

CRMA Journal Vol.16 (2018)



วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปีที่ 16 (2561)

CRMA Journal Vol.16 (2018)

<http://kml.o.crma.ac.th/Journal>

ISSN 2350-9600

จัดทำโดย

สภาอาจารย์ ส่วนการศึกษา
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์

พลเอกหญิง ศ.ดร.สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ
สยามบรมราชกุมารี

ที่ปรึกษา

พลโท สิทธิพล ชินสำราญ
พลตรี ศุภชัย ศรีหอม
พันเอก จิระ เหล่าจิระอังกูร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณค่าของบุคลากรภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กองทัพบก กองทัพไทย และบุคคลทั่วไป
2. เพื่อสร้างความตระหนัก และตื่นตัวในด้านการวิจัยและพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการทหาร

ขอบเขต

1. การวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. การวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคง

กำหนดการออกวารสาร

ปีละ 1 ฉบับ ในเดือนธันวาคม

บรรณาธิการ

พันเอก ผศ.ภาคภูมิ รุจิเสนีย์

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
นาวาอากาศเอก ศ.ดร.นพพล หาญกล้า
ศ.ดร.อรรถกร เก่งพล
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์
ผศ.ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์
ผศ.ดร.ธีรพจน์ เวศพันธ์
ผศ.ดร.สราวุธ เวชกิจ
พันเอก ผศ.ดร.ชวน จันทวาลย์
พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนังสือ
พันเอก รศ.ดร.ปรีชา อภิวันท์ตระกูล
พันเอก ผศ.ดร.โอภาส สุขแสงพนมรุ่ง
พันเอก ผศ.ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล
พันเอก ผศ.ดร.นราเทพ พฤกษ์ศิริ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
มหาวิทยาลัยมหิดล
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ

รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์
รศ.ดร.วิสุทธิ ช่อวิเชียร
พันเอก ผศ.ดร.ชวน จันทวาลย์
พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนังสือ
พันเอก ผศ.ดร.โอภาส สุขแสงพนมรุ่ง
พันเอกหญิง ผศ.ภมร จินตามณี
พันเอก ดร.สมโภช ปันท้วงกูร
พันเอก ผศ.ดร.ปรัชญา อารีกุล
พันเอกหญิง ผศ.วาสนา รุจิเสนีย์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Dr.Aaron Christian

Dr.Jared Rice

ผศ.ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์

ผศ.ดร.ธีรพจน์ เวศพันธ์

ผศ.ดร.นิศากร สมสุข

ผศ.ดร.สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย

ผศ.ดร.วรารักษ์ กลิ่นบุญ

ผศ.ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์

ผศ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ

ผศ.ดร.กำพล วรดิษฐ์

ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด

ผศ.ดร.สุรพงษ์ พงษ์ยุพินพานิช

ผศ.ดร.นันทชัย ชูศิลป์

ผศ.วิศิษฐ์ สีสาคู

พันโทหญิง ผศ.ดร.สุวิมล เสนิงค์ ณ อยู่ธยา

พันตรีหญิง ดร.ปวีณา วัชรบัว

พันตรี ดร.ต้องการ แก้วเฉลิมทอง

ดร.โสภิตา สังข์สุนทร

ดร.สายสุนีย์ จำรัส

ดร.สุธิดา ทัพภิรักษ์พันธ์

ดร.ประมวล ชูรัตน์

ดร.เดช ธรรมศิริ

ดร.จิระพงษ์ พนาวงศ์

ดร.ปัทมากร เนตยวิจิตร

ดร.เสกสรรค์ สุทธิสงค์

ดร.วันโชค เครือหงษ์

ดร.เสกสรรค์ สุทธิสงค์

ดร.ปัทมากร เนตยวิจิตร

ดร.วันโชค เครือหงษ์

University of Montana, USA. (Volunteer)

Texas State University (Volunteer)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

คณะผู้จัดทำ

พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนังสือ

พันเอกหญิง ผศ.วาสนา รุจิเสนีย์

พันเอก ผศ.ดร.นราเทพ พฤษภักดิ์

พันโท ฐานิส มานวงศ์

ร.ต.หญิง กังสดาล อินทกุล

ดร.ปริญญา เกียรติภาชัย

พันเอกหญิง ผศ.ภรต จินตามณี

พันเอกหญิง ผศ.สาธิต แก้วสืบ

พันโทหญิง ผศ.ดร.สุวิมล เสนิงค์ ณ อยู่ธยา

พันตรีหญิง ดร.ปวีณา วัชรบัว

ร.ต.หญิง ปิยธรรมา พันธุระ

โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เลขที่ 99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

