเกิดจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตจาก

ปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบเคมีของเถ้าขานอ้อย [16] แม้กระนั้นก็ตาม ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทุกส่วนผสม (ยกเว้น C0.25) มีค่าความต้านแรงอัดมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.827-2565 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ที่กำหนดให้ความต้านแรงอัดแต่ละก้อนต้องไม่น้อยกว่า 35 เมกะพาสคัล และมีค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 40 เมกะพาสคัล

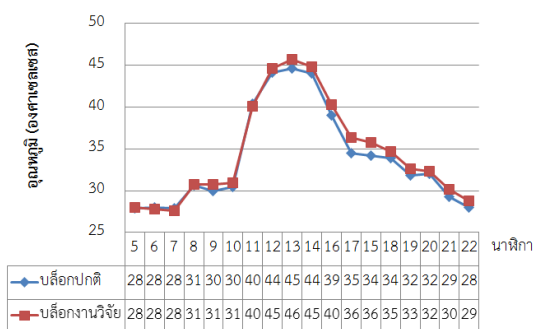


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงอัดและอายุการบ่มที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.6 ผลทดสอบการใช้งานจริง

ผลการทดสอบการปูพื้นในสถานที่จริง พบว่าสามารถปูพื้นได้เช่นเดียวกับบล็อกปูพื้นปกติทั่วไป มีความแข็งแรงทนทาน ไม่บิ่น แตกหักเสียหายระหว่างการปูพื้น ใช้อุปกรณ์การติดตั้งบล็อกปูพื้นได้แบบปกติ และผลการทดสอบอุณหภูมิที่ผิวหน้าแสดงดังรูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาการในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าของบล็อกปูพื้น ระหว่างเวลา 5.00-22.00 นาฬิกา โดยการวัดค่าเฉลี่ย 3 จุด ทุก 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ผลการดำเนินงานพบว่า อุณหภูมิผิวหน้าของบล็อกปูพื้นมีค่าสูงขึ้นตามเวลาที่แสงแดดส่องและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดช่วง 12.00-14.00 น. โดยมีค่าสูงถึง 45 องศาเซลเซียส

ทั้ง 2 ประเภทบล็อกปูพื้น หลังจากนั้นก็จะลดลงตามลำดับ และพบว่าบล็อกปูพื้นจากงานวิจัยมีอุณหภูมิที่ผิวหน้าสูงกว่าบล็อกปูพื้นปกติประมาณ 1 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมคอนกรีตแทนทรายและการใช้เถ้าขานอ้อยเป็นส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้เนื้อบล็อกปูพื้นแน่น ผิวหน้าของบล็อกปูพื้นเรียบเนียนและมีสีที่เข้มกว่าบล็อกปูพื้นปกติ จึงส่งผลให้ผิวหน้าบล็อกปูพื้นจากงานวิจัยดูดซับความร้อนดีขึ้น เป็นไปตามทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง มีผิวเรียบ และมีสีเข้ม จะดูดซับความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีสีอ่อนกว่า [17] ดังนั้นอุณหภูมิผิวหน้าบล็อกปูพื้นจากงานวิจัยจึงสูงกว่าบล็อกปูพื้นปกติ ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้น 1 องศาเซลเซียสนี้ เป็นผลดีในการนำไปใช้งานกับลานตากผลผลิตทางเกษตร โดยช่วยให้ผลผลิตทางการเกษตรที่ตากมีความแห้งเร็วขึ้นได้



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาการในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าบล็อกปูพื้นในเวลาต่าง ๆ

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

บล็อกปูพื้นลานตากผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวม ใช้เถ้าขานอ้อยแบบหยาบแทนที่หินฝุ่นบางส่วน และใช้เถ้าขานอ้อยแบบละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ ดังนี้

4.1 การใช้เถ้าขานอ้อยแบบหยาบร่วมกับหินฝุ่นเป็นมวลรวมในการผสมคอนกรีตบล็อกปูพื้นในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนที่เหมาะสมพิจารณาจากการใช้เถ้าขานอ้อยมากที่สุดเพื่อทำให้อุณหภูมิผิวหน้าบล็อกปูพื้น

สูงสุด โดยมีคุณสมบัติด้านการรับแรงผ่านเกณฑ์มาตรฐานนั้น คืออัตราส่วน ปูนซีเมนต์:ไฮดรอลิก: เถ้าขานอ้อยแบบละเอียด (ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325): เถ้าขานอ้อยแบบหยาบ (ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างตะแกรงเบอร์ 325): หินฝุ่น เท่ากับ 0.85: 0.15: 0.25: 4.75 มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น (อายุ 14 วัน) และ อัตราส่วน 0.85: 0.15: 0.20: 4.80 มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.827-2565 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (อายุ 28 วัน)

4.2 เมื่อแทนที่หินฝุ่นด้วยเถ้าขานอ้อยแบบหยาบในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดและความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ในทางกลับกันค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าขานอ้อยแบบหยาบมีขนาดใหญ่ มีรูพรุนสูง มีความสามารถในการดูดน้ำได้มาก เกิดช่องว่างในเนื้อของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ทำให้ส่งผลต่อความต้านแรงอัดและความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์ได้

4.3 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ ทำลานตากผลผลิตทางการเกษตรในพื้นที่ขนาดใหญ่ แบบถาวรที่ไม่ต้องการรื้อถอน ควรออกแบบส่วนผสมโดยใช้มวลรวมหยาบที่เป็นหินก่อสร้างเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งปรับวิธีการผลิตเป็นแบบคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับนำไปเทที่หน้างานแทนวิธีการทำบล็อกปูพื้น เพื่อความสะดวกรวดเร็วและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ เรื่อง “การใช้หินฝุ่นและเถ้าขานอ้อยที่เป็นของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จเพื่อทดแทนการใช้ทรายธรรมชาติและปูนซีเมนต์ สำหรับใช้ในงานลานคอนกรีตสำหรับตากผลผลิตทางการเกษตร” ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khamput P, Compressive strength of mortars mixing with fly ash and crushed dust. International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2007), 2007 November 21-23; The Swissôtel Le Concorde, Bangkok; 2007. p.452-5.
- [2] Menadi B, Kenai S, Khatib J, Ait-Mokhtar A. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. Construction and Building Materials. 2009;23(2):625-33.
- [3] Rajput S. P. An experimental study on crushed stone dust as fine aggregate in cement concrete. Materials Today: Proceedings. 2018;5(9):17540-47.
- [4] Chaikaew Ch, Wongprachum W. The compaction of concrete using dust stone substitute sand. The Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University. 2018;6(2):63-71. (in Thai).
- [5] Choosakul Ch, Yongsata K. Compressive strength of mortar using the mineral dust partial replacement in sand. Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal. 2018;10(2):324-32. (in Thai).
- [6] Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Journal of Cement and Concrete Composites. 2007;29:515.
- [7] Srinivasan R, Sathiya K. Experimental study on bagasse ash in concrete. International Journal of Service Learning in Engineering. 2010;5(2):60.
- [8] Singh N. B., Singh V. D., Rai S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. Journal of Cement and Concrete Research. 2000;30:1485.
- [9] Rukzon S, Chindaprasirt P. Utilization of bagasse ash in high strength concrete. Journal of Materials and Design. 2012;34:45
- [10] Aigbodion V.S., Hassan S.B., Ause T, Nyior G.B. Potential utilization of solid waste (bagasse ash). Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 2010;9:67-77.
- [11] Thai Industrial Standards Institute. TIS.2594-2556. Standard for hydraulic cement. Ministry of industry. Bangkok; 2013. (in Thai).
- [12] Thai Industrial Standards Institute. TIS.378-2531. Standard for concrete floor tile. Ministry of industry. Bangkok; 1988. (in Thai).
- [13] Thai Industrial Standards Institute. TIS. 827-2565. Standard for Interlocking concrete paving blocks. Ministry of industry. Bangkok; 2022. (in Thai).
- [14] Chatveera B, Promsawat P. Effect of bagasse ash replacement in fine aggregate on mechanical properties of plastering cement. Research and Development Journal. 2009;20(1):59-68.
- [15] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C. Cement Pozzolanic and concrete. 7thed. Bangkok: Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai).
- [16] Modania P O, Vyawahare M.R. Utilization of Bagasse Ash as a Partial replacement of fine aggregate in concrete. Procedia Engineering. 2013;51:25–9.
- [17] Khamput P, Tantavoranart S, Suweero K. Improving the thermal insulation properties of the concrete block with EVA plastic scrap. KKU-IENC2014, 2014 March 27-29; Pullman KhonKaen Raja Orchid Hotel; 2014. p.12.

การออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบโดยขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฟ

สิทธิศักดิ์ อันสนั่น¹ อัศนัย ทาเภา² และเรืองรุทธ์ ชีระโรจน์^{1*}

sitthisak.ans@gmail.com¹, assanai.ta@rmuti.ac.th², raungrut.c@msu.ac.th^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น

Received: February 7, 2024 Revised: May 25, 2024 Accepted: June 19, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฟ (WOA) สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบที่มีตัวแปรการออกแบบที่ไม่ต่อเนื่อง ตามมาตรฐาน AISC วิธีกำลังที่ยอมให้ (ASD) โดยเลือกใช้หน้าตัดเหล็กจากตารางเหล็กมาตรฐานเพื่อหาน้ำหนักที่น้อยที่สุดของโครงสร้าง ซึ่ง WOA มีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยเลียนแบบพฤติกรรมการล่าเหยื่อแบบพิเศษของวาฟที่เรียกว่า การพ่นฟองอากาศ โดยการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบนี้ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Visual Studio 2015 เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีนี้ จึงทำการทดสอบกับตัวอย่างโครงถักเหล็กในระนาบจำนวน 2 ตัวอย่างจากงานที่ผ่านมา ได้แก่ ตัวอย่างโครงถักเสาไฟฟ้า และโครงถักโครงหลังคา และเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA กับขั้นตอนวิธี HCA และวิธีการออกแบบตามประสบการณ์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่าวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบ โดยสามารถออกแบบได้น้ำหนักที่เบากว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11.04 ถึง 16.60

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฟ การออกแบบโครงถักเหล็ก การออกแบบที่เหมาะสม

Optimum Design of Plane Steel Truss using Whale Optimization Algorithm

Sittisak Ansanan¹, Assanai Tapao² and Raungrut Cheerarot^{1*}
sitthisak.ans@gmail.com¹, assanai.tapao@gmail.com², raungrut.c@msu.ac.th^{1*}

¹Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

²Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

Received: February 7, 2024 Revised: May 25, 2024 Accepted: June 19, 2024

Abstract

This paper aims to present the application of the Whale Optimization Algorithm (WOA) to design the optimal plane steel truss with discrete design variables according to the ASD methods by AISC standard. Angle sections are selected from the standard table of steel sections to find the minimum weight of structure. The WOA finds an optimal solution by simulating the special hunting behavior of whales called bubble-net. This optimal plane steel truss design is developed by Visual Studio 2015. To demonstrate the effectiveness of this algorithm, the WOA is tested by two examples of steel plane trusses from literature, namely transmission tower truss and roof truss. The results obtained by the WOA are compared with the HCA and the experience-based design method. The results show that the WOA outperforms the compared methods in finding the optimal solution. It can be designed with a lighter weight in the range of 11.04 to 16.60 %

Keywords: Whale optimization algorithm, Design of steel truss, Optimum design

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) เพื่อใช้ในแก้ปัญหาในทางวิศวกรรมที่มีข้อจำกัดและความซับซ้อน [1] ซึ่งขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic algorithm) จัดเป็นระบบปัญญาประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่ได้แรงบันดาลใจจากปรากฏการณ์ทางกายภาพ พฤติกรรมหรือแนวคิดการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต งานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากได้พิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพอย่างมากในการแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้าง [2] โดยขั้นตอนวิธีที่นิยมได้แก่ ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) ที่ได้แรงบันดาลใจจากทฤษฎีการวิวัฒนาการของดาร์วิน ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant colony optimization, ACO) ที่ได้แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการหาอาหารของมด และขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ที่เลียนแบบพฤติกรรมทางสังคมของกลุ่มสิ่งมีชีวิต [3] ซึ่งขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกจะเริ่มต้นกระบวนการด้วยการสร้างประชากรแบบสุ่มและค่อยๆ ปรับปรุงค่าความเหมาะสมโดยรวมของประชากรอย่างเป็นระบบ [2] และเนื่องจากกระบวนการสร้างประชากรแบบสุ่มนี้จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงค่าตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local optimum) ได้เป็นอย่างดี [4] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกเป็นที่นิยมอย่างมาก

