

ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2567
Vol. 18 No. 2 July – December 2024

E-ISSN : 3027-8260



วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาทีเรื้อตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยี่มนิรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสีธิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลลิกา เชาวชาญชัยกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ป็อกเท้ง
ดร.วราพร ทองจั่น	นางสาวพัชรนันท์ ยังรวริเชียร

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤติปัญญา
ศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต สุขภารังษี
รองศาสตราจารย์ ดร.กษมา ศิริสมบุรณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.แก้วตา แก้วดาทิพย์
รองศาสตราจารย์ ดร.จงลักษณ์ พาหะชา
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.นิตต์อลิน พันธุ์อภัย
รองศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุวดี วิทย์พันธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์ เปี่ยมสุวรรณ
รองศาสตราจารย์ ดร.วันเพ็ญ วิโรจน์ภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุสรณ์ ชาติอารยะดี
รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเวียง ฤทธิศักดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร
รองศาสตราจารย์ ดร.สกุล ห่อวโนทยาน
รองศาสตราจารย์ ดร.สโรช บุญศิริพันธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์ เกิดนิยม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒนา พฤษะศรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อนิรุตต์ มัทธจักร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุกร ภูเรือรัตน์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ กาญจนทัต
รองศาสตราจารย์ ดร.อัศรัตน์ พูลกระจำ
รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัน วัฒนเทพินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล จิรเสรีมรกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ จำรูญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรัฐ ศิริเมืองมูล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ลักษณะกิจ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยพะเยา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยพะเยา
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ดำรงกิจโกศล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ติกะ บุณนาค
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดาพร ศุภภากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย กานตานันทะ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยัตตะยา ผาสุขพันธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑิรา ดวงสาพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักขณา บรรณวัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีกาญจนา คล้ายเรือง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวัสดิ์ ภาระราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจิ้น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา ร้อยดวง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ นุตยะสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา มากมูล กราร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพรัตน์ สีหะวงษ์
ดร.ประกอบ ขาติภักต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สารบัญ
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

Poly (ethylene terephthalate) Oligomers as a Stabilizer in Colloidal Silver Nanoparticles Synthesis: Blending in Polyethylene for Antimicrobial Efficiency Sataporn Komhom	1
Selection of Amylase-Producing Filamentous Fungi to Hydrolyze Cassava Starch Chutima Kaewkrajay and Tida Dethoup	16
คำนวณโมเมนต์ดัดในคานด้วยวิธีสามโมเมนต์เพื่อใช้ในการออกแบบแชสซีรถบรรทุก สิทธิเดช เพชรราช นันธิ์ธนนท์ พงษ์พานิช วิชญ์พล พักแก้ว และ สุธรรม อรุณ	28
การประเมินสมรรถนะของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส ด้วยการปรับค่าความถี่ในการสวิตช์ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ ประสพโชค โห้ทองคำ	40
การกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง อภิรักษ์ ชัดวิลาส* ไพโรจน์ จันทร์แก้ว และ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล	51
การศึกษาแนวทางการอนุรักษ์พลังงานในฟาร์มเป็ด สุรพงษ์ สำลีพันธุ์ และ ชัยยศ ดำรงกิจโกศล	62

สารบัญ
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

ผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็ว	73
สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ณิชพล เรืองทรัพย์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	
Impact of Particulate Matter 2.5 During Covid-19 in Bangkok, Thailand	89
Krit Jedwanna Suwit Paengkanya and Prin Boonkanit	
Thoracic injury of Motorcyclists from Handlebar under Frontal impact in Thailand	105
Pananya Chuadamrong Saiprasit Koetnuyom and Julaluk Carmai	
การศึกษาอิทธิพลของแวนตอพลวัตกรรมการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อของเตาแก๊ส KB-5 โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	121
พัฒนพงษ์ แก้วโพธิ์ และ มานะ วิชางาม	
การพัฒนาขอสคาราเมลจากน้ำเชื่อมตาลโตนดและเนื้อตาลโตนดผง (<i>Borassus flabellifer</i> L.)	136
ลัดดาวัลย์ กลิ่นมัลย์ จิราภัทร โอทอง* สุธิดา กิจจาวรเสถียร วรลักษณ์ ป้อมน้อย และ วรธร ป้อมเย็น	
การล้อยตัวของฝุ่นบนถนนจากระยันทไฟฟ้าภายใต้การทดสอบแบบคงตัว และการขับขี่เสมือนจริง	149
ศิริศักดิ์ พงษ์อมตย์ วรวัฒน์ ทรงกิตติ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย	

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การพัฒนาจานชั่วคราวจากวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตอง นภัสส์ จันทรมี สุภาพร ดาวทอง และ จูตินันท์ รัตนพรหม	160
การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกที่ใช้ระบบทำความเย็น แบบแผ่นระเหยน้ำ วัศพล จันทพยัพ เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค และ กระวี ตริอำนาจรรค	175
การวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ : กรณีศึกษาของศูนย์รถยนต์ขนาดใหญ่ในประเทศ ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล กร พวงนาค และ ประวิง จินปรีชา	188
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยจากการประมาณค่าสูญหาย ด้วยตัวแปรเสริมภายใต้กลไกการสูญหายหลายแบบ ณัททัย สระกบแก้ว คณิศา โชติจันทิก และ คณารักษ์ ศรีสมบุญ	205

Poly (ethylene terephthalate) Oligomers as a Stabilizer in Colloidal Silver Nanoparticles Synthesis: Blending in Polyethylene for Antimicrobial Efficiency

Sataporn Komhom*

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Rangsit University
52/347 Muang-Ake, Phaholyothin Road, Lak-Hok, Muang, Pathumthani 12000

Received 2 November 2022; Revised 13 March 2023; Accepted 5 April 2023

Abstract

Colloidal silver nanoparticles synthesis (CSNPs) with the chemical reduction method obtained the achievement by using PET oligomers as a stabilizer that was oligomerized from the glycolysis reaction of poly (ethylene terephthalate) (PET) and ethylene glycol (EG). The study was conducted by varying the concentration of silver nitrate (AgNO_3) solution, D-glucose, and stabilizer to find the most suitable conditions to control silver nanoparticles (AgNPs) size. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) exposed oligomers' functional groups, the same as poly (ethylene terephthalate). The scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscopy (AFM) revealed that the smallest size was about 42 nm for high concentration at 0.75 M of AgNO_3 solution, 1.00 M of D-glucose, and 1.8%w/w of the PET: EG ratio. When analyzed by an atomic absorption spectrophotometer (AAS), the AgNPs concentration was approximately 71,870 ppm. The antimicrobial efficiency test by the plate count method showed greater than 95% inhibition when using CSNPs at AgNPs concentration of 10 ppm. Furthermore, blending CSNPs in polyethylene pellets and polyethylene sheets at AgNPs concentrations of 200 ppm and 750 ppm, respectively, could provide more than 95% inhibition efficiency.

Keywords: Poly (ethylene terephthalate); Colloidal Silver Nanoparticles; Silver Nanoparticles; PET oligomers; Antimicrobial Efficiency

* Corresponding Author. Tel.: +66 2791 6000 Ext.3333, E-mail Address: sataporn.k@rsu.ac.th

1. Introduction

Colloidal silver nanoparticles (CSNPs) have received widespread attention in recent years because of their applications, especially antimicrobial and antibacterial activities [1]. Previous studies have suggested that there are several methods of preparation. However, it seems that the chemical reduction method is the most widely used because of its stability and potential in controlling silver nanoparticles (AgNPs), usually ranging from 1 to 100 nm. Generally, this method consists of reducing agents, salt solutions, and stabilizers. Initially, the reduction of salt solution with Ag^+ ions can lead to the formation of silver atoms (Ag^0) by reducing agents such as borohydride, citrate, ascorbate, alcohol, and D-glucose, where the problem of agglomeration of colloidal nanoparticles has solved by stabilizers such as polyvinyl alcohol, polyvinylpyrrolidone, and polyethylene oxide [2], [3]. Controlled synthesis of CSNPs is based on experimental conditions such as the nature of stabilizers and strong or weaker reductants that affect the particle's size, size distribution, morphology, stability, and physicochemical properties when blending in the advanced nanomaterials [4].

Blending CSNPs into polymers is an emerging area of antimicrobial materials. A. S. Maryan reported developing polyurethane (PU) properties by incorporating AgNPs into the polymer matrix to improve antimicrobial properties. The results revealed that

AgNPs exhibit antimicrobial properties due to their large surface area. Other reports have published the synthesis of AgNPs-PLA nanofibers and AgNPs-cotton fabric [5]-[7]. The mechanism of antimicrobial is the inhibition of their reproducibility due to the absorption and accumulation of Ag^0 or silver ions into the cells, causing shrinkage of the cytoplasm membrane or its detachment from the cell wall, and the interaction of the silver ions with the S-H bounds of the proteins can also disrupt and inactivate cells [8]. Naturally, the collision of AgNPs in colloids tends to aggregate into larger particles, so it is necessary to have a protective layer. Various polymers can solve this problem by acting as stabilizers. Their structure influences the control over the size and morphology of nanoparticles, indicating different redox reaction mechanisms [9].

Polyethylene terephthalate (PET) is a thermoplastic polyester for use in many fields, such as packaging, medical, automotive, electronics, and garment industries. A factor associated with its widespread use, it has developed into a problem of non-biodegradable plastic waste and is a serious global environmental issue [10]. Given the negative impact of plastic waste on living organisms and ecosystems, plastic disposal and recycling have received much attention from the scientific community. The chemical recycling of PET by depolymerization can be achieved through solvolytic chain cleavage, which produces high-quality

end-products as monomers or oligomers. It is usually carried out by various methods such as glycolysis, methanolysis, hydrolysis, ammonolysis, and aminolysis at high temperatures and catalysts. According to research on the kinetics of PET glycolysis, the complete depolymerization of PET with ethylene glycol necessitates the use of a catalyst, which results in the breakdown of the ester linkage and the formation of bis(2-hydroxyethyl terephthalate) (BHET) monomer via transesterification [11],[12]. Although BHET from complete reactions cannot be achieved without a catalyst, products in the presence of oligomers have the potential to be used as stabilizers for the synthesis of CSNPs.

In this study, we used PET oligomers from the glycolysis reaction as a stabilizer for the synthesis of CSNPs. We investigated how different concentrations of silver nitrate, D-glucose solution, and stabilizer affect the size of AgNPs. Polyethylene was chosen as a polymer matrix for blending with CSNPs because of its extensive use in various fields and the possibility of creating materials with unique properties and widened applications. The uniform shape and size of AgNPs in colloids are one of the factors of our study for CSNPs synthesis because they can promote good dispersion in the polymer matrix. Finally, the feasibility of blending CSNPs into polyethylene was studied by testing the antimicrobial efficiency.

2. Research Methodology

2.1 Materials

CSNPs were prepared by a chemical reduction method using AgNO_3 99.9% and D-glucose anhydrous from Ajax Finechem Pty Ltd (Australia), ethylene glycol 99.5% from Fisher Chemical (USA). The above chemicals were analytical reagent grade. The poly (ethylene terephthalate) (PET) bottle as a stabilizer was obtained by Singha packaging (Singha Corporation Company Limited, Thailand). A low-density polyethylene pellet received cooperation from InnoPlus (PTT Polyethylene Company Limited, Thailand).

2.2 Synthesis of Colloidal Silver Nanoparticles

Initially, PET oligomers were prepared by glycolysis reaction between poly (ethylene terephthalate) (PET) bottle pieces of $2 \times 2 \text{ mm}^2$ and ethylene glycol (EG) at 0.6, 1.0, 1.4, and 1.8%w/w. The reaction temperature was about $220 - 240^\circ\text{C}$ under constant reflux and magnetic stirring for 5 h and then cooled down to room temperature. In this step, we obtained a PET oligomer solution for CSNPs synthesis. Subsequently, CSNPs were prepared by mixing 100 ml of 0.01 M silver nitrate (AgNO_3) solution with 0.1 M D-glucose solution, and then 150 ml of oligomer solution at different weight ratios were slowly added with an increase in temperature to 120°C under stirring continuously for 2 h. The flow chart for the preparation of CSNPs is represented in **Fig. 1**.

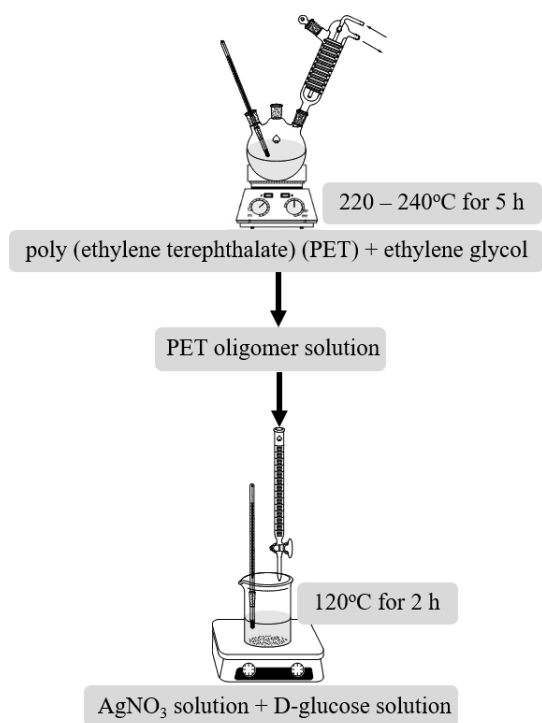


Fig. 1 The synthesis of CSNPs

After this step, we would find the suitable weight ratio of the PET oligomer solution to be used for further high-concentration synthesis. Finally, the colloidal solution with high concentrations of AgNO_3 solution was prepared at 0.50, 0.75, 1.00,

1.50, and 2.00 M, and varying D-glucose solution at 0.50, 1.00, and 2.00 M.

2.3 Blending and Forming of Nanocomposites

The high-concentration of CSNPs containing the smallest AgNPs were blended into polyethylene using an internal mixer (Chareon Tut MX500-D75L90) to produce 500 g of the polyethylene masterbatch at the AgNPs concentration of 5,000 ppm. The concentrations of AgNPs in polyethylene pellets were varied by varying the weight ratios of polyethylene masterbatch to polyethylene pellets at 0, 1, 2, 4, 10, and 15 phr using a single screw extruder (MASKIN TYP BX1-8). For a polyethylene sheet with a thickness of 0.3 mm, it was performed by a compression extruder (SCRIAL LP-204T) with square molding at a size of 120 mm. **Table 1** summarizes the preparation of polyethylene at various concentrations of AgNPs.

Table 1 Polyethylene preparation at various concentrations of silver nanoparticles

Sample	Concentrations of Polyethylene Masterbatch (phr)	Weight of Polyethylene (g)	Weight of Polyethylene Masterbatch (g)	Concentrations of Silver Nanoparticles (ppm)
Blank	0	500	0	0
1	1	495	5	50
2	2	490	10	100
3	4	480	20	200
4	10	450	50	500
5	15	425	75	750

2.4 Testing Antimicrobial Efficiency

The antimicrobial efficiency was determined by the plate count method. An agar plate preparation for the cultivation of microorganisms started with mixing 28 g of nutrient agar and 1,000 ml of distilled water in the beaker, and it was heated up to 260°C and kept under constant stirring at this temperature for 2 h. After that, the mixture was sterilized by autoclaving at 121°C under a pressure of 1.021 atm for 25 min, and it was cooled down to 50°C and poured into a sterile agar plate.

The testing was determined by mixing 90 ml of nutrient broth, 10 ml of microbial stock solution, and AgNPs samples in an Erlenmeyer flask and keeping them for 24 h. The sample might contain thousands, millions, or even billions of microorganisms per milliliter, so dilution was necessary for counting colonies between 30 and 300 colonies. 1 ml of sample was added to 99 ml of distilled water and mixed them together. This first dilution had a concentration (number of microorganisms per ml) of 1/100 that of the original sample. Subsequently, 1 ml of the first dilution was added to 99 ml of distilled water to make the second dilution. The second dilution had a concentration of 1/100 that of the first dilution and 1/10000 that of the original sample. This process was repeated until we had a series of dilutions.

The microbial stock solution was produced by mixing wastewater from the canal with nutrient broth and using an incubation time of 24 h. To test all samples for antimicrobial efficiency, we pipetted 0.1 ml of each dilution onto the

agar plate and spread it around using a sterile glass rod, incubated at 37°C for 24 h, and then counted colonies on the surface of the agar plate. The colony counting of each sample was averaged by repeating it three times, where each dilution was based on three agar plates.

2.5 Characterization method

Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR, Perkin Elmer spectrum 100) analysis was performed in the range of 4000–600 cm^{-1} to determine the different functional groups present in the PET oligomer solution from the glycolysis reaction. The particle size distribution and morphology of AgNPs in the colloidal solution were assessed using a scanning electron microscope (SEM, QUANTA 450 FEI) together with atomic force microscopy (AFM, TMC Parkin-Elmer AAnalyst 800). The concentration of AgNPs was determined by an atomic absorption spectrophotometer (AAS, Varian SpectrAA 220).

3. Results and Discussion

3.1 Characterization of PET oligomers

One of the parameters for the colloidal silver nanoparticles (CSNPs) synthesis is the stabilizers. This study uses a PET bottle's pieces recycling process to obtain PET oligomers as the source of stabilizers by a glycolysis reaction between poly (ethylene terephthalate) (PET) and ethylene glycol (EG). Past research has shown that the PET chain length can be reduced by this reaction, enabling a shorter chain length

of PET of less than 130 repeating units of the polymer [13]. The complete reaction in this study is that the physical characteristics of the obtained solution are clear and colorless, which means that the digestion of the PET bottle pieces in the EG appears as a homogeneous mixture. It means that the reaction can

reduce the PET chain length. The FTIR spectra of the obtained solution can be used to determine whether the functional groups differ from the PET functional groups reported in the literature [14]. **Fig. 2** shows the corresponding infrared absorption bands of the obtained solution from the glycolysis reaction.

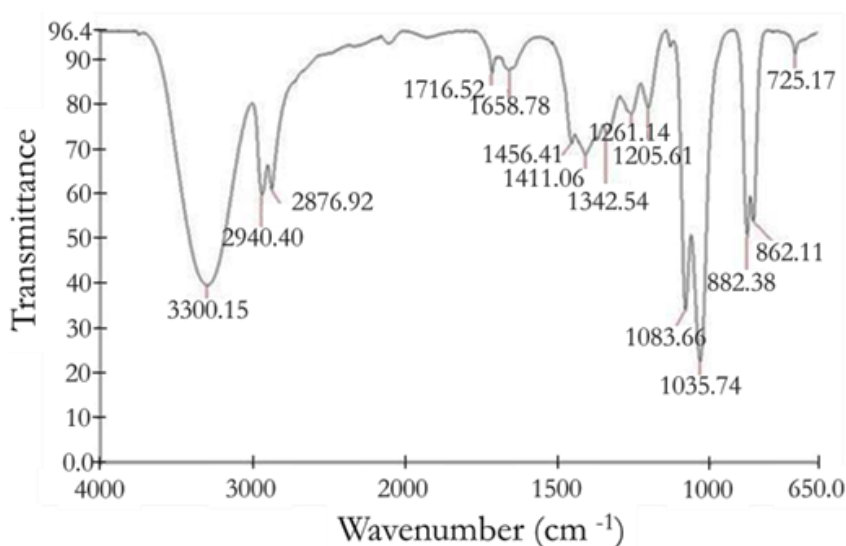


Fig. 2 FTIR spectra of the obtained solution from the glycolysis reaction

Table 2 summarizes the identified vibrational groups of the obtained solution from the glycolysis reaction. The absorption bands of the obtained solution detect the C-H bond stretching, which suggests the ethyl group and reveals the C=O bond stretching of the carboxylic acid group corresponding to the alkoxy carbonyl group. For the aromatic ring, the absorption bands can indicate the vibrations of the aromatic skeleton with stretching C=C, terephthalate group, and interaction of polar ester groups and benzene rings [14]. Based on the FTIR

spectra, we believe that the product from the glycolysis reaction is only PET oligomers and does not occur in other products. Because the glycolysis reaction in our study does not use a catalyst, complete depolymerization of PET to the bis-hydroxy ethyl terephthalate (BHET) monomer cannot be achieved. These results match our requirements because PET oligomers are low molecular weight polymers with short-chain structures. They may act as better stabilizers. However, glycolysis reaction requires sufficient reaction time and temperature [15].

Table 2 Bands with assigned vibrational modes from FTIR spectra of the obtained solution from glycolysis reaction

Bands Rang (cm ⁻¹)	Absorption Bands (cm ⁻¹)	Bands
3300	3300.15	OH group (hydroxyl)
2800-3000	2940.40 and 2876.92	C-H, Symmetrical stretching
1600-1700	1716.52 and 1658.78	Stretching of C=O of the carboxylic acid group
1300-1500	1456.41, 1411.06 and 1342.54	Stretching of the C-O group deformation of the O-H group and bending and wagging vibrational modes of the ethylene glycol segment /
1100-1300	1083.66	Vibrations aromatic skeleton with stretching C=C
	1261.14 and 1205.61	Methylene group and vibrations of the ester C-O bond
800-1000	882.38 and 862.11	Terephthalate Group (OOC ₆ H ₄ -COO)
700	725.17	Aromatic rings 1,2,4,5; Tetra replaced Interaction of polar ester groups and benzene rings

Fig. 3 shows the reaction mechanism between the PET chain and EG. Starting is to decompose the ester linkages in the PET chain with EG to produce oligomers, where the splitting of original molecules

into two parts is the occurrence of PET oligomers. The repeating units of the original PET chain are represented by subscript m. It is always greater than subscripts n and o of PET oligomers [16].

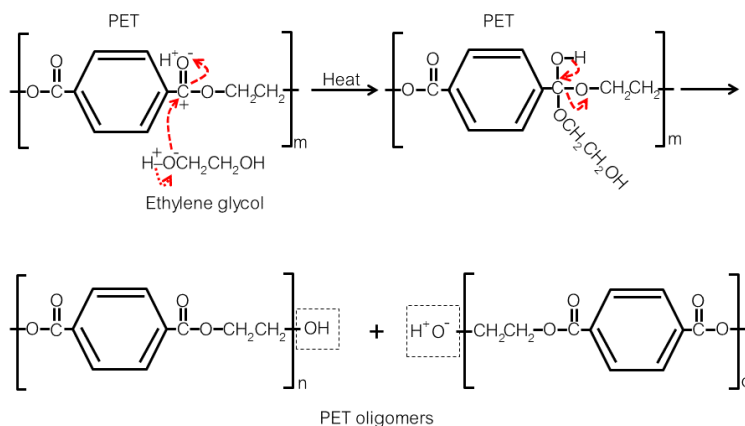


Fig. 3 The mechanism of the glycolysis reaction

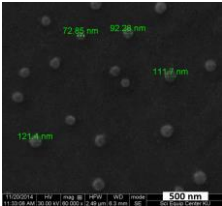
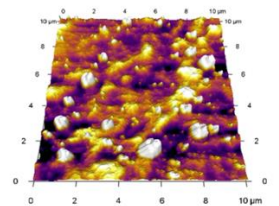
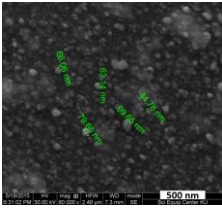
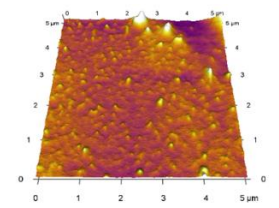
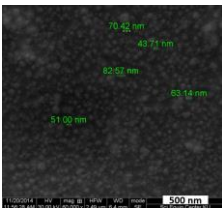
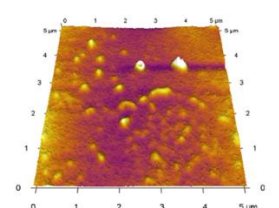
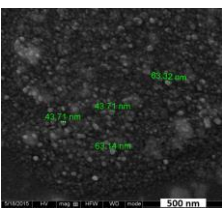
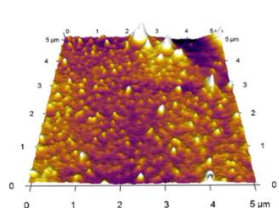
We chose PET oligomers as the source of stabilizers for CSNPs synthesis at low concentrations of AgNO₃ solution (0.01 M) and D-glucose (0.1 M) by varying the PET: EG ratios (0.6, 1.0, 1.4, 1.8 %w/w). **Table 3** shows SEM and AFM images of AgNPs in colloid for the morphology of particles. All PET: EG

ratio synthesis results in highly spherical AgNPs, and the average size of AgNPs in colloids can decrease with the increase in the PET: EG ratio. Only a few papers [17]-[20] have reported the synthesis of AgNPs with spherical shapes. The histogram for the particle size distribution for all samples is determined

to be 100 nanoparticles from SEM images. The results indicate that the condition of 1.8%w/w of PET: EG ratio for CSNPs synthesis yields a smaller mean particle diameter and a narrower size distribution; its average size is approximately 36 nm. These results are in agreement with the observed AFM images. Compared to other studies, the higher concentrations of stabilizing agents can affect the smaller size of the AgNPs. However, they also act as reducing agents, thereby accelerating the

concentration of silver particles, resulting in particle agglomeration to larger sizes. Although the direct comparison of the different methods is very complex, our study has shown that the function of PET oligomers is only as a stabilizer, and the increase of PET oligomer concentration can reduce the agglomeration of AgNPs [17]. For our study, the glycolysis reaction does not use a catalyst, and the solubility between the PET bottle's pieces and EG cannot increase more than 1.8%w/w of the PET: EG ratio.

Table 3 The average size of silver nanoparticles in colloid

PET: EG Ratios (%w/w)	Average size (nm)		SEM images	AFM images
	SEM	AFM		
0	116	110-120		
0.6	63	60-70		
1.0	49	40-50		
1.4	38	35-40		

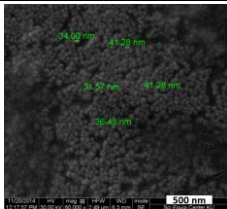
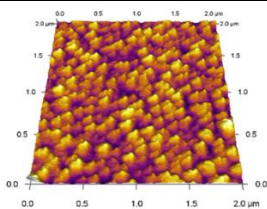
PET: EG Ratios (%w/w)	Average size (nm)		SEM images	AFM images
	SEM	AFM		
1.8	36	10-15		

Fig. 4 shows the pathway for the chemical reduction of silver ions on the PET oligomer structure. With the ability to be a reducing agent of D-glucose and EG, a plastic solvent, which is a protic solution with electron exchange capabilities. Thus, the contribution of electrons to the silver ions that enters the oxygen lone pair region of PET oligomers. A possible reaction

mechanism of AgNPs formation starts with forming of silver ion-PET oligomer complexes in the carbonyl group. AgNPs are formed by deprotonating silver ions with EG and D-glucose, whereas the steric effect of a long chain of PET oligomers acts as a stabilizer of colloids which reduces the aggregation of AgNPs [9].

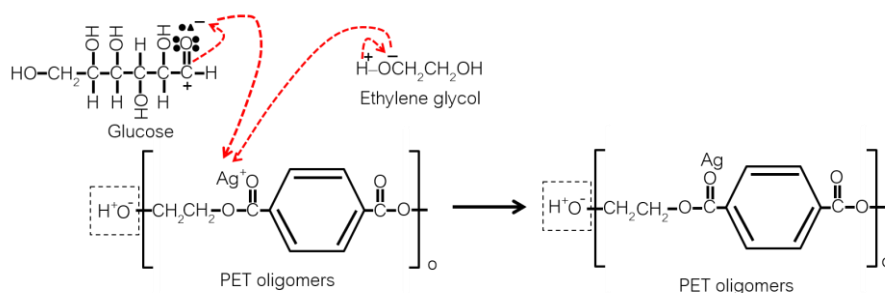


Fig. 4 The chemical reduction of silver ions on the PET oligomer structure

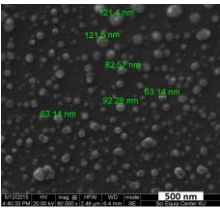
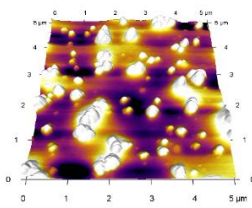
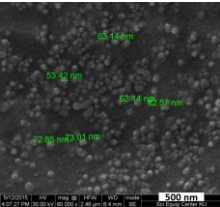
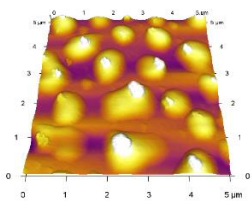
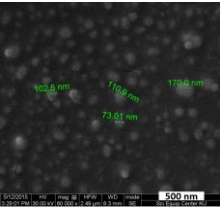
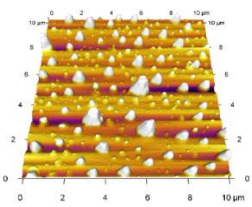
Our previous CSNPs synthesized data using a low concentration of AgNO_3 indicates that the smallest size of AgNPs can produce with the use of 1.8%w/w of PET: EG ratio. With this condition, it is possible to prepare the CSNPs using high concentrations of AgNO_3 , which possibly reduces the amount of blending to the polyethylene matrix to avoid the change of polymer properties. 1.8%w/w of PET:

EG ratio is chosen as the source of stabilizers for producing PET oligomers. D-glucose concentration is varied at 0.5, 1.0, and 2.0 M with a fixed AgNO_3 concentration at 1.0 M, resulting in the smallest size of the AgNPs of 58 nm with the use of a concentration of 1.0 M of D-glucose. After obtaining the suitable concentrations of D-glucose at 1.0 M, varying the concentration of AgNO_3 is

performed at 0.5, 0.75, 1.5, and 2.0 M. The obtained results indicate that the smallest size of AgNPs is about 42 nm with the use of a concentration of 0.75 M of AgNO₃, and it is also observed that they are highly spherical, well dispersed, and uniform in size. **Table 4** shows SEM and AFM images of AgNPs in colloid for the clarity of size and shape particles. The kinetics of AgNPs formation using various concentrations of AgNO₃ and a reducing agent is not completely surprising. It is the most popular strategy for controlling the size of AgNPs. Its concentration considerably affects the reduction rate and the nucleation and growth rates of AgNPs. In particular, in the case of reducing agents at low

concentrations, partly agglomerated large particles have an appearance that has many imperfections and leads to the final precipitation. On the other hand, large clumps of AgNPs can be observed at high concentrations, which is caused by instability because the solution has high ionic strength. At the suitable concentrations, the AgNPs with well-separated exhibit narrow size distribution, and few imperfections, the size slightly decreasing with increasing concentration [18]. In this study, the calculation of the average size from histograms using SEM images is the primary data, and the supporting data is AFM images. They show the results in the same direction.

Table 4 The average size of silver nanoparticles in colloid using 1.8% w/w of PET: EG ratio

Concentration (mol/L)		Average size (nm)		SEM images	AFM images
AgNO ₃	D-Glucose	SEM	AFM		
1.00	0.50	62	70-90		
1.00	1.00	58	60-80		
1.00	2.00	114	150-160		

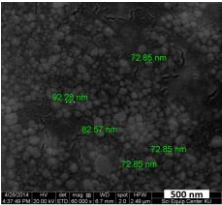
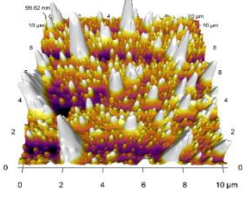
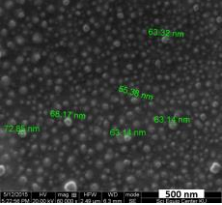
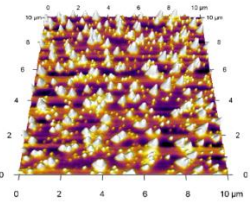
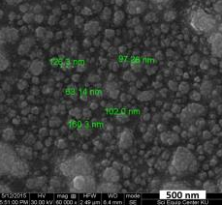
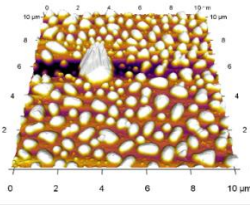
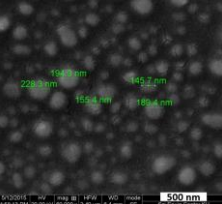
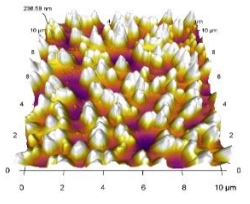
Concentration (mol/L)		Average size (nm)		SEM images	AFM images
AgNO ₃	D-Glucose	SEM	AFM		
0.50	1.00	79	90-100		
0.75	1.00	42	40-50		
1.50	1.00	110	100-110		
2.00	1.00	183	220-240		

Table 5 shows the concentration of AgNPs in colloids using atomic absorption spectroscopy (AAS). As can be seen in 0.75 M of AgNO₃ solution and 1.0 M of D-glucose, the concentration after filtration is 71,870 ppm with a filtration efficiency of 98.8%, using filter

paper no. 42 with a pore of 2.5 microns. Because this condition exhibits the smallest AgNPs, it reveals the highest filtration efficiency. We found that the agglomeration of larger particles tends to clump. It affects the ability to pass through the filter paper.

Table 5 Colloidal silver nanoparticles concentrations from AAS

Concentration (mol/L)		Concentrations (ppm)		Filtration efficiency (%)
AgNO ₃	D-Glucose	Before filtration	After filtration	
0.50	1.00	49,370	41,270	83.6
0.75	1.00	72,730	71,870	98.8
1.00	1.00	91,600	88,470	96.6
1.50	1.00	157,600	128,600	81.6
2.00	1.00	191,700	106,100	55.4

Based on the initial findings of CSNPs preparation, we expected that 0.75 M of AgNO_3 , 1.00 M of D-glucose, and 1.8%w/w of PET: EG ratio would provide the most suitable CSNPs for blending with polyethylene and produce satisfactory antibacterial activity. **Fig. 5** shows the

presence of CSNPs in the polyethylene matrix with various concentrations of AgNPs in polyethylene. Because of the higher AgNPs concentration in the polyethylene, the gray color is more visible than white. This characteristic appears to be the same for the pellet or sheet.

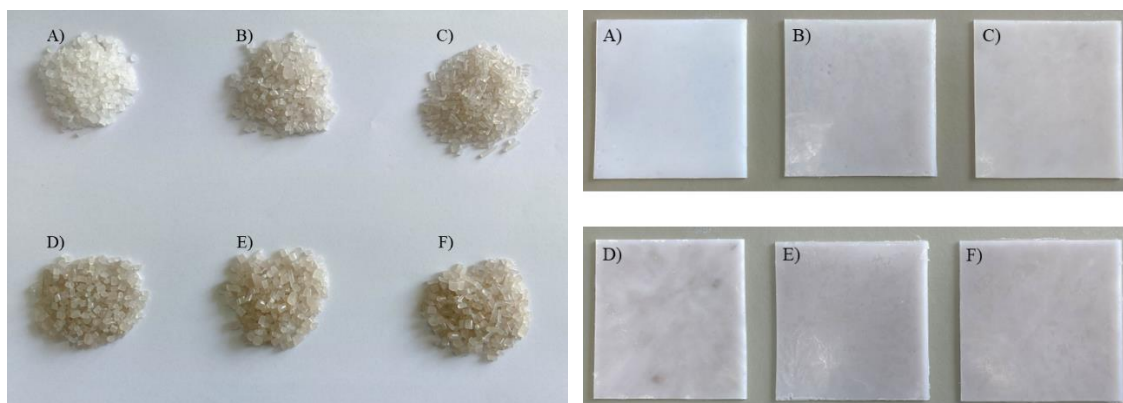


Fig. 5 The blending of CSNPs in polyethylene with various AgNPs concentrations; polyethylene pellet (left) and polyethylene sheet (right), A) = 0 ppm, B) = 50 ppm, C) = 100 ppm, D) = 200 ppm, E) = 500 ppm, F) = 750 ppm

The counting of viable microorganisms was carried out by the plate count method for testing the antimicrobial efficiency of CSNPs, polyethylene pellets, and polyethylene sheets when blended with CSNPs. After the incubation period, we

can count the colonies by comparing the control sample (without AgNPs concentration) and testing sample to determine the antimicrobial efficiency (%). **Table 6** shows the results of antimicrobial efficiency testing.

Table 6 Antimicrobial efficiency of colloidal silver nanoparticles and blending in polyethylene

AgNPs Concentration (ppm)	Antimicrobial efficiency (%)		
	CSNPs	PE pellet	PE sheet
1	43.5	NA	NA
5	83.5	NA	NA
10	98.4	NA	NA
25	100	NA	NA
50	100	87.6	65.9
100	100	91.1	72.2
200	100	94.6	81.7
500	100	97.7	90.3
750	100	99.7	96.7

NA is meaning of “not analysis”

The antimicrobial efficiency (%) of CSNPs is 98.4% when AgNPs concentration is only 10 ppm. The inhibition of polyethylene pellets is 94.6% when blended with CSNPs at 200 ppm of AgNPs concentration. Because particles embedded within the pellet reduce the silver nanoparticle sites, higher concentrations of AgNPs are required. The blending of CSNPs into the polyethylene sheets requires AgNPs concentration of up to 750 ppm for inhibition of 96.7%. The blending of CSNPs in polyethylene requires a high AgNPs concentration to achieve the same high levels of antimicrobial efficiency. Although increasing the AgNPs concentration results in higher antimicrobial efficiency, an inhibition level greater than 90% is acceptable in most studies. Many reports have been published on the antimicrobial efficiency of AgNPs. For example, the Ag^+ concentration in silver-infused lignin nanoparticles required for high antibacterial efficiency is 20 ppm, leading to a 94% inhibition. Likewise, the use of 500 ppm of AgNPs on polyester surfaces prevents bacterial growth and biofilm formation on polyester surfaces [19],[20]. The inhibition efficiency depends on the physiological interaction between silver and microbial by involving adsorption and accumulation of microbial cells and cytoplasmic membrane contraction or detachment from the cell wall. As a result, DNA molecules condense and lose their ability to replicate when Ag ions penetrate. Silver ions also interact with the

S-H boundaries of proteins, blocking and inactivating them [8]. Although the applicability of AgNPs in polyethylene in this study is less emitted when compared to lignin nanoparticles. However, the use of AgNPs concentrations in this research is similar to that of other studies.

4. Conclusion

Using PET oligomers as a stabilizer for CSNPs synthesis, the CSNPs showed colorless with varying AgNPs concentrations in the range from 41,270 to 106,100 ppm, and the sizes of the AgNPs from 36 to 183 nm. The suitable conditions can be synthesized by the AgNPs in a colloid with the smallest size of approximately 42 nm and a concentration of 71,870 ppm. In testing of antimicrobial efficiency, CSNPs showed an antimicrobial efficiency of more than 95% using the AgNPs concentration of 10 ppm, while polyethylene pellets and polyethylene sheets blended with CSNPs used the AgNPs concentrations of 200 ppm and 750 ppm, respectively. The incorporation of AgNPs into polymers can add new functionalities, making it an attractive alternative to medical or packaging applications. In particular, its use as a filler in polyethylene has attracted a lot of attention due to its wide range of applications in daily life.

5. Acknowledgement

I gratefully acknowledge the assistance of the Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Rangsit University.

6. References

- [1] V. K. Sharma, R. A. Yngard and Y. Lin, "Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 145, pp. 83 – 96, Jan. 2009.
- [2] H. Wang, X. Qiao, J. Chen and S. Ding, "Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 256, pp. 111 – 115. Apr. 2005.
- [3] N. Leopold and B. Lendl, "A new method for fast preparation of highly surface-enhanced raman scattering (SERS) active silver colloids at room temperature by reduction of silver nitrate with hydroxylamine hydrochloride," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 107, pp. 5723 – 5727, May. 2003.
- [4] Z. Khan and A. Talib, "Growth of different morphologies (quantum dots to nanorod) of Ag-nanoparticles: Role of cysteine concentrations," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 76, pp. 164 – 169, Mar. 2010.
- [5] A. S. Maryan and M. Gorji, "Synthesize of nano silver using cellulose or glucose as a reduction agent: the study of their antibacterial activity on polyurethan fibers," *Bulgarian Chemical Communications*, vol. 47, pp. 151 – 155, Sep. 2016.
- [6] M. Aljohani, J. Alkabli, M. M. Abualnaja, A. F. Alrefaei, S. J. Almeahmadi, M. H. H. Mahmoud, N. M. El-Metwaly, "Electrospun AgNPs-poly lactate nanofibers and their antimicrobial applications," *Reactive and Functional Polymers*, vol. 167, Jul. 2021.
- [7] D. Wang, K. Li, C. Zhou, L. Lei, Y. de R. de Mim'erand, X. Jin, J. Guo, "Bi₂MoO₆ and Ag nanoparticles immobilized on textile by plasma-derived innovative techniques to generate antimicrobial activity," *Applied Surface Science*, vol. 585, Feb. 2022.
- [8] T. V. Mathew and S. Kuriakose, "Studies on the antimicrobial properties of colloidal silver nanoparticles stabilized by bovine serum albumin," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 101, pp. 14 – 18, Jan. 2013.
- [9] A. Q. Zhang, L. J. Cai, L. Sui, D. J. Qian and M. Chen, "Reducing properties of polymers in the synthesis of noble metal nanoparticles," *Polymer Reviews*, vol. 53, pp. 240 – 276. Apr. 2013.
- [10] Y. Srithep, N. Hongkhaum and P. Takhot, "Characterization of bioplastics poly (lactic acid) blended with thermoplastic starch," *RMUTP Research Journal*, Vol. 14, No. 2, July-December. 2020.
- [11] A. M. Al-Sabagh, F. Z. Yehia, Gh. Eshaq, A. M. Rabie and A. E. ElMetwally, "Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 25, pp. 53 – 64, Apr. 2016.

- [12] S. Lalmangaihzuale, Z. Laldinpuii, C. Lalmuanpuia and K. Vanlaldinpuia, "Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) using biomass-waste derived recyclable heterogeneous catalyst," *Polymers*, vol. 13, 13 pages, Dec. 2021.
- [13] V. Sinha, M. R. Patel, J. V. Patel, "Pet waste management by chemical recycling: A review," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 18, pp. 8 – 25, Mar. 2010.
- [14] A. P. dos Santos Pereira, M. H. P. da Silva, É. P. Lima Júnior, A. dos Santos Paula and F. J. Tommasini, "Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymer concrete waste," *Materials Research*, vol. 20, Oct. 2017.
- [15] L. K. Krehula, Z. Hrnjak-Murgic', J. Jelenc'ic' and B. Andric'ic', "Evaluation of poly(ethylene-terephthalate) products of chemical," *Journal of Environmental Polymer Degradation*, vol. 17(1), pp. 20 – 27, Apr. 2009.
- [16] M. Khoonkari, A. H. Haghighi, Y. Sefidbakht, K. Shekoohi and A. Ghaderian, "Chemical recycling of PET wastes with different catalysts," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, 11 pages, Oct. 2015.
- [17] J. L. Cholula-Díaza, D. Lomelí-Marroquín, B. Pramanick, A. Nieto-Argüello, L. A. Cantú-Castillo and H. Hwang, "Synthesis of colloidal silver nanoparticle clusters and their application in ascorbic acid detection by SERS," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 163, pp. 329 – 335, Dec. 2018.
- [18] E. Konował, M. Sybis, A. Modrzejewska-Sikorska and G. Milczarek, "Synthesis of dextrin-stabilized colloidal silver nanoparticles and their application as modifiers of cement mortar," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 104, pp. 165 – 172, Jun. 2017.
- [19] F. Fontecha-Umaña, A. G. Ríos-Castillo, C. Ripolles-Avila and J. J. Rodríguez-Jerez, "Antimicrobial activity and prevention of bacterial biofilm formation of silver and zinc oxide nanoparticle-containing polyester surfaces at various concentrations for use," *Foods*, vol. 9, Apr. 2020.
- [20] K. Lintinen, S. Luiro, P. Figueiredo, E. Sakarinen, Z. Mousavi, J. Seitsonen, G. N. S. Rivière, U. Mattinen, M. Niemelä, P. Tammela, M. Österberg, L. S. Johansson, J. Bobacka, H. A. Santos, and M. A. Kostianen, "Antimicrobial colloidal silver–lignin particles via ion and solvent exchange," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 7, pp. 15297 – 15303, Aug. 2019.

Selection of Amylase-Producing Filamentous Fungi to Hydrolyze Cassava Starch

Chutima Kaewkrajay^{1*} and Tida Dethoup²

¹Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

²Faculty of Agriculture, Kasetsart University

¹96 Pridi Banomyong Road, Pratuchai, Phranakhon Si Ayutthaya District, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

²50 Ngamwongwan Road, Lad Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

Received 22 December 2021; Revised 16 March 2023; Accepted 5 April 2023

Abstract

Due to the current crisis of increasing petroleum fuel prices and problems concerning global warming, cassava starch is used as a low-cost carbon source for ethanol production. Several studies suggested that fungal amylase could be the biochemical solution for transforming polysaccharides into simple sugar. Therefore, the objective of this study was to investigate and characterize the highly efficient amylase-producing fungal isolates that hydrolyze cassava starch to sugar. The four hundred twenty-one (421) isolates of filamentous fungi were tested for their ability to digest 2% soluble starch using an agar plate assay. Among these 421 isolates, 72 fungal isolates exhibited a clear zone diameter in 7 days. All 72 fungal isolates were also tested for their ability to digest 2% cassava starch on agar plates. Four isolates, including 1-5, 13-3, 21-3, and 5-3, had the largest clear zone sizes (≥ 10 mm). They were identified as *Taralomyces macrosporus*, *Penicillium* sp., *T. flavus*, and *Penicillium* sp., respectively. The partial sequencing of internally transcribed spacer (ITS) regions was performed for the selected fungal isolate. The resulting *T. flavus* 21-3 gene sequences were deposited in GenBank under the accession number OQ184710. The sugar liberation was performed in a medium containing 2% cassava starch broth. The results showed that *T. flavus* 21-3 demonstrated the highest efficiency, with a maximum reducing sugar concentration of 5.14 g L⁻¹ and an enzyme activity of 0.37 U mL⁻¹. After 7 days of incubation at 30 °C and growth in a medium containing cassava starch with a pH of 7.5, the culture exhibited high levels of enzymatic activity. These results implied that *T. flavus* 21-3 has the ability to produce amylase and could digest cassava starch into sugar, which is advantageous for industrial applications and warrants further research.

Keywords : Amylase; Cassava starch; Filamentous fungi; Hydrolysis; Selection

1. Introduction

Thailand is a tropical country with a rich biodiversity of plants, animals, and microorganisms. Since the 1928 discovery of penicillin from *Penicillium notatum*, fungi have been regarded as a goldmine among microorganisms. The study of fungal bioactive compounds was conducted. The most common producers of bioactive compounds are ascomycetes (*Aspergillus*, *Penicillium*, and *Fusarium*) and imperfect fungi [1]. Many researchers reported that fungi are able to produce many bioactive substances such as alkaloids, antibiotics, camptothecin, enzymes, podophyllotoxin, and taxol [2]-[7], which have valuable potential applications in the chemical, pharmaceutical, food, agricultural, and biofuel industries.

Cassava (*Manihot esculenta*) is thought to be Thailand's most important economic crop. Planting has increased in Northeastern, Central (including Eastern), and Northern Thailand. In 2020, Thailand's total cassava plantation area was 9.4 million rai, and its annual production was approximately 29.0 million tons [8]. Cassava roots are utilized commercially for food, paper, glue, and ethanol production. Ethanol has demonstrated the ability to substitute traditional fossil fuels with the added benefits of renewability, non-toxicity, and clean consumption. Currently, cassava starch is used as a renewable carbon source alternative to sustain ethanol production. In addition to allowing enzymes to digest starch into sugar, cassava starch also enables filamentous fungi, which can produce α -amylase and glucoamylase, to digest starch into sugar. The filamentous fungi *Aspergillus niger*, *A. oryzae*, *A. kawachii*, *Curvularia lunata*,

and *Thermomucor indicae-seudaticae* have been studied for their ability to produce α -amylase and glucoamylase [9]-[13]. Screening filamentous fungi that could effectively produce α -amylase and glucoamylase has greater industrial benefits.

Amylase is a group of hydrolases capable of digesting starch by cleaving the glycosidic bond. This enzyme is divided into two important groups, namely glucoamylase and α -amylase. Glucoamylase (α -1,4-glucan glucohydrolase, amyloglucosidase, EC 3.2.1.3) produces glucose residues by continuously cleaving α -1,4 glycosidic bonds from non-reducing ends of amylose and amylopectin, whereas α -amylase (endo-1,4- α -D-glucan glucohydrolase) randomly cleaves α -1,4 glycosidic bonds within the linear amylose chain [14]. In general, they are used extensively in the food, bakery, brewing, detergent, and textile industries, particularly in alcohol production factories [15]. Recently, Beltagy *et al.* [16] reported that *A. flavus*, an amylase-producing fungus, was selected according to the formation of a clear zone. The enzyme produced from this fungus was utilized in bioethanol production. In addition, Kalia *et al.* [17] reported that *Trichoderma reesei* was able to produce α -amylase from starch effluent obtained from the textile industry. This enzyme can also be utilized during the desizing process.

The main objective of the present study was to identify and characterize filamentous fungal isolates with a high ability to produce amylase enzymes for digesting cassava starches into sugar using plate assays. Based on the zone of inhibition, potential isolates were selected for assessment of enzyme production using cassava starch as the raw material. The optimization of enzyme production was investigated.

2. Research Methodology

2.1 Preparation of materials

Fresh cassavas, a 12-month Kasetsart University (KU) strain, were washed, peeled, and cut into small pieces before being exposed to sunlight for 1–3 days to allow them to dry thoroughly. The cassava chips were then ground down and sifted through a 150 μm mesh screen. Cassava starches had to be kept in a clean and dry container for further study.

The cassava starches were prepared for moisture analysis according to Thai Industrial Standards TISI No. 52, method number 6.4. The percentage of starch was then determined using the color method [18]. This flour was used as the substrate.

2.2 Cassava starch hydrolysate from fungi

The 421 isolates of filamentous fungi were preserved in the Pathogenics Department, Faculty of Agriculture, Kasetsart University. All of them were isolated from plant debris in different locations in Thailand. The soil dilution plate method, soil plate method, alcohol treatment method, and heat treatment method were used to separate the fungi. All active fungal isolates were placed on potato dextrose agar (PDA) plates, incubated at room temperature for 7 days, and then pierced with a 5 mm sterile steel borer. Each mycelial plug was placed in the middle of a 2% soluble starch agar plate, incubated at room temperature for 7 days, and then flooded with iodine solution (2 g iodine, 2 g ammonium sulfate and 300 ml deionized water). Only the clear zone size was measured with the vernier caliper, excluding the fungal colony.

The ability of fungal isolates to hydrolyze soluble starch was evaluated using cassava starch. The mycelial plug of each selected fungus was placed in the middle of a 2% cassava starch agar plate and then incubated at room temperature for 7 days. Only the clear zone size was measured using a vernier caliper. All experiments were done in triplicate, and the results were expressed as the average $\pm$ SD.

Fungi capable of producing a clear zone on the cassava starch were collected for the starch digesting test with a 2% cassava starch broth medium. Each fungus was cultured on a PDA at room temperature for 7 days. Five mycelial plugs of each fungus were taken using a 5 mm sterile steel borer and inoculated into a cassava starch broth medium. The culture broth was placed on the rotary shaker with a shaking speed of 130 rpm at room temperature. After 7 days, the samples were collected, and the enzymatic activity was analyzed. An amount of reducing sugar was determined using the Nelson-Somogyi method [19]. Each experiment was performed in triplicate.

In the current study, the effects of important factors on amylase production in shake flask cultivation were evaluated using the one-factor-at-a-time technique. These factors were pH, temperature, and incubation period. The experiments were done in a cultivation medium consisting of 2% cassava starch with an initial pH of 7.0, which was then sterilized by autoclaving at 121 $^{\circ}\text{C}$ for 15 min. To facilitate the digestion of cassava starch, each selected fungus was cultivated in sterile media for 7 days at room

temperature with a shaking speed of 130 rpm. In the specific experiments of one-factor-at-a-time optimization, various levels of each target factor were considered, such as pH (5.0, 5.5, 6.0, 7.0, 7.5, and 8.0), temperature (26, 28, 30, 32, and 34 °C), and incubation period (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, and 14 days). Each experiment was performed in triplicate.

2.3 Identification of fungi

The morphological characteristics of the colonies were determined using the method described by Manoch *et al.* [20] and Domsch *et al.* [21]-[22]. Growth pattern, color, and texture on different media, such as malt extract agar (MEA), Czapek's agar (CZA), Czapek yeast extract agar (CYA), and oatmeal agar (OA), were observed for 7 to 14 days at room temperature. The diameter of colonies was measured in millimeters, most effectively by transmitted light and from the reverse side. Microscopic characters were examined on a slide preparation using sterile distilled water and lactophenol as mounting media and observed under a light microscope. *Camera lucida* drawings were employed. Photomicrographs of the fungal structure were taken under stereo, light, and scanning electron microscopes.

The identification of a selected fungus was confirmed using molecular techniques and ITS primers. DNA was extracted from young mycelia using a modified Murray and Thompson method [23]. The universal primer pairs ITS1 and ITS4 were used for ITS gene amplification [24]. The PCR reactions

were conducted on a thermal cycler, and the amplification process consisted of initial denaturation at 95 °C for 5 min, 34 cycles at 95 °C for 1 min (denaturation), at 55 °C for 1 min (annealing), and at 72 °C for 1.5 min (extension), followed by a final extension at 72 °C for 10 min. The PCR products were examined by agarose gel electrophoresis (1% agarose with 1X TBE buffer) and visualized under UV light after staining. DNA sequencing analyses were performed using the dideoxyribonucleotide chain termination method by Macrogen Inc. (Seoul, South Korea). The DNA sequences were edited using the FinchTV software, submitted to the BLAST program for alignment, and compared to those of fungal species in the National Center for Biotechnology Information (NCBI) database (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>).

2.4 Analytical methods

The sugar concentration was determined using the Nelson-Somogyi method. The high sugar concentration was diluted with distilled water until the optical density was in the range of 0.1 to 1.0, measured at a wavelength of 520 nm. The sample sugar concentrations were compared to the glucose standard.

The analytical enzymatic activity was described by Saleem and Ebrahim [14] with modifications. The reaction mixture, consisting of 1 ml of 2% soluble starch in sodium acetate buffer (pH 6.0) and 1 ml of crude extract, was incubated at 40 °C and left to stand for 30 min. The amount of reducing sugar was determined using the Nelson-Somogyi method and

spectrophotometrically measured at a wavelength of 520 nm. The results were compared to the glucose standard curve. One unit of amylase activity is defined as the amount of enzyme necessary for releasing 1 μmol of glucose under optimized assay conditions.

3. Results and Discussion

3.1 Soluble starch hydrolysate from fungi

The best of the 421 isolates of filamentous fungi, including 23 genera and 32 species, were tested with 2% soluble starch by inoculating the center of a soluble starch agar medium and incubating it at room temperature for 7 days. The results showed that 72 isolates were able to digest soluble starch, with three isolates (21-3, 13-3, and 5-3) producing a clear zone larger than 20 mm, 10 isolates producing a clear zone between 10 and 20 mm, and the rest producing a clear zone smaller than 10 mm. The isolate 21-3 produced the largest clear zone at 42 ± 2 mm. The clear zone after flooding with iodine solution is shown in Fig. 1. Yuwa-Amornpitak [25] reported that the largest clear zone of 0.1% starch agar at pH 4 and subjected to the culture filtrate of *Rhizopus* spp. isolated from look-pang (a traditional Thai fermenter) measured 57 mm. In addition, 166 fungal isolates obtained from 12 look-pang-khao-mak samples were screened for their ability to hydrolyze starch. Among these, 37 isolates of filamentous fungi showed a hydrolysis capacity within the 10–11 mm range. The results revealed that these fungi were able to produce the starch-degrading enzyme [26]. The screening of endophytic fungi for amylase production was proposed by Sunitha *et al.* [27]. Out of 30 endophytic isolates, only

seven isolates demonstrated amylolytic activity on solid media. Among these seven isolates, *Cylindrocephalum* sp. (Ac-7) showed the largest clear zone. In 2014, Saleem and Ebrahim [14] reported that out of 46 fungal isolates, eight isolates (17.39%) exhibited high amylase activity, 27 isolates (58.70%) exhibited moderate activity, and the rest (23.91%) exhibited low amylase activity. Among these fungal species, *A. niger* and *Rhizopus stolonifer* were the most active in producing amylase. The screening of amylase-producing microorganisms was also proposed by Zhou *et al.* [28]. After placing the crude enzyme solution on a soluble starch plate and allowing it to incubate overnight, the iodine solution was flooded. The largest clear zone size of the starch hydrolysis was selected to determine amylase activity. The results showed that the amylase-producing activity of fungal isolate M8 was not significantly different from that of bacterial isolate A-1, with an average of 1.50 U mL^{-1} .

On the other hand, by classifying the fungi above using the method of Manoch *et al.* [20] and Domsch *et al.* [21]–[22], the 72 isolates that produced clear zones on 2% soluble starch and enzymes capable of digesting starch into sugar were the following: 16 isolates of *A. niger*, three isolates of *C. lunata*, seven isolates of *T. flavus*, 10 isolates of *Scytalidium thermophilus*, five isolates of *Rhizomucor pusillus*, and 31 isolates of unidentified species due to being sterile fungi. Sattar Qureshi *et al.* [29] proposed that amylase production was carried out by various fungal species, including *Mucor geophyllus*, *A. niger*, *A. fumigatus*, *P. lilacinum*, and a mixed culture (*A. niger* +

A. fumigatus). The results showed that the maximum production of α -amylase (1.36 U mL^{-1}) was produced by *A. fumigatus* when grown at $31 \pm 2^\circ\text{C}$ for 168 h in the medium without glucose. The fungal species, namely *Aspergillus* sp., *Chaetomium* sp., and *Penicillium* sp., also showed high amylolytic activity when the clear zone diameter on the plate was evaluated [30].

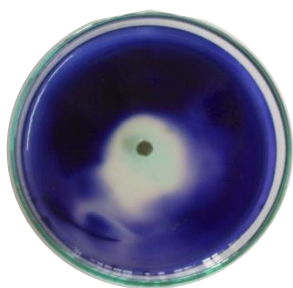


Fig. 1 Clear zone on 2% soluble starch of filamentous fungi, after incubation at room temperature for 7 days and then flooded with iodine solution.

3.2 Selection of cassava starch hydrolyzing fungi

Seventy-two isolates of fungi that can digest soluble starch were tested for their ability to digest 2% cassava starch on an agar medium incubated at room temperature for 7 days. The test was repeated three times before measuring the clear zone size. It was found that only 18 isolates were able to digest cassava starch and soluble starch (Table 1), whereas the remaining isolates could only digest soluble starch but not cassava starch. A reason for this might be that cyanogenic glucosides remaining in cassava starch dominated the digestion of fungi. Senn and Pieper [31] reported that cassava was toxic due to more than 2.80 g kg^{-1} of the cyanogenic glucoside.

Table 1 The fungal isolates produced a clear zone in the 2% cassava starch agar medium.

Fungal Isolation	Identification	Clear zone (mm)
21-3	<i>Talaromyces flavus</i>	35 ± 3
5-3	<i>Penicillium</i> sp.	13 ± 3
13-3	<i>Penicillium</i> sp.	12 ± 1
1-5	<i>Talaromyces macrosporus</i>	10 ± 1
2.2-1	<i>Aspergillus fumigatus</i>	6 ± 1
5-2	<i>Aspergillus flavus</i>	6 ± 1
10-1	<i>Eupenicillium</i> sp.	6 ± 1
5-2-8	<i>Aspergillus</i> sp.	6 ± 1
13-4	<i>Humicola</i> sp.	6 ± 1
12-1	<i>Mycelium hyphae</i>	5 ± 1
10-3	<i>Aspergillus terreus</i>	5 ± 2
16-3	<i>Penicillium</i> sp.	5 ± 1
2-1	<i>Aspergillus niger</i>	4 ± 0
2.1-8	<i>Aspergillus</i> sp.	4 ± 1
1-1	<i>Talaromyces flavus</i>	4 ± 0
15-2	<i>Eupenicillium parvum</i>	3 ± 0
11-2	<i>Penicillium</i> sp.	2 ± 0
11-2-18	<i>Aspergillus</i> sp.	1 ± 0

It was found that the following filamentous fungi, *A. niger*, *A. oryzae*, *A. kawachii*, *C. lunata*, and *T. indicae-seudatica*, could produce α -amylase enzyme and glucoamylase [9]-[13]. *A. niger* was also found in the 2-1 isolate; however, the 2-1 isolate could only produce a clear zone of $4 \pm 0 \text{ mm}$ during cassava starch digestion. It was determined that fungi capable of producing a clear zone larger than 10 mm had a high level of performance. The 21-3 isolate of *T. flavus* (Fig. 2) produced a clear zone that was greater than $35 \pm 3 \text{ mm}$, outperforming all other isolates in this experiment. The gene sequence was deposited in GenBank under the accession number OQ184710. The 5-3 isolate of *Penicillium* sp. could produce a clear zone of $13 \pm 3 \text{ mm}$. The 13-3 isolate of

Penicillium sp. could produce a clear zone of 12 ± 1 mm, and the 1-5 isolate of *T. macrosporus* could produce a clear zone of 10 ± 1 mm.

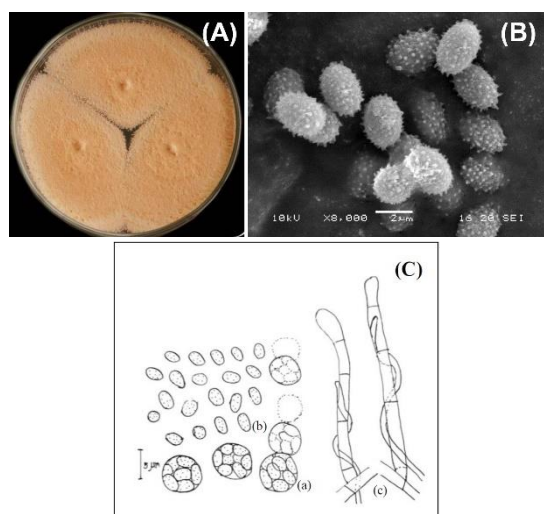


Fig. 2 *Taralomyces flavus* 21-3, (A) Growing on PDA medium for 14 days; (B) Spores pictured under a scanning electron microscope and (C) Camera lucida drawings of *T. flavus*, (a) asci and ascospores, (b) ascospores and (c) ascomatal initials.

3.3 Selection of fungi digested cassava starch to sugar

Four fungal isolates, 21-3, 5-3, 13-3, and 1-5, were tested for their ability to digest 2% cassava starch broth with a shaking speed of 130 rpm at room temperature for 7 days. The Nelson-Somogyi method was used to determine the amount of sugar and enzymatic activity in the aliquot. The results showed that *T. flavus* 21-3 was able to produce a reducing sugar of 5.14 g L^{-1} from the digestion of cassava, and its enzymatic activity was 0.37 U mL^{-1} (Table 2). As a result, the 21-3 was selected for further

studies. In 2003, Peixoto *et al.* [32] studied the effect of various carbon sources on the growth and amylase activity of *R. microsporus* var. *rhizopodiformis*. The results revealed that this fungus produced high levels of amylolytic activity at 45°C in a liquid medium supplemented with starch, sugarcane bagasse, oatmeal, or cassava flour. Cassava starch and other carbon sources, such as soluble starch, potato starch, and corn starch, have also been reported as effective substrates for glucoamylase production. At the end of fermentation, glucoamylase production by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*, which contained wild-type glucoamylase cDNA from *A. awamori*, was 4.90 U mL^{-1} in cassava starch medium, 8.30 U mL^{-1} in potato starch medium, 7.00 U mL^{-1} in soluble starch medium, and 2.70 U mL^{-1} in corn starch medium [33].

Table 2 Digestion of 2% cassava starch broth to sugar by fungal isolates.

Fungi	Clear zone (mm)	Enzymatic activity (U mL^{-1})	Reducing sugar (g L^{-1})
<i>T. flavus</i> 21-3	35 ± 3	0.37 ± 0.01	5.14 ± 0.04
<i>Penicillium</i> sp. 5-3	13 ± 3	0.24 ± 0.01	2.88 ± 0.02
<i>Penicillium</i> sp. 13-3	12 ± 1	0.21 ± 0.00	2.38 ± 0.02
<i>T. macrosporus</i> 1-5	10 ± 1	0.13 ± 0.00	1.00 ± 0.01

3.4 Optimal conditions for digesting cassava starch to sugar

T. flavus 21-3 was examined under various pH, temperature, and incubation conditions, and the results revealed that the most suitable conditions for starch digestion were insemination in cassava starch broth with an initial pH of 7.5, a temperature of 30°C , and an incubation

period of 9 to 14 days (Table 3). However, the cassava starch broth may become dry if digestion is allowed to continue for too long. Yuwa-Amornpitak [26] used fungi isolated from look-pang and the yeast *S. cerevisiae* to produce ethanol from cassava chips, and it was found that *Rhizopus* fungi could be isolated from 10 isolates of look-pang. The study also discovered that after 72 h of incubation, *Rhizopus* sp. #3Su could produce the highest amount of sugar at 25.90% from a source containing 6% cassava. Regarding the incubation period of 24 h, a fermentation of the *Rhizopus* sp. #3Su co-culture with the *S. cerevisiae* yeast could produce 14.4 g L⁻¹ of ethanol from a source containing 6% cassava. Kunamnemi *et al.* [34] discovered a suitable environment for the thermotolerant fungus, *Thermomyces lanuginonius*. Using wheat and allowing it to incubate for 120 h at 50 °C, 90% humidity, pH 6.0, a salt concentration of 1.5:10 (v/w), and a bran weight ratio of 1% (w/w) could facilitate the production of amylase enzyme at a maximum of 534 U g⁻¹. Moreover, Ray [35] reported the results of using two fungi, *Botryodiplodia theobromae* and *R. oryzae*, to digest a medium source containing 2% cassava incubated at 30 °C and pH 6. It was found that the amylase enzyme could be produced at 3.30 and 3.80 units, respectively. The results also demonstrated that adding ammonium acetate and ammonium nitrate to the medium source (subjected to a 2-L fermentation container) could produce a higher amount of enzymes at 4.80 and 5.10 units, respectively.

Table 3 Digestion of 2% cassava starch broth to sugar by *Taralomyces flavus* 21-3 at different factors.

Factors	Enzymatic activity (U mL ⁻¹)
pH	
5.0	0.02±0.00
5.5	0.04±0.01
6.0	0.04±0.01
6.5	0.03±0.00
7.0	0.04±0.00
7.5	0.58±0.02
8.0	0.04±0.01
Temperature (°C)	
26	0.01±0.00
28	0.18±0.01
30	0.47±0.00
32	0.17±0.01
34	0.18±0.01
Incubation period (Days)	
6	0.01±0.00
7	0.04±0.00
8	0.06±0.01
9	0.26±0.01
10	0.17±0.00
11	0.24±0.01
12	0.37±0.01
13	0.33±0.00
14	0.40±0.00

*pH and temperature of cassava starch hydrolysate were incubated for 7 days.

When exposed to a new fungal isolate with a high amylase production efficiency, *A. flavus*, isolated from soil in Syria, could produce a large number of enzymes at pH 5 and a temperature of 50 °C [36]. *Aspergillus* sp., isolated from seeds, is highly effective at producing amylase and could efficiently produce enzymes by fermenting a mixture of wheat,

soil, oil, and bran in a 1:2:2 ratio [37]. According to research on thermotolerant fungi with high efficiency, soil-isolated *Penicillium rugulosum* could produce a significant amount of amylase when incubated for 3 days in a carbon source containing galactose at pH 7.0 and a temperature of 57 °C [38]. *A. flavus*, isolated from Indian soil, could produce amylase when incubated at pH 6.0 and 30 °C on a *Cocos nucifera* substrate [39].

It is evident that screening and selecting amylase-producing fungi that are able to efficiently digest cassava starch into sugar will be beneficial to industries.

4. Conclusion

The screening and selection of 421 filamentous fungi capable of efficiently digesting cassava starch into sugar found that 18 isolates could digest 2% cassava starch. Among the 18 isolates, only four isolates produced a clear zone with a minimum of 10 mm. *T. flavus* 21-3 produced a larger clear zone of 35 ± 3 mm than other species. The maximum amount of reducing sugar was 5.14 g L^{-1} , and the enzymatic activity was 0.37 U mL^{-1} . When subjected to the 21-3 isolate, it was found that fermentation of 2% cassava starch for 9 to 14 days at 30 °C and pH 7.5 provided the most suitable conditions. For the digestion of cassava starch by this fungus, our findings suggest that nutrient components such as initial carbon concentration, nitrogen sources, and growth factors should be optimized. In addition, large-scale amylase production should be further studied to confirm the efficiency of *T. flavus* 21-3.

5. Acknowledgement

This work was completely supported by a grant from National Research Council of Thailand (NRCT).

6. References

- [1] J. Berdy, "Bioactive microbial metabolites," *The Journal of Antibiotic-Nature*, vol. 58, p. 1, Jan. 2005.
- [2] A. Sattar Qureshi, M. Umar Dahot and A.U. Rehman, "Production of amylase by fungi through submerged fermentation" *Pakistan Journal of Biotechnology*, vol. 1, pp. 35–42, Jan. 2004.
- [3] M. Chen, C.L. Shao, X.M. Fu, R.F. Xu, J.J. Zheng, D.L. Zhao, Z.G. She and C.Y. Wang, "Bioactive indole alkaloids and phenyl ether derivatives from a marine-derived *Aspergillus* sp. Fungus," *Journal of Natural Products*, vol. 76, pp. 547–552, Mar. 2013.
- [4] S. Sarrocco, S. Diquattro, F. Avolio, A. Cimmino, G. Puntoni, F. Doveri, A. Evidente and G. Vannacci, "Bioactive metabolites from new or rare fimicolous fungi with antifungal activity against plant pathogenic fungi," *European Journal of Plant Pathology*, vol. 142, pp. 61–71, Mar. 2015.
- [5] Z.H. Meng, T.T. Sun, G.Z. Zhao, Y.F. Yue, Q.H. Chang, H.J. Zhu and F. Cao, "Marine-derived fungi as a source of bioactive indole alkaloids with diversified structures," *Marine Life Science & Technology*, vol. 3, pp. 44–61, Nov. 2020.
- [6] A. Haq, S. Mushtaq, A. Khan, A. Islam, H. Khan, Z.A. Malik, F. Younas, S. Khan, A.A. Shah and M.

- Badshah, "Evaluation of phytochemical, bioactive, and antifungal potential of *Jatropha curcas* seed oil and de-oiled seed cake extracts against phytopathogenic fungi," *Journal of Plant Pathology*, vol. 103, pp. 863–873, Jul. 2021.
- [7] S. Kumar, R.P. Aharwal, R. Jain, and S.S. Sandhu, "Bioactive Molecules of Endophytic Fungi and Their Potential in Anticancer Drug Development" *Current Pharmacology Reports*, vol. 7, pp. 27–41, Feb. 2021.
- [8] Office of agriculture economic, "Cassava," Available Source: <http://www.oae.go.th>, 29 June 2021.
- [9] B. Feng, W. Hu, B.P. Ma, Y. Wang, H. Huang, S. Wang and X. Qian, "Purification, characterization, and substrate specificity of a glucoamylase with steroidal saponin-rhamnosidase activity from *Curvularia lunata*," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 76, pp. 1329–1338, Sep. 2007.
- [10] R.M. Kaaij, S. Janecek, M.J. Maarel and L. Dijkhuizen, "Phylogenetic and biochemical characterization of a novel cluster of intercellular fungal alpha-amylase enzymes," *Microbiology*, vol. 153, pp. 4003–4015, Dec. 2007.
- [11] P. Kumar and T. Satyanarayana, "Economical glucoamylase production by alginate-immobilized *Thermomucor indicae-seudaticae* in cane molasses medium," *Letters in Applied Microbiology*, vol. 45, pp. 392–397, Dec. 2007.
- [12] H. Shoji, T. Sugimoto, K. Hosoi, K. Shibata, M. Tanabe and K. Kawatsura, "Simultaneous production of glucoamylase and acid stable alpha-amylase using novel submerged culture of *Aspergillus kawachii* NBRC4308," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 103, pp. 203–205, Feb. 2007.
- [13] R. Kammoun, B. Naili and S. Bejar, "Application of a statistical design to the optimization of parameters and culture medium for-alpha-amylase production by *Aspergillus oryzae* CBS 819.72 grown on gruel (wheat grinding by-product)," *Bioresource Technology*, vol. 99, pp. 5602–5609, Sep. 2008.
- [14] A. Saleem and M.K.H. Ebrahim, "Production of amylase by fungi isolated from legume seeds collected in Almadinah Almunawwarah, Saudi Arabia," *Journal of Taibah University for Science*, vol. 8, pp. 90–97, Apr. 2014.
- [15] A.A.L. Tribst, and M. Cristianini, "High pressure homogenization of a fungi α -amylase," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 13, pp. 107–111, Jan. 2012.
- [16] E.A. Beltagy, A. Abouelwafa and K.M. Barakat, "Bioethanol production from immobilized amylase produced by marine *Aspergillus flavus* AUMC10636," *Egyptian Journal of Aquatic Research*, vol. 48, pp. 325–331, Feb. 2022.
- [17] S. Kalia, A. Bhattacharya, S.K. Prajapati and A. Malik, "Utilization of starch effluent from a textile industry as a fungal growth supplement for enhanced α -amylase production for

- industrial application,” *Chemosphere*, vol. 279, pp. 130554, Apr. 2021.
- [18] N. Saelee, “A comparative study of the starch determination methods in cassava root and flours,” MS thesis, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 1993.
- [19] N. Nelson, “A photometric adaptation of Somogyi method for the determination of glucose,” *Journal of Biological Chemistry*, vol. 153, pp. 375–380, Feb. 1944.
- [20] L. Manoch, O. Jeamjitt, T. Dethoup, J. Kokaew and P. Poochinya, “SEM study on ascospore ornamentation *Aspergillus* and *Penicillium* teleomorphs from soil at termite mounds,” *Journal of Electron Microscopy Society of Thailand*, vol. 18, pp. 98–103, 2004.
- [21] K.H. Domsch, W. Gams and T.H. Anderson, *Compendium of Soil Fungi*, vol. 1, 2nd ed. London: Academic Press, 1993a.
- [22] K.H. Domsch, W. Gams and T.H. Anderson, *Compendium of soil fungi*, vol. 2, 2nd ed. London: Academic Press, 1993b.
- [23] M.G. Murray and W.F. Thompson, “Rapid isolation of high molecular weight plant DNA,” *Nucleic Acids Research*, vol. 8, pp. 4321–4325, Oct. 1980.
- [24] T.J. White, T. Bruns, S. Lee and J. Taylor, “Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics,” in *PCR protocols: a guide to methods and applications*, M.A. Innis, D.H. Gelfand, J.J. Sninsky, T.J. White (eds.), New York, USA, Academic Press, 1990, pp. 315–322.
- [25] T. Yuwa-Amornpitak, “Ethanol production from cassava starch by selected fungi from Ton-Koji and *Saccharomyces cerevisiae*,” *Biotechnology*, vol. 9, pp. 84–88, 2010.
- [26] N. Roongrojmongkhon, N. Rungjindamai, T. Vatanavicharn and D. Ochaikul, “Isolation and identification of fungi with glucoamylase activity from look-pang-khao-mak (A Thai traditional fermentation starter),” *Journal of Pure and Applied Microbiology*, vol. 14, pp. 233–246, Mar. 2020.
- [27] V.H. Sunitha, A. Ramesha, J. Savitha and C. Srinivas, “Amylase production by endophytic fungi *Cylindrocephalum* sp. isolated from medicinal plant *Alpinia calcarata* (Haw.) roscoe,” *Brazilian Journal of Microbiology*, pp. 1213–1221, 2012.
- [28] S. Zhou, H. Zeng, L. Qin, Y. Zhou, K.M. Faridul Hasan and Y. Wu, “Screening of enzyme-producing strains from traditional Guizhou condiment,” *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, vol. 35, pp. 264–275, Dec. 2020.
- [29] A. Sattar Qureshi, M. Umar Dahot and A.U. Rehman, “Production of amylase by fungi through submerged fermentation,” *Pakistan Journal of Biotechnology*, vol. 1, pp. 35–42, Jan. 2004.
- [30] J.A. Rojas, C. Cruz, J.F. Mikán, L.S. Villalba, M.C.C. García and S. Restrepo, “Isoenzyme characterization

- of proteases and amylases and partial purification of proteases from filamentous fungi causing biodeterioration of industrial paper,” *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 63, pp. 169–175, 2009.
- [31] T. Senn and H.J. Pieper, “Classical methods,” in *the biotechnology of ethanol*, M Roehr, WILEY-VCH, Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto, 2000, pp. 13–14.
- [32] S.C. Peixoto, J.A. Jorge, H.F. Terenzi, M. de Lourdes and T.M. Polizeli, “*Rhizopus microspores* var. *rhizopodiformis*: a thermotolerant fungus with potential for production of thermostable amylases,” *International Journal of Microbiology*, vol. 6, pp. 269–273, Aug. 2003.
- [33] F.C. Pavezzi, E. Gomes and R. de Silva, “Production and characterization of glucoamylase from fungus *Aspergillus awamori* expressed in yeast *Saccharomyces cerevisiae* using different carbon sources,” *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 39, pp. 108–114, Jan. 2008.
- [34] A. Kunamneni, K. Permaul and S. Singh, “Amylase production in solid state fermentation by the thermophilic fungus *Thermomyces lanuginonus*,” *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 100, pp. 168–171, Aug. 2005.
- [35] R.C. Ray, “Extracellular amylase(s) production by fungi *Botryodiplodia theobromae* and *Rhizopus oryzae* grown on cassava starch residue,” *Journal of Environmental Biology*, vol. 25, pp. 489–495, Oct. 2004.
- [36] Y. Bakri, M. Magali and P. Thonart, “Isolation and identification of a new fungal strain for amylase biosynthesis,” *Polish Journal of Microbiology*, vol. 58, pp. 269–273, Sep. 2009.
- [37] S. Alva, J. Anupama, J. Savla, Y.Y. Chiu, P. Vyshali, M. Shruti, B.S. Yogeetha, D. Bhavya, J. Purvi, K. Ruchi, B.S. Kumudini and K.N. Varalakshmi, “Production and characterization of fungal amylase enzyme isolated from *Aspergillus* sp. JGI 12 in solid state culture,” *African Journal of Biotechnology*, vol. 6, pp. 576–581, Mar. 2007.
- [38] K.L. Tiwari, S.K. Jadhav and A. Fatima, “Culture condition for the production of thermostable amylase by *Penicillium rugulosum*,” *Global Journal of Biotechnology & Biochemistry*, vol. 2, pp. 21–24, Jul. 2007.
- [39] S. Arunsasi, S. Manthirikani, G. Jegadeesh and M. Ravikumar, “Submerged fermentation of amylase enzyme by *Aspergillus flavus* using *Cocos nucifera* meal,” *Kathmandu University of Science, Engineering and Technology*, vol. 6, pp. 75–87, Nov. 2010.

คำนวณโมเมนต์ดัดในคานด้วยวิธีสามโมเมนต์เพื่อใช้ในการออกแบบ แชสซีรถบรรทุก

สิทธิเดช เพชรราช นันธีรนนท์ พงษ์พานิช วิชญ์พล พักแก้ว และ สุธรรม อรุณ*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยพะเยา

19 ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

รับบทความ 10 สิงหาคม 2565 แก้ไขบทความ 23 มีนาคม 2566 ตอบรับบทความ 5 เมษายน 2566

บทคัดย่อ

การออกแบบแชสซีของส่วนพ่วงรถบรรทุกในปัจจุบัน จะพิจารณาให้แชสซีเป็นคานอย่างง่ายเพื่อความสะดวกในการประเมินค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากการรับน้ำหนักบรรทุก แต่ค่าโมเมนต์ดัดที่ถูกประเมินด้วยวิธีการดังกล่าว จะมีค่ามากกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงในแชสซี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอสมการทางเลือกที่สามารถใช้ประเมินค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแชสซีให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยสมการดังกล่าวถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีสมการสามโมเมนต์ ซึ่งสมการที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดและความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในแชสซี โดยจะนำเสนอผ่านกรณีศึกษา ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการ จากผลการเปรียบเทียบ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่สร้างขึ้นมีความแตกต่างจากผลลัพธ์จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เกิน 5% ดังนั้นสมการที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ เมื่อนำสมการดังกล่าวมาทำการคำนวณในกรณีศึกษาการออกแบบส่วนพ่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา โดยออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกขนาด 30 ตัน พบว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้มีค่าน้อยกว่าการคำนวณแบบเดิม 31.9% และเมื่อนำค่าโมเมนต์ดัดดังกล่าวไปใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดหน้าตัดของเหล็กสำหรับการทำแชสซี จะทำให้ได้เหล็กแชสซีที่มีน้ำหนักลดลง 17.9% ซึ่งจะส่งผลให้แชสซีมีน้ำหนักและต้นทุนการผลิตที่ลดลงเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีการแบบเดิม

คำสำคัญ : แชสซีรถบรรทุก; คานต่อเนื่อง; โมเมนต์ดัด; สมการสามโมเมนต์

The Calculation of Bending Moment in Beam by the Three-Moment Equation for the Design of Trailer Chassis

Sittidech Petcharat Nuttanon Pongpanit Wichaphon Fakkaew and
Sutham Arun*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Phayao

19 Mae Ka, Mueang District, Phayao 56000

Received 10 August 2022; Revised 23 March 2023; Accepted 5 April 2023

Abstract

For the current design of the chassis of a trailer, the chassis is determined as a simply support beam for ease of estimating the bending moment arising from the payload. However, the value of the bending moment estimated by such method is greater than the actual value. According to this issue, this paper therefore proposes an alternative equation that can be used to more accurately estimate the bending moment in the chassis. The equations are created based on three-moment equation and used to analyze the bending moments and bending stresses that occur in the chassis, presented through a case study. The results obtained from the equations are compared with the results obtained from the finite element (FE) model to confirm the validity of the equations. The comparison results show that the results calculated with the equations created are no more than 5% different from those of the FE model. Therefore, the equations developed in this research are reliable. In addition, the case study shows that the maximum bending moment value calculated with equations in this research was 31.9% less than traditional calculations. When such bending moment value is taken into the consideration for selecting the cross-sectional size of steel for making chassis, it resulted in a 17.9% reduction in the weight of the chassis. Therefore, using the equations developed in this research, the designed chassis has lower weight and production costs compared to traditional designs.