โทรศัพท์ 0-2564-3104 ถึง 6 โทรสาร 0-2564-3119 <http://www.thammasatprintinghouse.com>

บทบรรณาธิการ

ในปี พ.ศ. 2556 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า โดยสภาอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลเกล้าได้ปรับปรุง “วารสารทางวิชาการ สภาอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” ให้เป็นวารสารเฉพาะทางสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเปลี่ยนชื่อเป็น “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” ด้วยความมุ่งมั่นที่จะพัฒนาวารสารให้ได้มาตรฐานเป็นที่ยอมรับในวงวิชาการและเป็นที่อ้างอิงทางวิชาการ

ผลของการพัฒนาอย่างจริงจัง ทำให้ในปีเดียวกันนั้น “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” ได้รับการคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thailand-Journal Citation Index Centre-TCI) และเป็นที่น่ายินดีเป็นอย่างยิ่งว่า ในปี พ.ศ. 2558 จากการประเมินคุณภาพวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูล TCI รอบที่ 3 “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” จัดอยู่ในวารสารกลุ่มที่ 1 ที่มีคุณสมบัติดังนี้ คือ ผ่านการรับรองคุณภาพของ TCI จนถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2562 อยู่ในฐานข้อมูล TCI และอยู่ในเกณฑ์ที่จะได้รับการคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูลระดับสูงขึ้นไปคือ ASEAN Citation Index (ACI)

สำหรับ “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า พ.ศ. 2561” ฉบับนี้มีบทความทางวิชาการจากผลงานวิจัยจำนวน 13 บทความ จากอาจารย์และนักวิชาการภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า 2 บทความและจากภายนอก 11 บทความ ทั้งหมดผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) แล้ว

ผู้สนใจ “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” และวารสารวิชาการของโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าฉบับอื่น ทั้งเก่าและใหม่ ได้แก่ “วารสารวิชาการ สภาอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” ฉบับปีที่ 1-15 และ “วารสารวิชาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์” สามารถอ่านและดาวน์โหลดได้ทาง <http://kmlo.crma.ac.th/journal> สำหรับอาจารย์และนักวิชาการที่สนใจส่งบทความทางวิชาการสามารถติดต่อกับกองบรรณาธิการของทั้งสองฉบับได้ทาง URL นี้เช่นเดียวกัน

พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์

(ภาคภูมิ รุจิเสนีย์)

บรรณาธิการ

บทความหรือข้อคิดเห็นใดๆ ที่ปรากฏในวารสารเป็นวาระกรรมของผู้เขียน
บรรณาธิการหรือโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

The ideas and opinions expressed in the journal are those of the authors and not necessarily those of the editor or
Chulachomklao Royal Military Academy.

ติดต่อ บรรณาธิการ วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

99 ถ.สุวรรณศร ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก 26001

โทร. 037-393-010-4 ต่อ 62749 โทรสาร 037-393-024

สารบัญ

☆	The Efficiency of Ethanol Distillation Process Using Bubble Pump Technique: A Comparison of LPG and Solar Energy as Energy Source Jirapol Klinbun	1
☆	การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง อาจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม รองศาสตราจารย์ ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์	11
☆	การเพิ่มประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟด้วยไลน์แชทบอท กานดา ศรีอินทร์	25
☆	การศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลผู้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก โดยใช้เทคนิคการจัดกลุ่มและแสดงผลด้วยกราฟดาต้าวิซวลไลเซชัน พันโทหญิง รุ่งรัศมี สุวรรณวัฒนา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ มั่งสิงห์	41
☆	คอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าจากวัสดุชีวมวลบดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน รัฐศักดิ์ พรหมมาศ	53
☆	การแก้ปัญหาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีนด้วยวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง คณน สุจารี่	63
☆	ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการมีท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่รับก๊าซธรรมชาติจากพม่า บริเวณอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี ภัทรกร ชัยสินธุ์ สามัคคี บุญยะวัฒน์ สมนิมิตร พุกงาม สันติ แสงเลิศไสว	77