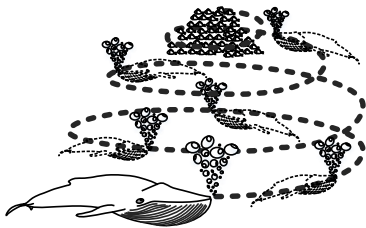
ขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของวาฬ (Whale optimization algorithm : WOA) [5] เป็นหนึ่งในขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกที่มีกระบวนการในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของวาฬหลังค่อม โดย Touna [6] ใช้ขั้นตอนวิธี WOA ในการแก้ปัญหาเศรษฐศาสตร์การจ่ายกำลังไฟฟ้า (Economic dispatch) โดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE 30-Bus ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ Mostafa และคณะ [7] นำขั้นตอนวิธี WOA มาใช้ในการแบ่งส่วนของดัดในภาพที่สร้างด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic resonance imaging, MRI) ซึ่งพบว่าผลการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี WOA มีความแม่นยำร้อยละ 96.75 เมื่อวัดด้วยดัชนีความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างและร้อยละ 97.50 เมื่อวัดด้วยดัชนีความคล้ายคลึงกัน Gautam และ Biswas [8] นำ

ขั้นตอนวิธี WOA มาใช้ในการตรวจจับขอบของภาพสิ่งรบกวนเกาส์แบบบวก (Additive gaussian noise images) ซึ่งผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคที่ใช้ในการตรวจจับขอบของภาพอื่นๆ และ Jiang และคณะ [9] ได้มีการพัฒนาขั้นตอนวิธี WOA และประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงถักที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดลองพบว่าขั้นตอนวิธี WOA ที่ได้รับการพัฒนามีประสิทธิภาพดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพที่สูงมากในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน และถึงแม้ว่า Jiang และคณะ เคยนำขั้นตอนวิธี WOA มาใช้กับการออกแบบโครงถักที่เหมาะสม แต่ในตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นไม่ได้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนตามมาตรฐานการออกแบบซึ่งเป็นเพียงการสมมติหน่วยแรงที่ยอมให้ของชิ้นส่วนเท่านั้น และหน้าตัดที่นำมาใช้นั้นไม่ใช่หน้าตัดจริง โดยกำหนดเพียงค่าพื้นที่หน้าตัดเท่านั้น และปราศจากคาร์ซีเมนต์เสริมที่ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนความเค้นที่ส่งผลต่อข้อจำกัดด้านความเค้นและกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโดยตรง จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ในการออกแบบโครงถักที่เหมาะสมตามมาตรฐานการออกแบบนั้นค่อนข้างซับซ้อน และงานวิจัยที่เคยนำเสนอไม่สามารถนำผลการออกแบบไปใช้ในการก่อสร้างได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี WOA ในการออกแบบโครงถักเหล็กในระนาบที่มีตัวแปรการออกแบบที่ไม่ต่อเนื่อง ตามมาตรฐาน AISI วิธีกำลังที่ยอมให้ (ASD) [10] เพื่อหาน้ำหนักที่น้อยที่สุดของโครงสร้าง โดยใช้หน้าตัดเหล็กฉากจากตารางเหล็กมาตรฐาน และใช้ตัวอย่างในการออกแบบจำนวน 2 ตัวอย่างจากงานที่เกี่ยวข้อง [11-12] และทำการเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA กับขั้นตอนวิธีการปีนเขา (Hill climbing algorithm, HCA) และวิธีการออกแบบตามประสบการณ์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีนี้ในการออกแบบโครงถักเหล็กในระนาบที่เหมาะสม

2. ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ

Mirjalili และ Lewis [5] ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ (WOA) ครั้งแรกในปี ค.ศ. 2016 โดยได้แนวคิดมาจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม (Humpback whales) ที่ชอบล่าฝูงกุ้งและฝูงปลาบริเวณผิวน้ำด้วยวิธีการล่าที่พิเศษที่เรียกว่าการพ่นฟองอากาศ (Bubble-net) ซึ่งการหาอาหารวิธีนี้สามารถทำได้โดยการสร้างฟองอากาศที่มีลักษณะเฉพาะตามแนววงกลมเพื่อต้อนฝูงปลาและกุ้งให้มาอยู่รวมกันที่ผิวน้ำดังรูปที่ 1 จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขั้นตอนวิธี WOA ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 พฤติกรรมการพ่นฟองอากาศของวาฬหลังค่อม [5]

2.1 การล้อมเหยื่อ (Encircling prey) ในขั้นตอนวิธีนี้จะสมมติว่าคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบันคือเหยื่อที่เป็นเป้าหมายหรือค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม โดยหลังจากการกำหนดตัวแทนการค้นหาค่าที่ดีที่สุดแล้ว ตัวแทนการค้นหาค่าอื่นจะพยายามปรับปรุงตำแหน่งของตนไปยังตัวแทนการค้นหาค่าที่ดีที่สุด ซึ่งพฤติกรรมที่กล่าวมาสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (1)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (2)$$

เมื่อ X^* คือ ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุด $\bar{X}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบัน t คือ รอบการทำซ้ำปัจจุบัน $\bar{A}, \bar{D}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3) และ (4)

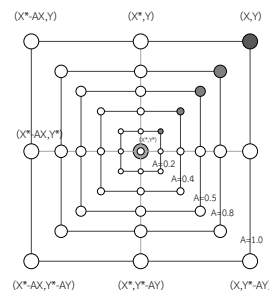
$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r} - \bar{a} \quad (3)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r} \quad (4)$$

โดยที่ $\bar{a}$ คือ ค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในทุกรอบการทำซ้ำ และ $\bar{r}$ คือ ค่าสุ่มที่อยู่ในช่วง $[0,1]$

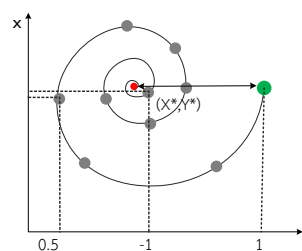
2.2 วิธีการโจมตีโดยการพ่นฟองอากาศ (Bubble-net attacking method) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพฤติกรรมพ่นฟองอากาศของวาฬหลังค่อมมีการออกแบบให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงไว้ 2 วิธีดังนี้

2.2.1 กลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัว (Shrinking encircling mechanism) ซึ่งวิธีนี้สามารถทำได้โดยการลดค่า $\bar{a}$ ในสมการที่ (3) โดยช่วงความผันผวนของค่าสัมประสิทธิ์ $\bar{A}$ จะลดลงด้วย ซึ่งกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ $\bar{A}$ คือค่าสุ่มในช่วง $[-a, a]$ โดยที่ $\bar{a}$ จะลดลงจาก 2 ถึง 0 ในทุกรอบการทำซ้ำ และค่าสัมประสิทธิ์ $\bar{A}$ มีค่าอยู่ในช่วง $[-1,1]$ ซึ่งตำแหน่งใหม่ของตัวแทนการค้นหาค่าสามารถกำหนดได้ทุกที่ระหว่างตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ดังรูปที่ 2 ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เป็นไปได้จาก (X,Y) ไปยัง (X^*,Y^*) เมื่อ $\bar{A}$ มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$



รูปที่ 2 กลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัว [5]

2.2.2 การปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว (Spiral updating position) โดยขั้นตอนแรกจะคำนวณระยะห่างและสร้างสมการแบบเกลียว ระหว่างตำแหน่งของวาฬและเหยื่อเพื่อเลียนแบบการเคลื่อนที่แบบเกลียวของวาฬหลังค่อมซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 และคำนวณได้ดังสมการที่ (5) และ (6)



รูปที่ 3 กลไกการปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว [5]

$$\bar{X}(t+1) = \bar{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) \quad (5)$$

$$\bar{D} = |\bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)| \quad (6)$$

โดยที่ b คือ ค่าคงที่สำหรับกำหนดรูปร่างของเกลียวลอการิทึม (Logarithm) l คือ ค่าสุ่มระหว่าง -1 ถึง 1

โดยทั่วไปวาทหลังค่อมจะว่ายน้ำรอบเหยื่อเป็นวงกลมที่ค่อยๆ หดตัวและว่ายน้ำเป็นเกลียวในเวลาเดียวกัน ซึ่งในการสร้างแบบจำลองที่เกิดขึ้นพร้อมกันนี้ มีความเป็นไปได้ประมาณร้อยละ 50 ที่จะเลือกระหว่างกลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัวกับการปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

เมื่อ $p < 0.5$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (7)$$

เมื่อ $p \geq 0.5$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) \quad (8)$$

เมื่อ p คือ ค่าสุ่มตั้งแต่ 0 ถึง 1

2.2.3 การค้นหาเหยื่อ (Search for prey)

วาทหลังค่อมจะค้นหาเหยื่อแบบสุ่มตามตำแหน่งของกันและกัน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) และ (10) ซึ่งกลไกนี้เป็นกลไกสำหรับการค้นหาทางกว้าง (Global search) ของขั้นตอนวิธี WOA

$$\bar{D} = \bar{C} \cdot \bar{X}_{rand} - \bar{X} \quad (9)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_{rand} - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (10)$$

เมื่อ $\bar{X}_{rand}$ คือ ตำแหน่งที่ได้จากการสุ่ม

3. ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน AISC

ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานการออกแบบตามข้อกำหนดของ AISC วิธี ASD [10] ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สภาวะการใช้งาน (Service state) กล่าวคือแรงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอิลาสติกภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ต้องมีค่าไม่เกินค่าความต้านทานระบุของหน้าตัด (Nominal resistance) ทหารด้วยตัวคูณความปลอดภัย (Factor of safety) ดังสมการที่ (11)

$$Q_a \leq R_n / \Omega \quad (11)$$

เมื่อ Q_a คือ แรงต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน R_n คือ ความต้านทานระบุของหน้าตัด และ Ω คือ ตัวคูณความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.67

ในการออกแบบโครงสร้าง จะพิจารณาให้จุดต่อระหว่างองค์อาคารเป็นแบบหมุน (Hinge joint) ดังนั้นแรงภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจึงมีเฉพาะ แรงดึงและแรงอัดเท่านั้น ซึ่งทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดึงและแรงอัดมีดังต่อไปนี้

3.1 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดึง การวิบัติเนื่องจากแรงดึงในองค์อาคารรับแรงดึงอาจเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ การครากบนพื้นที่หน้าตัดรวม และการขาดบนหน้าตัดสุทธิประสิทธิภาพ ณ จุดต่อ เพื่อให้สอดคล้องกับตัวอย่างการออกแบบที่นำมาเปรียบเทียบจากงานที่เกี่ยวข้อง [11-12] ที่ไม่มีการพิจารณาออกแบบจุดต่อ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่พิจารณาออกแบบจุดต่อ และกำหนดให้การวิบัติขององค์อาคารไม่เกิดการขาดบนหน้าตัดสุทธิประสิทธิภาพ กำลังรับแรงดึงเนื่องจากการครากแสดงดังสมการที่ (12)

$$T_n = F_y A_g \quad (12)$$

เมื่อ T_n คือ กำลังรับแรงดึงของหน้าตัด F_y คือ หน่วยแรงครากของชิ้นส่วน และ A_g คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน

3.2 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัด กำลังรับแรงอัดของหน้าตัดมีค่าดังสมการที่ (13)