Keywords : Trailer chassis; Continuous beam; Bending moment; Three-moment equation

* Corresponding Author. Tel.: +669 3281 2992, E-mail Address: sutham.ar@up.ac.th

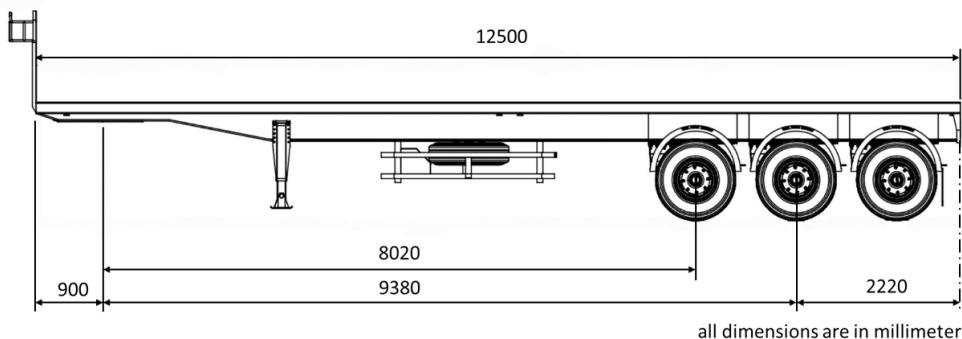
1. บทนำ

การขนส่งเป็นงานบริการที่มีส่วนสำคัญอย่างมากในภาคธุรกิจ จากการสำรวจข้อมูลในปี 2562-2564 พบว่าธุรกิจการขนส่งสินค้าของประเทศไทยมีการเติบโตเฉลี่ยปีละ 1-2% [1] และการขนส่งโดยใช้รถบรรทุกคิดเป็น 81% ของการขนส่งทั้งหมด [2] เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ง่าย และมีความสะดวกสบายต่อหลายภาคธุรกิจ

รถกึ่งพ่วง 6 เพลา เป็นรถบรรทุกที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานขนส่งด้วยรถบรรทุก โครงสร้างของรถประเภทนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ หัวลากและส่วนพ่วง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยกฎหมายกำหนดให้รถกึ่งพ่วง 6 เพลา ที่มีระยะระหว่าง

ระหว่างสลักพ่วง (king pin) มากกว่า 8 เมตร ขึ้นไป ต้องมีน้ำหนักรถและน้ำหนักบรรทุกรวมกันไม่เกิน 50.5 ตัน (รูปที่ 1 (ข))

ก่อนการสร้างส่วนพ่วงของรถบรรทุกตามแบบที่ออกแบบขึ้นใหม่ วิศวกรจะต้องยื่นเอกสารขออนุมัติแบบแชสซีต่อสำนักวิศวกรรมยานยนต์กรมการขนส่งทางบก (สวณ.) โดยวิศวกรจะต้องแนบรายละเอียดการประเมินความแข็งแรงแชสซีซึ่งเป็นโครงสร้างสำคัญของส่วนพ่วง เพื่อยืนยันว่าส่วนพ่วงที่ออกแบบนั้นมีความแข็งแรงเพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุกตามที่ขออนุญาต และเมื่อได้รับความเห็นชอบจาก สวณ. เรียบร้อยแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการผลิตส่วนพ่วงของรถบรรทุกตามแบบที่ขออนุมัติ



(ก)

	รถหัวลาก 10 ล้อ	รถกึ่งพ่วง 12 ล้อ	น้ำหนักรวม 22 ตัน
	25 ตัน	3 เพลา	50.5 ตัน

(ข)

รูปที่ 1 (ก) ส่วนพ่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา และ (ข) ข้อกำหนดน้ำหนักกลางเพลารถกึ่งพ่วง

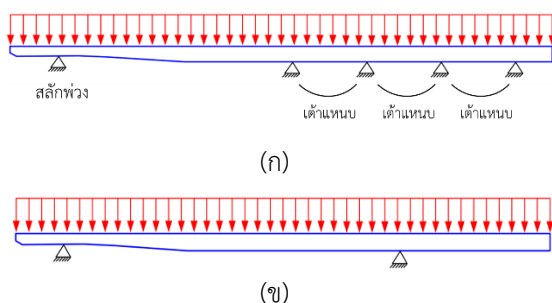
แชสซี คือ โครงสร้างที่มีความสำคัญที่สุดของส่วนพ่วง มีลักษณะเป็นคานเหล็ก 2 ชั้นวางขนานกัน และเชื่อมต่อกันด้วยคานเหล็กเป็นช่วง ๆ ดังรูปที่ 2 ทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักบรรทุก แชสซีจะถูกรองรับด้วยสลัก

พ่วงและระบบช่วงล่างซึ่งประกอบด้วยแหนบเพลาล้อ [3] การออกแบบแชสซีจำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเป็นหลักเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการบรรทุกสินค้า [4]-[5]

ในการประเมินความแข็งแรงของแอสซีของส่วนพ่วง วิศวกรจะเริ่มพิจารณาจากผังวัตถุอิสระ (Free-body-diagram) ของแอสซี โดยทั่วไปแอสซีจะวางอยู่บนจตุรรองรับทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือ บริเวณสลักพ่วง 1 ตำแหน่ง และบริเวณเต้าแขนบนและเต้าโดงเตงอีก 4 ตำแหน่ง กำหนดน้ำหนักบรรทุกให้มีลักษณะเป็นแรงกระจายสม่ำเสมอกระทำตลอดแนวความยาวของแอสซี ผังวัตถุอิสระของแอสซีดังรูปที่ 3 (ก) แต่อย่างไรก็ตาม การหาแรงปฏิกิริยาที่จตุรรองรับโดยใช้หลักการสมดุลของโมเมนต์ปัญหาดังกล่าวไม่สามารถทำได้เนื่องจากแรงที่ไม่ทราบค่ามีมากกว่าจำนวนสมการสมดุล ดังนั้นวิศวกรจึงทำการลดความซับซ้อนของปัญหาโดยการพิจารณาให้แอสซีมีจตุรรองรับเพียง 2 ตำแหน่ง คือบริเวณสลักพ่วง และเพลากลางดังรูปที่ 3 (ข)



รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงสร้างแอสซีของส่วนพ่วง



รูปที่ 3 (ก) ผังวัตถุอิสระของแอสซีขณะรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างจริง และ (ข) ผังวัตถุอิสระที่ผ่านการลดความซับซ้อนของปัญหา

จากรูปที่ 3 (ข) เมื่อวิศวกรทำการลดความซับซ้อนของปัญหาและทำการคำนวณแรงปฏิกิริยาที่จตุรรองรับแล้ว วิศวกรจะคำนวณโมเมนต์ดัดและความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในแอสซี จากนั้นนำค่าความเค้นดัดสูงสุดที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นคราก (yield strength) ของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปแอสซี เพื่อประเมินค่าความปลอดภัยในการรับน้ำหนักบรรทุก โดยแอสซีที่ออกแบบจะต้องมีค่าความปลอดภัยไม่ต่ำกว่า 4 [6]

วิธีการออกแบบโดยพิจารณาให้โครงสร้างของแอสซีมีลักษณะเป็นคานอย่างง่ายที่มีจตุรรองรับ 2 ตำแหน่ง เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก เนื่องจากสามารถประเมินแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่จตุรรองรับได้ด้วยสมการสมดุลแรงและสมการสมดุลโมเมนต์ แต่อย่างไรก็ตาม การคำนวณด้วยวิธีนี้จะให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมากกว่าค่าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจริง ทำให้แอสซีที่ได้จากออกแบบมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากกว่าที่ควรเป็น ส่งผลให้ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สูญเสียโอกาสในการบรรทุก อีกทั้งยังทำให้รถบรรทุกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นในกรณีของการวิ่งรถเปล่า [7]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอสมการทางเลือกสำหรับประเมินค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแอสซีของส่วนพ่วงของรถบรรทุกขณะรับภาระ โดยสมการดังกล่าวถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีสมการสามโมเมนต์ (Three-Moment Equation) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอกรณีศึกษาของการออกแบบแอสซีของส่วนพ่วงโดยใช้สมการที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัย ผลลัพธ์ที่ได้จากกรณีศึกษาจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการคำนวณด้วยวิธีแบบเดิมเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ และยังคงนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการที่ถูกสร้างขึ้น

2. ทฤษฎี

2.1 คาน

คาน หมายถึง โครงสร้างที่รับแรงตั้งฉากกับแนวแกนของคาน เมื่อคานรับภาระจะมีแรงภายในเกิดขึ้นในคาน 2 รูปแบบ ได้แก่ แรงเฉือนภายใน (internal shear force) และโมเมนต์ดัดภายใน (internal bending moment) โดยที่แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแนวแกนของคานตามที่กล่าวข้างต้น แรงเฉือนภายในจะส่งผลให้มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าตัดขวางของคาน (transverse shear stress) และพยายามทำให้หน้าตัดคานเลื่อนออกจากกัน ในขณะที่โมเมนต์ดัดภายในที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้มีความเค้นดัด (bending stress) เกิดขึ้นในแนวแกนซึ่งทำให้คานเกิดการแอ่นหรือโก่งตัว

ในการประเมินความแข็งแรงของคานขณะรับภาระ โดยทั่วไปความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเค้นดัด วิศวกรจึงมักพิจารณาเพียงค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นภายในคานเพียงอย่างเดียว โดยที่ค่าความเค้นดัดในคานสามารถคำนวณได้จากสูตรของการดัด (flexure formula)

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (1)$$

โดยที่

σ = ความเค้นดัด (เมกะปาสกาล)

M = โมเมนต์ดัดภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรับภาระ (นิวตันเมตร)

y = ระยะห่างจากแกนสะเทิน (neutral axis) (เมตร)

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (เมตร⁴)

จากสมการที่ (1) จะเห็นว่าวิศวกรจะต้องประเมินโมเมนต์ดัดภายในที่เกิดขึ้นในคานเนื่องจากการรับภาระเสียก่อน จึงจะสามารถหาค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในคานได้ โดยสมการของโมเมนต์ดัดสามารถ

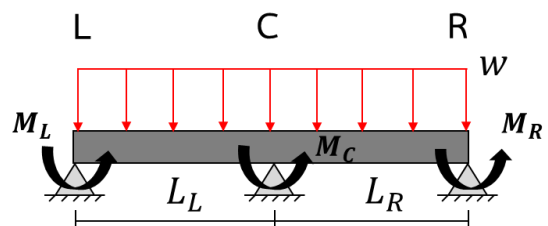
หาได้จากการสร้างภาคตัด (section) ของคานในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแรง ใช้สมการสมดุลของแรงและโมเมนต์ในการสร้างสมการโมเมนต์ดัด ซึ่งหลักการดังกล่าวได้ถูกอธิบายไว้ในหนังสือกลศาสตร์วัสดุทั่วไป

แต่อย่างไรก็ตาม ในการหาสมการโมเมนต์ดัดนั้น วิศวกรจะต้องทำการคำนวณแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ จุดรองรับของคานเสียก่อน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลของแรงและโมเมนต์ ดังนั้นหากคานที่ทำการวิเคราะห์เป็นคานต่อเนื่อง (continuous beam) ที่มีจุดรองรับมากกว่า 2 จุด จำนวนตัวแปรที่เกิดขึ้นจะมากกว่าจำนวนของสมการสมดุลที่มี วิศวกรจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่น ๆ เช่น วิธีสมการสามโมเมนต์ เข้ามาช่วยในการประเมินค่าแรงปฏิกิริยา

2.2 วิธีการสามโมเมนต์

วิธีสมการสามโมเมนต์ เป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคานต่อเนื่องที่มีโครงสร้างแบบ statically indeterminate โดยวิธีนี้จะใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดของจุด 3 จุดบนคานต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4 พิจารณาคานต่อเนื่องที่มีจุดรองรับ 3 จุด หรือมีช่วงของคาน 2 ช่วง รับแรงกระจายคงที่ตลอดความยาวคาน หากคานดังกล่าวมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ และวางอยู่บนจุดรองรับที่อยู่ในระดับเดียวกัน เราจะสามารถใช้วิธีการสามโมเมนต์เพื่อหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ณ บริเวณจุดรองรับทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้ดังนี้



รูปที่ 4 แนวทางของวิธีการสามโมเมนต์

$$M_L L_L + 2M_C(L_L + L_R) + M_R L_R = -\frac{w}{4}(L_L^3 + L_R^3) \quad (2)$$

โดยที่

M_L = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ณ จุดรองรับ L (นิวตันเมตร)

M_C = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ณ จุดรองรับ C (นิวตันเมตร)

M_R = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ณ จุดรองรับ R (นิวตันเมตร)

L_L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ L และ C (เมตร)

L_R = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ C และ R (เมตร)

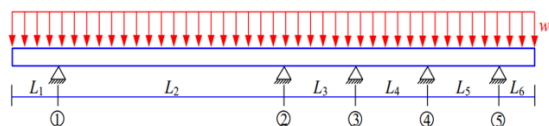
w = ภาระโหลดในรูปแบบแรงกระจาย (กิโลนิวตันต่อเมตร)

กรณีที่คานามีจุดรองรับมากกว่า 3 ตำแหน่ง เรายังสามารถใช้สมการที่ (2) ในการหาค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับได้โดยการแบ่งคานาออกเป็นช่วง ๆ โดยให้แต่ละช่วงมีจุดรองรับช่วงละ 3 ตำแหน่ง

3. การประยุกต์ใช้วิธีการสามโมเมนต์เพื่อวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแชสซีของส่วนพ่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา

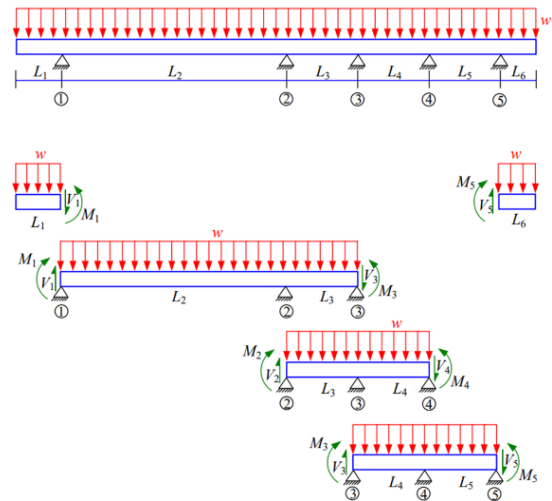
จากรูปที่ 1 (ก) เราสามารถเขียนแผนภาพอิสระของแรง ของแชสซีของส่วนพ่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา ได้ดังรูปที่ 5

โดยที่ w คือ น้ำหนักรถบรรทุกซึ่งอยู่ในรูปแบบแรงกระจาย $L_1, L_2, \dots, L_6$ คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ



รูปที่ 5 แบบจำลองของแชสซีขณะรับโหลด

จากรูปที่ 5 เราสามารถหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ณ จุดรองรับของคานาทั้ง 5 ตำแหน่งตามแนวทางของวิธีการสามโมเมนต์ ได้โดยการแบ่งคานาออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การแบ่งช่วงของคานาตามแนวทางของวิธีการสามโมเมนต์

เมื่อนำสมการที่ (2) มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของคานาในรูปที่ 6 จะได้ระบบสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่เกิดขึ้น ณ จุดรองรับของช่วงคานาทั้ง 5 ช่วง ดังนี้

$$M_1 = -\frac{w}{2} L_1^2$$

$$M_1 L_2 + 2M_2(L_2 + L_3) + M_3 L_3 = -\frac{w}{4}(L_2^3 + L_3^3)$$

$$M_2 L_3 + 2M_3(L_3 + L_4) + M_4 L_4 = -\frac{w}{4}(L_3^3 + L_4^3)$$

$$M_3 L_4 + 2M_4(L_4 + L_5) + M_5 L_5 = -\frac{w}{4}(L_4^3 + L_5^3)$$

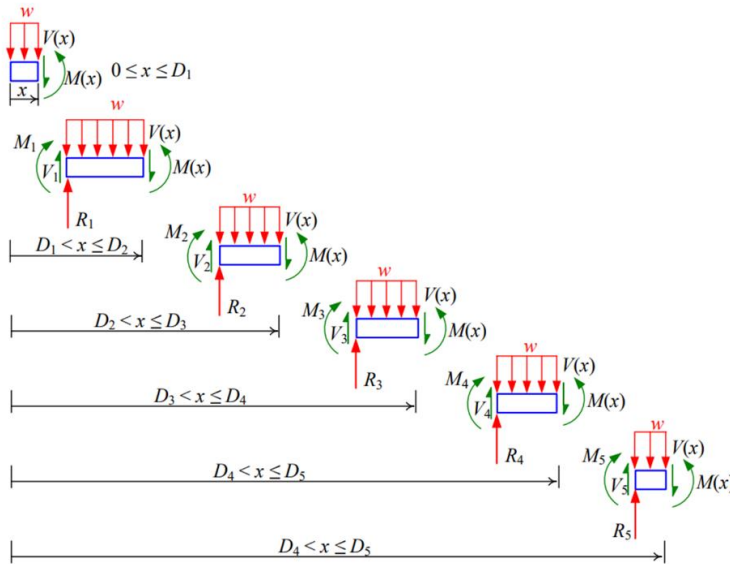
$$M_5 = -\frac{w}{2} L_6^2 \quad (3)$$

ตัวแปรในสมการที่ (3) ที่ยังไม่ทราบค่าคือ เมื่อ

M_2 , M_3 และ M_4 ซึ่งสามารถแก้สมการเพื่อหาค่าดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2 + L_3 & L_3 / 2 & 0 \\ L_3 / 2 & L_3 + L_4 & L_4 / 2 \\ 0 & L_4 / 2 & L_4 + L_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{wL_1^2L_2}{4} - \frac{w(L_2^3 + L_3^3)}{8} \\ -\frac{w(L_3^3 + L_4^3)}{8} \\ \frac{wL_5L_6^2}{4} - \frac{w(L_4^3 + L_5^3)}{8} \end{bmatrix} \quad (5)$$



รูปที่ 7 ผังวัตถุอิสระสำหรับภาคตัดคานช่วงต่าง ๆ

พิจารณาภาคตัดคานดังรูปที่ 7 ในที่นี้ M_1 , M_2 , ..., M_5 คือค่าโมเมนต์ดัดที่จุดรองรับ ซึ่งหาได้จากสมการ (3) และ (4) ค่าโมเมนต์ดัดในช่วง $D_n \leq x \leq D_{n+1}$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ คือ

$$M(x) = M_n + (R_n + V_n)(x - D_n) - 0.5w(x - D_n)^2 \quad (6)$$

เนื่องจาก $M(x = D_{n+1}) = M_{n+1}$ และ $D_{n+1} - D_n = L_{n+1}$ แทนค่าใน (6) แล้วแก้สมการจะได้ว่า

$$R_n + V_n = \frac{wL_{n+1}}{2} + \frac{M_{n+1} - M_n}{L_{n+1}} \quad (7)$$

แทนค่าสมการ (7) ใน (6) จะได้ว่า

$$M(x) = M_n + \left(\frac{wL_{n+1}}{2} + \frac{M_{n+1} - M_n}{L_{n+1}} \right) (x - D_n) - \frac{w(x - D_n)^2}{2} \quad (8)$$

ที่ตำแหน่งปลายคาน $M_0 = 0$, $M_6 = 0$ และ $M_1 = -wL^2 / 2$ จากสมการ (8) สมการโมเมนต์ดัดในแต่ละช่วงสามารถเขียนได้ดังนี้

ช่วง $0 \leq x \leq D_1$

$$M(x) = -\frac{wx^2}{2} \quad (9)$$

ช่วง $D_1 \leq x \leq D_2$

$$M(x) = M_1 + \left(\frac{wL_2}{2} + \frac{M_2 - M_1}{L_2}\right)(x - D_1) - \frac{w(x - D_1)^2}{2} \quad (10)$$

ช่วง $D_2 \leq x \leq D_3$

$$M(x) = M_2 + \left(\frac{wL_3}{2} + \frac{M_3 - M_2}{L_3}\right)(x - D_2) - \frac{w(x - D_2)^2}{2} \quad (11)$$

ช่วง $D_3 \leq x \leq D_4$

$$M(x) = M_3 + \left(\frac{wL_4}{2} + \frac{M_4 - M_3}{L_4}\right)(x - D_3) - \frac{w(x - D_3)^2}{2} \quad (12)$$

ช่วง $D_4 \leq x \leq D_5$

$$M(x) = M_4 + \left(\frac{wL_5}{2} + \frac{M_5 - M_4}{L_5}\right)(x - D_4) - \frac{w(x - D_4)^2}{2} \quad (13)$$

ช่วง $D_5 \leq x \leq D_6$ เราพบว่า $M(D_6) = 0$ ดังนั้น

$$M(x) = M_5 + \left(\frac{wL_6}{2} + \frac{-M_5}{L_6}\right)(x - D_5) - \frac{w(x - D_5)^2}{2} \quad (14)$$

จากการวิเคราะห์สมมูลขอแอสซีสามารถสรุปขั้นตอนการหาค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในแอสซีของส่วนพ่วงของรถบรรทุกทั้งพ่วง 6 เพลาได้ดังนี้

- 1) กำหนดค่าแรงกระจายต่อความยาว w และระยะของจุดรองรับ $L_1, L_2, \dots, L_6$
- 2) คำนวณค่าโมเมนต์ดัดที่จุดรองรับ $M_1, M_2, \dots, M_5$ โดยใช้สมการ (3) และ (4)
- 3) หาสมการโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานแต่ละช่วงโดยใช้สมการ (9) – (14)
- 4) นำสมการโมเมนต์ดัดที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด และความเค้นสูง
- 5) คำนวณขนาดหน้าตัดของคานที่สามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัย จากนั้นจึงเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแอสซี

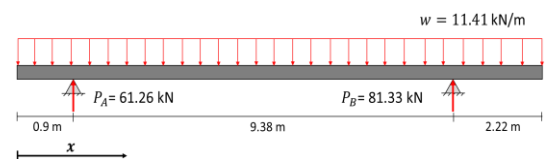
4. กรณีศึกษา

หัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบแอสซีที่ใช้สำหรับส่วนพ่วงของรถบรรทุกทั้งพ่วง 6 เพลา ที่มีความยาว 12.5 เมตร ซึ่งทำจากเหล็ก SS400 โดยแอสซีที่ถูกออกแบบจะถูกใช้สำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกทุกขนาด 30 ตัน หรือแอสซีจะรับแรง 15 ตัน คิดเป็นแรงกระจายตลอดความยาวแอสซีเท่ากับ 11.41 กิโลนิวตันต่อเมตร (นำภาระโหลดที่แอสซีได้รับหารด้วยพื้นที่ด้านบนของโครงสร้างแอสซี) โดยตัวโครงสร้างของแอสซีมีระยะห่างระหว่างสลักพ่วง เค้าแหวน และเต้าโตะแดงดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)

สำหรับการออกแบบจะใช้การคำนวณ 2 วิธี ได้แก่ การคำนวณโดยพิจารณาให้แอสซีเป็นคานอย่างง่าย และการคำนวณโดยพิจารณาให้แอสซีเป็นคานต่อเนื่องที่มีจุดรองรับ 5 จุด โดยในการคำนวณจะพิจารณาให้คานมีหน้าตัดคงที่ตลอดความยาวคานผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจากทั้ง 2 วิธีจะถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างขนาดของหน้าตัดและต้นทุนที่ใช้ในการผลิต

4.1 การคำนวณโดยพิจารณาให้แอสซีเป็นคานอย่างง่าย

จากรูปที่ 1 (ข) กำหนดตำแหน่งของจุดรองรับดังรูปที่ 8 ใช้สมการสมมูลวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับ จะได้ว่า $P_A = 61.26$ กิโลนิวตัน และ $P_B = 81.33$ กิโลนิวตัน นำแรงปฏิกิริยาที่ได้ไปสร้างสมการของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความยาวคานผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 8 ผังวัตถุอิสระของแอสซีรถบรรทุก กรณีพิจารณาให้เป็นคานอย่างง่าย

ตารางที่ 1 สมการโมเมนต์ดัดของคานอย่างง่าย

ช่วงคาน (เมตร)	สมการโมเมนต์ดัด (กิโลนิวตันเมตร)
$0 \leq x < 0.9$	$M(x) = -5.704x^2$
$0.9 \leq x < 10.28$	$M(x) = -5.704x^2 + 61.26(x - 0.9)$
$10.28 \leq x \leq 12.5$	$M(x) = -5.704x^2 + 61.261(x - 0.9) + 81.327(x - 10.28)$

4.2 การคำนวณโดยพิจารณาให้แชสซีเป็นคานต่อเนื่อง

จากรูปที่ 1 (ก) เมื่อพิจารณาให้แชสซีมีลักษณะเป็นคานเป็นคานต่อเนื่องที่มีจุดรองรับ 5 จุด กำหนดตำแหน่งของจุดรองรับดังรูปที่ 9 เมื่อแทนค่าในสมการ (3) และ (4) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับของคานมีค่าดังนี้

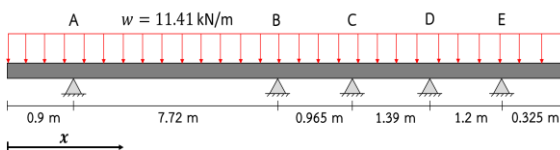
$$M_1 = -4.62 \text{ กิโลนิวตันเมตร}$$

$$M_2 = -74.46 \text{ กิโลนิวตันเมตร}$$

$$M_3 = 14.95 \text{ กิโลนิวตันเมตร}$$

$$M_4 = -6.3 \text{ กิโลนิวตันเมตร}$$

$$M_5 = -0.6 \text{ กิโลนิวตันเมตร}$$



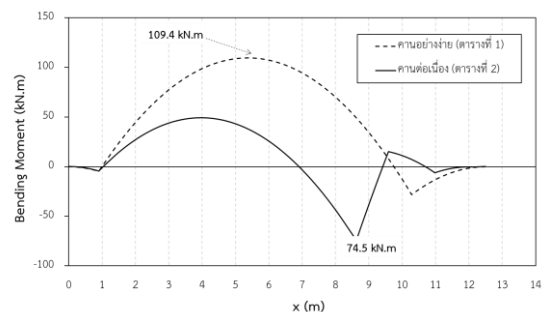
รูปที่ 9 FBD ของแชสซีรถบรรทุก กรณีพิจารณาให้เป็นคานต่อเนื่อง

แทนค่าโมเมนต์ดัดที่จุดรองรับลงในสมการที่ (9)-(14) สมการของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความยาวคานแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมการโมเมนต์ดัดของคานต่อเนื่อง

ช่วงคาน (เมตร)	สมการโมเมนต์ดัด (กิโลนิวตันเมตร)
$0 \leq x < 0.9$	$M(x) = -5.704x^2$
$0.9 \leq x < 8.63$	$M(x) = -5.704(x - 0.9)^2 + 34.984(x - 0.9) - 4.62$
$8.62 \leq x < 9.585$	$M(x) = -5.704(x - 8.62)^2 + 98.154(x - 8.62) - 74.462$
$9.585 \leq x < 10.975$	$M(x) = -5.704(x - 9.585)^2 - 7.357(x - 9.585) + 14.945$
$10.975 \leq x < 12.17$	$M(x) = -5.704(x - 10.975)^2 + 11.593(x - 10.975) - 6.301$
$12.175 \leq x < 12.5$	$M(x) = -5.704(x - 12.175)^2 + 3.707(x - 12.175) - 0.602$

4.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณ



รูปที่ 10 เปรียบเทียบ Bending Moment Diagram ของคานอย่างง่ายและคานแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณจากสมการในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าการคำนวณจากทั้ง 2 วิธีให้ค่าโมเมนต์ดัดที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยกรณีพิจารณาให้แชสซีเป็นคานอย่างง่าย (ตารางที่ 1) ให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเป็นบวกเท่ากับ 109.4 กิโลนิวตันเมตร และเกิดที่บริเวณ $x = 5.4$ เมตร ในขณะที่การพิจารณาให้แชสซี

เป็นคานต่อเนื่อง (ตารางที่ 2) ให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเป็นลบเท่ากับ -74.5 กิโลนิวตันเมตร และเกิดที่ตำแหน่ง $X = 8.7$ เมตร

ดังนั้น จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าการคำนวณโดยพิจารณาให้แซสซีเป็นคานต่อเนื่องตามลักษณะของโครงสร้างจริงของแซสซีจะให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ต่ำกว่าการคำนวณโดยพิจารณาให้แซสซีเป็นคานอย่างง่าย โดยในกรณีศึกษาให้ค่าต่ำกว่าถึงประมาณ 31.9%

4.3.1 การเปรียบเทียบขนาดพื้นที่หน้าตัดของคาน

ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ถูกนำมาใช้คำนวณค่า section modulus เพื่อใช้ในการเลือกขนาดหน้าตัดของเหล็กที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแซสซี โดยคำนวณจากสมการที่ 15

$$S = \frac{M_{\max} \times SF}{\sigma_y} \quad (15)$$

โดยที่

- S = section modulus (เซนติเมตร³)
- $M_{\max}$ = โมเมนต์ดัดสูงสุด (กิโลนิวตันเมตร)
- SF = ค่าความปลอดภัย
- σ_y = ค่าความเค้นครากของวัสดุที่ใช้ในการทำโครงสร้างแซสซี(เมกกะปาสคาล)

จากสมการที่ 15 หากกำหนดให้คานมีความปลอดภัยเท่ากับ 4 และจากคุณสมบัติของเหล็ก SS400 ค่าความเค้นครากจะเท่ากับ 400 เมกกะปาสคาล โดยค่า section modulus ที่ได้จะมีค่าดังนี้

- กรณีพิจารณาให้แซสซีเป็นคานอย่างง่าย ค่า section modulus เท่ากับ 1,093.6 เซนติเมตร³
- กรณีพิจารณาให้แซสซีเป็นคานต่อเนื่อง ค่า section modulus เท่ากับ 744.7 เซนติเมตร³

เมื่อนำค่า section modulus ที่ได้จากการคำนวณข้างต้นไปเลือกขนาดหน้าตัดของเหล็ก H-beam ปีกกว้าง หรือเหล็ก Wide Flange จากตารางเหล็ก (รูปที่ 11) จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3

Nominal size	Weight	Sectional Dimension						Sectional Area	Moment of Inertia		Radius of Gyration		Modulus of Section	
		H	B	t _f	t _w	r	I _x		I _y	r _x	r _y	Z _x	Z _y	
mm	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	cm ⁴	cm ⁴	mm	mm	cm ³	cm ³	
350x250	69.2	336	249	8.0	12	20	88.15	18,500	3,090	14.5	5.92	1,100	248	
	79.7	340	250	9.0	14	20	101.50	21,700	3,650	14.6	6.00	1,280	292	
	106.0	338	351	13.0	13	20	135.30	28,200	9,380	14.4	8.33	1,670	534	
	115.0	344	348	10.0	16	20	146.00	33,300	11,200	15.1	8.78	1,840	646	
	131.0	344	354	16.0	16	20	166.60	35,300	11,800	14.6	8.43	2,050	669	
350x350	137.0	350	350	12.0	19	20	173.90	40,300	13,600	15.2	8.84	2,300	776	
	156.0	350	357	19.0	19	20	198.40	42,800	14,400	14.7	8.53	2,450	809	
	300x150	32.0	298	149	5.5	8	13	40.80	6,320	442	12.4	3.29	424	59
36.7		300	150	6.5	9	13	46.78	7,210	508	12.4	3.29	481	68	
300x200	56.8	294	200	8.0	12	18	72.38	11,300	1,600	12.5	4.71	771	160	
	65.4	298	201	9.0	14	18	83.36	13,300	1,900	12.6	4.77	893	189	
300x300	94.5	294	302	12.0	12	18	107.70	16,900	5,520	12.5	7.16	1,150	365	
	97.0	298	299	9.0	14	18	110.80	18,800	6,240	13.0	7.51	1,270	417	
	94.0	300	300	10.0	15	18	119.80	20,400	6,750	13.1	7.51	1,360	450	
	106.0	300	305	15.0	15	18	134.80	21,500	7,100	12.6	7.26	1,440	466	
	106.0	304	301	11.0	17	18	134.80	23,400	7,730	13.2	7.57	1,540	514	

รูปที่ 11 ตารางเหล็ก H-beam ปีกกว้าง [8]

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบของคานอย่างง่ายกับคานต่อเนื่อง

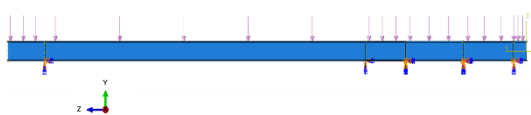
รายละเอียด	คาน	
	คานอย่างง่าย	คานต่อเนื่อง
ขนาด	350x250	300x200
section modulus (เซนติเมตร ³)	1,100	771
$\sigma_{\max}$ (เมกกะปาสคาล)	99.42	96.58
น้ำหนัก (กิโลกรัมต่อเมตร)	69.2	56.8
ความยาว (เมตร)	12.5	12.5
น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	865	710
ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	35	35
รวม (บาท)	30,275	24,850

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาที่ขนาดความยาวของแซสซี 12.5 เมตร และราคาเหล็กที่ 35 บาทต่อกิโลกรัม [10] การคำนวณโดยพิจารณาให้แซสซีเป็นคานต่อเนื่องจะได้แซสซีที่มีน้ำหนักลดลง 17.9% เมื่อเทียบกับกรณีของการพิจารณาให้แซสซีเป็นคานอย่างง่าย

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสามโมเมนต์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานต่อเนื่อง (รูปที่ 9) เพื่อใช้ในการยืนยันความถูกต้องของคำตอบที่ได้จากการนำวิธีสามโมเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการเลือกหน้าตัดของคาน โดยทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานต่อเนื่องในตารางที่ 3 (เหล็ก H-beam ขนาดหน้าตัด H 300x200 ที่ $t_1 = 8$ mm. และ $t_2 = 12$ mm.) รับภาระตามรูปที่ 12 ด้วยโปรแกรม ABAQUS [9] ซึ่งมีรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองดังนี้

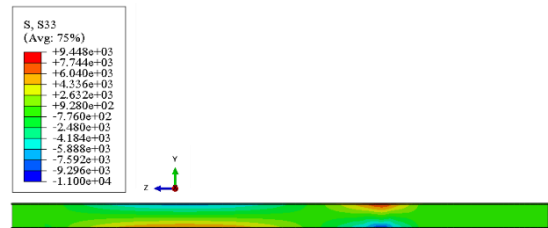
- แบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยแบบเอลิเมนต์ 3 มิติสี่เหลี่ยม 8 โหนด (hexahedral elements of type, C3D8R)
- กำหนดภาระในรูปของความดันขนาด 0.0376 เมกะปาสคาล กระจายลงบริเวณพื้นที่ด้านบนของโครงสร้างแซนดี้ โดยค่าความดันดังกล่าวถูกคำนวณมาจากการนำน้ำหนักบรรทุกทุกขนาด 30 ตัน ทารด้วยพื้นที่ด้านบนของโครงสร้างแซนดี้ (รูปที่ 12)
- กำหนด Boundary condition ที่จุดรองรับทั้ง 5 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยกำหนดให้จุดรองรับดังกล่าวสามารถหมุนรอบแกน x ได้เพียงอย่างเดียว (ไม่สามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน x, y และ z ได้ และไม่สามารถหมุนรอบแกน y และ แกน z ได้)
- กำหนดการประมวลผลของแบบจำลองเป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Elastic)



รูปที่ 12 ลักษณะการกำหนด Boundary condition และโหลด

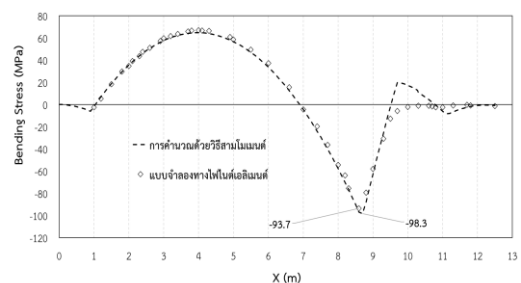
ในการประมวลผลของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มจำนวนของเอลิเมนต์ในแบบจำลอง จนกระทั่งผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองวิ่งเข้า

สู่ค่าคงที่ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะวิ่งเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อจำนวนของเอลิเมนต์มีจำนวนมากกว่า 2,256 เอลิเมนต์ ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลกระจายตัวของความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในแซนดี้ขณะรับน้ำหนักบรรทุก

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในแซนดี้ ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากตารางที่ 2 และผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากรูปจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีความสอดคล้องกันและมีความแตกต่างกันไม่เกิน 4.9% โดยความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจากกรณีที่คำนวณด้วยวิธีสมการสามโมเมนต์มีค่าเท่ากับ 98.3 เมกะปาสคาล ในขณะที่ความเค้นดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 93.7 เมกะปาสคาล ที่บริเวณ $x = 8.6$ เมตร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ 4, 5 และ 6 สามารถนำไปใช้ในการประเมินเพื่อหาค่าแรงปฏิกิริยา และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานต่อเนื่องที่มีจุดรองรับ 5 จุด ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าความเค้นดัดในแซนดี้

5. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการทางเลือกสำหรับใช้ในการออกแบบแชสซีของส่วนพ่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา โดยวิธีการที่นำเสนอนี้จะทำการพิจารณาให้แชสซีของส่วนพ่วงมีลักษณะเป็นคานต่อเนื่องที่มีจุดรองรับ 5 จุด และใช้สมการที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยด้วยวิธีสามโมเมนต์ในการวิเคราะห์เพื่อหาแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับ

จากการทดลองใช้วิธีการดังกล่าวกับกรณีศึกษาในงานวิจัย พบว่าการพิจารณาให้แชสซีเป็นคานต่อเนื่องนั้นจะส่งผลให้วิศวกรสามารถเลือกขนาดหน้าตัดของเหล็กที่ใช้ในการทำแชสซีได้เหมาะสมมากกว่าวิธีการที่ใช้ในการออกแบบแชสซีในปัจจุบัน ส่งผลให้แชสซีที่ได้รับการออกแบบมีน้ำหนักลดลง และสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่สร้างขึ้นในงานวิจัย กับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของงานวิจัย ผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบแชสซีของส่วนพ่วงรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบแชสซีรถบรรทุกด้วยวิธีสมการสามโมเมนต์ โดยมหาวิทยาลัยพะเยาได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริม ววน. ภายใต้โครงการวิจัย “ต้นแบบการพัฒนาระบบเพื่อส่งเสริมทักษะอาชีพสำหรับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ตามบริบทภาคเหนือตอนบน” ทั้งนี้จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Piyanuch. (2019, August 06). Industry Outlook (1st ed.). [Online]. Available: <https://www.krungsri.com>
- [2] S. Srisarin, A. Nattaya, T. Aeknaree and W. Sasiwimon, “Logistics Cost Analysis For Private Transport Entrepreneurs A Case Study Of ABC Company Limited,” Southeast Bangkok Journal, vol. 7, no.1, pp. 15-27, Jan.-Jun. 2021
- [3] A. Agarwal and L. Mthembu, “Weight optimization of heavy-duty truck chassis by optimal space fill design using light weight Graphite Al GA 7-230 MMC,” Materials Today Journal, vol. 52, pp. 1278-1287, Mar. 2022.
- [4] A. Agarwal and L. Mthembu, “FE design analysis and optimization of heavy-duty truck chassis using sparse grid initialization technique,” Materials Today Journal, vol. 60, pp. 2084-2092, May. 2022.
- [5] S. Mohd and G. Amir, “Design and Analysis of ‘Eco’ Car Chassis,” Procedia Engineering Journal, vol. 41, pp. 1756-1760, 2012.
- [6] A. Warid and T. Shan, Machine Design, 1st ed. Thailand: SE-EDUCATION, 2013.
- [7] N. Todsapon, “A Study Of Fuel Consumption Of Trucks,” Ph.D. dissertation, Dept. B. Eng., Suranaree Univ., Nakhon Ratchasima, Thailand, 2013.
- [8] Siam Yamato Steel co. ltd. (2019, August 06). H-Beam TIS 1227-2558. [Online]. Available: <https://www.syssteel.com/>
- [9] Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, “ABAQUS/Standard User Manual,” Rhode Island.
- [10] Steel leader of Thailand. (2019, August 06). H Beam Price. [Online]. Available: <https://www.steellead.com>

การประเมินสมรรถนะของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส ด้วยการปรับค่าความถี่ในการสวิตช์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบไซน์

ประสพโชค โห้ทองคำ*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล, จังหวัดนครปฐม 73170

รับบทความ 14 มิถุนายน 2565 แก้ไขบทความ 28 มีนาคม 2566 ตอรับบทความ 10 เมษายน 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยตรงที่ปราศจากวงจรเชื่อมโยงดีซีหรือที่เรียกว่า วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้สวิตช์สองทิศทางจำนวน 9 ชุด ซึ่งประกอบด้วยไอจีบีที-ไดโอดกำลังทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ด้านอินพุตที่มีความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่ด้านเอาต์พุตสามารถปรับความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ โดยการปรับค่าความถี่และค่าอัตราการใช้ดิวตี้ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบไซน์ รวมทั้งมีการแสดงหลักการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในเชิงคณิตศาสตร์ด้วย นอกจากนั้นได้ทำการวัดรูปคลื่น ค่าประสิทธิภาพ ค่าฮาร์โมนิก และค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุต โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ในการสวิตช์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบไซน์ เพื่อทำการประเมินสมรรถนะของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ ด้วยการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

คำสำคัญ : วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์; เอซีคอนเวอร์เตอร์; สวิตช์สองทิศทาง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1850 2305, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: prasopchok.hot@rmutr.ac.th

Performance Evaluation of the Three-Phase AC-AC Matrix Converter with Adjusting the Switching Frequencies of the SPWM

Prasopchok Hothongkham*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

96 Mu 3 Phuttamonthon Sai 5 Road, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170

Received 14 June 2022; Revised 28 March 2023; Accepted 10 April 2023

Abstract

This paper presents the direct conversion of the three-phase AC input to the three-phase AC output without the DC Link which the converter is called the Matrix Converter. This converter is using the 9-units of bidirectional switches, IGBT-Power Diode. The converter is converting a constant utility three-phase sinusoidal supply voltage and frequency into a variable output voltage and frequency through alteration of the frequency and modulation index of the SPWM signals used by the converter. A mathematical approach is initially applied to describe the principle of the Matrix Converter. Moreover, the voltage and current waveforms, the efficiencies, the harmonics analysis and the total harmonics distortion (THD) of the output side and input side of the voltage and the current waveforms are observed at several the output frequencies which the switching frequencies of the SPWM are adjusted for the performance evaluation of the converter. The simulation results of this converter are observed by the MATLAB/Simulink program.

Keywords : Matrix Converter; AC Converter; Bidirectional Switch

* Corresponding Author. Tel.: +668 1850 2305, E-mail Address: prasopchok.hot@rmutr.ac.th

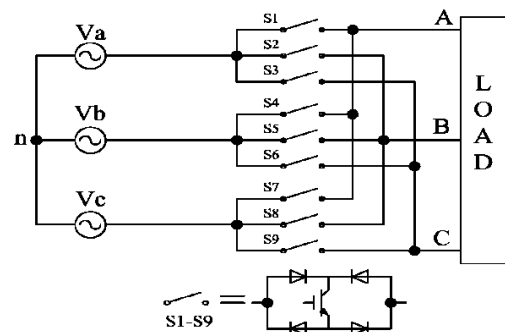
1. บทนำ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ไปเป็น ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยตรงที่ปราศจากวงจร เชื่อมโยงดีซี เรียกว่า วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกจาก Gyugyi และ Pelly ในปี 1976 [1], [2] และมีการนำเสนอในรูปแบบของ คณิตศาสตร์โดย Venturini และ Alessina ในปี 1981 [3] ด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลง ไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุต โดยตรงมีข้อดีคือทำการจัดส่วนวงจรเชื่อมโยง กระแสตรง (DC Link) ในวงจรอินเวอร์เตอร์ออกไป ซึ่งมีการนำเสนอในงานวิจัยโดย Ziogas [4] รวมทั้งของ Blaabjerg [5] มีการทำวิจัยเกี่ยวกับงานทางด้านวงจร เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีจำนวนมากมาย เช่น S. K. Sul [6] นำเสนอเทคนิคการมอดูเลตของวงจร เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ด้วยหลักการ การมอดูเลตตาม สัญญาณพาหะ (Carrier Based Modulation) นำมา ใช้กับการควบคุมการทำงานของวงจร J. Wang [7] นำเสนออุปกรณ์สวิตช์แบบใหม่ที่ใช้ในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ด้วย IGBT Hong-Hee Lee [8] นำเสนอเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบ Carrier Based Modulation โดยนำมาใช้กับวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยทางอ้อมที่ใช้สวิตช์สองทางในวงจรเรียงกระแส (Rectifier) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) Habib Rajabi Mashhadi [9] นำเสนอเทคนิค Space Vector Modulation มาใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีการทำ Over-modulation ด้วยในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ Kamal Al-Haddad [10] นำเสนอหลักการเทคนิคการมอดูเลตแบบ Space Vector Modulation แบบสมมาตรมาใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบโดยอ้อมด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จากงานวิจัยที่กล่าว

มา ยังคงมีการนำเสนองานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับวงจร เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์อย่างหลากหลายทั้งการเสนอ แนวความคิดโดยการทดลองและจากการจำลอง มากมายหลากหลายเทคนิค ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ นำเสนอแนวคิดอีกรูปแบบหนึ่งของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ด้วยการใช้สวิตช์สองทางที่ใช้เป็นไดโอดกำลัง จำนวน 4 ตัว ต่อกันเป็นแบบบริดจ์และใช้ไอจีบีทีจำนวน 1 ตัว ต่อตรงกลางบริดจ์ เป็นสวิตช์สองทางอีกรูปแบบ หนึ่งที่ทำการควบคุมการทำงานได้ง่าย พร้อมทั้งได้ทำการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทาง ด้วย พร้อมกันนั้นวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองกับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส ซึ่งทางด้านเอาต์พุตสามารถปรับค่าขนาด แรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ และทำการพิจารณาผลของ ค่าความถี่ในการสวิตช์ที่เปลี่ยนแปลงไปว่ามีผลอย่างไร ต่อสมรรถนะของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส และวงจรทุกส่วนทั้งหมดทำการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink

2. หลักการทำงานและโครงสร้างวงจร เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีลักษณะ ของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

และสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่สร้างได้ จากแรงดันไฟฟ้าอินพุต โดยสามารถอธิบายได้ด้วย สมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 1-6 [11] ดังนี้

$$[V_{oAB}(\omega_o t)] = [V_i \cos(\omega_i t), V_i \cos(\omega_i t + 120^\circ), V_i \cos(\omega_i t - 120^\circ)] \times \begin{bmatrix} M \cos(\omega_o t) \\ M \cos(\omega_o t + 120^\circ) \\ M \cos(\omega_o t - 120^\circ) \end{bmatrix} \times [\cos(\omega_o t)] \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} MV_i \cos(\omega_i t) \cos(\omega_o t) \\ MV_i \cos(\omega_i t - 120^\circ) \cos(\omega_o t + 120^\circ) \\ MV_i \cos(\omega_i t + 120^\circ) \cos(\omega_o t - 120^\circ) \end{bmatrix} \times [\cos(\omega_o t)] \quad (2)$$

$$= \frac{MV_i}{2} [\cos(2\omega_o t) + \cos(0^\circ) + \cos(2\omega_o t - 240^\circ) + \cos(0^\circ) + \cos(2\omega_o t - 480^\circ) + \cos(0^\circ)] \times \cos(\omega_o t) \quad (3)$$

$$= \left[\frac{3MV_i}{2} \right] \times [\cos(\omega_o t)] \quad (4)$$

$$[V_{oBC}(\omega_o t)] = \left[\frac{3MV_i}{2} \right] \times [\cos(\omega_o t + 120^\circ)] \quad (5)$$

$$[V_{oCA}(\omega_o t)] = \left[\frac{3MV_i}{2} \right] \times [\cos(\omega_o t - 120^\circ)] \quad (6)$$

โดยที่

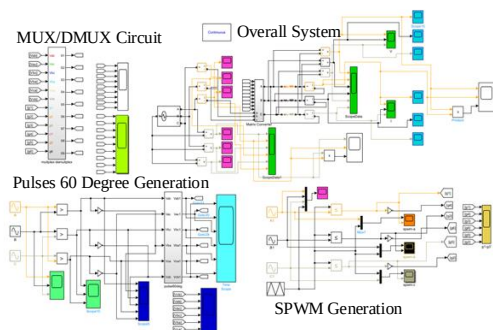
V_i คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต

$V_{oAB}, V_{oBC}, V_{oCA}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตไลน์ทูไลน์ของแต่ละไลน์ทางไฟฟ้า

M คือ อัตราการมอดูเลต

3. การจำลองการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

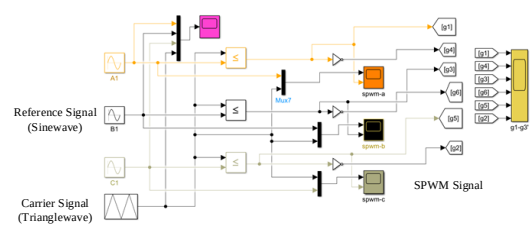
การจำลองการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสกับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink มีลักษณะโครงสร้างการจำลองของวงจรดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนประกอบของวงจรที่ใช้ในการจำลองจะประกอบด้วย ส่วนการสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มแบบ SPWM, ส่วนวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา, และส่วนวงจร MUX/DMUX มีรายละเอียดแต่ละส่วนดังนี้



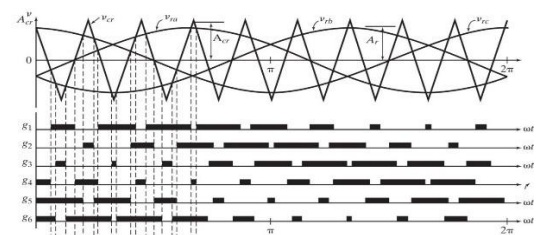
รูปที่ 2 วงจรโดยรวมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

3.1 ส่วนการสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มแบบ SPWM

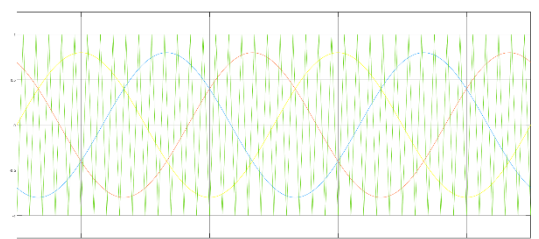
ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มแบบ SPWM ที่สามารถปรับความถี่และอัตราการมอดูเลตได้ ด้วยการใช้สัญญาณไซน์ 3 เฟส เป็นสัญญาณอ้างอิงและใช้สัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณพาหะแล้วนำมาทำการเปรียบเทียบกันเพื่อสร้างเป็นสัญญาณพีดับลิวเอ็มแบบ SPWM มีลักษณะวงจรตามรูปที่ 3 และมีลักษณะของสัญญาณพีดับลิวเอ็มตามรูปที่ 4



(ก) ส่วนสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มแบบ SPWM

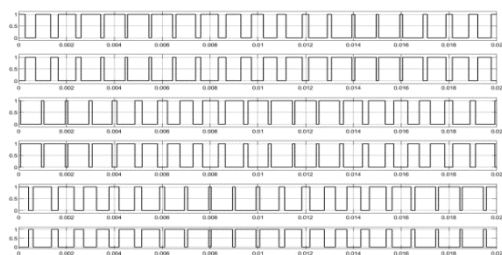


(ข) ลักษณะสัญญาณพีดับลิวเอ็มสามเฟสแบบ SPWM

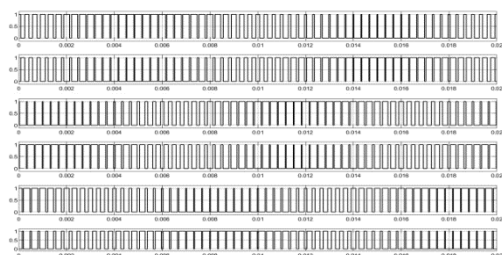


(ค) ลักษณะสัญญาณไซน์สามเฟสและสัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้ในการสร้างพีดับลิวเอ็มด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

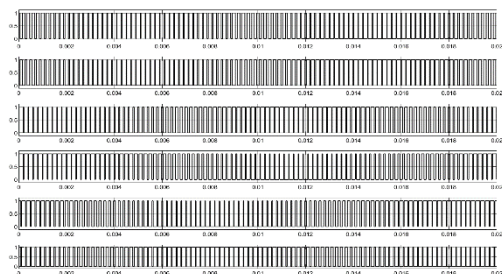
รูปที่ 3 สัญญาณพีดับลิวเอ็มสามเฟสแบบ SPWM ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink



(ก) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1kHz



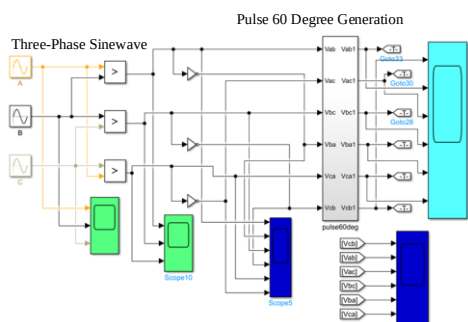
(ข) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 3kHz



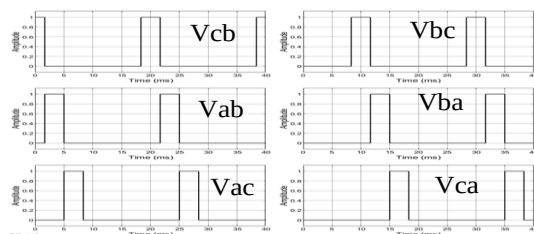
(ค) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 5kHz

รูปที่ 4 สัญญาณพีดับลิแอมสามเฟสแบบ SPWM ที่ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 50 Hz อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.8 ที่ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ (g1-g6 บนลงล่างตามรูปที่ 3)

3.2 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์เท่ากับ 60 องศา จำนวน 6 พัลส์ใน 1 ไซเคิล มีลักษณะตามรูปที่ 5 (ก) และมีลักษณะสัญญาณพัลส์ใน 1 ไซเคิลดังรูปที่ 5 (ข)



(ก) วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา

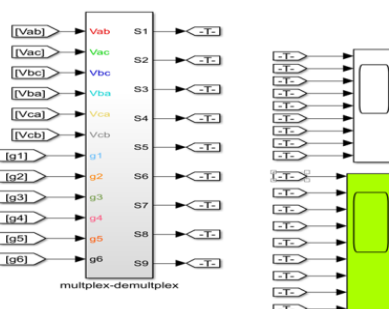


(ข) ลักษณะสัญญาณพัลส์ 60 องศาทั้ง 6 สัญญาณจากการตรวจจับไฟไลน์ 3 เฟส

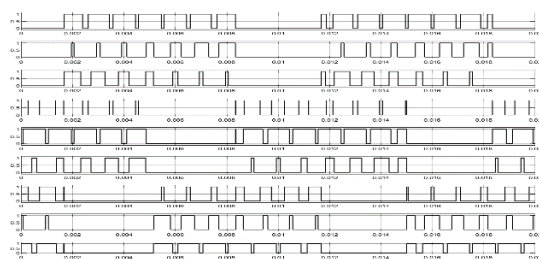
รูปที่ 5 วงจรและสัญญาณพัลส์ 60 องศาทั้ง 6 สัญญาณที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร

3.3 วงจร MUX/DMUX ทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 9 ชุด ได้รับสัญญาณพัลส์มาจากวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา และวงจรสร้างสัญญาณพีดับลิแอมแบบ SPWM มาทำการผ่านส่วนวงจร MUX/DMUX ประกอบด้วยวงจรลอจิกเพื่อทำการสร้างสัญญาณพีดับลิแอมที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทางทั้ง 9 ชุด มีลักษณะวงจรดังรูปที่ 6 และมีลักษณะสัญญาณพีดับลิแอมทั้ง 9 ชุด ดังรูปที่ 7

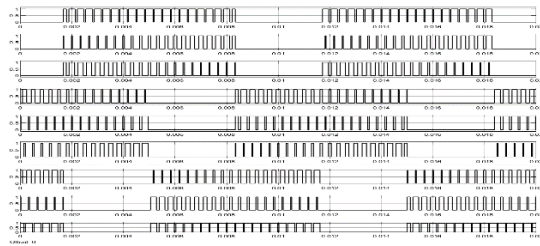
MUX/DMUX Circuit



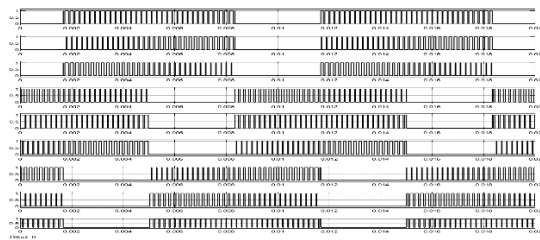
รูปที่ 6 วงจร MUX/DMUX ทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทาง S1-S9



(ก) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1kHz



(ข) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 3kHz



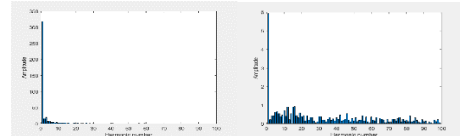
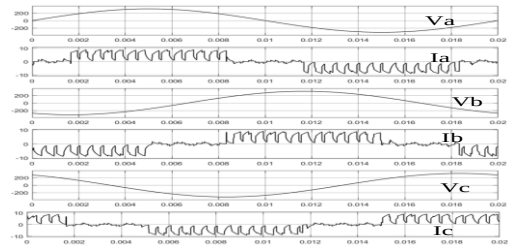
(ค) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 5kHz

รูปที่ 7 สัญญาณจากวงจร MUX/DMUX ที่ค่าความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 50Hz อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.8 ที่ค่าความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ (S1-S9 จากบนลงล่าง)

4. ผลการจำลองการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส

การจำลองวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส สามารถทำได้ตามวงจรในรูปที่ 9 ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าระดับแรงดัน 220Vrms ความถี่ 50Hz, 3 เฟส ต่อแบบวายเป็นอินพุตให้แก่วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ทำการทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส ต่อแบบเดลต้า(Delta) คือ ตัวต้านทานขนาด 100 โอห์มต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 20mH และควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มแบบ SPWM ที่ค่าความถี่สวิตช์เท่ากับ 1kHz, 3kHz, และ 5kHz จ่ายให้กับสวิตช์สองทางโดยผ่านเป็นสัญญาณอินพุตให้แก่วงจร MUX/DMUX เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มไปขับสวิตช์สองทางทั้ง 9 ชุด และทำการปรับค่าความถี่ทางด้านเอาต์พุตที่ค่าเท่ากับ 25Hz, 50Hz, และ 100Hz พร้อมทั้งสามารถปรับอัตราการ มอดของสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มแบบไซน์ได้ที่ค่า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 ในการจำลองได้ทำการวัดรูปคลื่นทางด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตเท่ากับ

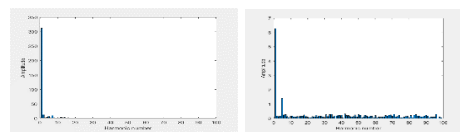
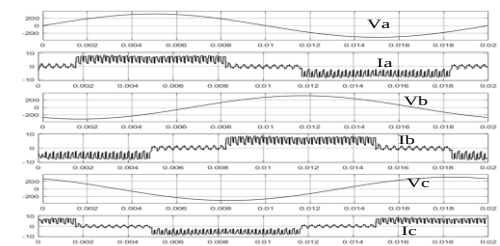
50Hz และทุกค่าความถี่ในการสวิตช์ที่อัตราการมอดเท่ากับ 0.8 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 และ 9



THDv=9.53%

THDi=56.6%

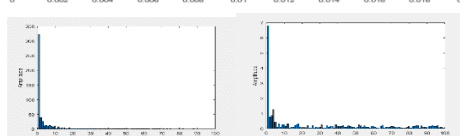
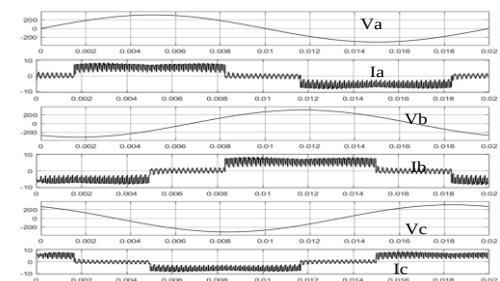
(ก) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1kHz



THDv=6.2%

THDi=34.8%

(ข) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 3kHz

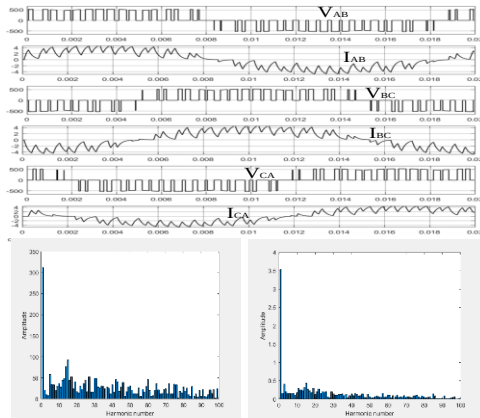


THDv=18.2%

THDi=33.9%

(ค) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 5kHz

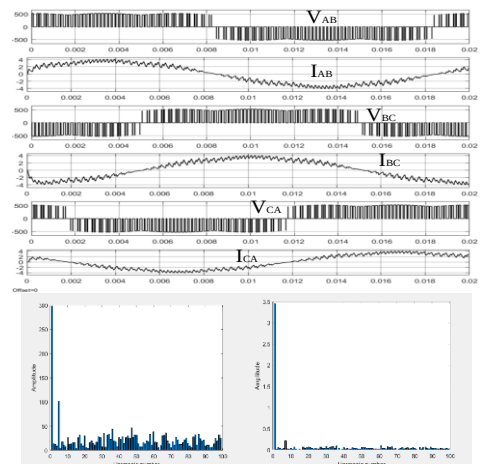
รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตทั้ง 3 เฟส และค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตที่เฟส a ที่ค่าความถี่เอาต์พุต 50Hz, อัตราการมอดเท่ากับ 0.8



THDv=94.7%

THDi=39.8%

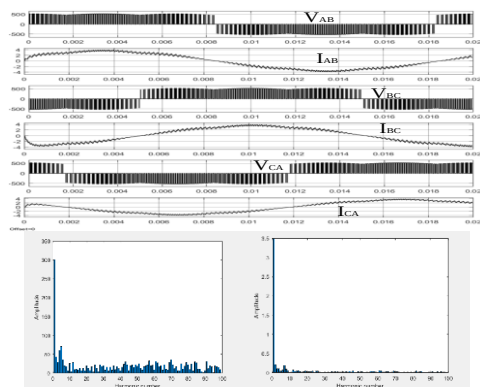
(ก) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1kHz



THDv=78.5%

THDi=14.3%

(ข) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 3kHz

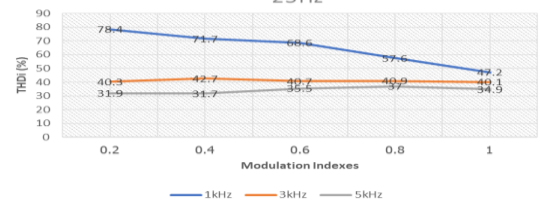
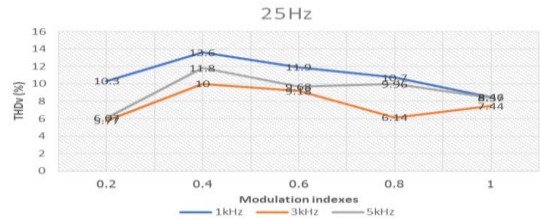


THDv=68.5%

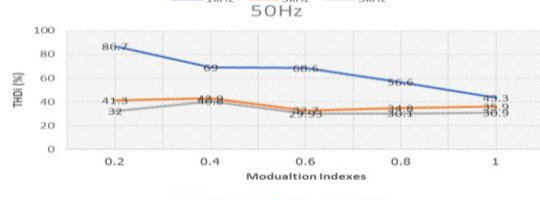
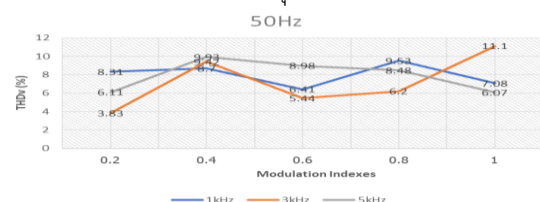
THDi=12.5%

(ค) ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 5kHz

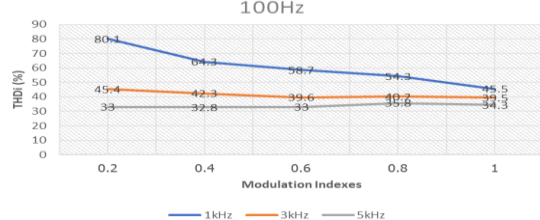
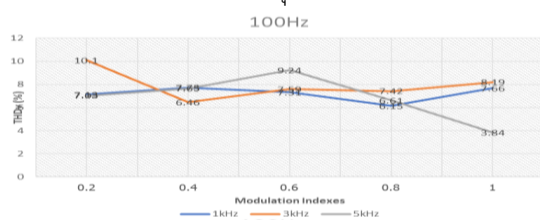
รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตทั้ง 3 เฟส และค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ไลน์ ab ที่ค่าความถี่เอาต์พุต 50Hz, อัตราการมอดเท่ากับ 0.8



(ก) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 25Hz



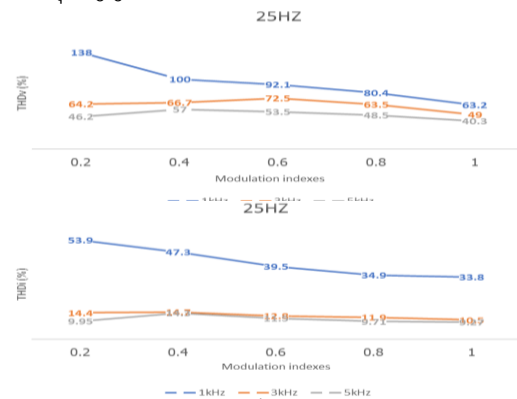
(ข) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 50Hz



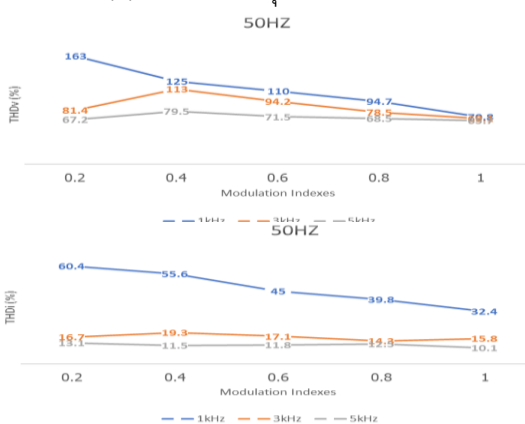
(ค) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 100Hz

รูปที่ 10 ค่า THDv และ THDi ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่าอัตราการมอดต่างๆ

จากรูปที่ 10 (ก)-(ค) เป็นค่า THDv และ THDi ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ และที่ค่าอัตราการมอดูเลตต่างๆ พบว่า ค่า THDv ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 10% ที่ทุกค่าความถี่ในการสวิตช์และค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ ส่วนค่า THDi ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีค่าค่อนข้างสูงที่ค่าอัตราการ มอดูเลตต่างๆ เนื่องจากมีความเป็นสัญญาณไซน์ค่อนข้างต่ำและมีค่าลดลงที่ค่าอัตราการมอดูเลตสูงขึ้นที่ทุกค่าความถี่ในการสวิตช์และค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ เมื่อค่าความถี่ในการสวิตช์ที่สูงขึ้นทำให้ค่า THDi ของกระแสไฟฟ้าลดลงที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุต ส่วนที่ค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 3kHz มีความผิดเพี้ยนจากค่าความถี่สวิตช์อื่นๆ เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะที่เป็นสัญญาณพีคดับบลิวเอ็มที่อยู่ในลักษณะที่ไม่สมมาตรกันในแต่ละเฟสจึงทำให้ได้ผลการจำลองดังผลการทดลองที่ได้ผิดเพี้ยนไปจากค่าความถี่สวิตช์อื่น จึงต้องมีการปรับปรุงสัญญาณพีคดับบลิวเอ็มที่ใช้ในการสวิตช์ต่อไป



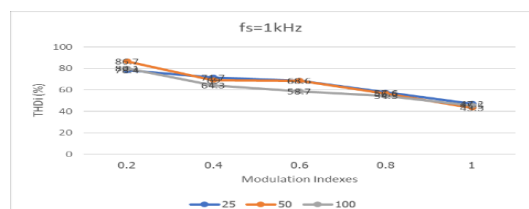
(ก) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 25Hz



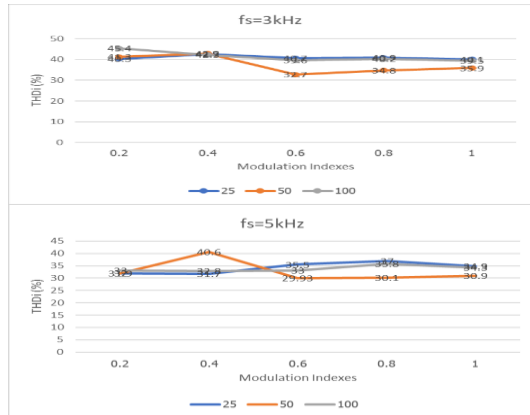
(ค) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 100Hz

รูปที่ 11 ค่า THDv และ THDi ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่าอัตราการมอดูเลตต่างๆ

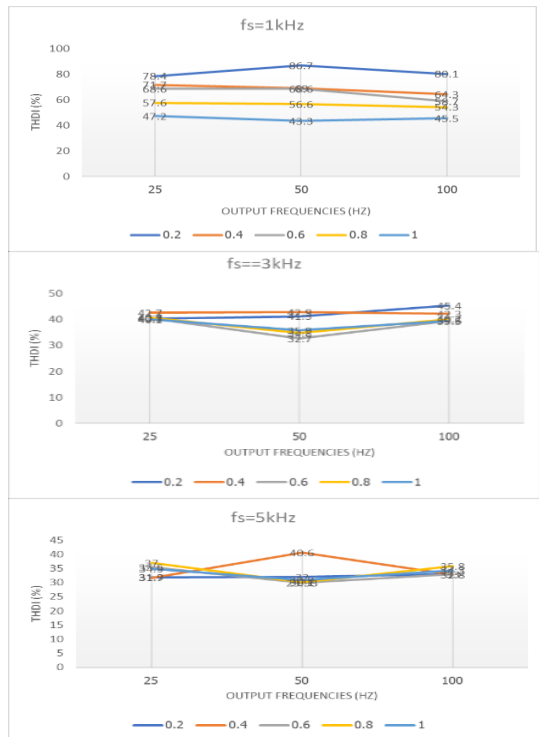
จากรูปที่ 11 (ก)-(ค) ค่า THDv และ THDi ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่าอัตราการมอดูเลตต่างๆ พบว่า ค่า THDv ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าค่อนข้างสูงที่ทุกค่าความถี่ในการสวิตช์และค่าความถี่เอาต์พุตและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความถี่เอาต์พุตสูงขึ้น ซึ่งจะมีค่าลดลงที่ค่าความถี่ในการสวิตช์สูงขึ้น รวมทั้งลดลงที่อัตราการมอดูเลตสูงขึ้นด้วย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าจึงเบี่ยงเบนจากสัญญาณไซน์ค่อนข้างมาก ส่วนค่า THDi ของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าสูงที่ค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1kHz และมีค่าลดลงที่ค่าความถี่ในการสวิตช์ที่สูงขึ้น คือ เท่ากับ 3kHz และ 5kHz ตามลำดับ นอกจากนั้นยังมีค่า THDi ลดลงตามค่าอัตราการมอดูเลตที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่เอาต์พุตที่เพิ่มขึ้นด้วย



(ข) ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 50Hz



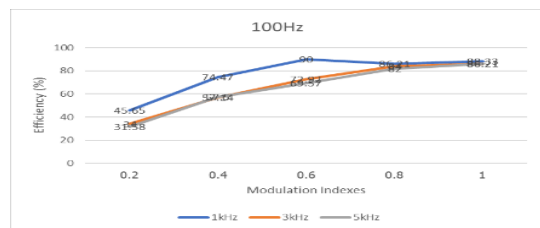
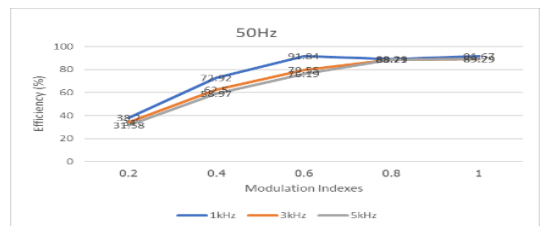
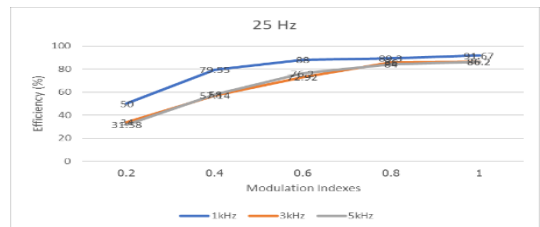
รูปที่ 12 ค่า THDi ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าทางดำนอินพุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่าอัตราการมอดูเลตต่างๆ



รูปที่ 13 ค่า THDi ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าทางดำนเอาต์พุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่าอัตราการมอดูเลตต่างๆ

จากรูปที่ 12 และ 13 เป็นค่า THDi ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าทางดำนอินพุตและเอาต์พุตที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่า

อัตราการมอดูเลตต่างๆ พบว่ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าทางดำนอินพุตที่ค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1 kHz มีค่า THDi มีค่าลดลงอย่างชัดเจนตามค่าอัตราการมอดูเลตที่เพิ่มขึ้นที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุตที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่ค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 3 kHz และ 5 kHz มีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกค่าอัตราการมอดูเลตและที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุต ส่วนทางดำนเอาต์พุตที่ค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1 kHz มีค่า THDi ลดลงตามค่าอัตราการมอดูเลตที่เพิ่มขึ้นที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุต ส่วนค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 3 kHz และ 5 kHz มีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกค่าอัตราการมอดูเลตและที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุต แต่ถ้าพิจารณาที่ค่าความถี่ในการสวิตช์จะพบว่าเมื่อค่าความถี่ในการสวิตช์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า THDi ทางดำนอินพุตและเอาต์พุตลดลงตามค่าความถี่ในการสวิตช์ที่สูงขึ้น



รูปที่ 14 ค่าประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่าอัตราการมอดูเลตต่างๆ

จากรูปที่ 14 เป็นค่าประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าความถี่เอาต์พุตต่างๆ, ความถี่ในการสวิตช์ต่างๆ, และที่ค่าอัตราการมอดต่างๆ พบว่าค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราการมอดเพิ่มขึ้นที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุตและค่าความถี่ในการสวิตช์ และที่ค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1kHz จะมีค่าประสิทธิภาพมากกว่าที่ทุกค่าความถี่ในการสวิตช์ที่ทุกค่าความถี่เอาต์พุตของวงจรและที่ทุกค่าอัตราการมอดด้วย ซึ่งหมายความว่าค่าประสิทธิภาพในการสวิตช์ที่เหมาะสมในการทำงานที่ค่าอัตราการมอดต่ำๆ ส่วนที่ค่าอัตราการมอดสูงๆ จะมีค่าประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 90%

5. สรุปผล

จากผลการจำลองวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส กับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส พบว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้สามารถทำการปรับความถี่ทางด้านเอาต์พุตได้ที่ค่า 25Hz, 50Hz, และ 100Hz โดยการปรับที่ความถี่ของสัญญาณพัลส์วidthเอ็มแบบ SPWM รวมทั้งสามารถปรับอัตราการมอดดูเลตของสัญญาณพัลส์วidthเอ็มแบบ SPWM ได้ที่ค่า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 เพื่อใช้ในการควบคุมโหลดแบบ 3 เฟส ที่ต่อแบบเดลต้า พร้อมทั้งทำการปรับค่าความถี่ในการสวิตช์ที่ค่า 1kHz, 3kHz, และ 5kHz ซึ่งในผลการจำลองพบว่าค่า Total Harmonics Distortion (THD) ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามค่าความถี่ในการสวิตช์ที่เพิ่มขึ้นทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุต ส่วนค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าผลของค่าความถี่ในการสวิตช์ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุต อีกทั้งได้ทำการหาค่าประสิทธิภาพของวงจรด้วย ซึ่งพบว่าค่าประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการมอดที่เพิ่มขึ้นและค่าความถี่ในการสวิตช์ที่ให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจะเป็นที่ค่าความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 1kHz ที่ได้จากการจำลองวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกว.) ร่วมกับโครงการวิจัยพื้นฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้มอบทุนวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ปี 2564 และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยแก่นักวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Gyugyi and B. R. Pelly, *Static Power Frequency Changers: Theory, Performance, and Application*, John Wiley & Sons, 1976.
- [2] B.R. Pelly, "Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters", New York, Wiley, 1971.
- [3] A. Alesina and M. Venturini, "Solid-State Power Conversion: A Fourier Analysis Approach to Generalize Transfer Synthesis", *IEEE Transactions on Circuit and Systems*, vol.CAS-28, No.4, pp.319-330., April, 1981.
- [4] P.D. Ziogas, S.I. Khan, and M.H. Rashid, "Some Improve Forced Commutated Cycloconverter Structures", *IEEE Trans. Industry Application*, vol. IA-21, pp.1242-1253, Sept./Oct. 1985.
- [5] P. C. Loh, R. Rong, F. Blaabjerg, and P. Wang, "Digital carrier modulation and sampling issues of matrix converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 7, pp. 1690-1700, July 2009.
- [6] Y. D. Yoon, and S. K. Sul, "Carrier-based modulation technique for matrix

- converter”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 6, pp. 1691-1703, Nov. 2006.
- [7] C. Liu, B. Wu, N. R. Zargari, D. Xu, and J. Wang, “A novel three-phase three-leg ac/ac converter using nine IGBTs”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1151-1160, May 2009.
- [8] Tuyen D. Nguyen, and Hong-Hee Lee “Dual Three-Phase Indirect Matrix Converter with Carrier-Based PWM Method”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, Feb. 2014.
- [9] Amir Masoud Bozorgi, Mohammad Monfared, and Habib Rajabi Mashhadi, “Two Simple Over Modulation Algorithms for Space Vector Modulated Three-phase to Three-phase Matrix Converter”, *IET Power Electron.*, 2014, Vol. 7, Iss. 7, pp. 1915–1924.
- [10] Lazhar Rmili, Sana Ktala, Salem Rahmani, and Kamal Al-Haddad, “Symmetrical Space Vector Modulation of Three Phases Indirect Matrix Converter”, *2020 4th International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, pp.278-283, 2020.
- [11] Hothongkham, V., Analysis and design of Three-Phase AC-AC Matrix Converter, Master of Engineering Thesis, Electrical Engineering Program, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2002.

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้ง ประดิษฐ์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

อภิรักษ์ ชัดวิลาส* ไพโรจน์ จันทร์แก้ว และ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 6 สิงหาคม 2565 แก้ไขบทความ 2 เมษายน 2566 ตอบรับบทความ 10 เมษายน 2566

บทคัดย่อ

อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์เป็นหนึ่งในวิธีแบบเมตาฮิวริสติกส์แบบกลุ่มที่มีประสิทธิภาพที่ยืดหยุ่นและ
การใช้งานที่เรียบง่าย แต่เป็นที่ทราบกันว่าวิธีแบบเมตาฮิวริสติกส์นั้นถ้าต้องการให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต้องมีการ
กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมให้เหมาะสมด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองใน
การวิเคราะห์ระดับของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์กับปัญหาทดสอบแบบตัวแปร
ต่อเนื่อง ในการดำเนินการวิจัยนี้จะเริ่มจากการออกแบบการทดลองแบบ 3^k แฟคทอเรียล โดยพารามิเตอร์ที่ถูก
นำมาใช้ในการออกแบบ ประกอบไปด้วย รอบในการวนซ้ำ (Iteration) จำนวนประชากรผึ้ง (Number of
population) และขีดจำกัด (Limit) หลังจากนั้นนำแบบการทดลองที่ได้ไปทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล และนำข้อมูลที่
ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ผลกระทบหลักซึ่งเกิด
จากการเปลี่ยนระดับของทั้งสามพารามิเตอร์ ผลกระทบระหว่างจำนวนประชากรผึ้งและขีดจำกัด และโมเดลกำลัง
สองมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($P\text{-value} < 0.05$) ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำตัวแบบการถดถอยไปหาค่าพารามิเตอร์ที่
ส่งผลให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ผลจากการวิเคราะห์ตัวแบบการถดถอยพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม
อาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ในการแก้ปัญหาฟังก์ชันคณิตศาสตร์แบบตัวแปรต่อเนื่อง ควรกำหนดระดับของ รอบในการวนซ้ำ
จำนวนประชากรผึ้ง และขีดจำกัด เป็น 900 40 และ 90 ตามลำดับ

คำสำคัญ : อาณานิคมผึ้งประดิษฐ์; วิธีพื้นผิวตอบสนอง; เมตาฮิวริสติกส์

Parameter optimization of Artificial Bee Colony Algorithm with Response Surface Methodology

Aphirak Khadwilard* Phairoach Chunkaew and
Chakkraphan Thawonngamyingsakul

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Lanna Tak
41/1 Moo. 7, Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, 63000

Received 6 August 2022; Revised 2 April 2023; Accepted 10 April 2023

Abstract

The Artificial Bee Colony Algorithm is one of the metaheuristic with excellent performance and simple implementation. But it is well known that a metaheuristic approach is required to optimize the algorithm's parameters. Therefore, this research aims to use the response surface methodology for analyze the optimal level parameters of the artificial bee colony algorithm for continuous variable benchmark problems. To carry out this research, a 3^K factorial experimental design was used, with the design parameters consisting of iteration, number of population, and limit. After that, the experimental table was used to collect data, and the data obtained from the experiments was analyzed by the response surface methodology. From the results of the data analysis, it was found that the main effects resulting from the level change of the three parameters, the interaction effect of the bee population and the limit, and the quadratic model were statistically significant at 0.05 (P-value <0.05). The final step was to run the regression model for finding the parameters that resulted in the best answer. The results of the regression model analysis revealed that the optimum parameters of the Artificial Bee Colony Algorithm to solve continuous variable mathematics functions should be set at iteration, bee population, and limits of 900, 40 and 90, respectively.