☆	การศึกษาคุณสมบัติของผนังเบาจากกระจกตาชปูนซีเมนต์ สุชน รุ่งเรือง ณิชาภา มินาบูลย์ รัฐศักดิ์ พรหมมาศ	95
☆	โพลีเซลล์ทนแรงดันน้ำสำหรับเครื่องทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ ชนม์พิสิทธิ์ ยาท่วม ชนกันต์ โคจรนา	107
☆	ปัจจัยสำเร็จในการบริหารโครงการก่อสร้างประเภทสัญญาราคาต่อหน่วย ดร.สุรางคณา ตรังคานนท์ ปองคุณ ตุลยกนิษฐ์ พีรพล ไชยมล	123
☆	Singly-Resonant OPO for CO ₂ /CH ₄ Dial Transmitter for Use in Atmospheric Studies Major Dr.Chat Chantjaroen	143
☆	การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานราก ก่อนและหลังปรับปรุงเสริมกำลัง ภาสกร บุญญาวิจิตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหัส พุทธิวรรณะ	155
☆	การศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการเดินระบบเมมเบรนและ โฟโตคะตะไลติกเมมเบรนเพื่อบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล วิสสา คงนคร อมรรัตน์ หวลกะสิน ปรียา หละต๋า ศศิวิมล สมณกิจ มณฑนา บริพันธ์	165

The Efficiency of Ethanol Distillation Process Using Bubble Pump Technique: A Comparison of LPG and Solar Energy as Energy Source

Jirapol Klinbun

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Corresponding Author. E-mail : Jirapol.kli@rmutr.ac.th

(Received: January 8, 2018; Revised: March 15, 2018; Accepted: March 30, 2018)

Abstract : Due to the increasing demand of ethanol production for renewable energy, the research was compared the efficiency of ethanol distillation process using bubble pump technique with two different energy sources. The two fuel sources of distillation involved liquefied petroleum gas (LPG) and solar energy. In addition, the capital cost of a distillation was also calculated. First, pineapple juice was fermented with yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) for ethanol concentration between 8-10% by volume. Then, ethanol solution was distilled using bubble pump technique. For the solar ethanol distillation with bubble pump technique, the solar collector area was 2.2 m² with inclined angle of 14 degree. The process operated during November to December 2017 under Nakhon Pathom province, Thailand climate. The average solar radiation was 6.48 kWh/m². The results of solar distillation shown that the ethanol concentration was 54.8 % v/v and efficiency was 43 %. When the LPG was used as energy source; the cold water entered the condenser tower at 27°C at a rate of 10 L/min. The efficiency of bubble pump with LPG was 53 %. The results of LPG distillation shown that the ethanol concentration was 65.7 % v/v and 39.1 % v/v in the first and second state, respectively. Finally, the unit cost for solar energy system was 128.82 THB/L ethanol which was due to 43.68 THB/L ethanol of the LPG unit (LPG cost is 20.29 THB/L).

Keywords: Bubble Pump Techniques, Capital Cost, Ethanol, Natural Gas, Solar Distillation

1. Introduction

Energy is a fundamental to the quality of our lives. Energy sources are classified into two main groups: nonrenewable and renewable energy. Nonrenewable energy sources come from fossil fuels (coal, crude oil, natural gas) and uranium while renewable energy is energy generated from natural resources such as sunlight, wind, rain, tides, geothermal heat, and various forms of biomass. Fossil fuels are high in carbon, when burned; produce major amounts of carbon dioxide. It causes more greenhouse gases to build up in the atmosphere. The ways to reduce greenhouse gas are increasing used renewable energy and improve energy efficiency. Thailand, the Ministry of Energy has been planning to develop and enhance the use of renewable energy and alternative energy to 25% over 10 year (2013-2023). One of the targeted strategies is the consumption of ethanol, which are sources of agricultural raw materials in the country. Any the improvement of ethanol production process must correspond to the Ministry of Energy's policy. Especially, the transportation industry has been encouraged to use ethanol as a form of alternative energy [1-3].

Ethanol is a grain alcohol that can be blended with gasoline and used in motor vehicles. Ethanol is produced from biomass mostly via a fermentation process using glucose derived from sugar, starch or cellulose as raw materials. However, the important process in producing fuel from ethanol is fractional distillation. To increase the concentration of