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (13)$$

เมื่อ A_g คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน F_y คือ หน่วยแรงครากของชิ้นส่วน F_{cr} คือ หน่วยแรงอัดวิกฤตซึ่งคำนวณได้จากสมการ (14)

$$F_{cr} = \begin{cases} 0.877 F_e & , KL/r > 4.71 \sqrt{E/F_y} \\ \left(\frac{F_y}{0.658} \right) F_y & , KL/r \leq 4.71 \sqrt{E/F_y} \end{cases} \quad (14)$$

เมื่อ E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่น L คือ ความยาวของชิ้นส่วน F_e คือ หน่วยแรงอัดอิลาสติกจากสมการของออยเลอร์มีค่าเท่ากับ $\pi^2 E / (KL/r)^2$ และ K คือ สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิภาพซึ่งเท่ากับ 1 สำหรับโครงสร้าง

4. สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายของการศึกษานี้คือ ผลรวมของน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (15)

$$\text{minimize } W = \sum_{i=1}^{nm} A_i \rho_i L_i \quad (15)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักรวมของโครงสร้าง A คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณ ρ คือหน่วยน้ำหนักของเหล็กรูปพรรณ L คือ ความยาวของเหล็กรูปพรรณ และ nm คือ จำนวนชิ้นส่วนของเหล็กรูปพรรณในโครงสร้าง

5. ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาวในการออกแบบโครงสร้าง

ในขั้นตอนแรก จะทำการเตรียมตัวแปรการออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาให้ขนาดหน้าตัดเหล็กเป็นตัวแปรการออกแบบ โดยทำการจัดเรียงหน้าตัดจากน้อยไปมากตามน้ำหนัก และกำหนดค่าหมายเลข (ID) ให้กับแต่ละหน้าตัดโดยเริ่มจากหมายเลข 1 จนถึง n (เมื่อ n คือจำนวนหน้าตัด) จากนั้นในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสม ตัวแปรการออกแบบหรือขนาดหน้าตัดของเหล็กจะเปรียบเสมือนตำแหน่งของวาว ดังนั้นในการหาค่าตำแหน่งใหม่ของวาวตามสมการการค้นหาค่า ID ของแต่ละหน้าตัดแทนตำแหน่งของวาว โดยค่าที่คำนวณได้จะต้องไม่น้อยกว่า 1 และไม่เกินค่า ID ที่มากที่สุด หากค่าที่ได้น้อยกว่า 1 หรือมากกว่าค่า ID ที่มากที่สุด ให้ใช้ค่าเท่ากับ 1 และเท่ากับค่า ID ที่มากที่สุด ตามลำดับ

ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธี WOA แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.1 กำหนดจำนวนประชากรของวาวเริ่มต้น และจำนวนรอบสูงสุด

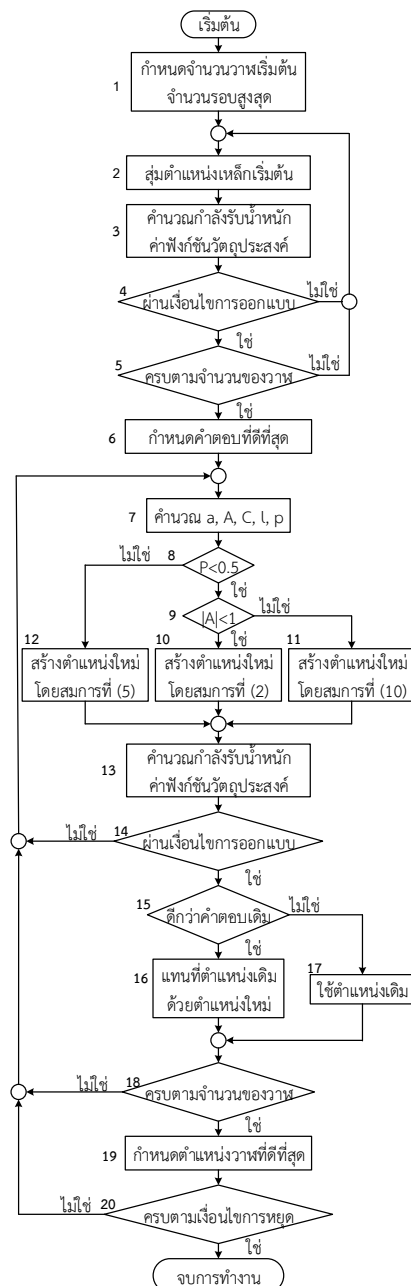
5.2 สุ่มหน้าตัดเหล็กรูปพรรณเริ่มต้นจากตารางเหล็ก

5.3 ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง คำนวณกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง

5.4 ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบหรือไม่ หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.2 อีกครั้ง

5.5 ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนประชากรของวาวที่กำหนดไว้หรือไม่ หากไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.2 อีกครั้ง

5.6 กำหนดให้วาวที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (น้ำหนักของโครงสร้างน้อยที่สุด) เป็นวาวที่มีคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธี WOA ในการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม

- 5.7 คำนวณค่า a , A , C , l , และ p
- 5.8 ตรวจสอบเงื่อนไข $p < 0.5$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.9 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.12
- 5.9 ตรวจสอบเงื่อนไข $|A| < 1$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.10 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.11
- 5.10 สร้างหน้าต่างใหม่ของเหล็ก โดยใช้กลยุทธ์การล้อมเหยื่อแบบหัดตัวตามสมการที่ (2)
- 5.11 สร้างหน้าต่างใหม่ของเหล็ก โดยใช้การสุ่มตำแหน่งเหล็กขึ้นมาใหม่ตามสมการที่ (10)
- 5.12 สร้างหน้าต่างใหม่ของเหล็ก โดยใช้กลยุทธ์การล้อมเหยื่อแบบเกลียวตามสมการที่ (5)
- 5.13 ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง คำนวณกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง
- 5.14 ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบหรือไม่ หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.7 อีกครั้ง
- 5.15 ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้ดีกว่าคำตอบเดิมหรือไม่ หากใช่ ให้ไปยังขั้นตอนที่ 5.16 แต่หากไม่ใช่ ให้ไปยังขั้นตอนที่ 5.17
- 5.16 แทนที่หน้าต่างเหล็กเดิมด้วยหน้าต่างเหล็กใหม่
- 5.17 ใช้หน้าต่างเหล็กเดิม (ไม่ทำการแทนที่หน้าต่างเหล็ก)
- 5.18 ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนประชากรของวาวที่กำหนดไว้หรือไม่ หากไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.7 อีกครั้ง
- 5.19 กำหนดให้วาวที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (น้ำหนักของโครงสร้างน้อยที่สุด) เป็นวาวที่มีคำตอบที่ดีที่สุด
- 5.20 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด หากจำนวนรอบการทำซ้ำครบตามจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ ขั้นตอนวิธีจะหยุดการทำงาน แต่หากไม่ครบจะทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.7 อีกครั้ง

6. ตัวอย่างและผลการทดสอบ

สำหรับขั้นตอนวิธี WOA ถูกทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 หน่วย

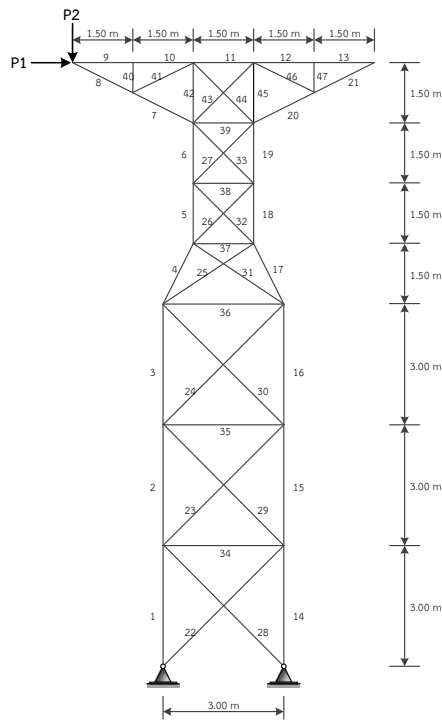
ประมวลผลกลาง (CPU) Intel Core i5-760 2.80 GHz และหน่วยความจำแรม (RAM) 4.00 GB ซึ่งใช้ภาษา Visual basic ในการพัฒนา โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวอย่างการออกแบบที่เป็นตัวแทนของปัญหาการออกแบบโครงถักในระนาบจากงานที่เกี่ยวข้อง [11-12] จำนวน 2 ตัวอย่าง ประกอบด้วย โครงถักเสาไฟฟ้า และโครงถักโครงหลังคา ซึ่งเป็นโครงถักที่มีขนาดใหญ่ มีจำนวนชิ้นส่วนมาก และมีข้อจำกัดในการออกแบบที่ซับซ้อน และจะกำหนดหน้าต่างสำหรับออกแบบจากตารางเหล็กฉากจำนวน 59 หน้าตัด โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 25 ครั้ง เพื่อหาค่าสถิติของการออกแบบที่เหมาะสมและเปรียบเทียบการออกแบบที่เหมาะสมที่ได้รับจากขั้นตอนวิธี WOA กับ ขั้นตอนวิธีการปีนเขา (Hill climbing algorithm, HCA) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่คล้ายกับการปีนเขาของนักปีนเขา [11] และผลการออกแบบของ Mongkol [12] ที่เป็นวิธีการออกแบบตามประสบการณ์

6.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงถักเสาไฟฟ้า

โครงถักเสาไฟฟ้า 47 ชิ้นส่วน มีขนาดและความยาวดังรูปที่ 5 มีแรง P_1 และ P_2 กระทำเท่ากับ 3000 กก. และ 7000 กก. ตามลำดับ โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (E) 2×10^6 กก./ตร.ซม. และหน่วยแรงคราก (F_y) 2500 กก./ตร.ซม. โดยจัดกลุ่มของชิ้นส่วนออกเป็น 4 กลุ่ม ดังตารางที่ 1 ซึ่งกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 คือชิ้นส่วนหลัก (Main leg) กลุ่มที่ 3 คือชิ้นส่วนในแนวทแยง (Diagonal member) และกลุ่มที่ 4 คือชิ้นส่วนในแนวนอน (Horizontal member) แต่ละชิ้นส่วนภายในกลุ่มจะใช้หน้าต่างขนาดเดียวกัน ดังนั้นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดจึงมีค่าเท่ากับ $59^4 = 1.21 \times 10^7$ คำตอบ เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบ [11] ในตัวอย่างนี้จึงไม่คำนึงถึงข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ด้านข้างของจุดต่อ

เพื่อหาพารามิเตอร์ (จำนวนประชากรของวาว และจำนวนรอบการทำซ้ำ) ของขั้นตอนวิธี WOA ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงถักโครงถัก จะกำหนดจำนวนประชากรของวาวเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตัว กำหนดจำนวนรอบการทำซ้ำสูงสุดเท่ากับ 200 รอบ เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะการลู่เข้า และทำการทดสอบจำนวน 25 ครั้ง เพื่อหาค่าสถิติ (น้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการ

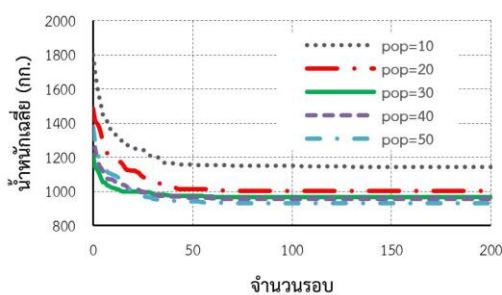
ออกแบบที่เหมาะสม โดยลักษณะการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของจำนวนประชากรรวม (pop) ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฉลี่ยของโครงสร้างกับจำนวนรอบการทำซ้ำ



รูปที่ 5 โครงถักเสาไฟฟ้า

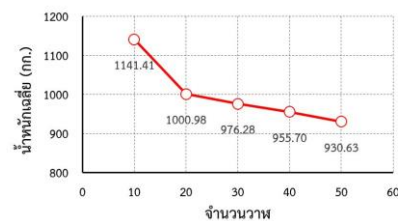
ตารางที่ 1 กลุ่มของชิ้นส่วนโครงถักเสาไฟฟ้า