Keywords : Artificial Bee Colony; Response Surface Methodology; Metaheuristics

**Corresponding Author. Tel.: +668 6926 9589, E-mail Address: aphirak@rmutl.ac.th*

1. บทนำ

อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในทางปฏิบัติที่หลากหลายมีวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดั้งเดิม เช่น Steepest descent method [1], Simplex algorithm [2], Newton's method [3], Conjugate direction method [4] และวิธีอื่น ๆ วิธีเหล่านี้โดยทั่วไปต้องการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีความต่อเนื่องและหาอนุพันธ์ได้ ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization problems) มีเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และได้พัฒนาเป็นแบบ Non-convex, Multi-modal, Non-linear และ Non-differentiable และไม่ต่อเนื่อง ซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้การหาค่าที่เหมาะสมแบบดั้งเดิม

เพื่อแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่ซับซ้อน จึงได้มีการเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบต่าง ๆ วิธีการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากคือ อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithms) ซึ่งต่อมาได้ถูกเรียกว่า เมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) มีความโดดเด่นเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้อย่างมาก [5]-[8] อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการ หรือเมตาฮิวริสติกส์สามารถแบ่งคร่าว ๆ ได้เป็นสามลักษณะ [9] คือ 1. อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกส์จากการวิวัฒนาการทางชีววิทยา (Metaheuristic algorithms based on the evolution of biology) 2. อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกส์จากพฤติกรรมของกลุ่มประชากร (Metaheuristic algorithms based on the behavior of the population) 3. อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกส์จากปรากฏการณ์ที่ไม่ได้มาจากชีววิทยา (Metaheuristic algorithms based on the nonbiological phenomenon) อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกส์จากการวิวัฒนาการทางชีววิทยาส่วนใหญ่จะใช้เพื่อจำลองกระบวนการวิวัฒนาการทางชีววิทยา และขั้นตอนที่สำคัญคือการสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) ของยีน ตัวอย่างเช่น อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Genetic

Algorithm: GA) [10], [11] และวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) [12] เป็นต้น อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกส์จากพฤติกรรมของกลุ่มประชากรโดยพื้นฐานแล้วได้จากจำลองพฤติกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ เช่น พฤติกรรมการหาอาหาร พฤติกรรมการค้นหา และพฤติกรรมการย้ายถิ่น เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การหาค่าที่เหมาะสมแบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization; ACO) [13] การหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization; PSO) [14] และอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (Artificial Bee Colony; ABC) [15] ในส่วนของอัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกส์จากปรากฏการณ์ที่ไม่ได้มาจากชีววิทยาจะใช้การจำลองตามกฎของธรรมชาติ เช่น อัลกอริทึมวัฏจักรของน้ำ (Water Cycle Algorithm; WCA) [16] อัลกอริทึมการค้นหาลักษณะโน้มถ่วง (Gravitational Search Algorithm; GSA) [17] และการหาค่าที่เหมาะสมแบบปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction Optimization; CRO) [18] เป็นต้น

อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ [15] เป็นหนึ่งในอัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกส์แบบกลุ่ม เนื่องจากประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมและการใช้งานที่เรียบง่าย อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ในการที่จะทำให้อัลกอริทึมแบบเมตาฮิวริสติกส์สามารถที่จะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพนั้น สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับอัลกอริทึม เพื่อให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละชนิด ต่อมา Akay และ Karaboga [19], Yap และคณะ [20] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการปรับพารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ โดยในงานวิจัยเหล่านี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์แต่ละตัวแยกกันด้วยวิธีการทดลองทีละปัจจัย (One factor at a time) ซึ่งไม่ได้ทำการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองกับปัญหาตัวแปรแบบต่อเนื่องกับอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้ง

ประดิษฐ์ โดยพารามิเตอร์หลักที่นำมาพิจารณา ได้แก่ รอบในการวนซ้ำ (Iteration) จำนวนประชากรผึ้ง (Number of population) และขีดจำกัด (Limit) เพื่อเป็นแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวิธีเมตาฮิวริสติกส์ต่อไป

2. อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (Artificial Bee Colony Algorithm)

อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ถูกนำเสนอโดย Karaboga [15] โดยได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมอันชาญฉลาดของการหาอาหารและการเต้นรำของอาณานิคมผึ้ง อัลกอริทึมนี้เป็นการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มประชากร (Population-based) และพยายามค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งอาจจะเป็นค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุด (Global minimum or maximum) ด้วยวิธีการวนซ้ำ โดยเงื่อนไขของการจบการค้นหาลำดับสำหรับอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์อาจจะเป็นจำนวนรอบสูงสุดหรือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ประชากรในกลุ่มอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ประกอบด้วยผึ้งสามชนิดคือ ผึ้งงาน (Employed Bee) ผึ้งสังเกตการณ์ (Onlooker Bee) และผึ้งสำรวจ (Scout Bee) โดยผึ้งงานและผึ้งสังเกตการณ์ จะสำรวจแหล่งน้ำหวานใหม่โดยอ้างอิงแหล่งน้ำหวานที่พบรอบ ๆ รัง ในขณะที่ผึ้งสำรวจจะทำการค้นหาเป็นวงกว้างในบริเวณพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ ในอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ จะกำหนดให้จำนวนแหล่งน้ำหวานรอบ ๆ รังเท่ากับจำนวนผึ้งงานนอกจากนี้จำนวนผึ้งงานจะเท่ากับจำนวนผึ้งสังเกตการณ์ ในการวนซ้ำจนพบเงื่อนไขการหยุดจำนวนผึ้งสำรวจในอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ อาจเกิดขึ้นเพียงแค่นึงตัวก็ได้ขึ้นอยู่กับที่ตั้งเงื่อนไขตัวนับการละทิ้ง (Abandonment counter: AC) รูปที่ 1 แสดงแนวคิดกระบวนการหาอาหารของผึ้งในอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ โดยสามารถสรุปขั้นตอนของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ ซึ่งมีสี่ขั้นตอน

ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนเริ่มต้น (Initialization Phase) ขั้นตอนผึ้งงาน (Employed Bee Phase) ขั้นตอนผึ้งสังเกตการณ์ (Onlooker Bees Phase) และขั้นตอนผึ้งสำรวจ (Scout Bee Phase) ตามลำดับ

2.1 ขั้นตอนเริ่มต้น (Initialization Phase)

อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์เริ่มทำงานโดยสุ่มสร้างผลเฉลยเริ่มต้น (Initial solutions) ซึ่งผลเฉลยนี้ถูกสร้างขึ้นสำหรับผึ้งงาน (Employed bees) โดยใช้สมการที่ (1)

$$x_{i,j} = x_j^{\min} + \lambda(x_j^{\max} - x_j^{\min}), \quad (1)$$

$$i = 1 \dots N, j = 1 \dots D$$

โดยที่

$x_{i,j}$ = มิติที่ j th ของผึ้งงานลำดับที่ i th

$x_j^{\min}$ = ขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ มิติที่ j th

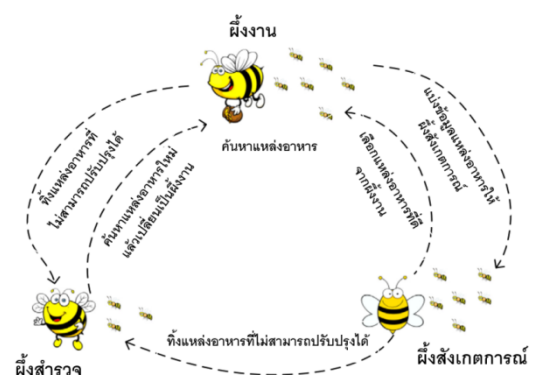
$x_j^{\max}$ = ขอบเขตบนของพารามิเตอร์ มิติที่ j th

λ = เป็นตัวเลขสุ่มในช่วง $[0, 1]$

N = จำนวนผึ้งงาน

D = มิติของปัญหาการหาค่าเหมาะสม

นอกจากนี้ ตัวนับการละทิ้ง (AC) ของผึ้งงานแต่ละตัวจะถูกรีเซ็ตในขั้นตอนนี้



รูปที่ 1 กระบวนการหาอาหารของผึ้งในอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ [9]

2.2 ขั้นตอนผึ้งงาน (Employed Bee Phase)

ในขั้นตอนนี้ผลเฉลยชุดใหม่จะถูกสร้างขึ้นสำหรับผึ้งงานแต่ละตัว โดยเริ่มจากผลเฉลยของผึ้งงานจะถูกคัดลอกไปยังผลเฉลยใหม่ ($V_i = X_i$) จากนั้นอัปเดตค่าพารามิเตอร์ของผลเฉลยเพียงมิติเดียวโดยใช้สมการที่ (2)

$$\begin{aligned} V_{i,j} &= X_{i,j} + \phi(X_{i,j} - X_{k,i}) \\ i, k &\in \{1, 2, \dots, N\}, \\ j &\in \{1, 2, \dots, D\} \text{ and } i \neq k \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่

$V_{i,j}$ = มิติที่ j th ของผลเฉลยใหม่ลำดับที่ i th
 $X_{i,j}$ = มิติที่ j th ของผึ้งงานลำดับที่ i th
 $X_{k,j}$ = มิติที่ j th ของผึ้งงานลำดับที่ k th
 ϕ = ตัวเลขสุ่มในช่วง $[-1, +1]$
 N = จำนวนผึ้งงาน
 D = มิติของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม

นอกจากนี้ ผลเฉลยลำดับที่ k และมิติของปัญหาที่ j จะถูกสุ่มเลือกจากประชากรผึ้งงานและระหว่างขนาดมิติของปัญหา ตามลำดับ

หลังจากที่ผลเฉลยชุดใหม่ถูกสร้างและคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉพาะสำหรับปัญหาแล้ว ค่าความเหมาะสมของคำตอบ (Fitness value) ของผลเฉลยชุดใหม่ และผลเฉลยของผึ้งงานจะถูกคำนวณดังนี้

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & \text{if } (f_i \geq 0) \\ \frac{1}{1 + \text{abs}(f_i)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่

fit_i = ค่าความเหมาะสมของคำตอบของผึ้งงานลำดับที่ i th
 f_i = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผึ้งงานลำดับที่ i th

หากค่าความเหมาะสมของคำตอบใหม่ดีกว่าค่าความเหมาะสมของคำตอบของผึ้งงาน ผึ้งงานจะถูกแทนที่ด้วยผลเฉลยของตัวใหม่ ($V_i = X_i$) และตัวนับการละทิ้ง (AC) ของผึ้งงานจะถูกรีเซ็ต ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ ตัวนับการละทิ้งจะเพิ่มขึ้น 1 ($AC = AC + 1$)

2.3 ขั้นตอนผึ้งสังเกตการณ์ (Onlooker Bees Phase)

ในอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ ผึ้งสังเกตการณ์แต่ละตัวจะเลือกผึ้งงานเพื่อปรับปรุงผลเฉลย ในการเลือกนี้จะเลือกตามค่าความเหมาะสมของคำตอบ (Fitness value) ของผึ้งงาน โดยใช้วงล้อรูเล็ตต์ (Roulette wheel) ซึ่งสร้างจากสมการที่ (4)

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^N fit_j} \quad (4)$$

โดยที่

p_i = ความน่าจะเป็นของผึ้งงานลำดับที่ i th ที่จะถูกเลือกโดยผึ้งสังเกตการณ์

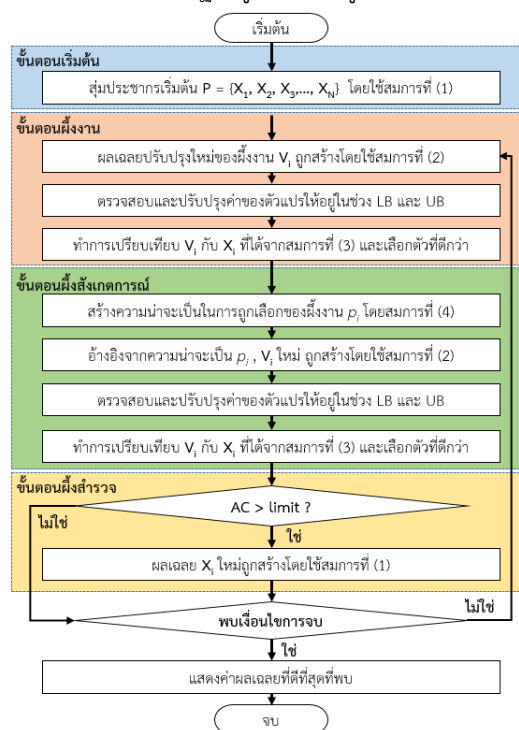
โดยที่ผึ้งสังเกตการณ์พยายามปรับปรุงผลเฉลยของผึ้งงานที่คัดเลือกมาโดยใช้สมการที่ (2) หากค่าความเหมาะสมของคำตอบใหม่ที่ดีกว่าค่าความเหมาะสมของคำตอบของผึ้งงาน ผึ้งสังเกตการณ์จะเปลี่ยนไปเป็นผึ้งงาน และรีเซ็ตตัวนับการละทิ้ง (AC) ของผึ้งงานถ้าไม่เข้าเงื่อนไขนี้ตัวนับการละทิ้งจะเพิ่มขึ้น 1 ($AC = AC + 1$) โดยสรุปแล้ว ผึ้งสังเกตการณ์และผึ้งงานจะใช้สมการเดียวกันในการค้นหาโดยรอบ (Exploitation) บริเวณแหล่งอาหาร

2.4 ขั้นตอนผึ้งสำรวจ (Scout Bee Phase)

ตัวนับการละทิ้ง (AC) ของผึ้งงานทั้งหมดจะถูกตรวจสอบด้วยตัวเลขซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้งานอัลกอริทึมคือตัวแปรขีดจำกัด (Limit) ผึ้งงานซึ่งไม่สามารถปรับปรุง

ผลเฉลยด้วยตนเองได้จนกระทั่งตัวนับการละทิ้ง (AC) ถึงขีดจำกัด (Limit) จะกลายเป็นฝั่งสำรวจ โดยที่การสร้างผลเฉลยสำหรับฝั่งสำรวจจะใช้สมการที่ (1) และตัวนับการละทิ้งจะถูกรีเซ็ต หลังจากนั้นฝั่งสำรวจซึ่งสร้างผลเฉลยใหม่สำหรับตัวมันเองจะเปลี่ยนมาเป็นฝั่งงานอีกครั้ง ดังนั้น ฝั่งสำรวจในอัลกอริทึมอาณานิคมฝั่งประดิษฐ์จึงป้องกันการหยุดนิ่ง (Stagnation) ของประชากรฝั่งงาน

จากคำอธิบายข้างต้น ผังการไหลของอัลกอริทึมอาณานิคมฝั่งประดิษฐ์ได้ถูกแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังการไหลของอัลกอริทึมอาณานิคมฝั่งประดิษฐ์

3. วิธีพื้นผิวตอบสนองสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการ (Response surface methodology for process optimization)

วิธีพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการทางสถิติและทางคณิตศาสตร์ที่ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง

พารามิเตอร์กระบวนการอินพุต และตัวแปรการตอบสนอง (เอาต์พุต) วิธีนี้ได้รับการแนะนำโดย Montgomery [21] วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ใช้การออกแบบการทดลองตามลำดับเพื่อให้ได้การตอบสนองที่ดีที่สุด วิธีนี้เป็นวิธีการที่ช่วยในการพัฒนา ปรับปรุง และปรับพารามิเตอร์กระบวนการให้เหมาะสม ขั้นตอนการออกแบบของวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้ 1. การออกแบบชุดการทดลอง 2. การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด 3. การหาชุดปัจจัยการทดลองที่เหมาะสมที่สุดเพื่อสร้างการตอบสนองสูงสุดหรือต่ำสุด 4. แสดงผลกระทบหลัก (Main effect) และผลกระทบร่วม (Interaction effect) ของตัวแปรกระบวนการและพื้นผิวตอบสนอง

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3^k (3^k factorial design) [22] ถูกออกแบบให้กับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมอาณานิคมฝั่งประดิษฐ์ซึ่งประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ 3 ตัว [19], [20] พารามิเตอร์ตัวแรกคือ รอบในการวนซ้ำ (Iteration; MaxIter) ซึ่งจะเป็นตัวที่กำหนดรอบในการหยุดค้นหาผลเฉลยของอัลกอริทึม ในขณะที่พารามิเตอร์ตัวที่สองจะเป็น จำนวนประชากรฝั่ง (Number of Population; NP) จะเป็นตัวกำหนดประชากรของฝั่งในการค้นผลเฉลย และตัวสุดท้ายคือ ขีดจำกัด (Limit) เป็นตัวแปรที่กำหนดการละทิ้งแหล่งอาหารปัจจุบันของฝั่งงานและฝั่งสังเกตการณ์ เพื่อเป็นฝั่งสำรวจในการค้นหาแหล่งอาหารใหม่ ในงานวิจัยนี้ ปัจจัยการทดลองและค่าระดับปัจจัยที่พิจารณาได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล 3^k ซึ่งมีการทดลอง 3 ซ้ำ และผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยการทดลองและระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับปัจจัย (Coded)		
	-1	0	+1
รอบในการวนซ้ำ	100	500	900
จำนวนประชากรผึ้ง	10	25	40
ขีดจำกัด	10	50	90

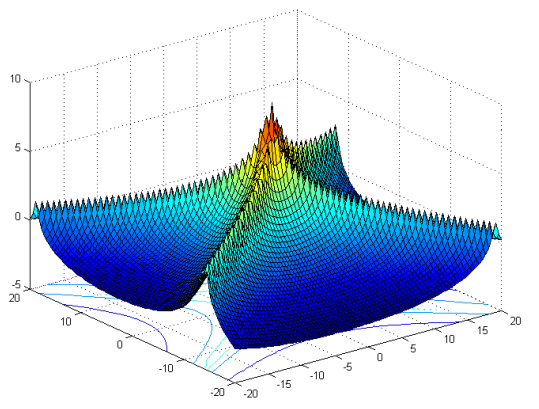
ตารางที่ 2 แบบการทดลองแฟคทอเรียล 3^k และผลการทดลอง

RUN	MaxIter	NP	Limit	Avg. Solution
1	100	10	10	8.35364
2	100	10	50	8.26353
3	100	10	90	8.24138
4	100	25	10	9.32991
5	100	25	50	8.83608
6	100	25	90	8.98511
7	100	40	10	8.94659
8	100	40	50	9.48359
9	100	40	90	9.51797
10	500	10	10	9.22240
11	500	10	50	8.70006
12	500	10	90	8.74521
13	500	25	10	9.45969
14	500	25	50	9.48091
15	500	25	90	9.50506
16	500	40	10	9.32106
17	500	40	50	9.48359
18	500	40	90	9.52111
19	900	10	10	9.28512
20	900	10	50	9.26896
21	900	10	90	8.74521
22	900	25	10	9.50483
23	900	25	50	9.52193

RUN	MaxIter	NP	Limit	Avg. Solution
24	900	25	90	9.50735
25	900	40	10	9.44367
26	900	40	50	9.51646
27	900	40	90	9.52252

4.2 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ มีการใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ชนิดตัวแปรต่อเนื่องที่ไม่เป็นเชิงเส้น คือฟังก์ชันทดสอบ โกลด์สเตนไพร์ซ์ (Goldstein-price function) จากสมการที่ (5) ซึ่งลักษณะของฟังก์ชันจะเป็นแบบ Multi-modal โดยมีจุด Local optimum จำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์



รูปที่ 3 ฟังก์ชันทดสอบโกลด์สเตนไพร์ซ์ (Goldstein-price function)

$$f(x,y)=10-\log_{10}[\{1+(1+x+y)^2(19-14x+3x^2-14y+6xy+3y^2)\} \\ * \{30+(2x-3y)^2(18-32x+12x^2+48y-36xy+27y^2)\}] \tag{5}$$

ช่วงของตัวแปร: $-20 < x < 20$; $-20 < y < 20$

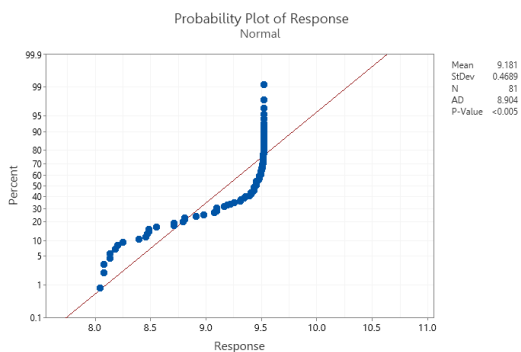
ผลเฉลยที่ดีที่สุด: $f(x^*, y^*) = 9.522878$

$x^* = 0$ และ $y^* = -1$

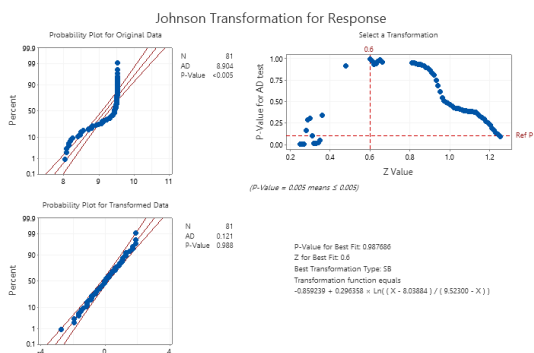
5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล

จากผลการทดลองข้อมูลผลเฉลยจะถูกนำไปวิเคราะห์ว่ามีการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติ (Normal distribution) หรือไม่ เพื่อให้เข้าเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อมูลแบบพารามตริก ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผลเฉลยที่ได้จากการทดลองพบว่าข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติแสดงดังรูปที่ 4 ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงข้อมูลโดยวิธี Johnson Transform สมการในการแปลงข้อมูลและผลจากการแปลงข้อมูลแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าข้อมูลที่ถูกแปลงมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4 ผลการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลผลเฉลยจากการทดลอง



รูปที่ 5 สมการและผลการแปลงข้อมูลผลเฉลย

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการตรวจสอบนัยสำคัญและความสามารถของแบบจำลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะระบุว่าแบบจำลองกำลังสองที่ถูกโมเดลนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ รวมถึงตรวจสอบผลกระทบหลักที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยว่ามีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ผลจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้างในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์มีการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายตัวของข้อมูลสม่ำเสมอ และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าโมเดลกำลังสองมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง นอกจากนั้นผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัย มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 (P-value<0.05) และมีค่า Lack-of-Fit 0.687 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่า $R^2 = 73.52\%$ แสดงว่าโมเดลมีความเหมาะสม

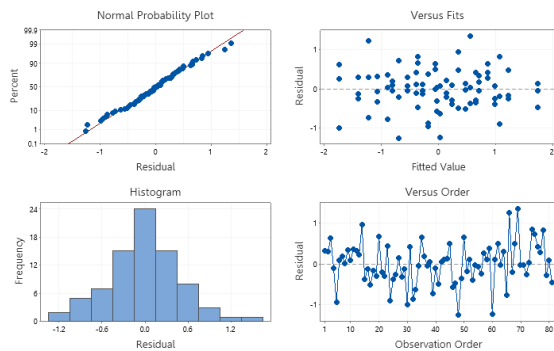
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	DF	F-Value	P-Value
Regression	5	41.65	0.000
Maxlter	1	52.57	0.000
NP	1	17.79	0.000
Limit	1	18.52	0.000
NP*NP	1	19.68	0.000
P*Limit	1	38.55	0.000
Error	75		
Lack-of-Fit	21	0.82	0.687
Pure Error	54		
Total	80		

R-sq 73.52% R-sq (adj) 71.76%

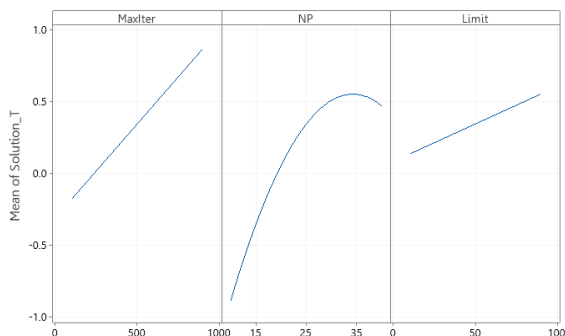
ตัวแบบการถดถอยโดยประมาณโดยใช้ตัวแปร
รหัสแสดงดังสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} \text{Solution}_T &= -2.092 \\ &+ 0.001303 \text{ MaxIter} + 0.1224 \text{ NP} \\ &- 0.01757 \text{ Limit} - 0.002454 \text{ NP}^2 \\ &+ 0.000911 \text{ NP} * \text{Limit} \end{aligned} \quad (6)$$

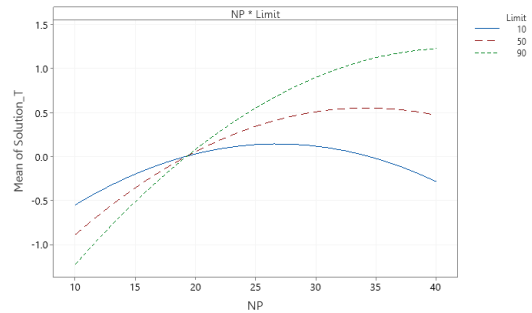


รูปที่ 6 กราฟวิเคราะห์ส่วนตกค้าง

ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ
อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ ในเบื้องต้นจะทำการ
พิจารณากราฟผลกระทบหลักในการเปลี่ยนระดับของ
พารามิเตอร์ และกราฟผลกระทบร่วมของพารามิเตอร์ ซึ่ง
เมื่อพิจารณาจากกราฟผลกระทบหลักในรูปที่ 7
พบว่าควรกำหนด ระดับของพารามิเตอร์ รอบในการวน
ซ้ำ (MaxIter) จำนวนประชากรผึ้ง (NP) และ ชีตจำกัด
(Limit) ที่ประมาณ 900 34 และ 90 ตามลำดับ แต่เมื่อ
พิจารณาจากกราฟผลกระทบร่วมในรูปที่ 8 พบว่า ควร
กำหนด จำนวนประชากรผึ้ง (NP) และ ชีตจำกัด (Limit)
ที่ 40 และ 90 ตามลำดับ

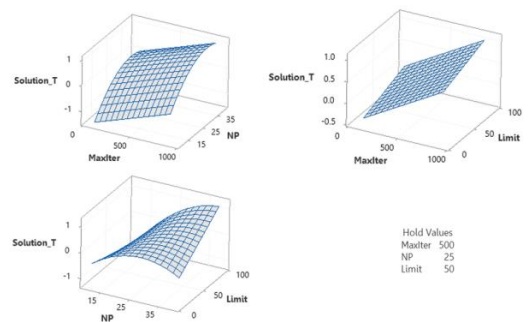


รูปที่ 7 ผลกระทบหลักของพารามิเตอร์

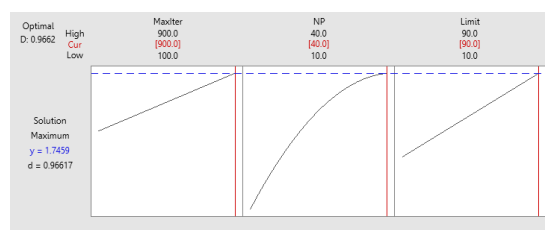


รูปที่ 8 ผลกระทบร่วมของพารามิเตอร์

เมื่อนำตัวแบบการถดถอยในสมการที่ (6) ไป
พล็อตจะได้พื้นผิวตอบสนองดังรูปที่ 9 และจะสังเกต
จากพื้นผิวตอบสนองได้ว่า ควรกำหนด ระดับของ
พารามิเตอร์ รอบในการวนซ้ำ (MaxIter) จำนวน
ประชากรผึ้ง (NP) และ ชีตจำกัด (Limit) ที่ประมาณ
900 40 และ 90 ตามลำดับเพื่อให้ชัดเจนมากขึ้นจึงนำ
ตัวแบบการถดถอยในสมการที่ (6) ไปหาค่าที่ดีที่สุด โดย
เครื่องมือการหาค่าที่ดีที่สุดของการตอบสนอง
(Response optimizer) โดยผลจากการวิเคราะห์แสดง
ดังรูปที่ 10 พบว่า ควรกำหนดกำหนด ระดับของ
พารามิเตอร์ รอบในการวนซ้ำ (MaxIter) จำนวน
ประชากรผึ้ง (NP) และ ชีตจำกัด (Limit) ที่ 900 40
และ 90 ตามลำดับ



รูปที่ 9 พื้นผิวตอบสนองของพารามิเตอร์



รูปที่ 10 ระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

6. สรุป

อัลกอริทึมเมตาฮีริสติกส์แบบกลุ่ม ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเนื่องจากประสิทธิภาพที่ยืดหยุ่นและการใช้งานที่เรียบง่าย อัลกอริทึมเมตาฮีริสติกส์จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการที่จะทำให้อัลกอริทึมแบบเมตาฮีริสติกส์สามารถที่จะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพนั้น สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับอัลกอริทึม เพื่อให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละชนิด โดยในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองและวิธีพันผิวตอบสนองกับปัญหาตัวแปรแบบต่อเนื่อง เพื่อเป็นแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวิธีเมตาฮีริสติกส์ การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3^k (3^k factorial design) โดยพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมเมตาฮีริสติกส์ประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ 3 ตัว คือ รอบในการวนซ้ำ (Iteration; MaxIter) จำนวนประชากรผึ้ง (Number of Population; NP) และ ชีตจำกัด (Limit) ดังนั้นการทดลองต่อหนึ่งซ้ำ (Replication) จะมีจำนวน 27 รัน ($3^k = 3^3 = 27$) หลังจากที่ได้รูปแบบการทดลองแล้วนำไปทดลอง 3 ซ้ำ และนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ จากการวิเคราะห์พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลไปแปลงโดยวิธี Johnson Transform เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีพันผิวตอบสนอง ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ผลกระทบหลักซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับของทั้งสามพารามิเตอร์ ผลกระทบร่วมระหว่างจำนวนประชากรผึ้ง และชีตจำกัด และโมเดลกำลังสองมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($P\text{-value} < 0.05$) ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำตัวแบบการถดถอยไปหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ผลจากการวิเคราะห์ตัวแบบการถดถอยพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมเมตาฮีริสติกส์

ประดิษฐ์ในการแก้ปัญหาฟังก์ชันคณิตศาสตร์แบบตัวแปรต่อเนื่อง ควรกำหนดระดับของ รอบในการวนซ้ำ จำนวนประชากรผึ้ง และชีตจำกัด เป็น 900 40 และ 90 ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดเป็นแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมเมตาฮีริสติกส์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Deift and X. Zhou, "A steepest descent method for oscillatory Riemann- Hilbert problems," *Asymptotics for the MKdV equation. Annals of Mathematics*, vol. 137(2), pp. 295-368, 1993.
- [2] D. Goldfarb and J. K. Reid, "A practicable steepest- edge simplex algorithm," *Mathematical Programming*, vol. 12(1), pp. 361-371, 1977.
- [3] L. Qi and J. Sun, "A nonsmooth version of Newton's method," *Mathematical programming*, vol. 58(1), pp. 353-367, 1993.
- [4] M. J. Best, "A feasible conjugate-direction method to solve linearly constrained minimization problems," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 16(1), pp. 25-38, 1975.
- [5] H. Rao, X. Shi, A. K. Rodrigue, J. Feng, Y. Xia, M. Elhoseny and L. Gu, "Feature selection based on artificial bee colony and gradient boosting decision tree," *Applied Soft Computing*, vol. 74, pp. 634-642, 2019.
- [6] W. Chen, M. Panahi, P. Tsangaratos, H. Shahabi, I. Ilia, S. Panahi, and B. B. Ahmad, "Applying population- based evolutionary algorithms and a neuro- fuzzy system for modeling landslide susceptibility," *Catena*, vol. 172, pp. 212-231, 2019.

- [7] Y. Xue, B. Xue and M. Zhang, "Self-adaptive particle swarm optimization for large-scale feature selection in classification," *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, vol. 13(5), pp. 1-27, 2019.
- [8] Q. Yang, W. N. Chen, T. Gu, H. Jin, W. Mao and J. Zhang, "An adaptive stochastic dominant learning swarm optimizer for high-dimensional optimization," *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020.
- [9] J. Yang, C. Jiangtao and Y. D. Zhang, "Artificial bee colony algorithm with adaptive covariance matrix for hearing loss detection," *Knowledge-Based Systems*, vol. 216, pp. 1-28, 2021.
- [10] Y. Xinjie and G. Mitsuo, "Introduction to Evolutionary Algorithms," *Springer Science & Business Media*, 2010.
- [11] A. Khadwilard, "Application of Genetic Algorithm for Optimization Problems", *RMUTP Sci J*, vol. 5, no. 2, pp. 153-163, 2011.
- [12] R. Storn and K. V. Price, "Differential Evolution—A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces," *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, 1997.
- [13] M. Dorigo, M. Birattari and T. Stutzle, "Ant colony optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1(4), pp. 28-39, 2006.
- [14] R. C. Eberhart, Y. Shi and J. Kennedy, "Swarm intelligence," *Elsevier*, 2001.
- [15] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," *Technical report- tr06, Erciyes University, engineering faculty, computer engineering department*, vol. 200, pp. 1-10, 2005.
- [16] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad and M. Hamdi, "Water cycle algorithm—A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems," *Computers & Structures*, vol. 110, pp. 151-166, 2012.
- [17] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour and S. Saryazdi, "GSA: a gravitational search algorithm," *Information sciences*, vol. 179(13), pp. 2232-2248, 2009.
- [18] N. Siddique and H. Adeli, "Nature-inspired chemical reaction optimization algorithms," *Cognitive computation*, vol. 9(4), pp. 411-422, 2017.
- [19] B. Akay and D. Karaboga, "Parameter Tuning for the Artificial Bee Colony Algorithm," *Computational Collective Intelligence*, pp. 608-619, 2009.
- [20] Y. S. Qi, T. K. Wen, S. Rui, D. Gan, Z. A. Abdul Salam, "Parameter tuning for artificial Bee Colony algorithm," *Journal of Applied Technology and Innovation*, vol. 5, no. 1, pp. 11-14, 2021.
- [21] G. E. P. Box and K. B. Wilson, "On the experimental attainment of optimum conditions," *Journal of the Royal Statistical Society B*, vol. 13, pp. 1-45, 1951.
- [22] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, New York: John Wiley and Sons, 2001.

การศึกษาแนวทางการอนุรักษ์พลังงานในฟาร์มเปิด

สุรพงษ์ สำลีพันธุ์ และ ชัยยศ ดำรงกิจโกศล*

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร, 10800

รับบทความ 22 มีนาคม 2566 แก้ไขบทความ 5 เมษายน 2566 ตอรับบทความ 10 เมษายน 2566

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่ และศึกษาแนวทางการอนุรักษ์การใช้พลังงานและวิเคราะห์ข้อมูลระยะเวลาคืนทุนในฟาร์มเปิดไข่ โดยได้ทำการสำรวจการใช้พลังงานในฟาร์มเปิด 3 ขนาด คือ ฟาร์มเปิดไข่ขนาดเล็กที่มีจำนวนเปิด 1,000 ถึง 3,000 ตัว ฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางที่มีจำนวนเปิด 3,001 ถึง 7,000 ตัว และฟาร์มเปิดไข่ขนาดใหญ่ที่มีจำนวนเปิด 7,001 ถึง 10,000 ตัว ในเขตพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคมปี พ.ศ.2565 ผลการวิจัยพบว่าฟาร์มเปิดขนาดเล็กมีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 226.8 kWh/month โดยมีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 82.14 W/month/duck ฟาร์มเปิดขนาดกลางมีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 968.4 kWh/month โดยมีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 199.25 W/month/duck และฟาร์มเปิดขนาดใหญ่ มีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 1,289.1 kWh/month โดยมีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 148.17 W/month/duck ด้านแนวทางการอนุรักษ์พลังงาน กรณีศึกษาฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีการกำหนดแนวทางการอนุรักษ์พลังงานไว้ 2 มาตรการ คือ การติดตั้งโซล่าเซลล์และการใช้หลอดแอลอีดีแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ พบว่า การใช้หลอดไฟแอลอีดีแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 581.66 kWh/year มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6 เดือน และเมื่อใช้ร่วมกับการติดตั้งโซล่าเซลล์ระบบ On Grid ขนาด 4.95 kW สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 7,227 kWh/year มีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 5 หรือ 8.3 ปี ขึ้นค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

คำสำคัญ : อนุรักษ์พลังงาน; ฟาร์มเปิด; ระยะเวลาคืนทุน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1458 0155, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th

A Study of Energy Conservation Guideline for the Duck Farm

Surapong Samleean and Chaiyot Damrongkijkosol*

College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800

Received 22 March 2023; Revised 5 April 2023; Accepted 10 April 2023

Abstract

The research objectives were to study the energy consumption in a duck farm, and study the guidelines for energy conservation for the duck farm, and analyze the payback period. This research surveyed three sizes of duck farms: a small-size duck farm with 1,000 – 3,000 ducks, a medium-size duck farm with 3,001 – 7,000 ducks, and a large-size duck farm with 7,001- 10,000 ducks in Banglen, Nakorn Pathom Province. The survey was implemented from February to May 2022. Results showed that the small, medium, and large duck farms had an average energy consumption of around 226.8, 968.4, and 1,289.1 kWh/month, respectively, and the specific energy consumption per duck was around 82.14, 199.25, and 148.17 W/month respectively. For the study of energy conservation in duck farms, the medium-sized duck farm was studied as a case study. There were two plans for energy conservation in the duck farm: the replacement of fluorescent light bulbs with LED light bulbs and the combination of on-grid solar cell system with LED light bulbs. Results showed that replacing fluorescent light bulbs with LED light bulbs could conserve electric energy around 581.66 kWh/year with a payback period of six months. Moreover, due to the combination of replacing fluorescent light bulbs with LED light bulbs and the 4.95 kW on-grid solar cell system, 7,227 kWh/year of electric energy was conserved with a payback period of 5 and 8.3 years, depending on the installation cost.

Keywords : Energy Conservation; Duck Farm; Payback Period

* Corresponding Author. Tel.: +668 1458 0155, E-mail Address: chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมกว่าครึ่งหนึ่งของประชากรไทยมีอาชีพเกษตรกรรม ซึ่งการเลี้ยงเป็ดไข่ (ฟาร์มเป็ดไข่) เป็นอาชีพทางการเกษตรแขนงหนึ่งในประเทศไทย เนื่องจากสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศเอื้ออำนวยต่อการเลี้ยงสัตว์ประเภทนี้มาก เดิมการเลี้ยงเป็ดไข่เป็นการเลี้ยงแบบธรรมชาติทั่วไปเป็นลักษณะเปิดโล่งทำให้มีความเสี่ยงต่อภัยพิบัติทางอุตุนิยมวิทยา เช่น พายุไต้ฝุ่น และการแพร่กระจายของโรคติดต่อจากสัตว์อื่นๆ ยิ่งไปกว่านั้นเป็นการยากที่จะจัดการสภาพแวดล้อมภายในให้เหมาะสม เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิในฤดูร้อนสูงขึ้น การเลี้ยงเป็ดไข่แบบทั่วไปจึงไม่เหมาะสำหรับการเลี้ยงเป็ดไข่ในเชิงพาณิชย์ จากหลักการดังกล่าวจึงมีการเลี้ยงเป็ดไข่ในโรงเรือน (ฟาร์มเป็ดไข่) นอกจากจะลดปัญหายังพิบัติทางอุตุนิยมวิทยา และการแพร่กระจายของโรคได้แล้ว [1], [2] เป็ดยังมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงหรือเปอร์เซ็นต์ไข่เปิดที่ดีขึ้น สามารถลดพื้นที่ในการเลี้ยงต่อตัวลงได้ แต่การลงทุนในการสร้างโรงเรือนในระยะเริ่มต้น และวัสดุอุปกรณ์ระบบต่างๆ ในโรงเรือน เช่น ระบบแสงสว่าง, ระบบน้ำ, ระบบระบายความร้อน และระบบผสมอาหาร [3] จะสูงกว่าการเลี้ยงเป็ดไข่แบบเดิมมาก ทำให้ต้นทุนในการเลี้ยงเป็ดสูงขึ้น นอกจากต้นทุนที่สูงขึ้นแล้วยังมีการใช้พลังงานในส่วนอื่นๆ เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายแต่ละเดือนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการสำรวจและกำหนดแนวทางอนุรักษ์พลังงานสำหรับฟาร์มเป็ดไข่เพื่อช่วยให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ การอนุรักษ์พลังงานโดยการใช้หลอดไฟ LED แทนหลอดไส้ที่สามารถช่วยให้ต้นทุนด้านพลังงานลดลงได้ [4] โดยแนวทางการอนุรักษ์พลังงานที่เหมาะสมจะช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน ส่งผลให้ต้นทุนด้านการเลี้ยงเป็ดไข่ไม่สูงเกินกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้การอนุรักษ์พลังงานยังเป็นการช่วยรักษาทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดไว้ให้มีใช้อย่าง

ยั่งยืน [5] รวมถึงการใช้พลังงานทดแทนอย่างพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าในฟาร์มเป็ดไข่ โดยโซลาร์เซลล์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้มาอยู่ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า [6], [7] เนื่องจากแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าขึ้นในสารกึ่งตัวนำจึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าไปใช้งานได้ [8]

จากที่มาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงดำเนินการสำรวจการใช้พลังงานในฟาร์มเป็ดไข่ในเขตพื้นที่บางเลน จังหวัดนครปฐม และศึกษาแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานในฟาร์มเป็ดไข่กรณีศึกษาฟาร์มเป็ดไข่ในเขตพื้นที่บางเลน จังหวัดนครปฐม

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการใช้พลังงานในฟาร์มเป็ดไข่

2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการอนุรักษ์การใช้พลังงานและวิเคราะห์ข้อมูลระยะเวลาคืนทุนในฟาร์มเป็ดไข่

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในการศึกษาการใช้พลังงานและศึกษาแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานในฟาร์มเป็ดไข่ มีการออกแบบการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1 และมีขั้นตอนการดำเนินการแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

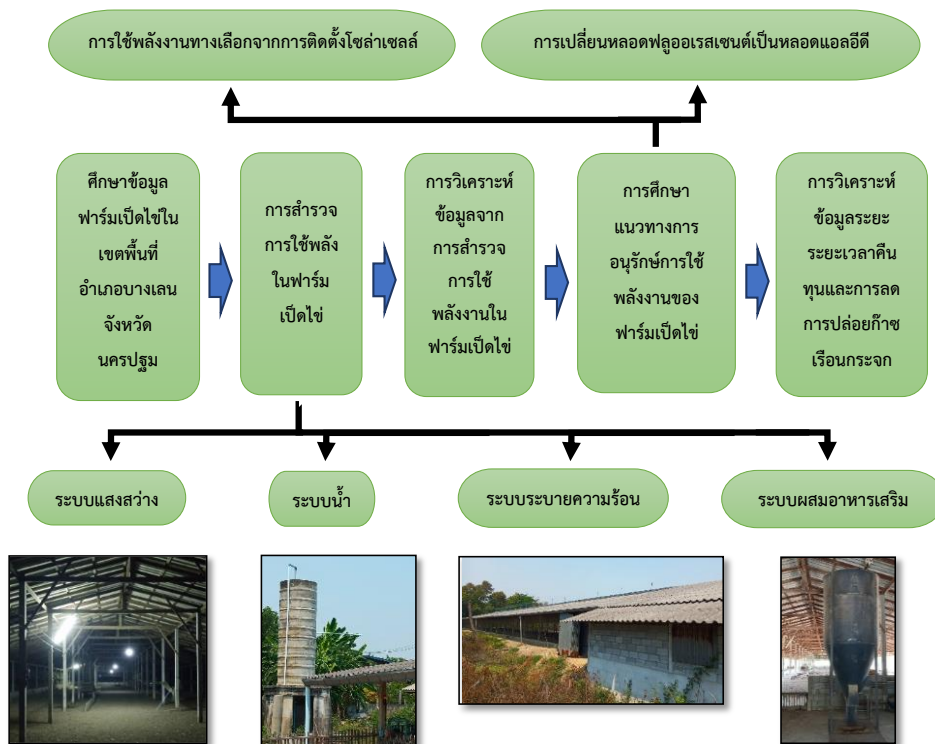
3.1 ศึกษาข้อมูลและสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเป็ดไข่

งานวิจัยนี้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเป็ดไข่ในเขตพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม จำนวนทั้งสิ้น 40 ฟาร์ม แบ่งเป็น ฟาร์มขนาดเล็กที่มีจำนวนเป็ดไข่ 1,000 ถึง 3,000 ตัว จำนวน

15 ฟาร์ม ฟาร์มขนาดกลางที่มีจำนวนเป็ดไข่ 3,001 ถึง 7,000 ตัว จำนวน 20 ฟาร์ม และฟาร์มขนาดใหญ่ที่มีจำนวนเป็ดไข่ 7,001 ถึง 10,000 ตัวจำนวน 5 ฟาร์ม

จากนั้นทำการศึกษาแนวทางการจัดทำแบบสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานจากเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและนำมาสร้างแบบสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเป็ดไข่ เพื่อนำไปใช้ในการสำรวจเก็บข้อมูลการใช้พลังงานของฟาร์มเป็ดไข่จำนวน 40 ฟาร์ม

ในเขตพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐมโดยดำเนินการเก็บข้อมูลด้วยการสอบถามข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ขนาดของฟาร์ม จำนวนเป็ดไข่ในฟาร์มจากผู้ประกอบการหรือเจ้าของฟาร์ม รวมถึงสำรวจจำนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ตรวจสอบวัดอัตราการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในฟาร์มโดยใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 1 กรอบการวิจัย (Conceptual framework)



รูปที่ 2 การสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานของฟาร์มเป็ดไข่ในเขตอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม

รูปที่ 3 การตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบต่างๆ ในฟาร์มเป็ดไข่

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจการใช้พลังงานของฟาร์มเปิดไข่

เมื่อทำการสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่ขนาดต่างๆเสร็จแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจถูกนำไปวิเคราะห์และคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานในแต่ละระบบ [9] และคำนวณดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะต่อเปิดหนึ่งตัว [10] ดังสมการที่ (1)-(5)

การคำนวณอัตราการใช้พลังงานในระบบแสงสว่าง
อัตราการใช้พลังงานในระบบแสงสว่าง (kWh) = (จำนวนหลอดไฟของระบบแสงสว่าง × ค่าวัตต์ของหลอดไฟ (W) × ชั่วโมงการใช้งาน) / 1,000 (1)

การคำนวณอัตราการใช้พลังงานในระบบน้ำ
อัตราการใช้พลังงานในระบบน้ำ (kWh) = (จำนวนปั้มน้ำของระบบน้ำ × ค่าวัตต์ของปั้มน้ำ (W) × ชั่วโมงการใช้งาน) / 1,000 (2)

การคำนวณอัตราการใช้พลังงานในระบบระบายความร้อน
อัตราการใช้พลังงานในระบบระบายความร้อน (kWh) = (จำนวนมอเตอร์ของระบบระบายความร้อน × ค่าวัตต์ของมอเตอร์ระบบระบายความร้อน (W) × ชั่วโมงการใช้งาน) / 1,000 (3)

การคำนวณอัตราการใช้พลังงานในระบบผสมอาหารเสริม
อัตราการใช้พลังงานในระบบผสมอาหารเสริม (kWh) = (จำนวนมอเตอร์ของระบบผสมอาหารเสริม × ค่าวัตต์ของมอเตอร์ของระบบผสมอาหารเสริม (W) × ชั่วโมงการใช้งาน) / 1,000 (4)

การคำนวณดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะ หรือการคำนวณค่าพลังงานต่อผลผลิต (Specific energy consumption: SEC) [10] สำหรับฟาร์มแต่ละขนาดต่อเปิด 1 ตัวต่อเดือน

ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะต่อเปิดหนึ่งตัวต่อเดือน: SEC (kW/month/duck) = (ปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งฟาร์มต่อเดือน (kWh) / จำนวนตัวเปิดในฟาร์ม) × 1,000 (5)

3.3 การศึกษาแนวทางการอนุรักษ์การใช้พลังงานของฟาร์มเปิดไข่

จากข้อมูลในการสำรวจฟาร์มที่เลี้ยงเปิดไข่ในเขตพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม พบว่าฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีจำนวนมากที่สุดในเขตพื้นที่ดังกล่าว จึงเลือกฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางเป็นกรณีศึกษา เพื่อทำการศึกษาแนวทางการอนุรักษ์การใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่ตามแนวทางดังต่อไปนี้

3.3.1 การประหยัดพลังงานจากการเปลี่ยนหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดแอลอีดี โดยใช้หลอดแอลอีดีที่มีค่าลูเมน (Lumen) เท่ากับหลอดฟลูออเรสเซนต์ จากนั้นทำการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ [7] จากสมการที่ (6)

พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kW/ปี) = พลังงานไฟฟ้าจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (W) – พลังงานไฟฟ้าจากหลอดแอลอีดี (W) (6)

3.3.2 การใช้พลังงานทางเลือกจากการติดตั้งโซลาร์เซลล์ในระบบ On Grid ร่วมกับการใช้หลอดแอลอีดีเพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันของฟาร์มเปิดไข่ โดยคำนวณหาการใช้พลังงานไฟฟ้าช่วงกลางวันของฟาร์มเปิดไข่ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปใช้กำหนดขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ และนำมาคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลระยะเวลาคืนทุนและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จากข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าไฟฟ้า ผลต่างอัตราการใช้

พลังงานสุทธิเฉลี่ยต่อปี และระยะเวลาคืนทุน ได้ตั้งสมการที่ (7)-(10) [11], [12]

การคำนวณผลต่างอัตราการใช้พลังงานสุทธิเฉลี่ยต่อปี
ผลต่างอัตราการใช้พลังงานสุทธิเฉลี่ยต่อปี = ปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งฟาร์มต่อปีของฟาร์มก่อนปรับปรุง (kWh) – ปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งฟาร์มต่อปีของฟาร์มที่มีการอนุรักษ์พลังงานหลังปรับปรุง (kWh) (7)

การคำนวณการประหยัดเงิน (บาท/ปี)
การประหยัดเงิน (บาท/ปี) = ผลต่างอัตราการใช้พลังงานสุทธิเฉลี่ยต่อปี × ราคาค่าไฟของการไฟฟ้า (วันที่) (8)

การคำนวณระยะเวลาคืนทุน [11]
ระยะเวลาคืนทุน = ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด/ผลต่างอัตราการใช้พลังงานสุทธิเฉลี่ยต่อปี (9)

การคำนวณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG emissions) [12]
การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก = ข้อมูลกิจกรรม × GHG emissions Factor (10)

4. ผลการศึกษา

จากการเก็บข้อมูลโดยการสำรวจและสัมภาษณ์ผู้ประกอบการฟาร์มเปิดไข่ ในพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ด้านการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่จำนวน 40 ฟาร์ม พบว่าสามารถแบ่งฟาร์มเปิดไข่ตามขนาดฟาร์มได้ดังนี้ ฟาร์มเปิดไข่ขนาดเล็กจำนวน 15

ฟาร์ม มีจำนวนเปิดเฉลี่ย 2,761 ตัว ฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางจำนวน 20 ฟาร์ม มีจำนวนเปิดเฉลี่ย 4,860 ตัว และฟาร์มเปิดไข่ขนาดใหญ่จำนวน 5 ฟาร์ม มีจำนวนเปิดเฉลี่ย 8,700 ตัว โดยผลการสำรวจการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่แต่ละขนาดและแนวทางการอนุรักษ์พลังงาน มีผลการวิจัยดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่ 3 ขนาดที่แตกต่างกัน พบว่ามีการใช้พลังงานแตกต่างกันในฟาร์มเปิดไข่แต่ละขนาดดังนี้ (รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1) โดยฟาร์มเปิดไข่ขนาดเล็ก พบว่าระบบแสงสว่างใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เฉลี่ย 5 หลอด มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 180 W/h ระบบน้ำใช้ปั้มน้ำมีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 1,800 W/h ฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลาง พบว่าระบบ แสงสว่างใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เฉลี่ย 8.3 หลอด มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 298.8 W/h ระบบน้ำใช้ ปั้มน้ำใช้ปั้มน้ำเฉลี่ย 1.35 ตัว มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 2,430 W/h ระบายความร้อน (แบบสปริงเกอร์) ใช้อัตราเฉลี่ย 1.35 ตัว มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 2,430 W/h และระบบผสมอาหารเสริมเฉลี่ย 2,200 W/h ฟาร์มเปิดไข่ขนาดใหญ่ พบว่าระบบแสงสว่างใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์เฉลี่ย 11 หลอด มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 396 W/h ระบบน้ำใช้ปั้มน้ำเฉลี่ย 2 ตัว มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 3,600 W/h ระบายความร้อน (แบบสปริงเกอร์) มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 1,800 W/h และระบบผสมอาหารเสริมเฉลี่ย 2,900 W/h

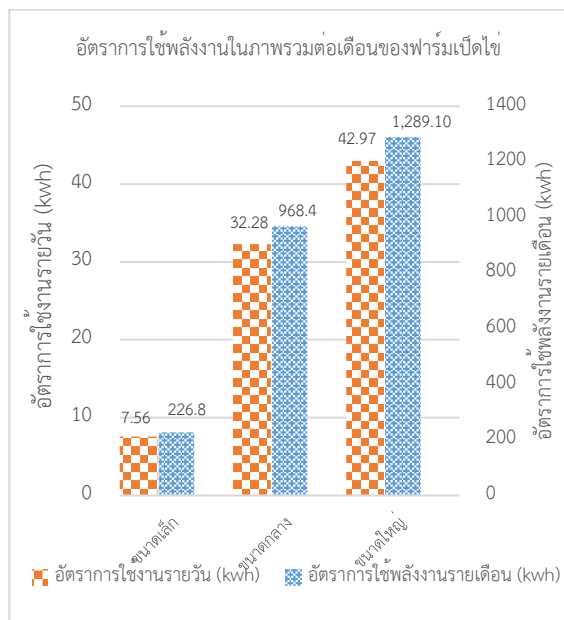
ตารางที่ 1 อุปกรณ์และอัตราการใช้ไฟเฉลี่ยของแต่ละอุปกรณ์ในฟาร์มเปิดไข่

ฟาร์ม	พลังงานการใช้ไฟฟ้าในแต่ละระบบ							
	ระบบแสงสว่าง		ระบบน้ำ		ระบบระบายความร้อน		ระบบผสมอาหารเสริม	
	จำนวน	พลังงาน	จำนวนปั้ม	พลังงาน	จำนวน	พลังงาน	จำนวน	พลังงาน
	หลอดไฟ	ต่อ 1 หลอด (W)	น้ำ	ต่อปั้มน้ำ 1ตัว (W)	มอเตอร์	ต่อมอเตอร์ 1ตัว (W)	มอเตอร์	ต่อมอเตอร์ 1ตัว (W)
ขนาดเล็ก	5	36	1	1,800	-	-	-	-
ขนาดกลาง	8.3	36	1.35	1,800	1.35	1,800	1	2,200
ขนาดใหญ่	11	36	2	1,800	1.4	1,800	1	2,900

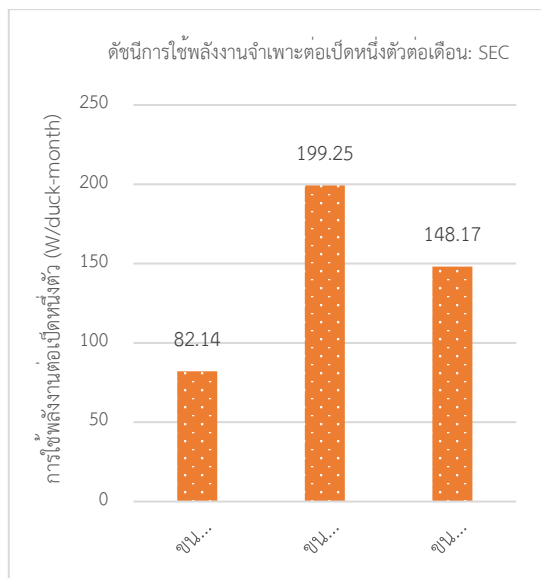
4.1.1 อัตราการใช้พลังงานในภาพรวมของฟาร์มเปิดไข่แต่ละขนาด

จากผลการสำรวจและเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่ดังแสดงในตารางที่ 1 สามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อเดือนและต่อวันของฟาร์มเปิดแต่ละขนาดและดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption: SEC) โดยแบ่งตามขนาดฟาร์มต่างๆได้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5

อัตราการใช้พลังงานในภาพรวมต่อเดือนและต่อวันของฟาร์มเปิดไข่ที่มีขนาดแตกต่างกันจะมีการใช้พลังงานในภาพรวมที่แตกต่างกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4) ซึ่งฟาร์มเปิดไข่ขนาดที่ใหญ่ขึ้นจะมีอัตราการใช้พลังงานในภาพรวมเพิ่มขึ้น โดยฟาร์มเปิดไข่ขนาดเล็กมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 226.8 kWh/month ฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 968.4 kWh/month และฟาร์มเปิดไข่ขนาดใหญ่มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 1,289.1 kWh/month



รูปที่ 4 อัตราการใช้พลังงานในภาพรวมต่อเดือนของฟาร์มเปิดไข่



รูปที่ 5 ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะต่อเปิดหนึ่งตัว

ดัชนีการใช้พลังงานต่อเดือนของเปิดหนึ่งตัว (Specific energy consumption: SEC) ของฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีดัชนีการใช้พลังงานในภาพรวมของเปิด 1 ตัวสูงที่สุดตัว ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยฟาร์มเปิดไข่ขนาดเล็กมีดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาพรวมของเปิด 1 ตัวเฉลี่ย 82.14 W/month ฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาพรวมของเปิด 1 ตัวเฉลี่ย 199.25 W/month และฟาร์มเปิดไข่ขนาดใหญ่มีดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาพรวมของเปิด 1 ตัวเฉลี่ย 148.17 W/month โดยฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะสูงที่สุดเนื่องจากฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีอุปกรณ์และระบบต่าง ๆ เพิ่มขึ้นมาในฟาร์มเปิดไข่ เช่นการใช้แสงสว่างที่เพิ่มขึ้น และการระบายความร้อนหรืออุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นมาในโรงเรือนเพื่อป้องกันไม่ให้เปิดเครียดจากความร้อน โดยฟาร์มเปิดไข่ขนาด 3,001 ตัวขึ้นไปจะมีข้อกำหนดมาตรฐานการทำฟาร์มเปิดไข่ของสมาคมเปิดไข่ เพื่อที่ฟาร์มเปิดไข่จะได้มีมาตรฐานไข่เปิดที่จะส่งออกไปขายในประเทศและนอกประเทศได้

4.2 ผลการศึกษาแนวทางการอนุรักษ์พลังงานในฟาร์มเปิดไข่

จากการศึกษาและสำรวจฟาร์มเปิดไข่ในเขตพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม จำนวน 40 ฟาร์ม พบว่าฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมีจำนวนมากที่สุด โดยฟาร์มเปิดไข่ขนาดเล็กมีจำนวน 15 ฟาร์ม ฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางจำนวน 20 ฟาร์ม และฟาร์มเปิดไข่ขนาดใหญ่จำนวน 5 ฟาร์ม จึงนำข้อมูลการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลางมาศึกษาและกำหนดแนวทางการอนุรักษ์พลังงานในฟาร์มเปิดไข่เป็นกรณีศึกษา โดยกำหนดแนวทางการอนุรักษ์พลังงาน 2 แนวทาง ได้แก่ การใช้หลอดแอลอีดีแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ และการติดตั้งโซล่าเซลล์ On Grid ร่วมกับการใช้หลอดแอลอีดี โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดแอลอีดี

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนหลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 36W เป็นหลอดแอลอีดี T8 20W ที่มีค่าความสว่างของหลอดไฟเท่ากันที่ 2,100 ลูเมน โดยข้อมูลการวิเคราะห์การใช้พลังงานเฉลี่ยต่อวันและต่อปี ระยะเวลาคืนทุน และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเปลี่ยนไปใช้หลอดแอลอีดี T8 แสดงในตารางที่ 2 (หลอดไฟแอลอีดี T8 20 W มีราคาเฉลี่ยจากการสำรวจตลาดในเดือนมิถุนายน พ.ศ.2565 ราคาหลอดละ 160 บาท)

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในฟาร์มเปิดไข่ขนาดกลาง ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า การใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 36W มีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 1,308.74 kWh/year และการใช้หลอด

แอลอีดี T8 20W มีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 727.08 kWh/year ดังนั้นฟาร์มเปิดไข่ที่เปลี่ยนจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดแอลอีดีสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 581.66 kWh/year หรือลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้เท่ากับ 44% โดยการเปลี่ยนหลอดแอลอีดีเพื่อใช้ทดแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์มีระยะเวลาดำเนินการ 6 เดือน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 303.68 kg CO₂e/kWh/year

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อติดตั้งโซล่าเซลล์ระบบ On Grid ร่วมกับหลอดชนิดแอลอีดี

การนำหลอดชนิดแอลอีดี T8 20W มาใช้แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 36W ร่วมกับการติดตั้งโซล่าเซลล์ระบบ On Grid ขนาด 4.95 kW ซึ่งเป็นขนาดที่ครอบคลุมการใช้พลังงานไฟฟ้าของฟาร์มเปิดขนาดกลางในช่วงเวลากลางวัน โดยชุดโซล่าเซลล์ระบบ On Grid ขนาด 4.95 kW ที่ติดตั้งด้วยตนเอง มีราคาเฉลี่ยเท่ากับ 130,000 บาท และราคาสำหรับชุดโซล่าเซลล์พร้อมติดตั้งเท่ากับ 220,000 บาท โดยราคาทั้งสองรายการดังกล่าวรวมค่าใช้จ่ายในการยื่นขออนุญาตจากการไฟฟ้า และเป็นราคาเฉลี่ยจากการสำรวจในตลาดวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ.2565 จากร้านค้าจำนวน 3 ร้าน มีผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3 โดยฟาร์มเปิดไข่ที่ติดตั้งโซล่าเซลล์ระบบ On Grid ร่วมกับหลอดชนิดแอลอีดี สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ 7,227 kWh/year มีระยะเวลาดำเนินการ 5 ปี สำหรับชุดโซล่าเซลล์ติดตั้งด้วยตนเอง และ 8 ปี 4 เดือน หรือ 8.3 ปี สำหรับชุดโซล่าเซลล์ที่ติดตั้งโดยบริษัท โดยการติดตั้งโซล่าเซลล์จะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3,773.21 kg CO₂e/kWh/year

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 36W เป็นหลอดแอลอีดี T8 20W

	จำนวน หลอดไฟ	กำลังไฟของ หลอดไฟ 1 ดวง (W)	เวลาใช้งาน เฉลี่ยต่อวัน (h)	การใช้พลังงาน เฉลี่ยต่อวัน (kWh)	การใช้พลังงาน เฉลี่ยต่อปี (kWh/year)
หลอดฟลูออเรสเซนต์ (ของเดิม)	8.3	36	12	3.5856	1,308.74
หลอดแอลอีดี (ของใหม่)	8.3	20	12	1.992	727.08
ระยะเวลาคืนทุน				6 เดือน	
ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก				303.68 kg CO ₂ e/kWh/year	

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อติดตั้งโซลาร์เซลล์ระบบ On Grid 4.95 kW ร่วมกับหลอดชนิดแอลอีดี T8 20W

	การใช้พลังงานรายวัน (kW)	การใช้พลังงาน รายเดือน (kWh/month)	การใช้พลังงานต่อปี (kWh/year)
ก่อนการติดตั้ง	30.692	920.76	11,202.58
หลังการติดตั้ง	10.892	326.76	3,975.58
ระยะเวลาคืนทุน (ชุดโซลาร์เซลล์ติดตั้งด้วยตนเอง)			5 ปี
ระยะเวลาคืนทุน (บริษัทรับติดตั้งโซลาร์เซลล์)			8 ปี 4 เดือน หรือ 8.3 ปี
ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก			3,773.21 kg CO ₂ e/kWh/year

5. สรุป

ในการศึกษาแนวทางการอนุรักษ์พลังงานในฟาร์มเปิดจากนั้นได้ทำการศึกษาค่าการใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่มุกเพื่อดำเนินการนำข้อมูลการใช้พลังงานมาศึกษาแนวทางการอนุรักษ์การใช้พลังงานและวิเคราะห์ข้อมูลระยะเวลาคืนทุนในฟาร์มเปิดไข่มุก สามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

จากศึกษาการใช้พลังงานในฟาร์มเปิด พบว่า ฟาร์มเปิดขนาดเล็กจำนวนตัวเปิดเฉลี่ย 2,761 ตัว มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 226.5 kWh/month มีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ 82.14 W/month/duck ฟาร์มเปิดขนาดกลางจำนวนตัวเปิดเฉลี่ย 4,860 ตัว มีอัตราการการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 968.4 kWh/month มีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ 199.25 W/month/duck และฟาร์มเปิดขนาดใหญ่จำนวนตัวเปิดเฉลี่ย 8,700 ตัว มีอัตราการ

ใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 1,289.1 kWh/month มีดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ 148.17 W/month/duck ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Ullah [13] ทำการศึกษา SEC ของข้าว 1 kg ที่แบ่งขนาดฟาร์มข้าวเป็น 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดใหญ่ ขนาดกลาง ขนาดเล็ก พบว่า ฟาร์มเล็กใช้พลังงานน้อยสุด เนื่องจากมีอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานน้อย และสอดคล้องกับ S. Posawee and P.Thanapat [10] ที่ศึกษาการใช้พลังงานของอาคารที่แตกต่างกัน พบว่าอาคารที่แตกต่างกันมีการใช้พลังงานต่อบุคคล (SEC) ที่แตกต่างกันในแต่ละอาคารมากจากการที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละอาคาร ซึ่งฟาร์มเปิดไข่มุกแต่ละขนาดมีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่เหมือนกัน โดยจะมีข้อกำหนดมาตรฐานการทำฟาร์มเปิดไข่มุกตามแต่ละขนาด

ในการหาแนวทางการอนุรักษ์การใช้พลังงานในฟาร์มเปิดไข่มุกขนาดกลาง ด้วยการเปลี่ยนหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็น

หลอดแอลอีดี โดยใช้หลอดแอลอีดี T8 20W แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 36W พบว่าการใช้หลอดแอลอีดี T8 20W ที่ใช้พลังงานน้อยกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 36W ทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ 581.66 kWh/year คิดเป็นการใช้พลังงานลดลง 44% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Suda, N. Sangwat, D. Adoonsook, and J. Duanwongsa [14] ที่ทำการศึกษาแนวทางการลดต้นทุนการจัดการฟาร์มสัตว์น้ำขนาดเล็ก โดยการทดแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วยหลอดชนิดแอลอีดี สามารถลดต้นทุนการจัดการฟาร์มในส่วนการใช้แสงสว่างได้ราว 50 % โดยการเปลี่ยนหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดแอลอีดีมีระยะเวลาคืนทุน 6 เดือน สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 303.68 kg CO₂e/kWh/year

ในด้านการใช้โซลาร์เซลล์ระบบ On Grid ขนาด 4.95 kW ร่วมกับหลอดชนิดแอลอีดี T8 20W สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยได้เท่ากับ 7,227 kWh/year โดยการเลือกใช้โซลาร์เซลล์ระบบ On Grid 4.95 kW สามารถผลิตไฟฟ้าได้ครอบคลุมการใช้พลังงานของฟาร์มเปิดขนาดกลางที่มีการใช้พลังงานในช่วงเวลากลางวันมาก สอดคล้องกับ W. Chansela and V. Inkarojit [15] ที่ทำการศึกษาการประเมินความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาอาคารประเภทสนามกีฬาในร่ม: กรณีศึกษาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่า อาคารสนามกีฬาในร่มที่มีการใช้งานมากในช่วงเวลากลางวันเหมาะสมการลงทุนติดตั้งโซลาร์เซลล์ระบบ On Grid มากที่สุด ซึ่งฟาร์มเปิดขนาดกลางมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวันมากกว่ากลางคืน ซึ่งการติดตั้งโซลาร์เซลล์ระบบ On Grid มีระยะเวลาคืนทุน 5 ปี หรือ 8.3 ปี ขึ้นกับค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ซึ่งระยะเวลาคืนทุนที่นานถึง 8.3 ปี เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่สูง โดยการติดตั้งโซลาร์เซลล์ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3,773.21 kg CO₂e/kWh/year

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Livestock Development, Ministry of Agriculture and Cooperative, *The Duck Raising Manual*, 1st ed. Bangkok: The Agriculture and Cooperative Federation of Thailand Printery, 2016.
- [2] W. Tunterak, D. Prakairungnamthip, P. Nivilai, S. Tiawsirisup, K. Oraveerakul, J. Sasipreeyajan, A. Amonsin, and A. Thontiravon, "Patterns of duck Tembusu virus infection in ducks, Thailand: a serological study," *Poultry Science*, vol. 100, no. 2, pp. 537–542, 2021.
- [3] S.Y. Lee, I.B. Lee, R.W. Kim, U.H. Yeo, J.G. Kim, and K. S. Kwon, "Dynamic energy modelling for analysis of the thermal and hygroscopic environment in a mechanically ventilated duck house," *Biosystems Engineering*, vol. 200, pp. 431–449, 2020.
- [4] D. Katzin, L. F. M. Marcelis, and S. van Mourik, "Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting," *Applied Energy*, vol. 281, pp. 1-14, 2021.
- [5] M. Golušin, S. Dodić, and S. Popov, "Sustainable Energy Development Monitoring," *Sustainable Energy Management*, 1st ed, Massachusetts: Elsevier, 2013, ch.8, pp. 335–362.
- [6] Y. Sriudom, A.Tewate, S. Sapsa, and N. Pratumchai, "An Experimental Study of Solar Panel Efficiency with Water Cooling," *RMUTP Research Journal Science & Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 1-13, 2021.

- [7] A. Tewate, and Y.Sriudom, “An Experimental Study on Increasing Efficiency of Solar Cell Modules by Flat Heat Pipe Cooling,” *RMUTP Research Journal Science & Technology*, vol.12, no.2, pp. 83-94, 2018.
- [8] P. Kerdlarp. “Efficiency Enhancement of Solar Panels Using Water Recirculation System Automatic,” *EAU Heritage Journal Science and Technology*, vol. 12, no.1, pp. 136-148, 2018.
- [9] Agriculture Land Reform Office. (2022, September 28). Solar Cell for Agriculture Handbook: Villager Edition. [Online]. Available: https://alro.go.th/uploads/org/land_ref_area/download/article/article_20200915120128.pdf
- [10] S. Posawee, T. Promwattanapakdee, “Specific Energy Consumption Analysis in Lecture Building Sripatum University,” in Proceeding of 10th National Sripatum University Conference (SPUCON), Sripautum University, Bangkok, Thailand, 2015, pp. 1137-1145.
- [11] *Energy Conservation in Electrical System*. Ministry of Energy., Bangkok, Thailand, 2020.
- [12] Thailand Greenhouse Gas Management Organization. (2022, September 28). Local Performance Assessment: The amount of Greenhouse Gas Inventory Report. [Online]. Available: http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/Article/2018/GHG_LPA.pdf
- [13] A. Ullah, “A COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY USE PATTERNS IN SMALL AND LARGE SCALE IRRIGATED RICE FARMING SYSTEMS: A CASE STUDY IN AYUTTHAYA PROVINCE IN THE CENTRAL REGION OF THAILAND,” M. S Thesis, School of Environment, AIT., Phathumthani, Thailand, 2009.
- [14] C. Suda, N. Sangwat, D. Adoonsook, and J. Duanwongsa, “Guidelines for reducing the electricity cost of managing small-scale aquatic farm by replacing the fluorescent with LED,” *Khon Kean Agriculture Journal*, vol. 49, no. suppl. 1, pp. 172-178, 2021.
- [15] W. Chansela, and V. Inkarojit, “Feasibility assessment of solar rooftop system for gymnasium: case study of Chulalongkorn University,” *Journal of Environmental Design*, vol. 7, no.2, pp.1-25, 2020.

ผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็ว

ศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพัฒน์ พันธุ์ วัฒนพล เรืองทรัพย์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 15 ธันวาคม 2565 แก้ไขบทความ 9 เมษายน 2566 ตอรับบทความ 10 พฤษภาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็ว ในงานนี้ข้อมูลที่น่าสนใจได้มาจากการตรวจวัดค่าที่ส่งผลโดยตรงต่อระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ด้านอินพุตของสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ค่าที่ทำการตรวจวัดได้แก่ ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย ค่ากระแสรากกำลังสองเฉลี่ย ค่าความถี่แรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าความถี่กระแสฮาร์มอนิกรวม ในการเก็บข้อมูลจะทำการตั้งแต่วงจรอัดประจุ ขณะเริ่มอัดประจุไปจนกระทั่งแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีประจุเต็ม โดยยานยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นรถมินิบัสขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขนาด 120 กิโลวัตต์-ชั่วโมง สถานีอัดประจุที่ทดสอบเป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเช่นกัน โดยมีแรงดันด้านอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 400 โวลต์ แรงดันด้านเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 250 ถึง 750 โวลต์ และหัวปลั๊กที่ใช้อัดประจุเป็นแบบ CCS-Type 2 เมื่อได้ข้อมูลแล้วจึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้ทราบว่าขณะใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็วจะเกิดผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามด้านหลัก ๆ นั่นคือ ผลกระทบด้านแรงดัน ผลกระทบด้านการเกิดฮาร์มอนิก และผลกระทบด้านความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ: คุณภาพกำลังไฟฟ้า; สถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า; ความถี่ของฮาร์มอนิก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 1353 6426, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nattachote.r@rmutp.ac.th

Impact on Power Quality When Using Fast Charge Type of Battery Charging Station for Electric Vehicles

Sakhon Woothipatanapan Natchapol Ruangsap and
Nattachote Rugthaicharoencheep*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok, 10800

Received 15 December 2022; Revised 9 April 2023; Accepted 10 May 2023

Abstract

This article presents the impact on power system when operating fast charge type of battery charging stations for electric vehicles. In this work, the data analyzed were obtained from measurements that directly affect the three-phase power system at the input side of the electric vehicle battery charging station. The measured values were root mean square voltage (V_{rms}), root mean square current (I_{rms}), the total harmonic distortion of voltage (% THD_V), and the total harmonic distortion of current (% THD_I). To store data will be done since it has not been charged, while starting to charge until the electric vehicle battery is fully charged. The vehicles used for testing belong to the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), which is an electric powered minibus that uses a 120 kW-h lithium-ion battery. The charging station used for testing also belongs to the Electricity Generating Authority of Thailand, the input voltage is AC 400 V, the output voltage is DC 250 to 750 V, and the plug used for charging is a CCS-Type type 2. Once the data is complete, those data are then used to create a graph to analyze the impact on power system. The results of the data analysis revealed that while operating fast charge type of battery charging station for electric vehicles, there are three main effects on power quality of the power system: voltage effect, harmonic effect and the impact on unbalance of power system.

Keywords : Power System; Electric Vehicle Charging Station; Harmonic Distortion

* *Corresponding Author. Tel.: +666 1353 6426, E-mail Address: nattachote.r@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ถูกนำขึ้นมาเป็นประเด็นสำคัญต่อการดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจในเวทีโลก และหลายประเทศให้การตอบรับที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยต่างเห็นพ้องว่าภาคขนส่งเป็นหนึ่งในตัวการของปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะมลภาวะที่ปลดปล่อยจากรถยนต์ที่วิ่งบนท้องถนน จึงนำมาสู่การส่งเสริมการใช้นยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ทดแทนยานยนต์พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล [1] โดยขณะนี้ทั่วโลกเริ่มมีแนวโน้มใช้นยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นทุกปี ในอนาคตคาดว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะเข้ามาแทนการใช้นยานยนต์พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลในอัตราส่วนที่มากขึ้น

การใช้นยานยนต์ไฟฟ้าที่คาดว่าจะมีแนวโน้มสูงมากขึ้นในอนาคตนั้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าต้องการการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ด้วยกำลังไฟฟ้าที่สูง [2] ส่วนสำคัญซึ่งทำหน้าที่ดังกล่าวคือ สถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (EV Charging Station) โดยภายในก็คือเครื่องอัดประจุไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าด้านอินพุตให้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้านเอาต์พุตอย่างเหมาะสมเพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ จากนั้นแบตเตอรี่จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์และวงจรไฟฟ้าอื่น ๆ ภายในยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป ซึ่งเครื่องอัดประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) ที่มีคุณสมบัติทางพลวัตต่างจากโหลดทั่วไป ดังนั้นการอัดประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าปริมาณมากโดยที่ไม่มีการควบคุมการอัดประจุไฟฟ้าจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ ผลกระทบหลักที่ผู้ดูแลระบบหรือการไฟฟ้าต้องประสบได้แก่ การเกิดภาระเกิน (Overload) การเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss), การเกิดแรงดันตก (Voltage Drop) การเกิดภาระไม่สมดุล (Unbalance Load) และการเกิดฮาร์มอนิก (Harmonic) [3] รวมทั้งอาจมี

ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงเกิดขัดข้อง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือคอมพิวเตอร์ถูกรบกวนจนเกิดความเสียหายได้

ปัญหาดังกล่าวข้างต้นนั้นเกิดในช่วงที่สถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าทำการอัดประจุนั่นเอง การอัดประจุจะแบ่งออกเป็นสองชนิดหลัก ๆ คือ การอัดประจุนิตปกติ และการอัดประจุนิตเร็ว แต่การอัดประจุนิตเร็วมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูง [4] จึงส่งผลกระทบมากกว่าการอัดประจุนิตปกติ

ในปี ค.ศ. 2016 [5] มีการประเมินการวัดคุณภาพกำลังไฟฟ้าของสถานีชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าในไต้หวัน โดยใช้ระบบตรวจสอบระยะไกล สถานีชาร์จที่ศึกษามีเสาชาร์จ 11 เสา รวมถึงเสาชาร์จแบบเร็ว 2 เสา และเสาชาร์จแบบช้า 9 เสา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าด้วยวิธีการที่เสนอนี้ สามารถตรวจสอบและประเมินคุณภาพกำลังไฟฟ้าของสถานีชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปี ค.ศ. 2017 [6] มีการวิเคราะห์หลักการทำงาน โครงสร้างทางไฟฟ้าของเครื่องชาร์จประจุแบบเร็ว และวัดค่าฮาร์มอนิกของเครื่องชาร์จประจุแบบเร็วแบบต่าง ๆ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสฮาร์มอนิกกับรถยนต์ไฟฟ้า และเครื่องชาร์จประจุแบบเร็ว กำหนดขอบเขตของประสิทธิภาพ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง จากนั้นประเมินอิทธิพลของสถานีชาร์จประจุแบบเร็วของกริด ในปี ค.ศ. 2018 [7] มีการศึกษาโหลดโปรไฟล์ และผลกระทบฮาร์มอนิกของสถานีชาร์จต่อแรงดันไฟฟ้าปานกลางในระบบจำหน่าย วัดอุปสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าและความแปรผันของโปรไฟล์ฮาร์มอนิกของสถานีชาร์จ โดยใช้การจำลองเครือข่ายเชิงใหม่ (ประเทศไทย) 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้ DigSILENT Power Factory เป็นเครื่องมือจำลอง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 9 ถึง 10 นาฬิกา

ในปี ค.ศ. 2021 [8] มีการศึกษาผลการตรวจวัดของเครื่องชาร์จที่แตกต่างกัน 20 แบบ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องชาร์จแบบเร็ว ซึ่งได้รับในประเทศจีนและในเยอรมนี มุ่งเน้นไปที่ทั้งการปล่อยฮาร์มอนิก รวมถึงการประเมินเทียบกับขีดจำกัดที่เกี่ยวข้อง และการปล่อยซูเปอร์ฮาร์มอนิกในช่วงความถี่ระหว่าง 10 kHz ถึง 50 kHz เครื่องชาร์จของทั้งสองประเทศจึงถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ในปี ค.ศ. 2022 [9] มีการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าสำหรับการประกอบธุรกิจในภาคเอกชน ทดสอบวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของตัวอย่างระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วหลายมาตรฐาน รวมถึงค่าปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ๆ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าก่อนเข้าเครื่องอัดประจุแบบ 3 เฟส ค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าแบบ 3 เฟส ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า ค่า %SOC ของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (THDV) ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (THDi) ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า ค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ เป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้า โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟสของระบบเท่ากับ 395.25 โวลต์ หรือค่าเฉลี่ยต่อเฟสเท่ากับ 228.2 โวลต์ ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.16% ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.51% ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 50.03 เฮิรตซ์ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของเครื่องอัดประจุเท่ากับ 0.99

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดประจุเร็ว โดยเก็บข้อมูลด้านอินพุตของสถานีประจุแบตเตอรี่ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ข้อมูลที่ทำการตรวจวัด คือ ค่าแรงดันรากกำลัง

สองเฉลี่ย ค่ากระแสรากกำลังสองเฉลี่ย ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม ซึ่งจะตรวจวัดตั้งแต่ยังไม่อัดประจุ ขณะเริ่มอัดประจุ ไปจนกระทั่งแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีประจุเต็ม เมื่อได้ข้อมูลครบแล้วจึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ทดสอบต่อไป

ก่อนจะทำการตรวจวัดค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็ว จำเป็นต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยมีสามหัวข้อที่สำคัญ คือ ยานยนต์ไฟฟ้า สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า และคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำเสนอในช่วงต้นของหัวข้อที่ 2 ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นแรกนำเสนอข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งมีสามหัวข้อหลัก คือ ยานยนต์ไฟฟ้า สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า และคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า จากนั้นนำเสนอวิธีการวิจัยโดยแสดงวิธีการตรวจวัดเพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด รายละเอียดของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ และรายละเอียดของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

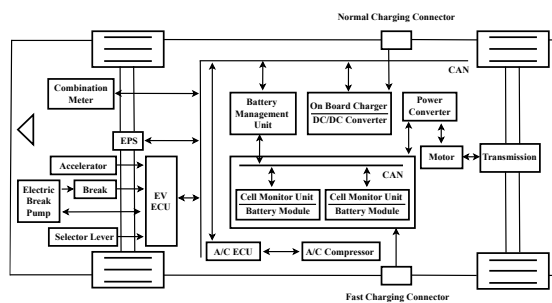
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า หมายถึง ยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หรือยานยนต์ที่อาศัยเครื่องยนต์มาใช้ร่วมกับมอเตอร์ทั้งในส่วนของการทำงานของขับเคลื่อนและผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อเก็บสะสมใน

แบตเตอรี่ หรือการอัดประจุไฟฟ้าจากภายนอก หรือการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง [10]

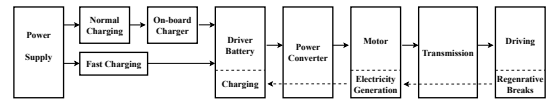
ยานยนต์ไฟฟ้ามีการใช้แบตเตอรี่เพื่อเก็บ และส่งพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์โดยผ่านวงจรตัวแปลงกำลังไฟฟ้า (Power Converter) ซึ่งส่งพลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสมให้กับมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนล้อของยานยนต์ไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ [11] โดยองค์ประกอบเบื้องต้นของยานยนต์ไฟฟ้าได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบเบื้องต้นของยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้าส่วนมากในปัจจุบัน เช่น ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบดังรูปที่ 1 สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้สองรูปแบบ รูปแบบแรก คือ การอัดประจุชนิดปกติผ่านหัวแบบอัดประจุปกติ (Normal Charging Connector) ซึ่งจะรับไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและปรับให้มีค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมด้วยวงจรอัดประจุภายในยานยนต์ไฟฟ้า (On-board Charger and DC/DC Converter) เพื่อทำการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ รูปแบบที่สอง คือ การอัดประจุชนิดเร็วผ่านหัวต่อแบบอัดประจุเร็ว ซึ่งสามารถอัดประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ได้โดยตรงจากรูปแบบการอัดประจุทั้งสองรูปแบบดังกล่าวจะสอดคล้องกับไดอะแกรมในรูปที่ 2 ที่แสดงถึงกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่เพื่อนำพลังงานไปขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้ารวมทั้งการคืนพลังงานกลับสู่แบตเตอรี่ หรืออาจเรียกโดยย่อว่า

กระบวนการอัดประจุไปสู่การขับเคลื่อน (Charging to Driving Process)



รูปที่ 2 กระบวนการอัดประจุไปสู่การขับเคลื่อน

2.1.2 สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า

ปัจจุบันรูปแบบการใช้งานสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็นสามรูปแบบ คือ การอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สาย สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สายเป็นรูปแบบการอัดประจุหลักที่ทั่วโลกเลือกใช้เพราะมีความคุ้มค่าในการลงทุน มีประสิทธิภาพสูง และสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการจัดการพลังงานได้ โดยสามารถจำแนกการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สายตามระดับกำลังไฟฟ้าที่ใช้เป็นสองชนิด คือ การอัดประจุชนิดปกติ และการอัดประจุชนิดเร็ว

2.1.2.1 การอัดประจุชนิดปกติ

การอัดประจุชนิดปกติ (Normal Charging) เป็นอัดประจุด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Charging) โดยทั่วไปมักจะใช้ประเภทกล่องติดตั้งที่ติดตั้งตามบ้านหรือห้างสรรพสินค้า เพราะการอัดประจุด้วยตู้อัดประจุแบบกล่องติดตั้งสามารถอัดประจุได้รวดเร็วกว่าการต่อจากเต้ารับภายในบ้านโดยตรง ซึ่งอาจใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 4 ถึง 7 ชั่วโมง หรืออาจถึง 9 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุและความจุพลังงานของแบตเตอรี่ โดยเวลาในการอัดประจุสามารถหาได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

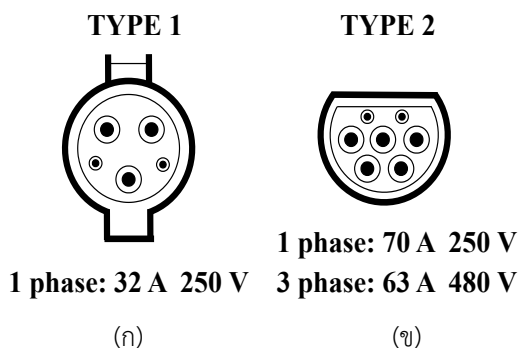
$$t_{charge} = \frac{C_{batt}}{P_{batt}} \quad (1)$$

โดยที่	t_{charge}	คือ เวลาในการอัดประจุ (ชั่วโมง: h)
	C_{batt}	คือ ความจุพลังงานขอ แบตเตอรี่ (กิโลวัตต์- ชั่วโมง: kW-h)
	P_{batt}	คือ กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัด ประจุ (กิโลวัตต์: kW)

หัวอัดประจุชนิดปกติแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ Type 1 และ Type 2

- Type 1 ได้แสดงในรูปที่ 3 (ก) เป็นหัวอัดประจุที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น
- Type 2 ได้แสดงในรูปที่ 3 (ข) เป็นหัวอัดประจุที่นิยมใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศแถบยุโรป

สำหรับการติดตั้งตู้อัดประจุแบบติดผนัง เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าของบ้านที่ติดตั้งต้องสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าขั้นต่ำที่ 30 (100) A



รูปที่ 3 หัวอัดประจุชนิดปกติ [12]

2.1.2.2 การอัดประจุชนิดเร็ว

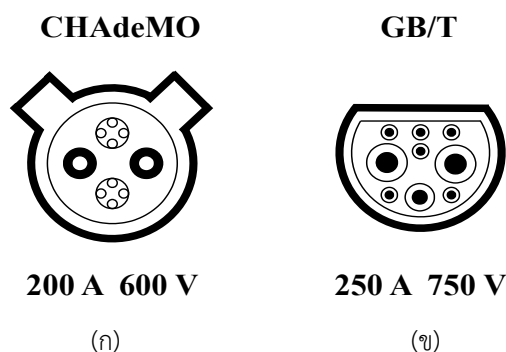
การอัดประจุชนิดเร็ว (Fast Charging) เป็นการอัดประจุอย่างรวดเร็วด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC Charging) สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าจาก 0 ถึง 80% ได้ในเวลาประมาณ 40 ถึง 60 นาที (ขึ้นอยู่กับความจุพลังงานแบตเตอรี่) สถานีอัดประจุชนิดนี้มักจะติดตั้งในสถานที่จำเพาะ เช่น สถานี

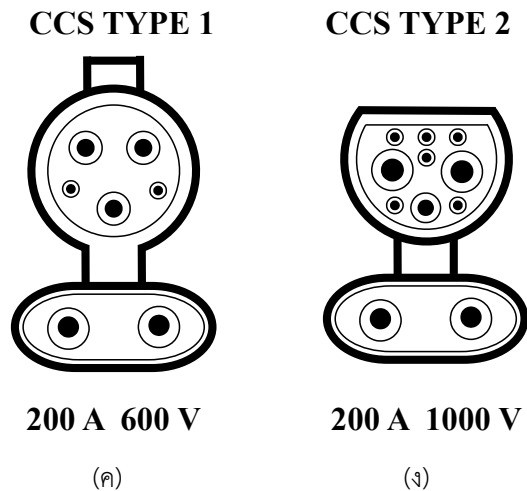
บริการน้ำมัน สาขาของการไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สถานีบริการรถยนต์ และที่จอดรถในห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมบางแห่ง การอัดประจุชนิดนี้เหมาะกับผู้ที่ต้องการความรวดเร็วในการอัดประจุ โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน หัวอัดประจุชนิดเร็วแบ่งออกเป็นสามประเภท คือ CHAdeMO, GB/T และ CCS

- CHAdeMO ย่อมาจาก "CHArge de MOve" อยู่ในมาตรฐาน IEC 62196-2 (Type 3) การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 62.5 กิโลวัตต์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ และพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด 125 A [9] มีการใช้แพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น หัวอัดประจุแบบนี้แสดงในรูปที่ 4 (ก)

- GB/T ได้แสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยหัวอัดประจุแบบนี้ประเทศจีนเป็นผู้พัฒนาขึ้นเพื่อตอบรับการใช้นยานยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในประเทศจีน

- CCS ย่อมาจาก Combined Charging System ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท คือ CCS TYPE 1 ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) ซึ่งเป็นหัวอัดประจุที่ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ลักษณะของหัวอัดประจุมีขนาดเล็ก รองรับแรงดันไฟฟ้าที่ 200 ถึง 500 V ส่วนหัวอัดประจุ CCS TYPE 2 ได้แสดงในรูปที่ 4 (ง) เป็นหัวอัดประจุที่นิยมใช้ในประเทศแถบทวีปยุโรป หัวอัดประจุประเภทนี้จะมีขนาดใหญ่กว่าและมีกำลังไฟฟ้ามักกว่า CCS Type 1





รูปที่ 4 หัวอัดประจุชนิดเร็ว [12]

2.1.3 คุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ ความเสถียรของระบบไฟฟ้าที่ได้รับจากผู้ให้บริการ [13] โดยนิยามคุณภาพไฟฟ้าจากผู้ให้บริการและผู้ใช้อาจจะแตกต่างกัน แต่ถ้าอ้างอิงตามคำจำกัดความของคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE ก็คือ ลักษณะของแรงดันและกระแสที่ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดปกติหรือเสียหาย [14]

โดยแรงดันและกระแสที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ ดังนี้

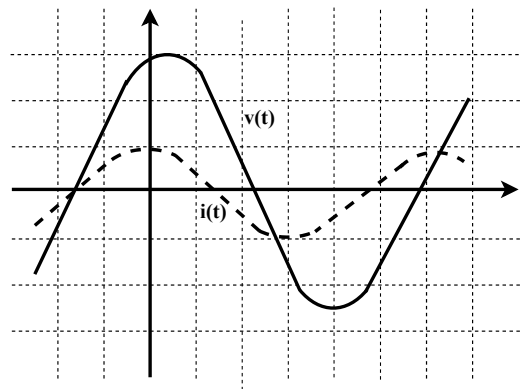
$$V_S(t) = \hat{V} \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

$$i_S(t) = \hat{I} \sin(\omega t + \beta_1) \quad (3)$$

โดยที่	$V_S(t)$	คือ แรงดันชั่วขณะ (โวลต์: V)
	$i_S(t)$	คือ กระแสชั่วขณะ (แอมแปร์: A)
	$\hat{V}$	คือ แรงดันค่ายอด (โวลต์: V)
	$\hat{I}$	คือ กระแสค่ายอด (แอมแปร์: A)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที: rad/sec)
	θ	คือ มุมแรงดัน (เรเดียน: rad)

β_1 คือ มุมกระแสที่ความถี่หลักมูล
(เรเดียน: rad)

จากสมการที่ (2) และ (3) เมื่อพิจารณาในช่วง 1 คาบเวลา สามารถนำมาพล็อตเป็นรูปคลื่นทั่วไปของแรงดันและกระแสในหนึ่งเฟสได้ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปคลื่นทั่วไปของแรงดันและกระแสในหนึ่งเฟส

2.1.3.1 เหตุการณ์เกี่ยวข้องกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า

1. สภาวะชั่วคราว (Transient) คือ ปรากฏการณ์ที่สัญญาณไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน แบ่งเป็นสองประเภท คือ

1.1 อิมพัลส์ชั่วคราว (Impulsive Transient) คือ แรงดันหรือกระแสที่มีค่าความชันสูงมากซึ่งเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดโดยความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง มีชั่วหรือทิศทางเดียว บางครั้งเรียกว่าเสิร์จ (Surge) สาเหตุมักเกิดจากฟ้าผ่าซึ่งอาจเกิดขึ้นที่บริเวณนั้นหรือบริเวณใกล้เคียง โดยมีผลทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันเกิน

1.2 ออสซิลเลทชั่วคราว (Oscillatory Transient) คือ แรงดันหรือกระแสที่มีค่าสูงซึ่งเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือรูปคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วระหว่างชั่วบวก และชั่วลบ สาเหตุเกิดจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ผลที่เกิดขึ้นอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายหรือฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าสูญเสียความเป็นฉนวนเร็วขึ้น

2. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย (Vrms) ที่มีระยะเวลาไม่เกิน 1 นาติ สาเหตุเนื่องจากสภาวะความผิดปกติทางไฟฟ้า (Fault) ซึ่งสามารถทำให้เกิดสองเหตุการณ์ คือ

2.1 แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage Sag) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีขนาดลดลง 0.1 ถึง 0.9 เพอร์ยูนิต (p.u.) ในช่วงเวลา 10 มิลลิวินาที (ms) ถึง 1 นาติ มักเกิดขึ้นกับเฟสที่เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า ซึ่งทำให้แรงดันลดลงเหลือ 0.2 เพอร์ยูนิตของแรงดันปกติ (80% sag) ภายใน 3 คาบการทำงาน มีสาเหตุจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์เหล่านี้ขณะสตาร์ทจะใช้กระแสสูง 6 ถึง 10 เท่า ของกระแสปกติ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงเกิดการ ทำงานผิดพลาดหรือหยุดทำงานได้

2.2 แรงดันเกินช่วงสั้น (Voltage Swell) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีขนาดเพิ่มขึ้น 1.1 ถึง 1.8 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลา 10 มิลลิวินาที ถึง 1 นาติ มักเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า สาเหตุเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบหรือเมื่อเชื่อมต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงเกิดการ ทำงานผิดพลาดหรือหยุดทำงานได้

3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีระยะเวลาเกิน 1 นาติ สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำให้เกิดสามเหตุการณ์ คือ

3.1 แรงดันตก (Under Voltage) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีค่าลดลงระหว่าง 0.8 ถึง 0.9 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลามากกว่า 1 นาติ เกิดจากการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบหรือปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายเนื่องจากเกิดการรับภาระเกิน

3.2 แรงดันเกิน (Over Voltage) คือ ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีขนาดเพิ่มขึ้น 1.1 ถึง 1.2 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลามากกว่า 1 นาติ เกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบหรือมีการต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบหรือการปรับแก้หม้อแปลงไม่เหมาะสมกับระบบ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน

3.3 ไฟดับ (Voltage Interruption) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเป็น 0 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลาเกิน 1 นาติ มีสาเหตุจากความผิดปกติทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าออกจากระบบอย่างถาวร ถ้าความผิดปกติทางไฟฟ้าในระบบยังคงอยู่ จะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ายังไม่สามารถทำงานได้

4. แรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance) คือ แรงดันในระบบสามเฟสมีขนาดแตกต่างกัน 0.5 ถึง 2% หรือมีมุมต่างกันไม่ใช่ 120 องศาไฟฟ้า ซึ่งมีผลทำให้กระแสโหลดในแต่ละเฟสไม่สมดุล เหตุการณ์นี้ทำให้มอเตอร์หรือหม้อแปลงร้อนเกินไปและทำให้อายุสั้นลง

5. ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform Distortion) คือ การเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้า สามารถอธิบายคุณลักษณะความผิดเพี้ยนรูปคลื่น โดยแยกเป็นองค์ประกอบทางความถี่ออกมาได้ห้าชนิด คือ

5.1 องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (DC Offset) คือ การที่มีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นผลจากการใช้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier) ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและกำลังสูญเสียที่หม้อแปลง รวมทั้งอาจทำให้เกิดการผุกร่อนของแท่งกรวดได้

5.2 ฮาร์โมนิก (Harmonic) ถูกกำหนดให้เป็นแรงดันและกระแสที่มีความถี่ที่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่มูลฐานที่สร้างขึ้น [15], [16] เช่น ระบบไฟฟ้ามีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ (Hz) ฮาร์โมนิกที่สามจะมีความถี่ 150 เฮิร์ตซ์ เมื่อฮาร์โมนิกรวมกับความถี่หลักมูล

ทั้งขนาด และมุมเฟส สัญญาณคลื่นไซน์ของระบบไฟฟ้าจะผิดเพี้ยนไปจากเดิม เหตุการณ์นี้เกิดจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ผลที่ได้รับคือจะทำให้อุปกรณ์ในระบบทำงานผิดปกติ [17] หากฮาร์โมนิกมีขนาดสูง อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ ตัวอย่างของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้แสดงในรูปที่ 6

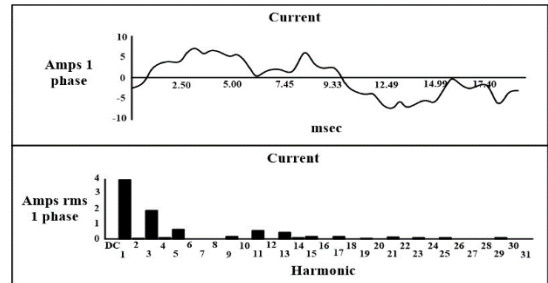
5.3 อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Inter Harmonic) คือ ส่วนประกอบในคลื่นไซน์ของสัญญาณคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็มของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่ 104 เฮิร์ตซ์ 134 เฮิร์ตซ์ หรือ 147 เฮิร์ตซ์ โดย ผลกระทบของอินเตอร์ฮาร์โมนิกเหมือนกับฮาร์โมนิก

5.4 คลื่นรอยบาก (Notching) คือ การรบกวนทางแรงดันไฟฟ้า ลักษณะคล้ายกับฮาร์โมนิก และสภาวะทรานเซียนท์ มีลักษณะต่อเนื่องเป็นผลที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้กระแสถูกเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง มีผลทำให้อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์เกิดการทำงานผิดพลาด

5.5 สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ ซึ่งมีความถี่ต่ำกว่า 200 กิโลเฮิร์ตซ์ปะปนมากับสัญญาณแรงดันหรือกระแสในสายเคเบิล โดยมีผลมาจากระบบไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ควบคุมที่มีการต่อสายดินไม่ถูกต้อง ซึ่งจะ ทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดหรือไม่ทำงาน

6. แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ยในช่วง 0.95 ถึง 1.05 เพอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากการใช้เตาหลอมชนิดอาร์ค หากแรงดันไฟฟ้าเกิดการกระเพื่อมมาก อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

7. การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variation) เป็นเหตุการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่เกิดความผิดพลาดหรือหลุดจากระบบไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้ ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับความถี่ของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 6 กระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า [17]

2.2 การตรวจวัดข้อมูล

2.2.1 ยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ

ยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ เป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าจะเป็นรถมินิบัสขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่มีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบมีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2 โดยภาพจริงของยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ข้อมูลของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
มิติ ยาวxกว้างxสูง	8.59 × 2.5 × 3.28 m
จำนวนที่นั่ง	20 ที่นั่ง
ความเร็วสูงสุดที่วิ่งได้	69 km/h
ตำแหน่งขับเคลื่อน	ล้อหลัง
ระยะทางที่วิ่งได้ต่อการประจุ 1 ครั้ง	> 100 km
กำลังสูงสุดของมอเตอร์	135 kW
แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์	2,100 N-m
ความจุพลังงานของแบตเตอรี่	120 kW-h
ชนิดของแบตเตอรี่	ลิเทียมไอออน (Li-ion)