ethanol from 9-10 % v/v to 93-95 % v/v, a large amount of heat is required. The distillation process is remained interesting in process industries to separate mixtures with similar boiling points. Anyway, a variety of new technologies have been explored [4-6]. This work is investigated the ethanol distillation with bubble pump technique. This is because of the many advantages of this techniques including smooth continuous flow, simple operation, and low cost of maintenance. The bubble pump is a fluid pump that operates on thermal energy to pump the liquid from the lower level to the upper level. When heat is applied to the pump tube, the ethanol solution turns into two phases, liquid and vapour. Dynamiting the gas creates a pressure that pushes the boiling ethanol to a higher elevation. There are many parameters of the bubble pump which can be optimised its pumping action. These parameters involve: the diameter of the lift tube, the work fluid, the level of pressure, and the heat input. The source of heat energy in the production and distillation of ethanol are many such as fossil fuels and solar radiation. Propane or liquefied petroleum gas (LPG), which can be used as a source of heat, releases fewer toxic and smog-forming air pollutants, is less expensive than gasoline. Nonetheless, solar radiation can be used instead of fossil fuels in the ethanol distillation process. The advantage of using solar ethanol distillation include the production of ethanol concentration in batch operation is significantly higher than that of a normal process.

2. Objectives

This research was aimed to study (1) the efficiency of ethanol distillation with bubble pump technique and (2) to calculate the capital cost per unit distilled when solar energy was used compared with LPG consumption. The ethanol was produced from fermentation pineapple. The initial concentration of ethanol in this experiment was 10% by volume.

3. Literature reviews

There are many previous research improve the efficiency of solar ethanol distillation [7-12]. For example, Jareanjit and Naemsai [13] reported the performance of solar ethanol distillation using ultrasonic waves. They found that the amount of pure ethanol product from each distilled batch was larger than the amount of product obtained from a normal system when the initial concentration of ethanol was lower than 50 % v/v. Vorayos and Kiatsiroat [14] studied the performances and economic viability of continuous solar ethanol distillation systems having flat-plate and evacuated heat pipe solar collectors. Jareanjit et al. [15] purposed models for the management of the ethanol waste of a solar ethanol distillation system prototype. Compared to a distillation process without recycling, the amount of cassava broth fed to the system can be reduced by over 180,000 L/year by using scenario 3.

4. Materials and methods

Batavia or pineapple Sri Racha (Scientific name: *Ananas comosus*) was used as raw material. The pineapple juice was fermented using yeasts strains of *Saccharomyces cerevisiae* (NCIM No. 3319). The fermentation was to obtain 40-100 L of 8-10 % v/v (% by volume). Fig. 1 was shown the ethanol production process from pineapple juice. From Fig. 1, the process can separate in two major processes including fermentation and distillation. The detail of each process was described in the next section.



Fig. 1 Bioethanol production from pineapple juice.

This research was to study the efficiency of bubble pump distiller when solar energy was used to compare with LPG consumption. The process flow diagrams of the distillation process were shown in Fig. 2 and Fig. 3

4.1 Solar ethanol distillation

Fig. 2 was the solar energy distillation. The flat plate solar collector area was 2.2 m² with 14 degrees to horizontal angle of inclination. The flow rate through the collector was 0.0035 kg/s and was controlled by a rotameter. The condenser was 0.751 m tall and 0.025 m I.D. The tube heat exchanger with heat exchanger area was 0.059 m². The experiment was performed between 08.00 – 16.00 (8 hours per day), and the

solar radiation was measured using pyranometer (Kipp&Zonen) model CM11B with resolution of $\pm 2 \text{ W/m}^2$.

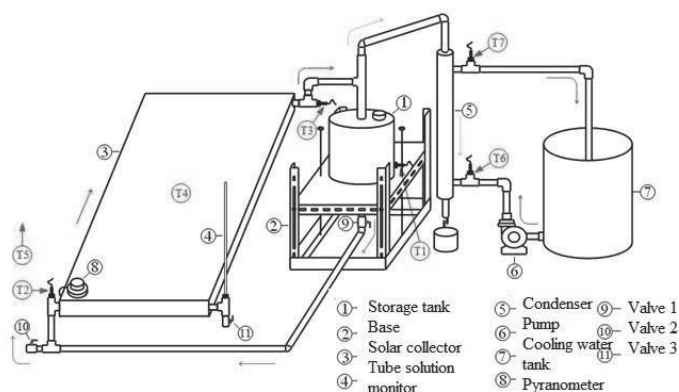


Fig. 2 Schematic diagram of solar ethanol distillation.