กลุ่มที่	หมายเลขชิ้นส่วน
1	1, 2, 3, 14, 15, 16
2	4, 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19, 20, 21
3	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 41, 43, 44, 46
4	9, 10, 11, 12, 13, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 45, 47

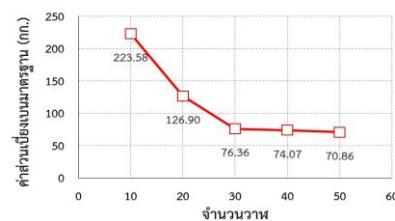


รูปที่ 6 การเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1

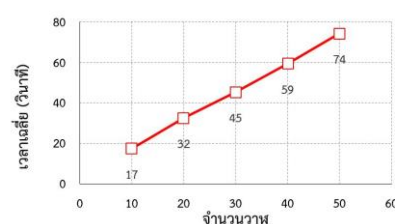
จากรูปที่ 6 พบว่าเมื่อจำนวนประชากรรวมเพิ่มขึ้น ขั้นตอนวิธี WOA มีอัตราการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยได้เร็วขึ้น และมีแนวโน้มที่เข้าสู่คำตอบที่ดีกว่า เพราะหากเพิ่มจำนวนประชากร จะทำให้โอกาสในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมีมากขึ้น เนื่องจากคุณลักษณะที่เป็นแบบสุ่มของขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกประชากรการค้นหามจะถูกส่งกระจายไปยังพื้นที่การค้นหาได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น ดังนั้นโอกาสในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมจึงเพิ่มมากขึ้นและมีอัตราการเข้าสู่ที่เร็วขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mirjalili และ Lewis [5] ที่พบว่า เมื่อประชากรการค้นหามีจำนวนมากขึ้น การประมาณค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดก็ยิ่งดีขึ้นด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเวลาที่ใช้ในการทดสอบกับจำนวนประชากรรวมต่างๆแสดงดังรูปที่ 7 - 9 ตามลำดับ



รูปที่ 7 น้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ยของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 8 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 9 เวลาที่ใช้ในการทดสอบเฉลี่ยของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1

จากรูปที่ 7 - 9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนประชากรวาทเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบจะเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าเหล่านี้พบว่าเมื่อประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว ขั้นตอนวิธี WOA พบน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีความเหมาะสม และยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมอีกด้วย โดยค่าน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค้นพบมากกว่าค่าที่ค้นพบจากการกำหนดประชากรวาทเท่ากับ 50 ตัว ร้อยละ 4.90 และ 7.76 ตามลำดับ ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการทดสอบเมื่อกำหนดจำนวนประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว มีค่าน้อยกว่าเวลาที่ใช้เมื่อประชากรวาทเท่ากับ 50 ตัว อย่างมาก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว นั้นเพียงพอแล้วในการออกแบบโครงสร้างประเภทนี้ อีกทั้งยังลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6 ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้จำนวนประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว และใช้จำนวนรอบการทำงานซ้ำสูงสุด 100 รอบ

ค่าสถิติของการออกแบบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA และขนาดหน้าตัดเหล็กที่เหมาะสมที่สุดของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 2 จากตารางพบว่าขั้นตอนวิธี WOA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ค่าตอบเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 870.80, 976.28 และ 76.36 กก. ตามลำดับ โดยใช้จำนวนรอบการทำงานซ้ำเท่ากับ 100 รอบ หรือคิดเป็นจำนวนครั้งที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเท่ากับ 3000 ครั้ง ซึ่งขั้นตอนวิธี WOA ค้นพบคำตอบที่มีน้ำหนักน้อยกว่าขั้นตอนวิธี HCA [11] ที่ออกแบบตามข้อกำหนด AISI วิธีกำลังที่ยอมให้ (ASD) [10] ซึ่งเหมือนกับข้อกำหนดการออกแบบที่ใช้กับงานวิจัยนี้ ร้อยละ 16.60 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพดีกว่าขั้นตอนวิธี HCA ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ คือ ขั้นตอนวิธี WOA มีกลไกในการเปลี่ยนค่าคำตอบใหม่ (ขั้นตอนการค้นหาเหยื่อ) เพื่อลดโอกาสในการติดอยู่ที่จุดที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local optimum) ของคำตอบที่ค้นพบ แต่ขั้นตอนวิธี HCA ไม่มีกลไกนี้ ดังนั้นขั้นตอนวิธี HCA จึงไม่สามารถหลบหนีจากจุดที่เหมาะสมเฉพาะแห่งได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Morteza KT และคณะ [13] ที่พบว่า

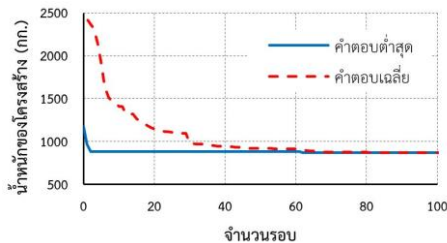
ขั้นตอนวิธี HCA เป็นวิธีการที่ดีสำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง แต่ไม่สามารถรับประกันได้ว่าขั้นตอนวิธีนี้จะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Global optimum) อีกทั้งขั้นตอนวิธี WOA เป็นวิธีการที่อิงตามประชากร (Population base algorithm) ที่มีการสุ่มคำตอบเริ่มต้นที่หลากหลาย แต่ขั้นตอนวิธี HCA เป็นขั้นตอนวิธีคำตอบเชิงเดี่ยว (Single solution base algorithm) ที่มีเพียงคำตอบเริ่มต้นเพียงค่าเดียว ดังนั้นขั้นตอนวิธี WOA จึงมีโอกาสมากกว่าที่จะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี HCA จะขึ้นอยู่กับคำตอบเริ่มต้นดังที่แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดที่ถูกค้นพบโดยขั้นตอนวิธี WOA ในทุกกลุ่มชิ้นส่วน มีขนาดเล็กกว่าขนาดหน้าตัดที่ขั้นตอนวิธี HCA ค้นพบ ดังนั้นจึงส่งผลให้น้ำหนักของโครงสร้างของขั้นตอนวิธี WOA น้อยกว่าขั้นตอนวิธี HCA โดยเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA กับตัวอย่างนี้เท่ากับ 45.21 วินาที ที่จำนวนวาท 30 ตัว

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 โครงถักเสาไฟฟ้า

กลุ่มที่	HCA[13]	งานวิจัยนี้(WOA)
1	L125x75x7	L100x100x7
2	L125x75x10	L100x100x7
3	L100x75x7	L80x80x6
4	L75x75x6	L70x70x6
น้ำหนัก (กก.)	1044.15	870.80
ค่าเฉลี่ย (กก.)	-	976.28
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก.)	-	76.36
ร้อยละความประหยัด	-	16.60

ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA แสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งแสดงคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุดของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำงาน และคำตอบเฉลี่ยที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างเฉลี่ยของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำงาน จากรูปพบว่าขั้นตอนวิธี WOA ลู่เข้า

สู่คำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็ว โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบการทำซ้ำที่ 62 และค่าเฉลี่ยของคำตอบที่เหมาะสมของกลุ่มประชากรในแต่ละรอบการทำซ้ำลดลงอย่างต่อเนื่องและเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมในที่สุด ซึ่งเป็นไปตามกลไกการปรับปรุงคำตอบของขั้นตอนวิธีนี้



รูปที่ 10 การเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA ในตัวอย่างที่ 1 โครงถักเสาไฟฟ้า

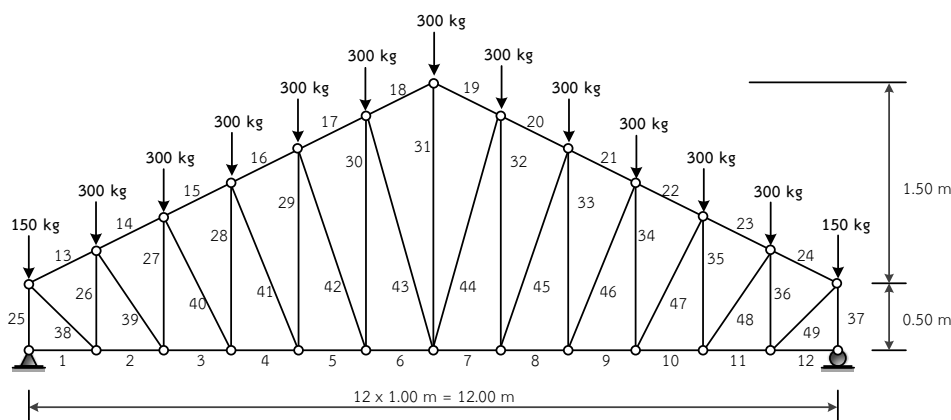
6.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงถักโครงหลังคา

โครงถักโครงหลังคามีขนาดของชิ้นส่วนและแรงที่มากระทำแสดงดังรูปที่ 11 โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (E) 2.1×10^6 กก./ตร.ซม. หน่วยแรงคราก (F_y) 2500 กก./ตร.ซม. และทำการจัดกลุ่มของโครงสร้างออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนหมายเลข 1-24 (Top chord, bottom chord) เป็นกลุ่มที่ 1 ชิ้นส่วนหมายเลข 24-37 (Vertical member) เป็นกลุ่มที่ 2 และชิ้นส่วนหมายเลข 38-49 (Diagonal member) เป็นกลุ่มที่ 3 โดยแต่ละชิ้นส่วนภายในกลุ่มจะใช้หน้าตัดเหล็กชนิดเดียวกัน ดังนั้นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดจึงเท่ากับ $59^3 = 2.05 \times 10^5$ คำตอบ ในตัวอย่างนี้ นอกจากพิจารณาให้แต่ละชิ้นส่วนต้องสามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้นตามมาตรฐานการออกแบบ

แล้ว ยังคำนึงถึงข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของจุดต่ออีกด้วยซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 3.33 ซม.

จากตัวอย่างการออกแบบโครงถักเสาไฟฟ้าก่อนหน้าที่มีตัวแปรการออกแบบและข้อจำกัดการออกแบบที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างนี้ พบว่าเมื่อประชากรราวเท่ากับ 30 ตัว ขั้นตอนวิธี WOA พบน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีความเหมาะสม และยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมอีกด้วย ดังนั้น ในตัวอย่างการออกแบบโครงถักโครงหลังคาที่ทำการศึกษาในส่วนนี้จะกำหนดใช้ประชากรราวเท่ากับ 30 ตัว เช่นเดียวกับตัวอย่างการออกแบบโครงถักก่อนหน้า ค่าสถิติของการออกแบบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA และขนาดหน้าตัดเหล็กที่เหมาะสมที่สุดของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 3 จากตารางพบว่าขั้นตอนวิธี WOA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้เท่ากับ 121.53 กก. ซึ่งน้อยกว่าผลการออกแบบของ Mongkol [12] ที่เป็นวิธีการออกแบบตามประสบการณ์ร้อยละ 11.04 โดยค่าเฉลี่ยและ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 130.83 และ 13.39 กก. ตามลำดับ มีจำนวนรอบการทำซ้ำเท่ากับ 100 รอบ หรือคิดเป็นจำนวนครั้งที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเท่ากับ 3000 ครั้ง และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในตัวอย่างนี้เท่ากับ 44.45 วินาที

เนื่องจากผลการออกแบบของ Mongkol ใช้ข้อกำหนด AISI วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress design) [12] ในการออกแบบ ซึ่งมีสมการที่ใช้