ตารางที่ 2 ข้อมูลของสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
มิติ ยาวxกว้างxสูง	800×800×1800 mm
พิกัดสูงสุดด้านอินพุต	แรงดันไลน์-ไลน์: 400 ± 10% Vac กระแส: 135 A ประสิทธิภาพ: >95%
พิกัดด้านเอาต์พุต	แรงดัน: 250 – 750 Vdc กระแส: 0 – 120 A หัวอัดประจุ: CCS-Type 2



รูปที่ 7 ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

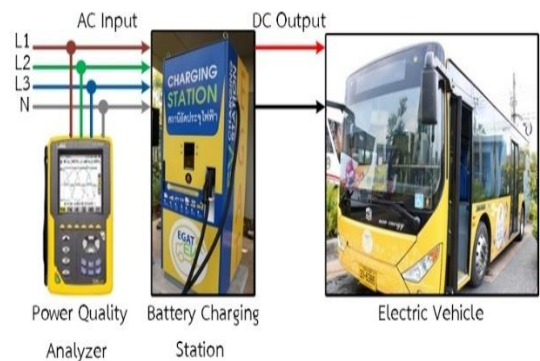


รูปที่ 8 สถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ

จากรูปที่ 8 สถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ DC Combo2 ขนาด 90 kW รองรับการอัดประจุไฟฟ้า รถปลั๊กไฟฟ้า/มินิบัสไฟฟ้าประเภทยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle: BEV ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 100%) ใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 2 ชั่วโมง และสามารถรองรับการอัดประจุไฟฟ้ารถ BEV ส่วนใหญ่ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยได้เช่น MG ZS EV, Hyundai Kona, BMW i3 เป็นต้น ใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 20 นาที

2.2.2 วิธีการวัดค่าและเก็บข้อมูล

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องจะอาศัยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality Analyzer) มาทำการวัดปริมาณทางไฟฟ้าด้านอินพุตของเครื่องอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยนำสายไฟของเครื่องวัดต่อเข้ากับช่อง L_1 L_2 L_3 และ N ของเครื่องวัด และนำปลายสายอีกด้านต่อเข้ากับสายไฟสามเฟสด้านอินพุตของเครื่องอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การวัดค่าเพื่อเก็บข้อมูล

ภายในของเครื่องอัดประจุจะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สายตัวนำ และอุปกรณ์สำหรับเพิ่มแรงดัน นอกจากนี้เครื่องอัดประจุยังต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงเพื่อลดระยะเวลาในการอัดประจุ จึงควรต้องเริ่มจากการศึกษาค่าที่มีผลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสร้างแรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์ออกมา แต่กระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบจะส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงได้ เช่น กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการลัดวงจร ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะหรือไฟฟ้าดับ ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เมื่อกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบจะทำให้รูปคลื่นแรงดันเกิดความผิดเพี้ยน ดังนั้นค่าที่จำเป็นในการตรวจวัด ได้แก่ ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย (V_{rms}) ค่ากระแสรากกำลังสองเฉลี่ย (I_{rms})

ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (% THD_V) และ
ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (% THD_I)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า
ซึ่งสามารถวัดแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย กระแสรบกวน
กำลังสองเฉลี่ย ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม และ
ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมได้โดยตรง จึงไม่
จำเป็นต้องใช้ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยมาคำนวณหา
ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ซึ่งทั่วไปแล้วหากอยาก
ทราบค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและค่าความ
เพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมจำเป็นต้องคำนวณหาจาก
สมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{1,rms}} \cdot (100) \quad (4)$$

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{1,rms}} \cdot (100) \quad (5)$$

โดยที่

%THD_V คือ ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม

%THD_I คือ ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม

V_{h,rms} คือ แรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
ฮาร์มอนิกอันดับใด ๆ (โวลต์: V)

I_{h,rms} คือ กระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
ฮาร์มอนิกอันดับใด ๆ (แอมแปร์: A)

V_{1,rms} คือ แรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
หลักมูล (โวลต์: V)

I_{1,rms} คือ กระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
หลักมูล (แอมแปร์: A)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในการตรวจวัด แรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย
กระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ย ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก
รวมและค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมนั้น จะทำ
อย่างต่อเนื่อง แต่มองเป็นสามช่วงที่สำคัญได้ คือ

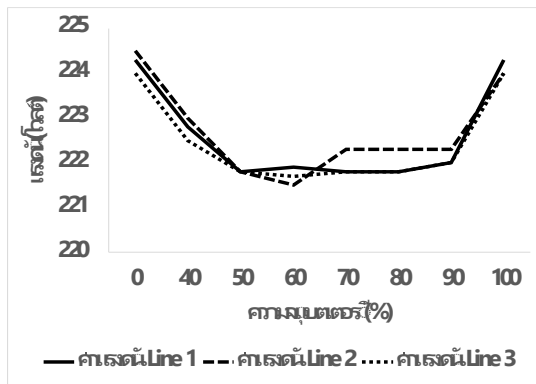
- ช่วงเวลาที่ยังไม่อัดประจุ
- ช่วงเวลาเริ่มอัดประจุ แบตเตอรี่ที่ทดสอบใช้ไน
ยานยนต์ไฟฟ้าของ กฟผ. ซึ่งใช้รับส่งพลังงานด้วย
ระยะทางและช่วงเวลาเดิมประจำ และต้องการให้
แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานนานที่สุด จึงพยายามอัดประจุ
ขณะที่ยังเหลือประจุอยู่พอสมควร ทำให้ขณะทดสอบ
ประจุในแบตเตอรี่มักจะมีค่าประมาณ 40เปอร์เซ็นต์
- ช่วงเวลาที่แบตเตอรี่เต็ม หรือความจุ 100 เปอร์เซ็นต์

3.1 ค่าแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ยที่วัดได้

จากการตรวจวัดค่าแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย
ทั้งสามเฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตาม
ช่วงเวลาที่กำหนด สามารถนำข้อมูลที่ได้อ่านบันทึกลงใน
ตารางที่ 3 โดยนำค่าจากตารางที่ 3 สร้างกราฟแสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทียบกับความจุแบตเตอรี่
ดังได้รูปที่ 10 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 10
สังเกตได้ว่าแรงดันทั้งสามเฟสจะลดลงเล็กน้อยจากค่า
แรงดันก่อนอัดประจุซึ่งแบตเตอรี่มีความจุ 40 ถึง 50
เปอร์เซ็นต์ และแรงดันจะค่อนข้างคงที่ไปจนแบตเตอรี่มี
ความจุ 90 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นแรงดันจะค่อย ๆ สูงขึ้น
ไปจนแบตเตอรี่ประจุเต็มหรือมีความจุ 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3 ค่าแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย

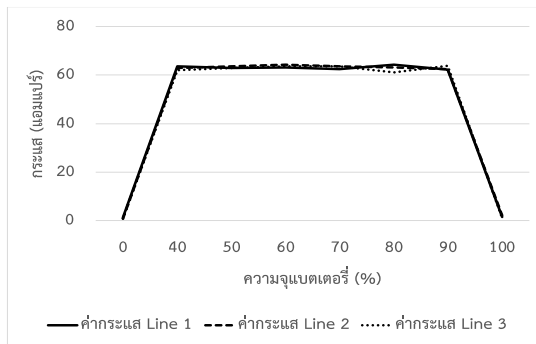
ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	แรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย ไลน์-นิวทรัล (โวลต์: V)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	224.3	224.5	224.0
40 (เริ่มประจุ)	3	222.8	223.0	222.5
50	15	221.8	221.8	221.8
60	29	221.9	221.5	221.7
70	43	221.8	222.3	221.8
80	57	221.8	222.3	221.8
90	71	223.9	223.9	223.6
100 (ประจุเต็ม)	80	224.3	224.0	224.0



รูปที่ 10 แรงดันเทียบกับความจุแบตเตอรี่

3.2 ค่ากระแสรกกำลังสองเฉลี่ยที่วัดได้

จากการตรวจวัดค่ากระแสรกกำลังสองเฉลี่ยทั้งสามเฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตามช่วงเวลาที่กำหนด สามารถนำข้อมูลที่ได้มาบันทึกลงในตารางที่ 4 โดยนำค่าจากตารางที่ 4 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเทียบกับความจุแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กระแสเทียบกับความจุแบตเตอรี่

ตารางที่ 4 ค่ากระแสรกกำลังสองเฉลี่ย

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	กระแสรกกำลังสองเฉลี่ย (แอมป์: A)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	1.2	0.9	0.9
40 (เริ่มประจุ)	3	63.6	63.0	62.1
50	15	63.0	63.5	63.0
60	29	63.2	64.3	63.5
70	43	62.4	63.5	63.5
80	57	64.2	63.2	61.2

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	กระแสรกกำลังสองเฉลี่ย (แอมป์: A)		
		L1	L2	L3
90	71	62.3	62.5	63.8
100	80	1.4	2.1	1.1
(ประจุเต็ม)				

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 11 สังเกตได้ว่ากระแสทั้งสามเฟสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากค่าก่อนประจุในช่วงเริ่มการประจุซึ่งแบตเตอรี่มีความจุ 40 เปอร์เซ็นต์ จนกระแสมีค่าประมาณ 62 ถึง 64 แอมป์ และคงค่าประมาณนี้ไปจนแบตเตอรี่มีความจุ 90 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าประมาณ 1.1 ถึง 2.1 แอมป์ ซึ่งแบตเตอรี่ประจุเต็มหรือมีความจุ 100 เปอร์เซ็นต์

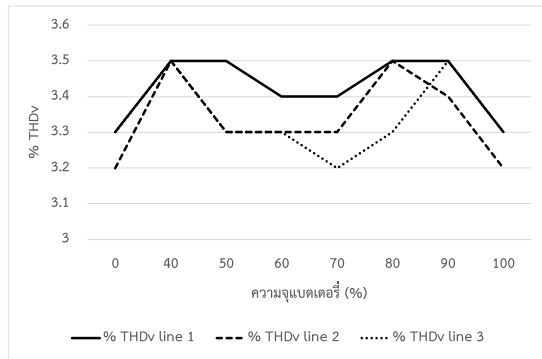
3.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่วัดได้

จากการตรวจวัดความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกทั้งสามเฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตามช่วงเวลาที่กำหนด สามารถนำข้อมูลที่ได้มาบันทึกลงในตารางที่ 5 โดยนำค่าจากตารางที่ 5 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับความจุแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 12 สังเกตได้ว่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกทั้งสามเฟสจะอยู่ในช่วง 3.2 ถึง 3.5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เริ่มอัดประจุ (ความจุแบตเตอรี่ 40 เปอร์เซ็นต์) ไปจนแบตเตอรี่มีประจุเต็ม (100 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 5 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก

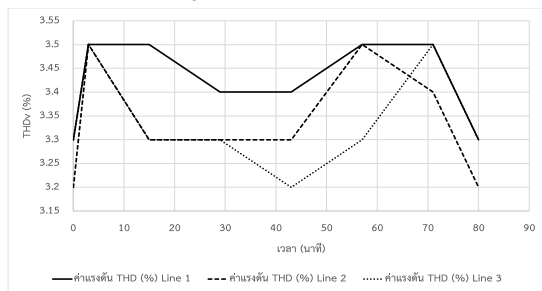
ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD _V : %)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	3.3	3.2	3.3
40 (เริ่มประจุ)	3	3.5	3.5	3.5
50	15	3.5	3.3	3.3
60	29	3.4	3.3	3.3
70	43	3.4	3.3	3.2

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาทื)	ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD _v : %)		
		L1	L2	L3
80	57	3.5	3.5	3.3
90	71	3.5	3.4	3.5
100 (ประจุเต็ม)	80	3.3	3.2	3.3
เฉลี่ย		3.42	3.33	3.33



รูปที่ 12 ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับ
ความจุแบตเตอรี่

การเปรียบเทียบ %THD_v และเวลาในการอัด
ประจุได้แสดงไว้ดังรูปที่ 13



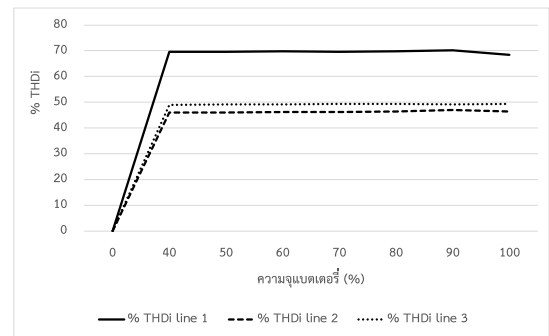
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบ %THD_v และเวลา

เมื่อตรวจวัดความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกทั้งสาม
เฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตามช่วงเวลา
ที่กำหนด สามารถนำมาข้อมูลที่ได้มาบันทึกลงในตาราง
ที่ 6 โดยนำค่าจากตารางที่ 6 มาสร้างกราฟแสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกเทียบ
กับความจุแบตเตอรี่ดังในรูปที่ 14 ซึ่งจากกราฟแสดง
ความสัมพันธ์ในรูปที่ 14 สังเกตได้ว่าที่เฟส L1 มีค่า

ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสูงสุด คือ ช่วง 68.5 ถึง
70.1 เปอร์เซ็นต์ และที่เฟส L2 จะมีค่าความเพี้ยน
กระแสฮาร์มอนิกต่ำสุด คือช่วง 46.1 ถึง 47 เปอร์เซ็นต์
ส่วนที่เฟส L3 มีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก
ปานกลาง คือ ช่วง 49 ถึง 49.4 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้งสาม
เฟสจะมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกค่อนข้างคงที่
ตั้งแต่เริ่มอัดประจุ (ความจุแบตเตอรี่ 40 เปอร์เซ็นต์) ไป
จนกระทั่งแบตเตอรี่มีประจุเต็ม (100 เปอร์เซ็นต์)

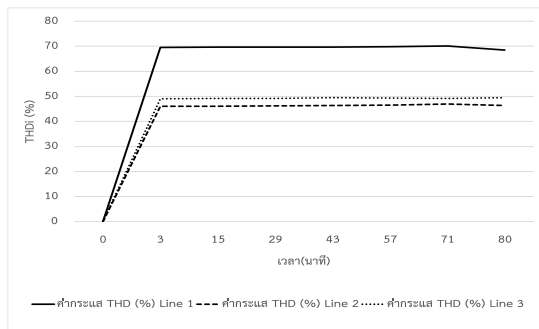
ตารางที่ 6 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาทื)	ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (THD _i : %)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	0	0	0
40 (เริ่มประจุ)	3	69.5	46.1	49.0
50	15	69.6	46.0	49.1
60	29	69.7	46.2	49.1
70	43	69.6	46.3	49.4
80	57	69.8	46.5	49.3
90	71	70.1	47.0	49.1
100 (ประจุเต็ม)	80	68.5	46.4	49.4
เฉลี่ย		69.54	46.35	49.2



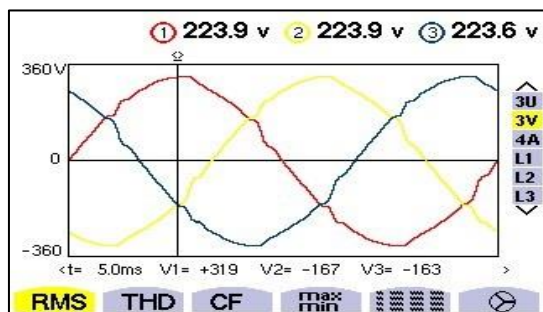
รูปที่ 14 ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกเทียบกับ
ความจุแบตเตอรี่

จากรูปที่ 13 พบว่าความเพี้ยนกระแส
ฮาร์มอนิกเทียบกับความจุแบตเตอรี่ของเฟสที่ 1 มีค่าสูง
กว่าเฟสอื่น เนื่องจากมีการต่อโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
แบบสวิตชิ่งในจำนวนมากกว่าเฟสอื่นพอสมควร ส่วน
การเปรียบเทียบ %THD_i และเวลา ดังแสดงในรูปที่ 15



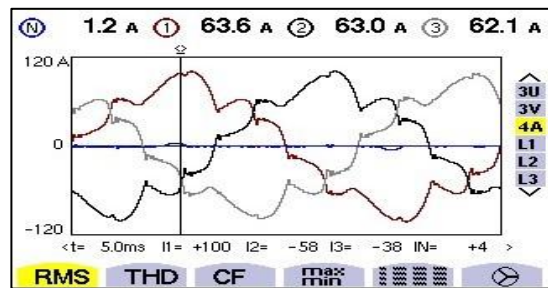
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบ %THDi และเวลา

ตัวอย่างรูปคลื่นของแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย และกระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ยทั้งสามเฟสที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าขณะทำการอัดประจุแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 16 และรูปที่ 17 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างขนาดแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละส่วนประกอบสมมาตร และขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ ทั้งสามเฟสที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ตามลำดับ

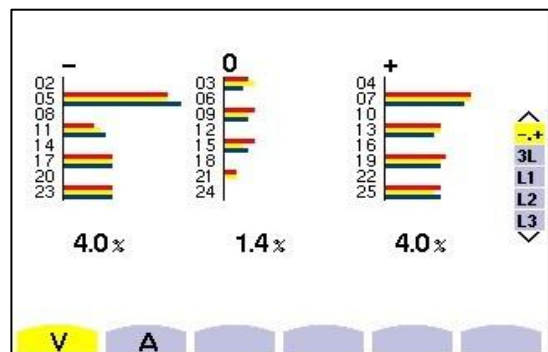


รูปที่ 16 รูปคลื่นแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย

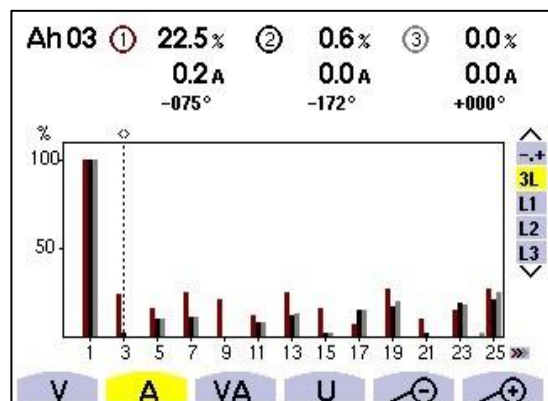
จากรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแรงดันขณะอัดประจุจะเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับขนาดแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละส่วนประกอบสมมาตรที่แสดงในรูปที่ 18 ส่วนรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ยขณะอัดประจุจะเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ค่อนข้างมาก ซึ่งสอดคล้องกับขนาดกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 17 รูปคลื่นกระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ย



รูปที่ 18 ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ



รูปที่ 19 ขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ

การเปรียบเทียบผลการทดสอบ %THDv และ %THDi เฉลี่ยกับบทความการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าสำหรับการประกอบธุรกิจในภาคเอกชน [9] ดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8 โดยที่บทความอ้างอิงใช้หัวปลั๊กประเภท CHAdeMO พิกัด 50 kW ใช้ SOC ช่วง 20-80 % ในขณะที่บทความ

วิจัยนี้ใช้หัวปลั๊กประเภท CCS-Type 2 พิกัด 90 kW ใช้ SOC ช่วง 40-100 % สังเกตว่าพิกัดกำลังขณะอัดประจุ และ SOC อาจมีผลต่อการเปรียบเทียบในกรณีนี้

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบ %THDv เฉลี่ยจาก 3 เฟส

บทความอ้างอิง	บทความผู้วิจัย
0.16	3.36

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบ %THDi เฉลี่ยจาก 3 เฟส

บทความอ้างอิง	บทความผู้วิจัย
0.51	55.03

4. สรุป

ผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็วสรุปได้สามส่วน ส่วนแรกคือผลกระทบด้านแรงดัน เมื่อมีการอัดประจุพร้อมกันจำนวนมากจะทำให้เกิดสภาวะแรงดันตกในระบบไฟฟ้า และหากหยุดอัดประจุพร้อมกันจะทำให้เกิดสภาวะแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า ส่วนที่สองคือผลกระทบด้านฮาร์มอนิก โดยขณะอัดประจุจะทำให้แรงดันเกิดความเพี้ยนเล็กน้อย แต่กระแสจะเกิดความเพี้ยนสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นโดยทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดพลาด ส่วนที่สามคือผลกระทบด้านความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า กรณีสถานีอัดประจุแบบสามเฟสที่ทดสอบมักจะไม่เกิดปัญหานี้ แต่กรณีใช้สถานีอัดประจุแบบหนึ่งเฟส หากเฟสใดมีการอัดประจุจะทำให้เฟสนั้นใช้กระแสมาก ทำให้ปลายสายของเฟสนั้นมีแรงดันต่ำกว่าเฟสอื่น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลและอุปกรณ์เพื่อการทดสอบในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Policy Research Department, National Science and Technology Development Agency (NSTDA), "Electric Vehicle Industry," *Study Report*, pp. 11–18, Sep. 2017.
- [2] Office of Policy and Planning, Ministry of Energy, "Report on The Performance According to The Plan to Drive Thailand's Smart Grid in The Short Term for The Year 2020," *Annual Report*, pp. 1–38, Feb. 2021.
- [3] Joint Working Group: Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Metropolitan Electricity Authority (MEA) and Provincial Electricity Authority (PEA), "Electrical Infrastructure Development Plan Report," *Annual Report*, pp. 5–20, Nov. 2016.
- [4] Office of Policy and Planning, Ministry of Energy, "EV Charging Station," *Handbook for Developing Battery Charging Stations for Electric Vehicles to Support the Country's Goals for the Promotion of Electric Vehicles*, pp. 4–5, Feb. 2022.
- [5] C.-L. Su, J.-T. Yu, H.-M. Chin and C.-L. Kuo, "Evaluation of power-quality field measurements of an electric bus charging station using remote monitoring systems," in proceeding of 2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Bydgoszcz, Poland, 2016, pp. 58–63.
- [6] T. Fujun, X. Ruiheng, C. Dong, R. Lijia, Y. Quanning and Z. Yan, "Research on the harmonic characteristics of electric vehicle fast charging stations," in proceeding of 2017 2nd International Conference on

- Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, China, 2017, pp. 805-809.
- [7] T. Pothinun and S. Premrudeepreechacharn, "Power Quality Impact of Charging Station on MV Distribution Networks: A Case Study in PEA Electrical Power System," 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, UK, 2018.
- [8] F. Chen, Q. Zhong, H. Zhang, M. Zhu, S. Müller, J. Meyer and W. Huang, "SURVEY OF HARMONIC AND SUPRAHARMONIC EMISSION OF FAST CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES IN CHINA AND GERMANY," CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Online Conference, 2021.
- [9] P. Khemmook, S. Thongsuk and P. Inban "The Impact Study of Electric Vehicle Quick Charger to Electrical System for Business in Private Sector," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 32, no. 4, pp. 843-853, Oct-Dec 2022.
- [10] King Mongkut's University of Technology Thonburi, "Study on Technology and Innovations in Electric Vehicles," *The Complete Report of The Electric Vehicle Technology Education Project*, pp. 1-29, Nov. 2017.
- [11] U. Vaidya, *Composites for Automotive, Truck and Mass Transit: Materials, Design, Manufacturing*, 1st ed. Lancaster, PA: Destech Publications Inc., 2010.
- [12] <https://www.nissan.co.th/experience-nissan/Nissan-EV/EV-charger-type.html>
- [13] K. Bhummikittipich, *Power System Quality*, 1st ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd., 2015.
- [14] IEEE std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [15] S. Chaladying and N. Rugthaicharoencheep, "Implement of Harmonic Current Impact on Power Factor Correction Device," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 12, no. 1, pp.109-120, Jan-Apr 2016.
- [16] P. Ngamprasert, N. Chattranont and N. Rugthaicharoencheep, "The Analysis Harmonic for Connect Grid Photovoltaic Rooftop Synergy Distribution System," 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Khon Kaen, Thailand, 2022.
- [17] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso and H. Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2012.

Impact of Particulate Matter 2.5 During Covid-19 in Bangkok, Thailand

Krit Jedwanna* Suwit Paengkanya and Prin Boonkanit

Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok

Received 16 March 2023; Revised 25 April 2023; Accepted 10 May 2023

Abstract

Bangkok is a large city with severe Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}) and traffic congestion problem. In past decades, traffic was the main cause of PM_{2.5}. Due to the Covid-19 pandemic in 2020, Bangkok was in lockdown which substantially decreased traffic volume during that period. In this research, the author studied how this change in Bangkok's traffic volume affected the concentration of pollution, especially PM_{2.5}. Data were collected from 63 points in Bangkok and on 4 highways during January 2018 to December 2023. The analysis showed that during the lockdown period, the concentrations of PM_{2.5}, NO_x, NO₂, NO and CO decreased by 14.38%, 12.93%, 18.43%, 2.65% and 5.66%, respectively, while traffic volume decreased by about 40%. However, there was no significant relationship between the concentration of PM_{2.5} and the decreased traffic volume. Therefore, the results indicated that while the Covid-19 pandemic might have influenced the change in traffic volume, it was not the main cause because the effect of season on PM_{2.5} outweighed the impact of traffic volume.

Keywords: Traffic; PM_{2.5}; Covid-19 pandemic; Bangkok; Thailand

* Corresponding Author. Tel.: +668 9777 1654, E-mail Address: krit.j@rmutp.ac.th

1. Introduction

The US EPA (United States Environmental Protection Agency) [1] has set a standard for small particles which are harmful to human health based on a particulate matter (PM) rating. For example, PM₁₀ or coarse particles defines the small particles found in dust and smoke, which have a diameter in the range 2.5–10 microns that can be clearly seen. However, PM_{2.5}, or fine particles, are tiny, having a diameter of 2.5 microns and below.

There is substantial evidence and many studies all over the world that have shown that traffic is the main factor contributing to PM_{2.5} [2]–[7]. Currently, PM_{2.5} pollution has become a severe problem in Thailand, especially in metropolitan areas, such as Bangkok, Chiangmai, Chiang Rai and Lampang [8], [9]. In addition, extreme traffic congestion in Thailand is still a concern, with Bangkok having consistently bad traffic jams over a long period [10], [11]. From the beginning of 2020, the Covid-19 pandemic changed people's behavior. In many countries, cities were locked down to reduce the opportunities for the virus to spread, which catalyzed online learning and working from home. This lockdown policy not only had economic impacts but also restricted activities in communities, such as major reductions in traveling and changing the mode of transportation in many countries [12]–[14]. In particular, on Bangkok's highway, during the worst of the Covid-19 period, traffic volume decreased by about 40% and the number of people using public transportation fell by 50% [15], [16]. Authors questioned the relationship

between the decrease in traveling and air pollution.

The current research separated statistical data 2015 and 2021 into 2 periods, with the first set the Covid-19 pandemic (from 2015 to 2019) and second during the pandemic (2020 to 2021) [17]. Statistical methods were applied to compare the data in same the period range [16] as well as to study how traffic volume and air pollution were related, especially the impact of the PM_{2.5} concentration level on changing traffic volume.

2. Other Studies

Particulate matter is made up of particles (tiny pieces) of solids or liquids that are in the air. It may include dust, dirt, soot, smoke and drops of liquid (aerosols). It may occur from natural sources, such as dust and pollen, but also can arise from human activities, such as industrial processes, working machinery (including internal combustion engines), electrical generation processes, and construction, mining and agricultural activity [18]–[20], lead to the release of PM_{2.5} material into the atmosphere that is sourced from releasing elementary particles and changes in initial substances, such as SO₂, NO_x, VOCs and NH₃ in the primary releasing stage [21]–[24]. In addition, PM_{2.5} material can include not only toxic but also long-lasting components that continue to pollute the environment. Furthermore, PM_{2.5} can travel long distances due to atmospheric circulation. In summary, the combination of these factors makes PM_{2.5} material extremely harmful to human health [25], [26].

2.1 PM_{2.5} in Thailand

The Pollution Control Department has estimated that the number of deaths in Thailand caused by PM_{2.5} may have reached 22,000 in 2021 [27] as the Thailand air quality index (AQI) from the beginning of 2021 [28], including the concentration level of PM_{2.5} was exceedingly high. Main factors influencing the level of PM_{2.5} are human activities especially from transportation—smoke from exhaust pipes and emissions from the incomplete combustion of gases in the engine—which were the main sources of PM_{2.5} in Bangkok, Chiang Mai and Khon Kaen [9].

In addition, high density traffic results in high PM_{2.5} levels. Thailand was ranked fifth in the Asian region after Indonesia, Myanmar, Vietnam, and Laos, respectively [8]. In 2021, Lampang had the highest level of PM_{2.5} in Thailand. PM_{2.5} levels in Thailand are heavily influenced by dust and air pollution related to seasonal activities, especially in the Chiang Mai river basin due to particles from burning agricultural waste to prepare for the next rice harvest in the subsequent rainy season. These agricultural areas are in valleys where the landscape is suitable for PM_{2.5} accumulation [29]. The PM_{2.5} problem is especially bad during the dry season in northern rural areas, such as Chiang Mai, Lampang and Nan provinces, where the [pollution seems to have become increasingly severe in recent times [30], [31]. Research studies on the causes of PM_{2.5} in community areas, such as Bangkok, found there were higher levels of PM_{2.5} in the dry season compared to the wet season.

The most common sources of PM_{2.5} emissions in Bangkok are biomass combustion and traffic, and industrial activities, with varying concentrations based on seasonal factors [32]–[34]. A study on pollutant concentrations for O₃, NO_x, CO and SO₂ from 1996 to 2009 in Bangkok reported that for residential area and roadside locations, the winter air pollution concentrations were higher than in summer and rainy seasons, with the roadside areas having higher levels than the residential areas in Bangkok [35].

2.2 Transportation and PM_{2.5}

Road transportation is a source of pollutants, such as O₃, CO, NO_x, and NMVOC, along with the greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O), acidic substances (NH₃ and SO₂) and carcinogens (polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and Persistent organic pollutants (POPs)) as well as toxic heavy metals [36]. Over past period, transportation and travel-related activity were the main cause of PM_{2.5} in urban areas. A study in China on the impacts of freight transport on PM_{2.5} concentrations showed that switching the mode of goods transportation from road freight to sea freight helped to significantly reduce the PM_{2.5} level in rural areas [37]. Another research study on alternative transport options in Adelaide, South Australia using modeling found that the PM_{2.5} level was directly proportional to Vehicle-Kilometers Traveled (VKT), with a decrease of 40% decreasing the PM_{2.5} level by 0.4 µg./m³. In other words, shifting transportation modes from road to other forms could help in reducing the PM_{2.5}

level [38]. A study in Pittsburgh, USA on trace elements found that the concentration of pollutants, such as As and Se, during rush hours was higher than during other periods in the week [39]. The above research results show that in the transport sector, especially road transport, the higher the traffic density, the more it affects the occurrence of PM2.5.

2.3 Transportation and PM2.5 during Covid-19 pandemic

In Wuhan, China on December 2020, the WHO China Country office reported cases of pneumonia of unknown etiology [40] that was later confirmed by WHO as an emerging infectious disease defined as coronavirus disease 2019 (COVID-19) [41]. Thailand declared a state of emergency on 26th March 2021, leading to a partial lockdown of Bangkok and surrounding areas. Although the number of infected cases in other areas continuously increased as a result of worker immigration, the number of confirmed cases never exceeded 200 per day. The Covid-19 situation in Thailand remains under control; however, there are uncertain factors and there is the risk of outbreaks. Therefore, the government issued prevention measures and continues to closely monitor the situation [9]. Throughout the Covid-19 pandemic (January 2019 to August 2022), Thailand took preventive and proactive measures as the situation unfolded. Then, Covid-19 was declared endemic, and Thailand has reopened its borders to tourists after a long period of closure. Countermeasures applied, from the first infection until 2021 (when the situation unfolded), are provided in **Table 1**.

Table 1 Preventive measure for handling Covid-19 in Thailand.

Measure	Wave				
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Restriction on entering high-risk infected areas	•	•	•	•	
Curfew 9.00pm–04.00am				•	
Working from home and online learning	•	•	•	•	
Restriction on opening times for shopping malls and markets	•	•	•	•	
Parks and entertainment places closed	•	•	•	•	
Border closed	•				
14 days quarantine on international arrival		•	•	•	•
Availability of 1 st dose of vaccine (Aug. 2021)				•	
Availability of 2 nd dose of vaccine					•

1st wave, Mar 2020–Jun 2020; 2nd wave, Dec 2020–Jan 2021; 3rd wave, Apr 2021–May 2021; 4th wave Jun 2021–Dec 2021; and 5th wave, Jan 2022–May 2022.

Fig. 1 shows the number of infected cases from January 2020 to June 2021. During the 1st and 2nd waves of Covid-19, there were low numbers of new infected cases per day because of the quarantine policy when Covid-19 was an emerging disease, with no developed vaccine. However, after some people had received a vaccination and returned to living a normal life, they became familiar with the Covid-19 situation and were less careful and ignored some of the preventative measures. This led to new waves (3rd and 4th) of Covid-19, resulting in increased numbers of infected cases over a short period. Concurrently, Covid-19 had evolved to

produce mutations that were more severe and more rapidly transmitted.

Therefore, during the 4th and 5th waves, the numbers of infected cases increased to 10,000 per day before continuously declining. Finally in July 2022, the Ministry of Public Health, Thailand declared the Covid-19 situation to

be fully controlled and Covid-19 was downgraded from pandemic to endemic status. However, the Covid-19 pandemic changed the travel behavior of people globally. In Europe, research in Spain (Mobility Patterns: The First Wave's Results) [42], provided evidence of changing travel behavior.

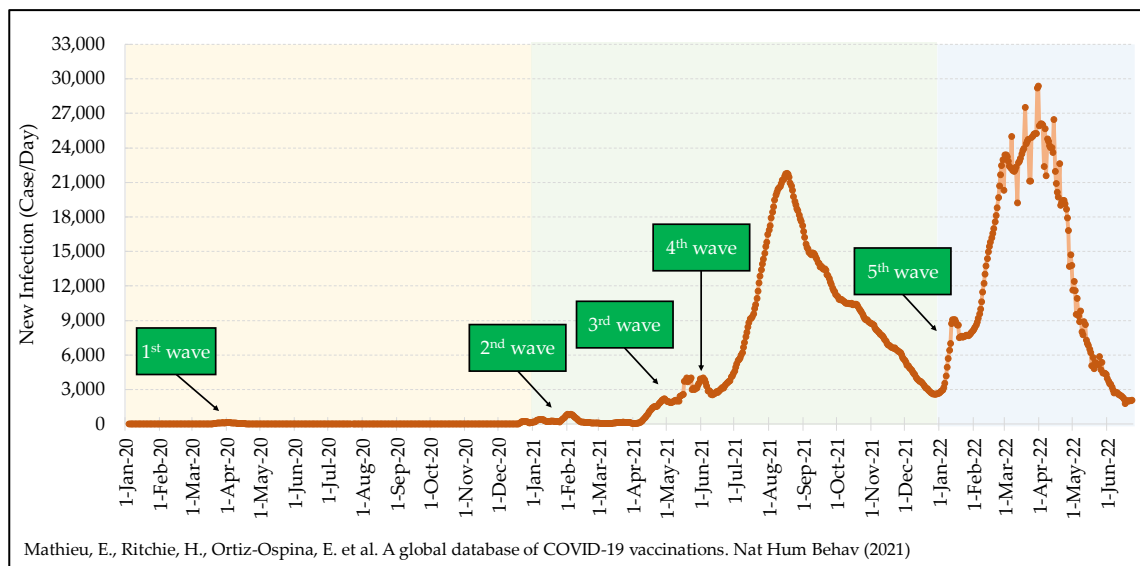


Fig. 1 Overview of number of Covid-19 infections (cases/day) in Thailand January 2020–June 2021

3. Methodology and Motivation

The meteorological dataset used in this research contained air pollution and statistical data of expressway traffic volumes in Bangkok. These data were used to identify the correlation between traffic volume and the PM2.5 level during the Covid-19 pandemic. Daily data were obtained from the Bangkok Pollution Control Department and the Expressway Authority, from January 2015 to December 2021.

3.1. Statistical data of meteorology and air pollution

In this research, the meteorological and pollution data of Bangkok areas were

collected at the points shown in **Fig. 2** based on 2 sources totaling 66 stations: 12 stations from the Pollution Control Department (green points in **Fig. 2**) and 50 stations from the Environment Bureau Bangkok (red points in **Fig. 2**). These inspection tools are aligned to the announcements of the Pollution Control Department [43] (Measuring Instruments and Methods for Measuring Average Gases or Particulates in the Atmosphere in General Other Systems or other Methods Approved). The instruments are permanently installed 2 meters above ground level.

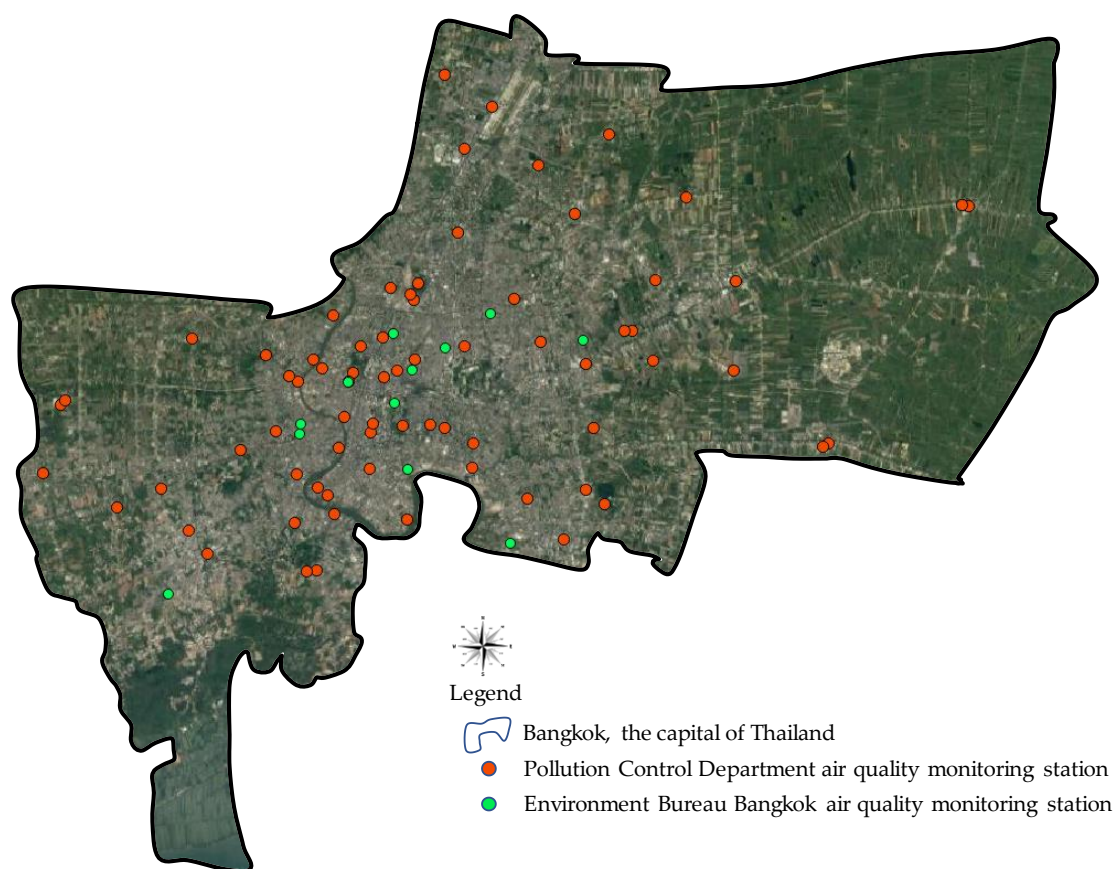


Fig. 2 Air monitoring stations of Pollution Control Department (50 red points) and Environment Bureau Bangkok (13 green points)

The meteorological dataset consisted of more than 2.3 million measured values for PM_{2.5} (fine dust particles with a size less than 2.5 microns), coarse particles (PM₁₀), nitrogen oxide (NO_x), nitrogen dioxide (NO₂), nitric oxide (NO), carbon monoxide (CO), wind speed (WS), wind direction (WD), temperature (Temp), barometric pressure (BP), relative humidity (RH%), and ozone (O₃) from 1 January 2015 to 31 December 2021. Hourly measurements were taken using

appropriate instrumentation and the results were reported according to standard values. For example, PM_{2.5} values were collected every hour and then averaged to provide a 24-hour average that was compared with standard values. The measurement and sampling methods followed the Federal Equivalent Method standards. **Fig. 3** shows an example of some of the dataset used in this study. **Table 2** provides a summary of the raw data obtained from various organization during the study period.

Key_mth	Hour	WS(m/s)	WD(Deg)	Temp(Deg.C)	RH(%)	BP(mBar)	CO(ppm)	NO(ppb)	NO2(ppb)	NOX(ppb)	O3(ppb)	PM10(ug/m3)	PM2.5(ug/m3)
20210101.0	1.0	1.2	81.0	22.8	57.0	763.0	0.85	7.0	20.0	27.0	22.0	43.0	15.0
20210101.0	2.0	0.8	78.0	22.2	59.0	762.0	0.99	14.0	22.0	36.0	18.0	45.0	23.0
20210101.0	3.0	0.6	83.0	21.6	62.0	762.0	0.98	9.0	21.0	30.0	18.0	45.0	21.0
20210101.0	5.0	0.6	32.0	20.9	62.0	762.0	0.92	11.0	21.0	32.0	15.0	46.0	33.0
20210101.0	6.0	1.2	342.0	20.2	61.0	762.0	0.86	18.0	24.0	42.0	13.0	42.0	32.0
20210101.0	7.0	0.5	8.0	19.9	63.0	763.0	1.01	40.0	33.0	73.0	7.0	38.0	28.0
20210101.0	8.0	0.6	6.0	20.0	64.0	764.0	1.06	59.0	33.0	91.0	6.0	41.0	27.0
20210101.0	9.0	0.8	46.0	20.5	64.0	765.0	1.04	49.0	33.0	80.0	10.0	47.0	28.0
20210101.0	10.0	0.9	13.0	21.8	60.0	765.0	1.02	44.0	28.0	71.0	14.0	52.0	33.0
20210101.0	11.0	1.1	22.0	23.3	56.0	765.0	1.01	32.0	28.0	60.0	18.0	52.0	33.0

Fig. 3 Example of dataset used in this study

Table 2 Summary of data sources

Data Source	Number of stations	Data records (2015–2021)
Pollution Control Department air quality monitoring station	13	787,550
Environment Bureau Bangkok air quality monitoring station	50	1,516,342
Total	63	2,303,892

Then, a data cleansing process was conducted to obtain the final data used in the analysis. Data within the 99th percentile were used. This meteorological dataset was used to help not only identify influential factors of pollution sources regarding air quality but also to help directly reduce pollution from the origin source [44], [45].

The meteorological data were separated into 2 datasets: 1) before the Covid-19 pandemic (2015–2019); and 2) during the Covid-19 lockdown. (2020–2021) **Table 3** provides an overview of the various pollution concentrations before the Covid-19 outbreak and during the lockdown. The authors compared the hourly average pollution concentration data from the 63 monitoring stations in Bangkok.

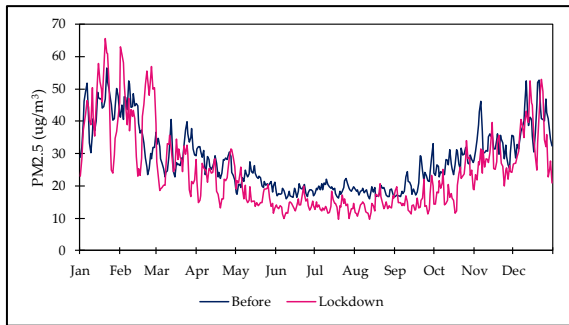
There were differences and trends in the air pollution concentrations before the Covid-19 epidemic and during the lockdown. During the Covid-19 outbreak, the average values for PM2.5, NO_x, NO₂, NO and CO were lower than before the Covid-19 outbreak, while the average PM10 and O₃ values increased during the Covid-19 outbreak.

During the lockdown period, there were fewer cars on roads. Mobility was restricted and most people stayed at home. During this time, the concentrations of PM2.5, NO_x, NO₂, NO and CO decreased by 14.38, 12.93, 18.4, 2.65 and 5.66%, respectively. In addition, we compared the average hourly concentration of air pollution before the pandemic and during the lockdown period.

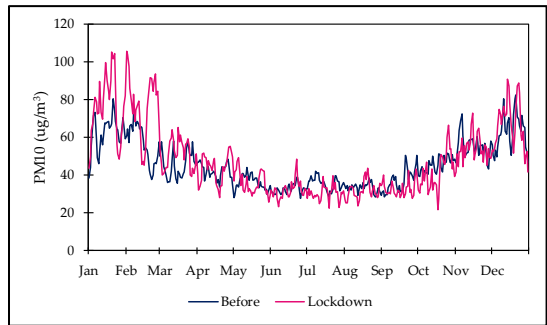
Fig. 4 (a) PM2.5, (b) PM10, (c) NO_x, (d) NO₂, (e) NO, (f) CO and (g) O₃ show the concentration values of each parameter after analysis and compared with the concentration of pollution in the dry season, from November to March for both before the pandemic and during lockdown period; the concentration levels of pollution in both periods were in the same direction.

Table 3 Statistical data on air pollution used in this study

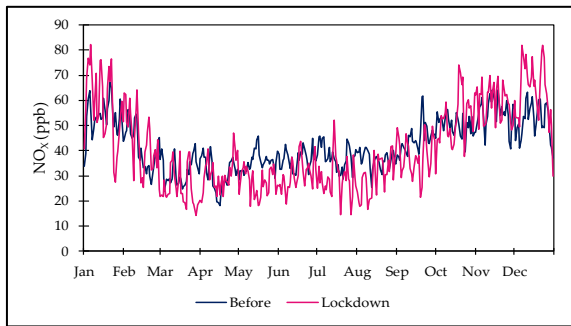
Factor	Before Covid-19 pandemic		During lockdown period		Difference (%)
	Mean	SD	Mean	SD	
PM2.5 (ug/m ³)	27.93	18.94	23.92	16.21	-14.38
PM10 (ug/m ³)	44.97	26.19	47.45	27.94	5.51
NO _x (ppb)	42.15	40.88	36.70	41.32	-12.93
NO ₂ (ppb)	22.15	15.10	18.07	14.35	-18.43
NO (ppb)	23.00	32.96	22.39	33.93	-2.65
CO (ppm)	0.85	0.55	0.80	0.55	-5.66
WS (m/s)	0.84	0.66	0.65	0.52	-23.40
WD (°)	188.56	92.74	186.22	97.33	-1.24
Temp (°C)	29.42	2.92	29.18	3.09	-0.82
BP (mBar)	869.66	59.13	978.40	83.61	12.50



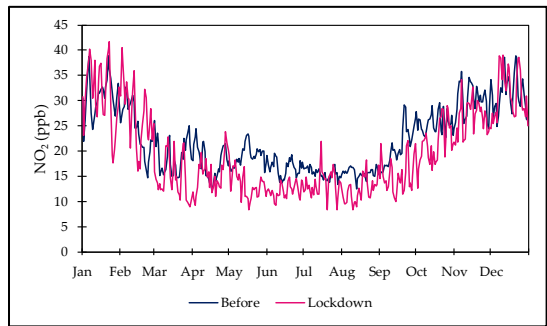
(a)



(b)



(c)



(d)

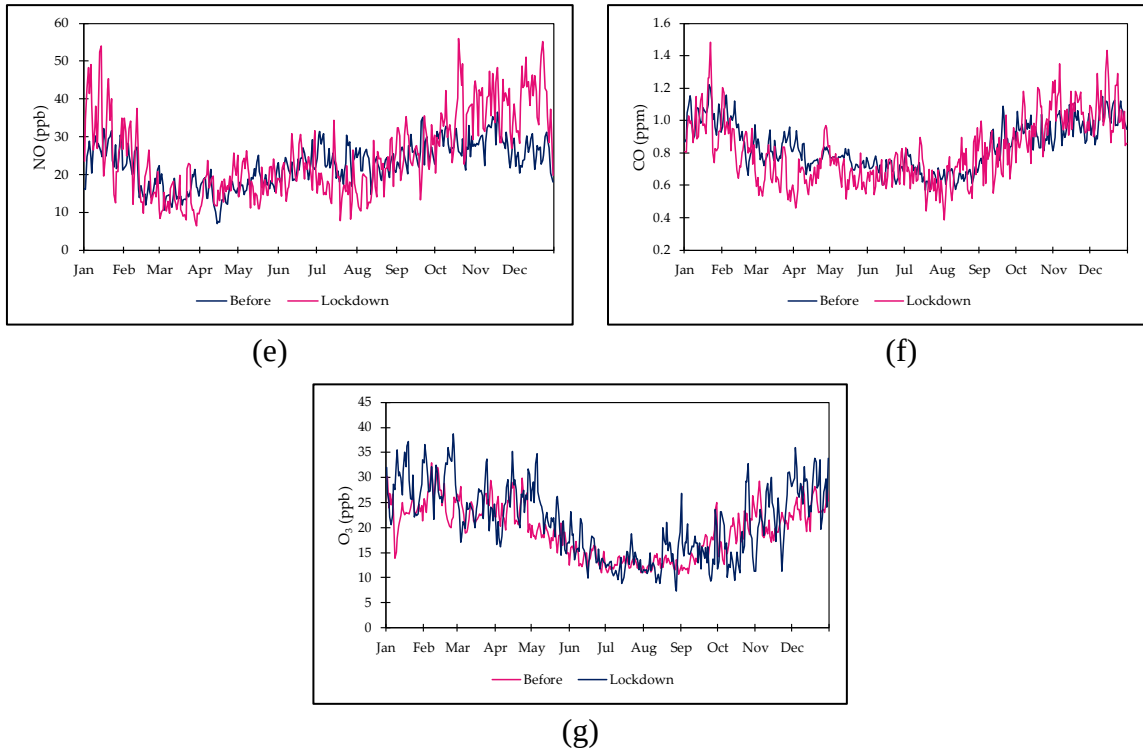


Fig. 4 Hourly average concentration levels of each parameter before period of Covid-19 pandemic and during period of lockdown: (a) PM_{2.5}; (b) PM₁₀; (c) NO_x; (d) NO₂; (e) NO; (f) CO; (g) O₃

3.2. Kruskal-Wallis test

The Kruskal-wallis one-way analysis of variance method was used to identify the characteristics of the distribution of the time series data [46], [47]. The Kruskal-Wallis method is commonly used for identifying the distribution of air pollution data and has been proven effective at monitoring seasonal distribution data of air quality and dominant air pollutants [48], [49]. Initially in the characteristic distribution testing, the pollution data characteristic was assumed to be seasonal using the hypotheses:

- H₀: Median value of each pollution parameter is equal every month.
- H₁: Median value of each pollution parameter differs for at least 1 month.

H was calculated using equation (1):

$$H = \left[\frac{12}{n(n+1)} \sum_{j=1}^c \frac{r_j^2}{n_j} \right] - 3(n+1) \quad (1)$$

based on the sum of sample sizes for all samples (n), the number of samples (c), the sum of ranks in the j^{th} sample (T_j) and the size of the j^{th} sample (n_j).

Table 4 shows the results, indicating that the median of each pollution parameter differed in at least 1 pair in each monthly result, with a P-value lower than 0.05. Therefore, hypothesis H₁ was accepted that pollution parameters each month before the pandemic and during the lockdown period were significantly different.

Table 4 Results of Kruskal-Wallis test on pollution parameters (January 2015 to December 2021)

Parameter	Statistic	
	H statistic	Asymp. Sig.
PM2.5 (ug/m ³)	48.57	0.000
PM10 (ug/m ³)	49.37	0.000
NO _x (ppb)	28.62	0.000
NO ₂ (ppb)	28.94	0.000
NO (ppb)	44.48	0.000
CO (ppm)	36.69	0.000
O ₃ (ppb)	48.47	0.000

In summary, the concentration of PM2.5 was significantly influenced by seasonal factors.

Some research has shown that decreasing road traffic volume is not the major cause of decreasing air pollution, with general human activity more directly related to the pollution level [50]. Nonetheless, research in Italy [51], studying the correlation between road traffic and air pollution, indicated the effect of traffic on the

concentration of air pollution; however, the research focus was on NO, NO₂ and NO_x (PM2.5 was not mentioned). Therefore, it was not possible to utilize that study to determine conclusively the relationship between traffic and the concentration of PM2.5.

3.3. Relationship between traffic density and PM2.5

The daily traffic data in the metropolitan area, shown in **Fig. 5**, covered the Chalerm Maha Nakhon Expressway, the Si Rat Expressway, Chalong Rat Expressway and the Burapha Withi Expressway. The travel data showed that under normal conditions, the traffic volume on these expressways reached 1.78 million vehicles per day. However, during the lockdown period (2020–2021), the traffic volume on expressways dropped to 1.36 million vehicles per day.

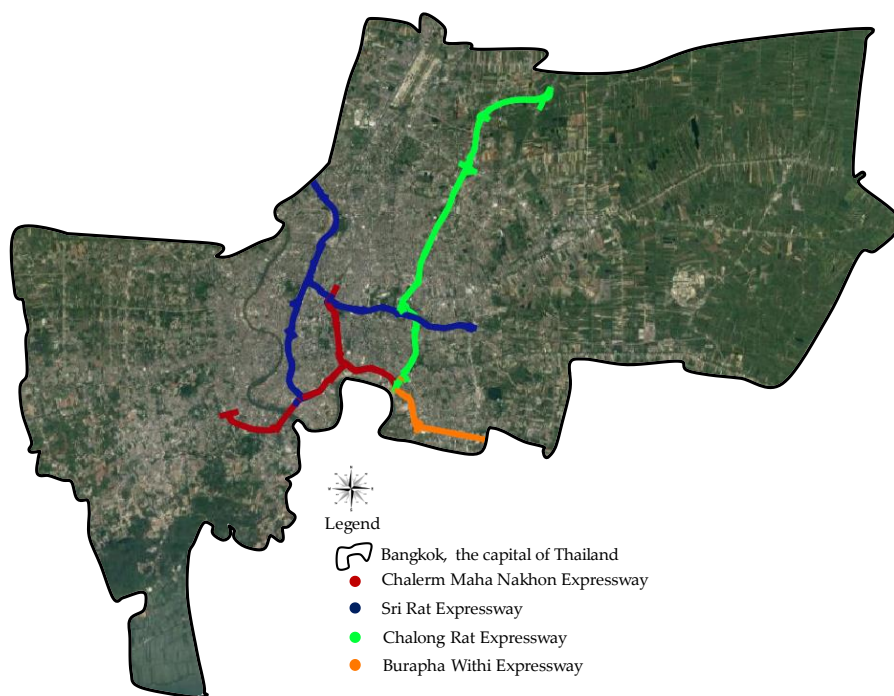


Fig. 5 Overview of 4 urban expressways in Bangkok

In **Fig. 6**, the daily volume of vehicles is separated into 2 periods: before the Covid-19 pandemic (January 2015 to December 2019), and during the Covid-19 outbreak (January 2020 to December 2021). In Thailand, the Covid-19 pandemic began in January 2020, with the lockdown

that prohibited people from going out for non-essential activities being implemented from April to June 2020 and was considered to be most effective as indicated by the approximately 40% reduction in travel volume that occurred during this time.

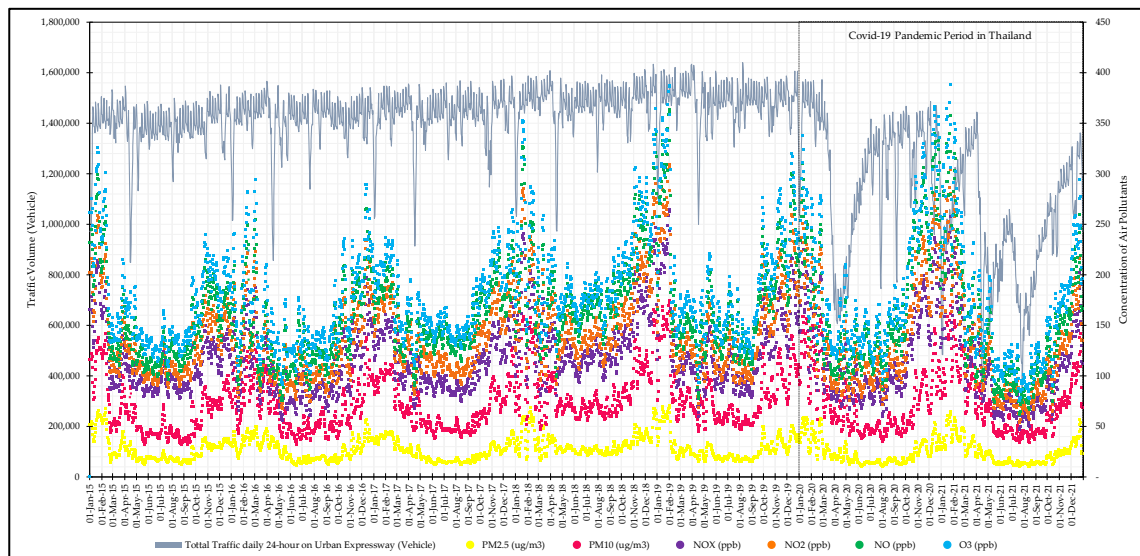


Fig. 6 Daily traffic volume and concentration of air pollution during 2 periods: before Covid-19 pandemic (January 2015 to December 2019) and during Covid-19 outbreak (January 2020 to December 2021)

4. Results and Discussion

Considering relationship between traffic volume and PM2.5 in Figure 7, before the Covid-19 pandemic (January 2015 to December 2019), the traffic volume each day was generally within the same range, while the PM2.5 concentration level depended on seasonal factors. In every year, PM2.5 was the highest in the dry season (November to March).

During the Covid-19 pandemic, the implementation of a lockdown caused the traffic volume to rapidly decrease (from March 2020). Considering only the data before March 2020, the data is misleading, suggesting that PM2.5 and traffic volume

are strongly related. However, considering all the data in this research (from 2015 to January 2021), it was during the dry season that there was a 5th wave of Covid-19 which reduced the traffic volume again. The analysis showed that when the PM2.5 level was highest it resulted in an inverse effect on the traffic volume, especially during the dry season (January) when traffic volumes were reduced but the PM2.5 level was noticeably higher (square box highlighted in yellow in **Fig. 7**).

In addition, the statistical data showed that the correlation coefficient between traffic volume and the concentration of PM2.5 was 0.206.

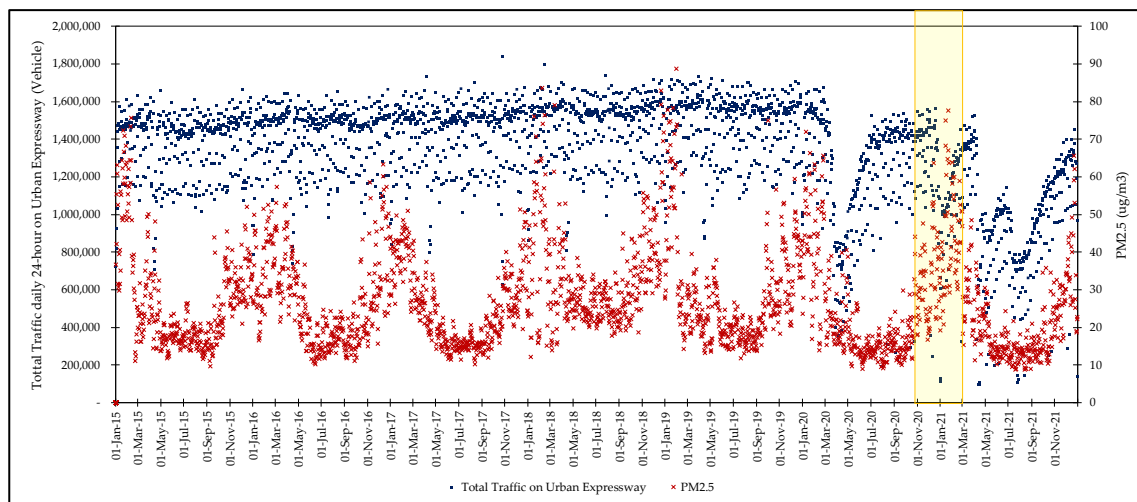


Fig. 7 Daily traffic volume and concentration of PM2.5 in 2 periods: before Covid-19 pandemic (January 2020 to December 2019), and during the Covid-19 outbreak (January 2020 to December 2021)

5. Conclusions

This study examined the changes in PM2.5 levels as a result of the Covid-19 outbreak. The researchers used data on the levels of PM2.5 and other air pollution parameters gathered at 63 points in addition to traffic volume data on 4 expressways from January 2015 to December 2021.

The results showed that during the city lockdown due to the Covid-19 pandemic, the percentage of concentration of the air pollution parameters PM2.5 NOX NO2 NO and CO, decreased by 14.38, 12.93, 18.43, 2.65, and 5.66%, respectively. In addition, testing the time series air pollution dataset using the Kruskal-Wallis method indicated that the data directly related to seasonal distribution, with the concentrations of pollution being highest during the dry season every year.

In addition, the city lockdown forced people to stay at home and to work and learn online. This directly reduced the

traffic volume by 40%. The average monthly PM2.5 level dropped by 21 percent from before the Covid-19 outbreak compared to during the lockdown period. This indicated that during the outbreak, the lockdown had a direct impact on human behavior, particularly transportation, which decreased by 40%. These changes played a substantial role in the reduction of PM2.5 concentrations.

While it was not possible to clearly determine which factors (traffic or seasonal) had the greater impact on the PM2.5 concentration, the current research provided evidence that human activities, specifically traffic in urban regions, had a notable effect on PM2.5 levels.

The PM2.5 problem has been of concern in Thailand, with government and academic studies attributing the main cause of increased PM2.5 levels to traffic. The current research results showed that decreasing the traffic volume significantly reduced PM2.5 levels. The authors believe that this research can contribute to policy

and stake-holder reviews on how to sustainably solve the PM_{2.5} problem in Thailand in a more appropriate way. However, the data collected represent only a sample from a part of Thailand.

6. Acknowledgement

The completion of this study would not have been possible without the assistance of the Rajamagala University of Technology Phra Nakhon. The authors also thank the Pollution Control Department, the Environment Bureau Bangkok, and the Expressway Authority of Thailand for providing support in data collection.

7. References

- [1] US EPA, "Criteria Air Pollutants," *Encycl. Immunotoxicol.*, pp. 218–218, October. 2016.
- [2] V. Ratanavaraha and S. Jomnonkwao, "Trends in Thailand CO₂ emissions in the transportation sector and policy mitigation," *Transp. Policy*, vol. 41, pp. 136–146, 2015.
- [3] C. Li and S. Managi, "Contribution of on-road transportation to PM_{2.5}," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [4] S. Heydari, M. Tainio, J. Woodcock, and A. de Nazelle, "Estimating traffic contribution to particulate matter concentration in urban areas using a multilevel Bayesian meta-regression approach," *Environ. Int.*, vol. 141, no. December 2019, p. 105800, 2020.
- [5] W. M. Hodan and W. R. Barnard, "Evaluating the Contribution of PM_{2.5} Precursor Gases and Re-entrained Road Emissions to Mobile Source PM_{2.5} Particulate Matter Emissions. MACTEC Under Contract to the Federal Highway Administration," MACTEC Fed. Programs, Res. Triangle Park. NC, p. 58 pp, 2004, Available: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei13/mobile/hodan.pdf>
- [6] R. Sun, Y. Zhou, J. Wu, and Z. Gong, "Influencing factors of PM_{2.5} pollution: Disaster points of meteorological factors," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 20, 2019.
- [7] R. Li, X. Mei, L. Wei, X. Han, M. Zhang, and Y. Jing, "Study on the contribution of transport to PM_{2.5} in typical regions of China using the regional air quality model RAMS-CMAQ," *Atmos. Environ.*, vol. 214, no. 40, p. 116856, 2019.
- [8] Engel, "World air quality report 2021," *Pap. Knowl. Towar. a Media Hist. Doc.*, 2014.
- [9] M. Station, K. Findings, K. Kaen, C. Mai, and C. Mai, "Greenpeace's City Rankings for PM_{2.5} in Thailand," no. 2013, pp. 1–6, 2016.
- [10] Tomtom Traffic Index, "Traffic Index Traffic Index results 2018 - 2021," *Www.Tomtom.Com*, p. 21, 2021, Available: <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>
- [11] B. Pishue and T. Trepanier, "2020 INRIX Global Traffic Scorecard and

- latest travel trends,” Mar. 2021.
- [12] A. König and A. Dreßler, “A mixed-methods analysis of mobility behavior changes in the COVID-19 era in a rural case study,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 13, no. 1, 2021.
- [13] M. Hasselwander, T. Tamagusko, J. F. Bigotte, A. Ferreira, A. Mejia, and E. J. S. Ferranti, “Building back better: The COVID-19 pandemic and transport policy implications for a developing megacity,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 69, October 2020, 2021.
- [14] Q. Cui et al., “The impacts of COVID-19 pandemic on China’s transport sectors based on the CGE model coupled with a decomposition analysis approach,” *Transp. Policy*, vol. 103, January, pp. 103–115, 2021.
- [15] “People’s travel during the COVID-19 viral epidemic - dataset - MOT Data Catalog.” <https://datagov.mot.go.th/dataset/greenhouse-emissions-in-the-road-transport-sector>
- [16] “Annual Traffic Report 2021, EXAT.” Available: <https://www.exat.co.th/statistics/>.
- [17] “Air quality and noise statistics, Pollution Control Department.” Available: <http://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/History>
- [18] J. D. Sacks et al., “Particulate matter-induced health effects: who is susceptible?” *Environ. Health Perspect.*, vol. 119, no. 4, pp. 446–454, Apr. 2011.
- [19] M. Rosenlund, F. Forastiere, D. Porta, M. De Sario, C. Badaloni, and C. A. Perucci, “Traffic-related air pollution in relation to respiratory symptoms, allergic sensitisation and lung function in schoolchildren,” *Thorax*, vol. 64, no. 7, pp. 573–580, 2009.
- [20] G. Chen et al., “Short-term effects of ambient gaseous pollutants and particulate matter on daily mortality in Shanghai, China,” *J. Occup. Health*, vol. 50, no. 1, pp. 41–47, 2008.
- [21] J. Cao, J. C. Chow, F. S. C. Lee, and J. G. Watson, “Evolution of PM_{2.5} measurements and standards in the U.S. And future perspectives for China,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 1197–1211, 2013.
- [22] M. Kanakidou et al., “Organic aerosol and global climate modelling: A review,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 5, no. 4, pp. 1053–1123, 2005.
- [23] M. Hallquist et al., “The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 14, pp. 5155–5236, 2009.
- [24] X. Liu et al., “Secondary formation of sulfate and nitrate during a haze episode in megacity Beijing, China,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 15, no. 6, pp. 2246–2257, 2015.
- [25] R. M. Harrison and J. Yin, “Particulate matter in the atmosphere: Which particle properties are important for its effects on health?” *Sci. Total Environ.*, vol. 249, no. 1–3, pp. 85–101, 2000.

- [26] U. Pöschl, "Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 44, no. 46, pp. 7520–7540, 2005.
- [27] A. Farrow and E. Newport, "The Burden of Air Pollution in Thailand 2021 The Burden of Air Pollution in Thailand 2021," May, 2022.
- [28] P. C. Department, "Bangkok Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI)." pp. 1–5, 2021. Available: <https://aqicn.org/city/bangkok>
- [29] T. Amnuaylojaroen and J. Kreasuwun, "Investigation of fine and coarse particulate matter from burning areas in Chiang Mai, Thailand using the WRF/CALPUFF," *Chiang Mai J. Sci.*, vol. 39, no. 2, pp. 311–326, 2012.
- [30] S. Khodmanee and T. Amnuaylojaroen, "Impact of Biomass Burning on Ozone, Carbon Monoxide, and Nitrogen Dioxide in Northern Thailand," *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, , pp. 1–6, April 2021.
- [31] T. Amnuaylojaroen, "Prediction of PM_{2.5} in an Urban Area of Northern Thailand Using Multivariate Linear Regression Model," *Adv. Meteorol.*, vol. 2022, p. 3190484, 2022.
- [32] S. Chirasophon and P. Pochanart, "The long-term characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} in Bangkok, Thailand," *Asian J. Atmos. Environ.*, vol. 14, no. 1, pp. 73–83, 2020.
- [33] D. Narita et al., "Pollution characteristics and policy actions on fine particulate matter in a growing Asian economy: The case of Bangkok Metropolitan Region," *Atmosphere (Basel)*, vol. 10, no. 5, pp. 1–18, 2019.
- [34] P. Uttamang, V. P. Aneja, and A. F. Hanna, "Assessment of gaseous criteria pollutants in the Bangkok Metropolitan Region, Thailand," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, no. 16, pp. 12581–12593, 2018.
- [35] P. Watcharavitoon, C. P. Chio, and C. C. Chan, "Temporal and spatial variations in ambient air quality during 1996–2009 in Bangkok, Thailand," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 13, no. 6, pp. 1741–1754, 2013.
- [36] EEA, "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013: Technical guidance to prepare national emission inventories," EEA Tech. Rep., no. 12/2013, p. 23, 2013. Available: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>
- [37] Y. Wang and D. Yang, "Impacts of freight transport on PM_{2.5} concentrations in China: A spatial dynamic panel analysis," *Sustain.*, vol. 10, no. 8, 2018.
- [38] T. Xia, M. Nitschke, Y. Zhang, P. Shah, S. Crabb, and A. Hansen, "Traffic-related air pollution and health co-benefits of alternative transport in Adelaide, South Australia," *Environ. Int.*, vol. 74, pp. 281–290, 2015.
- [39] B. J. Tunno et al., "Spatial patterns in

- rush-hour vs. Work-week diesel-related pollution across a downtown core,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 9, 2018.
- [40] D. S. Hui et al., “The continuing 2019-nCoV epidemic threat of novel coronaviruses to global health — The latest 2019 novel coronavirus outbreak in Wuhan, China,” *Int. J. Infect. Dis.*, vol. 91, pp. 264–266, 2020.
- [41] L. Pérez-Campos Mayoral, M. T. Hernández-Huerta, G. Mayoral-Andrade, E. Pérez-Campos Mayoral, and E. Pérez-Campos, “World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel Coronavirus (COVID-19),” *Int. J. Surg.*, vol. 79, pp. 163–164, Feb. 2020.
- [42] A. E. Dingil and D. Esztergár-Kiss, “The Influence of the Covid-19 Pandemic on Mobility Patterns: The First Wave’s Results,” *Transp. Lett.*, pp. 1–13, Mar. 2021.
- [43] “Instruments and methods for measuring the average value of gas or dust in the atmosphere in general - Pollution Control Department.” Available: <https://www.pcd.go.th/publication/5420/>
- [44] P. Wetchayont, “Investigation on the impacts of covid-19 lockdown and influencing factors on air quality in greater Bangkok, Thailand,” *Adv. Meteorol.*, vol. 2021, no. 2, 2021.
- [45] Y. Miao, S. Liu, L. Sheng, S. Huang, and J. Li, “Influence of boundary layer structure and low-level jet on pm2.5 pollution in Beijing: A Case Study,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 4, 2019.
- [46] W. H. Kruskal and W. A. Wallis, “Use of ranks in one-criterion variance analysis,” *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 47, no. 260, pp. 583–621, 1952.
- [47] T. W. MacFarland and J. M. Yates, *Introduction to Nonparametric Statistics for the Biological Sciences Using R*, 1st ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2018.
- [48] X. Zhao et al., “Statistical analysis of spatiotemporal heterogeneity of the distribution of air quality and dominant air pollutants and the effect factors in Qingdao Urban Zones,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 9, no. 4, pp. 12–16, 2018.
- [49] K. Webel, “A data driven selection of an appropriate seasonal adjustment approach,” *SSRN Electron. J.*, no. 07, 2021.
- [50] S. Dursun, M. Sagdic, and H. Toros, “The impact of COVID-19 measures on air quality in Turkey,” *Environ. Forensics*, vol. 23, no. 1–2, pp. 47–59, 2022.
- [51] R. Rossi, R. Ceccato, and M. Gastaldi, “Effect of road traffic on air pollution. experimental evidence from covid-19 lockdown,” *Sustainability*, vol. 12, no. 21, 2020.

Thoracic injury of Motorcyclists from Handlebar under Frontal impact in Thailand

Pananya Chuadamrong^{1*} Saiprasit Koetniyom² and Julaluk Carmai²

¹The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

²Automotive Safety and Assessment Research Centre, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

^{1,2}1518 TGGs Building, Pracharat 1 road, Wong Sawang, Bangsue, Bangkok 10800

Received 30 May 2023; Revised 24 May 2023; Accepted 29 May 2023

Abstract

Motorcycle accidents can lead to chest injuries that result in high mortality rates among motorcyclists. Among the different types of front collisions involving motorcycles, front chest impact with the side of a four-wheeled vehicle was found to be the most likely cause of severe thoracic injury among motorcyclists in this research. The study analyzed information collected in Phuket from October 2021 to May 2022. The most common harmful part and angle of impact were extracted from the analysis of accident simulation. The results from data statistical analysis significantly indicate that the side of a four-wheeler vehicle is the most influential area in causing more severe chest injuries in motorcyclists compared to other sites ($P < 0.05$). Notably, a handlebar is one of the most significant parts that cause thoracic injuries. The most influential area of a four-wheeler vehicle and the common thoracic injury of motorcyclists from the harmful parts were used to investigate the effectiveness of possible protective gear. Thus, a chest protective gear can play a critical role in providing thoracic protection. Therefore, the FE human body models of motorcyclist were simulated under front chest impact based on collected data analysis. As a result, it was found that the 2 cm thick rubber of thoracic protective gear is effective only in a 5th percentile female's chest from the left-frontal attack case. In addition, the findings of data analysis in this research can be used by policymakers and stakeholders to focus on reducing the impact of four-wheeler vehicle on motorcyclists and developing more effective protective gear to mitigate the severity of chest injuries in motorcycle accidents.

Keywords : motorcycle accident; thoracic injury; thoracic protective gear; in-depth data collection; accidental reconstruction

* *Corresponding Author. Tel.: +669 9192 9362, E-mail Address: s6309093860026@email.kmutnb.ac.th*

1. Introduction

Motorcycle accidents are the main cause of deaths and injuries among overall traffic accidents throughout the world. According to the statistical data of World Health Organization (WHO), 945,000 people were killed in motorcycle accidents in 2018 [1]. Majority of these killed people were teenagers and young adults [2].

Although the incident of thoracic injury is not as high as soft tissue injuries, approximately 60 percent of thoracic-injured people could face death [3]. Indeed, the patient who has multiple thoracic organ injuries and rib fracture gain higher mortality risk because the thorax contains many vital organs [4].

Typically, severity of injury depends on impact velocity [5]. The impact direction also affects the level of thoracic injury [6]. However, different thoracic impact locations cause variation of organ injuries and traumatic configurations. The side of a four-wheeler vehicle with frontal collision of motorcyclist causes the most severity of thoracic injuries, compared with the frontal and rear collisions of four-wheeler vehicle [7]. Therefore, further study is needed to investigate the influence of impact locations and chest injury level in a step-through motorcyclist which is the most common motorcycle type found in Thailand.

As systematically reviewed, a handlebar of two-wheeled vehicle causes significant thoracoabdominal injuries in children, however, further evidence in adults is needed to clarify its effect on thoracic injuries [8].

Under the most current regulations, unlike helmet, chest protection gears were not mandatory by laws [9]. Some research works support the advantages of general protective clothing for motorcyclists in reducing injuries and length of stay in hospital [10]. Such research findings also suggest the effectiveness of the protective gear in thoracic injury protection.

Crushable foam is widely suggested for impact energy absorption in traffic accident. However, some studies showed that Ogden-Mooney Rivlin material can effectively protect the chest from severe blunt thoracic injuries [11]. While metal and ceramic textile composite are mainly suggested in acute chest penetrating injury protection [12], [13]. Despite widespread usage of crushable foam and convinced evidence in many research works, rubber material was studied to find out and support the pros and cons of Ogden-Mooney Rivlin rubber in crash worthiness [11]. Therefore, the objective of this research is to analyze chest injury severity in motorcyclist's frontal collision with the side of a four-wheeler vehicle. Furthermore, the part of vehicle that causes the most severity of motorcyclist thoracic injuries is investigated from the case selection. In addition, the rubber material is applied for the chest protective gear to evaluate its effectiveness based on human tolerance criteria [14].

2. Tools and definitions

In this research, STATA 17.0 program was utilized as the statistical tool for the sample size and data analysis. STATA is a statistical software that

enables users to analyze, manage and produce graphical visualizations of data in many fields, for example biomedicine, economics, epidemiology, and sociology. In order to estimate the amount of sample size, the technique of retrospective cohort study was used [15]. Additionally, the PC-crash 10.0 and LS-dyna 4.0 program were used for multibody dynamics and Finite Element (FE) simulation respectively. A virtual human body model called Total Human Model for Safety (THUMS) are mainly classified in two genders for adults and children. Normally, THUMS [16] is used in FE simulation of human body under vehicle collisions. Therefore, the human body of motorcyclist under front chest impact with and without rubber of thoracic protective gear can be simulated to identify the thoracic injury from selected cases using THUMS.

Human thorax is the part of a human body that is situated between the neck and the abdomen and supported by the ribs, costal cartilages, and sternum. Human thorax contains various organs, for example, bony structure (ribs, sternum), lungs, heart, vessels and nerves [17]. Therefore, only some organs in human thorax of THUMS are included in this research due to the limitation of standard human tolerance criteria. However, the organs with uncertain reliable human tolerance are excluded. Human abdomen is defined as the anterior region of the trunk between the thoracic diaphragm superiorly and the pelvic brim inferiorly.

While human trunk means a part of human body which contains thorax and abdomen. Furthermore, chest deflection is

defined as the compression distance of the chest, which is used to predict the risk of injury. A longer chest deflection indicates a higher risk of chest injury.

Measurement of thoracic injury severity and fatality prediction are evaluated using the AIS score as shown in **Table 1**. Abbreviated Injury Scale (AIS) score of 3 or higher is generally associated with high mortality, and it can be applied to assess injuries in all organs.

Table 1 AIS criteria for thoracic injury [18]

AIS	Injury Level	Description
1	Minor injury	-Contusion, closed-one rib fracture
2	Moderate injury	-Closed 2-3 Rib fracture -Closed multiple location, one rib fracture -Closed sternal fracture with stable rib cage -Dislocation, fracture spinous or transverse process t-spine -Minor compression fracture (<20%) t-spine
3	Serious injury, non-life-threatening	-Open rib fracture, comminuted rib fracture, displaced rib fracture -Unilateral hemo/pneumothorax, diaphragmatic injury -Intimal tear/minor laceration/thrombosis of subclavian or innominate artery
4	Severe, Life-threatening	-Flail chest -Bilateral hemo/pneumothorax, tension pneumothorax, massive hemothorax, tracheal fracture -Myocardial contusion

AIS	Injury Level	Description
5	Critical	-Visibly unstable chest, ruptured trachea, ventilator needed -Major aortic laceration, cardiac laceration
6	Non-survivable	-Dead at scene

3. Human tolerance criteria and injury mechanism

The assessment of chest deflection in Euro NCAP is divided into two criteria: lower and upper performance limits [19]. The lower performance limit indicates the criteria that can be minimally accepted, while the upper performance limit indicates the criteria that can be highly accepted. Therefore, the upper performance criteria of chest deflections are lower and result in fewer chest injuries than the lower performance limit. To provide clearer explanation of the performance limit, the following paragraphs provide more details.

The lower performance limit of the chest is the minimum score parameter used to predict a 50% risk of AIS score ≥ 3 . Euro NCAP assessment establishes the human chest's lower performance limit as a deflection of 50 mm. A deflection value ≥ 50 mm indicates a 50% risk of AIS score ≥ 3 . On the other hand, the upper (higher) performance limit is the maximum score parameter used to predict a 5% risk of AIS score ≥ 3 . Euro NCAP assessment states that the human chest's upper performance limit is a deflection of 22 mm. A deflection value ≥ 22 mm indicates a 5%

risk of AIS score ≥ 3 . In this research, the correlation between chest deflection and AIS score was assessed according to the Euro NCAP assessment protocol.

The measurement of rib strain is used as an indicator of human tolerance criteria, which refers to the force per unit area within the ribs resulting from external forces or permanent deformation. It enables an accurate description and prediction of elastic and plastic behaviors. The human tolerance limit of rib strain for rib fracture detection is determined to be 0.3 based on existing theory [14]. Apart from chest deflection and rib strain, lung pressure is another indicator for thoracic injury. The pressure is exerted across the entire lung, including the airways. This is also influenced by both respiratory airflow and resistance as well as lung volume and compliance. If the lung pressure exceeds 10 kPa, it can predict the occurrence of pneumothorax [14].

To describe injury mechanism, fuel-tank collisions are the most common type of motorcycle accidents that result in thoracic injuries. When a rider collides with the motorcycle dashboard or other objects in the environment, it can result in impact force applying to the thoracic organs [20]. In some cases, shearing force can also increase the severity of thoracic injuries. However, the severity of thoracic and associated organ injuries is primarily dependent on the relative speed of the motorcyclist and the object, along with other health conditions and environmental factors.

Other types of collision typically do not cause direct thoracic injuries. Side

collisions at lower location primarily cause injuries to the lower extremities of a rider or passenger, while those at higher location often result in head or upper extremity injuries. Nevertheless, some secondary impacts from head-on collisions can result in chest injuries, such as ground impact or subsequent collision with other objects.

4. Accidental data analysis

4.1 Procedure and parameters

To fulfill the objective of this research, raw data are firstly collected from accident scenes. Then, chest injury level in motorcyclists' front collision with a four-wheeler vehicle side and other locations can be analyzed. The relevant parameters recorded contain 1) Point of impact and point of rest from motorcycle, motorcyclists and four-wheeler vehicle 2) four-wheeler vehicle location of impact 3) Motorcyclist weight and height 4) Step-through motorcycle engine volume 5) four-wheeler vehicle engine volume 6) Vehicle deformations 7) Road types and characteristic 8) AIS injury score and injured thoracic organs by on-scene physician evaluation 9) Diagnosis and autopsy result 10) Types of collision

General data such as the average weight and height of the volunteers are reported after raw data collection. However, there are four distinct parameters to be selected for analysis such as 1) four-wheeler vehicle location of impact 2) motorcyclists' weight and height 3) AIS injury score and injured thoracic organs and 4) diagnosis and autopsy results. The others are utilized in completion of accident reconstruction.

Secondly, statistical analysis is performed to determine the location of impact and severity of thoracic injury through the sample size by using retrospective cohort study calculation. Such calculation with at least 50 cases is obtained from prevalence of outcome/exposure, prevalence of outcome/non-exposure, false positive and false negative values at 0.7, 0.3, 0.05 and 0.2 respectively. Accident reconstruction is then carried out using a multibody program to obtain incomplete parameters that were not initially collected. As a result, speed parameter and angle of impact from accident reconstruction analysis are identified independently.

Thirdly, numerical simulation using FE method is conducted through THUMS for harmful part of human being. This task is carried out to determine the most common configuration for each gender based on weight, height, front chest impact location, impact speed, and overall harmful part. Furthermore, the parameters from the multibody model reconstruction are selected from raw data to compare thoracic injuries in real samples that match each gender in the most common configuration with THUMS for human body simulations.

Finally, the effectiveness of chest protective gear is tested in the most frequent configuration for each gender in the FE simulation to predict a reduction in chest injuries of real cases. Thus, overall procedure for analysis is shown in **Figure 1**. Examples of collected data on-scene for accident reconstruction and analysis are shown in **Figure 2**.

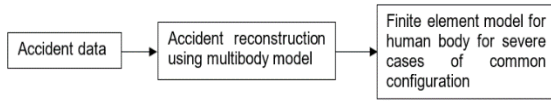


Fig. 1 Overall procedure of data collection and analysis



Fig. 2 On-scene investigation during emergency response

4.2 Population and sample size of accidental data

As previous calculation, at least fifty cases sampling was calculated based on retrospective cohort study statistical formula in statistical application. From on-scene investigation, eighty cases with inclusion criteria of this study for thoracic injury severity include three stipulations according to the four-wheeled vehicle side and other locations against a motorcyclist's frontal impact.

The first stipulation is 15-year-old or more among step-through motorcyclists. Principal diagnosis of the cases is thoracic injury from front collision as the second stipulation. For the last one, the litigant of a step-through motorcyclist is a four-wheeler vehicle. While the exclusion criteria in this initial data analysis consists of four stipulations. The first issue is

pregnant motorcyclists. The principal diagnosis from the cases is not thoracic injury or is the thoracic injury from other mechanism than front collision as the second issue. For the third issue, the cases associated injuries with other than thoracic organ have AIS criteria 4-6 (life-threatening injury). The last issue are the cases with a pillion passenger. Thus, the procedure of case selection for impact analysis is shown in **Figure 3**.

The severity of injury is divided into 2 groups such as life-threatening (Thoracic AIS 4-6) and non-life-threatening cases (Thoracic AIS 1-3). Those groups were classified by on-scene physician evaluation.

Consequently, emphasizing only thoracic AIS, area of impact plays an important role which affects injury severity. Despite of the speed, four-wheeler vehicle side impact causes significantly severe chest injury than front and rear site of a four-wheeler vehicle (P-value < 0.05) with typical statistic null hypothesis acceptability of five percent.

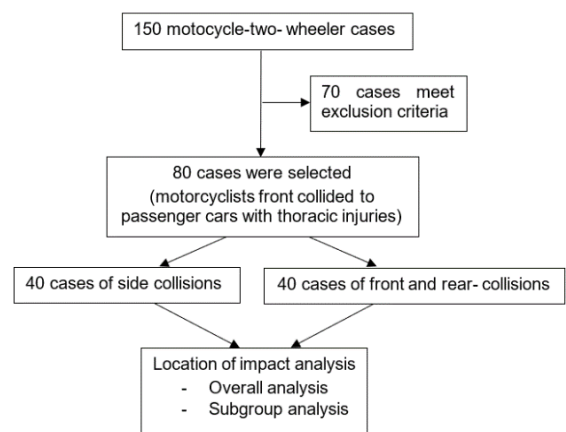


Fig. 3 Case selection steps for impact analysis

Table 2 Point of impact and injury severity analysis

Topics	Four-wheeled vehicle location of impact		Total
	Side	Front and rear	
Life-threatening cases (AIS 4-6)	33	10	43
Non-Life-threatening cases (AIS 1-3)	7	30	37
Total	40	40	80
Topics	Point estimation	95% confidence interval	
Risk difference	0.575	0.340-0.75	
Risk ratio	3.3	1.89-5.75	
Attribution fraction of exposure	0.70 (70%)	0.47-0.83	
Attribution fraction of population	0.53 (53%)	N/A	
			P-value < 0.05

Based on **Table 2**, it is observed that when a motorcyclist experiences a frontal impact with a car side, the risk of life-threatening injury is 3.3 times higher than other types of impacts. According to statistic parameters definition, attribution fraction expresses the real influence of an interested factor in specified studied sample, despite of other confounding factors such as age, gender, BMI, angle of impact, and type of road calculated by multiple logistic regression after raw data collection and multibody program simulation. The attribution fraction analysis in this study shows that the car side impact is one of the main risk factors which significantly contributes to the prevalence of life-threatening injuries,

70% and 53% in exposed cases and in population respectively.

Furthermore, the risk difference suggests that car side impacts result in more life-threatening cases of thoracic injuries than front or rear impacts with a four-wheeled vehicle. However, it is important to conduct further analysis to identify and control for confounding variables and other factors that may affect the prevalence of thoracic injuries such as the presence of harmful environmental objects at the scene such as bridges, barriers or else.

5. Accident reconstruction

5.1 Multibody and kinematic studies

The multibody simulation from PC-crash program was used to simulate events in all cases. The layout of road geometry obtained from the real scenes and human body geometry can be simulated as shown in **Figure 3-5**. Simulated results that were performed from the program were validated with the collected accidental data in order to analyze the location of impact. **Figure 3** and **Figure 4** show the distance in different variables among vehicle and human body from the real scenes and the program respectively. In this research, it is acceptable to have errors up to 10 percent in the program because the closest matches between the results of real scene position and multibody program simulation were found in this research (in this research, no simulations has an error more than 10 percent.) Therefore, the data collection, validation and reconstruction from the real

impact, rear impact, left side and right side. Furthermore, each group are divided by parameters of specific angle as shown in **Figure 6**.

After conducting various simulations in PC-crash 10.0 program along with kinematic study and analysis, it was found that the middle front chest is the most commonly affected position in male cases, while the left front is the most frequent configuration found in female cases. Side impact was found to be a common impact area in life-threatening cases. To have further analysis, only side impact cases was categorized into 3 zones of side impact as in **Figure 7**. Consequently, **Figure 8** reveals that zone B of the car side with angle group 5 is the most common configuration correlated with life-threatening cases with chest injury.