4.2 LPG fuel in bubble pump distillation technique

In Fig. 3, the LPG was used as fuel. The process started from the ethanol solution with an initial concentration of ethanol 10 % v/v (by volume) was kept in the storage tank. Then it was flowed into filling tank to keep the constant level of solution (19 cm). The mixture (ethanol-water) to be separated was added to a distilling tank where it was heated to the boiling point. Lower boiling components will vaporize first. The ethanol was a lower boiling point (79°C) or a higher vapor pressure substance while the water was a higher boiling point (100°C) or a lower vapor pressure substance. The resulting vapor passes into a distilling head and then into a condenser. Within the condenser the vapor was cooled and it liquefied. The resulting liquid was then collected in a receiving tank. The distillation process

was repeated until the product solution reaches 20 % v/v (%by volume) concentration. The area of heat transfer surface was 8.35 m^2 .

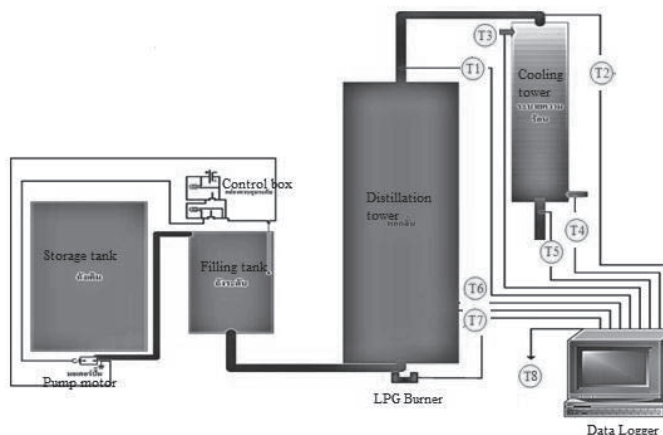


Fig. 3 Schematic diagram of LPG fuel in bubble pump ethanol distillation.

4.3 Temperature measurement and calculation of ethanol distillation efficiency

From the both ways of ethanol distillation, the temperature were measured at various locations using a thermocouple type K with a resolution of $\pm 0.1^\circ\text{C}$. The temperature were recorded every 10 min using a data logger (Yokogawa) Model Fx112.

The distillation volume and concentration were measured at every 10 min time intervals. Furthermore, the separation performance of ethanol distiller (η_{distill}) was determined based on the ethanol quantity of the distillation product (m_{product}) and initial quantity of ethanol (m_{initial}) in the solution in mm^3 , which can be calculated from the equation as follow:

$$\eta_{\text{distill}} = \frac{m_{\text{product}} \times (\% \text{ v/v})_{\text{product}}}{m_{\text{initial}} \times (\% \text{ v/v})_{\text{initial}}} \times 100\% \quad (1)$$

4.4 Appraisal of ethanol distillation cost

Economics analysis. Economic analysis was a procedure for assessing the opportunity of a project by considering the benefits compared to the costs, both elements being considered economically. The economic analysis used the same indicators as financial analysis. For this work, it has in considering such as:

1. Investment cost, C_I
2. Operating and maintenance cost, $C_{O\&M}$
3. Energy cost, C_E
4. Fermentation cost, C_F

Thus, the equation for examining the annual cost was:

$$\text{Annual cost} = C_I + C_{O\&M} + C_E \quad (2)$$

The capital cost per unit distillation was following:

$$\text{Capital cost} = \frac{\text{Annual cost (THB)} + C_F \text{ (THB)}}{\text{Production (L)}} \quad (3)$$

per unit

5. Results and discussions

5.1 Ethanol from fermentation

Ethanol fermentation or alcoholic fermentation was a biological process that converted sugars such as glucose, fructose, and sucrose into cellular energy, producing ethanol and carbon dioxide as by-products. Thus, ethanol in pineapple juice was produced by the fermentation of glucose by yeasts. In this work, the ethanol concentration rapidly increased for 2 days fermentation and it was constant at 6 days ago as

seen in Fig. 4. The ethanol solution with an initial concentration of ethanol 10 % v/v was distilled with bubble pump technique. The next topics were shown the performance of bubble pump technique for ethanol distillation when solar energy is used compared with LPG consumption.

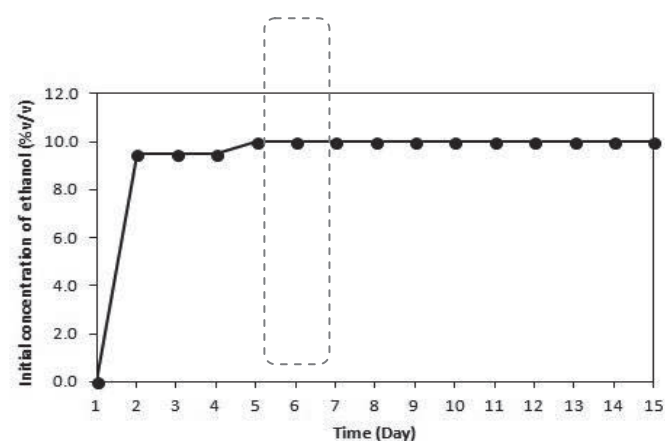


Fig. 4 The increasing of ethanol concentration per day in the fermentation process.