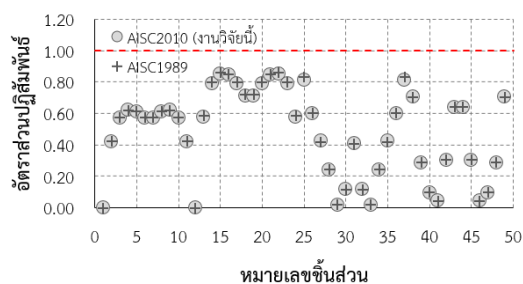


รูปที่ 11 โครงถักโครงหลังคา

ในการคำนวณกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนที่แตกต่างจากข้อกำหนด AISC วิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable strength design) [10] ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และอาจส่งผลต่อผลการออกแบบที่เหมาะสม ดังนั้น ในส่วนนี้จึงทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในที่เกิดขึ้นและกำลังรับแรงของแต่ละชิ้นส่วนของผลการออกแบบที่เหมาะสมที่ค้นพบโดยขั้นตอนวิธี WOA กับข้อกำหนดทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 12 โดยพบว่าค่าของอัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ของทุกชิ้นส่วนที่ออกแบบตามข้อกำหนดทั้งสองมีค่าไม่เกิน 1 ซึ่งหมายความว่า หน้าตัดสามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ และจากรูปยังแสดงให้เห็นอีกว่า ค่าอัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ของแต่ละชิ้นส่วนที่ออกแบบตามข้อกำหนดทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ความแตกต่างของข้อกำหนดการออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้ ไม่มีผลต่อผลการออกแบบที่เหมาะสมที่ขั้นตอนวิธี WOA ค้นพบ

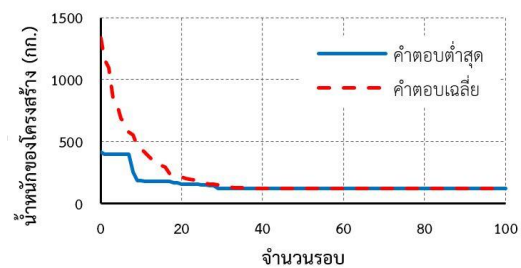
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 2 โครงถักโครงหลังคา

กลุ่มที่	Mongkol [12]	งานวิจัยนี้(WOA)
1	L50x50x4	L45x45x4
2	L40x40x3	L25x30x3
3	L40x40x3	L40x40x3
น้ำหนัก (กก.)	136.61	121.53
ค่าเฉลี่ย (กก.)	-	130.83
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(กก.)	-	13.39
ร้อยละความประหยัด	-	11.04



รูปที่ 12 อัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ของคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA ในตัวอย่างที่ 2

ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งแสดงคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุดของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำซ้ำ และคำตอบเฉลี่ยที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างเฉลี่ยของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำซ้ำ จากรูปแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธี WOA ลู่เข้าสู่คำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วและค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่เหมาะสมของกลุ่มประชากรในแต่ละรอบการทำซ้ำลดลงอย่างต่อเนื่องและลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมในที่สุด โดยขั้นตอนวิธี WOA เริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบการทำซ้ำที่ 40



รูปที่ 13 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA ในตัวอย่างที่ 2 โครงถักโครงหลังคา

7. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี WOA ในการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบ ตามมาตรฐาน AISC วิธีกำลังที่ยอมให้ เพื่อหาน้ำหนักรวมของโครงสร้างที่น้อยที่สุด โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อจำนวนประชากรวาทเพิ่มขึ้น ขั้นตอนวิธี WOA มีแนวโน้มในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้ดีขึ้น และค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเร็วขึ้น) แต่เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบจะเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้พบว่าจำนวนประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว เป็นจำนวนประชากรที่มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ และผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นอีกว่า ขั้นตอนวิธี WOA สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงถักเหล็กในระนาบที่มีตัวแปรการออกแบบที่ไม่ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งขั้นตอน

วิธี WOA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่มีน้ำหนักเบากว่า ขั้นตอนวิธี HCA และผลการออกแบบของ Mongkol ร้อยละ 16.60 และ 11.04 ตามลำดับ

ถึงแม้ว่าขั้นตอนวิธี WOA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่มีน้ำหนักเบากว่าขั้นตอนวิธี HCA แต่ขั้นตอนวิธี WOA ใช้จำนวนรอบการทำซ้ำหรือจำนวนครั้งในการวิเคราะห์โครงสร้างมากกว่า สิ่งนี้ทำให้ขั้นตอนวิธี WOA ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมนานกว่า ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาหรือปรับปรุงขั้นตอนวิธี WOA ให้ใช้เวลาน้อยลงในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม เพื่อให้การแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Skandar H, Sadollah A, Bahreinejad A, Hamdi M. Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers & Structures*. 2012;110:151-66.

[2] Farshchin M, Maniat M, Camp CV, Pezeshk S. School based optimization algorithm for design of steel frames. *Engineering Structures*. 2018;171:326-35.

[3] Camp CV, Farshchin M. Design of space trusses using modified teaching–learning based optimization. *Engineering Structures*. 2014;62:87-97.

[4] Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*. 2014;69:46-61.

[5] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*. 2016;95:51-67.

[6] Touma HJ. Study of the economic dispatch problem on IEEE 30-bus system using whale optimization algorithm. *International journal of engineering technology and sciences (IJETS)*. 2016;5(1):11-8.

[7] Mostafa A, Hassanien AE, Houseni M, Hefny H. Liver segmentation in MRI images based on whale optimization algorithm. *Multimedia Tools and Applications*. 2017;76(23):24931-54.

[8] Gautam A, Biswas M. Whale optimization algorithm based wedge detection for noisy image. *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*; 2018 June 14-15; Madurai, India: IEEE; 2019

[9] Fengguo J, Lutong W, Lili B. An improved whale algorithm and its application in truss optimization. *Journal of Bionic Engineering*. 2021;18:721-32.

[10] AISI, “Specifications for Structural Steel Buildings”, Chicago, Illinois, American Institute of Steel Construction, June 2010.

[11] Sunisa T, Thaksin T. Optimum design of plane steel truss using heuristic. *Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand*. 2011;22(3):25-30. (in Thai)

[12] Mongkol J. Structural Steel Design (Allowable Stress Design Method) . Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2005. (in Thai)

[13] Morteza KT, Seyed MK, Rahele Z, Fakhriye H. Improved hill climbing and simulated annealing algorithms for size optimization of trusses. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2013;7(2):135-8.

การวางแผนการผลิตด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีศึกษาท่อเหล็กที่เป็นส่วนประกอบช่วงล่างของรถยนต์

รวินท์ธันต์ ทัพย์เสนา¹ เอกวิศว์ สงเคราะห์¹ สุภัทรา หมูป่ารัง² วรณิศา นุชคุ้ม²
พัชระ กัญจนกาญจน์³ และบดินเดช จูมณีนี^{3*}

rawintanath.t@rmutsb.ac.th¹, ekawit.s@rmutsb.ac.th¹, supatthta12770@gmail.com²,
wannisa.nu@rmuti.ac.th², patchara.k@rmutsb.ac.th³, brodindech.j@rmutsb.ac.th^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

³สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Received: April 3, 2024 Revised: June 6, 2024 Accepted: June 19, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอวิธีการวางแผนการผลิตเพื่อลดเวลาการผลิตของกระบวนการผลิตท่อเหล็กที่เป็นส่วนประกอบช่วงล่างของรถยนต์ โดยศึกษาที่กระบวนการตัดผิวและกระบวนการเคลือบผิวซึ่งแต่ละกระบวนการมีหลายเครื่องจักรแบบขนาน กระบวนการตัดผิวมีเงื่อนไขที่อัตราการผลิตที่แตกต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเคลือบผิวมีเงื่อนไขของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตที่แตกต่างกัน การวางแผนการผลิตในแต่ละกระบวนการมีความซับซ้อนจากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และคำสั่งซื้อของลูกค้า ปัจจุบันการวางแผนการผลิตอาศัยประสบการณ์ของผู้วางแผน ส่งผลให้เวลาในการผลิตของกระบวนการตัดผิวและกระบวนการเคลือบผิวสูง ดังนั้นบทความนี้จึงได้หาวิธีการวางแผนการผลิตที่เหมาะสมเพื่อลดเวลาในการผลิต โดยพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการวางแผนการผลิตที่เหมาะสมของท่อเหล็กที่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตในกระบวนการตัดผิวและกระบวนการเคลือบผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในการผลิตของกระบวนการตัดผิวและกระบวนการเคลือบผิว ผลจากการประยุกต์ข้อมูลและแก้ปัญหาโดยใช้ Microsoft Excel Solver พบว่าเวลาการผลิตของกระบวนการตัดผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 11.77 และเวลาการผลิตของกระบวนการเคลือบผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 13.34

คำสำคัญ: การวางแผนการผลิต ท่อเหล็ก ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

Production Planning using Mathematical Modeling Methods a Case Study of Steel Pipes of a Car's Suspension

Rawintanath Thipsena¹ Ekawit Songkroh¹ Supatthra Muparang² Wannisa Nutkhum²
Patchara Kanchanakarn³ Brodindech Joommanee^{3*}
rawintanath.t@rmutsb.ac.th¹, ekawit.s@rmutsb.ac.th¹, supatthta12770@gmail.com²,
wannisa.nu@rmuti.ac.th², patchara.k@rmutsb.ac.th³, brodindech.j@rmutsb.ac.th^{3*}

¹Department of Manufacturing Engineering Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

³Department of Tool and Die Engineering, Tool and Die Technology Center (TDTC), Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

Received: April 3, 2024 Revised: June 6, 2024 Accepted: June 19, 2024

Abstract

This paper presents production planning using mathematical modeling methods in order to reduce processing time for steel pipe manufacturing production. The study specifically focused on the polishing and the coating processes with each process involving multiple parallel machines. The production for polished pipes was separated by different production rates while the steel pipe coating were separated into batches according to the diameter of the pipes. Production planning for each process is complex and diverse due to different products and customer orders. Current planning relies on the production planning experience, which results in long processing times of the coating processes. Therefore, the objective of this paper was to find optimal production planning to reduce processing A mathematical model for the optimal production planning for the processes was developed. In addition, the model was applied to the sample data sets and solved using Microsoft Excel Solver. The results revealed that the polishing process time decreased by 11.77 percent and the coating time decreased by 13.34 percent.

Keywords: Production planning, Steel pipe, Mathematical model

1. บทนำ

การผลิตทางอุตสาหกรรมมีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันอย่างสูง [1,2,3,4] ซึ่งอุตสาหกรรมเหล็กเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ อีกทั้งวัสดุเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่ใช้กันมากที่สุดเนื่องจากมีความสามารถในการใช้งานได้ดี มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และการใช้งานที่แพร่หลาย [5] เช่นการคมนาคม สะพาน ยานพาหนะ [6] ท่อเหล็กเป็นวัสดุที่นิยมใช้งานหลากหลายทั้งด้าน การสื่อสาร การเคลื่อนย้ายของไหล เช่น ก๊าซ น้ำ น้ำมัน [7]

ในปี พ.ศ.2566-2568 การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีแนวโน้มเติบโตเฉลี่ย 3.5-4.5% ต่อปี และคาดว่าอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จะมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง [8] ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตท่อเหล็กที่เป็นส่วนประกอบช่วงล่างของรถยนต์เป็นธุรกิจที่มีการแข่งขันสูง [9] อีกทั้งเป็นธุรกิจที่มีความต้องการการพัฒนาสูงสุดในการปรับปรุงการผลิต คือ การเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในตลาดโลก [10] ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงมีหลายรูปแบบ ทำให้มีกระบวนการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบผลิตภัณฑ์อยู่ตลอดเวลาเพื่อสามารถที่จะตอบสนองความต้องการของลูกค้า ในด้านคุณภาพและราคา [9] ซึ่งในการวางแผนการผลิตมีความยุ่งยากและซับซ้อน จากข้อจำกัดของเครื่องจักรที่อัตราการผลิตที่แตกต่างกัน ทั้งนี้การประยุกต์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์มีความสามารถในการวางแผนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยของ Salvador [11] ได้นำวิธีการวางแผนการผลิต มาแก้ปัญหามหาหน่วยงานแบบขนาน โดยให้ความสนใจด้านเวลาในการผลิตต่ำสุด โดย Geyik และ Cedimoglu [12] ได้จำแนกวิธีการที่ใช้ในการวางแผนการผลิตออกเป็น 3 วิธีการ คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Approaches) วิธีเชิงฮิวริสติกส์ (Heuristic Approaches) และวิธีการเชิงปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Approaches) เป็นวิธีการแก้ปัญหาของการวางแผนการผลิตที่มีความซับซ้อนให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการแก้ปัญหา อีกทั้ง Arz Y. Qwam Alden [13] ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตแบบจำลองการจ้างงาน โดยใช้ Pro-Model ในการ