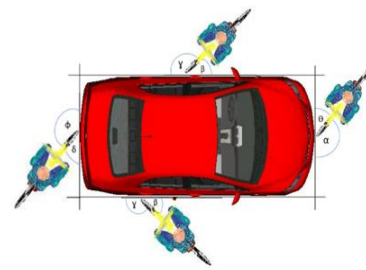
Table 3 Frequency of harmful parts and impact speed in life-threatened cases

Harmful part	Applied Speed(km/hr.)*	Frequency**
Motorcycle Handlebar	43.21	14
Car B-pillar***	41.25	12
Car A-pillar***	48	5
Car door	54.67	3
Rear panel	45	3
Car C-pillar***	57.5	2
Car bumper	60	2
Ground impact	60	1
Car bonnet	55	1
Total	46.26 (Average)	43

*Data obtained from kinematic simulation in multibody program

**Data obtained from the real life-threatened cases

***Car A, B and C-pillars are defined as number 1, 2, 3 in figure 7



Frontal impact angle

Group 1 $\Theta = 0^\circ - 45^\circ$, $\alpha = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 2 $\Theta = 46^\circ - 89^\circ$, $\alpha = 91^\circ - 134^\circ$
 Group 3 $\Theta = 90^\circ$, $\alpha = 90^\circ$
 Group 4 $\alpha = 0 - 45^\circ$, $\Theta = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 5 $\alpha = 46 - 89^\circ$, $\Theta = 91 - 134^\circ$

Rear impact angle

Group 1 $\delta = 0^\circ - 45^\circ$, $\phi = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 2 $\delta = 46^\circ - 89^\circ$, $\phi = 91^\circ - 134^\circ$
 Group 3 $\delta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ$
 Group 4 $\phi = 0 - 45^\circ$, $\delta = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 5 $\phi = 46 - 89^\circ$, $\delta = 91 - 134^\circ$

Left side impact angle

Group 1 $\beta = 0^\circ - 45^\circ$, $\gamma = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 2 $\beta = 46^\circ - 89^\circ$, $\gamma = 91^\circ - 134^\circ$
 Group 3 $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 90^\circ$
 Group 4 $\gamma = 0 - 45^\circ$, $\beta = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 5 $\gamma = 46 - 89^\circ$, $\beta = 91 - 134^\circ$

Right side impact angle

Group 1 $\beta = 0^\circ - 45^\circ$, $\gamma = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 2 $\beta = 46^\circ - 89^\circ$, $\gamma = 91^\circ - 134^\circ$
 Group 3 $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 90^\circ$
 Group 4 $\gamma = 0 - 45^\circ$, $\beta = 135^\circ - 180^\circ$
 Group 5 $\gamma = 46 - 89^\circ$, $\beta = 91 - 134^\circ$

Fig. 6 Impact angle in each location

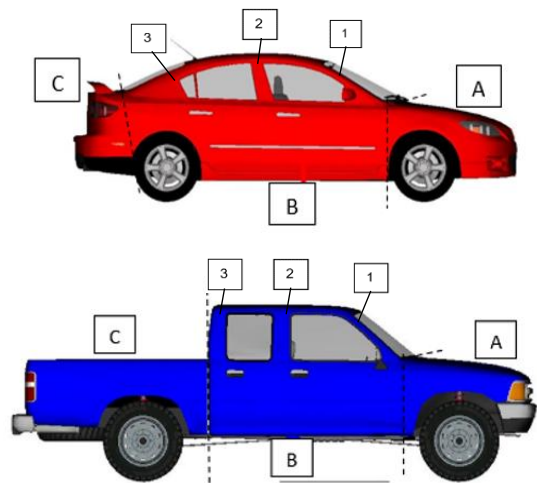


Fig. 7 Side impact zone and defined pillars in sedan and pick-up car

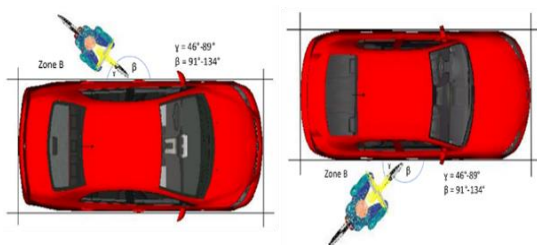


Fig. 8 Most common configuration of impact in life-threatening cases

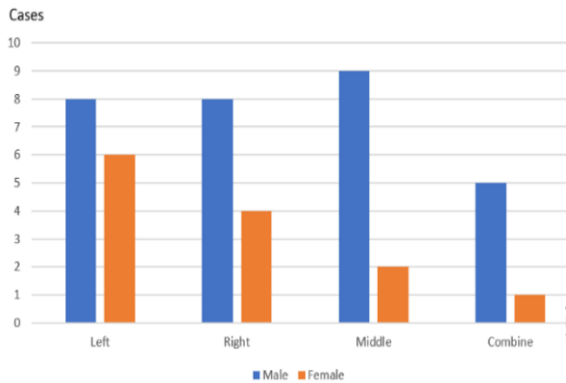


Fig. 9 Front chest's attacked position for life-threatening cases in each gender

In addition, after reconstructing 80 cases in PC-crash it was found that handlebars are the most common cause of chest injury, followed by B-pillar and rear panel of the car. The average speed in life-threatening cases involving handlebars was found to be 43.21 km/hr., which can be utilized in further experimental studies on thoracic protective gear. The reason why handlebars are the most frequent cause of thoracic injury in both overall and life-threatening cases is because they are present in all types of scenes, unlike other harmful parts that only occur in specific types of collisions as in **Table 3**. Furthermore, frequency of the front chest attacked positions in both males and females from simulation is shown in **Figure 9**.

6. Analysis of thoracic protective gear

6.1 Simulation and model configuration

To assess the protective gear, THUMS were used in FE simulation through usage of raw data and PC-crash simulation results as shown in **Figure 10**. The classification for THUMS simulation is

based on motorcyclists' frontal impact to all locations of four-wheeler vehicle. Therefore, the number of each group are different from those in **Figure 3**. The average height and impact speed from only 43 life-threatening cases are determined for THUMS selection and impact condition in each gender simulation. The raw data were obtained from each gender's life-threatening cases to evaluate thoracic injury severity reduction from the protective gear. The common configuration in life-threatening cases were extracted for attacked positions of front chest in FE simulation.

In this research, the prototype of chest protective gear developed from Wei et al.' work [11] is used in effective evaluation for life-threatening cases. The model of chest protective gear is made of rubber material. In addition, the model of handlebar is made of typical metal material with density of 3.5×10^{-9} ton/mm³, Poisson's ratio of 0.280 and Young modulus of 2.070×10^5 MPa. The model of handlebar is constrained in only one degree of freedom, which is moving towards from the front chest with speed of 43.21 km/hr. Besides, the actual handlebar can either twist (in left and right sides) or move towards-backwards from the chest. In order to simulate the twisted handlebar from real situation and PC-crash program, the handlebar model is controlled to move directly to the THUMS chest model. Hence, this configuration creates slightly different mechanism of injury. In the real cases of handlebar twisting condition, only the tip of the handlebar can attack motorcyclist' thorax and cause more

localized injury. In this simulated case, the whole bar may attack the front chest and result in less localized injury.

To achieve the effectiveness of protective gear, LS-dyna program for FE simulation was used to simulate two sample cases, one for male and one for female, with AIS score equal to or over 4 as shown **Figure 11**. The average height and weight of each gender in real cases were measured to obtain suitable size of THUMS selection including the handlebar model as shown in **Table 4** and **Table 5**. A rubber size of 24.15 x 35.27 x 2 cm with density of 9.0×10^{-10} ton/mm3 and Poisson’s ratio of 0.495 was modelled and applied to cover the front chest of THUMS at middle and left attacked positions with wearable application for male and female respectively. Consequently, human parameters such as chest deflections, ribs strain, ribs deflection, and lungs pressure can be measured and compared at each given speed for each gender.

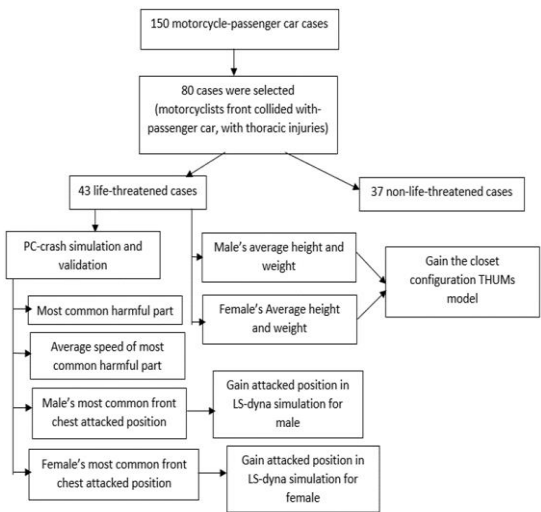


Fig. 10 Case extraction for protective gear analysis

Table 4 Each life-threatening gender average height and weight

Gende r	Average Height(cm)	Averag e	Frequenc y
Male	170.53	68.50	30
Female	156.85	60.23	13
Total	166.39	66.0	43

Table 5 50th percentile male and 5th percentile female THUMS model weight and height

THUMS Model	Height(cm.)	Weight (Kg.)
50th percentile Male	175	77
5th percentile Female	152.4	49.9
Handlebar	-	5*

*Real measurement based on average weight and geometry of step-through motorcycle handlebar.

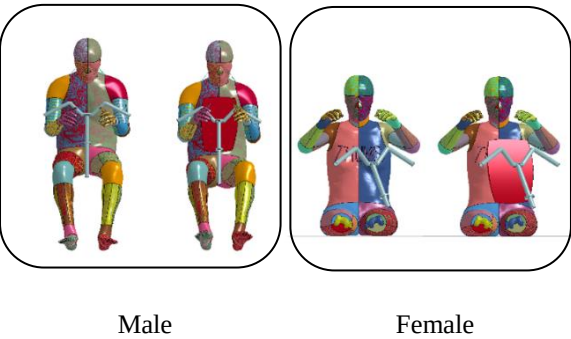


Fig. 11 THUMS with and without chest protection

6.2 Chest injury and chest protective gear evaluation

In the real case, the height of motorcyclist matches the 50th percentile male THUMS model, resulting in the same handlebar-ribs level as shown in THUMS from the FE simulation. A 33-

year-old male (motorcyclist) with 175 cm height in this case was diagnosed with closed 4th and 5th ribs fracture both sides as shown in **Figure 12** (white arrows) with left massive hemothorax and great vessel injury from chest x-ray after colliding with a four-wheeler vehicle. The case was categorized as thoracic AIS 4 at the scene and then passed away soon after emergency resuscitation in the hospital. After the data collection and evaluation with PC-crash simulation, the handlebar was found as harmful part and the middle chest was attacked by the handlebar. While the simulated damage and actual injury are similar, sternal fracture did not occur in the simulation, making it possible to assess the effectiveness of chest protective gear. However, THUMS cannot be used to measure clinical diagnosis or temporary conditions, such as flail chest, real-time chest deflection, and deoxygenation. Furthermore, rubber protective gear from the simulation causes more pneumothorax in the 50th percentile male THUMS due to an increase in lung pressure from approximately 75 up to 83 percent that exceed 10 kPa of human tolerance limit, while decreasing overall rib strain and maximal rib deflection in the handlebar-attacked position. Rib deflections are measured by subtracting each rib's anterior-posterior position in caged ribs, and the float ribs (11th and 12th ribs) are not considered as shown in **Figure 13**. The rib strain contours with and without the protective gear also are measured as shown in **Figure 14**.

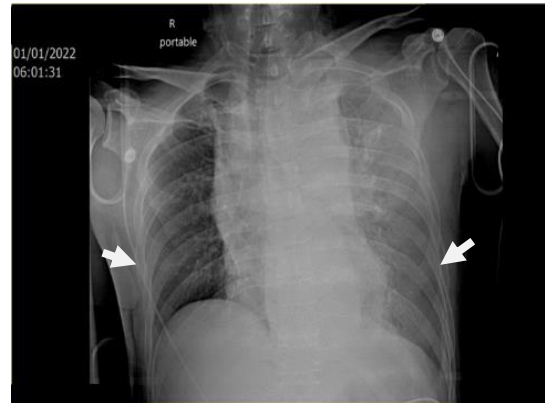


Fig. 12 Chest x-ray of male actual case

In comparing an actual female case to a 5th percentile female test (representing average life-threatening female configuration), the impact of handlebar at the left front chest produced similar results in the THUMS simulation. Since rib deflections in the 5th female were subtracted only from anterior left to posterior right sides (The impacted position and its opposite side), and float ribs were not considered in the model, the different rib deflection measurement in a female is obtained from different attacked position from a male. Therefore, the 5th percentile female's rib deflection that was measured from frontal (anterior) left and posterior right of rib cage is shown in **Figure 15**. The actual female case is a 52-year-old female motorcyclist with 155 cm height underwent motorcycle against four-wheeler vehicle collision, she was categorized to AIS 5 with hypovolemic shock and was early resuscitated at scene. However, soon after resuscitation, the patient was dead before reaching the hospital. The later autopsy result showed closed fracture of left 3rd -7th ribs with left hemopneumothorax. Similarly, after data collection and evaluation with PC-crash simulation, the handlebar was found

to be harmful part and the middle chest was attacked by the handlebar. However, left 6th rib fracture was not observed in the THUMS simulation. Despite the intact 6th rib cortex, the 8th-9th rib fractures were detected. Both lungs pneumothorax was found in the THUMS simulation through the measured lung pressure that reduced from approximately 87 to 77 percent of exceeding human tolerance limit of 10 kPa with and without the protective gears respectively. And the rib strain contour is shown in **Figure 16**, while only left lung pneumothorax was diagnosed in the actual case. However, hemothorax and hypovolemic shock cannot be obtained from the simulation.

In the 50th percentile male THUMS, applying the rubber chest protective gear leads to increase in lung pressure and some rib deflection due to load distribution, while decreasing overall rib fracture tendency as shown in **Figure 13** and **Figure 14**. The more localized the force acting on the ribs, the greater the tendency for specific rib fractures. In contrast, the 5th percentile female was tested only for left front chest impact, and the rubber chest protective gear reduced overall rib strain, both lungs pressure and maximal rib deflection, hence decreasing overall rib fracture tendency.

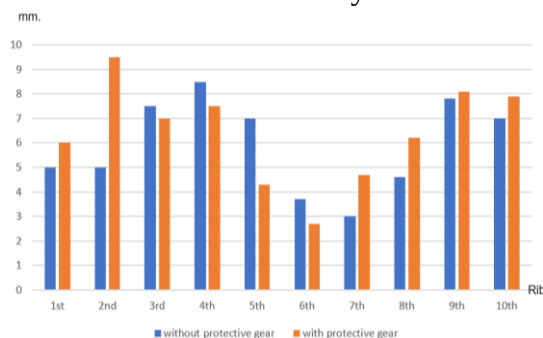


Fig. 13 50th percentile male's left ribs deflection

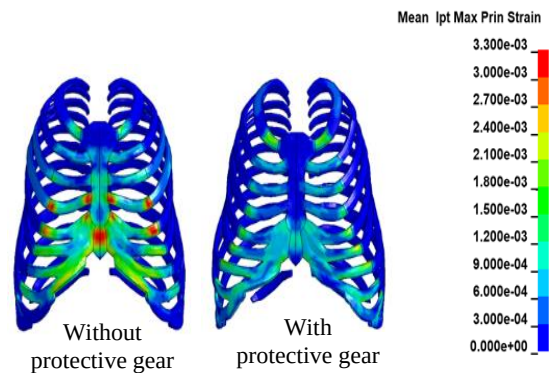


Fig. 14 50th percentile male's rib stain without and with chest protective gear

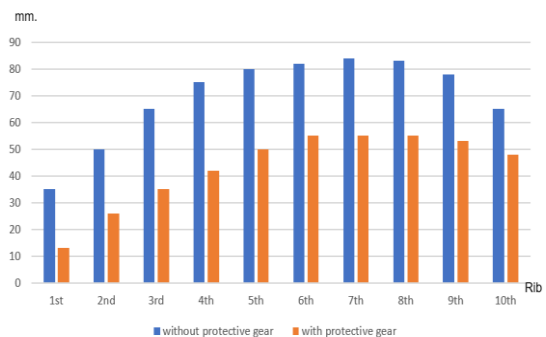


Fig. 15 5th percentile female's rib deflection

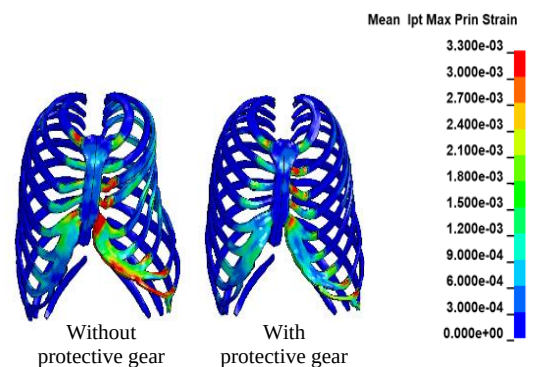


Fig. 16 5th percentile female's rib stain without and with chest protective gear

As shown in **Figure 13** and **Figure 14**, the THUMS simulation in 50th percentile male showed that rubber chest protective gear decrease left 3rd, 4th, 5th,

6th ribs deflection but increase other left ribs' deflection. For the 5th percentile female, the results showed that rubber chest protective gear decreases all rib deflections. Especially, the 2nd -5th rib deflections are decreased from more to less than the lower performance limit (less than 50% risk of AIS score ≥ 3) and the 1st rib deflection is decreased from more to less than the upper performance limit (less than 5% risk of AIS score ≥ 3).

7. Discussion and Conclusion

The findings of data statistical analysis show that the side of impact and speed of the collision are the most significant factors in determining the severity of chest injury in motorcyclists' front impact. In addition, the handlebars are the most frequent cause of thoracic injury in both overall and life-threatening cases in kinematic simulations from multibody program. Other factors, such as age, gender, BMI, angle of impact, and type of road, do not significantly affect the severity of chest injury. Further research is recommended to analyze different directions of impact on thoracic injury severity.

In THUMS model, the handlebar was modeled using the properties of a steel bar. However, in real step-through motorcycles, the handlebar is wrapped by rubber coverage. Therefore, results from FE simulation may indicate more injury than the real handlebar. Thus, it should be modelled in future simulations to obtain more realistic results and recommendations for the use of force-absorbing materials in chest protective gears. Additionally, the

design, availability, and applicability of chest protective gear need to be considered.

The use of rubber chest protective gear can reduce rib fracture in the male case but may increase lung pressure due to more impact force distribution and increase most male's rib deflections. The increment of lung pressure under pneumothorax causes lowering body gas exchange, which is more fatal than rib fracture [21]. In the female case, rubber chest cushion reduces all analyzed factors, including ribs fracture, both lung pressure, and all rib deflections. The differences of real female case and THUMS models might come from different localized impact load applying to the chest. However, different physical factors and collision types may result in different outcomes. Therefore, future studies should consider different situations and collision types to create more functional crash worthiness.

Finally, confounding human body factors could not be analyzed in this research due to the fixed properties of THUMS. The approximation was compared to the closest configurations in the real case. However, factors such as bone mass, muscle thickness, underlying conditions, sex hormones, and drug use in actual cases need to be considered in future studies.

8. References

- [1] World Health Organization. (2022, June 20). Road traffic injuries. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>

- [2] TDRI. (2020 November 11). Road Accidents Biggest Health Crisis. [Online]. Available: <https://tdri.or.th/en/2020/11/road-accidents-biggest-health-crisis/>
- [3] V.T. Veysi, V. S. Nikolaou, C. Paliobeis, N. Efstathopoulos and P. V. Giannoudis, "Prevalence of chest trauma, associated injuries and mortality: a level I trauma centre experience," *International Orthopaedics*, vol. 33, no.5, pp. 1425-1433, Mar. 2009.
- [4] M. Yadollahi, A. H. Arabi, A. Mahmoudi, M. Zamani and M. Farahmand, "Blunt thoracic injury mortality and clinical presentation". *Trauma Monthly*, vol.23 no.4, pp. 3-7, Jul. 2018.
- [5] V. Kasantikul, *Motorcycle accident causation and identification of countermeasures in Thailand: Bangkok Study*, 1st ed. Bangkok: K.P. Printing, 2001.
- [6] Lai, X., Ma, C., Hu, J., & Zhou, Q, "Impact direction effect on serious-to-fatal injuries among drivers in near-side collisions according to impact location: Focus on thoracic injuries," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 48, pp. 442-450. Sep. 2012.
- [7] de Rome, L., Ivers, R., Fitzharris, M., Haworth, N., Heritier, S., & Richardson, D. "Effectiveness of motorcycle protective clothing: Riders' health outcomes in the six months following a crash," *Injury*, vol.43, no.12, pp. 2035-2045. Dec. 2012.
- [8] Cheung, R., Shukla, M., Akers, K. G., Farooqi, A., & Sethuraman, U. "Bicycle handlebar injuries—a systematic review of pediatric chest and abdominal injuries," *The American Journal of Emergency Medicine*, vol.51, pp. 13-21. Jan. 2022.
- [9] K. Wilde, A. Tilsen, S. Burzyński and W. Witkowski, "On estimation of occupant safety in vehicular crashes into roadside obstacles using non-linear dynamic analysis," in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Kombornia, Poland, 2019, vol. 285, p. 1-8.
- [10] United Nations Economic Commission for Europe. (2014, January 29) Current injury criteria ECE-R 94 comparison with USNCAP. [Online]. Available: <https://wiki.unece.org/download/attachments/17760977/FI-24-06e.pdf?api=v2>
- [11] W. Wei, "Recommendation for Modifying the Current Testing Standard for PTW Rider Chest Protectors," in *Proceeding of IRCOBI Asia 2020*, Beijing: International Research Council on the Biomechanics of Injury, Beijing, China 2020, pp. 72-75.
- [12] Visa Kharmum, Prakorb Chartpuk, "Finite Element Analysis of Armor Piercing Bullet Penetrating Hard Steel Armor Plate," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no.2, pp.171-185, Jul-Dec. 2022.
- [13] Pariente Jonathan^{1,2}; Boussu François^{1,2}; Veyet Frédéric, "NEW 3D TEXTILE COMPOSITE PROTECTION AGAINST ARMOUR PIERCING AMMUNITIONS,"

- RMUTP Research Journal*, special issue 2014, pp. 109-112, Mar. 2015.
- [14] J. Carmai, S. Koetniyom, S., and Hossain, W. "Analysis of rider and child pillion passenger kinematics along with injury mechanisms during motorcycle crash," *Traffic injury prevention*, vol.20(sup1), pp. S13-S20. May. 2019.
- [15] X. Wang, and X. Ji (2020). "Sample size estimation in clinical research: from randomized controlled trials to observational studies". *Chest*, vol. 158, no.1, pp. S12-S20, Jul. 2020.
- [16] Toyota Motor Cooperation, *THUMS Virtual Human Body: In Toyota Motor Corporation offers Free Access to THUMS Virtual Human Body*, 6th ed. Toyota: Toyota Motor Corporation, 2020.
- [17] Aurimas Kudzinskas, Avery L . Callahan(2022, July 25). Anatomy, Thorax. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557710/>
- [18] Condensed Chart AIS 85 co - ministry of public health. (n.d.). (1995). [Online]. Available: [https://ddc.moph.go.th/uploads/ckeditor2/files/CONDENSED_CHART%20_AIS_85_EB%20\(1\).pdf](https://ddc.moph.go.th/uploads/ckeditor2/files/CONDENSED_CHART%20_AIS_85_EB%20(1).pdf)
- [19] The European New Car Assessment Programme: Euro NCAP. (2023, April 12). EuroNCAP. [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en>
- [20] P. Logan, "A review of common motorcycle collision mechanism of injury," *EFORT open reviews*, vol. 5, pp.544-548.Sep. 2020.
- [21] Won-Il Choi, "Pneumothorax," *Journal of Tuberculosis and Respiratory diseases*, vol. 76, no.5, pp. 99-104, Mar. 2014.

การศึกษาอิทธิพลของแหวนต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อของเตาแก๊ส KB-5 โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พัฒน์พงษ์ แก้วโพธิ์ และ มานะ วิฆางาม*

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

รับบทความ 5 พฤศจิกายน 2565 แก้ไขบทความ 23 พฤษภาคม 2566 ตอรับบทความ 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของแหวนต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อของเตาแก๊ส KB-5 โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และการทดลอง ซึ่งแบบจำลองถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม ANSYS 21 ในรูปแบบ 3 มิติ โดยศึกษาอิทธิพลของแหวนต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อ การถ่ายเทความร้อนสู่หม้อของเตาที่มีแหวน คือ Model B และ Model C เปรียบเทียบกับเตาแบบดั้งเดิมที่ไม่มีแหวนคือ Model A และทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ความร้อนรวมจากการจำลองและประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการทดลอง จากการศึกษาพบว่าผลลัพธ์ความร้อนรวมจากแบบจำลองและประสิทธิภาพเชิงความร้อนทดลองของเตาที่มีแหวนทั้งสองเตาดีกว่าเตาที่ไม่มีแหวน โดย ผลลัพธ์ความร้อนรวมของ Model C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 24.40 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร รองลงมาคือ Model B และ Model A มีผลลัพธ์ความร้อนรวมเท่ากับ 21.42 และ 18.32 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ หรือ Model C และ Model B มีผลลัพธ์ความร้อนรวมเพิ่มขึ้น 24.92 และ 14.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ Model C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 45.80 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ Model B และ Model A มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 42.40 และ 39.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หรือ Model C และ Model B มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น 14.52 และ 7.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A ซึ่งแสดงว่าเตาที่มีแหวน (Model C) มีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อดีที่สุด

คำสำคัญ : แหวน; เตาแก๊ส KB-5; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; การถ่ายเทความร้อน

A Study on Effect of Ring on Behavior of Heat Transfer to Pot of KB-5 Cooking Stove by Computational Fluid Dynamics

Pattanapong Kaewpho and Mana Wichangarm*

Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen campus
150 Srichan Road Muang, Khankaen 40000

Received 5 November 2022; Revised 23 April 2023; Accepted 29 June 2023

Abstract

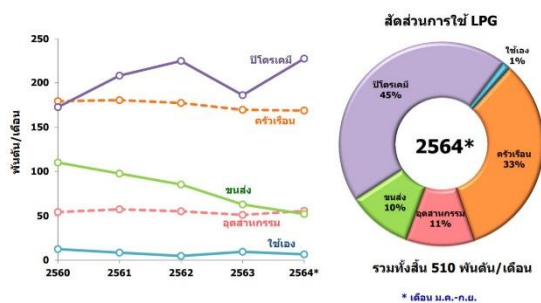
The objective of this research is to study the effect of the ring on the behavior of heat transfer to the pot of a KB-5 cooking stove by computational fluid dynamics and experiments. The simulation model was using ANSYS 21 in 3D-model. The effect of the ring on heat transfer behavior to the pot was investigated. Heat transfer to the pot of the stove with ring, being Model B and Model C, was compared with the original stove, the stove without ring (Model A), using total heat flux from simulation and thermal efficiency from experiment. In this study, it was found that the total heat flux from simulation and the thermal efficiency from the experiment of two stoves with rings were better than those of stoves without rings. Model C has the highest total heat flux of 24.40 kW/m^2 , followed by Model B and Model A with total heat fluxes of 24.42 and 18.32 kW/m^2 , respectively. Model C and Model B have a total heat flux increase of 24.92 and 14.47% , respectively, compared to Model A. Model C has the highest thermal efficiency of 45.80% , followed by Model B and Model A with thermal efficiency of 42.40 and 39.15% , respectively. Model C and Model B have a thermal efficiency increase of 14.52 and 7.67% , respectively, compared to Model A. Thus, heat transfer to the pot of the stove with a ring (Model C) has the highest performance.

Keywords : Ring; KB-5 Cooking Stove; Computational Fluid Dynamics; Heat Transfer

* Corresponding Author. Tel.: +66 4323 4756, E-mail Address: mana.wi@rmuti.ac.th

1. บทนำ

การประกอบอาหารสำหรับบริโภคในครัวเรือนของประเทศไทยนิยมใช้เชื้อเพลิงหลายรูปแบบ เช่น ฟืน ถ่านไม้ ไฟฟ้า แก๊สแอลพีจี แก๊สชีวมวล เป็นต้น ในกรณีของการใช้แก๊สแอลพีจี (Liquefied Petroleum Gas, LPG) เป็นเชื้อเพลิงนั้น เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางเพราะมีความสะดวก ใช้งานง่าย มีความปลอดภัย เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้หลายปีที่ผ่านมามีการใช้ LPG ในภาคครัวเรือนสูงเป็นอันดับต้นๆ ของปริมาณการใช้ LPG รวมในประเทศไทย Energy Policy and Planning office (EPPO) Ministry of Energy [1] ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นหากลดการใช้ LPG ในส่วนของภาคครัวเรือนได้จะช่วยลดการปนเปื้อนการใช้ LPG ในประเทศไทยได้ การใช้ LPG กับอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะช่วยลดปริมาณการใช้ LPG ได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่สำคัญในการใช้ LPG ประกอบอาหารในครัวเรือนคือเตาแก๊ส หากเตาแก๊สมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงจะช่วยประหยัด LPG ได้ ซึ่งเตาแก๊สที่นิยมใช้ในครัวเรือน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 สถิติการใช้ปริมาณ LPG ในประเทศไทย [1]

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามที่จะพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนเตาแก๊สอย่างต่อเนื่อง อาทิ Jugjai and Sanitjai [2] ได้ทำการศึกษาดัชนีที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนใน Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB) โดยแนวคิดเป็นการออกแบบสำหรับเตาใน

อนาคต Makmool et al. [3] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและการวิเคราะห์โดย PIV ของเตาในประเทศไทย Rungsimuntuchat [4] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุพูนเพื่อประหยัดพลังงานในเตาแก๊สสูง ต้ม Sudarno et al. [5] ทำการศึกษาผลขององค์ประกอบ EMBER เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา LPG Khan and Saxena [6] ศึกษาประสิทธิภาพของเตา LPG โดยใช้หัวเตาแบบต่าง ๆ Tamir et al. [7] ศึกษาและปรับปรุงเปลวไฟในการปรุงอาหารโดยใช้เปลวไฟแบบหมุนวน Wichangarm et al. [8] ทำการศึกษาโดยการจำลองพฤติกรรมการไหลในเตาแก๊สแบบประหยัดพลังงาน Punchapong et al. [9] ศึกษาโดยการจำลองพฤติกรรมการไหลของเตาชนิดประหยัดแก๊สโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Matthujak et al. [10] ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สเวอร์ติคอลพอร์ตด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Chimchom et al. [11] ศึกษาโดยการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Wichangarm et al. [12] ศึกษาโดยการจำลองการเผาไหม้ของเตา LPG Matthujak et al. [13] ศึกษาอิทธิพลของการไหลแบบหมุนวนต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาประหยัดพลังงาน Wichangarm et al. [14] ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา LPG โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Aroonjarattham [15] ศึกษาพารามิเตอร์ของเตาแก๊สต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน เป็นต้น จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นจะมีทั้งการศึกษาโดยการทดลอง การศึกษาโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และการศึกษาโดยการทดลองร่วมกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งพบว่าการศึกษาแต่ละวิธีสามารถพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สให้สูงขึ้นได้ทั้งสิ้น แต่การศึกษาโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นนอกจากจะให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองแล้วยังสามารถแสดงในรูปของแถบสีอุณหภูมิเวกเตอร์ความเร็ว หรือพาทไลน์ความเร็ว เป็นต้น ซึ่งทำ

ให้เห็นพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน เป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊ส

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Matthujak et al. [10], Matthujak et al. [13], Wichangarm et al. [14] และ Wichangarm et al. [16] ที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเผาไหม้ พฤติกรรมการไหลของเตา LPG ซึ่งศึกษาโดยวิธีการทดลองร่วมกับวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าผลที่ได้จากวิธีการทดลองมีความสอดคล้องกับวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ โดยพิจารณาจากการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อเหนือหัวเตาในรูปแบบของ พลักซ์ความร้อนรวม โดยพบว่าเตาที่มีการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อได้ดีที่สุดในแบบจำลองส่งผลให้แนวโน้มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาในการทดลองดีที่สุดด้วย

จากการศึกษา Wichangarm et al. [14] ที่ศึกษาผลของแหวนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊ส และการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อโดยวิธีการทดลองและวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าเตาแก๊สที่มีแหวนครอบหุ้มเผาไหม้จะมีการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นหรือมี พลักซ์ความร้อนรวมสูงขึ้น และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเตาแก๊สที่ไม่มีแหวนครอบหุ้มเผาไหม้เพราะแหวนที่ครอบหุ้มเผาไหม้นอกจากจะช่วยในการประกอบเปลวไฟสู่กันหม้อแล้ว ยังช่วยป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ด้วย และเป็นที่ยอมรับว่าเตาแต่ละเตาก็จะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นแหวนที่จะนำมาครอบหุ้มเผาไหม้ของเตาก็จะแตกต่างกันออกไป การออกแบบแหวนจึงสำคัญ

ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของแหวนต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตา KB-5 โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลอง



รูปที่ 2 เตาแก๊ส KB-5

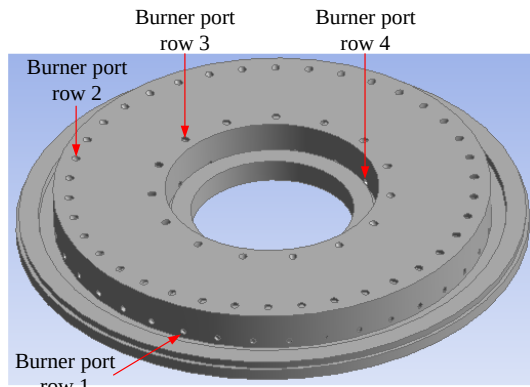
2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของแหวนต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊ส KB-5 โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลอง เตาแก๊ส KB-5 ที่นำมาศึกษามีจำนวนรูหัวเผา 4 แถว รูหัวเผาแถวที่ 1 (Burner port row 1) เป็นรูหัวเผาที่อยู่บนสุด มีจำนวนรูหัวเผา 38 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร รูหัวเผาแถวที่ 2 (Burner port row 2) มีจำนวนรูหัวเผา 38 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร รูหัวเผาแถวที่ 3 (Burner port row 3) มีจำนวนรูหัวเผา 15 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และรูหัวเผาแถวที่ 4 (Burner port row 4) มีจำนวนรูหัวเผา 15 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 ก)

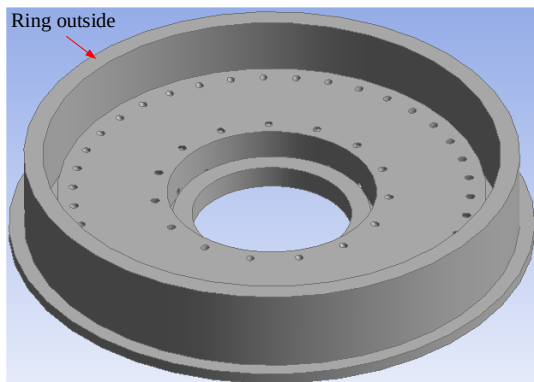
ในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อของเตาแก๊ส KB-5 จะทำการศึกษาหัวเตาแก๊สที่ต่างกัน 3 รูปแบบคือ

1. Model A คือหัวเตาแบบดั้งเดิม (ไม่มีแหวน) ดังแสดงในรูปที่ 3 ก)
2. Model B คือหัวเตาที่มีแหวนครอบด้านนอก (Ring outside) ซึ่งแหวนครอบด้านนอก มีความสูง 25 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สามารถสวมเข้ากับหัวเตาได้พอดี ดังแสดงในรูปที่ 3 ข)
3. Model C คือหัวเตาที่มีแหวนครอบด้านนอก (Ring outside) และแหวนครอบด้านใน (Ring inside) ซึ่งแหวนครอบด้านนอก มีขนาดเท่ากับแหวนครอบของ

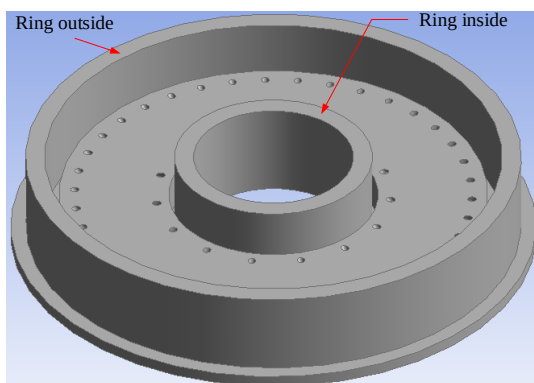
Model B ในส่วนแหวนรอบด้านใน มีความสูง 25 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สามารถสวมเข้ากับช่องอากาศส่วนที่สองได้พอดี ดังแสดงในรูปที่ 3 ค)



ก) หัวเตาดั้งเดิม (Model A)



ข) หัวเตาที่มีแหวนรอบด้านนอก (Model B)

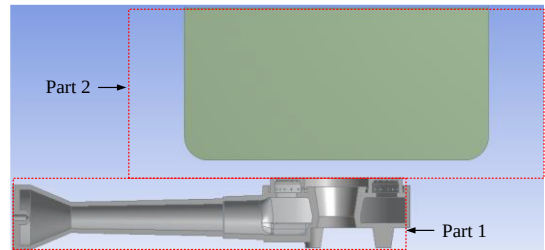


ค) หัวเตาที่มีแหวนรอบด้านนอกและด้านใน (Model C)

รูปที่ 3 หัวเตาแบบต่างๆ

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งการวิเคราะห์โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ออกเป็น 2 ส่วน คือ Part 1 และ Part 2 ดังแสดงในรูปที่ 4 เหมือนการศึกษาของ Chimchom et al. [11], Matthujak et al. [13] และ Wichangarm et al. [14]



รูปที่ 4 การแบ่งขอบเขตพื้นที่การศึกษา

2.1.1 CFD Part 1

การศึกษาวิจัย CFD Part 1 เป็นการจำลองในรูปแบบ 3 มิติ (3-D Model) และพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Steady State) โดยไม่มีการเผาไหม้ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อนำผลลัพธ์การไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และอัตราส่วนเชิงมวล (Mass Fraction) ของ โพรเพน บิวเทน ออกซิเจน และไนโตรเจน ไปกำหนดในเงื่อนไขขอบเขตของ Part 2 ความน่าเชื่อถือหรือความถูกต้องของการจำลอง Part 1 นี้จะยืนยันผลของความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณทางออกของรูหัวเผาจากแบบจำลองและการทดลอง เหมือนงานวิจัยของ Wichangarm et al. [14] สำหรับขอบเขตพื้นที่ของไหลภายในเตาแก๊ส KB-5 จะสร้างในรูปแบบ 3 มิติ (3D-Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาจริง

รูปที่ 5 แสดงกริดและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา Part 1 โดยเงื่อนไขขอบเขตทางเข้าของ LPG กำหนดเป็น Pressure inlet (LPG) ความดัน LPG เท่ากับ 0.4 บาร์ เท่ากับความดันของ LPG ที่ใช้ในการทดลอง บริเวณด้านข้างทางเข้า LPG (Primary air) กำหนดเป็น Pressure inlet (air) ความดันอากาศ เท่ากับความดันบรรยากาศ ผนังเตา กำหนดเป็น Wall

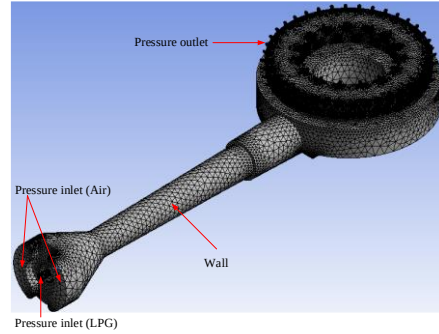
และรูหัวเผาทางออก กำหนดเป็น Pressure outlet (air) ความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG k- ϵ Model คำนวณร่วมกับสมการ Species transport และเงื่อนไขอื่นดังแสดงในตารางที่ 1

จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสมกับการศึกษาใน Part 1 ซึ่งทำการศึกษากิริยรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral grid) ที่มีความละเอียดแตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 856,358, 959,788, 1,125,536, 1,545,661 และ 1,842,325 อิลิเมนต์ และเมื่อเทียบผลการจำลองกับการทดลอง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.68, 6.24, 5.70, 5.68 และ 5.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้กริดที่มีความละเอียด 1,125,536 อิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5

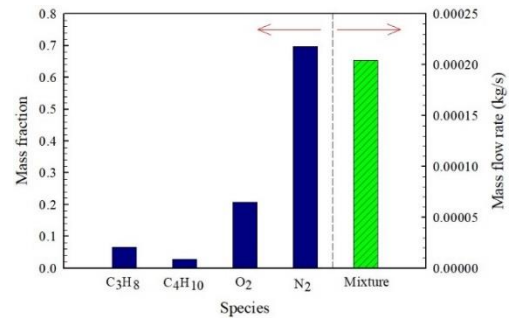
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD Part 1

Condition			Model
Inlet	Boundary Condition	LPG gauge pressure inlet = 0.4 bar Air gauge pressure inlet = 0 bar	
Outlet	Boundary Condition	Air gauge pressure outlet = 0 bar	
Solver			Pressure Base
Time			Steady State
Turbulence Model			RNG k- ϵ Model
Other			Species transport

เมื่อทำการคำนวณโดย CFD เหมือนการศึกษาของ Chimchom et al. [11], Matthujak et al. [13] และ Wichangarm et al. [14] จะได้อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และ อัตราส่วนเชิงมวล (Mass Fraction) ของส่วนผสมที่ออกจากรูหัวเผาที่ความดัน LPG เท่ากับ 0.4 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 และข้อมูลนี้จะนำไปป้อนในเงื่อนไขขอบเขตของ CFD Part 2 ในหัวข้อ 2.1.2



รูปที่ 5 กริดและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา Part 1



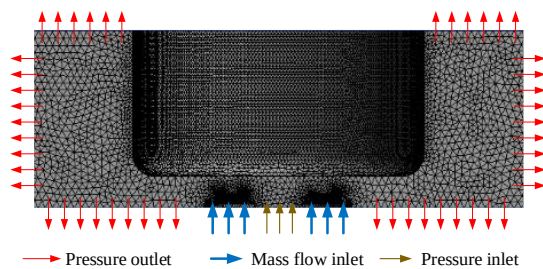
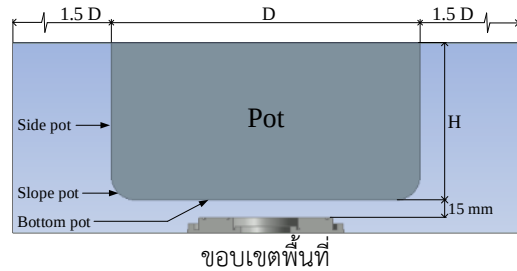
รูปที่ 6 อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และ อัตราส่วนเชิงมวล (Mass Fraction) ของส่วนผสมที่ออกจากรูหัวเผาที่ความดันแก๊ส 0.4 บาร์

2.1.2 CFD Part 2

การศึกษาวิจัย CFD Part 2 เป็นการจำลองในรูปแบบ 3 มิติ (3-D Model) และพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Steady State) โดยมีการเผาไหม้ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อศึกษา การกระจายอุณหภูมิ การกระจายความเร็ว และการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อ ไบวิเคราะห์เพื่อหา รูปทรงของแหวนที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊ส KB-5

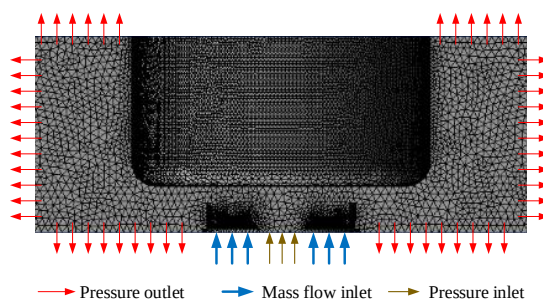
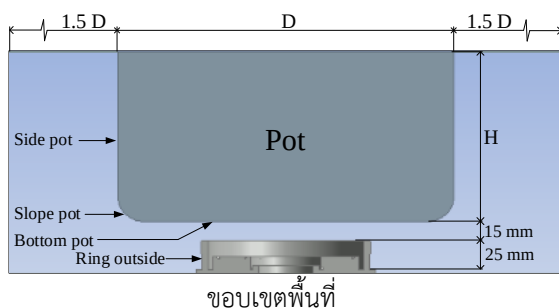
ความน่าเชื่อถือหรือความถูกต้องของการจำลอง Part 2 นี้จะยืนยันผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณห้องเผาไหม้จากแบบจำลองและการทดลอง เหมือนงานวิจัยของ Wichangarm et al. [14] จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสมกับการศึกษาใน Part 2 ซึ่งทำการศึกษากิริยรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral grid) ที่มีความละเอียดแตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 976,363, 1,273,419, 1,502,664, 1,647,691 และ 1,842,325

1,914,726 อิลลิเมนต์ และเมื่อเทียบผลการจำลองกับการทดลอง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.41, 6.15, 5.48, 5.42 และ 5.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้กริดที่มีความละเอียด 1,502,664 อิลลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ก)



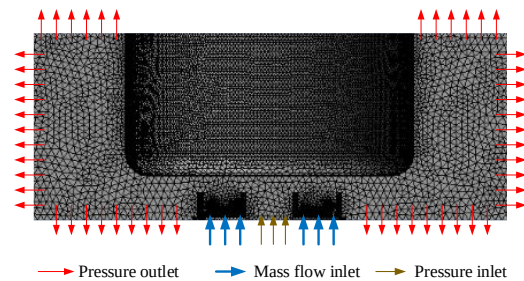
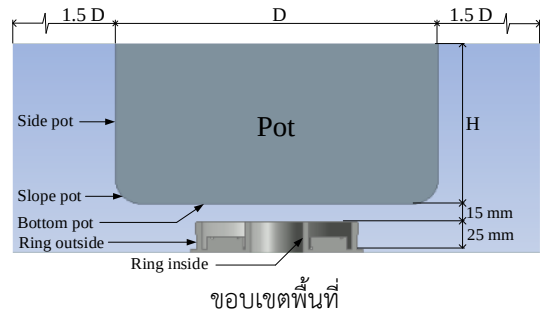
กริดและเงื่อนไขขอบเขต

ก) Model A



กริดและเงื่อนไขขอบเขต

ข) Model B



กริดและเงื่อนไขขอบเขต

ค) Model C

รูปที่ 7 ขอบเขตพื้นที่ กริดและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา Part 2

สำหรับของเขตพื้นที่ของของไหลบริเวณหัวเตา และบริเวณหม้อเหนือหัวเตา จะสร้างในรูปแบบ 3 มิติ (3D-Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาและหม้อเหนือหัวเตาจริง โดย Model A วางหม้อสูง 15 มิลลิเมตร จากระดับหัวเตา เท่ากันทั้งการทดลองและ CFD ดังแสดงในรูปที่ 7 ก) Model B วางหม้อสูง 15 มิลลิเมตร จากระดับวงแหวน โดยแหวนจะวางที่ความสูงระดับเดียวกับรูหัวเตา เท่ากันทั้งการทดลองและ CFD ดังแสดงในรูปที่ 7 ข) และ Model C วางหม้อสูง 15 มิลลิเมตร จากระดับวงแหวน โดยแหวนจะวางที่ความสูงระดับเดียวกับรูหัวเตา เท่ากันทั้งการทดลองและ CFD ดังแสดงในรูปที่ 7 ค)

รูปที่ 7 แสดงขอบเขตพื้นที่ กริดและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา Part 2 โดยเงื่อนไขขอบเขตทางเข้าของอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และอัตราส่วนเชิงมวล (Mass Fraction) ของ โพรเพน บิวเทน ออกซิเจน และไนโตรเจน (ทางออกของรูหัวเตา)

กำหนดเป็น Mass Flow Inlet of Mixture ที่ได้จาก Part 1 บริเวณด้านข้างทางเข้าของอากาศส่วนที่สอง (Secondary air) กำหนดเป็น Pressure inlet (air) ความดันอากาศเท่ากับความดันบรรยากาศ อากาศรอบๆ หัวเตาและหม้อ กำหนดเป็น Pressure outlet (air) ความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ผนังเตา กำหนดเป็น Wall (Steel) และผนังหม้อ กำหนดเป็น Wall (Aluminum) เนื่องจากปัญหาของการจำลองของงานวิจัยนี้คล้ายกับการศึกษาของ Chimchom et al. [11], Matthujak et al. [13] และ Wichangarm et al. [14] ที่เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็นแบบ Standard k- ϵ Model ซึ่งพฤติกรรมการเผาไหม้ พฤติกรรมการไหลต่างๆ รวมถึงขนาดของเตาที่ศึกษามีความใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k- ϵ Model คำนวณร่วมกับสมการ การเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation Model และเงื่อนไขอื่นดังแสดงในตารางที่ 2

เงื่อนไขขอบเขตและกริดที่ใช้ในการคำนวณ สำหรับ CFD Part 2 เป็นกริดรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral Grid) ทั้ง 3 Model ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่ง Model A, Model B และ Model C มีกริดจำนวน 1,502,664, 1,645,723, และ 1,721,451 อีลิเมนต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของ CFD Part 2 เหมือนการศึกษาของ Matthujak et al. [13] และ Wichangarm et al. [14] โดยกำหนดให้ขอบเขตพื้นที่ของอากาศรอบๆ หัวเตาและหม้อเหนือหัวเตา กำหนดเป็น Pressure Outlet หม้อเหนือหัวเตาเป็นกำหนดเป็นหม้ออะลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 260 มิลลิเมตร และมีความสูง (H) เท่ากับระดับน้ำในหม้อที่ใช้ในการทดลอง เท่ากับ 130 มิลลิเมตร กำหนดให้ผนังหม้อมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 395 เคลวิน งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของ LPG ในห้องเผาไหม้ ซึ่งได้กำหนดระยะห่างจากผนังหม้อเท่ากับ 1.5 D

สำหรับผนังหม้อและผนังหัวเตา กำหนดเป็น Wall รูหัวเผา กำหนดเป็น Mass Flow Inlet สำหรับ Mass Fraction ของ C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 และ O_2 และ Mass Flow Rate ของ Mixture (แอลพีจีผสมอากาศ) ได้จากผลการคำนวณ CFD Part 1 ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งคำนวณร่วมกับเงื่อนไขของการคำนวณอื่น ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการคำนวณ CFD Part 2

Condition		Model
Inlet Condition	Boundary	Mass Flow Inlet of Mixture (From CFD Part 1)
Inlet Condition	Boundary	Mass Fraction of C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 and O_2 (From CFD Part 1)
Outlet Condition	Boundary	Pressure Outlet (Air Gauge, Pressure Outlet = 0 Pa)
Solver		Pressure Base
Time		Steady State
Turbulence Model		Standard k- ϵ Model
Radiation Model		Discrete Ordinates (DO) Radiation Model
Combustion Model		Eddy Dissipation Model

สมการที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษานี้ ประกอบด้วย ANSYS [17]

สมการอนุรักษ์มวล ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการที่ (2)

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังสมการที่ (3)

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

สมการการเผาไหม้

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการการเผาไหม้ชนิด

Eddy Dissipation Combustion Model ดังสมการที่ (4)

$$R_{i,r} = v_{i,r}' M_{w,i} A_p \frac{\varepsilon}{k} \min_R \frac{YR}{v_{R,r}' M_{W,R}}$$

$$R_{i,r} = v_{i,r}' M_{w,i} A B_p \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v_{j,r}'' M_{W,j}} \quad (4)$$

สมการการแผ่รังสีความร้อน ดังสมการที่ (5)

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (5)$$

สมการพลั๊กซ์ความร้อน ANSYS [17] และ Matthujak et al. [10] ดังสมการที่ (6-9)

$$q_{flux} = \frac{q_{total}}{A_{total}} = \frac{q_{bottompot} + q_{slopepot} + q_{sidepot}}{A_{total}} \quad (6)$$

$$q_{bottompot} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{\Delta_x} + \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

$$q_{slopepot} = 2\pi LK \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{\ln(r_{in} - r_{out})} \right) \quad (8)$$

$$q_{sidepot} = 2\pi LK \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{\ln(r_{in} - r_{out})} \right) \quad (9)$$

โดยที่

$q'' = \dot{W}_A \Delta H$ หมายถึง พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่อหน่วยปริมาตรของของไหล

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$ หมายถึง ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อน

ρ หมายถึง ความหนาแน่น

k หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

c หมายถึง ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

R หมายถึง อัตราโมลาร์ของ Arrhenius

v' หมายถึง สัมประสิทธิ์สตรอยของสารตั้งต้น

M หมายถึง มวลโมเลกุล

k หมายถึง พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน

ε หมายถึง อัตราการกระจายตัว

v'' หมายถึง สัมประสิทธิ์สตรอยของสารผลิตภัณฑ์

A หมายถึง ค่าคงที่ในการทดลองเท่ากับ 4.0

B หมายถึง ค่าคงที่ในการทดลองเท่ากับ 0.5

Y หมายถึง เศษส่วนมวล (Mass Fraction)

I หมายถึง Radiation Intensity (แปรผันตามตำแหน่งและทิศทาง)

$\vec{r}$ หมายถึง ตำแหน่งเวกเตอร์

$\vec{s}$ หมายถึง ทิศทางของเวกเตอร์ในระบบพิกัดแกน

$\vec{s}'$ หมายถึง การกระจายตัวของเวกเตอร์ในระบบพิกัดแกน

a หมายถึง สัมประสิทธิ์การดูดซับ

σ_s หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายตัว

n หมายถึง ดัชนีการหักเหแสง

T หมายถึง อุณหภูมิ

Φ หมายถึง Phase Function

Ω'	หมายถึง Solid Angle
q_{flux}	หมายถึง ฟลักซ์ความร้อน, วัดต่อตารางเมตร
q_{total}	หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด, วัดต่อ
$q_{bottompot}$	หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณก้นหม้อ, วัดต่อ
$q_{slopepot}$	หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณส่วนโค้งของหม้อ, วัดต่อ
$q_{sidepot}$	หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณส่วนโค้งของหม้อ, วัดต่อ
A_{total}	หมายถึง ผลรวมพื้นที่หน้าตัดของหม้อทั้งหมด, ตารางเมตร
A	หมายถึง พื้นที่หน้าตัด, เมตร
Δx	หมายถึง ความหนาของผนังหม้อ, เมตร
L	หมายถึง ความสูงของระดับน้ำในหม้อ, เมตร
ε	หมายถึง ค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ
σ	หมายถึง ค่าคงที่ของสเตฟาน, $W/m^2 \cdot K^4$
T	หมายถึง อุณหภูมิ, เคลวิน
r	หมายถึง รัศมีของหม้อ, เมตร
K	หมายถึง ค่าการนำความร้อนของวัสดุ, วัดต่อตารางเมตร-เคลวิน

คิดผลฟลักซ์ฟลักซ์ความร้อนรวมของการถ่ายเทความร้อนโดยพิจารณาการนำ และแผ่รังสีความร้อน สำหรับพื้นที่ผิวของหม้อที่ใช้ในการคำนวณของ Model A, Model B และ Model C จะใช้พื้นที่ด้านล่างของหม้อ (Bottom pot) ส่วนโค้งของหม้อ (Slope pot) และด้านข้างของหม้อ (Side pot) ดังแสดงในรูปที่ 7ก), 7ข) และ 7ค) ตามลำดับ

2.1.3 การทดลอง

รูปที่ 8 แสดงไดอะแกรมการทดลอง เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน การทดสอบ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้มาตรฐานเยอรมัน DIN-EN 203-2 German standards and technical rules [18] ซึ่งใช้หลักการต้มน้ำ (Water boiling test) ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

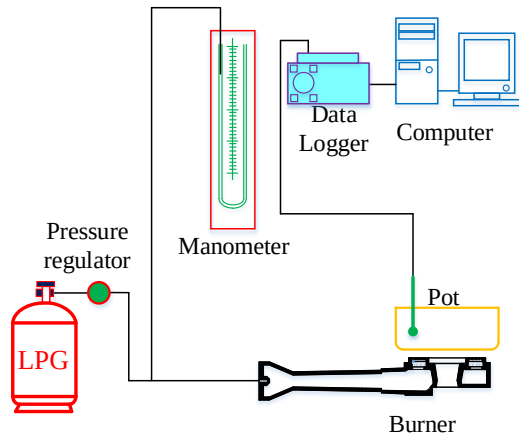
1. อุณหภูมิให้ร้อนโดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
 2. เลือกขนาดหม้อ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 เซนติเมตร เติมน้ำปริมาณ 6.1 กิโลกรัม ลงในหม้อ พร้อมทั้งวัดและบันทึกอุณหภูมิน้ำก่อนต้ม
 3. นำหม้อดังกล่าวตั้งบนเตา จุดไฟที่หัวเตา ปรับความดันแก๊สแอลพีจีเท่ากับ 0.4 บาร์ พร้อมทั้งจับเวลา
 4. ทำการต้มน้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนกระทั่งถึง 90 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ
 5. ในการศึกษานี้จะทำการทดลองทั้งหมด 3 กรณี คือ 1. กรณีที่ไม่มีแหวน (เตาดั้งเดิม) 2. กรณีที่มีแหวนครอบเฉพาะด้านนอก (Ring Outside) และ 3. กรณีที่มีแหวนครอบทั้งด้านนอกและด้านใน (Ring Outside and Ring Inside) แต่ละกรณีทดสอบที่ความดันแก๊สแอลพีจี 0.4 บาร์ เพื่อความถูกต้องของข้อมูลในแต่ละกรณีจะทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และทำการทดสอบที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน
- สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊ส ดังสมการที่ (10)

$$\eta_{th} = \frac{m_{water} \times Cp_{water} \times (363 - T_{water,i})}{\dot{m}_g \times LHV_{xt}} \quad (10)$$

โดยที่

η_{th}	หมายถึง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, เปอร์เซนต์
m_{water}	หมายถึง มวลของน้ำ, กิโลกรัม
Cp_{water}	หมายถึง ค่าความจุความร้อนของน้ำ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวิน

$T_{water,i}$	หมายถึง อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น, เคลวิน
$\dot{m}_g$	หมายถึง อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส, กิโลกรัมต่อวินาที
LHV	หมายถึง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, กิโลจูลต่อกิโลกรัม
t	หมายถึง เวลาที่ใช้ในการทดลอง, วินาที



รูปที่ 8 ไดอะแกรมการทดลอง

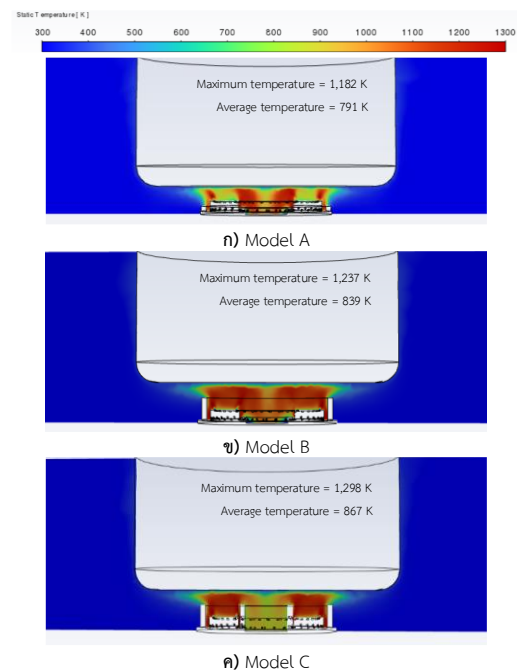
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

รูปที่ 9 แสดงเค้าโครงของอุณหภูมิจาก CFD ของเตาแบบต่างๆ

จากรูปที่ 9 ก) Model A ซึ่งเป็นหัวเตาแบบดั้งเดิมที่ไม่มีแหวนครอบหัวเตา พบว่า อุณหภูมิสูงจะกระจายตัวบริเวณอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) เนื่องจากไม่มีแหวนครอบห้องเผาไหม้ จึงทำให้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงที่พุ่งออกจากรูหัวเตา เมื่อพุ่งชนหม้อเหนือหัวเตาแล้วจะเกิดการม้วนตัวลงมาที่บริเวณช่องของอากาศส่วนที่สองและฟุ้งกระจายออกด้านนอกห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนบริเวณดังกล่าว ซึ่ง Model A มีอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 791 เคลวิน และ 1,182 เคลวิน ตามลำดับ

จากรูปที่ 9 ข) Model B ซึ่งมีแหวนครอบด้านนอกของห้องเผาไหม้ พบว่า อุณหภูมิสูงจะกระจายตัวบริเวณห้องเผาไหม้และมีบางส่วนกระจายตัวที่ช่อง

อากาศส่วนที่สอง เนื่องจากแหวนครอบด้านนอกของเผาไหม้จึงทำให้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิที่พุ่งออกจากรูหัวเตา เมื่อพุ่งชนหม้อเหนือหัวเตาแล้วจะเกิดการม้วนตัวในห้องเผาไหม้และมีบางส่วนม้วนตัวลงมาที่ช่องอากาศส่วนที่สอง ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนบริเวณช่องอากาศส่วนที่สอง แต่เปลวไฟไม่ฟุ้งกระจายออกด้านนอกห้องเผาไหม้เหมือน Model A เนื่องจากมีแหวนครอบห้องเผาไหม้ด้านนอกคอยประคองเปลวไฟ ซึ่ง Model B มีอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 839 เคลวิน และ 1,237 เคลวิน ตามลำดับ หรือ Model B มีอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น 5.72 เปอร์เซ็นต์ และ 4.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A



รูปที่ 9 เส้นเค้าโครงของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 9 ค) Model C ซึ่งเป็นแบบที่มีแหวนครอบทั้งด้านนอกและด้านในของห้องเผาไหม้ พบว่า อุณหภูมิที่สูงจะกระจายตัวบริเวณห้องเผาไหม้เท่านั้น เนื่องจากแหวนครอบรอบนอกและด้านในของห้องเผาไหม้ จึงทำให้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิที่สูงที่พุ่งออกจาก

รูหัวเผา เมื่อชนหม้อเหนือหัวเตาแล้วจะเกิดการมันตัวลงมาที่ห้องเผาไหม้ แต่เปลวไฟไม่พุ่งกระจายออกด้านนอกห้องเผาไหม้และช่องอากาศส่วนที่สอง เหมือน Model A และ Model B เนื่องจากมีแหวนครอบห้องเผาไหม้ด้านนอกและด้านในห้องเผาไหม้ครอบเปลวไฟ ซึ่ง Model C มีอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 867 เคลวิน และ 1,298 เคลวิน ตามลำดับ หรือ Model B มีอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น 8.76 เปอร์เซ็นต์ และ 8.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A

รูปที่ 10 แสดงพาทไลน์ความเร็วจาก CFD ของเตาแบบต่างๆ พบว่าแหวนครอบห้องเผาไหม้มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ โดย Model A พฤติกรรมของเปลวไฟที่พุ่งด้วยความเร็วสูงจากรูหัวเผาไปชนกับหม้อเหนือหัวเตาจากนั้นความเร็วกระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากไม่มีแหวนประกอบความเร็วของเปลวไฟทั้งด้านนอกและด้านในห้องเผาไหม้ ทำให้พาทไลน์ความเร็วของ Model A ไม่สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 10 ก) โดย Model A มีความเร็วเฉลี่ยและความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.47 เมตรต่อวินาที และ 1.62 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ Model B พฤติกรรมการพุ่งของเปลวไฟที่พุ่งด้วยความเร็วสูงจากรูหัวเผาไปชนกับหม้อเหนือหัวเตาจากนั้นจะมันตัวบริเวณเหนือห้องเผาไหม้ และไม่กระจายออกด้านข้าง เนื่องจากมีแหวนประกอบความเร็วของเปลวไฟด้านนอกและความเร็วของเปลวไฟบางส่วนย้อนกลับไปทางช่องอากาศส่วนที่สองเนื่องจากไม่มีแหวนด้านใน ทำให้พาทไลน์ความเร็วของ Model B ไม่สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 10 ข) โดย Model B มีความเร็วเฉลี่ยและความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.72 เมตรต่อวินาที และ 1.75 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ หรือ Model B มีความเร็วเฉลี่ยและความเร็วสูงสุดเพิ่มขึ้น 34.73 เปอร์เซ็นต์ และ 7.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A แต่ Model C พฤติกรรมการพุ่งของเปลวไฟที่พุ่งด้วยความเร็วสูง ไปชนกับหม้อเหนือหัวเตาจากนั้นจะมันตัว

บริเวณเหนือห้องเผาไหม้ และไม่กระจายออกด้านข้าง เนื่องจากมีแหวนประกอบความเร็วของเปลวไฟด้านนอก และไม่มีส่วนที่ย้อนไปทางช่องอากาศส่วนที่สอง เนื่องจากอิทธิพลของแหวนด้านในที่ช่วยในการประกอบความเร็วของเปลวไฟนั่นเอง ทำให้พาทไลน์ความเร็วของ Model C มีความสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 10 ค) โดย Model C มีความเร็วเฉลี่ยและความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.95 เมตรต่อวินาที และ 1.94 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ หรือ Model B มีความเร็วเฉลี่ยและความเร็วสูงสุดเพิ่มขึ้น 50.52 เปอร์เซ็นต์ และ 16.49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A

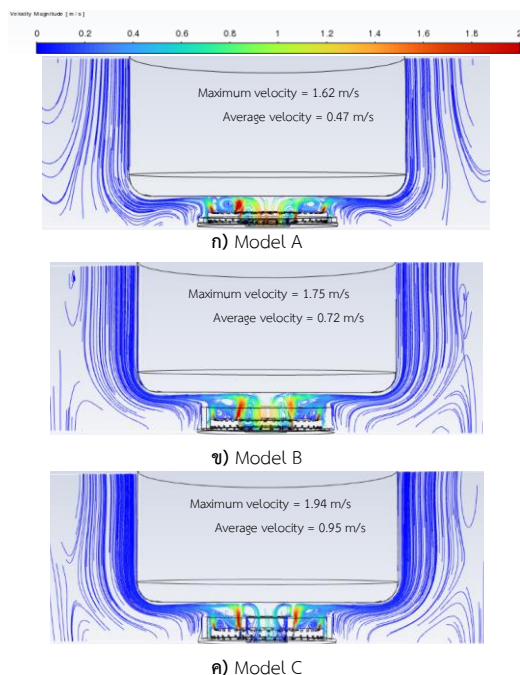
รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) และฟลักซ์ความร้อนรวม (Total Heat Flux) ของเตา Model A, Model B และ Model C ที่ความดันแอลพีจี 0.4 บาร์ พบว่าฟลักซ์ความร้อนรวมซึ่งเป็นค่าที่ได้จาก CFD ซึ่งใช้สำหรับประเมินการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อ และใช้สำหรับคาดการณ์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา การคาดการณ์ด้านการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อ โดยคาดการณ์จาก ฟลักซ์ความร้อนรวม พบว่า Model C มีฟลักซ์ความร้อนรวมสูงที่สุดเท่ากับ 24.40 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร รองลงมาคือ Model B และ Model A ซึ่งมี ฟลักซ์ความร้อนรวมเท่ากับ 21.42 และ 18.32 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ฟลักซ์ความร้อนรวมของ Model A ที่ต่ำกว่า Model B และ Model C อาจเกิดจากระยะหัวเผาถึงกันหม้อที่ต่างกันจึงอาจทำให้การเผาไหม้ของ Model A ไม่สมบูรณ์อาจเกิดจาก combustion residence time จึงส่งผลต่ออุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำกว่า Vlachos et al. [19] และ Chander et al. [20] จึงทำให้ฟลักซ์ความร้อนรวมของ Model A ต่ำกว่า Model B และ Model C

จากผลของการถ่ายเทความร้อนที่ได้จาก CFD ทำให้คาดการณ์ล่วงหน้าว่า Model C มีแนวโน้มที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงกว่า Model A และ Model B เนื่องจาก Model C มีฟลักซ์ความร้อน

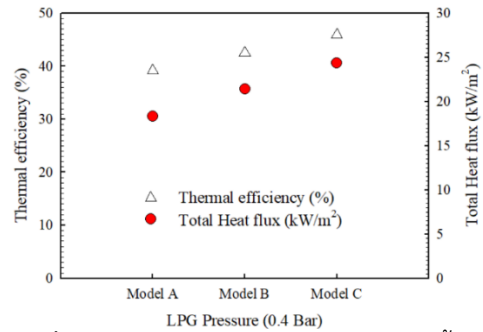
รวมสูงที่สุดหรือมีการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อดีที่สุดใน ส่วนของประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่า Model C มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 45.80 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ Model B และ Model A ซึ่งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนประมาณ 42.40 และ 39.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณล่วงหน้าจาก CFD ว่า Model C มีแนวโน้มที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงกว่า Model A และ Model B เนื่องจาก Model C มีฟลักซ์ความร้อนรวมสูงที่สุด

ในการศึกษานี้ นอกจากผลการถ่ายเทความร้อนที่ได้จาก CFD มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน แล้วยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Matthujak et al. [10], Matthujak et al. [13], Wichangarm et al. [14] และ Wichangarm et al. [16] ที่กล่าวถึงเตาที่มีการถ่ายเทความร้อนสู่หม้อได้ดีที่สุดในแบบจำลอง ส่งผลให้มีแนวโน้มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาในการทดลองดีที่สุดด้วย



รูปที่ 10 พาทไลน์ความเร็ว



รูปที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) และฟลักซ์ความร้อนรวม (Total Heat Flux) ของเตา Model A, Model B และ Model C ที่ความดันแอลพีจี 0.4 บาร์

4. สรุป

1. ฟลักซ์ความร้อนรวมของ Model C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 24.40 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร รองลงมาคือ Model B และ Model A มีฟลักซ์ความร้อนรวมเท่ากับ 21.42 และ 18.32 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ หรือ Model C และ Model B มีฟลักซ์ความร้อนรวมเพิ่มขึ้น 24.92 และ 14.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A

2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ Model C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 45.80 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ Model B และ Model A มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 42.40 และ 39.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หรือ Model C และ Model B มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น 14.52 และ 7.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ Model A

จากการเปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิ พฤติกรรมการกระจายความเร็ว และการถ่ายเทความร้อน ของเตาที่ไม่มีหม้อและเตาที่มีหม้อพบว่า เตาที่ไม่มีหม้อ (Model A) ไม่สามารถควบคุมเปลวไฟที่กระจายสู่ด้านนอกห้องเผาไหม้ได้เนื่องจากไม่มีหม้อคอยประครองเปลวไฟทำให้เปลวไฟไม่ค่อยเสถียรและเกิดการสูญเสียความร้อนเป็นอย่างมาก เตาที่มีหม้อด้านนอก (Model B) สามารถควบคุมเปลวไฟได้

ดีกว่า Model A เนื่องจากมีแหวนประครองเปลวไฟด้านนอกแต่ยังมีเปลวไฟบางส่วนย้อนกลับไปทางช่องอากาศ ส่วนที่สองเนื่องจากไม่มีแหวนด้านใน และเตาที่มีแหวนด้านนอกและด้านใน (Model C) สามารถควบคุมเปลวไฟได้ดีกว่า Model A และ Model B เนื่องจากอิทธิพลของแหวนด้านนอกสามารถควบคุมเปลวไฟที่จะกระจายสู่ด้านนอกห้องเผาไหม้ได้ และอิทธิพลของแหวนด้านในที่ช่วยในการควบคุมเปลวไฟที่จะกระจายไปที่ช่องอากาศส่วนที่สองได้ทำให้ Model C มีเปลวไฟที่ค่อนข้างเสถียรมากกว่า Model A และ Model B

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning office (EPPO) Ministry of Energy. (2021). Energy statistics of Thailand 2021. [Online]. Available: http://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Energy_Statistics/00All.pdf
- [2] S. Jugjai and S. Sanitjai, "Parametric Studies of Thermal Efficiency in a Proposed Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB): A Design Concept for the Future Burner," *International Energy Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 97-111, Dec. 1996.
- [3] U. Makmool, S. Jugjai and S. Tia, P. Vallikul and B. Fungtammasan, "Performance and analysis by particle image velocimetry (PIV) of cooker-top burners in Thailand," *Energy*, vol. 32, no. 10, pp. 1986-1995, 2007.
- [4] N. Rungsimuntuchat, "Application of Porous Medium for Energy Saving in Gas Cooker," M. Eng thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2011.
- [5] S. Sudarno, S. Soeparman, S. Wahyidi and A.S. Widodo, "Effect of the EMBER Element in Increasing the Efficiency of Liquefied Petroleum Gas Stoves," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 19(2021)2, pp. 375-382, 2021.
- [6] M.Y. Khan and A. Saxena, "Performance of LPG Cooking Stove Using Different Design Of Burner Heads," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 2, no.2, pp. 656-659, July. 2013.
- [7] A. Tamir, I. Elperin and S. Yotzer, "Performance Characteristics of a Gas Burner with a Swirling Central Flame," *Energy*, vol. 14, no.7, pp. 373-382, 1989.
- [8] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "Simulation of Flow Characteristics in an Energy-saving High-pressure gas Stove," in *Proceeding of 30th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Songkla, Thailand, 2016, Paper no. CST0027.
- [9] T. Punchapong, A. Matthujak, M. Wichangarm, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "Simulation of Flow Characteristics in a Gas-saving High-pressure gas Stove by Computational Fluid Dynamics," in *Proceeding of 31st*

- Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Nakhonnayok, Thailand, 2017, Paper no. CST09.
- [10] A. Matthujak, T. Chanakul, M. Wichangarm, T. Sriveerakul, B. Chanthamas, S. Sucharitpwatskul and S. Sucharitpwatskul, "A Study on Influence of Swirl Angle of Burner Port on Behavior of Heat Transfer to a Vessel of High-pressure Cooking Stove by Computational Fluid Dynamics" *RMUTP Research Journal*, Vol. 14, No. 1, January-June 2020, pp.70-81, 2020.
- [11] P. Chimchom, A. Matthujak, M. Wichangarm, T. Sriveerakul, and S. Sucharitpwatskul, "Simulation on Combustion Behavior of Gas-saving Burner S-10 by Computational Fluid Dynamics" *RMUTP Research Journal*, Vol. 14, No. 1, January-June 2020, pp.165-176, 2020.
- [12] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul, S. Sucharitpwatskul and S. Phongthanapanich, "Simulation Study of LPG Cooking Burner," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no.3.7, pp. 142-144, 2018.
- [13] A. Matthujak, M. Wichangarm, T. Sriveerakul, S. Sucharitpwatskul and S. Phongthanapanich, "Numerical investigation on the influence of swirling flow to thermal efficiency enhancement of an LPG-energy saving burner," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28 (2021), 101466, 2021.
- [14] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul, S. Sucharitpwatskul and S. Phongthanapanich, "Investigation on thermal efficiency of LPG cooking burner using computational fluid dynamics," *Energy*, vol. 203, 15 July 2020, 117849, 2020.
- [15] P. Aroonjarattham, "The Parametric Studied of High Pressure Gas Burner Affect Thermal Efficiency," *Engineering Journal*, vol. 20(3), pp. 33-48, 2016.
- [16] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul, S. Sucharitpwatskul and S. Phongthanapanich, "A study on effect of swirling flow on behavior of heat transfer to vessel of high-pressure cooking stove by computational fluid dynamics," in *Proceeding of 33th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Udonthani, Thailand, 2019, Paper no. AEC-003.
- [17] ANSYS, *Ansys Fluent Theory Guide*. Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS, Inc., 2013.
- [18] German standards and technical rules. 1997. p. 17. DIN EN 203-2: Gas-heated catering equipment.
- [19] D.G. Vlachos, L.D. Schmidt, and R. Aris, "Ignition and extinction of flames near surfaces: Combustion of H₂ in air," *AIChE Journal*, vol. 40, no.6, pp. 1055-1018, 1994.
- [20] S. Chander, and A. Ray, "An experimental and numerical study of stagnation point heat transfer for methane/air laminar flame impinging on a flat surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(2008), pp. 3595-3607, 2008.

การพัฒนาซอสคาราเมลจากน้ำเชื่อมตาลโตนดและเนื้อตาลโตนดผง (*Borassus flabellifer* L.)

ลัดดาวัลย์ กลิ่นมาลัย จิราภัทร โอทอง* สุธิดา กิจจาวรเสถียร วรลักษณ์ ป้อมน้อย
และ วรธร ป้อมเย็น

สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวรชัยยบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

รับบทความ 16 กุมภาพันธ์ 2566 แก้ไขบทความ 28 พฤษภาคม 2566 ตอรับบทความ 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาซอสคาราเมลจากน้ำเชื่อมตาลโตนดและเนื้อตาลโตนดผง ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับตาลโตนดและพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสให้มีความหลากหลายมากขึ้น ทำการคัดเลือกซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานจำนวน 3 สูตร โดยใช้น้ำเชื่อมตาลโตนดทดแทนน้ำตาลทรายทั้งหมด คือ สูตรพื้นฐานที่ 1 2 และ 3 จากนั้นนำซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่มีค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสมากที่สุดมาเสริมเนื้อตาลโตนดผง 3 ระดับ คือ 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์ นำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสเปรียบเทียบกับซอสคาราเมลสูตรพื้นฐาน จากการศึกษาพบว่าซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 2 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูงที่สุดในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มีค่า 7.80 7.87 7.90 7.55 และ 7.82 ตามลำดับ อยู่ในระดับชอบมาก เมื่อนำซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 2 มาเสริมเนื้อตาลโตนดผง พบว่าซอสคาราเมลเสริมเนื้อตาลโตนดผงระดับ 3 เปอร์เซ็นต์ มีคุณภาพทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ใกล้เคียงกับซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 2 โดยมีค่าความหนืด 33.4×10^4 เซนติพอยท์ ค่าความสว่าง (L^*) 46.99 ค่า a^* 19.59 และค่า b^* 45.25 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่ามีพลังงาน 404.40 กิโลแคลอรี/100 กรัม ความชื้น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เยื่อใย และเถ้าอยู่ที่ 34.81 30.67 2.44 25.53 5.48 และ 1.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากสูตรพื้นฐานที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

คำสำคัญ : ซอสคาราเมล; ตาลโตนด; เนื้อตาลโตนดผง; น้ำเชื่อมตาลโตนด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 5536 2236, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: jirapat.o@rmutp.ac.th

The Development of Caramel Sauce From Palmyra Palm Syrup and Palmyra Palm Powder (*Borassus flabellifer* L.)

Laddawan Klinmalai Jirapat Othong* Suthida Kitjavorasatien

Woralak Pomnoi and Vorathon Pomyen

Department of Food and Nutrition, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

168 Thanon Sri Ayuthaya, Wachira Phayaban, Dusit District, Bangkok 10300

Received 16 February 2023; Revised 28 May 2023; Accepted 29 June 2023

Abstract

The purpose of this research was to develop caramel sauce from palmyra palm syrup and palmyra palm powder. This is to add value to palmyra palm and to develop more variety of sauce products. Three basic formulas of caramel sauce were selected by using palmyra palm syrup instead of sugar, i.e. basic formulas 1, 2, and 3. Then, the basic formula caramel sauce with the highest average sensory quality was added to palmyra palm powder. Three levels of palmyra palm powder, 3%, 4%, and 5%, were analyzed for physical quality, chemical composition, and sensory quality compared to the basic formula of caramel sauce. The study found that in basic caramel sauce No. 2, the tasters gave the highest average sensory quality score. In terms of appearance, color, smell, texture, and overall liking, the values were 7.80 7.87 7.90 7.55, and 7.82, respectively, in the very like level. Basic caramel sauce no. 2 was added to the palmyra palm powder. The 3% palmyra palm powder caramel sauce had physical quality. chemical composition and sensory quality were similar to basic caramel sauce no. 2 with a viscosity of 33.4×10^4 cent points, lightness (L^*) of 46.99, a^* of 19.59, and b^* of 45.25. The chemical composition shows that energy was 404.40 kcal/100 g, moisture, fat, protein, carbohydrate, fiber, and ash were 334.81%, 30.67%, 2.44%, 25.53%, 5.48%, and 1.07%, respectively. The tasters gave the sensory quality score, in terms of appearance, color, smell, texture, and overall liking, which is not significant from the basic caramel sauce no. 2 at the 0.05 level.