5.2 Efficiency of solar energy distillation

This process was operated during November to December 2017 under Thailand climate at Nakorn Prathom Province. The average solar radiation from 09.00 a.m. to 03.00 p.m. and average temperature at all point of system was show in Fig. 5. From Fig. 5, It can be seen that the temperature at each point slowly varies with the solar radiation value from the accumulated heat of the ethanol-water solution, in which the outlet temperature of solar collector (T3), inlet temperature of the solar collector (T2), and solution temperature (T1) were similar at approximately 70-80°C between 12:00-15:00. The temperature of ambient (T5), water inlet (T6),

and outlet (T7) were lower, approximately 30-40°C. The temperature of solar collector (T4) was significantly changed according to solar radiation.

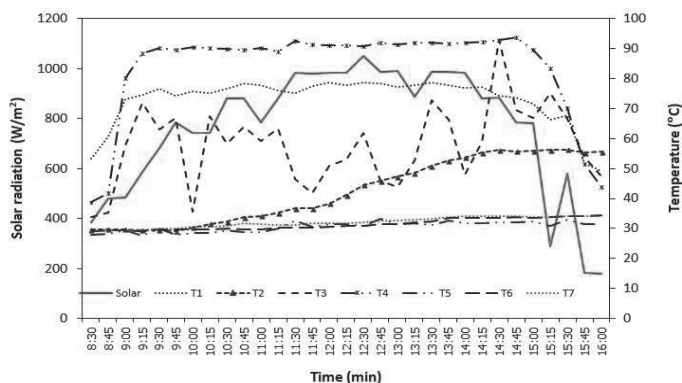


Fig. 5 Average solar radiation changing time in 15 minutes and average temperature at each points of solar ethanol distillation system.

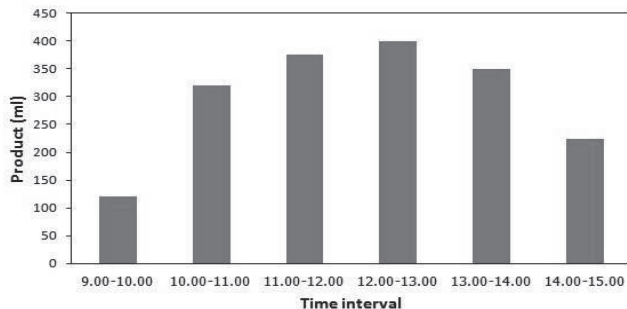


Fig. 6 The average distilled ethanol volume per hours.

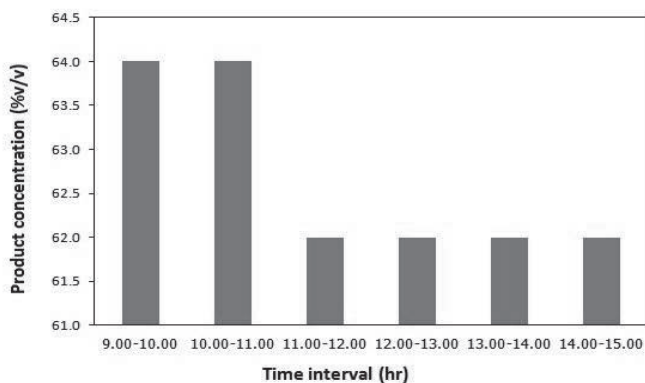


Fig. 7 The average distilled ethanol concentration per hours.

The experiments were repeated three times. The average ethanol volume and average ethanol concentration from distillation process changing time in hours were shown in Fig. 6 and Fig. 7, respectively. Using Fig. 6 and 7, it can be clearly observed that the volume of distillation varied based on the solution temperature in the solar collector (T4). In addition, the product concentration clearly had an inverse relationship with the amount of distillation increased based on the batch system, and the product concentration was proportional to the remaining ethanol volume of the ethanol-water solution in the distillation tank. Finally, it can be concluded that the average solar collection was 6.48 kWh/m², the collection efficiency was 43% (calculated by Eq. (1)), and the average ethanol concentration was 54.8 % v/v.