จำลอง พบว่าสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับสถานประกอบการอย่างมีประสิทธิภาพ ในลักษณะคล้ายกัน Chayaporn และคณะ [14] ดำเนินการวางแผนและกำหนดเวลาการผลิตท่อเหล็ก โดยใช้ Digital Twin ในการจำลอง พบว่า สามารถช่วยลดเวลาการวางแผนการผลิต และสามารถกำหนดแผนการผลิตได้แม่นยำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนหาปริมาณการผลิตที่เหมาะสมและลดระยะเวลาของกระบวนการตัดผิวและกระบวนการเคลือบผิวของท่อเหล็ก ที่เป็นส่วนประกอบช่วงล่างของรถยนต์ โดยแต่ละขั้นตอนมีหลายเครื่องจักร และเป็นเครื่องจักรแบบขนาน (Parallel Machine) จึงได้ประยุกต์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยวางแผนการผลิต เพื่อกระบวนการทำงานให้มีประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น

2. วิธีการดำเนินงาน

การแก้ปัญหาในการวางแผนการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่เหมือนกันแต่อัตราการผลิตต่างกันรวมถึงข้อจำกัดของเครื่องจักรที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยที่ผ่านมาวิธีการแก้ปัญหาหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีการวางแผนการผลิตของเครื่องจักร โดย Salvador [11] ได้นำวิธีการวางแผนการผลิต มาแก้ปัญหามหาหน่วยงานแบบขนาน โดยให้ความสนใจด้านเวลาในการผลิตต่ำสุด โดย Geyik และ Cedimoglu [12] ได้จำแนกวิธีการที่ใช้ในการวางแผนการผลิตออกเป็น 3 วิธีการ คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Approaches) วิธีเชิงฮิวริสติกส์ (Heuristic Approaches) และวิธีการเชิงปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Approaches) ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาของการวางแผนการผลิตที่มีความซับซ้อนให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการแก้ปัญหา

2.1 รูปแบบโปรแกรมเชิงเส้น

ในการศึกษาปัญหาวิธีการวางแผนการผลิตนี้ได้นำทฤษฎีการโปรแกรมเชิงเส้น [15] มาใช้เป็นเทคนิคในการแก้ปัญหาซึ่งเป็นเทคนิคที่มีลักษณะเกี่ยวข้องกับการจัดสรรปัจจัยและทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดทั้งขนาด ปริมาณ และขอบเขตของการใช้งาน ที่มีลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเป็นเชิงเส้น

ตรงนั้น โดยมีจุดหมายเพื่อแก้ปัญหาและตัดสินใจให้เกิดผลตามแนวทางการดำเนินงานที่ดีที่สุด (Optimal) รูปแบบโปรแกรมเชิงเส้นมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ [16] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่พิจารณาอยู่นั้น เป็นปัญหาในลักษณะที่ต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด (Maximize, Minimize) โปรแกรมเชิงเส้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1) ฟังก์ชันเป้าหมายหรือจุดประสงค์ 2) สมการแสดงเงื่อนไข (Constraints) ซึ่งแสดงถึงปัจจัยหรือทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด 3) สมการข้อจำกัดตัวแปรตัดสินใจที่จะต้องเป็นค่าที่ไม่ติดลบ แต่ทั้งนี้ตัวแปรที่กำหนดจะต้องเป็นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming)

2.2 การมอบหมายงาน (Assignment)

ปัญหาการมอบงาน เป็นปัญหาที่พัฒนามาจากรูปแบบปัญหาการขนส่ง Transportation Problem ได้แก่ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรบุคลากร อุปกรณ์ เครื่องจักร ให้เหมาะสมกับงานหน้าที่สถานที่ การแจกแจงจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด จากแหล่งทรัพยากรต่างๆ ไปสู่จุดหมายที่ได้กำหนดไว้แล้ว ให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด มักจะเป็นรูปแบบการแก้ปัญหาด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นรูปแบบที่ใช้มากที่สุดในการดำเนินงาน ซึ่งอยู่ในรูปของสมการหรือสมการต่างๆ เป็นการหาผลลัพธ์ตามจุดประสงค์ (Objective Function) คือ สูงสุดหรือต่ำสุด จะประกอบด้วย 2 ตัวแปรคือ 1) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) เป็นค่าที่กำหนดขึ้น หรือควบคุมได้ (Controllable Variable) เช่น ราคา ปริมาณการสั่งซื้อ งบประมาณ เส้นทาง เป็นต้น จัดเป็นแนวทางที่เลือกกระทำได้ 2) ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) เป็นองค์ประกอบของระบบที่ไม่อยู่ภายใต้การกำหนดหรือการควบคุม (Uncontrollable Variable) แต่มีผลกระทบกับผลลัพธ์ของระบบ เช่น ราคาของคู่ต่อสู้ ฝ่ายตรงข้าม ระดับความต้องการสินค้า นโยบายของรัฐบาล การกระทำหรือเหตุการณ์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายนอก ระบบ เพื่อหาผลลัพธ์ของระบบที่เหมาะสมที่สุด

2.3 โปรแกรมคำนวณ Excel Solver

Solver คือเครื่องมือที่ช่วยในการคำนวณประเภท Linear Programming การคิดแก้ปัญหาการคำนวณใน Excel ถ้าปัญหามีคำตอบเพียงคำตอบเดียว Excel มีสูตรที่สามารถนำมาใช้คำนวณหาคำตอบที่ต้องการนั้นได้ ซึ่งจะไม่สามารถใช้สูตรสำเร็จรูปที่ Excel เตรียมไว้ให้ใช้ได้โดยตรง ก็สามารถนำสูตรมาซ้อนต่อกัน หรือใช้หลายสูตรมาคำนวณร่วมกันเพื่อแก้ปัญหานั้น แต่ถ้าปัญหาหนึ่งๆอาจจะมีหลายคำตอบก็จำเป็นต้องใช้สูตรคำนวณของ Excel นำมาใช้ร่วมกับคำสั่ง Solver โดยต้องสร้างสูตรคำนวณที่เกี่ยวข้องจากนั้นจึงใช้ Solver คำนวณหาผลลัพธ์ ทั้งนี้ในตัวคำสั่ง Solver เองจะไม่สามารถรับสูตรคำนวณได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างสูตรไว้ในเซลล์ต่างๆเพื่อ Solver จะทำหน้าที่ค้นหาตัวเลขคำตอบที่เป็นไปได้แล้วนำผลลัพธ์ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับระหว่างเซลล์สูตรคำนวณที่เกี่ยวข้องว่าได้คำตอบตามขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนดทั้งหมดแล้วหรือไม่ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยด้านการวางแผนการผลิตโดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอุตสาหกรรมการผลิตต่อเนื่องโดยมีงานวิจัยการวางแผนการผลิตรวมในรูปแบบการผลิตทั่วไป สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และใช้ Solver ในการหาค่าที่เหมาะสม [17,18] ดังนั้นงานบทความนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีการวางแผนการผลิตต่อเนื่องโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.4 เงื่อนไขของผลิตภัณฑ์กับเครื่องเคลือบผิว

- 1) เครื่องเคลือบผิวยี่ห้อที่ 1 ไม่สามารถผลิตต่อเนื่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็ก 28.6 มิลลิเมตรได้
- 2) อัตราการผลิตของเครื่องเคลือบผิวแต่ละเครื่องมืออัตราการผลิตต่อชั่วโมงที่แตกต่างกัน ดังนั้นการผลิตชิ้นงานแต่ละเครื่องมือมีการผลิตที่แตกต่างกัน
- 3) กำลังการผลิตของเครื่องเคลือบผิวยี่ห้อที่ 1 และเครื่องเคลือบผิวยี่ห้อที่ 2 มีกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เครื่องเคลือบผิวยี่ห้อที่ 2 มีกำลังการผลิตที่มากกว่า
- 4) ผลิตภัณฑ์แต่ละคำสั่งซื้อของลูกค้าสามารถที่จะเข้าเครื่องเคลือบผิวได้เฉพาะเครื่อง แต่ไม่

สามารถเข้าเกินจำนวนกำลังการผลิตต่อเครื่องได้ ถ้าจำนวนผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อมากกว่าจำนวนการผลิตต่อเครื่องแต่ละยี่ห้อต่อหนึ่งรอบการผลิต สามารถที่จะนำผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อที่เหลือเข้าเครื่องเคลือบผิวได้ในรอบต่อไปของการผลิต โดยการคำนวณหาจำนวนรอบการผลิต

จำนวนรอบการผลิต = $\frac{\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อทั้งหมด (ชิ้น)}}{\text{กำลังการผลิตของเครื่องเคลือบผิวทุกเครื่อง (ชิ้น)}}$

2.5 ดัชนี (Index)

i คือ คำสั่งซื้อของลูกค้า

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n^s, n^{s+1}, \dots, n^l, n^{l+1}, \dots, n^m$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n^s$ หมายถึง คำสั่งซื้อของ

ลูกค้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็ก 28.6 มิลลิเมตร

โดยที่ $i = n^{s+1}, \dots, n^l$ หมายถึง คำสั่งซื้อของ

ลูกค้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็ก 34.4 มิลลิเมตร

โดยที่ $i = n^{l+1}, \dots, n^m$ หมายถึง คำสั่งซื้อของ

ลูกค้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็ก 41.3 มิลลิเมตร

j คือ เครื่องขัดผิว โดยที่ $j = 1, 2, 3, \dots, J$

r คือ จำนวนรอบในการผลิต

โดยที่ $r = 1, 2, 3, \dots, R$

2.6 พารามิเตอร์ (Parameter)

d_i คือ ปริมาณคำสั่งซื้อ i (ชิ้น)

S_j คือ อัตราความเร็วของเครื่องขัดผิว j (ชิ้น/ชั่วโมง)

Z คือ เวลาการผลิตรวม (ชั่วโมง)

Cap_j คือ กำลังการผลิตของเครื่องขัดผิว j (ชิ้น)

2.7 ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables)

Y_{ijr} คือ จำนวนปริมาณคำสั่งซื้อ i เข้าเครื่องขัดผิว j รอบที่ r

2.8 สมการเป้าหมาย (Objective Function)

เพื่อลดเวลาในการผลิตของกระบวนการขัดผิว

$$\text{Min } Z = \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \frac{Y_{ijr}}{S_j} \quad (1)$$

สมการเงื่อนไข (Constraints)

จำนวนคำสั่งซื้อทั้งหมดที่ทำการผลิตต้องไม่เกินกำลังการผลิตของเครื่องขัดผิว

$$\sum_{i=1}^N Y_{ijr} \leq Cap_j \quad ; \quad \forall_j, \forall_r \quad (2)$$

ผลรวมของคำสั่งซื้อที่เข้าเครื่องขัดผิว จะต้องเท่ากับคำสั่งซื้อของลูกค้า

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J Y_{ijr} = d_i \quad ; \quad \forall_i \quad (3)$$

ตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นจำนวนเต็มและต้องมีความมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$Y_{ijr} \geq 0 \text{ and Integer} \quad ; \quad \forall_i, \forall_j, \forall_r \quad (4)$$

3. สภาพของปัญหา

การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาจากการศึกษาข้อมูลพฤติกรรมของลูกค้า กระบวนการทำงาน เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงกระบวนการทำงาน

3.1 พฤติกรรมของลูกค้า จากกรณีศึกษาพบว่าอุตสาหกรรมการผลิตท่อเหล็กนั้นจะผลิตท่อเหล็กตามความต้องการคำสั่งซื้อของลูกค้า โดยคำสั่งซื้อของลูกค้าจะสั่งเป็นจำนวนชิ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหลากหลาย ส่งผลให้มีผลกระทบต่อการวางแผนการผลิต เนื่องจากมีผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายและเป็นปัญหาที่ซับซ้อน อีกทั้งเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตนั้นเป็นเครื่องจักรแบบขนานและมีอัตราการผลิตที่แตกต่างกัน รวมถึงข้อจำกัดต่างๆของเครื่องจักร ส่งผลให้เวลาแต่ละกระบวนการสูง

3.2 การไหลของกระบวนการในกรณีศึกษา การวางแผนการผลิตในปัจจุบัน อาศัยประสบการณ์ความชำนาญของผู้วางแผน ไม่มีการเก็บรวบรวมข้อมูลนำมาวิเคราะห์ปัญหา ไม่มีการจัดระบบช่วยแนะนำในการตัดสินใจในการวางแผน ส่งผลให้เวลาในการผลิตของกระบวนการขัดผิวกับเคลือบผิวสูง ซึ่งขั้นตอนการวางแผนการผลิตมีดังนี้

1. ฝ่ายวางแผนการผลิตออกไปสั่งผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า

2. กระบวนการเตรียมท่อเหล็ก ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้รับคำสั่งการผลิต ซึ่งมี

ขนาด 28.6 มิลลิเมตร 34.4 มิลลิเมตร และ 41.3 มิลลิเมตร

3. กระบวนการเตรียมเครื่องจักรที่ใช้ตัดท่อเหล็ก

4. กระบวนการตัดท่อเหล็กจะตัดท่อเหล็กตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็ก

5. กระบวนการลบมุมของท่อเหล็ก

6. กระบวนการตัดผิวท่อเหล็กซึ่งทุกคำสั่งซื้อ สามารถเข้าเครื่องตัดผิวได้ทุกเครื่อง

7. กระบวนการเคลือบผิว ท่อเหล็กที่ผลิตในกระบวนการเคลือบผิวมีหลากหลายประเภทและหลายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นงานที่รับมาไม่สามารถผลิตร่วมกันได้เนื่องจากกระบวนการเคลือบผิวมีข้อจำกัดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดของท่อเหล็กที่แตกต่างกัน

4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงในลักษณะตารางผลของกระบวนการตัดผิว ผลของกระบวนการเคลือบผิว และเปรียบเทียบเวลาในกระบวนการผลิต

4.1 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากข้อมูลพบว่าเวลาในการผลิตก่อนการปรับปรุงใช้เวลาในกระบวนการตัดผิว 32.55 ชั่วโมง และกระบวนการเคลือบผิว 34.33 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วย ผลการทดลองการตัดผิว และข้อมูลของเครื่องเคลือบผิว

4.1.1 ผลการทดลองการตัดผิว

กระบวนการตัดผิวมีเครื่องจักรแบบขนาน (Parallel Machine) ที่เหมือนกันแต่มีอัตราการผลิตที่ต่างกันทั้งหมด 4 เครื่อง ซึ่งมีกำลังการผลิตต่อเครื่อง 1000 ชิ้น และอัตราการผลิตต่อชั่วโมง 300, 360, 250 และ 220 ชิ้น ตามลำดับ

เงื่อนไขของผลิตภัณฑ์กับเครื่องตัดผิว

1) กำลังการผลิตของเครื่องตัดผิวแต่ละเครื่องสามารถบรรจุท่อเหล็กได้ 1000 ชิ้นต่อเครื่องโดยไม่ขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็ก

2) อัตราการผลิตของเครื่องตัดผิวแต่ละเครื่องมีอัตราการผลิตต่อชั่วโมง ที่แตกต่างกันโดยไม่ขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็ก

3) ท่อเหล็กสามารถเข้าเครื่องตัดผิวได้ทุกเครื่อง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันสามารถที่จะเข้าเครื่องตัดผิวหมายเลขเดียวกันได้ แต่ไม่สามารถเข้าเกินจำนวนกำลังการผลิตต่อเครื่องของแต่ละเครื่องตัดผิว ซึ่งจำนวนผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อมากกว่าจำนวนการผลิตต่อเครื่องของเครื่องตัดผิวแต่ละเครื่องต่อหนึ่งรอบการผลิต สามารถที่จะนำผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อที่เหลือเข้าเครื่องตัดผิวได้ในรอบที่ 2 ของการผลิตโดยการคำนวณหาจำนวนรอบการผลิตได้จาก

$$\text{จำนวนรอบการผลิต} = \frac{\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อทั้งหมด (ชิ้น)}}{\text{กำลังการผลิตของเครื่องตัดผิวทุกเครื่อง (ชิ้น)}}$$

4.1.2 ผลการทดลองเครื่องเคลือบผิว

กระบวนการเคลือบผิวมีเครื่องจักรแบบขนาน (Parallel Machine) ที่เหมือนกันแต่มีอัตราการผลิตที่ต่างกันโดยขึ้นอยู่กับประเภทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็ก ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลเครื่องเคลือบผิว

เครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ	กำลังการผลิตต่อเครื่อง (ชิ้น/เครื่อง)	อัตราการผลิตต่อชั่วโมง (ชิ้น/ชั่วโมง)
1	230	920
2	300	1100

4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดสอบแบบจำลองได้ใช้ข้อมูลกรณีศึกษาหาเวลาการผลิตที่ต่ำสุดของกระบวนการตัดผิวและกระบวนการเคลือบผิว โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 4 การทดสอบแบบจำลองโดยใช้ Excel Solver ในการหาคำตอบ บทความนี้ได้

รวบรวมข้อมูลความต้องการคำสั่งซื้อของลูกค้าในอดีต เพื่อต้องการทราบปริมาณความต้องการคำสั่งซื้อของลูกค้าในแต่ละเดือนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 7,870 ชิ้นต่อเดือน ดังแสดงดังกราฟรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟคำสั่งซื้อของลูกค้า

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงข้อมูลการสั่งซื้อของลูกค้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คำสั่งซื้อ STKM11A/41.3 มีจำนวนการสั่งซื้อมากที่สุด การทดสอบการคำนวณผลของกระบวนการขัดผิว แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คำนวณผลของกระบวนการขัดผิว

คำสั่งซื้อลูกค้า	ปริมาณคำสั่งซื้อ (ชิ้น)	รอบที่ 1 (ชิ้น)	รอบที่ 2 (ชิ้น)
STAM1470	450	0	450
	250	0	250
	350	0	350
STKM12A	330	0	330
	280	0	280
	350	350	0
	420	420	0
	370	370	0
	500	500	0
	250	250	0
	400	400	0
	350	350	0
STKM11A	600	600	0
	420	420	0
	300	210	90
	280	0	280
	770	0	770
	450	0	450
	330	0	330
	420	0	420

ตารางที่ 3 คำนวณผลของกระบวนการเคลือบผิว

คำสั่งซื้อลูกค้า	ปริมาณคำสั่งซื้อ (ชิ้น)	รอบที่ 1 (ชิ้น)	รอบที่ 2 (ชิ้น)	รอบที่ 3 (ชิ้น)	รอบที่ 4 (ชิ้น)
STAM1470	450	0	0	450	0
	250	0	0	250	0
	350	0	0	350	0
STKM12A	330	330	0	0	0
	280	280	0	0	0
	350	350	0	0	0
	420	0	420	0	0
	370	0	370	0	0
	500	500	0	0	0
	250	0	250	0	0
	400	0	400	0	0
	350	0	350	0	0
STKM11A	600	560	40	0	0
	420	0	190	230	0
	300	0	0	300	0
	280	0	0	280	0
	770	0	0	160	610
	450	0	0	0	450
	330	0	0	0	330
	420	0	0	0	420

จากนั้นได้ดำเนินการเปรียบเทียบเวลาในกระบวนการผลิต ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ การขัดผิว และการเคลือบผิว ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบเวลาในกระบวนการผลิต

เวลาในกระบวนการผลิต(ชั่วโมง)	วิธีการผลิต		ผลต่าง	เปอร์เซ็นต์
	แบบปัจจุบัน	แบบประยุกต์		
การขัดผิว	32.55	28.72	3.83	11.77%
การเคลือบผิว	34.33	29.75	4.58	13.34%

จากการประยุกต์การใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการวางแผนการผลิตของกระบวนการขัดผิวและกระบวนการเคลือบผิว ซึ่งในทางปฏิบัติงานจริงจำนวนคำสั่งซื้อของลูกค้าและจำนวนผลิตภัณฑ์มีจำนวนมาก จึงต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณหาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมและรายงานผล โดยใช้โปรแกรม Microsoft

Excel Solver ซึ่งวิธีการสร้างคำตอบที่ดีที่สุดในการหาคำตอบในแต่ละรอบของการวางแผนการผลิต จากตารางที่ 2 แสดงคำนวณผลโปรแกรม Microsoft Excel Solver ของกระบวนการขัดผิว และจากตารางที่ 3 คำนวณผลโปรแกรม Microsoft Excel Solver ของกระบวนการเคลือบผิว พบว่าตารางที่ 4 เวลาการผลิตของกระบวนการขัดผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 11.77 และเวลาการผลิตของกระบวนการเคลือบผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 13.34 จากคำสั่งซื้อของลูกค้าทั้งหมดจำนวน 7,870 ชิ้น ซึ่งจะยกตัวอย่างคำสั่งซื้อของลูกค้าบางคำสั่งซื้อที่เข้ากระบวนการขัดผิวและกระบวนการเคลือบผิว

5. อภิปรายผล

จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าเวลาในการผลิตก่อนการปรับปรุงใช้เวลาในกระบวนการขัดผิว 32.55 ชั่วโมง และกระบวนการเคลือบผิว 34.33 ชั่วโมง และพบว่าผลการทดลองการขัดผิวของเครื่องจักร 4 เครื่อง มีกำลังการผลิต 1,000 ชิ้น แบ่งออกเป็น ชั่วโมง 300, 360, 250 และ 220 ชิ้น ซึ่งในกระบวนการเคลือบผิว พบว่าเครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ 2 กำลังการผลิต 300 ชิ้น ซึ่งมากกว่าเครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ 1 และยังมีอัตราการผลิต 1,100 ชิ้น/ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าเครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ 1 ผลการคำนวณปริมาณความต้องการคำสั่งซื้อของลูกค้าในแต่ละเดือนโดยเฉลี่ย 7,870 ชิ้น แสดงให้เห็นว่าคำสั่งซื้อ STKM11A/41.3 มีจำนวนการสั่งซื้อมากที่สุด จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อของลูกค้า STKM11A ปริมาณคำสั่งซื้อ 420 ชิ้น ดำเนินการเข้ากระบวนการขัดผิว เข้ารอบการผลิตที่ 1 เครื่องขัดผิวที่ 1 จำนวน 420 ชิ้น ต่อจากนั้นเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิว เข้ารอบการผลิตที่ 2 เครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ 2 จำนวน 190 ชิ้น และเข้ารอบการผลิตที่ 3 เครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ 3 จำนวน 230 ชิ้น ดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 และผลการเปรียบเทียบเวลาในกระบวนการผลิต พบว่าเวลาการผลิตของกระบวนการขัดผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 11.77 และเวลาการผลิตของกระบวนการเคลือบผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 13.34 จากคำสั่งซื้อของลูกค้าทั้งหมดจำนวน

7,870 ชิ้น ลักษณะคล้ายกันกับ Arz Y. Qwam Alden [13] ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตต่อ ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงเวลาในกระบวนการผลิตได้ดียิ่งขึ้น

6. สรุปผลการวิจัย

การวางแผนการตารางการผลิตโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์มีความหลากหลายและรูปแบบที่แตกต่างกัน และเครื่องจักรมีประสิทธิภาพในการผลิตที่ต่างกัน จากการจำลองพบว่าจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์คำสั่งซื้อของลูกค้า STKM11A ปริมาณคำสั่งซื้อ 420 ชิ้น ดำเนินการเข้ากระบวนการขัดผิว เข้ารอบการผลิตที่ 1 เครื่องขัดผิวที่ 1 จำนวน 420 ชิ้น ต่อจากนั้นเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิว เข้ารอบการผลิตที่ 2 เครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ 2 จำนวน 190 ชิ้น และเข้ารอบการผลิตที่ 3 เครื่องเคลือบผิวยี่ห้อ 3 จำนวน 230 ชิ้น และการทดสอบแบบจำลองพบว่า เวลาการผลิตของกระบวนการขัดผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 11.77 และเวลาการผลิตของกระบวนการเคลือบผิวลดลงจากเดิมร้อยละ 13.34 จากคำสั่งซื้อของลูกค้าทั้งหมดจำนวน 7,870 ชิ้น แบบจำลองนี้สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้ และสามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนการผลิต

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gresova E, Svetlik J. Modeling within national economy using industry-oriented indicators: Evidence from Czech Republic. *MM Sci. J.* 2020;6:3892-95.
- [2] Gresova E, Svetlik J. Economic impact of industrial segment in the selected country. *Manag. Syst. Prod. Eng.* 2020;28:312-7.
- [3] Cohen Y, Shoval S, Faccio M, Minto R. Deploying cobots in collaborative systems: Major considerations and productivity analysis. *Int. J. Prod. Res.* 2021.