Keywords: Caramel Sauce; Palmyra Palm; Palmyra Palm Powder; Palmyra Palm Syrup

* Corresponding Author. Tel.: +666 5536 2236, E-mail Address: jirapat.o@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ตาลโตนดเป็นไม้ยืนต้นที่มีอายุยืน ลำต้นเดี่ยวไม่แตกกิ่งก้านสาขา ชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Borassus flabellifer* L. จัดเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ *Palmae* มีชื่อสามัญ ได้แก่ Palmyra palm, Lontar palm, Fan palm และ Brab palm [1] ตาลโตนดจัดเป็นพืชท้องถิ่นของประเทศไทยที่มีพื้นที่ในการเพาะปลูกกระจายทั่วไปในทุกภูมิภาค โดยในปี 2562 มีเนื้อที่เพาะปลูกตาลโตนดทั้งสิ้น 13,364 ไร่ พื้นที่เพาะปลูก 7 จังหวัด ผลผลิตรวม 4,460 ตัน ผลผลิตต่อไร่ 1,177 กิโลกรัม ราคาขายได้ต่อกิโลกรัม 37.80 บาท โดยจังหวัดที่มีผลผลิตตาลโตนดที่เก็บเกี่ยวได้มากที่สุด 3 ลำดับแรก ได้แก่ 1) เพชรบุรี มีผลผลิตจำนวน 2,863,500 กิโลกรัม 2) สงขลา มีผลผลิตจำนวน 1,573,100 กิโลกรัม 3) ฉะเชิงเทรา มีผลผลิตจำนวน 13,000 กิโลกรัม [2]

ผลผลิตจากตาลโตนดที่สามารถนำไปรับประทานได้ คือ น้ำตาลสด เนื้อตาล ลอนตาล และจาวตาล ซึ่งผลผลิตนี้เกษตรกรสามารถนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์ 3 กลุ่มด้วยกัน คือ ผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำตาลโตนด ได้แก่ น้ำตาลสด ตังเม น้ำตาลกรวด น้ำ น้ำตาลปึก และกระแฉะ ผลิตภัณฑ์ประเภทแคง ได้แก่ แคงหัวตาลโตนด และแคงยอดตาลโตนด ผลิตภัณฑ์ประเภทขนม ได้แก่ ขนมตาล จาวตาลเชื่อม ตาลลอยแก้ว โตนดทอด ข้าวเหนียวลูกตาล ข้าวเหนียวหน้ากะฉีก ขนมเปียกหอม และโตนดน้ำกะทิ เป็นต้น [3] จากผลิตภัณฑ์อาหารข้างต้นเห็นได้ว่า ส่วนใหญ่ได้จากการแปรรูปน้ำตาลโตนด เนื่องจากมีกรรมวิธีการผลิตที่ไม่ยาก โดยใช้น้ำตาลสดแค่ครั้งเดียวก็สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำตาลโตนดได้หลายชนิด แต่ข้อเสีย คือ มีกรรมวิธีที่เหนื่อยและต้องใช้น้ำตาลสดในปริมาณมาก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลโตนดที่เพียงพอต่อความต้องการ และยังมีราคาขายที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความยากในการเก็บเกี่ยวและเวลาในการผลิตที่นาน นอกจากนี้เนื้อตาลโตนดสี

เหลืองที่ได้จากลูกตาลสุกกียังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลาย มีเพียงแต่การนำมาทำเป็นขนมตาลเพียงอย่างเดียว เพราะมีกรรมวิธีการเตรียมและการยีสเนื้อตาลที่ยุ่งยาก ใช้เวลานาน และมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการนำเนื้อตาลโตนดไปอบแห้งเป็นแป้ง เพื่อพัฒนาเนื้อตาลโตนดให้มีรูปแบบที่สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก และเก็บรักษาได้นาน โดย C. Pangmark and S. Sriwilai [4] ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งเนื้อตาลโตนด พบว่าเนื้อตาลโตนดที่ผ่านการนึ่งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด นาน 10 ชั่วโมง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.12 มิลลิเมตร จะมีค่าอัตราการคืนรูปและการละลายของแป้งดีที่สุด ส่วนเส้นใยที่เหลือทิ้งจากกระบวนการทำเนื้อตาลโตนดผงสามารถนำมาผลิตเป็นเส้นด้าย เพื่อนำมาถักทอเป็นผืนผ้าสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย

ปัจจุบันมีการผลิตน้ำเชื่อมตาลโตนดขายตามกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่ปลูกตาลโตนด และมีการพัฒนาเนื้อตาลโตนดให้อยู่ในรูปแบบแป้ง แต่ยังไม่มีการใช้น้ำเชื่อมและแป้งตาลโตนดในผลิตภัณฑ์อาหารที่น้อยและยังไม่หลากหลาย ผู้วิจัยจึงความสนใจที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้วัตถุดิบจากตาลโตนด โดยผลิตภัณฑ์อาหารที่ผู้วิจัยสนใจที่จะนำมาพัฒนาคู่กับวัตถุดิบจากตาลโตนด คือ ซอสคาราเมล ซึ่งเป็นซอสที่มีส่วนผสมของน้ำตาล ครีม นม และเนย สามารถหาซื้อและผลิตได้ง่าย ทั้งนี้ซอสคาราเมลนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคทั่วไปรู้จัก มีวางขายทั่วไปตามท้องตลาด สามารถบริโภคได้ทุกเพศทุกวัย โดยรับประทานคู่กับอาหารหวาน เช่น เบเกอรี่ เครื่องดื่ม และไอศกรีม เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนาซอสคาราเมลจากตาลโตนด โดยใช้น้ำเชื่อมตาลโตนดทดแทนน้ำตาลทรายทั้งหมด และเสริมเนื้อตาลโตนดผงลงในซอสคาราเมล เพื่อปรับปรุงสี สัน สร้างรสชาติที่แปลกใหม่ให้แก่ซอสคาราเมล ซึ่งเป็นซอสคาราเมลที่มี

กลืนรหวานกลมกล่อมซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของน้ำเชื่อมตาลโตนด และมีรสชาติอมเปรี้ยวเล็กน้อยจากผงน้ำตาลโตนด ช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้ตาลโตนดและผลิตภัณฑ์ซอสคาราเมล และสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 ขั้นตอนการทำน้ำเชื่อมตาลโตนด

นำน้ำตาลสดที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 75 °C นาน 30 นาที มาเคี่ยวในกระทะทองเหลืองโดยใช้ไฟอ่อน อุณหภูมิ 70 °C คนเป็นระยะๆ จนกลายเป็นน้ำเชื่อมตาลโตนดที่มีลักษณะข้นเหนียว สีน้ำตาลอ่อน และมีของแข็งที่ละลายน้ำได้มากกว่า 65 °brix ซึ่งใช้เวลาเคี่ยวนาน 5 ชั่วโมง บรรจุน้ำเชื่อมลงในขวดพลาสติกสำหรับใช้งานต่อไป

ดัดแปลงจาก A. Dholvitayakhun [8] นำน้ำเชื่อมตาลโตนดมาวัดค่า a_w , ความหนืด, ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้, ค่าสี และองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับน้ำตาลโตนดสดที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

2.1.2 ขั้นตอนการทำเนื้อมะพร้าวคั่ว

นำลูกตาลโตนดสุกมาล้างให้สะอาด ลอกเปลือกสีดำออกจนหมด เอาดีตาลออกเพื่อไม่ให้เนื้อมีรสขม นำลูกตาลโตนดไปต้มน้ำที่ละลายน้ำเพื่อให้น้ำตาลออกมา จากนั้นกรองด้วยตะแกรงตาถี่เพื่อนำเส้นใยออก นำเนื้อมะพร้าวคั่วที่ได้ใส่ผ้าขาวบาง 2 ชั้น ห่อให้แน่นและใช้ของหนักทับไว้นาน 1 คืน เพื่อเอาน้ำออก นำเนื้อมะพร้าวคั่วที่ได้ไปนึ่งในน้ำเดือด โดยกวนเนื้อมะพร้าวคั่วตลอดเวลาด้วยอุณหภูมิในจุดกึ่งกลางของเนื้อมะพร้าวคั่วจนได้อุณหภูมิ 70 °C จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 5 นาที ยกออกจากเตาพักไว้ ร่อนกระดากไซเลงในภาชนะขนาด 35x50x2 ซม.² (กว้าง x ยาว x สูง) เกลี่ยเนื้อมะพร้าวคั่วที่คั่วแล้วให้เป็นแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร จนทั่วภาชนะ

จากนั้นนำเข้าอบในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Tray dryer; Reliance tech service, Thailand) อุณหภูมิ 60 °C นาน 5 ชั่วโมง นำออกจากเตาอบ พักไว้ให้เย็น แล้วนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม (Blender; Hamilton Beach, China) ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช บรรจุลงในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ สำหรับใช้งานต่อไป ดัดแปลงจาก C. Pangmark and S. Sriwilai [4] นำเนื้อมะพร้าวคั่วมาวัดค่า a_w , ค่าสี และองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับเนื้อมะพร้าวคั่วที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

2.1.3 การคัดเลือกสูตรที่ดีที่สุดจากสูตรพื้นฐาน

ศึกษาสูตรพื้นฐานของซอสคาราเมลจำนวน 3 สูตร โดยใช้ส่วนผสมน้ำตาลโตนดทดแทนน้ำตาลทรายทั้งหมดในซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร จากนั้นคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุด โดยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาซอสคาราเมลเสริมเนื้อมะพร้าวคั่ว

ขั้นตอนการทำซอสคาราเมลสูตรพื้นฐาน

1. วิธีการทำซอสคาราเมล สูตรพื้นฐานสูตรที่ 1

นำน้ำเชื่อมตาลโตนดใส่ลงในหม้อ นำไปตั้งไฟกลางจนถึงอุณหภูมิ 120 °C คนต่อไปอีก 4 นาที จากนั้นเติมวิปครีมลงไปคนให้เข้ากันนาน 3 นาที โดยคุมอุณหภูมิ 120 °C ยกออกจากเตา ใส่เนยจืดที่แช่เย็นอุณหภูมิ 4 °C ลงไปคนให้เข้ากัน พักไว้ให้เย็น ดัดแปลงมาจาก S. Kitiaworasatien and V. Pomnoi [5]

2. วิธีการทำซอสคาราเมล สูตรพื้นฐานสูตรที่ 2

นำน้ำเชื่อมตาลโตนดใส่ลงในหม้อ นำวิปครีมใส่ลงในอ่างผสมผสมแล้วนำไปต้มในลังถึงจนมีอุณหภูมิ 50 °C ต้มต่อไปอีก 5 นาที จากนั้นนำออกจากลังถึงพักไว้ นำน้ำเชื่อมตาลโตนดลงในหม้อตั้งไฟจนถึงอุณหภูมิ 120 °C คนต่อไปอีก 4 นาที แล้ววิปครีมลงไปคนให้เข้ากันอีก 3 นาที โดยคุมอุณหภูมิ 120 °C ตลอด ยกออกจากเตา ใส่เนยจืดที่แช่เย็นอุณหภูมิ 4 °C ลงไปคนให้เข้ากัน พักไว้ให้เย็น ดัดแปลงมาจาก C. Bloom [6]

3. วิธีการทำซอสคาราเมล สูตรพื้นฐานสูตรที่ 3

นำน้ำเชื่อมตาลโตนดใส่ลงในหม้อ นำไปตั้งไฟกลางจนถึงอุณหภูมิ 120 °C คนต่อไปอีก 4 นาที จากนั้นเติมวิปครีมและเกลือกไปคนให้เข้ากันนาน 3 นาที โดยคุมอุณหภูมิ 120 °C ยกออกจากเตา ใส่เนยจืดที่แช่เย็นอุณหภูมิ 4 °C ลงไปคนให้เข้ากัน พักไว้ให้เย็น ตัดแปลงมาจาก Danielle (2022) [7]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการทำซอสคาราเมลสูตรพื้นฐาน

วัตถุดิบ	ปริมาณ (%)		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
น้ำเชื่อม			
ตาลโตนด	43.50	32.26	32.25
วิปครีม	43.50	58.06	51.61
เนยจืด	13.00	9.68	14.52
เกลือ	-	-	1.62

ที่มา: สูตรที่ 1 : ตัดแปลงจาก S. Kitiaworasatien and V. Pomnoi [5]

สูตรที่ 2 : ตัดแปลงจาก C. Bloom [6]

สูตรที่ 3 : ตัดแปลงจาก Danielle [7]

2.1.4 ขั้นตอนการทำซอสคาราเมลเสริมเนื้อมาลง

นำน้ำใส่ลงถึงต้มจนเดือด นำวิปครีมใส่ลงในอ่างผสมสแตนเลสนำไปตุ๋นในลังถึงจนมีอุณหภูมิ 50 °C ตุ่นต่อไปอีก 5 นาที จากนั้นนำออกจากลังถึงพักไว้ นำน้ำเชื่อมตาลโตนดลงในหม้อตั้งไฟจนถึงอุณหภูมิ 120 °C คนต่อไปอีก 4 นาที จากนั้นค่อยๆใส่น้ำตาลโตนดผงลงไปทีละ 3 ระดับ คือ 3 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทั้งหมด คนจนเป็นเนื้อเดียวกันนาน 5 นาที จากนั้นใส่ วิปครีมลงไปคนให้เข้ากันอีก 3 นาที โดยคุมอุณหภูมิ 120 °C ยกออกจากเตา ใส่เนยจืดที่แช่เย็นอุณหภูมิ 4 °C ลงไปคนให้เข้ากัน พักไว้ให้เย็น นำซอสคาราเมลที่เสริมเนื้อมาลงมาวิเคราะห์ค่าความหนืด ค่าสี องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัส

2.1.5 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

1. การวัดค่าสี

วัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab (Hunter Associates Labory, Inc, USA) และวัดออกมาในค่า L^* , a^* , และ b^*

2. การวัดค่าความข้นหนืด

นำตัวอย่างปริมาณ 500 มิลลิลิตร มาวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer (Laboratories. Inc., USA) ที่อุณหภูมิ 25 ±1 องศาเซลเซียส โดยใช้หัววัดหมายเลข 4

3. การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้วัดด้วยเครื่อง Hand Refractometer (Atogo, Japan)

4. วัดค่า a_w วัดด้วยเครื่อง Water activity analyzer (Novasina IC-500 AW-LAB, Switzerland)

2.1.6 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

นำน้ำตาลโตนดสด น้ำเชื่อมตาลโตนด เนื้อมาลงตาลโตนดผง และซอส คาราเมลมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ไขมัน เกลือ และเยื่อใย ด้วยวิธี AOAC (2016) สำหรับคาร์โบไฮเดรตใช้การคำนวณ คาร์โบไฮเดรต (%) = 100-(ความชื้น (%) + โปรตีน (%) + ไขมัน (%) + เยื่อใย (%) + เกลือ (%))

2.1.7 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำซอสคาราเมลสูตรพื้นฐาน และซอสคาราเมลเสริมเนื้อมาลงตาลโตนดผงทั้ง 3 ระดับ มาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) (โดย คะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ คะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด) ใช้ผู้ชิมเป็นนักศึกษา คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครจำนวน 80 คน เสรีพิติตัวอย่างโดยการเทตัวอย่างลงในถ้วยพลาสติกปริมาณ 30 กรัม มีการใช้รหัสเลข 3 ตัวแทนชื่อตัวอย่าง โดยเลขที่ใช้ได้จากตารางเลขสุ่ม และมีการล้างปากในระหว่างการเปลี่ยนตัวอย่าง

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) ในการประเมินคุณภาพทางกายภาพและเคมี และ RCBD (Randomized Complete Block Design) ในการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง โดยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาน้ำเชื่อมตาลโดนด

เมื่อน้ำตาลโดนดสดผ่านความร้อนจนกลายเป็นน้ำเชื่อมตาลโดนด ส่งผลให้ค่า a_w และค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง โดยน้ำเชื่อมตาลโดนดมีค่า a_w และค่าความสว่าง (L^*) อยู่ที่ 0.75 และ 60.93 ตามลำดับ ส่วนความหนืดและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนืดและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของน้ำเชื่อมอยู่ที่ 9.03×10^2 cps และ 74.00 °brix เมื่อเปรียบเทียบกับค่า a^* พบว่าเมื่อน้ำตาลโดนดสดผ่านความร้อนมีค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำตาลโดนดสดมีค่า a^* (-1.17) ส่วนน้ำเชื่อมตาลโดนดมีค่า a^* (13.56) ส่วนค่า b^* เมื่อน้ำตาลโดนดสดที่ผ่านการระเหยเอาน้ำออกจนกลายเป็นน้ำเชื่อมจะมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น โดยน้ำเชื่อมตาลโดนดมีค่าความเป็นสีเหลือง b^* อยู่ที่ 69.60 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Dholvitayakhun [8] ที่ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำน้ำตาลสดผงให้เกิดภาวะอิมตัวยิงยวด พบว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีเหลืองอมน้ำตาลอ่อน มีค่า a_w อยู่ที่ 0.6 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ 84.84 °brix มีปริมาณมีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ที่ 68 ค่า a^* และค่า b^* อยู่ที่ 5.39 และ 23.74 ตามลำดับ

ทั้งนี้เนื่องจากการเคี่ยวน้ำตาลโดนดสดจนกลายเป็นน้ำเชื่อมตาลโดนดเป็นการระเหยเอาน้ำออกจากตัวอาหาร ซึ่งจัดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารในรูปแบบของการทำให้อาหารเข้มข้นขึ้น แต่อาหารนั้นยังคงมีสถานะเป็นของเหลวอยู่ จึงจัดเป็นการถนอมอาหาร ในรูปแบบหนึ่งที่ทำให้อาหารมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อาหารมีค่า a_w ลดลง จึงเป็นการป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของอาหารเสื่อมเสียและจุลินทรีย์ก่อโรคหลายชนิด เนื่องจากเมื่อ a_w ลดลงจุลินทรีย์ก็เจริญช้าลง ระยะเวลาในช่วง logarithmic phase เพิ่มขึ้น ทำให้การเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ต้องใช้เวลานานขึ้น [9] ส่งผลให้น้ำเชื่อมตาลโดนดสามารถเก็บได้นานกว่าน้ำตาลโดนดสด และการเคี่ยวน้ำตาลโดนดสดนั้นมีการใช้อุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา Caramelization ขึ้น เพราะในน้ำตาลโดนดสดมีน้ำตาล (ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต) เป็นองค์ประกอบถึง 8.09% (ตารางที่ 3) ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงและเวลานานเพื่อระเหยเอาน้ำออก น้ำตาลที่โดนความร้อนสูงก็จะแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ทำให้เกิดพอลิเมอร์แซนของสารประกอบคาร์บอน ส่งผลให้อาหารนั้นเกิดเป็นสีน้ำตาล (คาราเมล) มีความหนืดและความเหนียวเพิ่มขึ้น [10] ด้วยเหตุนี้ น้ำเชื่อมจากตาลโดนดจึงมีสีที่เข้มข้นความหนืดที่สูงขึ้น

เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเชื่อมตาลโดนดเปรียบเทียบกับน้ำตาลโดนดสด จากตารางที่ 3 พบว่า เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนน้ำเชื่อมตาลโดนดมีพลังงาน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีค่าพลังงาน 385.10 kcal โปรตีน 1.73% และคาร์โบไฮเดรต 59.45% ความชื้นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีค่าอยู่ที่ 36.99% ส่วนปริมาณไขมันและเยื่อใยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ทั้งนี้ เนื่องจากการเคี่ยวน้ำตาลโดนดเป็นกระบวนการระเหยเอาน้ำ

ออกจากตัวผลิตภัณฑ์ ทำให้ปริมาณสารอาหารที่เหลืออยู่ในอาหารแห้ง (เปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนัก) มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น [11] ค่าพลังงาน ปริมาณโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตในผลิตภัณฑ์หลังแปรรูปจึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 คุณภาพทางเคมีและกายภาพของน้ำตาลโตนดสดและน้ำเชื่อมตาลโตนด

คุณภาพทางเคมีและกายภาพ	น้ำตาลสด	น้ำเชื่อม
a_w	1.00 ± 0.00^a	0.75 ± 0.00^b
ความหนืด (cps)	$13.60 \times 10^1 \pm 0.00^a$	$9.03 \times 10^2 \pm 0.00^b$
Total soluble solid ($^{\circ}$ brix)	13.00 ± 0.00^b	74.00 ± 0.00^a
L^*	80.56 ± 0.05^a	60.93 ± 0.04^b
a^*	-1.17 ± 0.02^b	13.56 ± 0.04^a
b^*	3.58 ± 0.08^b	69.60 ± 0.05^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรแนวนอนต่างกัน หมายถึง ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
 ค่า L^* คือ ความสว่าง มีค่า 0 – 100
 ค่า a^* คือ ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^* เป็น + คือ ออกสีแดง และ a^* เป็น - คือ ออกสีเขียว)
 ค่า b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* เป็น + คือ ออกสีเหลือง และ b^* เป็น - คือ ออกสีน้ำเงิน)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำตาลโตนดสดและน้ำเชื่อมตาลโตนดจากตัวอย่าง 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	น้ำตาลสด	น้ำเชื่อม
พลังงาน (kcal)	61.64 ± 0.00^b	385.10 ± 1.73^a
ความชื้น (%)	91.37 ± 0.01^a	36.99 ± 0.41^b
ไขมัน (%) ^{ns}	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
โปรตีน (%)	0.26 ± 0.01^b	1.73 ± 0.00^a
คาร์โบไฮเดรต (%)	8.09 ± 0.01^b	59.45 ± 0.43^a
เยื่อใย (%) ^{ns}	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
เถ้า (%)	0.28 ± 0.01^b	1.83 ± 0.02^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรแนวนอนต่างกัน หมายถึง ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
 ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.2 ผลการศึกษาเนื้อตาลโตนดผง

เมื่อศึกษาเนื้อตาลโตนดที่ผ่านกระบวนการอบแห้งพบว่าเนื้อตาลโตนดอบแห้งมีค่า a_w ค่า a^* และค่า b^* ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนค่าความสว่าง (L^*) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยค่า a_w ค่า a^* และค่า b^* ของเนื้อตาลโตนดผงอบแห้งอยู่ที่ 0.28 11.59 และ 54.26 ตามลำดับ ส่วนความสว่าง (L^*) มีค่าอยู่ที่ 73.74 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณภาพทางกายภาพของเนื้อโตนดสดและเนื้อตาลโตนดผง

คุณภาพทางกายภาพ	เนื้อตาลสด	เนื้อตาลผง
a_w	0.99 ± 0.00^a	0.28 ± 0.00^b
L^*	52.80 ± 0.06^b	73.74 ± 0.05^a
a^*	25.60 ± 0.05^a	11.59 ± 0.07^b
b^*	69.46 ± 0.22^a	54.26 ± 0.07^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรแนวนอนต่างกัน หมายถึง ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
 ค่า L^* คือ ความสว่าง มีค่า 0 – 100
 ค่า a^* คือ ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^* เป็น + คือ ออกสีแดง และ a^* เป็น - คือ ออกสีเขียว)
 ค่า b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* เป็น + คือ ออกสีเหลือง และ b^* เป็น - คือ ออกสีน้ำเงิน)

ทั้งนี้ เนื่องจากการทำแห้งเป็นกระบวนการที่นำลูกตึงออกจากอาหาร ทำให้อาหารมีค่า a_w ลดลง [11] เนื้อตาลโตนดผงจึงมีค่า a_w ที่น้อยกว่าเนื้อตาลโตนดสด ทำให้เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้จึงเก็บรักษาได้นานกว่าเนื้อตาลโตนดสด การอบแห้งทำให้ลักษณะของผิวหน้าอาหาร การสะท้อนแสงและสีที่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีพันธะคู่อุณหภูมิสูงจำนวนมาก และความร้อนยังส่งผลให้เกิดจากการเปลี่ยนไอโซเมอร์จากทรานส์ไปเป็นซิสทำให้เกิดการสูญเสียของแคโรทีนอยด์ ซึ่งส่งผลให้สีของเนื้อตาลโตนดจางลง [12] ด้วยเหตุนี้เนื้อ

ตาลโตนดผงจึงมีค่าความสว่าง (L^*) ที่สูงกว่าเนื้อตาลโตนดสด และมีค่า a^* และค่า b^* ที่ลดลง

จากตารางที่ 5 พบว่า เมื่อเนื้อตาลโตนดสดผ่านกระบวนการอบแห้งจนกลายเป็นเนื้อตาลโตนดผงจะมีพลังงาน ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เยื่อใย และเถ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งมีค่า 413.51 kcal, 7.05%, 14.88%, 37.88%, 34.85% และ 2.85% ตามลำดับ ส่วนความชื้นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยลดลงเหลือ 2.49% เนื่องจาก การทำแห้งเป็นกระบวนการที่น้ำถูกดึงออกจากอาหารทำให้อาหารมีความชื้นลดลง และส่งผลให้ปริมาณสารอาหารที่เหลืออยู่ในอาหารแห้ง (เปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนัก) มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น [11] พลังงาน ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเยื่อใยในผลิตภัณฑ์อบแห้งจึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อโตนดสดและเนื้อตาลโตนดผงจากตัวอย่าง 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	เนื้อตาลสด	เนื้อตาลผง
พลังงาน (kcal)	39.14±0.02 ^b	413.51±0.44 ^a
ความชื้น (%)	90.38±0.02 ^a	2.49±0.04 ^b
ไขมัน (%)	0.38±0.02 ^b	7.05±0.07 ^a
โปรตีน (%)	2.27±0.01 ^b	14.88±0.04 ^a
คาร์โบไฮเดรต (%)	6.23±0.02 ^b	37.88±0.01 ^a
เยื่อใย (%)	0.43±0.01 ^b	34.85±0.02 ^a
เถ้า (%)	0.31±0.02 ^b	2.85±0.16 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรแนวอนดต่างกัน หมายถึง ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.3 ผลการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมจากสูตรพื้นฐาน

ตารางที่ 6 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสูตรพื้นฐานซอสคาราเมล จำนวน 3 สูตร พบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานทั้ง 3 สูตร ในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น

รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนค่าสี ผู้ชิมให้คะแนนความชอบของซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 3 แตกต่างกับสูตรพื้นฐานที่ 1 และ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อแปลผลคะแนนความชอบแบบอันตรายภาคขึ้นพบว่า ซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 1 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และรสชาติ โดยมีค่าเฉลี่ย 7.50 7.75 7.77 และ 7.62 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก ส่วนเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมมีค่าเฉลี่ย 7.40 และ 7.47 ตามลำดับ อยู่ในระดับชอบปานกลาง ซึ่งต่างจากซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 2 ที่ผู้ชิมให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมีค่าเฉลี่ย 7.80 7.87 7.90 7.52 7.55 และ 7.82 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 2 สำหรับนำไปศึกษาการเสริมเนื้อตาลผงต่อไป

3.4 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเนื้อตาลโตนดผงที่เสริมในซอสคาราเมล

นำซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ 2 ที่มีผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสอยู่ในระดับชอบมาก มาศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเนื้อตาลโตนดผง โดยเสริมเนื้อตาลโตนดผงที่ 3 ระดับ คือ 3 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทั้งหมด จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อคัดเลือกระดับการเสริมเนื้อตาลโตนดผงที่เหมาะสมต่อไป การเสริมเนื้อตาลโตนดผงส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพของซอสคาราเมล เมื่อเปรียบเทียบกับซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาล พบว่า ค่าความหนืด ค่าความสว่าง (L^*) ค่า a^* และค่า b^* ของซอสคาราเมลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 7 การเสริมเนื้อตาลโดนดผงส่งผลต่อค่าความหนืดของซอสคาราเมล โดยซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาลมีค่าความหนืดน้อยที่สุด คือ 6.51×10^4 cps และซอสคาราเมลเสริมเนื้อตาลผงที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความหนืดสูงที่สุด คือ 38.00×10^4 cps ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อตาลโดนดอบแห้งความชื้นลดลงเหลือ 2.49% (ตารางที่ 5) จึงกลายเป็นเนื้อตาลโดนดผงที่มีความชื้นต่ำ และเมื่อสัมผัสกับส่วนผสมที่เป็นน้ำจึงเกิดการดูดซับน้ำไว้เนื่องจากอาหารผงมีความสามารถในการดูดน้ำที่ผิวซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการคืนรูป [9] ซึ่งเนื้อตาลโดนดผงอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีการดูดซับน้ำ 6.42% [4] นอกจากนี้ในเนื้อตาลโดนดผงยังมีเส้นใย (ตารางที่ 5) โดยในเนื้อตาลโดนดที่นึ่งสุกมีเส้นใย 5.83% [13] และเนื้อตาลโดนดอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีเส้นใย 27.65% [4] เส้นใยที่อยู่ในเนื้อตาลโดนดผงนี้มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างของเส้นใย เนื่องจากเส้นใยมีองค์ประกอบของโพลีแซคคาไรด์ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระจำนวนมากจึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ทำให้เส้นใยอาหารจึงมีความสามารถในการอุ้มน้ำ [14] ดังนั้นค่าความหนืดของซอสคาราเมลที่เสริมเนื้อตาลผงทั้ง 3 ระดับจึงมีค่าสูงกว่าซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาล และการเสริมเนื้อตาลโดนดผงที่ระดับ 5% ส่งผลให้ซอสคาราเมลมีค่าความหนืดสูงที่สุด เพราะเป็นระดับที่ปริมาณเนื้อตาลโดนดผงมากที่สุดจึงมีการดูดซับน้ำไว้มากที่สุด ซอสคาราเมลจึงมีค่าความหนืดสูงที่สุด

เมื่อศึกษาค่าความสว่าง (L^*) ค่า a^* และค่า b^* พบว่า เมื่อเนื้อตาลโดนดผงเพิ่มขึ้นค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ส่วนค่า a^* และค่า b^* มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความสว่าง (L^*) ของซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาล มีค่าสูงที่สุด คือ 54.84 และซอสคาราเมลเสริมเนื้อตาลโดนดผงที่ระดับ 5% มีค่าน้อยที่สุด คือ 42.41 นอกจากนี้ซอสคาราเมลเสริมเนื้อตาลโดนดผงที่

ระดับ 5% มีค่า a^* และค่า b^* มากที่สุด คือ 21.40 และ 49.27 ตามลำดับ (ตารางที่ 7) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Tanasombun, *et al.* [15] ศึกษาการใช้เนื้อตาลโดนดผงทดแทนแป้งสาลีที่ระดับ 10% ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ งานวิจัยของ S. Kitjavorasatien [16] ที่ศึกษาการพัฒนาสูตรแป้งสาลีแปะเสริมผงเนื้อตาลสูงที่ระดับ 10% และ C. Peeraphatchara and W. Panyathitipong [17] ศึกษาการใช้เนื้อตาลสูงทดแทนแป้งสาลีที่ระดับ 35% ในขนมปัง โดยพบว่าเมื่อใส่เนื้อตาลโดนดลงในผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ส่วนค่า a^* และค่า b^* เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อตาลโดนดมีเบต้าแคโรทีนเป็นองค์ประกอบ โดยเนื้อตาลโดนดสูง 100 กรัม มีเบต้าแคโรทีน 6,075 หน่วยสากล (IU) [12] ซึ่งค่าสีของเบต้าแคโรทีนให้ค่าสีเหลืองและแดง ทำให้เมื่อนำมาเสริมในซอสคาราเมลจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีแดง และสีเหลืองเพิ่มขึ้น

เมื่อนำซอสคาราเมลทั้ง 4 สูตร คือ สูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาล และสูตรเสริมเนื้อตาลผงที่ระดับ 3% 4% และ 5% มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า พลังงาน ความชื้น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เยื่อใย และเถ้าของซอสคาราเมลทั้ง 4 สูตรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จากตารางที่ 8 พบว่าปริมาณเนื้อตาลโดนดผงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ซอสคาราเมลมีค่าพลังงาน ความชื้น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย และเถ้าเพิ่มขึ้น แต่มีคาร์โบไฮเดรตลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาล โดยซอสคาราเมลเสริมเนื้อตาลโดนดผงที่ระดับ 5% มีพลังงาน 416 kcal ความชื้น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย และเถ้าสูงที่สุด โดยมีค่า 36.19%, 31.88%, 2.77%, 6.51% และ 1.02% ตามลำดับ ส่วนสูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาลมีค่าน้อยที่สุด ส่วนคาร์โบไฮเดรตของซอสคาราเมลเสริมเนื้อตาลโดนดผงที่ระดับ 5% มีค่า 21.76 % และซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่เติมเนื้อตาล มีค่า 28.63%

ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อตาลโตนดผงมีพลังงาน
ความชื้น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย และเถ้า (ตารางที่ 3)
ซึ่งเมื่อปริมาณเนื้อตาลโตนดผงเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ข้อ
คาราเมลที่เสริมเนื้อตาลโตนดผงทั้ง 3 ระดับ มีค่า
องค์ประกอบทางเคมีสูงขึ้นด้วย แต่ปริมาณ
คาร์โบไฮเดรตในข้อคาราเมลเสริมเนื้อตาลโตนดผงมี

ค่าลดลง เนื่องจากปริมาณคาร์โบไฮเดรตนั้นได้จาก
การคำนวณจากสูตร เปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรต = 100
- (% ความชื้น + % โปรตีน + % ไขมัน + % เยื่อใย +
% เถ้า) ด้วยเหตุนี้ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน เยื่อ
ใย และเถ้าเพิ่มที่ขึ้น เมื่อนำมารวมกันและลบกับหนึ่ง
ร้อยละของคาร์โบไฮเดรตจึงน้อยลง

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสและค่าความแตกต่างของสูตรพื้นฐานของข้อคาราเมล 3 สูตร

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัส		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.50±0.88	7.80±0.91	7.45±0.88
สี	7.75±0.93 ^a	7.87±0.88 ^a	7.20±0.97 ^b
กลิ่น ^{ns}	7.77±0.80	7.90±0.78	7.55±0.88
รสชาติ ^{ns}	7.62±0.93	7.52±0.96	7.62±0.98
เนื้อสัมผัส ^{ns}	7.40±0.96	7.55±0.90	7.30±1.02
ความชอบโดยรวม ^{ns}	7.47±0.87	7.82±0.90	7.45±0.93

หมายเหตุ : ตัวอักษรแนวอนต่างกัน หมายถึง ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 7 คุณภาพทางกายภาพของข้อคาราเมลทั้ง 4 สูตร

ตัวอย่าง	ความหนืด (cps)	L*	a*	b*
สูตรพื้นฐาน	6.51×10 ⁴ ±1,555.63 ^c	54.84±0.06 ^a	12.61±0.00 ^c	36.52±0.06 ^c
3%	33.4×10 ⁴ ±16,970.56 ^b	46.99±0.01 ^b	19.59±0.13 ^b	45.25±0.05 ^b
4%	35.20×10 ⁴ ±11,313.71 ^{ab}	45.56±0.01 ^c	20.13±0.37 ^b	43.61±0.57 ^b
5%	38.00×10 ⁴ ±9,899.50 ^a	42.41±0.01 ^d	21.40±0.11 ^a	49.27±0.01 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกันหมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
ค่า L* คือ ความสว่าง มีค่า 0 – 100
ค่า a* คือ ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a* เป็น + คือ ออกสีแดง และ a* เป็น - คือ ออกสีเขียว)
ค่า b* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b* เป็น + คือ ออกสีเหลือง และ b* เป็น - คือ ออกสีน้ำเงิน)

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของข้อคาราเมลทั้ง 4 สูตร จากตัวอย่าง 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	สูตรพื้นฐาน	3%	4%	5%
พลังงาน (kcal)	404.18±0.08 ^c	404.40±0.42 ^c	405.77±0.04 ^b	416.17±0.04 ^a
ความชื้น (%)	34.68±0.69 ^c	34.81±0.01 ^b	36.19±0.01 ^a	36.19±0.02 ^a
ไขมัน (%)	29.28±0.00 ^d	30.67±0.04 ^c	30.92±0.03 ^b	31.88±0.04 ^a

องค์ประกอบทางเคมี	สูตรพื้นฐาน	3%	4%	5%
โปรตีน (%)	1.62±0.03 ^d	2.44±0.04 ^c	2.57±0.03 ^b	2.77±0.02 ^a
คาร์โบไฮเดรต (%)	28.14±0.38 ^a	25.53±0.40 ^b	23.44±0.38 ^c	21.63±0.46 ^d
เยื่อใย (%)	5.39±0.46 ^b	5.48±0.48 ^b	5.87±0.18 ^b	6.51±0.40 ^a
เถ้า (%)	0.89±0.02 ^b	1.07±0.04 ^a	1.01±0.00 ^a	1.02±0.01 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกันหมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 9 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของซอสคาราเมลทั้ง 4 สูตร

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัส			
	สูตรพื้นฐาน	3%	4%	5 %
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.48±0.89	7.56±0.95	7.28±0.93	7.31±0.91
สี ^{ns}	7.57±0.87	7.50±0.94	7.27±0.98	7.38±0.96
กลิ่น	7.67±0.87 ^a	7.49±0.92 ^{ab}	7.25±0.94 ^b	7.21±0.88 ^b
รสชาติ	7.70±0.86 ^a	7.31±0.93 ^b	7.17±1.03 ^b	7.10±0.94 ^b
เนื้อสัมผัส ^{ns}	7.40±0.96	7.51±1.01	7.28±1.01	7.25±0.99
ความชอบโดยรวม	7.62±0.86 ^a	7.51±1.01 ^{ab}	7.16±0.97 ^b	7.10±0.86 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรแนวนอนต่างกัน หมายถึง ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 9 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของซอสคาราเมลทั้ง 4 สูตร พบว่าทดสอบผู้ชิมให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี และเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนด้านกลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อแปลผลคะแนนความชอบแบบอันตรายค่าขึ้นพบว่า ซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่มีน้ำตาล ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความด้านกลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมมีค่าเฉลี่ย 7.67 7.70 และ 7.62 ตามลำดับซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก ส่วนซอสคาราเมลเสริมน้ำตาลโตนดผงระดับ 3% ผู้ชิมให้คะแนนความชอบด้านกลิ่น และความชอบโดยรวมมีค่าเฉลี่ย 7.67 และ 7.62 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก และผู้ทดสอบชิมให้คะแนนด้านรสชาติ 7.31 ซึ่งอยู่

ในระดับชอบปานกลาง ดังนั้นซอสคาราเมลสามารถเสริมน้ำตาลโตนดผงได้มากที่สุดที่ระดับ 3% เนื่องจากน้ำตาลโตนดมีรสชาติเปรี้ยว เมื่อเสริมลงในซอสคาราเมลปริมาณมากจะส่งผลให้ซอสคาราเมลมีรสชาติเปรี้ยวตามไปด้วย ทำให้ผู้ทดสอบชิมไม่ให้การยอมรับ

4. สรุป

น้ำตาลสดและน้ำตาลสดเป็นผลิตภัณฑ์จากตาลโตนดที่มีอายุการเก็บรักษาที่สั้น ดังนั้นการแปรรูปให้อยู่ในรูปแบบน้ำเชื่อมตาลโตนดและน้ำตาลโตนดผงเป็นการลดค่า a_w จึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ และยังสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด เช่น นำมาเป็นวัตถุดิบในซอสคาราเมล โดยนำน้ำเชื่อมตาลโตนดทดแทนน้ำตาลทรายทั้งหมดในซอสคาราเมลสูตรพื้นฐาน ซึ่งมีส่วนผสม

ดังนี้ น้ำเชื่อมตาลโตนด 32.26% วิปปิงครีม 58.06% และเนยจืด 9.86% จากนั้นนำมาเสริมเนื้อตาลโตนดผง เพื่อพัฒนาให้ซอสคาราเมลมีสี กลิ่น และรสชาติของตาลโตนด พบว่าการเสริมเนื้อตาลโตนดผงที่ระดับ 3% ทำให้ซอสคาราเมลมีคุณภาพทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกับซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่ใส่เนื้อตาล แต่ซอสคาราเมลที่พัฒนามีรสชาติเปรี้ยว จากเนื้อตาลโตนดผงทำให้ผู้ที่ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบด้านรสชาตินี้ต่ำกว่าซอสคาราเมลสูตรพื้นฐานที่ไม่ใส่เนื้อตาล ด้วยเหตุนี้หากต้องการนำเนื้อตาลโตนดผงไปเสริมในผลิตภัณฑ์อาหารจึงควรคำนึงถึงรสชาติซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของเนื้อตาลโตนด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลงด้วยดีด้วยการสนับสนุนจากได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร งบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Choocherd, "The research and development of products from palmyra palm," M.S. thesis, Major in product design. Faculty of applied arts and design., Ubonrajathane Univ., Ubonrajathane, Thailand, 2008.
- [2] *Palmyra Palm*, Information and communication technology center, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2020.
- [3] S. Kamnuansin, "An In-depth Study of Phechaburi People's Local Knowledge of Palmyra Palm through Terminology," Capital grants fund research and Creativity Fund., Silpakorn Univ., Nakhonpathom, Thailand. 2018.
- [4] C. Pangmark and S. Sriwilai. "Thai dessert product development from Palmyra – Plum power," in *Proceeding of The 5th Rajamangala University of technology National Conference*, RMUTP Research Journal Special, Thailand, pp. 39 - 105. n.d.
- [5] S. Kitiaworasatien and V. Pomnoi. *Practical European Food Banoffee pie cup*, Bangkok: n.p., 2019.
- [6] C. Bloom. (2018). *The Art of Caramel: Techniques & Treats*. [Online]. Availability: <http://www.carolebloom.com>.
- [7] Danielle. (2022). *HOMEMADE SALTED CARAMEL SAUCE*. [Online]. Availability: <https://www.livewellbakeoften.com/home-made-salted-caramel-sauce/>
- [8] A. Dholvitayakhun. "Product Development of Plam Sap Powder," *RMUTP Research Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 19-26, July-December. 2018.
- [9] O. Chaiprasop. "Food Preservation by Drying and Dehydration," Bangkok: Ramkhamheang University, n.d.
- [10] T. Keeratiburana. "Food Chemistry," Buriram: Buriram Rajahat University, 2014.
- [11] O. Chaiprasop. "Food preservation," 2 ed. Bangkok: Ramkhamheang University, 2008.
- [12] K. Cheuyglintase. "Foog Color Spray Dried Powders from Natural Raw Materials," Contribution from the income budget., Rajamangala Univer of Technology Thanyaburi Pathum Thani, Thailand. 2016.

- [13] J. Wiboonsirikul and P. Chachana. "Quality of Palmyra Palm Pulp After Heat Treatment," The 3rd National Graduate Research Conference RMU GRC, vol. 13, no. 4, pp. 1818-1822, 2018.
- [14] Y. Tanongkankit. "Utilization of Vegetable and Fruit Residues for Production of Dietary Fiber Powder," *Journal of Food Technology, Siam University*, vol. 9, no. 1, pp. 31-38, 2014.
- [15] P. Tanasombun, C. Siripanwattana, S. Prasengchom and N. Ngamsangiam. "Replacement of Palmyra plam powder in Fresh noodle," *SDU Res. J.*, Vol. 7, No. 1, pp. 105-123, Jan-April. 2014.
- [16] S. Kitjavorasatien. " Formulation Development of Steamed Buns by Supplemented Toddy Palm Pulp Powder," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 1-11, July-December. 2022.
- [17] C. Peeraphatchara and W. Panyathitipong. " Utilization of Palmra Palm (*Borassus abellifer* L.) of Phetchaburi Community in Bread Making," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 168-178, March. 2016.

การลอยตัวของฝุ่นบนถนนจากรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้การทดสอบแบบคงตัวและการขับขี่เสมือนจริง

ศิริศักดิ์ พงษ์สมบัติ วรวัฒน์ ทรงกิตติ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

รับบทความ 27 กุมภาพันธ์ 2566 แก้ไขบทความ 4 มิถุนายน 2566 ตอบรับบทความ 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่ารถยนต์สันดาปภายในเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญที่สุด ซึ่งในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยได้ให้ความสำคัญถึงปัญหานี้และสนใจที่จะเปลี่ยนมาใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางวิจัยพบว่ารถยนต์ไฟฟ้ายังคงมีการปล่อย PM (Particulate Matter) ที่ไม่ได้มาจากไอเสีย (Non-Exhaust PM Emission) ได้แก่ การสึกหรอของยาง (Tyre wear) การสึกหรอของระบบเบรก (Brake wear) การสึกหรอของพื้นผิวถนน (Road surface wear) และการลอยตัวของฝุ่นบนถนน (Resuspension of road dust) นอกจากนี้ยังพบว่ามีตัวแปรสำคัญคือน้ำหนักของรถยนต์ และความเร็วของรถยนต์ที่ส่งผลต่อปริมาณการปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากไอเสีย งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปล่อย PM แบบ Non-Exhaust ที่เกิดจากรถยนต์ไฟฟ้าโดยติดตั้งอุปกรณ์วัด ปริมาณความเข้มข้นของ PM แบบ Real-time ที่บริเวณด้านหลังของล้อหน้าซ้ายในขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบ 3 รูปแบบ คือความเร็วในการขับขี่แบบคงที่ การเบรกรถยนต์ตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 และการทดสอบในวัฏจักรการขับขี่เสมือนจริง ซึ่งแต่ละการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกต่างกัน 200 kg จากการทดสอบทั้ง 3 รูปแบบพบว่า เมื่อรถยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยของ PM สุกชัดอย่างชัดเจน โดยในการทดสอบแบบความเร็วคงที่พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน ความเร็วที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การปลดปล่อยของ PM₁₀ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 80 km/hr พบว่าการปลดปล่อยของ PM₁ และ PM_{2.5} จะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่จะส่งผลเฉพาะต่อการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยของ PM₁₀ เท่านั้น ในการเบรกดตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 น้ำหนักที่บรรทุกเพิ่มขึ้น 200 kg ส่งผลต่อการปลดปล่อย PM เพิ่มขึ้นเกือบสองเท่า และในการทดสอบแบบวัฏจักรการขับขี่เสมือนจริง การเร่งความเร็วเพื่อออกตัวและเบรกเพื่อชะลอความเร็วส่งผลให้การปลดปล่อยของ PM จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้สภาพพื้นผิวถนนที่สกปรกยังเป็นปัจจัยสำคัญในการปลดปล่อยของ PM ที่เพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ : มลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสีย; รถยนต์ไฟฟ้า; ฝุ่นละอองขนาดเล็ก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 2797 0999 ต่อ 1839, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: fengeka@ku.ac.th

Resuspension of Road Dust from Electric Vehicles under Steady and Real-world Driving Tests

Sirasak Pong-a-mas Worawat Songkitti and Ekathai Wirojsakunchai*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
50 Ngamwongwan Road Ladyao, Chatuchak District Bangkok, Thailand 10900

Received 27 February 2023; Revised 4 June 2023; Accepted 29 June 2023

Abstract

Internal combustion engines are considered as one of the most important major causes of air pollution. Many countries including Thailand pay attention to this problem and support electric vehicle usages for emission reductions. However, past literatures indicated that electric vehicles also emitted Particulate Matter (PM) via non-exhaust emissions. These included tyre wear, brake wear, road surface wear, and resuspension of road dust. Weight and speed of vehicles were found out as the major variable on this non-exhaust PM emissions. In the current study, non-exhaust PM emissions from an electric vehicle were measured by installing a real-time PM concentration measuring device in the back of the front left wheel while the vehicle was moving. There were three types of tests: constant speed test, ISO 21994:2007 standard brake test, and real-world driving cycle test. In each type of tests, payloads were varied. From the experimental data in all tests, it has been clearly seen that increasing payloads on the tested vehicle resulting in changes in PM emissions. With the same payload, the amounts PM₁₀ emissions increase when the vehicle speeds are varied from 40 to 80 km/hr. However, varying speed do not affect the amounts of PM₁ and PM_{2.5} at the speed of 60 and 80 km/hr. Only the increase of PM₁₀ emissions is observed. In ISO 21994:2007 standard brake test, additional payload of 200 kg results in almost half of PM emissions increase. In the real-world driving test, braking sequences (vehicle was accelerated and stopped) tremendously affects the amount of PM emissions. In addition, the condition of road surface also impacts the amounts of resuspended PM emissions.

Keywords : Non-exhaust exhaust emissions, Electric vehicles, Particulate Matters

* Corresponding Author. Tel.: +66 2797 0999, E-mail Address: fengeka@ku.ac.th

1. บทนำ

ฝุ่นละออง Particulate Matter (PM) เป็นหนึ่งในมลพิษทางอากาศที่เป็นปัญหาย่างมากในด้านของสุขภาพมนุษย์ โดยทั่วไป PM มักถูกแบ่งออกเป็น PM₁, PM_{2.5} และ PM₁₀ ซึ่งใช้แทนในการเรียกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร, 2.5 ไมโครเมตร และ 10 ไมโครเมตร ตามลำดับ [1], [2]-[6] แหล่งที่มาหลักของ PM สามารถพบได้ในเขตเมือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่มีการจราจรที่แออัดหนาแน่น ซึ่งหนึ่งในกลยุทธ์ที่ถูกนำมาใช้ในหลากหลายประเทศ รวมถึงในประเทศไทยเพื่อปรับปรุงดัชนีคุณภาพอากาศคือการส่งเสริมนโยบายให้หันมาใช้รถยนต์ไฟฟ้าโดยได้รับเสนอให้เป็นวิธีการแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [7]

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อจำลองผลกระทบของรถยนต์ไฟฟ้าต่อคุณภาพอากาศ [8], [9] พบว่าการหันมาใช้รถยนต์ไฟฟ้าไม่สามารถลดการปล่อย PM อย่างมีนัยสำคัญได้เนื่องมาจากความสำคัญของการปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากไอเสีย Non-Exhaust PM Emission จากการตรวจเอกสารเบื้องต้นพบว่ารถยนต์ไม่เพียงแต่ปล่อย PM ที่เกิดจากไอเสีย แต่ยังปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากไอเสียอีกด้วย เช่น การสึกหรอของยาง (Tyre Wear) การสึกหรอของระบบเบรก (Brake wear) การสึกหรอของพื้นผิวถนน (Road Surface Wear) และการลอยตัวของฝุ่นบนถนน (Resuspension of Road Dust) [10]-[13] การปล่อยมลพิษที่ไม่ได้เกิดจากไอเสียเหล่านี้มักจะมี PM₁₀ เป็นส่วนใหญ่ แต่ส่วนที่สำคัญของการปล่อยมลพิษยังมี PM_{2.5} อีกเช่นกัน โดยลักษณะทางเคมีของการปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากการเผาไหม้แตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโลหะหนัก เช่น สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) และอื่นๆ [14], [15]-[21] การสึกหรอของถนนและการสึกหรอของยางเกิดจากการเสียดสีกันระหว่างดอกยางกับพื้นผิวถนน การสึกหรอของเบรกเกิด

จากการเสียดสีกันระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรก และการลอยตัวของฝุ่นบนถนน เกิดจากการตะกุกของล้อรถยนต์กับพื้นผิวถนน [22] โดยน้ำหนักของรถยนต์จะมีอิทธิพลต่อตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งรถยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักมากกว่ารถยนต์สันดาปภายใน 24% [23] จึงส่งผลให้รถยนต์ไฟฟ้ายังคงเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสีย

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปล่อยมลพิษไม่ได้เกิดจากไอเสียในรถยนต์ไฟฟ้า โดยทำการทดสอบในช่วงความเร็วคงที่ ทดสอบในมาตรฐานการเบรก (ISO 21994:2007) และทดสอบในวัฏจักรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง (Real World Driving Cycle) ซึ่งแต่ละการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกเพื่อศึกษาผลกระทบปริมาณการปล่อย PM กับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยในการทดสอบนี้จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มข้นของ PM แบบ Real-time ที่ฟังก์กระจายบริเวณด้านหลังล้อหน้าซ้ายของรถยนต์ไฟฟ้า ขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อย PM จากรถยนต์ดังกล่าว โดยการวัด PM ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการวัดการลอยตัวของฝุ่นบนถนนที่เกิดจากรถยนต์ [24] ไม่ได้ใช้วิธีการวัดการสึกหรอของเบรกตรงที่ดุมล้อของรถยนต์ [25] นอกจากนี้ระยะทางที่ใช้ในการทดสอบรถยนต์ในงานวิจัยนี้มีระยะทางที่ไม่มากนัก จึงได้ไม่คิดผลกระทบของการสึกหรอที่มาจากยางล้อรถยนต์ การทดสอบทำขึ้นในช่วงเวลากลางคืนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการจราจรที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 รถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าเอสยูวีที่มีระบบขับเคลื่อนเฉพาะล้อหน้าเท่านั้น โดยที่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้รับการบำรุงรักษาตรวจเช็ค

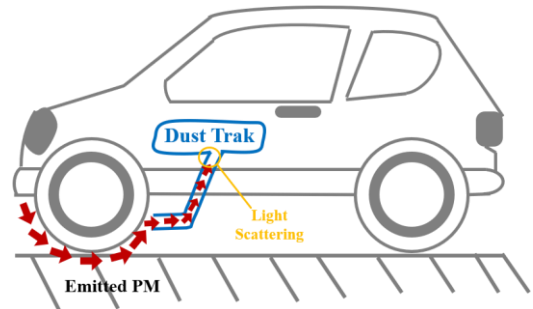
ระยะตามมาตรฐานรวมถึงแรงดันลมยางที่เติมตามสเปกที่ตัวรถยนต์ไฟฟ้ากำหนด โดยตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจำเพาะของรถยนต์ไฟฟ้าทดสอบในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของรถยนต์ไฟฟ้า

รายละเอียด	ข้อมูลทางเทคนิค
มิติ	
ความยาว (มิลลิเมตร)	4,314
ความกว้าง (มิลลิเมตร)	1,089
ความสูง (มิลลิเมตร)	1,624
ระยะช่วงล้อ (มิลลิเมตร)	2,585
ระยะห่างระหว่างล้อคู่หน้า / หลัง (มิลลิเมตร)	1,526 / 1,539
ระยะต่ำสุดจากพื้น (มิลลิเมตร)	161
ขนาดล้อ และยาง	
	ล้ออัลลอยด์ 17 นิ้ว 215 / 50 R17
น้ำหนักกรด (กิโลกรัม)	1,590
สมรรถนะ	
ประเภทมอเตอร์ไฟฟ้า	Permanent Magnet Synchronous Motor
ประเภทแบตเตอรี่	Lithium – Ion Battery
กำลังสูงสุด (แรงม้า (กิโลวัตต์))	150 (110)
แรงบิดสูงสุด (นิวตัน - เมตร)	350
ความจุแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์ - ชั่วโมง)	44.5
ระยะทางวิ่งสูงสุด (NEDC Mode) (กม.)	337
ระบบพวงมาลัย และระบบช่วงล่าง	
ระบบพวงมาลัย	แร็คแอนด์พีนีเยน ควบคุมด้วยไฟฟ้า (EPS)
รัศมีวงเลี้ยวแคบสุด (เมตร)	5.6
ระบบช่วงล่างหน้า	อิสระแมคเฟอร์สันสตรัท พร้อมเหล็กกันโคลง
ระบบช่วงล่างหลัง	ทอร์ชันบาร์
ระบบเบรคหน้า	ดิสก์เบรคพร้อมช่องระบายความร้อน
ระบบเบรคหลัง	ดิสก์เบรค

2.2 การเก็บตัวอย่าง

การทดลองได้ทำการใช้อุปกรณ์ตรวจจับอนุภาคฝุ่นละออง Dust Trak DRX 8533 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ $\pm 0.1\%$ และเครื่องมือชนิดนี้ได้มีการตั้งค่า Isokinetic Sampling ภายในตัวเครื่อง โดยมีการไหลในท่อแบบคั่งที่ (Choked flow) [26] ซึ่งแผนผังการทดลองแสดงดังในรูปที่ 1 โดยได้ทำการติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งด้านหลังยางของล้อหน้าซ้ายของรถยนต์ไฟฟ้างดรูปที่ 2 ในการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างในเวลากลางคืนเพื่อลดการปนเปื้อนของ PM ที่อาจปลดปล่อยมาจากรถยนต์คันอื่นในเวลาที่ทำการทดสอบ โดยทุกการทดสอบจะทำการทดสอบในสภาพถนนที่แห้งสนิท



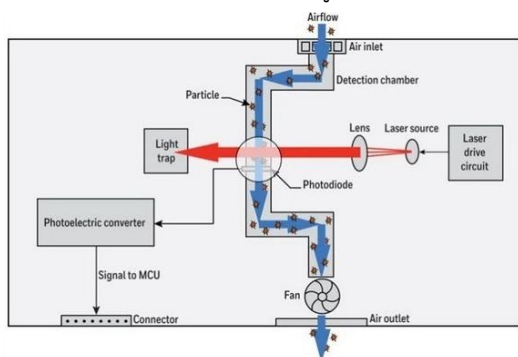
รูปที่ 1 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด

Dust Trak DRX 8533 เป็นอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM ที่สามารถวัดความเข้มข้นในแต่ละขนาดของอนุภาคได้ในเวลาเดียวกัน ค่าที่วัดได้จะแสดงผลแบบ Real Time ซึ่งสามารถวัดอนุภาคได้พร้อมกันทั้ง 4 ขนาดได้แก่ PM1, PM2.5, PM4 และ PM10 โดยจะแสดงผลการตรวจวัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีช่วงการตรวจวัด 0.001 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

หลักการทำงานของ Dust Trak DRX 8533 จะมีอุปกรณ์ปล่อยแสงเลเซอร์และอุปกรณ์ตรวจจับค่าการสะท้อนแสงถูกวางไว้ให้ลำแสงของทั้งสองอุปกรณ์ตัดกันตรงรูปออดี้ (Light Scattering) โดยหลักการการตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองนั้นจะทำได้ด้วยการใช้ปั๊มดูดอากาศเข้าไปในตัวเซนเซอร์แล้วใช้เลเซอร์ตรวจจับ เมื่อเลเซอร์ตรวจพบอนุภาคฝุ่นละออง แสงเลเซอร์ที่กระทบตัวอนุภาคจะหักเหอยู่ในรูปคลื่นแสงที่มีลักษณะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองโดยได้แสดงถึงลักษณะตัวอย่างหลักการทำงานของเครื่องมือวัดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องมือวัด [27]

2.3 กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บค่าและบันทึกผลโดยมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

2.3.1 น้ำหนัก

จากการศึกษาวิจัยพบว่า น้ำหนักของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เพิ่มการปล่อยอนุภาค

มลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสียเพิ่มขึ้น [23] โดยในการทดสอบนี้ได้ทำการเพิ่มภาระโหลด (Payload) ของรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อศึกษาความแตกต่างของการปล่อยมลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสียจากภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำหนักของรถยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดรวมถึง 1 คนขับ คือ 1,663 กิโลกรัม จากนั้นจะทำการเพิ่มน้ำหนักประมาณ 200 กิโลกรัม ให้กับรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองการนั่ง 4 ที่นั่งให้เต็มคันรถ ทำให้รถยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักเป็น 1,863 กิโลกรัม

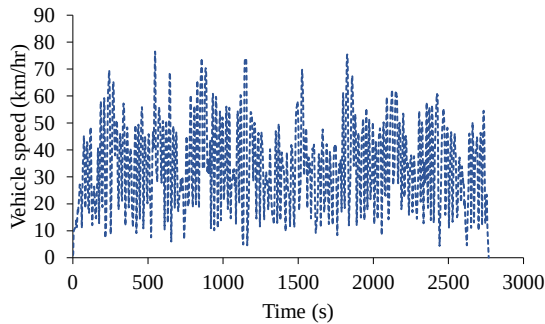
2.3.2 ความเร็วของรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับขี่

ทำการทดสอบผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ที่ส่งผลต่อการปล่อย PM ซึ่งจากงานวิจัยของ [24] ได้ทำการทดสอบด้วยความเร็วคงที่คือ 30, 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าความเร็วที่ใช้ในการขับขี่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณการปล่อย PM เพิ่มขึ้น โดยเป็นการทดสอบในช่วงความเร็วต่ำ และเนื่องจากยังไม่มี การทดสอบที่ความเร็วสูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบด้วยความเร็วคงที่ที่ใช้ในการทดสอบคือ 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อศึกษาว่าในช่วงของความเร็วสูงนั้นส่งผลต่อปริมาณการปล่อย PM อย่างไร

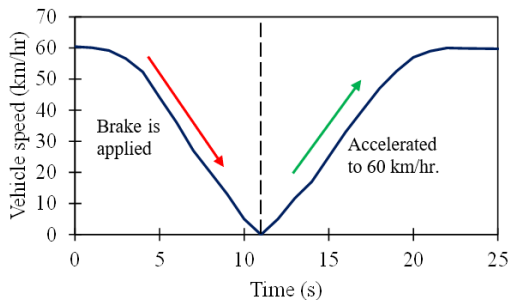
2.3.3 วงจรการขับขี่

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบลักษณะการปล่อย PM โดยใช้เงื่อนไขลักษณะการขับขี่สองรูปแบบ โดยแบบแรกคือ วงจรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง ดังที่แสดงในรูปที่ 4 โดยในงานวิจัยนี้ใช้เวลาเกือบ 3,000 วินาที ในการขับขี่ โดยเลือกขับขี่ในพื้นที่ปิด ซึ่งในวงจรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริงนี้ มีทั้งช่วงการชะลอความเร็ว และการเร่งความเร็ว เพื่อใช้ในการเลียนแบบวงจรการขับขี่บนท้องถนนจริงภายใต้พื้นที่การจราจรคับคั่ง ส่วนที่สอง คือ รูปแบบการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 ดังที่แสดงในรูปที่ 5 โดยยานพาหนะจะวิ่งที่ความเร็วคงที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากนั้นจะทำการเหยียบเบรกให้ความเร็วของ

ยานพาหนะเป็น 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเพื่อให้ยานพาหนะหยุดภายในระยะ 36.7 เมตร และจากนั้นก็ทำความเร็วของยานพาหนะให้เป็น 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอีกครั้ง โดยสามารถหาข้อมูล การเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 เพิ่มเติมได้จาก [28]



รูปที่ 4 ตัวอย่างรูปแบบวัฏจักรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5 การชะลอความเร็วจาก 60 – 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใต้การเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007

โดยตัวแปรต่างๆทั้งหมดที่ถูกกำหนดในแต่ละการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกคือ 1,663 กิโลกรัม (น้ำหนักเบา) และ 1,863 กิโลกรัม (น้ำหนักหนัก) เพื่อศึกษาถึงผลเปลี่ยนแปลงของปริมาณของ PM ที่ออกมาจากการขับขี่ที่มีน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน โดยแต่ละตัวแปรและลักษณะการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

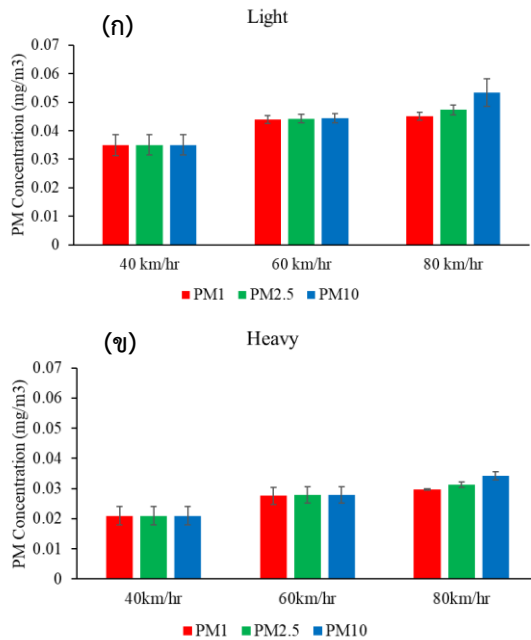
ตัวแปร	ลักษณะการทดสอบ
การขับขี่ช่วงความเร็วคงที่	น้ำหนักเบา น้ำหนักหนัก
การขับขี่ตามเงื่อนไขจริง	น้ำหนักเบา น้ำหนักหนัก
มาตรฐานการเบรก ISO 21994:2007	น้ำหนักเบา น้ำหนักหนัก

จากนั้นทำการหาพื้นที่ใต้กราฟของผลการทดลองและเฉลี่ยออกมาเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ย PM สุทธิในหน่วย มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ PM

ในการทดสอบนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ต่อการปล่อย PM ในช่วงของความเร็วสูงโดยการทดสอบจะขับขี่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ ได้แก่ สถิติ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิที่เพิ่มขึ้น แบบมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ระดับของ PM₁ และ PM_{2.5} แบบมีนัยสำคัญ แต่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิที่ระดับของ PM₁₀ เท่านั้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [29] ที่ระบุว่า การลอยตัวของฝุ่นบนถนนที่เกิดจากการตะกุกของล้อรถยนต์กับพื้นผิวถนนเป็น PM ขนาดใหญ่ ดังที่แสดงในตารางที่ 3



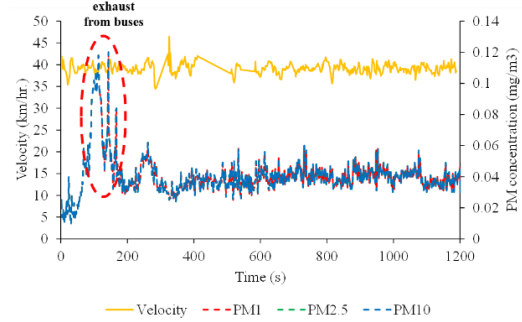
รูปที่ 6 ปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว: (ก) แบบน้ำหนักเบา (ข) แบบน้ำหนักหนัก

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติถึงผลกระทบของความเร็วต่อการปลดปล่อย PM10

Tests of Between-Subjects Effects					
Dependent Variable: PM2.5					
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.001 ^a	5	.000	9.393	.008
Intercept	.013	1	.013	880.836	.000
Velocity	.000	2	7.46E-005	4.904	.055
Weight	.001	1	.001	36.171	.001
Velocity * weight	1.50E-005	2	7.50E-006	.493	.633
Error	9.13E-005	6	1.52E-005		
Total	.014	12			
Corrected Total	.001	11			

a. R Squared = .887 (Adjusted R Squared = .792)

เนื่องจากการทดสอบที่ความเร็วคงที่จำเป็นต้องใช้ระยะทางกว้าง จึงอาจมีตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับการทดสอบ เช่น ไอเสียจากยานพาหนะรอบๆ โดยได้ยกกรณีตัวอย่างมาจากการขับด้วยความเร็วคงที่แบบน้ำหนักเบา ช่วงความเร็วคงที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 7

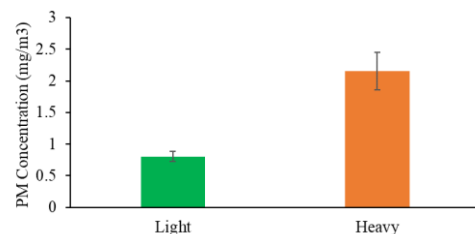


รูปที่ 7 ตัวอย่างค่าความเข้มข้นของ PM ของภาระน้ำหนักเบาในแต่ละช่วงเวลาของความเร็วคงที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.2 มาตรฐานการเบรก ISO 21994:2007

เป็นการทดลองการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 โดยยานพาหนะจะวิ่งที่ความเร็วคงที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากนั้นจะทำการเหยียบเบรกให้ความเร็วของยานพาหนะเป็น 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อให้หยุดภายในระยะ 36.7 เมตรโดยการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาพื้นที่ใต้กราฟของผลการทดลองและเฉลี่ยออกมาเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยสุทธิของฝุ่นอนุภาคที่มีการฟุ้งกระจายขึ้นมาจากรถยนต์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 แบบน้ำหนักหนักนั้นจะทำให้การเพิ่มขึ้นของค่า PM10 โดยสุทธินั้นมากกว่าแบบน้ำหนักเบาประมาณ 50 % เนื่องจากน้ำหนักที่มากทำให้เกิดแรงที่กดที่พื้นผิวถนนมีค่ามาก ทำให้ทั้งการเบรกและการเร่งแบบน้ำหนักหนักมีการตะกุกฝุ่นขึ้นมาจากพื้นและรุนแรงกว่าแบบน้ำหนักเบาซึ่งสอดคล้องกับงานของ [30]

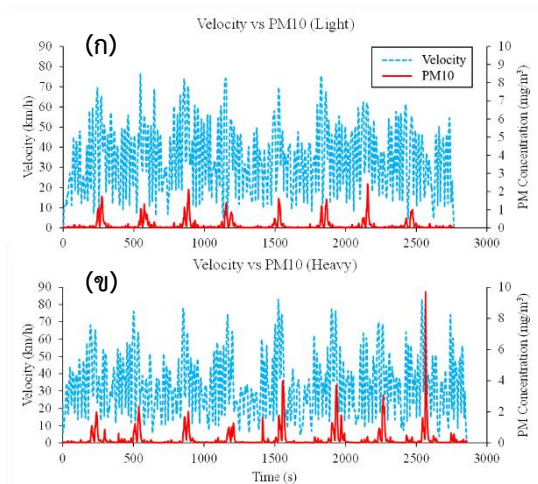
Braking from 60 to 0 km/h under ISO 21994:2007 standard.



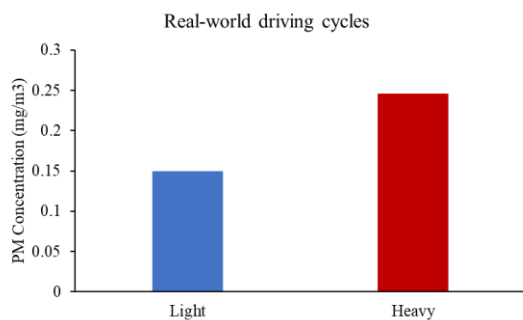
รูปที่ 8 ปริมาณความเข้มข้นของ PM10 โดยสุทธิจากการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007

3.3 การขับขี่ตามเงื่อนไขจริง

เป็นการทดลองการขับขี่เพื่อจำลองการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง โดยได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 9 ปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ออกมาจากภาระหนักมีค่ามากกว่าภาระเบา แต่จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าตำแหน่งที่มีค่า PM สูงและเกิดเป็นลักษณะลูกคลื่นนั้นมาจากการขับวนซ้ำเป็นวัฏจักร เมื่อรถทดสอบขับไปที่ช่วงของถนนที่มีพื้นผิวถนนค่อนข้างสกปรกปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่วัดได้จะมีค่าสูง แต่เมื่อรถทดสอบขับไปที่ช่วงของถนนที่มีพื้นผิวค่อนข้างสะอาดปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่วัดได้ก็จะมีค่าต่ำ โดยลักษณะของพื้นผิวถนนได้แสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 พฤติกรรมการปล่อย PM ที่วัดได้ระหว่างการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง: (ก) แบบน้ำหนักเบา (ข) แบบน้ำหนักหนัก



รูปที่ 10 ปริมาณความเข้มข้นของ PM สู่จากการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง



รูปที่ 11 ลักษณะพื้นผิวถนนที่ทำการทดสอบ: (ก) ช่วงที่ถนนสะอาด (ข) ช่วงถนนที่สกปรก

4. สรุป

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิด Non-Exhaust PM Emissions จาการถยนต์ไฟฟ้าที่ทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกันสามารถสรุปได้ดังนี้

1.จากการทดสอบในการขับขี่ด้วยความเร็วคงที่พบว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM สู่ที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM1 และ PM2.5 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM10 จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

2.จากการทดสอบการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 น้ำหนักที่บรรทุกส่งผลต่อการปล่อย PM

เป็นอย่างมาก ในขณะที่การเร่งความเร็วเพื่อออกตัว โดยความเข้มข้นของ PM จะเพิ่มขึ้นเกือบครึ่งหนึ่งจากเดิม นอกจากนี้ยังเพิ่มการปล่อย PM ที่มาจากการสึกหรอของเบรกในระหว่างการชะลอความเร็วอีกด้วย

3.จากการทดสอบการขับขึ้นเนินจริง น้ำหนักที่บรรทุกเพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ออกมาจากรถยนต์ไฟฟ้า แต่ที่สังเกตได้ชัดเจนคือสภาพของพื้นผิวถนนที่มีความสะอาดและสกปรกที่ไม่เท่ากันมีผลต่อการฟุ้งกระจายของ PM เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ที่เกิดจากการตะกุกของล้อรถยนต์ไฟฟ้า

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รหัสโครงการวิจัยเลขที่ 62/09/ME/D.Eng และมูลนิธิโทรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนทางการเงินในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. D. B. B. Guerreiro, F. Leeuw, V. Foltescu, J. Horalek. (2014, Jan) Air Quality in Europe - 2014 Report. European Environmental Agency Copenhagen. [Online] Available: <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2014>.
- [2] A. Valavanidis, K. Fiotakis, T. Vlachogianni, "Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms," Journal of Environmental Science and Health, Part C, vol. 26, no. 4, pp. 339-362, 2008.
- [3] N. Li, M. Hao, R. F. Phalen, W. C. Hinds, A. E. Nel, "Particulate air pollutants and asthma: a paradigm for the role of oxidative stress in PM-induced adverse health effects," Clinical Immunology, vol. 109, no. 3, pp. 250-265, Dec. 2003.
- [4] U. Gehring, R. Beelen, M. Eeftens, G. Hoek, K. de Hoogh, J. C. de Jongste, M. Keuken, G. H. Koppelman, K. Meliefste, M. Oldenwening, D. S. Postma, L. V. Rossem, M. Wang, H. A. Smit, B. Brunekreef, "Particulate matter composition and respiratory health: the PIAMA Birth Cohort Study," Epidemiology, vol. 26, no. 3, pp. 300-309, Feb. 2015.
- [5] World Health Organisation. (2015, Aug 3). Burden of Disease from Ambient Air Pollution for 2012. [Online]. Geneva. Available: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/AAP_BoD_results_March2014.pdf.
- [6] J. D. Sacks, L. W. Stanek, T. J. Luben, D. O. Johns, B. J. Buckley, J. S. Brown, M. Ross, "Particulate matter induced health effects: who is susceptible?," Environ Health Perspect, vol. 119, no. 4, pp. 446-454, Apr. 2011.
- [7] T. Murrells, Y. Pang. (2013, Feb 6). Emission Factors for Alternative Vehicle Technologies. [Online]. Available: http://naei.defra.gov.uk/resources/NAEI_Emission_factors_for_alternative_vehicle_technologies_Final_Feb_13.pdf.

- [8] A. Soret, M. Guevara and J. M. Baldasano, "The potential impacts of electric vehicles on air quality in the urban areas of Barcelona and Madrid (Spain)," *Atmospheric Environment*, vol. 99, pp. 51-63, Dec. 2014.
- [9] J. J. P. Kuenen, A. J. H. Visschedijk, M. Jozwicka and H. A. C. Denier van der Gon, "TNO-MACC_II emission inventory: a multi-year (2003 – 2009) consistent high-resolution European emission inventory for air quality modelling," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 20, pp. 10963-10976, 2014.
- [10] P G Boulter, "A Review of Emission Factors and Models for Road Vehicle Nonexhaust Particulate Matter," *TRL Project Report PPR065 for DEFRA*, 2005.
- [11] A. Thorpe and R. M. Harrison, "Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 400, no. 1, pp. 270-282, Aug. 2008.
- [12] M. Mathissen, V. Scheer, R. Vogt, T. Benter, "Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire-road interface," *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 34, pp. 6172-6179, Nov. 2011.
- [13] Victor R.J.H. Timmers and Peter A.J. Achten, "Non-Exhaust PM Emissions from Electric Vehicles," *Atmospheric Environment*, vol. 134, pp. 10-17, Jun. 2016.
- [14] Sanders, P.G., Xu, N., Dalka, T.M., Maricq, M.M., "Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests," *Environmental Science Technology*, vol. 37, no. 18, pp. 4060-4069, 2003.
- [15] Hjortenkrans, D.S.T., Bergbäck, B.G., Häggerud, A.V., "Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005," *Environmental Science Technology*, vol. 41, no.15, pp. 5224–5230, 2007.
- [16] F. Amato, M. Pandolfi, M. Viana, X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, "Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment," *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 9, pp. 1650–1659, 2009.
- [17] F. Amato, M. Pandolfi, T. Moreno, M. Furger, J. Pey, A. Alastuey, N. Bukowiecki, A.S.H. Prevot, U. Baltensperger, X. Querol, "Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities," *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 6777-6787, 2011.
- [18] Gietl, J.K., Lawrence, R., Thorpe, A.J., Harrison, R.M., "Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road," *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 2, pp. 141–146, 2010.
- [19] Apeagyei, E., Bank, M.S., Spengler, J.D., "Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts," *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 13, pp. 2310–2323, 2011.

- [20] Harrison, R.M., Jones, A.M., Gietl, J., Yin, J., Green, D.C., "Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to non-exhaust traffic particles de-rived from atmospheric measurements," *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 12, pp. 6523–6529, 2012.
- [21] Hulskotte, J.H.J., Roskam, G.D., Denier van der Gon, H.A.C., "Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors," *Atmospheric Environment*, vol. 99, pp. 436–445, Dec. 2014.
- [22] A. Simons, "Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in Ecoinvent v3, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 21, no. 9, pp. 1299-1313, 2013.
- [23] E. Wirojsakunchai, C. Plengsa-Ard, and W. Songkitti, "Effects of Payload on Non-exhaust PM Emissions from Hybrid Electric Vehicle during Braking Sequences," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1013, no. 1, pp. 012002.
- [24] Noh, S.-Y., K.-R. Lee, J.-H. Noh, H.-S. Kim and S.-J. Yook, "Comparison of resuspended road dust concentration for identifying optimum sampling position on a mobile laboratory vehicle," *Aerosol Science and Technology*, vol. 55, no. 11, pp. 1230-1238, 2021.
- [25] W. Songkitti, E. Wirojsakunchai, and T. Aroonsrisopon, "Identifying Factors that Affect Brake Wear PM Emissions during Real-World Test Conditions," *SAE Technical Paper*, Mar. 2022.
- [26] Nertrium. (2015). Choked Flow. [Online]. Available: <https://neutrium.net/fluid-flow/choked-flow/>
- [27] W. Songkitti, S. Pong-A-Mas, C. Plengsa-Ard, and E. Wirojsakunchai, "Influence of Factors on Non-Exhaust PM Emissions from Motorcycle," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 39, no. 1, pp. 46-53, Mar. 2022.
- [28] ISO, (2007). ISO 21994:2007. Passenger Cars — Stopping Distance at Straight-Line Braking with ABS — Open-Loop
- [29] D. R. Fitz, K. Bumiller, C. Bufalino, D. E. James, "Real-time PM10 emission rates from paved roads by measurement of concentrations in the vehicle's wake using on-board sensors part 1. SCAMPER method characterization," *Atmospheric Environment*, vol. 230, Jun. 2020.
- [30] Hagino, H., M. Oyama, and S. Sasaki, "Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating," *Wear*, vol. 334-335, p. 44-48, 2015.

การพัฒนาจานข้าวครวจากวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียว สันป่าตอง

นภัสภ์ จันทรมี¹ สุภาพร ดาวทอง² และ จิตินันท์ รัตนพรหม^{3*}

^{1,2}คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

^{1,2}หน่วยวิจัยวัสดุผสมและการสร้างต้นแบบโดยใช้การพิมพ์สามมิติ สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

³คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

^{1,2,3} 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

รับบทความ 19 มิถุนายน 2565 แก้ไขบทความ 12 มิถุนายน 2566 ตอรับบทความ 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจ
หมุนเวียนได้รับความสนใจอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มคุณค่าเศษใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้น
กล้าข้าวเหนียวสันป่าตองโดยการนำมาเป็นส่วนผสมในการผลิตจานข้าวครวจากโฟมแข็งที่ประกอบด้วยวิธีการกดอัดทาง
ความร้อน ปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งไม่เกินร้อยละ 14 โดยน้ำหนักของปริมาณแป้ง สภาวะการอัดคืออุณหภูมิของ
แม่พิมพ์ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 14 เมกกะปาสคาล ได้จานข้าวครวขนาดพื้นที่ 144 ตารางเซนติเมตร ความหนา
1 – 2 มิลลิเมตร น้ำหนักเบา มีความหนาแน่น 0.20 – 0.46 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นไม่ขึ้นกับปริมาณ
ของเศษใบข้าวเหลือทิ้ง มีความต้านทานแรงดัด 3.2 – 3.5 เมกกะปาสคาล ซึ่งยังคงต่ำกว่าจานข้าวครวที่มีขายใน
ท้องตลาดปัจจุบัน (4.18 ± 0.45 เมกกะปาสคาล) ความสามารถในการดูดซับน้ำของจานข้าวครวจากโฟมแข็งลดลงเมื่อ
เพิ่มปริมาณเกล็ดในส่วนผสมและปริมาณน้ำยางพาราไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปริมาณแป้ง การเคลือบผิว
หน้าจานข้าวครวด้วยพอลิแลคติกแอซิดช่วยลดอัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ชิ้นงานได้

คำสำคัญ : เศษใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูป; จานข้าวครว; โฟมแข็ง; น้ำยางพารา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 2694 1539, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: tithinun@mju.ac.th

Development of Single-use Plate from waste of Sanpatong Seedling

Napat Chantaramee¹ Supaporn Daotong² and Tithinun Rattanaplome^{3*}

^{1,2}Faculty of Science, Maejo University

^{1,2}Composite Materials and 3D Prototyping Research Unit, the Office of Agricultural Research and Extension, Maejo University

³Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

^{1,2,3} 63 Moo 4, Nongharn, Sunsai, Chiangmai, 50290

Received 19 June 2022; Revised 12 June 2023; Accepted 29 June 2023

Abstract

Recently, it has been of great interest involving to mitigate the environmental impact by changing the plant processing waste towards the circular economy concept. This research was aimed to add value to waste from processing of Sanpatong sticky rice seedling. Disposable plate was made from starch foam mixed with waste from processing of Sanpatong sticky rice seedling by compression molding. The content of rice seedling waste was not more than 14 weight percent of starch foam. The compression condition is 170 °C with the pressure of 14 MPa. The area, the thickness, and the density of disposable container are 144 cm², 1-2 mm. and 0.20-0.46 g/cm³, respectively. The disposable plate is light and the density does not depend on the content of waste of rice seedling. The flexural strength of disposable plate is about 3.2-3.5 MPa which is lower than that of commercial one. The water adsorption of disposable plate decreased when adding not more than 10 wt% of kaolin and latex rubber in starch foam. Coating with polylactic acid on disposable container can also reduce the water adsorption.

Keywords : Waste from processing or rice seedling; Disposable plate; Starch foam; Latex rubber

* Corresponding Author. Tel.: +662 694 1539, E-mail Address: tithinun@mju.ac.th

1. บทนำ

งานแบบชั่วคราวแบบใช้แล้วทิ้ง (Single-use plate) ที่ทำจากพอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) ก่อให้เกิดปัญหาขยะที่เป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โฟมแข็งถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนโฟมจากพลาสติกสังเคราะห์ เพราะแหล่งวัตถุดิบสามารถปลูกซ้ำใหม่ได้อีก (Renewable sources) และวัตถุดิบนี้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) แต่อย่างไรก็ตามโฟมแข็งยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ เพราะและไวต่อความชื้น

งานวิจัยมากมายได้ทดลองทำโฟมแข็ง เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส การผสมยางพารา และสารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำเช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid: PLA) ก็ช่วยป้องกันภาชนะโฟมแข็งสัมผัสกับน้ำได้ง่าย เช่น โฟมแข็งที่เสริมแรงด้วยเส้นใยบาร์เลย์ Lopez-Gila et.al., 2015 [1] โฟมแข็งมันสำปะหลังผสมเส้นใยเซลลูโลส และการทำภาชนะโฟมแข็งจากมันฝรั่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ [2] N. H. P. Rodrigues et. al. [2] ใช้ Xanthan gum เป็นพลาสติกไซเซอร์ ได้ภาชนะสี่เหลี่ยม มีการดูดซับน้ำสูงสุดเมื่อเติม Xanthan gum และเส้นใยไผ่ร้อยละ 20 ทำให้การดูดซับน้ำสูงที่สุด และเมื่อเติม Xanthan gum และเส้นใยไผ่ร้อยละ 15 จะมีความทนแรงดึงสูงสุดประมาณ 0.42 MPa ส่วนความหนาแน่นของภาชนะที่ได้ อยู่ในช่วง 0.84-1.87 g/cm³ Manangan and Shawaphun [3] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเคลือบกระดาษชานอ้อยเพื่อใช้บรรจุอาหารด้วยพอลิแลคติกแอซิด โดยใช้กระบวนการจุ่มเคลือบ จากผลการทดลองพบว่า ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับ PLA คือ เอทิลอะซิเตท ปริมาณพอลิเมอร์ที่เกาะติดบนกระดาษชานอ้อยจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของพอลิเมอร์มากขึ้นและระยะเวลาในการจุ่มนานขึ้น ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 8%w/v และเวลาที่เหมาะสมคือ 20 นาที ทั้งนี้กระดาษที่เคลือบผิว มีคุณสมบัติที่ดีกว่ากระดาษที่

ไม่เคลือบผิว เช่น ความเรียบของพื้นผิว การลดการซึมผ่านของอากาศ ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำและน้ำมัน Soykeabkaew et.al. [4] ได้เขียนบทความเรียบเรียงงานวิจัยเกี่ยวกับการทำโฟมแข็งรายงานว่ามีโฟมแข็งไม่แข็งแรง และดูดความชื้นได้ง่าย เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้ดีขึ้น ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น มีความทนต่อน้ำ เบาล จึงมีการปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งโดยการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี (Chemical modification of starches), ผสมกับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Blending with various biodegradable polymers), เสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส (Incorporation of natural fibers) การเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่นน้ำ และ กลีเซอรอล ก็จะทำให้โฟมแข็งขึ้นรูปง่ายขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่ยืดหยุ่นในการขึ้นรูปโฟมแข็งด้วยการอบ Sanhawong et. al.[5] ได้ศึกษาผลของน้ำยางขึ้นต่อสมบัติบางประการและการเสื่อมสภาพของโฟมแข็งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย เพื่อพัฒนาโฟมแข็งให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น การดูดซับน้ำลดลง งานวิจัยนี้จึงได้ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีการอัดด้วยความร้อน และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย สารช่วยการขึ้นรูป และสารก่อฟอง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางขึ้นถึง 5 phr การดูดซับน้ำลดลง มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น (Hydrophobicity) แสดงว่าโฟมแข็งที่ได้ทนต่อความชื้น ไม่เสียรูปง่าย เมื่อปริมาณน้ำยางขึ้นมีประมาณ 2.5 phr ระยะยืดเมื่อขาดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 24 แต่ค่ามอดูลัสลดลงเพียงร้อยละ 2.2 จาก การทดสอบการเสื่อมสภาพทางชีวภาพโดยการฝังดิน พบว่าการใส่น้ำยางขึ้นทำให้การเสื่อมสภาพช้าลง Bergel et. al. [6] ได้ศึกษาการเคลือบ PLA ลงบนโฟมแข็งจากมันฝรั่งเพื่อลดการดูดซับความชื้นของโฟมแข็งพบว่าการเคลือบด้วย PLA ปริมาณ 6%w/v ทำให้การดูดซับน้ำลดลง และทำให้ความหนาแน่น ความทนแรงดึง และความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

ต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตองซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดเชียงใหม่ กระบวนการนำมาผลิตเป็น

เครื่องต้มเชิงหน้าที่ที่อุดมไปด้วยสารพฤกษเคมี จะมีเศษเหลือทิ้งจากการคั้นเครื่องต้มเชิงหน้าที่ งานวิจัยนี้จึงทดลองนำมาแปรรูปเป็นภาชนะชั่วคราวสำหรับใส่อาหารจะทำให้ได้ภาชนะที่ผลิตจากวัสดุทางธรรมชาติ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าและเป็นการทำให้ขยะจากการแปรรูปเครื่องต้มเชิงหน้าที่เป็นขยะเหลือศูนย์ (Zero waste) โดยส่วนผสมของงานชั่วคราวจึงประกอบด้วยเศษเหลือทิ้งจากการผลิตผงพฤกษเคมีของต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตองมาผสมในโฟมแข็ง น้ำยางพาราและเคลือบด้วย PLA เพื่อลดการดูดความชื้น โดยศึกษาหาส่วนผสมที่มีความทนแรงดัดโค้งเคียงกับงานชั่วคราวในท้องตลาดและสามารถใช้ประโยชน์เป็นภาชนะใส่อาหารได้ โดยพิจารณาสมบัติกายภาพอื่นๆ ร่วมด้วยเช่นลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพรงหรือฟองอากาศที่เกิดภายในความหนาแน่น การดูดซับน้ำ การคงรูปร่างหลังการดูดซับน้ำ รวมถึงความสะอาดของงานชั่วคราว

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 สารเคมีที่ใช้

เศษใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตอง (แสดงดังรูปที่ 1) แป้งมันสำปะหลังซื้อจากบริษัทบางกอกอินเตอร์ฟู้ดจำกัด น้ำยางธรรมชาติซื้อจากบริษัทคึกคักไฟร์ กลีเซอรอล แมกนีเซียมสเตียเรต ไซฟิงธรรมชาติ ซื้อจากบริษัทยูเนี่ยน ชายน์ จำกัด กัวร์กัม จาก Wendt-Chemie เกาหลินจาก Imerys ส่วนพอลิแลคติกแอซิด เกรด 2003D จาก Nature work และเอทิลอะซิเตท ยี่ห้อ J T Baker ซื้อจากบริษัทเอทีชายน จำกัด

2.1.2 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

นำใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตอง ตากแดด อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้น

ย่อยบั่นลดขนาดด้วยเครื่องบั่นละเอียดแบบแห้งแล้วนำเศษใบข้าวเหลือทิ้งดังกล่าวผสมกับส่วนผสมอื่นๆ โดยส่วนผสมหลักประกอบด้วยส่วนผสมที่แปรผัน และส่วนผสมที่คงที่ เช่น ส่วนผสมที่แปรผันเป็นส่วนผสมระหว่างเศษใบข้าวเหลือทิ้ง เกาหลิน และยางพารา โดยที่ AR หมายถึงเศษใบข้าวเหลือทิ้ง K หมายถึงเกาหลิน R หมายถึงน้ำยางพารา ส่วนตัวเลขข้างหลังหมายถึงจำนวนกรัมที่ผสม เช่น AR6 K15 R10 หมายถึงเศษใบข้าวเหลือทิ้งร้อยละ 6 เกาหลิน ร้อยละ 15 น้ำยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง 100 ส่วน และทุกสูตรมีส่วนผสมที่คงที่ ได้แก่ น้ำ 100 ส่วน กลีเซอรอล 5 ส่วน กัวร์กัม 1 ส่วน และ แมกนีเซียมสเตียเรต 2 ส่วน โดยผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมอาหารแบบมือจับ จากนั้นอัดขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดทางความร้อนด้วยเครื่องอัด CT Compression Molding ที่อุณหภูมิ 150 – 200 องศาเซลเซียส ความดัน 10 – 14 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้แม่พิมพ์โลหะสแตนเลส เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผสมและเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดัดรูปสแตนเลสแผ่นที่มีความกว้าง 40 มิลลิเมตร หนา 230 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ตัวอย่างโฟมแข็งจากการขึ้นรูปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 เป็นเวลา 5 วัน ก่อนนำไปทดสอบความต้านทานแรงดัด



รูปที่ 1 เศษใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตอง

2.1.3 การทดสอบสมบัติของโฟมแข็ง

1. ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโฟมหรือฟองอากาศที่เกิดภายใน และการกระจายของเศษใบข้าวเหลือทิ้งในชิ้นงาน ทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM -IT300

2. ความต้านทานแรงดัด ทำการทดสอบด้วยวิธี Three point bending method ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ NRI-TS-500-10B ใช้โหลดเซลล์ 10 กิโลนิวตัน อัตราเร็วในการกด 2 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 4 เซนติเมตร ทำการทดสอบอย่างน้อยสุตรละ 10 ชิ้น เพื่อแสดงผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ย วิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติการวิเคราะห์

3. ความหนาแน่น ทำการทดสอบโดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตร โดยใช้เครื่องชั่งยี่ห้อ BONITA รุ่น BMB224 ความละเอียด 4 ตำแหน่ง และดิจิตอลเวอร์เนียร์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตรในการวัดขนาดของตัวอย่าง การทดสอบทำซ้ำ 3 ตัวอย่างในแต่ละสุตร

4 การวัดปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้วิธีการที่ปรับมาจากรายละเอียดในมาตรฐาน ISO 535 (1991) ที่ใช้สำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษและบอร์ด ซึ่งทำโดยตัดตัวอย่างขนาดประมาณ 2.5 เซนติเมตร x 2.5 เซนติเมตร x 0.3 เซนติเมตร และชั่งน้ำหนักก่อนแช่น้ำ จากนั้นจุ่มลงในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้องประมาณ 28 องศาเซลเซียส นาน 60 วินาที ชีบน้ำออกจากตัวอย่างและนำไปชั่งน้ำหนักหลังการแช่น้ำ ค่าปริมาณการดูดซับน้ำคำนวณจากน้ำหนักของน้ำที่ตัวอย่างดูดซึมไว้หารด้วยน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่น้ำ

5 การทดสอบความสามารถในการคงรูปร่างหลังการดูดซับน้ำ ทำโดยแช่ตัวอย่างขนาดประมาณ 2.5 เซนติเมตร x 2.5 เซนติเมตร x 0.3 เซนติเมตร ในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 28 องศา

แล้วบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ด้วยกล้องดิจิตอล เมื่อเวลาผ่านไป 0 30 และ 60 นาที

2.1.4 การขึ้นรูปต้นแบบงานชั่วคราวและการทดสอบ

ทำโดยใช้เครื่องอัด CT Compression Molding PR1D-W300L300 และแม่พิมพ์โลหะเป็นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมตามแม่พิมพ์ (รูปที่ 2) แล้วนำไปทดสอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปงานชั่วคราว

1. การทดสอบความสะอาดของงานชั่วคราว ด้วยชุดตรวจเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียขั้นต้น SI-2 จากกองสุขาภิบาลอาหาร กรมอนามัย ซึ่งประกอบด้วยไม้ปั่นสำลี 1 อัน และน้ำยา SI-2 จำนวน 1 ขวด (รูปที่ 3) สำหรับการทดสอบงานชั่วคราว 5 ชิ้น ที่เมื่ออัดขึ้นรูปแล้วเก็บในตู้ควบคุมความชื้นอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำจากความชื้นจากสิ่งแวดล้อม การทดสอบเริ่มจากการทำความสะอาดมือผู้ทดสอบ และชุดอุปกรณ์การทดสอบด้วยแอลกอฮอล์ 70% เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียปนเปื้อนจากแหล่งอื่น หลังจากนั้นทำการจุ่มไม้ปั่นสำลีในขวดน้ำยา SI-2 บิดน้ำยาส่วนเกินออก แล้วป้ายไม้ปั่นสำลีบนผิวงาน จากนั้นจุ่มไม้ปั่นสำลีลงในขวดน้ำยาอีกครั้ง บิดน้ำยาส่วนเกินออกอีกครั้ง นำไปป้ายงานชิ้นต่อไปจนครบ 5 ชิ้น จากนั้นหักไม้ปั่นสำลีกับปากขวด โดยดึงไม้ให้พ้นปากขวดประมาณครึ่งหนึ่งแล้วหักไม้ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 – 48 ชั่วโมง แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีสารละลาย

2. การทดสอบคุณสมบัติของเหลวบนผิวงานชั่วคราว เป็นการทดสอบพื้นผิวที่ไม่เคลือบพอลิแลคติกแอซิด เปรียบเทียบกับที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิด การทดสอบเตรียมตัวอย่างโดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร และจัดวางชิ้นงานกับปลายเข็มหยดน้ำห่างกันประมาณ 3 เซนติเมตร หยดน้ำลงบนชิ้นงานแล้วถ่ายภาพ ตามกำหนดเวลาดังนี้ คือ หลังหยดน้ำทันทีเป็นนาที่ที่ 0 นาที่ที่ 5 และนาที่ที่ 10 และวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำกับชิ้นงานด้วย โปรแกรม Image J



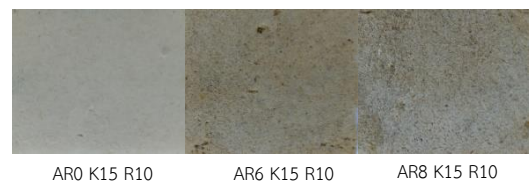
รูปที่ 3 ชุดตรวจเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียขั้นต้น SI-2

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

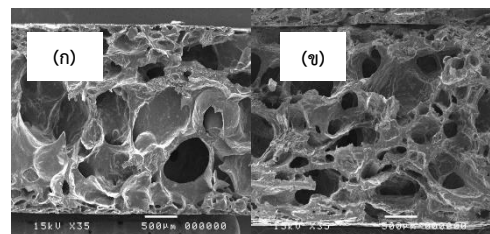
3.1 ผลการทดสอบลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพรงหรือฟองอากาศที่เกิดภายใน

โฟมแข็งที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดทางความร้อน อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 14 เมกกะปาสกาล เป็นระยะเวลา 5 นาที ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4 มีผิวเรียบ ส่วนภายในประกอบด้วยเซลล์รูพรุนขนาดต่างๆ เกิดจากน้ำที่ผสมในแป้งระเหยกลายเป็นไอ โดยขณะที่แป้งอยู่ในแม่พิมพ์ที่ร้อนจะเกิดเป็นเจลด้วยกระบวนการเจลลาติไนเซชัน ความหนืดเพิ่มขึ้น ความดันภายในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ความดันของไอน้ำที่อยู่ภายในแม่พิมพ์จึงเกิดการขยายตัวดันแป้งให้เป็นโพรงอากาศพร้อมกับดันเนื้อวัสดุผสมเต็มแม่พิมพ์ ส่วนเกินจะระบายออกทางช่องด้านข้างของแม่พิมพ์เมื่อไอน้ำระเหยออกจนหมดชิ้นงานแห้งจะได้โฟมแข็งที่มีเซลล์รูพรุน