5.3 Efficiency of bubble pump technique with LPG fuel

The experiments on LPG fuel in ethanol distillation were conducted in three times and to compare in the distillation efficiency; the details of the study were following.

Fig. 8 shown that the temperature at each point slowly varies with time distillation, in which the outlet temperatures of solution of distillation tank (T1), the inlet temperature of solution of condenser (T2) were similar at approximately 70-80°C. The outlet temperature of water of condenser (T3), the inlet temperature of water of condenser (T4), the outlet temperatures of solution of condenser, and the ambient temperature were approximately 25-30°C. Finally,

the inlet temperature of water of distillation tank (T6) and the outlet temperature of water of distillation tank (T7) were approximately 90-100°C. Similar changing features are exhibited by the solar distillation system as well.

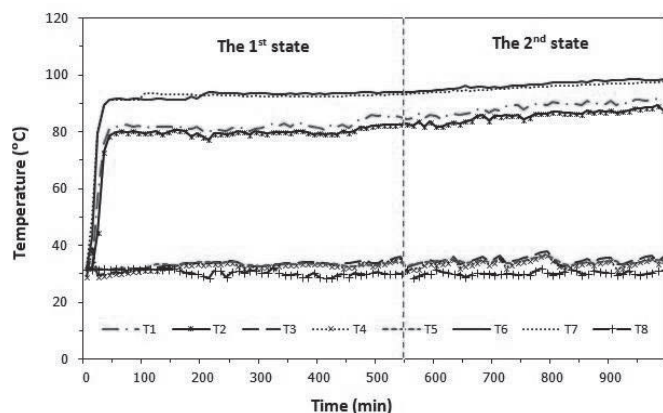


Fig. 8 The average temperature at various location changing in time.

Fig. 9 was shown the volume of distilled ethanol and its concentration at various times, and it can be observed that the distilled volume varies with the temperature of the solution. The concentration of the distilled solution inversely varied with the amount of distillation rate, which appears to be same, that of the solar distillation system. The distilled ethanol in first started at 20 minutes and 12 mL. Then, the distilled volume rapidly increased and kept constant at the second state (from 550 to 990 minutes). The total distilled ethanol volume was 13,890 mL. The heat and mass transport occurred that the ethanol vapor floated in distillation tower has not enough pressure at the first state. After that in second state, the pressure was enough so the process can flow.

Considering distilled ethanol concentration from Fig. 9, distilled ethanol from the process started in 20 minutes, was 59 % v/v. Then, distilled ethanol concentration became to 64 % v/v during 30 to 440 minutes. Last, distilled ethanol concentration rapidly decrease to 59.2 % v/v during 550 to 990 minutes. Furthermore, the use of LPG as fuel in the ethanol distillation caused the average concentration of hourly distilled product to become higher than that of a solar distillation system. However, solar distillation was influencing to hourly concentration, pure ethanol volume and separation performance of ethanol decreased slightly compared to the system that used LPG energy varying with the initial concentration value. The overall efficiency of bubble pump with LPG was 53 %.

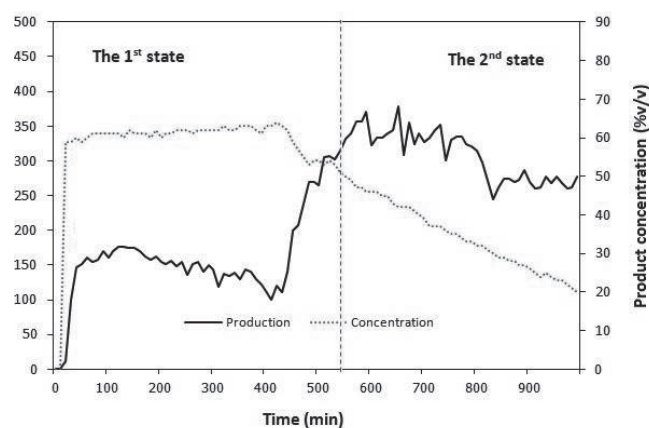


Fig. 9 The average production and concentration of ethanol from the ethanol-water solution.