- [4] Cohen Y, Faccio M, Pilati, F.; Yao, X.F. Design and management of digital manufacturing and assembly systems in the Industry 4.0 era. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 2019;105:3565-77.
- [5] Guo Z, Wang C, Yang G, Huang Z, Li G. MSFT-YOLO: Improved YOLOv5 Based on Transformer for Detecting Defects of Steel Surface. *Sensors* 2022;22:3467.
- [6] World Steel Association. The white book of steel. Available online: <https://worldsteel.org/publications/bookshop/the-white-book-of-steel/> (accessed on 10 March 2022).
- [7] The importance of steel pipes Rojpairi Automation Buan Equipment Co., Ltd.. <https://www.rojpai boon.co.th/th>
- [8] Yongphisanphob W. 2566. Business/industry trends 2566-2568: Auto parts industry. <https://www.krungsri.com/1.03.2566>.
- [9] Chalerm Sak T, Kaona J. Development of Measurement Tools A case study automotive wire harness manufacturer. *Journal of Engineering, RMUTT.* 2022;20(1):25-30. (in Thai)
- [10] Draheim D. Business process technology: a unified view on business processes, workflows and enterprise applications. Berlin: Springer Science & Business Media, 2010.
- [11] Salvador M. A solution to a special case of flow shop scheduling problem. *Symposium on the Theory of Scheduling and Its Applications*, 1973; pp. 83-91.
- [12] Geyik F, Cedimoglu, I.H. A Review of the Production Scheduling Approaches Based-on Artificial Intelligence and the Integration of Process Planning and Scheduled. 2003.
- [13] Arz Y. Qwam Alden. Improving productivity employ simulation model: A case study of a steel pipe manufacturing company. *Anbar Journal of Engineering Science (AJES).* 2022;13(1):35–45.
- [14] Maitreesorasunte C, Jeenanunta C, Buddhakulsomsiri J, Chaysiri R, Pannakkong W, Karnjana J, Nakamura M. A steel tube production planning and scheduling with product-dependent changeover time using Digital Twin. *International Scientific Journal of Engineering and Technology.* 2020;4(2):13-9
- [15] Prakob J, Linear Programming. 1st ed. Bangkok: National Institute of Development Administration; 1992. (in Thai)
- [16] Tantasut W, Wijiravanit W, Thongprasert S. Operations research. Bangkok : SE-Education Book Publishers; 1997. (in Thai)
- [17] Atthawit T, Pisal Y. Aggregate production planning using spreadsheet solve: model and case study. *Science Asia.* 2002;28:291-300.
- [18] Ahmed W, Fadi A. Solving the university class scheduling problem using advanced ILP Techniques. Department of Computer Engineering. American University of Sharjah (AUS), UAE. 2007.

รูปแบบบทความสำหรับ วารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

ปรกช สิริสุวัฒน์^{1*} สุมนมัลย์ เนียมกลาง² และกุลยา สาริชีวิน³

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 บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำเสนอผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสิทธิ์การส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว

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 not 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 and 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) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นและกระชับแต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่องสื่อความหมายชัดเจนไม่ควรใช้คำย่อ และวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

2.2. ชื่อผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) และผู้เขียนร่วม (Co-Author) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใส่หมายเลขลำดับ (ด้วยก) เรียงตามลำดับความสำคัญ โดยใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ผู้เขียนหลักถัดจากหมายเลขลำดับ (ด้วยก)

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

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อดัด (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 เพื่อพิมพ์ออกเส็ตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนเนื้อหาของเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

2.7.1 การเขียนหน่วยต่างๆ

หน่วยในเนื้อหาจะต้องใช้เป็นรูปแบบเดียวกันทั้งฉบับ

ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

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

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะพิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรแบบ

“TH SarabunPSK”

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

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะพิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรรูปแบบ “TH SarabunPSK” (ต่อ)

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
สมการต่างๆ	14	กึ่งกลาง	ตัวเอียง
คำบรรยายประกอบรูปและตาราง	14	กึ่งกลาง	ปกติ

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม เยื้องบรรทัดแรกของย่อหน้าใช้ 1 แท็บ หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.2 การจัดทำรูปภาพ

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

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายใต้ภาพ

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



รูปที่ 1 ตัวอย่าง....

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้ รูปภาพควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพ เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด และไม่มีเส้นกรอบรูป

2.7.3 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพยัญชนะเอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

$$a + b = c \quad (1)$$

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.7.4 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายกำกับเหนือตาราง 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 กรณียบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

2.7.7 การส่งบทความ

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



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งบทความวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

● Word ● PDF

● แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความ

เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารแนวหน้าวิจัย

นวัตกรรมทางวิศวกรรม มายังระบบออนไลน์ และกรุณาจัดส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความทางอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th มายังกองบรรณาธิการวารสารแนวหน้าวิจัย นวัตกรรมทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ครบถ้วน จึงจะถือว่า การส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์

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 โดยใช้ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] เป็นต้น แล้วรวบรวมไปเขียนอ้างอิง ตามรูปแบบวารสารกำหนด

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

ตัวอย่าง (Example)

[1] Kalsirisilp R, Nadpakdee A, Langkapin J. Performance evaluation of sugarcane grab loader. Journal of Engineering, RMUTT. 2018; 16(1):1-12. (in Thai)

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

(เครื่องหมาย\หมายถึง 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)

[4] Halpern SD, Ubel PA, Caplan AL. Solid-organ transplantation in HIV-infected patients. *N Engl J Med*. 2002;347(4):284-7.

รูปแบบหนังสือและเอกสารเฉพาะเรื่อง

(Books and Other Monographs)

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

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

ตัวอย่าง(Example)

[7] Murray PR, RoawnrhL KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. *Medical microbiology*. 4th ed. St.Louis: Mosby; 2002.

[8] Borkowski MM. *Infant sleep and feeding: a telephone survey of Hispanic Americans [dissertation]*. Mount Pleasant (MI): Central Michigan University; 2002.

รูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์

(Electronic Material)

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

ตัวอย่าง(Example)

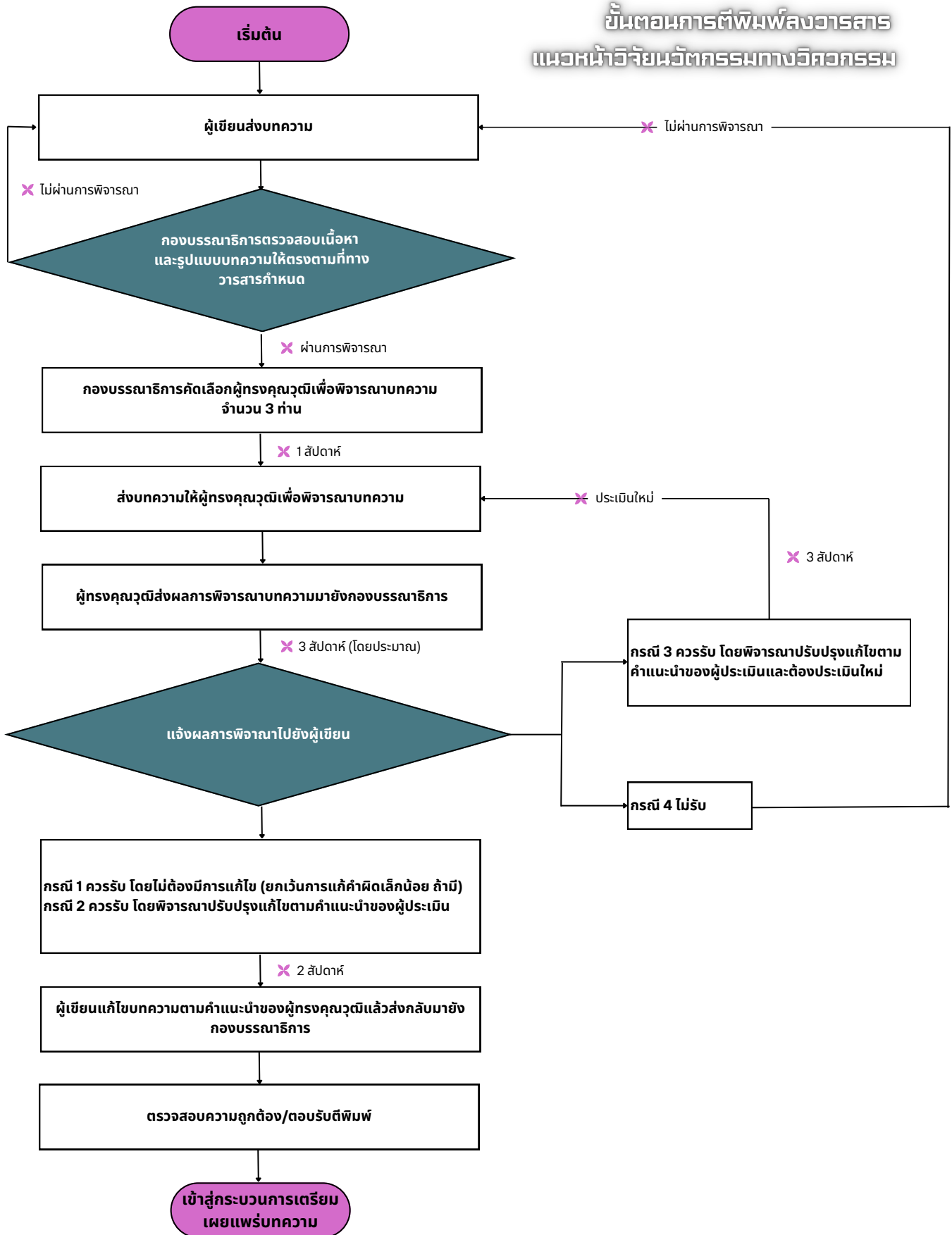
[10] Siriprasert R. Model development for health screening system in prachinburi province. *Journal of Health Science [Internet]*. 2010 [cited 2011 Feb 25];19(3):409-21. Available from:http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e_doc.php?id=2593 (in Thai)

[11] Abood S. Quality improvement initiative in nursing homes: the ANA acts in an advisory role. *Am J Nurs [Internet]*. 2002 Jun [cited 2002 Aug 12];102(6): [about 1 p.]. Available from : <http://www.nursingworld.org/AJN/2002/june/Wawatch.htmArticle>

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ในรูปแบบ Word และคู่มือการอ้างอิงระบบ (Vancouver Style) ได้ที่

<https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwmeIUTtRwHH3HEFlFuVZXsIOPV>

ขั้นตอนการตีพิมพ์ผลงานวารสาร 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



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

ธนาคารใด ส่งจ่าย

ตัวเลขเงินไปรษณีย์ 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 บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความ
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