สำหรับโฟมแข็งสูตร ARO K15 R10 (เศษใบข้าวเหลือทิ้ง 0 กรัม เกลือ 15 กรัม น้ำยางพารา 10 กรัม) มีลักษณะสีขาว การเติมเศษใบข้าวเหลือทิ้งทำให้สีของโฟมแข็งเป็นสีน้ำตาลเนื่องจากการสะสมของปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งมากขึ้น อย่างไรก็ตาม สังเกตด้วยตาเปล่าไม่พบการกระจายตัวของเศษใบข้าวเหลือทิ้งอย่างชัดเจนตัวอย่างลักษณะโพรงอากาศที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโฟมแข็ง ตามรูปที่ 5 ประกอบไปด้วยเซลล์รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ขนาดเล็กปะปนกัน บริเวณผิวบนและล่างปรากฏเซลล์รูพรุนแบบเซลล์ปิดที่มีขนาดเล็กกว่าบริเวณตอนกลางของตัวอย่าง อาจเป็นเพราะบริเวณผิวใกล้แม่พิมพ์มีความร้อนสูงน้ำเดือดเร็ว ระเหยง่าย ทำให้เซลล์โฟมไม่สามารถขยายตัวได้ ลักษณะเซลล์โฟมที่คล้ายกันพบในงานโฟมแข็งจากมันสำปะหลัง [7] และโฟมแข็งผสมก้านอุน [8] รูปที่ 5 (ก) มีขนาดเซลล์โฟมที่แตกต่างจากรูปที่ 5 (ข) อาจเป็นเพราะมีปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งมากกว่าขัดขวางการขยายตัวของเซลล์โฟมซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 4 ผิวหน้าของโฟมแข็งบางสูตรที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดทางความร้อน 170 องศาเซลเซียส ความดัน 13.8 เมกกะปาสกาล เป็นระยะเวลา 5 นาที



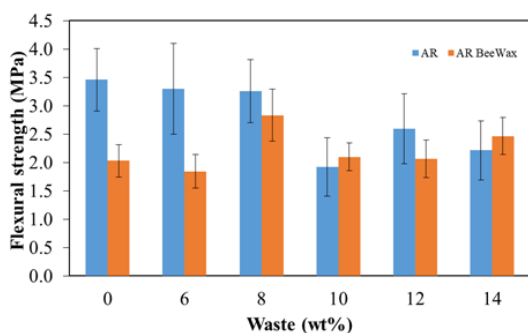
รูปที่ 5 ภาพตัดขวางของโฟมแข็งแสดงลักษณะโพรงอากาศ (ก) ARO K15 R10 และ (ข) AR8 K15 R10

3.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัด

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดด้วยวิธี

Three point bending method ของจานชั่วคราว
จำหน่ายในท้องตลาดซึ่งใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง จำนวน
10 ชิ้น มีค่า 4.176 ± 0.452 เมกกะปาสคาล และผล
การทดสอบความต้านทานแรงดัดของตัวอย่างใน
งานวิจัยนี้แสดงผลเปรียบเทียบในรูปที่ 6 และตารางที่ 1

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan
สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทาน
แรงดัดของโฟมแข็งสูตรที่ไม่ผสมไขขี้ผึ้ง (AR) และผสม
ไขขี้ผึ้ง (AR BeeWax) ได้ดังตารางที่ 1 จากข้อมูล
ดังกล่าว การใช้ไขขี้ผึ้งเป็นส่วนผสมส่งผลให้โฟมแข็งมี
ค่าความต้านทานแรงดัดต่ำกว่า จึงเลือกที่จะไม่ใช้ไขขี้ผึ้ง
เป็นส่วนผสม และโฟมแข็งกลุ่มที่ไม่ผสมไขขี้ผึ้ง AR0
K15 R10, AR6 K15 R10 และ AR8 K15 R10 มี
ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดัดไม่แตกต่างกันทางสถิติ
โดยมีค่าในช่วง 3.2 – 3.5 เมกกะปาสคาล แต่เมื่อผสม
เศษใบข้าวเหลือทิ้งมากกว่าร้อยละ 8 ค่าความต้านทาน
แรงดัดลดลง อาจเป็นเพราะเศษใบข้าวเป็นพวกชอบน้ำ
มักดูดซึมความชื้นค่าความต้านทานแรงดัดจึงลดลง ซึ่ง
ผลไปในทางเดียวกับงานวิจัยของ J. B. Engel et. al.
[8] ที่มีการผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและก้านองุ่น
ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดของโฟมแข็งสูตร
ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งขณะที่
ปริมาณเกล็นร้อยละ 15 และน้ำยางพาราร้อยละ 10

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทาน
แรงดัดของโฟมแข็งแต่ละสูตร

กลุ่ม	สูตร	ค่าเฉลี่ย (MPa)	ความแปรปรวน (MPa)
AR	AR0 K15 R10	3.4611 ^a	0.5498
	AR6 K15 R10	3.3016 ^a	0.8002
	AR8 K15 R10	3.2592 ^a	0.5592
	AR10 K15 R10	1.9220 ^b	0.5145
	AR12 K15 R10	2.5957 ^c	0.6147
	AR14 K15 R10	2.2149 ^{bc}	0.5183
AR BeeWax (ผสมไขขี้ผึ้ง)	AR0 K15 R10	2.0307 ^a	0.2858
	AR6 K15 R10	1.8452 ^a	0.2963
	AR8 K15 R10	2.8325 ^b	0.4591
	AR10 K15 R10	2.1002 ^a	0.2479
	AR12 K15 R10	2.0674 ^a	0.3309
	AR14 K15 R10	2.4649 ^c	0.3274

* ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรต่างกัน หมายความว่า ค่าเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทาน
แรงดัดของโฟมแข็งที่ไม่ผสมไขขี้ผึ้งแต่ละสูตร

สูตร	ค่าเฉลี่ย MPa	ความแปรปรวน MPa
AR8 K0 R10	2.6994 ^{ab}	0.3657
AR8 K5 R10	3.1364 ^{bc}	0.8628
AR8 K10 R10	2.4154 ^a	0.5758
AR8 K15 R10	3.2592 ^c	0.5592
AR8 K20 R10	2.6175 ^{ab}	0.4686
AR8 K15 R5	4.1907 ^a	1.3518
AR8 K15 R10	3.2592 ^a	0.5592
AR8 K15 R20	1.8850 ^b	0.3776

* ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรต่างกัน หมายความว่า ค่าเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดัดของโฟม
แข็งที่คงปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งที่ร้อยละ 8 น้ำ
ยางพาราคงที่ร้อยละ 10 แปรปริมาณเกล็นร้อยละ 0
– 20 และการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย
วิธี Duncan สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

ความต้านทานแรงดัดของโฟมแป่งสูตรที่แปรปริมาณ เกลือ และยางพาราได้ดังตารางที่ 2

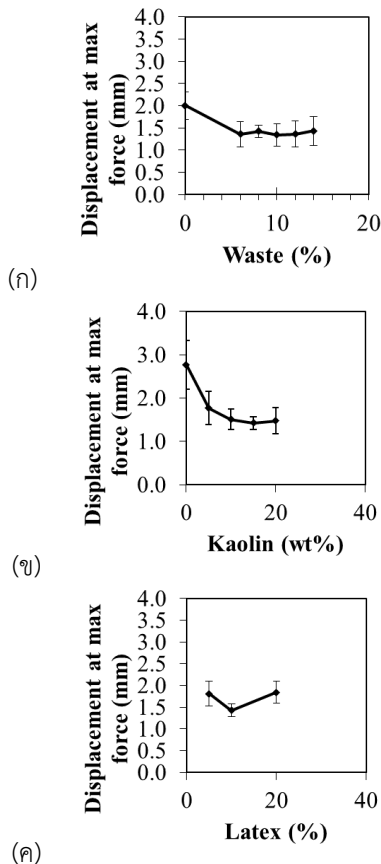
จากข้อมูลตามตารางที่ 2 โฟมแป่งสูตร AR8 K10 R10, AR8 K15 R10, AR8 K15 R5, AR8 K15 R10 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดัดไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตามสูตร AR8 K15 R10 ที่ผสมเกลือร้อยละ 15 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดัดสูงกว่าสูตรอื่น ๆ ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดัดของโฟมแป่งที่คงปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งคงที่ร้อยละ 8 ปริมาณเกลือร้อยละ 15 ปรับปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 5 10 และ 20 พบว่าโฟมแป่งสูตร AR8 K15 R20 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดัดแตกต่างจากสูตรอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ แต่สำหรับโฟมแป่งสูตร AR8 K15 R5 และ AR8 K15 R10 มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดัดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดัดของโฟมแป่ง ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า โฟมแป่งเติมเศษใบข้าวเหลือทิ้งที่ร้อยละ 8 (งานวิจัยนี้) ถึงแม้ว่าจะมีค่าความต้านทานแรงดัดที่ต่ำกว่ากรณีงานชั่วคราวจำหน่ายในท้องตลาด แต่ก็ยังจัดว่ามีค่าความต้านทานแรงดัดสูงกว่าโฟมแป่งที่เติมเส้นใยป่าน หรือน้ำมันปาล์ม หรือกากกาแฟ [7]-[9]

ความยืดหยุ่นของตัวอย่างจากการทดสอบ แสดงเป็นกราฟระหว่างการโก่งตัวของโฟมแป่งที่ค่าแรงดัดสูงสุด แสดงเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 7 ขณะที่ตัวอย่างอ้างอิงมีระดับการโก่งตัว 2.103 ± 0.272 มิลลิเมตร จากรูปที่ 7 (ก) ความยืดหยุ่นของโฟมแป่งลดลงหรืออีกนัยหนึ่งคือความสามารถในการต้านทานแรง (Stiffness) เพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมเศษใบข้าวเหลือทิ้ง แต่ปริมาณการผสมเศษใบข้าวเหลือทิ้งร้อยละ 6 – 14 ยังไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยืดหยุ่น ผลการทดลองเป็นไปตามแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยโฟมแป่งซึ่งเตรียมจากแป้งมันฝรั่ง (Potato starch) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มี

การผสมเศษเส้นใยข้าวโพดของ Cinelli P. et. al. [12] ที่พบว่าความยืดหยุ่นของโฟมแป่งลดลงเมื่อมีการผสมเศษเส้นใยข้าวโพด อย่างไรก็ตามความยืดหยุ่นของโฟมแป่งในงานศึกษานี้มีค่าต่ำกว่าที่ระบุในงานวิจัยของ Cinelli P. et. al. [12] ซึ่งหมายความว่าการใช้ส่วนผสมในงานศึกษานี้ทำให้โฟมแป่งมีความสามารถในการต้านทานแรงที่ดีกว่าระบบแป้งมันฝรั่งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเศษเส้นใยข้าวโพด สำหรับรูปที่ 7 (ข) ความยืดหยุ่นของโฟมแป่งลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการผสมเกลือ โดยความยืดหยุ่นค่อนข้างคงที่เมื่อผสมเกลือร้อยละ 15 – 20 และจากรูปที่ 7 (ค) ความยืดหยุ่นของโฟมแป่งค่อนข้างใกล้เคียงกันเมื่อผสมน้ำยางพาราระหว่างร้อยละ 5 – 20

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดัดของโฟมแป่ง

โฟมแป่ง	ค่าความต้านทานแรงดัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
งานชั่วคราวจำหน่ายในท้องตลาด	4.18 ± 0.45	n/a
โฟมแป่งผสมเศษใบข้าวเหลือทิ้งที่ร้อยละ 8 (งานวิจัยนี้)	3.2 – 3.5	0.20 – 0.46
โฟมแป่งผสมก้านอุนร์ร้อยละ 7 [8]	2.5 ± 0.4	0.18 ± 0.002
โฟมแป่งมันสำปะหลัง [8]	2.9 ± 0.6	0.21 ± 0.002
โฟมพอลิสไตรีน [8]	0.57 ± 0.06	0.031 ± 0.003
โฟมแป่งผสมเส้นใยป่าน [9]	2.19 – 2.52	0.242
โฟมแป่งผสมเส้นใยคราฟ [10]	2.5 – 5.3	n/a
โฟมแป่งผสมน้ำมันปาล์ม [10]	0.3 – 1.1	n/a
โฟมแป่งผสมกากกาแฟที่ร้อยละ 10 [11]	2.98	0.15 – 0.26



รูปที่ 7 การโค้งตัวของโฟมแข็งที่ค่าแรงกดสูงสุด เมื่อ (ก) ปริมาณเกลินร้อยละ 15 น้ำยางร้อยละ 10 แปร ปริมาณเศษใบข้าว (ข) ปริมาณเศษใบข้าวร้อยละ 8 น้ำ ยางร้อยละ 10 แปรปริมาณเกลิน (ค) ปริมาณเศษใบ ข้าวร้อยละ 8 เกลินร้อยละ 15 แปรปริมาณน้ำยาง

3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ความหนาแน่นของโฟมแข็งสรุปในตารางที่ 4 ซึ่งในภาพรวมพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.20 - 0.46 กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของโฟมแข็งมีค่า ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเศษใบข้าวเหลือทิ้งเพิ่มขึ้น ความ หนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขนาดเซลล์โฟมลดลง (รูปที่ 5) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งเพิ่ม จากร้อยละ 0 ในสูตร AR0 K15 R10 เป็นร้อยละ 12 ใน สูตร AR0 K15 R10 ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 50% จาก 0.303 เป็น 0.459 สำหรับกรณีโฟมแข็งที่ผสมเศษใบ

ข้าวเหลือทิ้งและน้ำยางพาราปริมาณคงที่นั้น ค่าความ หนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมเกลินที่มาก ขึ้น แต่ในปริมาณการเติมเกลินร้อยละ 15 และ 20 ค่า ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaewtatip K. et. al. [13] ซึ่งได้ศึกษาผลของปริมาณ เกลินในโฟมแข็งที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดทางความ ร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 6.89 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 5 นาที ที่พบว่าโฟมแข็งมี ค่าความหนาแน่น 0.21 0.23 0.24 0.25 0.27 และ 0.29 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณเกลิน จากร้อยละ 0 เป็น ร้อยละ 3 6 9 12 และ 15 โดย น้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟม แข็งแต่ละสูตร

กลุ่ม	สูตร	ความหนาแน่น g/cm ³
AR	AR0 K15 R10	0.303 ± 0.016
	AR6 K15 R10	0.395 ± 0.023
	AR8 K15 R10	0.446 ± 0.026
	AR10 K15 R10	0.338 ± 0.035
	AR12 K15 R10	0.459 ± 0.009
	AR14 K15 R10	0.413 ± 0.009
AR8 K(x) R10	AR8 K0 R10	0.167 ± 0.017
	AR8 K5 R10	0.259 ± 0.048
	AR8 K10 R10	0.235 ± 0.020
	AR8 K15 R10	0.446 ± 0.026
	AR8 K20 R10	0.352 ± 0.013
AR8 K15 R(x)	AR8 K15 R5	0.436 ± 0.037
	AR8 K15 R10	0.446 ± 0.026
	AR8 K15 R20	0.290 ± 0.009

ในกรณีโฟมแข็งที่ผสมเศษใบข้าวเหลือทิ้งและ เกลินในปริมาณคงที่ พบว่า เมื่อใช้น้ำยางพาราปริมาณ ร้อยละ 5 และ 10 โฟมแข็งมีค่าความหนาแน่นใกล้ เคียงกัน แต่กลับลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มเป็น

ร้อยละ 20 เนื่องจากการเติมน้ำยางพาราในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของของแข็ง (Solid content) ลดต่ำ ทั้งยังเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำที่จะทำให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวภายในเนื้อวัสดุมากขึ้นไปอีกด้วย ซึ่งส่งผลกลับมายังค่าความต้านทานแรงดัดที่มีแนวโน้มลดต่ำลงเช่นกัน ค่าความหนาแน่นที่ลดลง เมื่อมีปริมาณน้ำมากสอดคล้องกับงานวิจัยโฟมแข็งผสมก้านอ่อนที่อธิบายว่าปริมาณน้ำมาก ความหนืดของส่วนผสมต่ำ ทำให้มีการขยายตัวของเซลล์โฟมได้ดี ผนังเซลล์บาง เซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ ความหนาแน่นจึงต่ำ ค่าความหนาแน่นในตารางที่ 4 เป็นค่าที่อยู่ในช่วงเดียวกันกับงานวิจัยโฟมแข็งต่างๆ ดังที่แสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 3 และมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมฝ้ายและน้ำยางวัลคาไนซ์จากงานวิจัยของ Sanhawong et al. [5] ซึ่งได้ค่าระหว่าง 0.28 – 0.44 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือจากงานวิจัยของ Vercelheze et al. [14] ที่รายงานความหนาแน่นโฟมแข็งผสมเส้นใยชานอ้อย 0.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่นกัน

3.4 ผลการวัดปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้อง

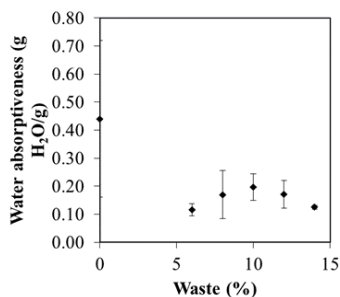
จากปริมาณการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 60 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการใช้เกล็ด (รูปที่ 9(ข)) กรณียโฟมแข็งที่ผสมเกล็ดและน้ำยางพาราปริมาณคงที่ (รูปที่ 9 (ก)) ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลงเมื่อมีการใช้เศษใบข้าวเหลือทิ้งในปริมาณที่มากขึ้น อาจเป็นเพราะลักษณะเส้นใยทำให้ชิ้นงานไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งสอดคล้องกับงานของ N. H. P. Rodrigues et. al [2] แต่ปริมาณเศษใบข้าวเหลือทิ้งร้อยละ 6 – 14 ยังไม่ส่งผลต่อระดับความสามารถในการดูดซับน้ำแตกต่างกันอย่างชัดเจน การดูดซับน้ำที่ลดลงซึ่งเป็นผลมากจากการลดลงของปริมาณแข็งในสัดส่วนผสมที่ทำให้

ปริมาณการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซีของสายโซ่แบ่งกับหมู่ไฮดรอกซีของน้ำน้อยลง แต่ในกรณีโฟมแข็งที่ผสมเศษใบข้าวเหลือทิ้งและเกล็ดในปริมาณคงที่ พบว่า เมื่อใช้น้ำยางพาราปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ระดับความสามารถในการดูดซับน้ำไม่ต่างกัน แต่เมื่อใช้น้ำยางพาราปริมาณร้อยละ 20 ความสามารถในการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปได้ว่าปริมาณน้ำในสัดส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำยางส่งผลให้มีโอกาสเกิดโพรงอากาศภายในเนื้อโฟมแข็งมากกว่าสูตรอื่นในกลุ่มเดียวกันจึงทำให้มีโอกาสดูดซับน้ำได้มากกว่า สอดคล้องกับความหนาแน่นที่ลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้นในตารางที่ 4 และงานวิจัยโฟมแข็งผสมก้านอ่อน [8]

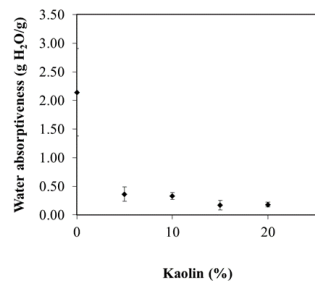
3.5 ผลการทดสอบความสามารถในการคงรูปร่างหลังการดูดซับน้ำ

ผลการทดสอบความสามารถในการคงรูปร่างหลังการดูดซับน้ำก่อนและหลังการแช่ตัวอย่างในน้ำปราศจากไอออน ที่เวลา 30 และ 1 ชั่วโมง แสดงด้วยภาพเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในตารางที่ 5 พบว่า โฟมแข็งส่วนใหญ่สามารถคงรูปร่างได้ภายในเวลา 30 นาที ยกเว้นสูตร AR0 K15 R10, และ กลุ่มสูตร AR8 K(x) R10 ที่มีปริมาณเกล็ดต่ำกว่า 15 ที่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สังเกตได้ โดยขอบชิ้นงานพองและยุบ เวลาภายหลังทดสอบการดูดซับน้ำ 30 นาที จึงเหมาะกับการใช้งานกับอาหารที่แห้ง ยังไม่เหมาะกับการใช้กับอาหารที่มีปริมาณน้ำมาก

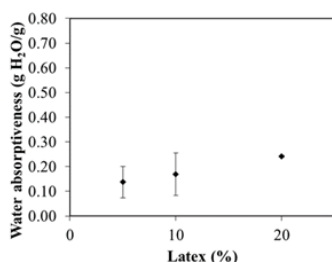
ตัวอย่างงานชั่วคราวขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 13.8 เมกกะปาสกาล แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเตรียมจากสูตร AR0 K15 R10 ร่วมกับ AR8 K15 R10 ซึ่งผสมขึ้นรูปเป็นงานชั่วคราวในลักษณะสองสี รูปที่ 10 งานชั่วคราวมีผิวหน้าเรียบรูปสี่เหลี่ยมขนาด 12 เซนติเมตร x 12 เซนติเมตร และหนา 1 – 2 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8 ปริมาณการดูดซับน้ำของโฟมแบ่งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 วินาที เมื่อ (ก) ปริมาณกาลีนร้อยละ 15 น้ำยางร้อยละ 10 แปรปริมาณเศษใบข้าว (ข) ปริมาณเศษใบข้าวร้อยละ 8 น้ำยางร้อยละ 10 แปรปริมาณกาลีน (ค) ปริมาณเศษใบข้าวร้อยละ 8 กาลีน ร้อยละ 15 แปรปริมาณน้ำยาง



รูปที่ 9 ตัวอย่างงานชั่วคราว เตรียมจากโฟมแบ่งสูตร ARO K15 R10 โชนสีเข้ม ร่วมกับ AR8 K15 R10 โชนสีอ่อน

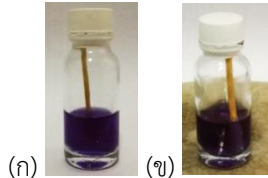
ตารางที่ 5 ความสามารถในการคงรูปร่างหลังการดูดซับน้ำของตัวอย่างบางสูตร

ก่อนแช่น้ำ	หลังแช่น้ำ 30 นาที	หลังแช่น้ำ 1 ชั่วโมง
ARO K15 R10		
AR14 K15 R10		
AR8 K0 R10		
AR8 K5 R10		
AR8 K15 R10		

3.6 ผลการตรวจสอบความสะอาดของงานชั่วคราว

ผลการตรวจสอบความสะอาดของงานชั่วคราวด้วยชุดตรวจเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียขั้นต้น SI-2 สังเกตจากการเปลี่ยนสีของสารตรวจ เมื่อครบ 48 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 11 โดยเปรียบเทียบสีของสารตรวจที่ 0 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง พบว่า สีของสารตรวจเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง ยังคงเป็นสีม่วง แสดงผลเป็นลบ คือ ไม่มีเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ดังนั้นงานที่ผลิตขึ้นมีความสะอาดไม่ปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินอาหาร อาจเป็นเพราะมีการขึ้นรูปผ่านความร้อน และเก็บในตู้ดูดความชื้นทำให้ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังนั้นการเก็บรักษาภาชนะชั่วคราวก่อนการใช้งานควรเก็บในที่แห้ง

มีสารดูดความชื้น และบรรยากาศควรมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 40 เพราะถ้าตัวอย่างดูดความชื้นเข้าไปอาจส่งเสริมให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้

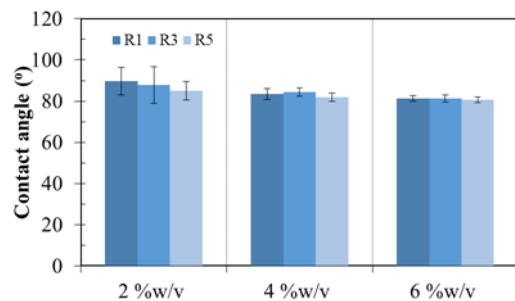


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบสีของสารตรวจเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรีย เมื่อเวลา (ก) 0 ชั่วโมง และ (ข) 48 ชั่วโมง

3.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติของของเหลวบนผิวงานชั่วคราว

ภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำบนชิ้นงานไม้เคลือบและเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิด ที่เตรียมโดยการละลายพอลิแลคติกแอซิดในเอทิลอะซิเตท เป็นความเข้มข้นสารเคลือบ 3 ระดับ คือ 2, 4 และ 6 %w/v โดยเคลือบด้วยจำนวนรอบ 1, 3 และ 5 รอบ (แทนด้วย R1 R3 และ R5 ตามลำดับ) และระยะเวลาของหยดน้ำสัมผัสกับชิ้นงานนาที่ 0, 5 และ 10 นาที่ แสดงดังตารางที่ 6 ผลของความเข้มข้นของพอลิแลคติกแอซิดกับมุมสัมผัสหยดน้ำที่เวลา 0 นาที่ และผลของจำนวนรอบการเคลือบพอลิแลคติกแอซิดกับมุมสัมผัสหยดน้ำแสดงในรูปที่ 11-12 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า เมื่อเคลือบผิวหน้าด้วยพอลิแลคติกแอซิดความเข้มข้น 2 %w/v หรือ 4 %w/v หรือ 6 %w/v มุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เคลือบ แสดงถึงการเคลือบทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามความเข้มข้นของพอลิแลคติกแอซิดที่เพิ่มขึ้นกลับให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่เคลือบ และจากข้อมูลตามรูปที่ 11 พบว่า เมื่อใช้พอลิแลคติกแอซิดความเข้มข้น 2 %w/v ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงค่อนข้างมากเมื่อรอบการเคลือบเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้พอลิแลคติกแอซิดความเข้มข้น 4 %w/v ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงเช่นกันเมื่อรอบการเคลือบเพิ่มขึ้นแต่อัตราการลดลง

น้อยกว่าของความเข้มข้น 2 %w/v ทั้งนี้จำนวนรอบของการเคลือบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสหยดน้ำคือมุม $80^{\circ} - 83^{\circ}$ เมื่อใช้ความเข้มข้นพอลิแลคติกแอซิด 6 %w/v ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานพฤติกรรมความไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ประเภทพอลิแลคติกแอซิดอยู่ในช่วง $75^{\circ} - 85^{\circ}$ ตามรายงานของ Ratner [15] และ Burg et al. [16]



รูปที่ 11 มุมสัมผัสหยดน้ำของชิ้นงานเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิด ความเข้มข้น 2, 4 และ 6 %w/v ด้วยจำนวนรอบการเคลือบ 1 3 และ 5 รอบ ที่เวลา 0 นาที่

ดังนั้นการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้ความเข้มข้นสารเคลือบ 2 - 6 %w/v เคลือบจำนวน 1 รอบ เพียงพอต่อการช่วยลดและชะลออัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ชิ้นงานได้ สำหรับผลของระยะเวลากับมุมสัมผัสหยดน้ำ แสดงในรูปที่ 12 พบว่าการเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดทุกความเข้มข้น เมื่อระยะเวลาผ่านไป 10 นาที่ มุมสัมผัสหยดน้ำของชิ้นงานเคลือบพอลิแลคติกแอซิด มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าชิ้นงานไม่เคลือบอย่างชัดเจน แสดงถึงการเคลือบทำให้พื้นผิวของชิ้นงานไม่ชอบน้ำและช่วยลดอัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ชิ้นงานได้

การเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดช่วยลดการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ชิ้นงาน เก็บรักษาชิ้นงานได้นานขึ้น ลดความเสี่ยงในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่พอลิแลคติกแอซิดยังมีราคาแพง Chaireh et. al [17] ได้เสนอให้มีการเคลือบโพลีเอสเตอร์จากผักตบชวาด้วยไข่ผึ้งธรรมชาติ ซึ่งราคาถูกกว่าพบว่าชิ้นงานคงรูปร่าง

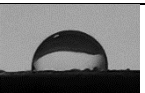
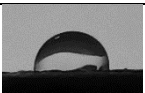
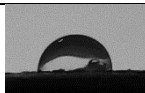
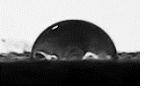
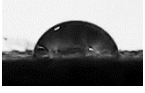
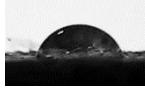
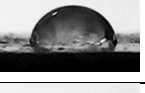
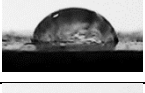
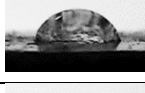
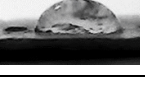
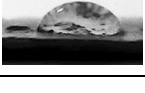
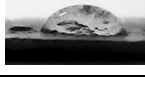
เมื่อจุ่มน้ำกลั่นได้นานขึ้น ความสามารถในการละลายน้ำลดลง งานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้โซ่ขี้ผึ้งเพราะทำให้ความต้านทานแรงดัดลดลง

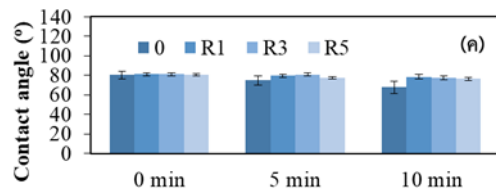
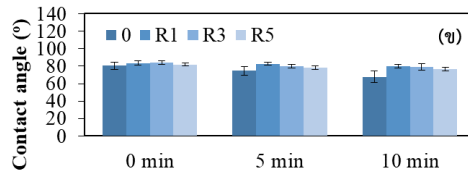
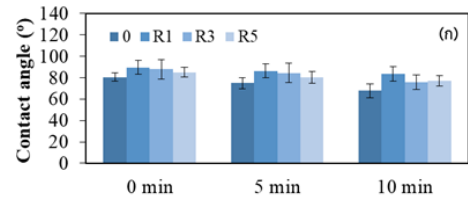
4. สรุป

การทดลองนี้พัฒนาจานชั่วคราวจากวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตอง โดยนำเศษใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตองมาผสมกับแป้งมันสำปะหลัง เกาหลินและน้ำยางพารา และสารตัวเติมอื่นๆ

ความต้านทานแรงดัดเป็นข้อมูลสำคัญที่จะบ่งบอกถึงการเสียรูปขณะใช้งานได้อย่างชัดเจน เศษใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตองไม่ช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงดัดของโฟมแป้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการใช้ผสมในสัดส่วนที่มากกว่าร้อยละ 8 จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดต่ำลง การใช้เกาหลินผสมในสัดส่วนร้อยละ 15 – 20 ส่งผลให้โฟมแป้งแสดงความสามารถในการต้านทานแรงในช่วงอิลาสติกลิมิตได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 6 ลักษณะหยดน้ำสัมผัสชิ้นงานบางสูตรที่ระยะเวลาต่างๆ

ชิ้นงาน	ระยะเวลาหยดน้ำบนชิ้นงาน (นาท)		
	0	5	10
ไม่เคลือบ (0)			
2%w/v R1			
2%w/v R5			
6%w/v R1			
6%w/v R5			



รูปที่ 12 มุมสัมผัสหยดน้ำของชิ้นงานที่ไม่เคลือบและเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิด ความเข้มข้น (ก) 2 %w/v (ข) 4 %w/v และ (ค) 6 %w/v ที่จำนวนรอบการเคลือบ 1, 3 และ 5 รอบ ที่เวลา 0 – 15 นาที

การใช้น้ำยางพาราเป็นส่วนผสมในสัดส่วนร้อยละ 5 – 20 ทำให้โฟมแป้งมีค่าความต้านทานแรงดัดลดลงขณะที่มีความยืดหยุ่นระดับใกล้เคียงกัน ดังนั้นสูตรที่ดีที่สุดคือเศษใบข้าวร้อยละ 8 เกาหลินร้อยละ 15 และน้ำยางพารา ร้อยละ 10 (AR8 K15 R10)

ความต้านทานน้ำเป็นตัวแปรสำคัญต่อการพิจารณาการนำโฟมแป้งไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากโฟมแป้งมีความไวต่อความชื้น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซีของสายโซ่แป้งกับหมู่ไฮดรอกซีของน้ำจะลดความแข็งแรงของโฟมลง ถึงแม้ว่าความสามารถในการดูดซับน้ำลดลงเมื่อมีการใช้เศษใบข้าวเหลือทิ้งในปริมาณที่มากขึ้นหรือเมื่อมีการใช้ปริมาณเกาหลินเพิ่มขึ้น แต่โฟมแป้งยังคงไวต่อความชื้นจึงต้องอาศัยการเคลือบผิวหน้าจานโฟมแป้งด้วยพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งการเคลือบจำนวน 1 รอบ โดยใช้ความเข้มข้นสารเคลือบ 2 – 6 %w/v เคลือบจำนวน 1 รอบ เพียงพอ

ต่อการช่วยลดและชะลออัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ชิ้นงานได้ โฟมแป้งผสมเศษใบข้าวเหลือทิ้งจากการแปรรูปต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตองในงานวิจัยนี้จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นงานชั่วคราวสำหรับอาหารแห้งหรือกึ่งแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ตัวอย่างการใช้งานงานชั่วคราวจากเศษเหลือทิ้งจากการผลิตผงฟอกเคมีของต้นกล้าข้าวเหนียวสันป่าตองมาผสมในโฟมแป้ง น้ำยางพาราเคลือบด้วย PLA

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ปีงบประมาณ 2562 รหัสโครงการย่อย มจ.1-62-01-02.3 ตลอดจนสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และสาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้สถานที่และเครื่องมือในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Lopez-Gila, F. Silva-Bellucci, D. Velasco, M. Ardanuy, and M. A. Rodriguez-Pereza, "Cellular structure and mechanical properties of starch-based foamed blocks reinforced with natural fibers and produced by microwave heating" *Industrial Crops and Products*, Vol. 66, pp. 194-205, Mar 2015.
- [2] N. H. P. Rodrigues, J. T. Souza, R. L. Rodrigues, M. H. Giovanetti Canteri, S. M. K. Tramontin, and A. C. Francisco, "Starch-based foam packaging developed from a by-product of potato industrialization (*Solanum tuberosum* L.)" *Applied Science*, Vol.10, pp.2235-2346, 2020.
- [3] T. Manangan and S. Shawaphun, "PHB and PLA coated bagasse paper for biodegradable food packaging" *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, Vol. 20 no. 2, pp. 215-223, 2010.
- [4] N. Soykeabkaew, C. Thanomsilp, and O. Suwantong, (2015). "A review: Starch-based composite foams". *Composites: Part A*, Vol. 78, pp. 246-243, 2015.
- [5] W. Sanhawong, P. Banhalee, A. Boonsang and S. Kaewpirom, "Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam" *Industrial Crops and Products*, Vol. 108, pp. 756-766, 2017.
- [6] F. B. Bergel, L. Machado da Luz, and R. M. C. Santana "Effect of poly(lactic acid) coating on mechanical and physical properties of thermoplastic starch foams from potato starch", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 118, pp. 91-96, 2018.

- [7] M. Jarpa-Parra and L. Chen, “Applications of plant polymer-based solid foams: current trends in the food industry”. *Applied Science*, Vol.11, 9605, 2021.
- [8] J. B. Engel, A. Ambrosi and I. C. Tessaroa, “Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging”, *Carbohydrate polymers*, Vol 225, 115234, 2019.
- [9] J. C. Benezet, A. Stanojlovic-Davidovic , A. Bergeret, L. Ferry. and A. Crespy, “Mechanical and physical properties of expanded starch, reinforced by natural fibres” *Industrial Crops and Products*, Vol. 37, pp. 435-440, 2012.
- [10] N. Kaisangsri, O. Kerdchoechuen and N. Laohakunjit, “Characterization of cassava starch based foam blended with plant proteins, kraft fiber, and palm oil” *Carbohydrate Polymers*, Vol. 110, pp. 70-77, 2014.
- [11] K. Trongchuen, S. Kethaew, K. Kamwilaisak, P. Kasemsiri and K. Saengprachatanarug, “Characterization of cassava starch foam composite containing spent coffee grounds” *KKU Research Journal (graduate study)* Vol. 17 no. 1 pp. 81-91, Jan 2017.
- [12] P. Cinelli, E. Chiellini, J. W. Lawton and S. H., Imam, “Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly(vinyl alcohol)”. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, pp. 1147-1155, 2006.
- [13] K. Kaewtatip, V. Tanrattanakul and W. Phetrat “Preparation and characterization of kaolin/starch foam” *Applied Clay Science*, Vol. 80-81, pp. 413-416, 2013.
- [14] A. E. S. Vercelheze, A. L. M. Oliveira, M. I. Rezende and C. M. O. Muller, F. Yamashita and S. Mali “Physical properties, photo- and bio-degradation of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite” *Polymers and the Environment*, Vol 21, pp. 266-274, 2013.
- [15] B. D. Ratner, “Surface modification of polymers: chemical, biological and surface analytical challenges” *Biosensors and Bioelectronics*, Vol.10, pp. 797-804, 1995.
- [16] K. J. L Burg, W. D Holder, C. R Culberson, R. J Beiler, K. G Greene, A. B Loeb sack, W. D Roland, D. J Mooney, C. R Halberstadt “Parameters affecting cellular adhesion to polylactide films”. *Journal of Biomaterials Science Polymer Edition*, Vol. 10, pp.147-161, 1999.
- [17] S. Chaireh, P. Ngasatool, and K. Kaewtatip “Novel composite foam made from starch and water hyacinth with beeswax coating for food packaging applications”, *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol 165, Part A, pp. 1382-1391, 2020.

การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ

วัศพล จันทายัพ¹ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ^{1*} และ กระวี ตรีอำนาจ²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^{1, 2}111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 31 กรกฎาคม 2566 แก้ไขบทความ 15 ตุลาคม 2566 ตอรับบทความ 31 ตุลาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ระบบการควบคุมแบ่งออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 70 และระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศที่ 0.85 กิโลปาสกาล พบว่าระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยให้มีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียสได้ ในวันที่อากาศมีอุณหภูมิไม่สูง แต่ในวันที่อุณหภูมิของอากาศสูงระบบไม่สามารถควบคุมหรือลดอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าตามที่กำหนดได้ แต่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าต่ำกว่าภายนอกโรงเรือนอยู่ประมาณ 5-7 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนได้ทุกวันทำการทดสอบให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 แต่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าสูงประมาณ 28-35 องศาเซลเซียส และระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศสามารถควบคุมให้มีค่าตามที่กำหนดได้บางช่วงเวลา โดยจะแปรผันไปตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชในโรงเรือน การใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าของระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและการทำงานของระบบควบคุมเป็นหลัก โดยในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ จะทำให้มีการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากระบบควบคุมใช้เวลาในการทำงานที่ยาวนานขึ้นและใช้น้ำปริมาณมากขึ้นในการระเหยเพื่อเติมน้ำเข้าไปในอากาศจนกว่าจะได้ค่าตามที่กำหนด ซึ่งระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดและระบบควบคุมอุณหภูมิมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ระบบควบคุมอุณหภูมินั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศ

คำสำคัญ : โรงเรือนเพาะปลูก; ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ; อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4694 2933, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: tawarat@sut.ac.th

Temperature and Relative Humidity Control in a Greenhouse Evaporative Cooling-pad system

Watsapon Junpayap¹ Tawarat Treeamnuk^{1*} and Krawee Treeamnuk²

¹School of Agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²School of Mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

^{1, 2}111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Received 31 July 2023; Revised 15 October 2023; Accepted 31 October 2023

Abstract

This research aimed to study the control of temperature and relative humidity of the air inside a greenhouse equipped with an evaporative cooling pad system. The control system was divided into 3 systems: The temperature control system at 25°C, the relative humidity control system at 70% RH, and the vapor pressure deficit (VPD) control system at 0.85 kPa. It was found that on a cool day, the temperature control system can maintain an average temperature of about 25°C. However, on a hot day, the system cannot effectively control or reduce the average temperature inside the greenhouse to the required value. Nonetheless, it can successfully control the average temperature inside the greenhouse to be about 5-7°C lower than outside the greenhouse. The relative humidity control system maintained the average relative humidity inside the greenhouse at about 70% RH every day of the test, but the average temperature inside the greenhouse was about 28-35°C. The VPD control system can be maintained at the specified value for some time; it varies according to the temperature and relative humidity of the air. However, the average temperature and relative humidity inside the greenhouse were still within the suitable range for growing plants in the greenhouse. The water and electricity consumption of the system depends mainly on the weather conditions and the operation of the control system. The relative humidity control system consumes the lowest electrical consumption, while the temperature control system has the highest electrical consumption. Therefore, the temperature control system has the highest cost compared with the relative humidity control system and the vapor pressure deficit control system.

Keywords : Greenhouse; Evaporative cooling pad system; Temperature and relative humidity

** Corresponding Author. Tel.: +668 4694 2933, E-mail Address: tawarat@sut.ac.th*

1. บทนำ

โรงเรือนเพาะปลูก (Greenhouse) คือ สิ่งก่อสร้างที่มีโครงสร้างของผนังและหลังคาเป็นวัสดุ โปร่งแสงที่ให้แสงซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ผ่านเข้ามาได้ และมีความสูงเพียงพอต่อการเข้าไป ปฏิบัติงานของมนุษย์ [1] โรงเรือนเพาะปลูกนั้นมี ประโยชน์ที่สำคัญคือสามารถปกป้องพืชจาก สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ได้ เช่น อุณหภูมิ ศัตรูธรรมชาติ และภัยธรรมชาติต่างๆ ซึ่งยังสามารถควบคุมปัจจัยที่จำเป็นและเหมาะสมต่อ การเจริญเติบโตของพืชและช่วยเพิ่มผลผลิต ปัจจัย เหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสง ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ตลอดจนถึงปริมาณธาตุอาหารที่พืช ต้องการ [2]

เนื่องจากสภาพอากาศในประเทศไทยนั้นจัดอยู่ในพื้นที่เขตร้อนชื้นจึงทำให้ในฤดูร้อนอุณหภูมิภายใน โรงเรือนนั้นมีอุณหภูมิสูง มีการสะสมความร้อนภายใน โรงเรือนและไม่มีการระบายอากาศออกสู่ภายนอก ส่งผล ให้อุณหภูมิสูงเกินกว่าที่พืชต้องการจึงส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช ในการแก้ปัญหาเรื่องความร้อน ภายในโรงเรือน ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ จึงเป็น ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในโรงเรือนเพาะปลูกในพื้นที่ เขตร้อน มีข้อดีคือ สามารถลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น ภายในโรงเรือน ซึ่งระบบทำความเย็นแบบการระเหยน้ำ ที่นิยมใช้มี 2 ระบบ ได้แก่ แบบพ่นหมอก และแบบแผ่น ระเหยน้ำ อีกทั้งมีการใช้ตาข่ายพรางแสงร่วมด้วยเพื่อช่วย ลดความร้อนที่แผ่เข้าสู่โรงเรือน [3], [4] ซึ่งระบบทำความ เย็นแบบแผ่นระเหยน้ำนั้นมีจุดเด่นกว่าแบบพ่นหมอกคือ สามารถลดอุณหภูมิได้รวดเร็ว และเพิ่มความชื้นใน อากาศได้รวดเร็ว และเมื่อระบบทำงานต่อเนื่องความชื้น ในอากาศที่ได้ไม่มากเกินไปเหมือนกับแบบพ่นหมอกที่มี ความชื้นสูงจนเกิดหยดน้ำไปเกาะที่ผิวใบพืชซึ่งจะส่งผล กระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและประหยัดการใช้น้ำ กว่าแบบพ่นหมอก [5] ยิ่งไปกว่านั้นความชื้นที่มากเกินไป

จะทำให้เชื้อราและโรคต่างๆ เจริญเติบโตได้ดีและเข้า ทำลายพืชได้ [6]

ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ (Evaporative Cooling Pad System) เป็นระบบทำ ความเย็นที่ใช้แผ่นระเหยน้ำหรือแผงรังผึ้ง (Cooling Pad) ร่วมกับพัดลม อาศัยหลักการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling) คือเมื่ออากาศร้อนผ่านแผ่น ระเหยน้ำที่เปิกความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ของ อากาศจะสูญเสียไป เนื่องจากถูกนำไปใช้เป็นการร้อน แฝง (Latent Heat) น้ำที่ระเหยจากแผ่นระเหยน้ำจะทำ ให้อากาศเย็นลงและชื้นเพิ่มขึ้น [7] ซึ่งความร้อนที่ใช้ใน การระเหยนี้มาจากความร้อนของอากาศไม่จำเป็นต้อง จัดหาพลังงานใดมาให้ความร้อน พัดลมดูดอากาศที่ ติดตั้งหน้าแผ่นระเหยน้ำทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ให้อากาศเคลื่อนที่ เมื่อระบบทำงานอย่างต่อเนื่องจะส่งผล ให้ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือน เพาะปลูกให้ต่ำกว่าสภาพภายนอกได้ตามประสิทธิภาพ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วจะสามารถลดอุณหภูมิได้ประมาณ 7 องศาเซลเซียส [8] แต่ยังมีปัจจัยหลายส่วนที่เกี่ยวข้อง กับประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของโรงเรือน เช่น สถานที่ทดสอบ ช่วงเวลาทดสอบ ขนาดและความยาว ของโรงเรือนที่ทำให้อุณหภูมิและความชื้นในแต่ละช่วงที่ ระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำไม่เท่ากัน [9]-[11] ซึ่งการ ปลูกพืชภายในโรงเรือนจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาพ อากาศให้มีการเหมาะสมต่อการปลูกพืช ซึ่งการปลูกพืช ในโรงเรือนให้เจริญเติบโตได้นั้นอุณหภูมิในโรงเรือน ควรอยู่ในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส [12] ความชื้น สัมพัทธ์ควรอยู่ที่ร้อยละ 60-80 [13] และค่าแรงดึง ระเหยน้ำของอากาศในโรงเรือนควรอยู่ที่ 0.45-1.25 กิโลปาสกาล [12]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการควบคุม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน ให้มีสภาพ อากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เพื่อให้ เกษตรกรสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืช



รูปที่ 1 ก) ตู้ควบคุมควบคุมโรงเรือน ข) ด้านหน้าโรงเรือน ค) ด้านหลังโรงเรือน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 โรงเรือนเพาะปลูก

โรงเรือนแบบปิดขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 3 เมตร โครงสร้างเป็นท่อเหล็กเคลือบสังกะสี ผึง พื้น และหลังคาคลุมด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีนหนา 0.15 มิลลิเมตร หลังคาทรงโค้งคลุมเสริมด้วยตาข่ายพรางแสง ซึ่งมีความสามารถในการพรางแสง 50 เปอร์เซ็นต์ วางซ้อนกัน 2 ชั้น ดังรูปที่ 1 ตั้งอยู่ที่อาคารจักรกลเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย (พิกัดตำแหน่งละติจูด 14.8925 N ลองจิจูด 102.0039 E) การวางแผนมีทิศตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ โดยด้านหน้าโรงเรือนหันไปทางทิศตะวันตกและด้านท้ายโรงเรือนหันไปทางทิศตะวันออก ซึ่งโรงเรือนประกอบด้วยพัดลมหมุนเวียนอากาศขนาด 12 นิ้ว กำลังไฟ 27 วัตต์ จำนวน 2 ตัวภายในโรงเรือน พัดลมระบายอากาศขนาด 16 นิ้ว กำลังไฟ 190 วัตต์ ปริมาณลม 4,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที จำนวน 4 ตัวด้านหน้าของโรงเรือนซึ่งทำหน้าที่ดึงอากาศในโรงเรือนออกสู่ภายนอกโรงเรือน แผ่นระเหยน้ำผลิตจากเยื่อกระดาษคราฟท์ ท่ออากาศสูง 7 มิลลิเมตร ทำมุมตัดกัน 90 องศา แบบ 45x45 องศา มีขนาด กว้าง 3.6 เมตร สูง 1.8 เมตร หนา 0.15 เมตร ด้านหลังโรงเรือน ใช้ปั้มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า อัตราการไหลของน้ำ 32 ลิตรต่อนาที

หมุนเวียนน้ำให้แผ่นระเหยน้ำ ควบคุมแรงดันน้ำด้วยวาล์วเปิด-ปิด

2.2 อุปกรณ์การวัดและการบันทึกข้อมูล

ระบบควบคุมใช้บอร์ด Arduino Mega360 ในการรับและประมวลผลข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ตามรูปที่ 1 ก) ซึ่งใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศรุ่น DHT22 ที่ถูกติดตั้งภายในและภายนอกโรงเรือน มีตำแหน่งการวัดที่ 1, 2, 3 อยู่ภายในโรงเรือนและตำแหน่งที่ 4 อยู่ภายนอกโรงเรือนที่ระยะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2 จากนั้นนำข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมาวิเคราะห์และสั่งการทำงานของปั้มน้ำและพัดลมที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป และติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้อ่านค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า วัดปริมาณการใช้น้ำโดยการตวงน้ำและเติมน้ำชดเชยส่วนที่ใช้ไปถึงเก็บน้ำ

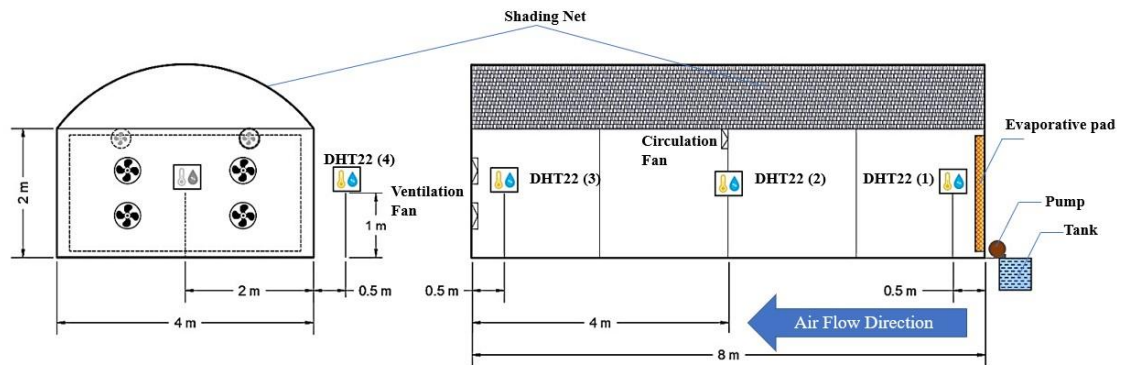
2.3 ระบบควบคุมสภาพอากาศของโรงเรือน

เนื่องจากค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีค่าที่แปรผกผันต่อกัน ซึ่งในการควบคุมค่าทั้งสองนั้นไปพร้อมกันทำได้ค่อนข้างยากหากใช้แค่ระบบทำความเย็นอย่างเดียว ดังนั้นจึงได้แบ่งการควบคุมเป็นการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ออกจากกัน และยังมีการควบคุมค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ผ่านค่าแรงดันระเหยน้ำของอากาศ

2.3.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ระบบควบคุมอุณหภูมิ จะเปิดการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในโรงเรือน เป็นตัวกำหนดค่าที่ 25 องศาเซลเซียส โดยเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย

ภายในโรงเรือนมีค่ามากกว่า 25 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำจะทำงาน แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำจะหยุดทำงาน



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการวัดของเซนเซอร์ DHT22

2.3.2 ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ จะเปิดการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนเป็นตัวกำหนดค่าที่ร้อยละ 70 โดยที่เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 70 ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำจะทำงาน แต่เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำจะหยุดทำงาน

เท่ากับ 0.85 กิโลปาสกาล ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำจะหยุดทำงาน

ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [14] ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิกับความดันไอน้ำของอากาศที่เกี่ยวข้องกับความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$VPD = (P_{sat} - P_{air}) / 1000 \quad (1)$$

โดยที่

VPD = แรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (กิโลปาสกาล)

P_{sat} = ความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศ (เมกกะปาสกาล)

P_{air} = ความดันไอน้ำของอากาศ (เมกกะปาสกาล)

2.3.3 ระบบควบคุมแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ

ระบบควบคุมแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ จะเปิดการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ใช้ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนมาคำนวณค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD) มาเป็นตัวกำหนดค่าที่ 0.85 กิโลปาสกาล โดยที่เมื่อค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศภายในโรงเรือนมีค่ามากกว่า 0.85 กิโลปาสกาล ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำจะทำงาน แต่เมื่อค่าแรงดึงระเหยน้ำภายในโรงเรือนต่ำกว่าหรือ

ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Saturation Vapor Pressure, P_{sat}) คือจุดที่อากาศอิ่มตัวหรือมีไอน้ำได้เต็มที่ที่อุณหภูมิและแรงดัน ณ ขณะนั้นๆ ความดันไอน้ำ

อิมตัวของอากาศในช่วงอุณหภูมิ 0 - 200 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2) [15]

$$\ln P_{sat} = \frac{C_1}{T_{db}} + C_2 + C_3 T_{db} + C_4 T_{db}^2 + C_5 T_{db}^3 + C_6 \ln T_{db} \quad (2)$$

โดยที่

$$C_1 = -5.8002206 \times 10^3$$

$$C_2 = 1.3914933$$

$$C_3 = -4.8640239 \times 10^{-2}$$

$$C_4 = 4.1764768 \times 10^{-5}$$

$$C_5 = -1.4452093 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = 6.5459673$$

$$T_{db} = \text{อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ (เคลวิน)}$$

ความดันไอน้ำของอากาศ (Vapor Pressure, P_{air}) จะสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ คือ มวลไอน้ำในอากาศต่อมวลไอน้ำที่อากาศขณะนั้นรับได้ หรือความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศที่อุณหภูมิเดียวกันดังแสดงในสมการ (3) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาความดันไอน้ำของอากาศจากสมการ (4) [15]

$$\theta = \frac{P_{air}}{P_{sat}} \quad (3)$$

$$P_{air} = P_{sat} \theta \quad (4)$$

โดยที่

$$\theta = \text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ไม่มีหน่วย)}$$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือน เห็นได้ว่าในวันที่อากาศเย็น เช่น ใน Day 1 (27/01/2566) ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิภายนอก

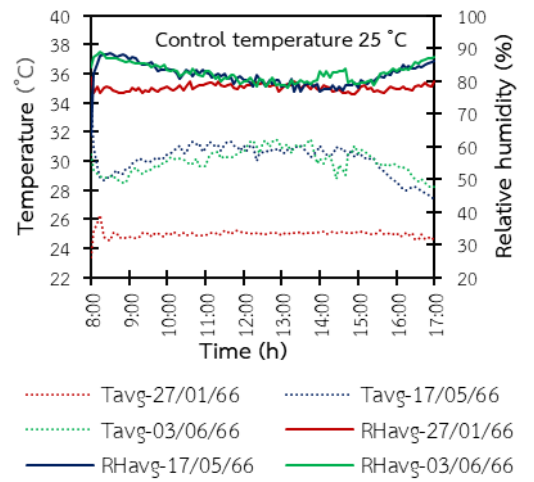
โรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 29.6 องศาเซลเซียส ระบบสามารถควบคุมค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส ได้ตลอดทั้งวัน ส่วนในวันที่อากาศร้อนเช่นใน Day 2 (17/05/2566) และ Day 3 (03/06/2566) ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 36.7 และ 35.2 องศาเซลเซียสตามลำดับ ระบบไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่า 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3 ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งวันสูงกว่าโดยมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 30.2 และ 30.0 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่ยังมีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันประมาณ 5-6 องศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันยังมีค่าสูงประมาณร้อยละ 78-82

การวิเคราะห์อุณหภูมิตามตำแหน่งการวัด ซึ่งมีทิศทางที่วัดตามแนวยาวที่กึ่งกลางของโรงเรือน จะเห็นได้ว่าการไล่ระดับของอุณหภูมิตามแนวยาวของโรงเรือน โดยที่ด้านท้ายโรงเรือนมีอุณหภูมิต่ำสุดและด้านหน้าโรงเรือนมีอุณหภูมิสูงสุด การเกิดการไล่ระดับของอุณหภูมินั้นมีสาเหตุมาจาก เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านแผ่นระเหยน้ำทำให้อากาศมีอุณหภูมิที่ลดต่ำลงทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิต่ำ จากนั้นเมื่ออากาศเคลื่อนที่ตามแนวยาวของโรงเรือน อากาศภายในโรงเรือนก็จะมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอากาศภายในโรงเรือนได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้าสู่โรงเรือนทางด้านผนังและหลังคา จึงเกิดเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อุณหภูมิของอากาศค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่กำลังเคลื่อนที่ออกนอกโรงเรือน จึงทำให้อากาศด้านท้ายโรงเรือนมีการสะสมความร้อนเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ตำแหน่งด้านหน้าโรงเรือนมีอุณหภูมิสูงสุด

ผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ได้คล้ายกับงานวิจัยในเขตพื้นที่แหล่งเลี้ยงที่นิยมใช้ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำในโรงเรือน เช่น Tsafaras et al. [5] ได้มีการ

พัฒนาโรงเรือนเพาะปลูกในประเทศซาอุดีอาระเบียให้ลดการใช้น้ำโดยการออกแบบและปรับปรุงโรงเรือน โดยในช่วงกลางวันนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 25-28 องศาเซลเซียส Oz et al. [16] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นและการกระจายตัวของอุณหภูมิในโรงเรือนที่ประเทศตุรกี ซึ่งในช่วงที่อากาศภายนอกนั้นมีอุณหภูมิสูงสุดคือ 35 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนลงได้ 7-13 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าของอุณหภูมินั้นมีค่าสูงขึ้นตามระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำ และ Mehmet กับ Sillesi [17] ศึกษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในแนวนเส้นตรงซึ่งเป็นแนวเดียวกับการปลูกพืชในโรงเรือนที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำร่วมกับตาข่ายพรางแสงที่ติดตั้งใต้หลังคาในประเทศตุรกี ซึ่งในช่วงเวลา 14.00-15.00 น. เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งมีค่าเฉลี่ย 31.44 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นนี้

สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนลงได้ โดยอุณหภูมิภายในมีค่าเฉลี่ยที่ 24.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ย (Tavg) และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RHavg) ภายในโรงเรือนเมื่อใช้การควบคุมอุณหภูมิ

ตารางที่ 1 ข้อมูลการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ

ข้อมูล	Day 1	Day 2	Day 3
	(27/01/2566)	(17/05/2566)	(03/06/2566)
อุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (องศาเซลเซียส)	29.6	36.7	35.2
ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน (ร้อยละ)	50.0	48.9	52.2
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (องศาเซลเซียส)	25.0	30.2	30.0
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (เปอร์เซ็นต์)	78.0	81.8	82.6
แรงดันระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (กิโลปาสกาล)	0.70	0.79	074
การใช้น้ำตลอดทั้งวัน (ลิตร)	264.0	423.0	406.5
การใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	4.43	7.47	7.63

ตารางที่ 2 ข้อมูลการทดสอบระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

ข้อมูล	Day 1	Day 2	Day 3
	(2/02/2566)	(13/02/2566)	(04/06/2566)
อุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (องศาเซลเซียส)	32.6	34.4	35.4
ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน (ร้อยละ)	46.1	53.8	58.5
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (องศาเซลเซียส)	28.6	32.9	35.4
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (เปอร์เซ็นต์)	70.4	70.6	70.8

ข้อมูล	Day 1 (2/02/2566)	Day 2 (13/02/2566)	Day 3 (04/06/2566)
แรงดันระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (กิโลปาสกาล)	1.17	1.47	1.69
การใช้น้ำตลอดทั้งวัน (ลิตร)	232.5	162.0	147.0
การใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	2.84	1.89	1.87

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดสอบระบบควบคุมค่าแรงดันระเหยน้ำของอากาศ

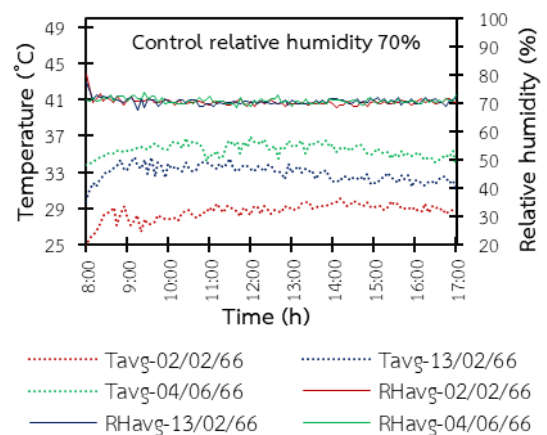
ข้อมูล	Day 1 (19/03/2566)	Day 2 21/03/2566	Day 3 22/03/2566
อุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (องศาเซลเซียส)	34.9	36.6	37.8
ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน (ร้อยละ)	50.9	49.1	41.1
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (องศาเซลเซียส)	29.9	30.5	30.3
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (เปอร์เซ็นต์)	79.2	79.5	78.1
แรงดันระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (กิโลปาสกาล)	0.88	0.90	0.95
การใช้น้ำตลอดทั้งวัน (ลิตร)	309.0	357.0	415.5
การใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	5.05	5.76	6.16

3.2 การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

การทดสอบการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนจะเห็นได้ว่าในวันที่อุณหภูมิของวันไม่สูงมากและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเช่นในวันที่ Day 1 (02/02/2566) ดังตารางที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 32.6 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ร้อยละ 46.1 ระบบสามารถควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 ได้ตลอดทั้งวัน เช่นเดียวกันกับวันที่มีอุณหภูมิสูงเช่นใน Day 2 (13/02/2566) และ Day 3 (04/06/2566) ดังตารางที่ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 34.4 และ 35.4 องศาเซลเซียสตามลำดับ และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ร้อยละ 53.8 และ 58.5 ตามลำดับ ระบบสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 (รูปที่ 4)

ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์สามารถควบคุมค่าความชื้น

สัมพัทธ์ภายในโรงเรือนได้ แต่ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนที่ทดสอบในแต่ละวันนั้นยังมีค่าสูงและขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละวัน โดยในวันที่อากาศเย็นอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าต่ำ และเมื่อในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าสูงขึ้นแปรผันไปตามกัน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ย (Tavg) และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RHavg) ภายในโรงเรือนเมื่อใช้การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

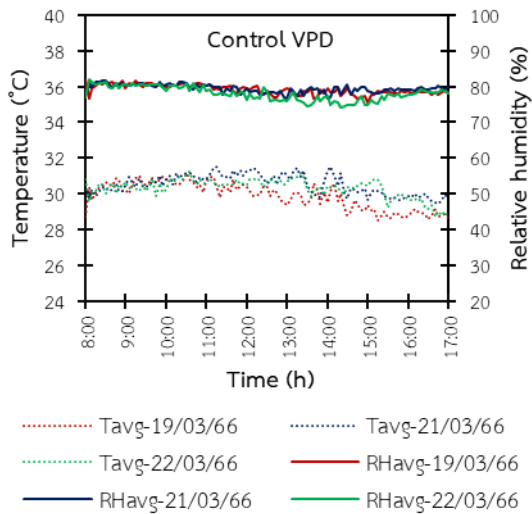
จากผลการทดสอบการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน เกิดการไล่ระดับของความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน เช่นเดียวกับการไล่ระดับของอุณหภูมิที่เคยกล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ แต่การไล่ระดับของความชื้นสัมพัทธ์นั้นจะมีค่าแปรผกผันกับการไล่ระดับของอุณหภูมิ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งวัดที่ใกล้แผ่นระเหยน้ำมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดจากนั้นค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงตามระยะทาง ซึ่งด้านหน้าโรงเรือนเป็นตำแหน่งก่อนที่อากาศจะถูกพัดลมดูดออกนั้นมีค่าต่ำสุด

ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยทางพื้นที่เขตแห้งแล้งที่มีความชื้นต่ำ ซึ่งนิยมใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำที่จะช่วยเพิ่มความชื้นให้กับอากาศในโรงเรือนเพาะปลูก เช่นในประเทศตุรกี Mehmet กับ Silileli [17] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของโรงเรือนระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำและตาข่ายพรางแสงร่วมด้วย นอกจากจะช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนแล้ว ยังพบว่าที่ช่วงอุณหภูมิสูงที่ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดที่ร้อยละ 23.09 ระบบทำความเย็นนี้สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้เพิ่มขึ้นได้ถึงร้อยละ 57.5 Sultan et al. [12] ได้ประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของโรงเรือนระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ซึ่งแผ่นระเหยน้ำทำจากฟางข้าว โดยสามารถเพิ่มความชื้นให้กับอากาศภายในโรงเรือนได้สูงถึงร้อยละ 57.16 ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านนอกโรงเรือนต่ำถึงร้อยละ 22.50 Tsafaras et al. [5] ได้ศึกษาการลดการใช้ น้ำของโรงเรือนที่ประเทศซาอุดีอาระเบีย ที่มีการออกแบบปรับปรุงทางด้านโครงสร้างและตำแหน่งการติดตั้งระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ซึ่งโรงเรือนที่ดัดแปลงแล้วสามารถ

ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 65-85 และ Aljubury กับ Ridha [18] ได้ใช้เครื่องทำความเย็นแบบระเหยทางอ้อมร่วมกับแผ่นระเหยน้ำ 3 ชั้นที่เป็นการระเหยโดยตรงในการทำความเย็นให้กับโรงเรือนทดสอบที่ประเทศอิรักซึ่งใช้น้ำใต้ดินมาใช้ในการหมุนเวียนระบบซึ่งมีความเย็นต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 24 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงถึง 50 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นสามารถลดทำอุณหภูมิในโรงเรือนเรือนกระจกลงประมาณ 12.1-21.6 องศาเซลเซียส และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จากร้อยละ 8 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 62 เมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อม จากตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าโรงเรือนระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำนี้ สามารถออกแบบระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้กับโรงเรือนได้เป็นอย่างดี

3.3 การควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ

จากผลการควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศในโรงเรือน ใน Day 1 (19/03/2566), Day 2 (21/03/2566) และ Day 3 (22/03/2566) ระบบสามารถควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศให้มีค่า 0.85 กิโลปาสกาลได้ในบางช่วงเวลา ซึ่งค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งวันมีค่าอยู่ที่ 0.88 0.90 และ 0.95 กิโลปาสกาลตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 29.9 30.5 และ 30.3 องศาเซลเซียสตามลำดับ และค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ร้อยละ 79.2 79.5 และ 78.1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ย (Tavg) และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RHavg) ภายในโรงเรือนเมื่อใช้การควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD)

จากตารางที่ 3 โดยใน Day 1 (19/03/2566) มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 28.5-31.1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอยู่ในช่วงร้อยละ 75.5-82.1 Day 2 (21/03/2566) มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 29.4-31.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอยู่ในช่วงร้อยละ 76.5-81.7 และ Day 3 (22/03/2566) มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 28.7-31.2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอยู่ในช่วงร้อยละ 74.3-82.2 ซึ่งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช

ผลลัพธ์ของค่าแรงดึงระเหยน้ำภายในโรงเรือนที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยทางพื้นที่เขตแห้งแล้งที่มีความชื้นต่ำในเขตทางประเทศแถบตะวันออกกลาง เช่นงานวิจัยของ Alsadon et al. [19] ที่ศึกษาสภาพอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกแบบแผ่นระเหยน้ำที่ใช้วัสดุคลุมโรงเรือนต่างชนิดกันเพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุคลุมโรงเรือนต่อผลผลิตของแตงกวาในประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยมีโรงเรือนที่ใช้ทดสอบ 3 หลัง พบว่าตลอดช่วงเวลาที่ทดสอบการปลูกแตงกวา ค่าแรงดึง

ระเหยน้ำของอากาศภายในโรงเรือนมีค่าเฉลี่ยตลอดเวลาที่ทดสอบของแต่ละโรงเรือนอยู่ที่ 1.03, 1.14 และ 1.43 กิโลปาสกาล

3.4 การใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้า

จากตารางที่ 1 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิใน Day 1 (27/01/2566) ซึ่งมีอากาศเย็น ทำให้ระบบควบคุมไม่ได้ทำงานตลอดเวลาเหมือนกับ Day 2 (17/05/2566) และ Day 3 (03/06/2566) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจึงทำให้ในวันที่ทดสอบนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่า โดยในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูงระบบทำงานตลอดเวลาทำให้ทั้งสองวันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการใช้น้ำ Day 2 (17/05/2566) มีการใช้น้ำที่เยอะกว่า Day 3 (03/06/2566) เนื่องจาก Day 2 (17/05/2566) มีสภาพอากาศที่แห้งกว่าจำเป็นที่จะใช้น้ำให้ระเหยเข้าสู่อากาศได้มากกว่าจึงทำให้มีการใช้น้ำที่มากกว่า

จากตารางที่ 2 การทดสอบการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน จะเห็นได้ว่าใน Day 1 (02/02/2566) ซึ่งมีอากาศแห้งจะมีการใช้น้ำที่สูงและมีการทำงานของระบบที่ยาวนานกว่าจึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่า Day 2 (13/02/2566) และ Day 3 (04/06/2566) ส่วนใน Day 3 (04/06/2566) ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่อนข้างสูงจึงทำให้มีการเติมน้ำเข้าไปในอากาศที่น้อยกว่าวันอื่นๆ จึงมีการใช้น้ำที่น้อยที่สุด แต่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับ Day 2 (13/02/2566)

จากตารางที่ 3 การทดสอบค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศจะเห็นได้ว่าใน Day 3 (22/03/2566) ซึ่งอากาศมีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ ทำให้มีการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่า Day 1 (19/03/2566) และ Day 2 (21/03/2566) ซึ่งอากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงกว่า

จากผลการทดสอบทั้งสามระบบจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในวันทดสอบที่มีอุณหภูมิสูงและ

ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ระบบควบคุมอุณหภูมิจะมีการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดเนื่องจากระบบทำงานตลอดเวลา ส่วนระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงมากที่สุดคือระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศ ส่วนระบบที่มีการใช้พลังงานน้อยที่สุดก็คือระบบควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์

4. สรุป

จากการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกช่วงเดือนมกราคมถึงมิถุนายน 2566 สรุปได้ว่าระบบควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่า 25 องศาเซลเซียส สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียสได้ ในวันที่อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นไม่สูงมากนัก ส่วนในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูง โรงเรือนไม่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิให้มีค่า 25 องศาเซลเซียสได้ แต่จะสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำกว่าภายนอกโรงเรือนได้ถึง 5-7 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนสามารถควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 แต่ในขณะเดียวกันอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าสูงอยู่ในช่วง 28-35 องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในวันที่ทดสอบ ส่วนระบบควบคุมค่าแรงดันระเหยน้ำระบบสามารถควบคุมค่าแรงดันระเหยน้ำให้มีค่า 0.85 กิโลปาสกาลได้ในช่วงเวลา แต่ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งวันนั้นยังมีค่าสูงกว่า 0.85 กิโลปาสกาล ซึ่งค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชในโรงเรือนซึ่งมีค่าประมาณ 30 องศาเซลเซียส และร้อยละ 79 ตามลำดับ ซึ่งการควบคุมด้วย VPD มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุด หากต้องการลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำลงมากขึ้น อาจจะเพิ่มพัดลมระบายอากาศให้มีอัตราการถ่ายเทอากาศที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนเครื่องมือและพื้นที่ในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Thongket, *Growing plants in greenhouses*, Bangkok: Kasetsart University, 2007.
- [2] M. Soussi, M. T. Chaibi, M. Buchholz, and Z. Saghrouni, "Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions," *Agronomy*, vol. 12, no. 626, 2022.
- [3] C. Saowarat, "AUTOMATIC CLIMATE CONTROL IN GREENHOUSE BY FOGGING SYSTEM," M.Eng. thesis, Program in Mechanical and Process System, Suranaree Univ. of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2017.
- [4] K. Simek, "REDUCTION OF HEAT FROM SOLAR ENERGY FOR MISTING GREENHOUSE," M.Eng. thesis, Program in Mechanical and Process System Engineering, Suranaree Univ. of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2019.
- [5] I. Tsafaras, J. B. Campen, C. Stanghellini, H. F. de Zwart, W. Voogt, K. Scheffers, A. Harbi and K. Assaf, "Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions," *Agricultural Water Management*, vol. 250, 2021.

- [6] W. Baudoin, R. Nono-Womdim, N. Lutaladio, and A. Hodder, *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [7] S. Ghani, F. Bakochristou, E. M. Elbialy, S. M. Gamaledin, M. M. Rashwan, A. M. Abdelhalim and S. M. Ismail, "Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review," *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 12, no. 1, pp. 48-70, Jan. 2019.
- [8] I. Norkaew, "Energy Saving in Climatic Controlled Greenhouse with Evaporative cooling Using Excess Cool Water from Ice Factory," M.Eng. thesis, Graduate School, Chiang Mai Univ, Chiang Mai, Thailand, 2000.
- [9] A. Arble, O. Yekutieli, and M. Barak, "Performance of a Fog System for Cooling Greenhouses," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 72, no. 2, pp. 129-136, 1999.
- [10] C. Kittas, T. Bartzanas, and A. Jaffrin, "Temperature Gradients in a Partially Shaded Large Greenhouse equipped with Evaporative Cooling Pads," *Biosystems Engineering*, vol. 85, no. 1, pp. 87-94, 2003.
- [11] J. Xu, Y. Li, R. Z. Wang, W. Liu, and P. Zhou, "Experimental performance of evaporative cooling pad systems in greenhouses in humid subtropical climates," *Applied Energy*, vol. 138, pp. 291-301, Jan. 2015.
- [12] M. Sultan, T. Miyazaki, B. B. Saha, and S. Koyama, "Steady-state investigation of water vapor adsorption for thermally driven adsorption based greenhouse air-conditioning system," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 785-795, Feb. 2016.
- [13] M. Amani, S. Foroushani, M. Sultan, and M. Bahrami, "Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 181, Nov. 2020.
- [14] F. W. Murray, "On the computation of saturation vapor pressure," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 6, pp. 203-204, Feb. 1967.
- [15] *ASHRAE Handbook Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009.
- [16] H. Oz, A. Atilgan, K. Buyuktas, and T. Alagoz, "The efficiency of fan-pad cooling system in greenhouse and building up of internal greenhouse temperature map," *African Journal of Biotechnology*, vol. 8, no.20, pp. 5436-5444, Oct. 2009.
- [17] M. Dayioglu and H. Silileli, "Performance Analysis of a Greenhouse Fan-Pad Cooling System: Gradients of Horizontal Temperature and Relative Humidity," *Journal of Agricultural Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 132-143, 2015.
- [18] I. M. A. Aljubury and H. D. Ridha, "Enhancement of evaporative cooling system in a greenhouse using geothermal

- energy,” *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 321-331, Oct. 2017.
- [19] A. Alsadon, I. Al-Helal, A. Ibrahim, A. Abdel-Ghany, S. Al-Zaharani, and T. Ashour, “The effects of plastic greenhouse covering on cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth,” *Ecological Engineering*, vol. 87, pp. 305-312, Feb. 2016.

การวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิค ชำนาญการ : กรณีศึกษาของศูนย์รถยนต์ขนาดใหญ่ในประเทศ

ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล กร พวงนาค และ ประวิง จินปรีชา*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 25 ตุลาคม 2566 แก้ไขบทความ 11 ธันวาคม 2566 ตอรับบทความ 19 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการศูนย์รถยนต์ขนาดใหญ่ในประเทศ ซึ่งอายุงานในองค์กรมีความสำคัญเนื่องจากเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สามารถใช้ระบุเรื่องของความพึงพอใจในการทำงาน ความสุขในการทำงาน และแน่นอนว่าถ้าอายุงานในองค์กรของพนักงานยิ่งยาว เสถียรภาพในการบริหารงานและการปฏิบัติงานก็จะคงที่ และสามารถคาดการณ์ได้รวมถึงยังลดค่าใช้จ่ายในการจ้างงานตำแหน่งใหม่เพื่อทดแทนได้อีกด้วย ทำให้ลดการลาออกจากงาน และศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ ศึกษาจากกลุ่มตัวอย่าง 245 คน เก็บข้อมูลด้วยวิธีสำรวจโดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงปริมาณอธิบาย ค่าเฉลี่ย ร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้สถิติเชิงอ้างอิง ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (One Way ANOVA) ในการทดสอบปัจจัยส่วนบุคคล และใช้สถิติวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กร ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยส่วนบุคคลด้านเงินเดือนและตำแหน่งที่ต่างกันมีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการแตกต่างกัน สำหรับปัจจัยส่วนบุคคลด้านระดับการศึกษาที่ต่างกันมีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการไม่แตกต่างกัน ในส่วนของปัจจัยผลักดัน และปัจจัยดึงดูด พบว่ามีอิทธิพลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สรุปได้ว่าปัจจัยดึงดูดมีอิทธิพลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการมากกว่าปัจจัยผลักดัน

คำสำคัญ : ช่างเทคนิคชำนาญการ; ศูนย์รถยนต์ขนาดใหญ่ในประเทศ; อายุงานในองค์กร; ปัจจัยดึงดูด; ปัจจัยผลักดัน

Analysis of Important Factors Affecting the Tenure of Professional Technicians in the Organization

Natworapol Rachsiriwatcharabul Korn Puangnak and Pravig Jeenprecha*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok, 10800

Received 25 October 2023; Revised 11 December 2023; Accepted 19 December 2023

Abstract

The purpose of this research is to analyze important factors that affect the tenure of professional Technicians at large automobile centers in the country. Years of employment in an organization are very important as it is one of the factors that can be used to determine employee satisfaction and happiness at work. If the employees have a long working life, then the stability of management and operations will be stable. In addition, it will make it possible to predict operating results as well as reduce the cost of hiring new positions to replace them, and it also reduces the rate of resignation from work. The study of influences affecting the tenure of professional technicians in an organization was conducted with a sample of 245 people. Data were collected by means of a survey using a questionnaire as a tool. Collecting data from samples to analyze the data using quantitative statistics to explain averages, percentages, standard deviations and uses reference statistics such as analysis of variance (One Way ANOVA). In testing personal factors using the Multiple Regression Analysis method to analyze the influence of push factors and attract factors that affect tenure in the organization. The results of the study found that the different personal factors in terms of salary and age have different effects on the tenured of skilled technicians in an organization. As for the personal factors of different educational levels, there is no difference in the effect on the tenured of skilled technicians in an organization. In terms of pushing factors and attracting factors, it was found that they influence the tenure in the organization of skilled technicians at a statistical significance at the 0.05 level. It can be concluded that attracting factors have a greater influence on the tenure of skilled technicians in an organization than pushing factors.

Keywords: Skilled Technicians; Large Automobile Centers in the Country; Tenure in the Organization; Attracting Factors; Pushing Factors

* Corresponding Author. Tel.: +668 9811 3310, E-mail Address: PRAVIG-J@rmutp.ac.th

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์ถือเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจของประเทศไทยจากแผนแม่บทเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ฉบับใหม่ ปี พ.ศ. 2562-2566 ระบุว่าอุตสาหกรรมยานยนต์ปัจจุบันมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 5 ของจีดีพีประเทศ อีกทั้งมีสัดส่วนของการจ้างงานแรงงานที่มีฝีมือจำนวนมาก [1] ซึ่งในปัจจุบันสถานการณ์ของอุตสาหกรรมยานยนต์โลกนั้นยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่และมีการนำใช้เทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์มากขึ้นก่อให้เกิดการแข่งขันและส่งผลกระทบต่อความต้องการปรับและพัฒนาทักษะพนักงาน (Upskills and Reskills) ไม่ว่าจะเป็นวิศวกรผู้เชี่ยวชาญ ทีมบริการภายในอุตสาหกรรมจำนวนมาก ในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากอุตสาหกรรมต้องการแนวทางการดำเนินงานเชิงนวัตกรรมขั้นสูง อีกทั้งเกิดการลงทุนในการผลิตใหม่โดยเฉพาะยานพาหนะไฟฟ้า (EV) รวมไปถึงความต้องการของลูกค้าที่กำลังเพิ่มขึ้น [2] ในขณะที่อัตราการขาดแคลนช่างเทคนิคที่มีความเชี่ยวชาญนั้นก็มีเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ตามรายงานของ CCC Intelligent Solutions Inc. ที่อ้างอิงถึงตัวแทนจาก Universal Technical Institute กล่าวว่า “ในช่วงทศวรรษหน้าพบว่าอุตสาหกรรมยานยนต์จะขาดแคลนตำแหน่งช่างเทคนิคมากถึง 100,000 ตำแหน่ง” อีกทั้งสำนักสถิติแรงงาน (Bureau of Labor Statistics) คาดการณ์ว่าภายในปี 2029 การจ้างงานช่างเทคนิคในอุตสาหกรรมรถยนต์จะลดลงประมาณ 4% การหาช่างเทคนิคที่มีทักษะที่เหมาะสมยังเป็นความท้าทายที่เพิ่มขึ้นเมื่อความซับซ้อนของอุตสาหกรรมรถยนต์เพิ่มขึ้นโดยในช่วง 15-20 ปีที่ผ่านมาว่าอุตสาหกรรมยานยนต์มักไม่ประสบความสำเร็จใน “การสรรหา” และ “รักษา” ช่างเทคนิคที่มีความสามารถ [3] เหล่านี้ถือเป็นปัญหาความไม่สมดุลกันระหว่างความต้องการช่างเทคนิคที่มีความ

เชี่ยวชาญสูงเพื่อสนับสนุนการเติบโตของอุตสาหกรรมและจำนวนกำลังคนในตำแหน่งช่างเทคนิคผู้มีความชำนาญพิเศษที่มีแนวโน้มลดลงในอนาคต นอกจากนี้ด้วยผลกระทบจากสถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนา (COVID-19) ทำให้ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ประสบปัญหาในการส่งมอบสินค้าและบริการไปยังผู้บริโภค ตลอดจนพบอุปสรรคในการบริหารจัดการห่วงโซ่อุปทานและการรักษาเสถียรภาพทางการเงินขององค์กร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัตราการเข้าใช้บริการในอุตสาหกรรมยานยนต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและทำให้อุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลกมีรายได้ลดลงถึงร้อยละ 50 ในปี 2020 [4] เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบจากมาตรการป้องกันการระบาด อาทิ การล็อกดาวน์และการรักษาระยะห่างทางสังคมทำให้สถานประกอบการที่ผลิตและให้บริการในอุตสาหกรรมยานยนต์หลายแห่งต้องปิดตัวและระงับการผลิตชั่วคราวเป็นเวลาหลายเดือน ส่งผลให้อัตราการผลิตและส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์ลดลงร้อยละ 30 อีกทั้งปริมาณคำสั่งซื้อและการเข้าใช้บริการจากผู้บริโภคยังลดลงถึงร้อยละ 70 ด้วยกันวิกฤตการณ์โรคระบาดดังกล่าวทำให้โลกเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ยุคฐานวิถีใหม่ในระยะเวลาอันรวดเร็ว (New Normal) ธุรกิจหลายภาคส่วน ตลอดจนอุตสาหกรรมยานยนต์เริ่มนำเทคโนโลยีและระบบดิจิทัลเข้ามามีใช้ในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการดำเนินธุรกิจตลอดจนพัฒนาแนวทางการให้บริการลูกค้ามากขึ้น เพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคภายใต้บริบทวิถีการดำเนินชีวิต และพฤติกรรมผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไป [5]

จากที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อเป็นการตอบสนองแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของอุตสาหกรรมรถยนต์ในเรื่องของความต้องการกำลังคนที่มีความเชี่ยวชาญสูงและแนวโน้มการขาดแคลนกำลังคนกลุ่มนั้น (Technician และ Expert Technician) รวมไปถึง

ถึงอัตราการเข้าใช้บริการและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการดำเนินงานที่ใช้เทคโนโลยีมาช่วยมากขึ้น จึงเป็นเหตุผลที่ควรนำปัจจัยต่างๆ มาทำการวิเคราะห์และพยากรณ์ปัจจัยที่ส่งผลการลาออกของช่างชำนาญการศูนย์รถยนต์ขนาดใหญ่ในประเทศ (Service Technician Dealership) เนื่องจากปัจจุบันช่างชำนาญการในกลุ่มดังกล่าวมีอัตราการลาออกสูงที่สุดจากตำแหน่งงาน [6] ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการส่งมอบสินค้าและบริการตลอดจนเพิ่มความเสี่ยงในด้านต้นทุนจากการขาดแคลนแรงงานในตำแหน่งสำคัญให้กับองค์กร ดังนั้นเพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากสถานการณ์นั้น องค์กรในอุตสาหกรรมยานยนต์จึงจำเป็นต้องค้นหาและพัฒนากลยุทธ์ที่จะใช้ในการดำรงรักษาพนักงานในกลุ่มช่างชำนาญการศูนย์รถยนต์ไว้ [7] เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการการดำเนินงานระหว่างช่างเทคนิคชำนาญการ กับบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ ตลอดจนเพื่อรักษาเสถียรภาพและความมั่นคงทางการเงินให้แก่องค์กร [8]

2. ระเบียบวิธีการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยส่วนบุคคลประกอบไปด้วย อายุ ระดับการศึกษา เงินเดือน ของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกัน น่าจะมีอิทธิพลต่ออายุงานในองค์กรที่ต่างกัน

เพื่อศึกษาปัจจัยผลักดันมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

เพื่อศึกษาปัจจัยดึงดูดมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันทั้ง 3 ปัจจัยคือ ปัจจัยส่วนบุคคล ปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดนั้น นำปัจจัยทั้ง 3 มาทำการพิสูจน์สมมติฐานโดยการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสถิติเชิงพรรณนาใช้การแจกแจงความถี่ อัตราร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐาน โดยใช้เกณฑ์การแปลความหมายค่าเฉลี่ยตามอันตรภาคชั้นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระต่อกันของตัวแปรด้านประชากรศาสตร์ ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา อายุงานเงินเดือน และการใช้สถิติวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ทำให้สามารถทราบถึงอิทธิพลระหว่างตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดกับตัวแปรตาม ซึ่งก็คืออายุงานในองค์กร

อายุงานในองค์กร (Length of Serving) มีความสำคัญเนื่องจากเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สามารถใช้ระบุเรื่องของความพึงพอใจในการทำงาน ความสุขในการทำงาน และแน่นอนว่าถ้าอายุงานในองค์กรของพนักงานยิ่งยาว เสถียรภาพในการบริหารงานและการปฏิบัติงานก็จะคงที่ และสามารถคาดการณ์ได้ รวมถึงยังลดค่าใช้จ่ายในการจ้างงานตำแหน่งใหม่เพื่อทดแทนได้อีกด้วย ทำให้ลดการลาออกจากงาน (Turnover Intention) แนวคิดที่สอดคล้องกับการทำงานอย่างมีความสุข

การทำงานอย่างมีความสุข (Happiness) เป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตที่คนเราปรารถนา ความหมายของคำว่า ความสุข (Happiness) จากการศึกษาวิจัยแบ่งการศึกษาความสุขออกเป็น 2 แนวทางคือ 1) ความสุขแบบเฮโดนิคส์ (Hedonic) หรือความสุขเชิงอัตวิสัย (Subjective Well-Being) คือการให้ความสำคัญทางอารมณ์ ความรู้สึกที่บุคคลมีต่อเป้าหมายของการใช้ชีวิตที่เน้นการมีความสุขมาก และการมีความรู้สึกเจ็บปวดน้อยที่สุด รวมถึงความรู้สึกยินดีและความรู้สึกพอใจที่บุคคลบรรลุจุดมุ่งหมายในตัวเองไม่ว่าจะเป็นอะไรก็ตาม [9] ยกตัวอย่างเช่น แนวความคิดของ [10] ซึ่งนำเสนอแนวความคิดว่าความสุขหรือสุขภาวะตามแนวเฮโดนิคส์ เกี่ยวกับส่วนประกอบทางอารมณ์ 2 ด้านรวมกัน คือ อารมณ์

เชิงบวก (positive affect) และ ปราศจากอารมณ์ทางลบ (absence of negative affect) และส่วนประกอบด้านกระบวนการทางความคิด (cognitive) แนวความคิดเกี่ยวกับความสุขที่ได้จากการทำงานโดยทำการศึกษาความสุขที่ได้จากการทำงานโดยการสัมภาษณ์เชิงลึกเพื่อหาคำจำกัดความหมายของความสุข บ่งชี้ว่าความสุขคือ ผลที่เกิดจากการรู้จากการสร้างของตัวเอง การแสดงออก โดยการเข้า มีความปลาบปลื้มนำไปสู่การทำงานอย่างมีคุณภาพ เป็นอารมณ์ในเชิงบวกที่เกิดจากการที่เกี่ยวกับการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น การช่วยเหลือกันในการทำงาน การร่วมกันออกความเห็นอย่างสมเหตุผล และผลจากการประสบความสำเร็จในการทำงาน ทำให้มีการแสดงออกทางด้านอารมณ์ในเชิงบวก ยกตัวอย่างเช่น ความสุข สนุกสนาน ที่เกิดขึ้นภายในที่ทำงาน และมีแวดล้อมในการทำงานที่ดี บุคคลที่ปฏิบัติงานร่วมกันต่างมีความสุข ทำให้เกิดความสัมพันธ์ที่ดีต่อกันในที่ทำงาน มีความรู้สึกที่ดีต่องานที่ได้รับมอบหมาย มีความผูกพันในที่ทำงาน ทำให้ผู้ที่ทำงานอยู่ภายในองค์กรมีความสุข [11] และมีผลต่ออายุงานในองค์กรของพนักงานที่ยาวนาน การลาออกถดถอย

การลาออกจากงาน (turnover intention) การลาออกว่าหมายถึงการเคลื่อนไหวหรือเปลี่ยนแปลง (movement) ของบุคลากรในการเข้าและออกจากองค์กรโดยครอบคลุมการเข้าทำงาน (job accessions) และการออกจากงาน (job separations) [12] เชย์ เลสและสเตราส์ได้ให้ความหมายการลาออกคือการสิ้นสุดการว่าจ้างพนักงาน และการจ้างพนักงานใหม่เข้ามาทำงาน หรือการเข้าทำงานหรือออกจากงานของบุคลากรในองค์กรสำหรับการเข้าทำงานมีความหมายหมุนเวียนทำงานที่เกิดขึ้นโดยที่พนักงานสมัครใจ (voluntary) และไม่สมัครใจ (involuntary) ทั้งโดยหลีกเลี่ยงได้และหลีกเลี่ยงไม่ได้ การลาออกจากงานโดยไม่สมัครใจ

มักเกิดจากนายจ้าง การออกจากงานโดยหลีกเลี่ยงได้มักเกิดในรูปที่นายจ้างควบคุมเรื่องของเงินเดือนค่าจ้าง ผลประโยชน์ตอบแทน ชั่วโมงการทำงาน และสภาพการทำงานที่เข้มงวดเกินไปสำหรับการออกจากงานโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้ ได้แก่ ความเจ็บป่วย การเกษียณอายุงาน การตาย และการตั้งครุภเป็นต้น [13]

ปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูด (Push and Pull Factor) ปัจจัยผลักดัน (Push Factor) ที่อยู่ในองค์กรเดิมเป็นสาเหตุกระตุ้นให้เกิดการออกจากงาน หรือปัจจัยดึงดูด (Pull Factor) ที่อยู่นอกองค์กร ซึ่งมีผลให้พนักงานเกิดความสนใจและได้รับแรงดึงดูดให้เข้าไปทำงานในองค์กรใหม่

จากแนวความคิดของ [14] ศึกษาถึงปัจจัยที่ทำให้พนักงานลาออกจากงาน โดยเป็นปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูด คือ 1) ปัจจัยผลักดัน (Push Factor) หมายถึงภายในองค์กรที่มีผลต่อการสร้างความไม่พอใจให้กับบุคคล ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการลาออกในที่สุด เช่น แรงกดดันในองค์กร ค่าตอบแทนไม่เพียงพอ โอกาสทางการศึกษาน้อย มีปัญหาด้านความสัมพันธ์ระหว่างคนในองค์กร เป็นต้น 2) ปัจจัยดึงดูด (Pull Factor) หมายถึง ปัจจัยภายนอกองค์กรที่ดึงดูดให้พนักงานมีการเคลื่อนย้าย หรือลาออกไปสู่องค์กรใหม่ เช่น มีโอกาสมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น สวัสดิการมากกว่า โอกาสทางหน้าที่การงานที่ดีกว่า ค่าตอบแทนที่สูงกว่า เป็นต้น

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดที่ส่งผลต่อความตั้งใจออกจากงาน พบว่าปัจจัยส่วนบุคคลด้านอายุ และรายได้ที่ต่างกันมีผลต่อความตั้งใจลาออกของพนักงาน Generation Y แตกต่างกันสำหรับปัจจัยส่วนบุคคลด้านอื่นๆ เช่น เพศ ระดับการศึกษา อายุงานในองค์กร และระดับตำแหน่งงานที่ต่างกันมีผลต่อความตั้งใจออกจากงานของพนักงาน Generation Y ไม่แตกต่างกัน และปัจจัย

ดึงดูดมีอิทธิพลต่อความตั้งใจออกจากงานของพนักงาน Generation Y มากกว่าปัจจัยผลักดัน [15]

อีริคและคณะ [16] การสร้างแบบจำลองอธิบายถึงกระบวนการของการลาออก เริ่มต้นจากปัจจัยส่วนบุคคล ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมในการทำงาน และนำไปสู่ความพึงพอใจในงานและความตั้งใจลาออก จนถึงพฤติกรรมของการลาออกจากงานจากทฤษฎีข้างต้นการลาออกจากงานเกิดจากการสะสมความไม่พึงพอใจ ทำให้เกิดความคิดที่จะลาออก ประกอบกับมีปัจจัยบางอย่างมากระตุ้น ทำให้มีความตั้งใจที่จะค้นหาทางเลือกว่าจะคงอยู่หรือลาออก และนำมาสู่การลาออกในที่สุดหากความไม่พึงพอใจไม่ได้รับการแก้ไขจากองค์กรจริง หากองค์กรเล็งเห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบ และเป็นสาเหตุจะสามารถป้องกันและหาแนวทางรักษาบุคลากรที่มีคุณภาพให้มีอายุงานที่ยาวนานต่อไป [17].

แนวทางการศึกษาด้านปัจจัยที่เป็นแรงผลักดันและปัจจัยที่เป็นแรงดึงดูด (Push and Pull Approach) แนวทางการศึกษานี้เน้นว่าเป็นแนวทางการศึกษาที่ผสมผสานแนวความคิดทางด้านพฤติกรรมและแนวทางด้านเศรษฐศาสตร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยกล่าวถึงปัจจัยที่ทำให้บุคคลลาออกจากงานมี 2 ปัจจัยด้วยกัน จากการศึกษาของ (Shiliar & Freudenberg, 1982) อ้างใน [18] คือ 1) ปัจจัยผลักดัน (Push Factors) หมายถึง ปัจจัยภายในองค์กรที่มีผลต่อการสร้างความไม่พอใจให้กับบุคคลซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้บุคคลลาออกในที่สุด เช่น ค่าจ้าง ความสัมพันธ์ระหว่างบุคคลในหน่วยงาน ขนาดขององค์กร การสื่อสาร เป็นต้น และ 2) ปัจจัยดึงดูด (Pull Factors) หมายถึง ปัจจัยภายนอกองค์กร ซึ่งเป็นปัจจัยที่ดึงดูดให้บุคคลมีการเคลื่อนย้าย หรือลาออกจากองค์กรเดิมไปสู่องค์กรใหม่ เช่น ตลาดแรงงาน ค่าตอบแทนสูงกว่า โอกาสก้าวหน้า เป็นต้น

ปัจจัยข้างต้นที่กล่าวมาแล้วนั้น [19] ได้เสนอว่า ปัจจัยผลักดันนั้นเป็นปัจจัยรองที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจทำให้บุคคลคิดลาออกจากงานหาทางเลือกหาทางเลือกหรือเปรียบเทียบระหว่างงานในขณะเดียวกันปัจจัยดึงดูดถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดและมีส่วนไม่น้อยต่อการตัดสินใจ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่บุคคลคาดหวังว่าจะได้งานที่ดีกว่าเดิม และมีความพึงพอใจในการทำงาน ซึ่งโดยปกติแล้ว พนักงานมักจะลาออกจากงานเมื่อเขาได้งานใหม่ที่จ่ายค่าจ้าง หรือค่าตอบแทนสูงกว่าเดิม

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากแนวคิดและทฤษฎีที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นกรอบแนวคิดสำหรับงานวิจัยได้ดังนี้



2.1.2 สมมติฐานในการวิจัย

1. ปัจจัยส่วนบุคคลประกอบไปด้วย อายุ ระดับการศึกษา เงินเดือน ของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกัน น่าจะมีอิทธิพลต่ออายุงานในองค์กรที่ต่างกัน
2. ปัจจัยผลักดันมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ
3. ปัจจัยดึงดูดมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

2.1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

เก็บรวบรวมข้อมูลจากการทำแบบสอบถามช่างเทคนิคชำนาญการศูนย์รถยนต์ขนาดใหญ่ในประเทศ จำนวน 245 คน จาก 155 ศูนย์ทั่วประเทศ โดยใช้เกณฑ์ของทาร์ ยามาเน่ [20] ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 5% ใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยคือแบบสอบถามแบบปลายปิด และในการวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ใช้การแจกแจงความถี่ อัตราร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้เกณฑ์การแปลความหมายค่าเฉลี่ยตามอันตรภาคชั้น คือ 1) ค่าเฉลี่ย 1.00-1.80 มีความหมายว่าน้อยที่สุด 2) ค่าเฉลี่ย 1.81-2.60 มีความหมายว่าน้อย 3) ค่าเฉลี่ย 2.61-3.40 มีความหมายว่าปานกลาง 4) ค่าเฉลี่ย 3.41-4.20 มีความหมายว่ามาก และ 5) ค่าเฉลี่ย 4.21-5.00 มีความหมายว่ามากที่สุด และใช้สถิติเชิงอ้างอิง (Inferential Statistics) ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระต่อกันของตัวแปรด้านประชากรศาสตร์ ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา आयुเงินเดือน และการใช้สถิติวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ทำให้สามารถทราบถึงอิทธิพลระหว่างตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดกับตัวแปรตาม ซึ่งก็คืออายุงานในองค์กรเพื่อใช้ในการทดสอบสมมติฐาน

3. ผลการศึกษาและอภิปราย

3.1 การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา

จากผลการทำแบบสำรวจช่างเทคนิคชำนาญการจำนวน 245 คน เป็น เพศชายร้อยละ 100 ช่างเทคนิคชำนาญการอายุส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 31-40 ปี ร้อยละ 42.44 ระดับการศึกษาส่วนใหญ่ระดับประกาศนียบัตรชั้นสูง (ปวส.) คิดเป็นร้อยละ 68.5 อายุงานส่วนใหญ่จะอยู่ในระหว่าง 11-15 ปี คิดเป็นร้อยละ 24.9 รายได้ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 20,001-30,000 บาทคิดเป็นร้อยละ 32.2 แสดงการคำนวณค่าเฉลี่ยจากข้อมูลตัวอย่างดังสมการ

$$\bar{x} = \frac{\sum fx}{N} \quad (1)$$

เมื่อ $\bar{x}$ ค่าเฉลี่ย

$\sum fx$ ผลรวมของค่าความถี่ทั้งหมด

f ค่าความถี่

x จุดกึ่งกลางของอันตรภาคชั้น

N จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

เมื่อ S ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

x ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\bar{x}$ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลในชุดนั้น

n จำนวนข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

ซึ่งมีระดับความคิดเห็นที่มีต่อระดับความสำคัญของปัจจัยผลักดันที่มีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงระดับความคิดเห็นปัจจัยผลักดันด้านต่างๆ

ด้านลักษณะงาน	$\bar{x}$	SD	ระดับความสำคัญ
ลักษณะงานที่สอดคล้องกับความชอบ	4.127	0.69	มาก
ปริมาณงานที่ได้รับมอบหมายมีความเหมาะสม	3.900	0.78	มาก
มีความภาคภูมิใจในงาน	4.180	0.71	มาก
งานที่ทำอยู่ทำให้มีโอกาสได้อยู่ร่วมกับครอบครัวมากขึ้น	3.841	0.85	มาก
รวม	4.01	0.76	มาก
ด้านผู้บังคับบัญชา	$\bar{x}$	SD	ระดับความสำคัญ
มีความยุติธรรม	3.531	0.98	มาก
พร้อมรับผิดชอบกรณีสถานมีความผิดพลาด	3.793	0.94	มาก
นโยบายบริษัทมีความชัดเจน	3.608	0.95	มาก
รวม	3.64	0.96	มาก
ด้านเพื่อนร่วมงาน	$\bar{x}$	SD	ระดับความสำคัญ
ช่วยเหลือซึ่งกันและกัน	3.944	0.89	มาก
สามารถขอคำปรึกษาได้เสมอ	4.004	0.77	มาก
รวม	3.97	79.49	มาก
ด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในการทำงาน	$\bar{x}$	SD	ระดับความสำคัญ
มีความก้าวหน้าในหน้าที่การงาน	3.806	0.88	มาก
บริษัทมีความมั่นคงและมีชื่อเสียง	4.098	0.77	มาก
มีโอกาพัฒนาความรู้เพิ่มเติม	4.177	0.68	มาก
มีการอบรมและคู่มือการทำงานที่ชัดเจน	3.881	0.83	มาก
รวม	3.99	0.79	มาก
ด้านผลตอบแทน	$\bar{x}$	SD	ระดับความสำคัญ
เงินเดือนเหมาะสมกับความรู้ความสามารถ	3.408	1.01	ปานกลาง
เงินเดือนเหมาะสมกับหน้าที่ความรับผิดชอบ	3.307	1.02	ปานกลาง
รวม	3.36	1.01	ปานกลาง

จากตารางที่ 1 พบว่าคะแนนเฉลี่ยของระดับความสำคัญของปัจจัยผลักดันในด้านต่างๆ โดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับมาก คือ ด้านลักษณะงาน ด้านผู้บังคับบัญชา ด้านเพื่อนร่วมงาน ด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในหน้าที่การงาน สำหรับด้านผลตอบแทนอยู่ในระดับปานกลาง

สำหรับระดับความคิดเห็นที่มีต่อระดับ
ความสำคัญของปัจจัยดึงดูดที่มีผลต่ออายุงานใน

องค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการแสดงใน
ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงระดับความคิดเห็นปัจจัยดึงดูดด้านต่างๆ

ด้านลักษณะงาน	$\bar{X}$	SD	ระดับความสำคัญ
ความคาดหวังที่จะได้เปลี่ยนลักษณะงานใหม่	3.070	0.93	ปานกลาง
รวม	3.070	0.93	ปานกลาง
ด้านสภาพแวดล้อมในองค์กร	$\bar{X}$	SD	ระดับความสำคัญ
ระดับเสียง อุณหภูมิ และแสงสว่างในการปฏิบัติงานมี ความเหมาะสม	3.820	0.80	มาก
มีโรงอาหาร สถานที่พักผ่อน ห้องน้ำอย่างเพียงพอ	3.492	0.94	ปานกลาง
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานเพียงพอต่อการ ปฏิบัติงาน	3.566	0.93	มาก
มีระบบการประสานงานภายในที่ดี	3.64	0.92	มาก
รวม	3.63	0.90	มาก
ด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในการทำงาน	$\bar{X}$	SD	ระดับความสำคัญ
ต้องการเลื่อนระดับในตำแหน่งที่สูงขึ้น	3.102	0.87	ปานกลาง
รวม	3.102	0.87	ปานกลาง
ด้านค่าตอบแทน	$\bar{X}$	SD	ระดับความสำคัญ
ต้องการมีรายได้สูงขึ้น	3.496	1.25	ปานกลาง
รวม	3.496	1.25	ปานกลาง

จากตารางที่ 2 พบว่า คะแนนเฉลี่ยของระดับ
ความสำคัญของปัจจัยดึงดูดในด้านต่างๆ โดยส่วน
ใหญ่อยู่ในระดับปานกลาง คือ ด้านลักษณะงาน ด้าน
ความก้าวหน้าและมั่นคงในงาน และด้านค่าตอบแทน
ส่วนการสภาพแวดล้อมในองค์กร ค่าเฉลี่ยโดยรวมอยู่
ในระดับมาก

3.2 การวิเคราะห์สถิติเชิงอ้างอิง

การวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างปัจจัย
ส่วนบุคคลกับอายุงานในองค์กรด้วยการใช้เทคนิค
การวิเคราะห์

ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way-ANOVA
Techniques) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง
ปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดกับอายุงานในองค์กร
ของช่างเทคนิคชำนาญการ ด้วยการใช้การ
ถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)
เพื่อทดสอบสมมติฐาน

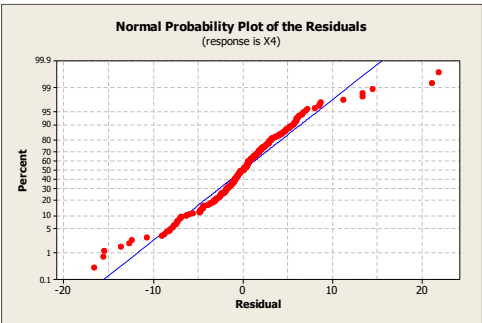
สมมติฐานที่ 1 ปัจจัยส่วนบุคคลประกอบไป
ด้วย อายุ ระดับการศึกษา เงินเดือน ของช่างเทคนิค
ชำนาญการที่แตกต่างกัน น่าจะมีอิทธิพลต่ออายุงาน
ในองค์กรที่ต่างกัน

ตารางที่ 3 ผลของปัจจัยส่วนบุคคลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

ปัจจัยส่วนบุคคล	ค่าสถิติทดสอบ	P-Value
ค่าคงที่	T-Statistics = -2.47	0.007
X2: อายุ	F-Statistics = 1249.21	0.000*
X3: ระดับการศึกษา	F-Statistics = 672.46	0.123
X4: เงินเดือน	F-Statistics = 937.69	0.000*
Regression Analysis: X4 versus X2, X3, X5		
$X4 = - 7.19 + 0.543 X2 - 0.700 X3 + 2.54 X5$		
R-Sq = 52.4%		
จำนวนข้อมูล 244		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 3 พบว่าปัจจัยส่วนบุคคลด้านอายุ และเงินเดือน ที่ต่างกันมีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยในด้านอายุ กลุ่มอายุ 38-40 ปี มีค่าเฉลี่ยอายุงานในองค์กรมากกว่ากลุ่มอายุอื่น ส่วนปัจจัยส่วนบุคคลด้านระดับการศึกษาที่ต่างกัน มีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการไม่ต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และปัจจัยด้านเงินเดือนที่แตกต่างกันมีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่า X4: เงินเดือน จากตารางที่ 3

สมมติฐานที่ 2 ปัจจัยหลักต้นมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

ตารางที่ 4 แสดงค่าสถิติการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณของตัวแปรปัจจัยหลักต้นและอายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

ตัวพยากรณ์ปัจจัยหลักต้น	Coefficient	Std. Error	P-Value
ค่าคงที่ (Constant)	10.930	3.532	0.002
F1: ด้านลักษณะงาน	0.188	1.258	0.881
F2: ด้านผู้บังคับบัญชา	-2.051	1.130	0.071
F3: ด้านเพื่อนร่วมงาน	0.3129	0.8685	0.719
F4: ด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในการทำงาน	1.464	1.311	0.265
F5: ด้านผลตอบแทน	1.4319	0.6577	0.030*
Regression Analysis: X4 versus F1, F2, F3, F4, F5			
$X4: \text{เงินเดือน} = 10.9 + 0.19 F1 - 2.05 F2 + 0.313 F3 + 1.46 F4 + 1.43 F5$			
จำนวนข้อมูล 240, F-Statistics 1.58, R Squared 3.3%, *มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05			

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่า ตัวแปรอิสระของปัจจัยหลักต้นที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ได้แก่ ปัจจัยด้านผลตอบแทน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Beta Coefficient) เท่ากับ 1.4319 ซึ่งหมายความว่า หากความพึงพอใจของช่างเทคนิคชำนาญการต่อด้านผลตอบแทนเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย

จะทำให้ช่างเทคนิคชำนาญการ มีอายุงานในองค์กรเพิ่มขึ้น 1.4319 ทั้งนี้ สำหรับค่า R Square ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 1.2% หมายความว่า ตัวแปรต้นทั้งหมดสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอายุงานในองค์กรของกลุ่มตัวอย่างได้ร้อยละ 3.3

สมมติฐานที่ 3 ปัจจัยดึงดูดมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

ตารางที่ 5 แสดงค่าสถิติการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณของตัวแปรปัจจัยดึงดูดและอายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

ตัวพยากรณ์ปัจจัยดึงดูด	Coefficient	Std. Error	P-Value
ค่าคงที่ (Constant)	19.824	3.136	0.000
A1: ด้านลักษณะงาน	0.0768	0.5769	0.894
A2: ด้านสภาพแวดล้อมในองค์กร	0.0721	0.6315	0.909
A3: ด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในงาน	-1.2421	0.5726	0.031*
A4: ด้านค่าตอบแทน	-0.1614	0.4288	0.707

Regression Analysis: X4 versus A1, A2, A3, A4

$X4: \text{เงินเดือน} = 19.8 + 0.077 A1 + 0.072 A2 - 1.24 A3 - 0.161 A4$

จำนวนข้อมูล 241, F-Statistics 1.46, R Squared 2.4%, *มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่า ตัวแปรอิสระของปัจจัยดึงดูดที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 คือด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในงานเท่านั้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Beta Coefficient) เท่ากับ -1.2421 ซึ่งหมายความว่า หากความพึงพอใจของช่างเทคนิคชำนาญการต่อด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในงานของปัจจัยดึงดูด เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย จะทำให้ช่างเทคนิคชำนาญการมีอายุงานใน

องค์กร 1.2421 หน่วย ทั้งนี้ สำหรับค่า R Square ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 2.4% หมายความว่า ตัวแปรต้นทั้งหมดสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการได้ร้อยละ 2.4%

ทั้งนี้ หากนำตัวแปรทั้งปัจจัยหลักต้นและปัจจัยดึงดูดมาทดสอบอิทธิพลที่มีต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่าสถิติการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณของตัวแปรปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

ตัวพยากรณ์ปัจจัยดึงดูด	Coefficient	Std. Error	P-Value
ค่าคงที่ (Constant)	16.484	3.769	0.000
MA: ปัจจัยผลักดัน	-1.3827	0.788	0.081
MP: ปัจจัยดึงดูด	1.0281	0.741	0.167

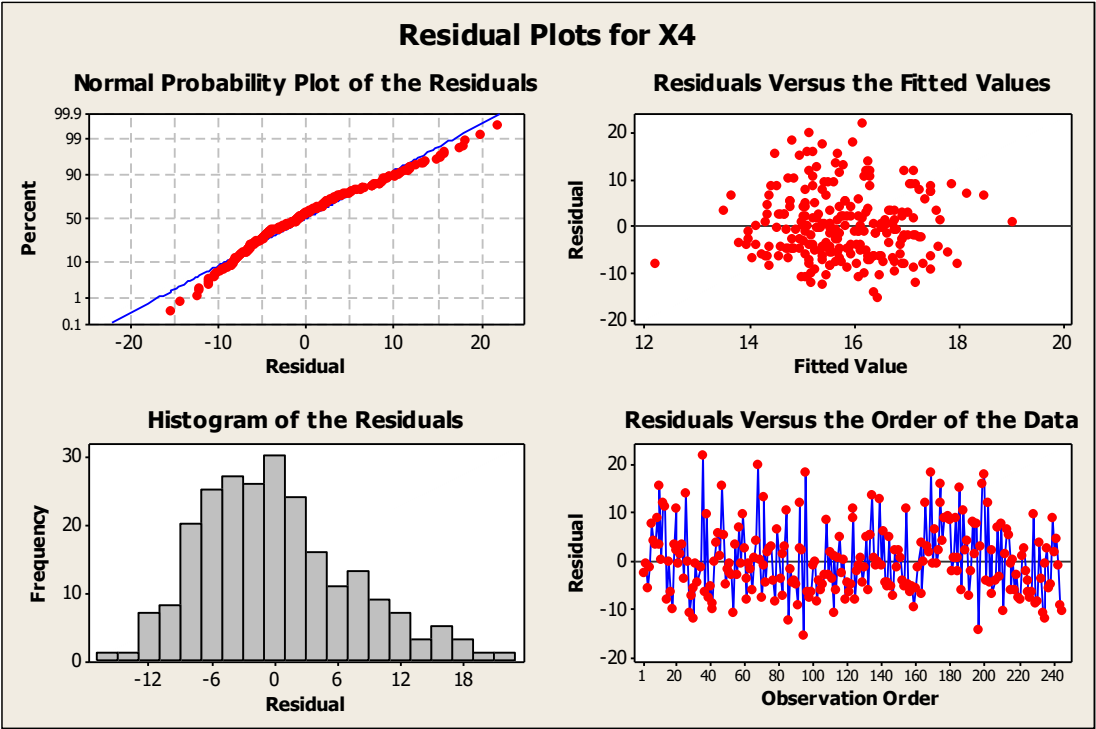
Regression Analysis: X4 versus MA, MP

X4: เงินเดือน = 16.5 - 1.38 MA + 1.03 MP

จำนวนข้อมูล 238, F-Statistics 2.38, R Squared 2.0%, *มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 6 พบว่าตัวแปรอิสระด้านปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดไม่มีอิทธิพลต่ออายุงานในองค์กรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่สมการรวมของ

ปัจจัยด้านต่างๆ ทั้ง ด้านปัจจัยส่วนบุคคล ปัจจัยด้านผลักดัน และ ปัจจัยด้านดึงดูด พบว่ามีอิทธิพลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ ดังในตารางที่ 7



รูปที่ 2 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยรวมด้านปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูด

ตารางที่ 7 แสดงค่าสถิติการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณของตัวแปรปัจจัยส่วนบุคคล ปัจจัยผลักดันและปัจจัยดึงดูดที่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ

ตัวพยากรณ์ปัจจัยดึงดูด	Coefficient	Std. Error	P-Value
ค่าคงที่ (Constant)	16.484	3.769	0.043
X2: อายุ	0.53972	0.05033	0.000*
X3: ระดับการศึกษา	-0.9209	0.4748	0.054
X4: เงินเดือน	2.2899,	0.5843	0.000*
F1: ปัจจัยผลักดัน : ด้านลักษณะงาน	-0.1088	0.8924	0.903
F2: ปัจจัยผลักดัน : ด้านผู้บังคับบัญชา	-0.9843	0.8595	0.253
F3: ปัจจัยผลักดัน : ด้านเพื่อนร่วมงาน	1.4389	0.6411	0.026*
F4: ปัจจัยผลักดัน : ด้านความก้าวหน้าและความมั่นคง ในการทำงาน	0.6079	0.9569	0.526
F5: ปัจจัยผลักดัน : ด้านผลตอบแทน	0.5878	0.4886	0.230
A1: ปัจจัยดึงดูด : ด้านลักษณะงาน	0.1906	0.4239	0.653
A2: ปัจจัยดึงดูด : ด้านสภาพแวดล้อมในองค์กร	-0.9356	0.7870	0.236
A3: ปัจจัยดึงดูด : ด้านความก้าวหน้าและความมั่นคง ในงาน	-0.7790	0.4071	0.050*
A4: ปัจจัยดึงดูด : ด้านค่าตอบแทน	0.3768	0.3179	0.237
Regression Analysis: X4 versus X2, X3, X4, A1, A2, A3, A4, F1, F2, F3, F4, F5			
$X4 = -7.92 + 0.540 X2 - 0.921 X3 + 2.29 X5 + 0.191 A1 - 0.936 A2 - 0.779 A3$ $+ 0.377 A4 - 0.109 F1 - 0.984 F2 + 1.44 F3 + 0.608 F4 + 0.588 F5$			
จำนวนข้อมูล 238, F-Statistics 21.72, R Squared 53.7%, *มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05			

จากตารางที่ 7 ปัจจัยส่วนบุคคลที่มีอิทธิพลในสมการพยากรณ์อายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการที่ต่างกันเป็นผลจาก อายุ, เงินเดือน, ปัจจัยผลักดันด้านเพื่อนร่วมงาน และปัจจัยดึงดูดด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในการทำงาน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Beta Coefficient) คือ 0.593, 2.289, 1.439 และ -0.779 ตามลำดับ สำหรับค่า R Square ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 53.7% หมายความว่า ตัวแปรต้นทั้งหมดสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการได้ร้อยละ 53.7

เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic regression analysis) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ตัวแปรเชิงพหุที่มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่า หรือทำนายเหตุการณ์ที่สนใจว่าจะเกิดหรือไม่เกิด เหตุการณ์นั้นภายใต้อิทธิพลของตัวแปรปัจจัยแบบจำลองโลจิสติกประกอบด้วยตัวแปรตามที่เป็นตัวแปรแบบทวินาม (Dichotomous variable) คือ เกิด และไม่เกิด และตัวแปรอิสระ คือ อายุ เงินเดือน ปัจจัยผลักดันด้านเพื่อนร่วมงาน ปัจจัยดึงดูดด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในงาน มีผลกับ

เงินเดือนหรือไม่ ซึ่งตัวแปรตามเป็นพหุนาม (Multinomial logistic regression) ปัจจัยด้านบุคคลที่มีอิทธิพลในสมการพยากรณ์

อายุการทำงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกันเป็นผลจาก อายุ เงินเดือน ความก้าวหน้า และ เพื่อนร่วมงาน

ตารางที่ 8 แสดงค่าสถิติการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกวิเคราะห์ตัวแปรเชิงพหุของตัวแปรปัจจัยส่วนบุคคลที่มีอิทธิพลในการพยากรณ์อายุการทำงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกันเป็นผลจาก อายุ เงินเดือน ความก้าวหน้าและความมั่นคง มีผลกับเงินเดือนแตกต่างกันหรือไม่

ตัวพยากรณ์ปัจจัย	Coefficient	Std. Error	Chi	95% CI for OR		
			P-Value	OR	Lower	Upper
X2: อายุ	-0.3045	0.0229	0.000*	0.74	0.71	0.77
A3: ปัจจัยดึงดูดด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในงาน	0.245477	0.1297	0.058	1.28	0.99	1.65
F3: ปัจจัยผลักดันด้านเพื่อนร่วมงาน	-0.3293	0.1465	0.025*	0.72	0.54	0.96
Ordinal Logistic Regression: X4 versus X2, A3, F3						
จำนวนข้อมูล 244						

การอ่านผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของอายุ ความก้าวหน้าและความมั่นคงในงาน และเพื่อนร่วมงาน มีผลกับเงินเดือนแตกต่างกันหรือไม่ พบว่า อายุ ความก้าวหน้าและความมั่นคงในงาน และเพื่อนร่วมงานมีความสัมพันธ์กับเงินเดือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p=0.000) เช่นเดียวกับกับวิธีการค่าสถิติการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ โดยปัจจัยดึงดูดด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในงานมีอิทธิพล 1.28 เท่า (95% IC; 0.99-1.65) ปัจจัยด้านอายุมีอิทธิพล 0.74 เท่า (95% IC; 0.71-0.77) และปัจจัยผลักดันด้านเพื่อนร่วมงานมีอิทธิพล 0.72 เท่า 95% IC; 0.54-0.96)

4. สรุปผล

จากสมมติฐานที่ 1 ปัจจัยส่วนบุคคลประกอบไปด้วย เพศ อายุ ระดับการศึกษา เงินเดือนของช่าง

เทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกันน่าจะมีอิทธิพลต่ออายุงานในองค์กรที่ต่างกัน พบว่าปัจจัยส่วนบุคคลด้านอายุ และเงินเดือน ที่ต่างกัน มีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากช่างเทคนิคชำนาญการถูกแบ่งเรื่องอายุอย่างชัดเจน ยิ่งอายุน้อยก็มีโอกาสย้ายงานได้บ่อยกว่าอายุมาก ทำให้อายุงานในองค์กรก็น้อยลง การไม่มีภาระและการต้องการรายได้ที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วของช่างเทคนิคชำนาญการ ทำให้ปัจจัยทั้งสองส่งผลต่ออายุงานในองค์กรที่ต่างกันสอดคล้องกับงานวิจัยของ [21] ซึ่งพบว่า อายุที่ต่างกันมีผลต่อความตั้งใจลาออกจากงานที่ต่างกัน และ [22] ซึ่งพบว่าอายุและรายได้เฉลี่ยต่อเดือนที่ต่างกันมีผลต่อความตั้งใจลาออกจากงานที่ต่างกัน

ส่วนปัจจัยส่วนบุคคลด้านอื่นๆ เช่น ระดับการศึกษาที่ต่างกันมีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ สำหรับด้านระดับการศึกษานั้นแต่ละองค์กรไม่มีการแบ่งแยกสวัสดิการหรือนโยบายการบริหารที่แตกต่างกันตามระดับการศึกษา ทำให้ช่างเทคนิคชำนาญการไม่รู้สึกลถึงความแตกต่างหรือแปลกแยกความต่างด้านนี้จึงไม่ส่งผลต่ออายุงานในองค์กร แม้ว่าจะพบความแตกต่างทางด้านเงินเดือนอย่างเห็นได้ชัด แต่ทั้งนี้เป็นเพราะประสบการณ์และความรู้ความสามารถของแต่ละบุคคลซึ่งเป็นเหตุผลที่สามารถเข้าใจกันได้ง่าย ช่างเทคนิคชำนาญการจึงไม่คิดว่าความต่างด้านนี้จะมีผลต่ออายุงานในองค์กร สอดคล้องกับงานวิจัยของ [21] ซึ่งพบว่า เพศระดับการศึกษา ที่ต่างกันมีผลต่อความตั้งใจออกจากงานที่ไม่แตกต่างกัน

สมมติฐานที่ 2 ปัจจัยผลักดันมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยผลักดันมีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Shikiar & Freudenberg, 1982) อ้างถึงใน [14] ที่ทำการศึกษาลงถึงปัจจัยที่ทำให้พนักงานลาออกจากงาน พบว่าปัจจัยผลักดันมีผลต่อความตั้งใจลาออกจากงาน ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการลาออกได้แก่ ค่าตอบแทนไม่เพียงพอ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [23] ที่พบว่าสาเหตุที่พนักงานลาออกจะมีเหตุผลที่แตกต่างกันไป แต่สาเหตุหลักจะมีเพียง 3 ประการ ได้แก่ งาน เงิน และเจ้านาย ทั้งนี้แต่ละปัจจัยอาจมาจกน้อยแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสถานการณ์หรือสภาพแวดล้อมของแต่ละบุคคล โดยสำหรับการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ปัจจัยด้านผลตอบแทนมีผลต่อการผลักดันให้ต่ออายุงานในองค์กรมากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ [24] และสะสมจนเกิดความตั้งใจลาออกในที่สุด

สมมติฐานที่ 3 ปัจจัยดึงดูดมีความสัมพันธ์ต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยดึงดูดมีผลต่ออายุงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Shikiar &

Freudenberg, 1982) อ้างถึงใน [14] ที่ทำการศึกษาลงถึงปัจจัยที่ทำให้พนักงานลาออกจากงาน แล้วพบว่าปัจจัยดึงดูดมีผลต่อความตั้งใจลาออกจากงาน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ [24] ที่กล่าวว่า การที่องค์กรอื่นยื่นข้อเสนอที่ดีกว่ามาให้ ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งที่สูงขึ้น หรือเงื่อนไขการทำงานที่ดีกว่า สำหรับการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ปัจจัยด้านความก้าวหน้าและความมั่นคงในงานมีผลต่อการดึงดูดให้เกิดอายุงานในองค์กรน้อยลงทำให้ความตั้งใจลาออกจากงานมากที่สุด ยังสอดคล้อง ปัจจัยผลักดันคือ 2.61 เปรียบเทียบกับผลการวิจัยครั้งนี้ที่มีค่าเฉลี่ยของปัจจัยดึงดูดคือ 3.496 ขณะที่ค่าเฉลี่ยของปัจจัยผลักดันคือ 3.36 จึงพบว่าผลการศึกษาของทั้งสองกรณีมีความใกล้เคียงกัน

สถิติการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกวิเคราะห์ตัวแปรเชิงพหุของตัวแปรปัจจัยส่วนบุคคลที่มีอิทธิพลในสมการการพยากรณ์อายุการทำงานในองค์กรของช่างเทคนิคชำนาญการที่แตกต่างกันเป็นผลจาก อายุ เงินเดือน ความก้าวหน้าและความมั่นคง มีผลกับเงินเดือนแตกต่างกันหรือไม่ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเช่นเดียวกับวิธีการค่าสถิติการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และอาจารย์ที่ปรึกษาที่สนับสนุน ให้คำแนะนำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Master Plan for Automotive Industry 2019-2023.
- [2] The Adecco Group, Annual Report, 2022.
- [3] CCC Intelligent Solutions Inc., 2022; Forbes, 2022.

- [4] United Nations Industrial Development Organization, Annual Report 2020.
- [5] Thailand Automotive Institute, 2020.
- [6] Hireology, 2020.
- [7] Cox Automotive, 2019.
- [8] NADA. Dealership Workforce Study. "Automotive Retail: National & Regional trends in Compensation," Benefits & Retention. 2016.
- [9] D. Mc. Dowell. "Core Values and Professional Integrity," 2010. http://www.mncap.org/protocol/CoreValues_ProfIntegrity.pdf. Retrieved from February ,25 2022.
- [10] E. Diener, R. A. Emmons, R. J. Larsen and S Griffin., "Satisfaction with Life Scale (SWLS). Journal of Personality Assessment," 49 (1), 1985, pp.71-75.
- [11] J. Manion. "Joy at work: Creating a positive workplace. Journal of Nursing Administration," 33 (12), 2003, pp.652-655.
- [12] P. Pigors and C. A. Meyers, "Personnel Administration: A point of view and method," New York: McGraw-Hill. 1973.
- [13] L. R. Sayles and G. Strauss, "Managing human resource. Englewood Cliffs," NJ: Prentice-Hill. 1977.
- [14] N. Srirattanaphan, "Trend of Quitting Jobs at Kohler (Thailand) Co.,Ltd," Master of Business Administration Thesis (Business Administration), Chonburi: Burapha University, 2010.
- [15] S. KwanThong and T. Krischaroen, "A study of factors affecting the intention to leave the job of employees of Generation Y.," Social science journal Srinakharinwirot University, Year 18, January-December, 2015.
- [16] Eric, G. L., et al., "The impact of job satisfaction on turnover intent: A test of a structure measurement model using a national sample of workers." The Social Science Journal, 38, Hickman & Silva. 1984; citing Warner.1991). 2001, pp.233-250.
- [17] R. Prasertsri "Organizational Behavior" Bangkok: Thammasat Company, 2005.
- [18] M Sawangbamng, "Survey of factors affecting the resignation of employees in private industrial plants in Chonburi Province." Master of Education degree thesis, Department of Guidance Psychology Graduate School Burapha University, 1993.
- [19] W.H. Mobley, "Intermediate Linkages in the Relationship Between Job Satisfaction and Employee Turnover." Journal of Applied Psychology, 62(2), 1977, pp.237-240.
- [20] T. Yamane, "Statistics, An Introductory Analysis." New York: Harper and Row. 1976.
- [21] A. Sawangarom, "Personal factors working environment job satisfaction and intention to resign from production staff Case study of a sample bread factory," M.A. Thesis, Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 2006.
- [22] Y. Thiwatphon, "Factors affecting the trend of employee turnover Case study: Employees of a company in the Eastern Industrial Estate. Chonburi Province," Master of Business Administration Thesis

(Business Administration). Chonburi:
Burapha University, 2010.

- [23] W. Duangdee, "Reasons for employees to resign and the organization's reputation may be lost," 2011. Retrieved on 14

October 2014, from
<http://www.bangpoosociety.com>

- [24] S. Wittawat-Olan, "Gen Y, hold on tight and make it work," Bangkok: Bangkok Thurakit Business Book, 2007.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยจากการประมาณค่า สุญหายด้วยตัวแปรเสริมภายใต้กลไกการสุญหายหลายแบบ

ณัทย สระกบแก้ว¹ คณิศา โชติจันทิก^{2*} และ คณารักษ์ ศรีสมบูรณ์³

¹กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

²ภาควิชาคณิตศาสตร์ สถิติ และคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

³หมวดวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ

¹99 หมู่ 1 ตำบลพรหมณี อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก 26001

²85 ถนนสกลมารค์ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

³6/999 พหลโยธิน 52 แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

รับบทความ 30 มิถุนายน 2566 แก้ไขบทความ 15 กรกฎาคม 2567 ตอบรับบทความ 24 กรกฎาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยเมื่อข้อมูลสุญหาย ตัวประมาณค่าเฉลี่ยมาจากการประมาณค่าสุญหาย ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ย วิธีแฟคเตอร์ และวิธีเลขชี้กำลัง ภายใต้กลไกการสุญหาย 3 รูปแบบ คือ การสุญหายแบบสุ่ม การสุญหายแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ และการสุญหายแบบไม่สุ่ม งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กจากแหล่งข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษในการศึกษาประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการประมาณค่าสุญหายในแต่ละสถานการณ์ สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยกำหนดขนาดตัวอย่าง คือ 30 100 และ 500 ที่ระดับการสุญหาย 10% 20% และ 30% ผลการวิจัยพบว่า ภายใต้กลไกการสุญหายทุกรูปแบบประสิทธิภาพของการประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีที่ใช้ข้อมูลตัวแปรเสริมร่วมกับตัวแปรที่สนใจศึกษา คือ วิธีแฟคเตอร์ และวิธีเลขชี้กำลัง ดีกว่า วิธีค่าเฉลี่ยที่ใช้ข้อมูลตัวแปรที่สนใจศึกษาเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ขนาดตัวอย่างและระดับการสุญหายของข้อมูลมีผลต่อประสิทธิภาพของวิธีการ เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของวิธีการเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้ระดับการสุญหายเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของวิธีการลดลง

คำสำคัญ : การประมาณค่าเฉลี่ย; ข้อมูลสุญหาย; ตัวแปรเสริม

The Performance Comparison of Mean Estimation by Imputation with Auxiliary Variable under Various Missing Data Mechanisms

Nahathai Srakobkaew¹ Kanisa Chodjuntug^{2*} and Kanarak Srisomboon³

¹Department of Mathematics and Computer Science, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

²Department of Mathematics Statistics and Computer, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

³Science and Technology Program, Faculty of Information Technology and Digital Innovation, North Bangkok University

¹99 Moo 1, Prommanee, Mueang, Nakhon Nayok 26001

²85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani Province 34190

³6/999 Phahonyothin 52, Khlong Thanon Subdistrict, Sai Mai District, Bangkok 10220

Received 30 June 2023; Revised 15 July 2024; Accepted 24 July 2024

Abstract

The objective of this research is to compare the performance of mean estimation when data is missing. Mean estimators are derived from imputation methods, including the mean method, factor method, and exponential method. Under missing data mechanisms, there are 3 types, including missing completely at random, missing at random, and missing not at random. This research uses the small dust particles from the Pollution Control Department's sources to study the efficiency of mean estimation using the imputation method for each situation. The criterion used to compare efficiency is the mean square error. The sample sizes were set to be 30, 100, and 500 at missing data levels of 10%, 20%, and 30%. The results showed that under all types of missing data mechanisms, the efficiency of mean estimation from the imputation method that uses information from an auxiliary variable together with the study variable as the factor method and the exponent method was better than the mean method that uses the study variable only. Moreover, the sample size and the missing data levels affect the performance of the method. As the sample size increases, the efficiency of the method increases. But if the missing data levels increase, the efficiency of the method decreases.

Keywords : Mean Estimation; Missing data; Auxiliary Variable

** Corresponding Author. Tel.: +66 4535 3401, E-mail Address: kanisa.c@ubu.ac.th*

1. บทนำ

ข้อมูลสูญหายเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในงานวิจัยด้านต่าง ๆ เช่น สิ่งแวดล้อม มลพิษทางอากาศ เศรษฐกิจ การแพทย์ การเกษตร เป็นต้น ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการทำวิจัยเนื่องจากปัญหาดังกล่าวไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ ข้อมูลที่รวบรวมได้จึงเป็นข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์หรือมีจำนวนข้อมูลไม่ครบถ้วนตามแผนงานวิจัยที่วางไว้ มีผลทำให้เมื่อนำข้อมูลที่ไม่มีความสมบูรณ์ไปทำการวิเคราะห์ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากความจริงที่เกิดขึ้น และด้วยข้อจำกัดเกี่ยวกับระยะเวลาและงบประมาณในการทำวิจัย หากแก้ปัญหาโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลใหม่อีกครั้งเพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลครบถ้วนตามแผนการดำเนินงานจึงค่อนข้างเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้การประมาณค่าสูญหาย (Imputation) จึงมีความเหมาะสม R. Little and D. Rubin [1] ได้จำแนกกลไกการสูญหายของข้อมูล 3 รูปแบบ ได้แก่ การสูญหายแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Missing Completely at Random; MCAR) คือความน่าจะเป็นที่ข้อมูลสูญหายไม่ขึ้นกับค่าใด ๆ หรือไม่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลอื่นเลย การสูญหายแบบสุ่ม (Missing at Random; MAR) คือ ความน่าจะเป็นที่ข้อมูลสูญหายขึ้นอยู่กับข้อมูลอื่น ๆ หรือมีความสัมพันธ์กับข้อมูลอื่นที่ทราบค่า แต่ไม่ขึ้นกับค่าของข้อมูลที่สูญหาย และการสูญหายแบบไม่สุ่ม (Missing Not at Random; MNAR) คือ ความน่าจะเป็นที่ข้อมูลสูญหายที่ตำแหน่งใด ๆ โดยขึ้นกับค่าของตำแหน่งนั้น ๆ

สำหรับวิธีการประมาณค่าสูญหายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ วิธีค่าเฉลี่ย มีการดำเนินงานโดยแทนค่าข้อมูลที่หายไปหรือข้อมูลสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่สนใจศึกษาที่สามารถเก็บรวบรวมได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำวิธีการดังกล่าวมาพัฒนาต่อยอดสู่ตัวประมาณค่าเฉลี่ยเมื่อข้อมูลมีปัญหาการสูญหายเกิดขึ้น เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการนำไปใช้ในการประมาณค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานที่

ต้องใช้ในงานวิจัยทั่วไปและยังสามารถทำให้ข้อมูลกลับมาเป็นจำนวนครบสมบูรณ์ตามแผนงานวิจัยเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูงต่อไป อีกทั้งได้มีการนำวิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีค่าเฉลี่ยมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลทางมลพิษทางอากาศ เช่น M. N. Norazian et al. [2], N. A. Zainuri et al. [3], K. Chodjuntug and N. Lawson [4], [5] ซึ่งปัญหามลพิษทางอากาศเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญในขณะนี้ โดยมีค่าระดับมลพิษทางอากาศเกินค่ามาตรฐานในหลายเขตพื้นที่ นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอการประมาณค่าสูญหายอีกหลายวิธีเพื่อนำไปสู่ตัวประมาณค่าเฉลี่ยเมื่อข้อมูลสูญหาย ยกตัวอย่างคือ H. Lee et al. [6] ได้เสนอตัวประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีอัตราส่วน ซึ่งได้แนวคิดมาจาก W. G. Cochran [7] โดยวิธีดังกล่าวเป็นการใช้ข้อมูลของตัวแปรเสริม (Auxiliary Information) หรือตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับตัวแปรที่สนใจศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประมาณค่าสูญหาย ซึ่งลักษณะชุดข้อมูลของตัวแปรเสริมจะต้องไม่มีข้อมูลสูญหายหรือให้มีข้อมูลสูญหายเกิดขึ้นเฉพาะตัวแปรที่สนใจศึกษาเท่านั้น และจากการศึกษาพบว่า วิธีอัตราส่วนซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลตัวแปรเสริมมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เฉพาะข้อมูลตัวแปรที่สนใจศึกษาโดยไม่มีการใช้ข้อมูลตัวแปรเสริม ในกรณีนี้ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ระดับสูงในทิศทางเดียวกัน

S. Singh and S. Horn [8] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าสูญหายที่ปรับปรุงจากวิธีอัตราส่วนและมีการใช้ค่าคงที่เพื่อปรับการถ่วงน้ำหนักระหว่างกลุ่มข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้และกลุ่มข้อมูลสูญหาย โดยวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอัตราส่วน และวิธีค่าเฉลี่ย อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของวิธีการขึ้นอยู่กับ การเลือกค่าคงที่ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1 วิธีดังกล่าวจะเป็นวิธีอัตราส่วน

ต่อมา D. Shukla and N. Thakur [9] ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีของ V. K. Singh and D. Shukla [10] หรือที่เรียกว่า วิธีแฟคเตอร์ โดยถูกปรับปรุงจากวิธี

อัตราส่วน สำหรับการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย ผลการศึกษาพบว่าวิธีแฟคเตอร์มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอัตราส่วน และวิธีค่าเฉลี่ย นอกจากนี้ D. Shukla et al. [11] ได้ปรับปรุงวิธีแฟคเตอร์โดยใช้แนวคิดของ S. Singh and S. Horn [8] ซึ่งใช้ค่าคงที่ในการเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าสูญหาย โดยเลือกค่าคงที่ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าต่ำสุด แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวศึกษาเฉพาะข้อมูลที่มีการสูญหายในรูปแบบ MCAR ซึ่งรูปแบบการสูญหายที่เกิดขึ้นในการสำรวจตัวอย่างนั้นยังมีอีกสองรูปแบบคือ MAR และ MNAR ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

A. K. Singh et al. [12] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยตัวประมาณค่าเลขชี้กำลัง หรือเรียกว่าวิธีเลขชี้กำลัง โดยวิธีการดังกล่าวเป็นการใช้ข้อมูลตัวแปรเสริมซึ่งจัดอยู่ในรูปแบบเลขชี้กำลัง จากการศึกษาผลการวิจัยพบว่าวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการที่ตัวแปรเสริมไม่ได้จัดอยู่ในรูปของเลขชี้กำลัง โดยลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่สนใจศึกษาและตัวแปรเสริมมีทิศทางเดียวกัน และลักษณะข้อมูลสูญหายอยู่ในรูปแบบ MCAR

สำหรับการประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีค่าเฉลี่ยที่ใช้เฉพาะข้อมูลที่สนใจศึกษาหรือวิธีที่ไม่ใช้ตัวแปรเสริมอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงที่เกิดขึ้นหากข้อมูลมีค่าผิดปกติปะปนอยู่ในชุดข้อมูลจึงถือได้ว่าเป็นข้อจำกัดของวิธีนี้ [13] ปัจจุบันจึงมีนักวิจัยสนใจศึกษาพัฒนาวิธีการประมาณค่าสูญหายเพื่อนำไปประมาณค่าเฉลี่ยโดยใช้ตัวแปรเสริม (Auxiliary Variable) ร่วมกับตัวแปรที่สนใจศึกษาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหรือดีกว่าวิธีที่ใช้เฉพาะข้อมูลของตัวแปรที่สนใจศึกษา ซึ่งมีผลทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงจากตัวประมาณด้วยวิธีการดังกล่าว [8]-[12]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการประมาณ

ค่าสูญหายด้วยตัวแปรเสริมได้แก่ วิธีแฟคเตอร์ และวิธีเลขชี้กำลัง กับวิธีค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นวิธีเบื้องต้นที่ไม่ใช้ตัวแปรเสริมภายใต้รูปแบบการสูญหาย ได้แก่ MCAR, MAR และ MNAR โดยใช้ข้อมูลเกี่ยวกับผู้ลงคะแนนขนาดเล็ก จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นพื้นที่หนึ่งที่ประสบปัญหาเกี่ยวกับผู้ลงคะแนนเล็กน้อยเกินค่ามาตรฐานและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในจังหวัดอุบลราชธานี [14] ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลทุติยภูมิจากกรมควบคุมมลพิษ โดยใช้เกณฑ์สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ คือ ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error; MSE)

2. ระเบียบวิธีวิจัย

เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยเมื่อข้อมูลสูญหายภายใต้รูปแบบการสูญหายที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษเกี่ยวกับผู้ลงคะแนนขนาดเล็ก จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งใช้เกณฑ์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ คือ MSE

2.1 สัญลักษณ์และข้อตกลงเบื้องต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีการประมาณค่าสูญหาย ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ย วิธีแฟคเตอร์ และวิธีเลขชี้กำลัง โดยกำหนด Y คือ ตัวแปรที่สนใจศึกษา X คือ ตัวแปรเสริม N คือ ขนาดประชากร n คือ ขนาดตัวอย่าง r คือ จำนวนข้อมูลตอบสนอง $n-r$ คือ จำนวนข้อมูลไม่ตอบสนอง y_i คือ ค่าตัวแปรที่สนใจศึกษาลำดับที่ i x_i คือ ค่าตัวแปรเสริมลำดับที่ i R คือ ชุดของข้อมูลที่ตอบสนอง R' คือ ชุดของข้อมูลที่ไม่ตอบสนอง $\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร $\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร $\bar{y}_r$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง Y จำนวน r หน่วย $\bar{x}_r$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง X จำนวน n หน่วย และ $\bar{x}_r$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง X จำนวน r หน่วย

2.2 วิธีที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับตัวประมาณค่าเฉลี่ยเมื่อข้อมูลสูญหายจากการประมาณค่าสูญหาย ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ย วิธีแฟคเตอร์ และวิธีเลขชี้กำลัง แล้วจึงทำการหาค่าเฉลี่ยอยู่ในรูปตัวประมาณค่าแบบจุด โดยมีรูปแบบทั่วไปของการหาตัวประมาณดังนี้ [15]

$$y_{.i} = \begin{cases} y_i ; i \in R \\ \hat{y}_i ; i \in R' \end{cases} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 ตัวประมาณค่าแบบจุดรูปแบบทั่วไป คือ

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i \in R} y_i + \sum_{i \in R'} \hat{y}_i \right] \quad (2)$$

2.2.1 วิธีค่าเฉลี่ย

การประมาณค่าสูญหายโดยวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปใช้ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดของวิธีการดังนี้ [16]

$$y_{.i} = \begin{cases} y_i ; i \in R \\ \bar{y}_r ; i \in R' \end{cases} \quad (3)$$

จากสมการที่ 1 ได้ตัวประมาณค่าแบบจุด คือ

$$\bar{y}_M = \bar{y}_r \quad (4)$$

2.2.2 วิธีแฟคเตอร์

วิธีแฟคเตอร์เพื่อใช้ในการประมาณค่าสูญหายถูกเสนอโดย D. Shukla and N. Thakur [9] โดยมีการใช้ข้อมูลของตัวแปรเสริมในการประมาณค่าสูญหายต่อมา D. Shukla et al. [11] ได้ปรับปรุงวิธีแฟคเตอร์โดยใช้

แนวคิดของ S. Singh and S. Horn [8] มีรายละเอียดของวิธีการดังนี้

$$(y_{.i})_j = \begin{cases} \frac{kn}{r} y_i + (1-k)\phi_j ; i \in R \\ \frac{1}{(n-r)} \bar{y}_r [\phi_j - r] ; i \in R' \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ $\phi_j ; j = 1, 2, 3$

โดยที่

$$\phi_1 = \frac{n \{ (A+C) \bar{X} + (n/N) B \bar{X}_n \}}{\{ (A + (n/N) B) \bar{X} + C \bar{X}_n \}}$$

$$\phi_2 = \frac{n \{ (A+C) \bar{x}_n + (n/N) B \bar{x}_r \}}{\{ (A + (n/N) B) \bar{x}_n + C \bar{x}_r \}}$$

$$\phi_3 = \frac{n \{ (A+C) \bar{X} + (n/N) B \bar{x}_r \}}{\{ (A + (n/N) B) \bar{X} + C \bar{x}_r \}}$$

$$A = (k-1)(k-2); 0 < k < \infty$$

$$B = (k-1)(k-4)$$

$$C = (k-2)(k-3)(k-4)$$

จากสมการที่ 5 ตัวประมาณค่าแบบจุดคือ

$$(\bar{y}_{Fj})_k = k\bar{y}_r + (1-k)\phi_j \quad (6)$$

นอกจากนี้ D. Shukla et al. [11] ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถแทนค่า $k = 1, 2, 3, 4$ ได้ และหากแทนค่า k ด้วย 1 และ 4 ตัวประมาณค่า $\bar{y}_{Fj}$ เท่ากับ $\bar{y}_r$ หรือ $\bar{y}_{Fj} = \bar{y}_M = \bar{y}_r$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะแทนค่า k ด้วย 2 และ 3 เนื่องจากต้องการให้ตัวประมาณค่าที่ได้แตกต่างจาก $\bar{y}_M = \bar{y}_r$

2.2.3 วิธีเลขชี้กำลัง

A. K. Singh et al. [12] ได้เสนอวิธีเลขชี้กำลังซึ่งได้แนวคิดจาก S. Bahl and R. K. Tuteja [17] และ

A. K. Singh et al. [18] ในการปรับปรุงวิธีการประมาณค่าสูญหาย มีรายละเอียดของวิธีการดังนี้

$$(y_i)_j = \begin{cases} y_i & ; i \in R \\ \frac{1}{(n-r)} \bar{y}_r [nT_j - r] ; i \in R' \end{cases} \quad (7)$$

เมื่อ T_j ; $j = 1, 2, 3$

โดยที่

$$T_1 = \exp \left[\alpha \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}_n}{\bar{X} + \bar{x}_n} \right) \right]$$

$$T_2 = \exp \left[\alpha \left(\frac{\bar{x}_n - \bar{x}_r}{\bar{x}_n + \bar{x}_r} \right) \right]$$

$$T_3 = \exp \left[\alpha \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}_r}{\bar{X} + \bar{x}_r} \right) \right]$$

จากสมการที่ 7 ตัวประมาณค่าแบบจุดคือ

$$\bar{y}_{Ej} = \bar{y}_r T_j \quad (8)$$

โดยเสนอให้ $\alpha = 2\rho \frac{C_Y}{C_X}$

เมื่อ

ρ คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

(X, Y) C_X คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของ X

C_Y คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของ Y

2.3 วิธีการศึกษา

2.3.1 ข้อมูล

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลของฝุ่นละอองขนาดเล็กจังหวัดอุบลราชธานี จากแหล่งข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ โดยกำหนดตัวแปรที่สนใจศึกษาและตัวแปรเสริม (Y, X) คือ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ตามลำดับ มีขนาดประชากร (N) เท่ากับ 1,126 จำนวน โดยข้อมูลมีค่า $\bar{X}$ เท่ากับ 52.83 $\bar{Y}$ เท่ากับ 76.35 ρ เท่ากับ 0.97

C_X เท่ากับ 0.53 และ C_Y เท่ากับ 0.45 ทำการสุ่มตัวอย่างแบบง่ายโดยไม่ใส่คืน กำหนดขนาดตัวอย่าง 30 100 และ 500 ในแต่ละขนาดตัวอย่างกำหนดให้มีร้อยละข้อมูลสูญหาย คือ 10 20 และ 30 ซึ่งลักษณะการสูญหายเป็นแบบ MCAR MAR และ MNAR สำหรับการสูญหายแบบ MCAR คือ การสูญหายของค่าสังเกตในตัวแปร Y จะไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรใดเลยหรือข้อมูลอื่น ๆ ส่วนการสูญหายแบบ MAR คือ การสูญหายของค่าสังเกตในตัวแปร Y จะมีความสัมพันธ์กับข้อมูลในตัวแปรเกี่ยวข้องที่ทราบค่า และการสูญหายแบบ MNAR คือ การสูญหายของค่าสังเกตในตัวแปร Y จะไม่เหมือนรูปแบบที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งการสูญหายจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใด ๆ โดยไม่เป็นไปอย่างสุ่ม ในแต่ละเหตุการณ์จะมีการทำซ้ำทั้งหมด 20,000 รอบ และในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม R ในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

ในแต่ละสถานการณ์ ใช้ MSE เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธีต่าง ๆ มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$MSE(\bar{y}) = \sum_{l=1}^{20,000} \frac{(\bar{y}_l - \bar{Y})^2}{20,000} \quad (9)$$

โดยที่

$\bar{y}$ คือ ตัวประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีการต่าง ๆ

$\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร

$MSE(\bar{y})$ คือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน

กำลังสองของ $\bar{y}$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการประมาณค่าสูญหายจะพิจารณาจากค่า MSE โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีเบื้องต้นที่ใช้เฉพาะตัวแปรที่สนใจศึกษาคือ $\bar{y}_M$ กับวิธีที่ใช้ตัวแปรเสริมร่วมด้วย ได้แก่ $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $(\bar{y}_{F3})_2$

$(\bar{y}_{F1})_3$ $(\bar{y}_{F2})_3$ $(\bar{y}_{F3})_3$ $\bar{y}_{E1}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $\bar{y}_{E3}$ สำหรับผลการศึกษาได้จำแนกตามลักษณะรูปแบบการสูญเสียของข้อมูลได้แก่ MCAR MAR และ MNAR ดังตารางที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ ต่อมาจะพิจารณาเฉพาะ $\bar{y}_M$ ซึ่งเป็นวิธีเบื้องต้น และวิธีที่มีค่า MSE ต่ำกว่า $\bar{y}_M$ โดยแสดงผลดังรูปที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ จำแนกตามลักษณะรูปแบบการสูญเสีย เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับการสูญเสียที่มีต่อวิธีการดังกล่าว

3.1 ผลการศึกษา

3.1.1 MCAR

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 1 พบว่า $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E1}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $\bar{y}_{E3}$ มีค่า MSE ต่ำกว่า $\bar{y}_M$ เมื่อพิจารณาค่า MSE โดยจำแนกตามขนาดตัวอย่างและร้อยละการสูญเสีย พบว่า

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ และ $(\bar{y}_{F1})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ โดย MSE ของ $(\bar{y}_{F3})_2$ เท่ากับ $\bar{y}_{E3}$ ถัดมา คือ $(\bar{y}_{F1})_2$ และ $\bar{y}_{E1}$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F3})_2$ ตามลำดับ สุดท้าย คือ $(\bar{y}_{F1})_2$ กับ $\bar{y}_{E1}$ โดย MSE ของ $(\bar{y}_{F1})_2$ เท่ากับ $\bar{y}_{E1}$

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ และ $(\bar{y}_{F1})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ และ $(\bar{y}_{F1})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ และ $(\bar{y}_{F1})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ กับ $\bar{y}_{E3}$ ถัดมา $(\bar{y}_{F1})_2$ กับ $\bar{y}_{E1}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ กับ $\bar{y}_{E2}$ ตามลำดับ โดยลำดับเดียวกันนี้ ค่า MSE เท่ากัน

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ ตามลำดับ สุดท้ายคือ $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $\bar{y}_{E1}$ และ $\bar{y}_{E2}$ โดยลำดับสุดท้ายทุกตัวมีค่า MSE เท่ากัน

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญเสีย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุดได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ กับ $\bar{y}_{E3}$ โดย MSE ของ $(\bar{y}_{F3})_2$ เท่ากับ $\bar{y}_{E3}$ ถัดมา คือ $(\bar{y}_{F2})_2$ และ $\bar{y}_{E2}$ ตามลำดับ

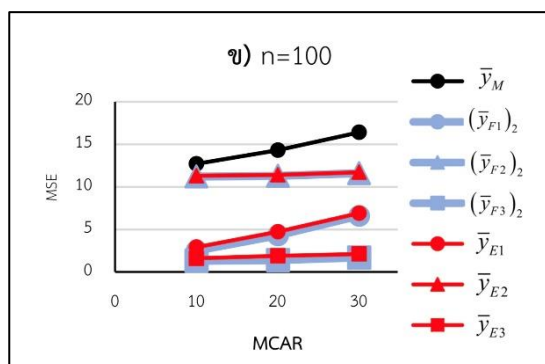
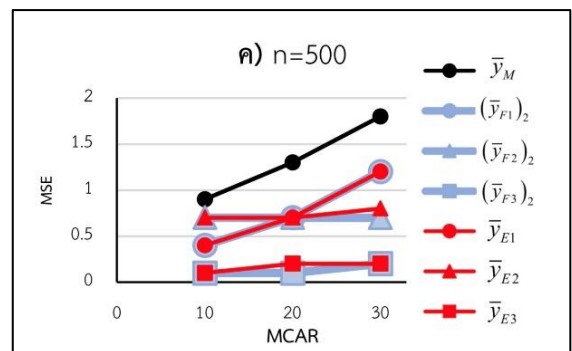
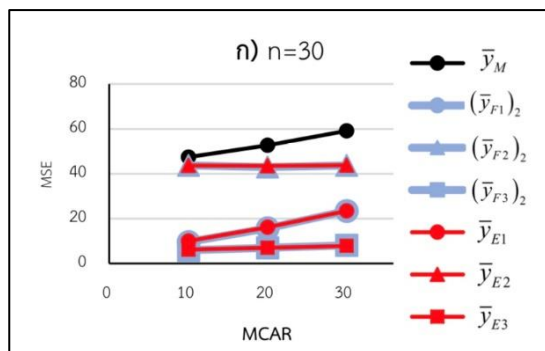
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของร้อยละการสูญเสียที่มีต่อค่า MSE ของวิธีต่าง ๆ จากรูปที่ 1 พบว่าขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 ร้อยละการสูญเสียที่แตกต่างกันมีผลต่อวิธี $\bar{y}_M$ กับวิธีที่ใช้ตัวแปรเสริม ได้แก่ $(\bar{y}_{F1})_2$ และ $\bar{y}_{E1}$ โดยร้อยละข้อมูลสูญเสียเพิ่มขึ้น ค่า MSE ของวิธีดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 ร้อยละการสูญเสียที่แตกต่างกันมีผลต่อวิธี $\bar{y}_M$ กับวิธีที่ใช้ตัวแปรเสริม ได้แก่ $(\bar{y}_{F1})_2$ และ $\bar{y}_{E1}$ โดยร้อยละข้อมูลสูญเสียเพิ่มขึ้น ค่า MSE ของวิธีดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 ร้อยละการสูญเสียที่แตกต่างกันมีผลต่อวิธี $\bar{y}_M$ กับวิธีที่ใช้ตัวแปรเสริม ได้แก่ $(\bar{y}_{F1})_2$ และ $\bar{y}_{E1}$ โดยร้อยละข้อมูลสูญเสียเพิ่มขึ้น ค่า MSE ของวิธีดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 1 แสดงค่า MSE ของตัวประมาณค่าใด ภายใต้ข้อมูลสูญหายแบบ MCAR สำหรับขนาดตัวอย่างเท่ากับ 30 100 และ 500

n	M	$\bar{y}_M$	$(\bar{y}_{F1})_2$	$(\bar{y}_{F2})_2$	$(\bar{y}_{F3})_2$	$(\bar{y}_{F1})_3$	$(\bar{y}_{F2})_3$	$(\bar{y}_{F3})_3$	$\bar{y}_{E1}$	$\bar{y}_{E2}$	$\bar{y}_{E3}$
30	10	47.4	9.6	43.7	5.9	57.6	48.4	58.7	10.0	43.7	6.2
	20	52.7	15.7	43.0	7.0	62.7	55.2	65.2	16.2	43.5	7.0
	30	59.1	23.4	43.6	8.1	68.9	63.2	73.1	23.4	43.8	7.8
100	10	12.7	2.5	11.2	1.3	24.0	14.2	25.6	2.9	11.3	1.6
	20	14.3	4.3	11.3	1.4	25.5	17.6	28.8	4.7	11.4	1.9
	30	16.4	6.6	11.6	1.7	27.5	21.9	33.0	6.9	11.7	2.1
500	10	0.9	0.4	0.7	0.1	43.8	20.4	63.3	0.4	0.7	0.1
	20	1.3	0.7	0.7	0.1	45.0	44.8	89.7	0.7	0.7	0.2
	30	1.8	1.2	0.7	0.2	45.4	75.0	119.4	1.2	0.8	0.2



รูปที่ 1 เปรียบเทียบ MSE ของข้อมูลสูญหายแบบ MCAR กำหนดร้อยละข้อมูลสูญหายได้แก่ 10 20 30

3.1.2 MAR

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 2 พบว่า $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E1}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $\bar{y}_{E3}$ มีค่า MSE ต่ำกว่า $\bar{y}_M$ เมื่อพิจารณาค่า MSE โดยจำแนกตามขนาดตัวอย่างและร้อยละการสูญหาย พบว่า

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F3})_2$ และ $(\bar{y}_{F1})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F3})_2$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $\bar{y}_{E3}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F3})_2$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $\bar{y}_{E3}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูล

สูญหาย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ และ $\bar{y}_{E3}$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ และ $\bar{y}_{E3}$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูล
สูญหาย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด
ได้ดังนี้ $\bar{y}_{E3}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของร้อยละการสูญหายที่มี
ต่อค่า MSE ของวิธีต่าง ๆ จากรูปที่ 2 พบว่า

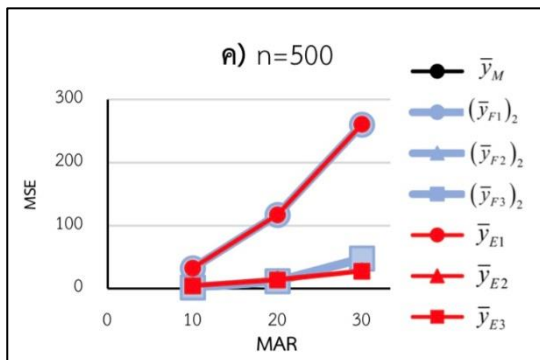
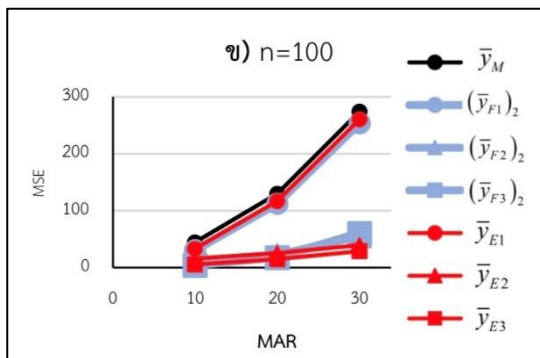
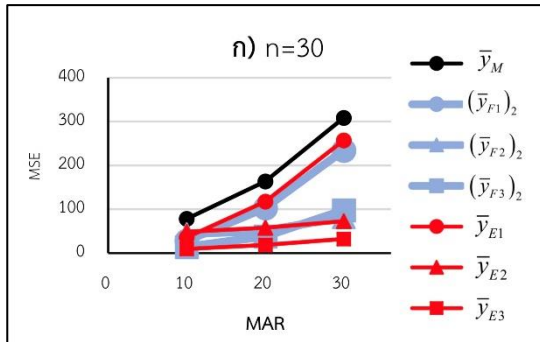
ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 ร้อยละการสูญหายที่
แตกต่างกันมีผลต่อค่า MSE ของทุกวิธี โดยร้อยละข้อมูล
สูญหายเพิ่มขึ้น ค่า MSE เพิ่มขึ้น

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 ร้อยละการสูญหาย
ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า MSE ของทุกวิธี โดยร้อยละ
ข้อมูลสูญหายเพิ่มขึ้น ค่า MSE เพิ่มขึ้น

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 ร้อยละการสูญหาย
ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า MSE ของทุกวิธี โดยร้อยละ
ข้อมูลสูญหายเพิ่มขึ้น ค่า MSE เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 แสดงค่า MSE ของตัวประมาณค่าใด ภายใต้ข้อมูลสูญหายแบบ MAR สำหรับขนาดตัวอย่างเท่ากับ 30 100 และ 500

<i>n</i>	<i>M</i>	$\bar{y}_M$	$(\bar{y}_{F1})_2$	$(\bar{y}_{F2})_2$	$(\bar{y}_{F3})_2$	$(\bar{y}_{F1})_3$	$(\bar{y}_{F2})_3$	$(\bar{y}_{F3})_3$	$\bar{y}_{E1}$	$\bar{y}_{E2}$	$\bar{y}_{E3}$
30	10	78.2	28.3	43.6	14.3	90.5	86.0	99.6	35.8	48.7	9.5
	20	163.6	103.6	51.0	38.3	177.6	194.4	211.2	117.8	58.0	18.6
	30	308.7	234.8	81.8	98.0	325.1	383.3	404.7	257.5	72.9	32.5
100	10	44.6	30.6	12.2	4.6	58.6	78.3	94.3	33.2	15.8	5.5
	20	129.6	112.7	21.7	18.2	145.5	263.5	284.0	117.1	25.3	14.9
	30	274.1	253.9	55.9	60.5	292.6	603.5	630.4	260.4	39.5	28.9
500	10	33.1	32.0	2.0	1.6	85.7	2238.9	2328.9	32.3	4.8	4.2
	20	117.8	116.8	12.0	11.7	176.2	9366.5	9469.3	117.0	14.3	13.7
	30	261.0	260.2	47.5	47.6	324.8	24159.9	24281.6	260.4	28.1	27.5



รูปที่ 2 เปรียบเทียบ MSE ของข้อมูลสูญหายแบบ MAR กำหนดร้อยละข้อมูลสูญหาย ได้แก่ 10 20 30

3.1.3 MNAR

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 3 พบว่า $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E1}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $\bar{y}_{E3}$ มีค่า MSE ต่ำกว่า $\bar{y}_M$ เมื่อพิจารณาค่า MSE โดยจำแนกตามขนาดตัวอย่างและร้อยละการสูญหาย พบว่า

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F3})_2$ และ $(\bar{y}_{F1})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F3})_2$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F2})_2$ และ $\bar{y}_{E2}$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E3}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $\bar{y}_{E3}$ $(\bar{y}_{F2})_2$ และ $\bar{y}_{E2}$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 10 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ และ $\bar{y}_{E3}$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 20 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $(\bar{y}_{F3})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ และ $\bar{y}_{E3}$ ตามลำดับ

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 เมื่อร้อยละข้อมูลสูญหาย เท่ากับ 30 สามารถเรียงลำดับ ค่า MSE ต่ำสุด ได้นี้ $\bar{y}_{E3}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $(\bar{y}_{F2})_2$ กับ $(\bar{y}_{F3})_2$ โดย

MSE ของ $(\bar{y}_{F2})_2$ เท่ากับ $(\bar{y}_{F3})_2$ ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของร้อยละการสูญหายที่มีต่อค่า MSE ของวิธีต่าง ๆ จากรูปที่ 3 พบว่า

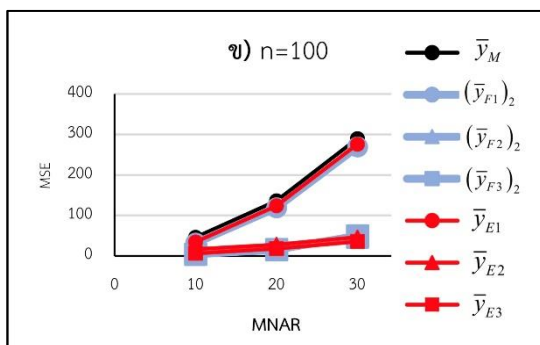
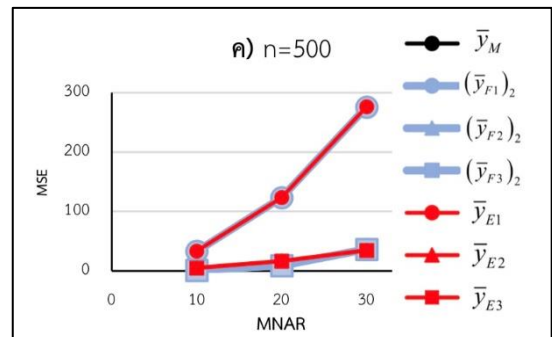
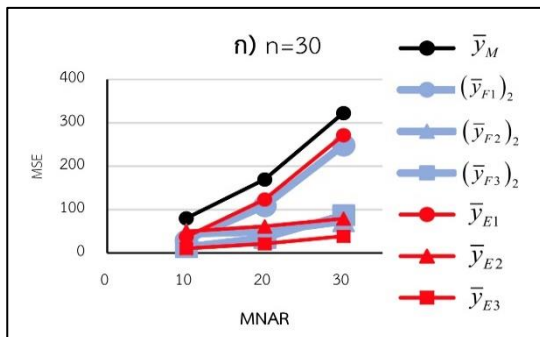
ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 30 ร้อยละการสูญหายที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า MSE ของทุกวิธี โดยร้อยละข้อมูลสูญหายเพิ่มขึ้น ค่า MSE เพิ่มขึ้น

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 ร้อยละการสูญหายที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า MSE ของทุกวิธี โดยร้อยละข้อมูลสูญหายเพิ่มขึ้น ค่า MSE เพิ่มขึ้น

ขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 ร้อยละการสูญหายที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า MSE ของทุกวิธี โดยร้อยละข้อมูลสูญหายเพิ่มขึ้น ค่า MSE เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 แสดงค่า MSE ของตัวประมาณค่าใด ภายใต้ข้อมูลสูญหายแบบ MNAR สำหรับขนาดตัวอย่างเท่ากับ 30 100 และ 500

n	M	$\bar{y}_M$	$(\bar{y}_{F1})_2$	$(\bar{y}_{F2})_2$	$(\bar{y}_{F3})_2$	$(\bar{y}_{F1})_3$	$(\bar{y}_{F2})_3$	$(\bar{y}_{F3})_3$	$\bar{y}_{E1}$	$\bar{y}_{E2}$	$\bar{y}_{E3}$
30	10	79.5	29.1	43.6	13.6	91.8	87.3	100.9	36.8	49.5	10.1
	20	169.5	108.9	48.8	35.0	183.6	200.6	217.4	123.5	60.9	21.2
	30	322.8	248.7	72.6	87.1	339.2	398.1	419.4	271.7	79.1	38.7
100	10	45.7	31.5	12.0	4.1	59.7	79.3	95.3	34.2	16.5	6.1
	20	135.7	118.7	18.9	15.2	151.7	270.5	291.1	123.3	28.1	17.6
	30	289.5	268.9	45.9	49.6	308.2	620.3	647.3	275.7	46.3	35.5
500	10	34.1	33.0	1.6	1.2	86.8	2197.8	2287.7	33.3	5.4	4.7
	20	124.2	123.2	9.1	8.9	182.8	9244.1	9346.6	123.5	17.1	16.4
	30	276.8	275.9	36.6	36.6	341.5	23605.5	23728.3	276.1	35.0	34.4



รูปที่ 3 เปรียบเทียบ MSE ของข้อมูลสูญหายแบบ MNAR กำหนดร้อยละข้อมูลสูญหาย ได้แก่ 10 20 30

3.2 อภิปรายผล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดให้ตัวแปรที่สนใจศึกษาและตัวแปรเสริม (Y, X) คือ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ตามลำดับ จากข้อมูลพบว่า ρ เท่ากับ 0.97 แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันระดับสูง

ในทิศทางเดียวกัน [13] เมื่อพิจารณาภาพรวมจากผลการศึกษาทั้งหมดที่ได้ตั้งตารางที่ 1-3 และรูปที่ 1-3 ด้วยค่า MSE แสดงให้เห็นว่า $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $(\bar{y}_{F3})_2$ $\bar{y}_{E1}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $\bar{y}_{E3}$ เป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลของตัวแปรเสริมในการคำนวณโดยมีค่า MSE ต่ำว่า $\bar{y}_M$ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เฉพาะข้อมูลที่สนใจศึกษา ดังนั้นวิธีที่ใช้ตัวแปรเสริมหรือข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่สนใจศึกษาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยได้ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Dubey and H. K. Sharma [19] และ A. Audu et al. [20]

อีกทั้งเมื่อพิจารณาวิธีที่มีการใช้ข้อมูลจากตัวแปรเสริมในการคำนวณ ได้แก่ วิธีแฟคเตอร์ พบว่า $(\bar{y}_{F3})_2$ และ $(\bar{y}_{F1})_2$ มีประสิทธิภาพดีกว่า $(\bar{y}_{F2})_2$ และวิธีเลขชี้กำลัง พบว่า $\bar{y}_{E3}$ และ $\bar{y}_{E1}$ มีประสิทธิภาพดีกว่า $\bar{y}_{E2}$ จากการพิจารณาการใช้ข้อมูลจากตัวแปรเสริม พบว่า $(\bar{y}_{F3})_2$ $(\bar{y}_{F1})_2$ $\bar{y}_{E3}$ $\bar{y}_{E1}$ มีการใช้ $\bar{X}$ ในการคำนวณ แต่ $(\bar{y}_{F2})_2$ $\bar{y}_{E2}$ ไม่มีการใช้ $\bar{X}$ ในการคำนวณ จึงแสดงให้เห็นว่า ภายใต้วิธีเดียวกันนั้นการใช้ข้อมูล $\bar{X}$ มีประสิทธิภาพดีกว่าการไม่ใช้ข้อมูล $\bar{X}$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. K. Singh et al. [12]

รูปแบบการสุ่มหายที่แตกต่างกันภายใต้สถานการณ์เดียวกันมีผลต่อประสิทธิภาพของการประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการประมาณค่าสุ่มหาย ซึ่งค่า MSE ในรูปแบบการสุ่มหายแบบ MAR และ MNAR มีค่ามากกว่า MCAR ดังนั้นประสิทธิภาพของการประมาณค่าสุ่มหายภายใต้การสุ่มหายแบบ MCAR จึงดีกว่าการสุ่มหายแบบ MAR และ MNAR โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. Srihaset et al. [21]

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยเกี่ยวกับขนาดตัวอย่างและระดับการสุ่มหายของข้อมูลมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวประมาณที่ได้จากวิธีต่าง ๆ เช่นกัน เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของวิธีการเพิ่มสูงขึ้นซึ่งมีทิศทางเดียวกัน แต่ถ้าวระดับการสุ่มหายเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพ

ของวิธีการลดลงซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามโดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Rueda and S. Gonzalez [22] และ G. N. Singh and S. Suman [23]

4. สรุป

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีการประมาณค่าสุ่มหายที่อาศัยข้อมูลตัวแปรเสริม ภายใต้รูปแบบการสุ่มหายที่แตกต่างกัน ได้แก่ แบบ MCAR MAR และ MNAR สำหรับการศึกษาตัวประมาณค่าเฉลี่ยในงานวิจัย ได้แก่ $\bar{y}_M$ $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $(\bar{y}_{F3})_2$ $(\bar{y}_{F1})_3$ $(\bar{y}_{F2})_3$ $(\bar{y}_{F3})_3$ $\bar{y}_{E1}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $\bar{y}_{E3}$ โดย $\bar{y}_M$ ได้มาจากวิธีค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นวิธีเบื้องต้นที่ใช้เฉพาะตัวแปรที่สนใจศึกษา ส่วน $(\bar{y}_{F1})_2$ $(\bar{y}_{F2})_2$ $(\bar{y}_{F3})_2$ $(\bar{y}_{F1})_3$ $(\bar{y}_{F2})_3$ $(\bar{y}_{F3})_3$ ได้มาจากวิธีแฟคเตอร์ และ $\bar{y}_{E1}$ $\bar{y}_{E2}$ และ $\bar{y}_{E3}$ ได้มาจากวิธีเลขชี้กำลัง สำหรับวิธีวิธีแฟคเตอร์และวิธีเลขชี้กำลังเป็นการใช้ข้อมูลตัวแปรเสริมร่วมกับตัวแปรที่สนใจศึกษา ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจริงเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศ คือ ฝุ่นละอองขนาดเล็กเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีการประมาณค่าสุ่มหายที่ได้นำเสนอ ภายใต้ขนาดตัวอย่าง 30 100 และ 500 ในแต่ละขนาดตัวอย่างกำหนดให้มีร้อยละข้อมูลสุ่มหาย คือ 10 20 และ 30

จากการศึกษาพบว่า ภายใต้รูปแบบการสุ่มหาย ได้แก่ แบบ MCAR MAR และ MNAR การประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีแฟคเตอร์ คือ $(\bar{y}_{F3})_2$ และวิธีเลขชี้กำลัง คือ $\bar{y}_{E3}$ มีประสิทธิภาพดีที่สุด อีกทั้งระดับข้อมูลสุ่มหายและขนาดตัวอย่างมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าอีกด้วย โดยขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของวิธีการเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้าวระดับการสุ่มหายเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของวิธีการเพิ่มลดลง

ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยครั้งต่อไป โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลของฝุ่นละอองขนาดเล็ก จังหวัด

อุปสรรคเหล่านี้ในการศึกษา ซึ่งกำหนดตัวแปรที่สนใจศึกษาและตัวแปรเสริมคือ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} จากการศึกษาพบว่า ρ เท่ากับ 0.97 ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรเพียงระดับเดียว และไม่ได้ประมาณค่าเฉลี่ยภายใต้ตัวแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นใด ๆ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจศึกษาระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่สนใจศึกษากับตัวแปรเสริมให้มีความหลากหลายมากขึ้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพของการประมาณค่าเฉลี่ยจากวิธีที่ได้นำเสนอในงานวิจัย นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาเพิ่มเติมภายใต้ข้อมูลที่สนใจโดยระบุตัวแบบการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งอาจจะพิจารณาจาก Bivariate Random Variables เพื่อประโยชน์ต่องานวิจัยในอนาคต

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Little and D. Rubin, *Statistical analysis with missing data*. 3rd ed. New York: Wiley, 2019.
- [2] M. N. Norazian et al., "Estimation of missing values in air pollution data using single imputation techniques," *ScienceAsia*, vol. 34, pp. 341-345, 2008.
- [3] N. A. Zainuri, A. A. Jemain and N. Muda, "A Comparison of Various Imputation Methods for Missing Values in Air Quality Data," *Sains Malaysiana*, vol. 44, no. 3, pp. 449-456, 2015.
- [4] K. Chodjuntug and N. Lawson, "Imputation for estimating the population mean in the presence of nonresponse, with application to fine particle density in Bangkok," *Mathematical Population Studies*, vol. 29, no. 4, pp. 204-225, 2022a.
- [5] K. Chodjuntug and N. Lawson, "A chain regression exponential type imputation method for mean estimation in the presence of missing data," *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, vol. 44, no. 4, pp. 1109-1118, 2022b.
- [6] H. Lee, E. Rancourt and C. E. Sarndall, "Experiments with variance estimation from survey data with imputed values." *Journal of Official Statistics*, vol. 10, no. 3, pp. 231-243, 1994.
- [7] W. G. Cochran, "The estimation of yield of cereal experiments by sampling for the ratio of gain to total produce." *Journal of Agricultural Science*, vol. 30, pp. 262-275, 1940.
- [8] S. Singh and S. Horn, "Compromised imputation in survey sampling." *Metrika*, vol. 51, pp. 267-276, 2000.
- [9] D. Shukla and N. Thakur, "Estimation of mean with imputation of missing data using factor type estimator." *Statistics in Transition*. vol. 9, pp. 33-48, 2008.
- [10] V. K. Singh and D. Shukla, "One parameter family of factor type ratio estimator," *Metron*, vol. 45, pp. 273-283, 1987.
- [11] D. Shukla, N. Singh and T. S. Pathak, "Some new aspects on imputation in sampling," *African Journal of Mathematics and Computer Science Research*, vol. 6, no. 1, pp. 5-15, 2013.

- [12] A. K. Singh, P. Singh, and V. Singh, "Estimation of mean with imputation of missing data using exponential-type estimators," *Journal of Statistics Applications and Probability Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 71-80, 2022.
- [13] K. Chodjuntug. *Biostatistics*, 1st ed. Ubon Ratchathani: Ubon Ratchathani University Printing House, 2024.
- [14] S. Salao, N. Potatong, P. Kammoongkun and P. Choomanee, "Chemical composition analysis for source identification of PM_{2.5} in Muang District of Ubon Ratchathani Province," *Burapha science Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 438-453, 2021.
- [15] S.K. Yadav, G.K. Vishwakarma and D.K. Sharm, "A computational strategy for estimation of mean using optimal imputation in presence of missing observation." *Scientific Reports*, vol.14, no. 6433, pp1-13, 2024.
- [16] T. Dachochaiporn, and K. Chodjuntug, "Estimating the Mean of PM_{2.5} with Missing Data in the Area Around Electricity Generating Authority of Thailand Using the Improved Compromised Imputation Method." *Current Applied Science and Technology*, vol.23, no. 5, pp 1-14, 2023.
- [17] S. Bahl and R. K. Tuteja, "Ratio and product type exponential estimator," *Journal of the Statistics Applications and Probability*, vol. 12, no. 1, pp. 159-163, 1991.
- [18] A. K. Singh, P. Singh, and V. K. Singh, "Exponential-Type Compromised Imputation in Survey Sampling," *Journal of the Statistics Applications and Probability*, vol. 3, no. 2, pp. 211-217, 2014.
- [19] V. Dubey and H. K. Sharma, "On estimating population variance using auxiliary information," *Statistics in Transition*, vol. 9, no. 1, pp. 7-18, 2008.
- [20] A. Audu et al, "On the efficiency of imputation estimators using auxiliary attribute," *Continental Journal Applied Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 1-13, 2020.
- [21] K. Srihaset, S. Kanjanawasee and D. Srisukho, "A comparison of the quality of missing data treatment methods for examinees' ability parameters estimation," *Journal of Research Methodology*, vol. 26, no. 2, pp. 169-187, 2013.
- [22] M. Rueda and S. Gonzalez, "A new ratio-type imputation with random disturbance," *Applied Mathematics Letters*, vol. 21, pp. 978-982, 2008.
- [23] G. N. Singh and S. Suman, "Estimation of population mean using imputation methods for missing data under two-phase sampling design," *Journal of Statistical Theory and Practice*, vol. 13, no. 19, pp. 1-24, 2019.



RNUTP

RESEARCH JOURNAL

Sciences and Technology