5.4 Capital cost comparison of ethanol distillation using bubble pump technique

This topic was to compare capital costs associated with the two distillations energy

system. According to Eq. (3), The each parameters were: capital cost was cost of ethanol distillation system; annual cost was sum of investment cost, energy cost, and operating and maintenance cost. By the way, operating and maintenance cost was 10 % of investment cost. The results was presented in Fig. 10. The solar ethanol distillation system cost was approximately 128.82 THB/L while the LPG consumption system was based on 43.68 THB/L, in which LPG cost was 20.29 THB/kg. The investment cost was an important and significant cost for calculating capital cost of two systems.

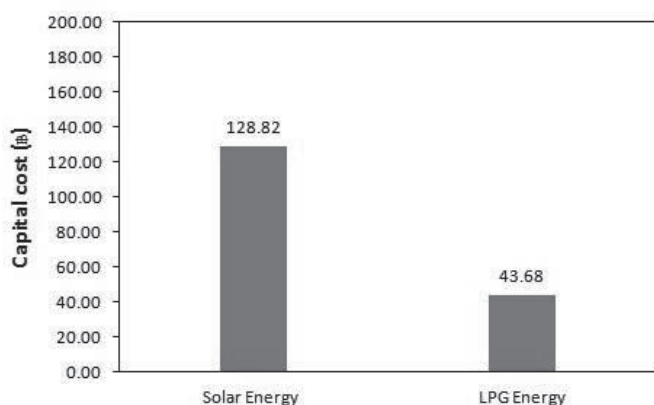


Fig. 10 Comparison of capital cost as a method of ethanol distillation.

6. Conclusion

In this paper, it was shown that the efficiency and capital costs per unit distilled in ethanol distillation production both using solar energy and LPG. The cost solar ethanol distillation was higher than using LPG. However, the average concentration of the hourly distilled ethanol product was higher than that of a LPG system at the same or higher distillation rate. The concentration of pure

ethanol product from each distillation system was > 60% v/v when the initial concentration of ethanol of 10 % v/v. Among two technologies, this work provided a data on ethanol distillation process in terms of their economic and energy viability. These technology made the bioethanol process successful at the commercial scale. The data was background information for advantage technology for ethanol distillation in the future.

7. Acknowledgement

The authors thank Rajamangala University of Technology Rattanakosin for providing the necessary facilities in order to accomplish this work.

8. References

- (1) Surawski NC, Ristovski ZD, Brown RJ, Situ R. Gaseous and particle emissions from an ethanol fumigated compression ignition engine. *Energy Conversion and Management* 2012; 54: 145-151.
- (2) Rendon-Sagardi M.A., Sanchez-Ramirez C, Cortes-Robles G, Alor-Hernandez G, Cedillo-Campos MG. Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico. *Applied Energy* 2014; 123: 358-367.
- (3) Uusitalo V., Leino M., Kasurinen H., Linnanen L., Transportation biofuel efficiencies from cultivated feedstock in the boreal climate zone: Case Finland. *Biomass and Bioenergy* 2017; 99: 79-89.
- (4) Kiss A.A., Suszwalak D.J. Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation in dividing-wall columns. *Separation and Purification Technology* 2012; 86: 70-78.
- (5) Gomis V., Pedraza R., Saquete M.D., Font A., Cano J.G. Ethanol dehydration via azeotropic distillation with gasoline fractions as entrainers: A pilot-scale study of the manufacture of an ethanol-hydrocarbon fuel blend. *Fuel* 2015; 139: 568-574.

- (6) Patraşcu I., Bildea C.S., Kiss A.A., Dynamics and control of a heat pump assisted extractive dividing-wall column for bioethanol dehydration. *Chemical Engineering Research and Design* 2017; 119: 66-74.
- (7) Kalogirou S. The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy* 2003; 76: 337-361.
- (8) Angrisani G, Bizon K, Chirone R, Continillo G, Fusco G, Lombardi S, Marra FS, Miccio F, Roselli C, Sasso M, Solimene R, Tariello F, Urciuolo M. Development of a new concept solar-biomass cogeneration system. *Energy Conversion and Management* 2013; 75: 552-560.
- (9) Al-Sulaiman FA. Energy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic Rankine cycles. *Energy Conversion and Management* 2014; 77: 441-449.
- (10) Abad M.T.J., Saedodin S., Aminy M., Experimental investigation on a solar parabolic trough collector for absorber tube filled with porous media. *Renewable Energy* 2017; 107: 156-163.
- (11) Chen W., Zou C., Li X., Li L., Experimental investigation of SiC nanofluids for solar distillation system: Stability, optical properties and thermal conductivity with saline water-based fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2017; 107: 264-270.
- (12) Deshmukh H.S., Thombre S.B., Solar distillation with single basin solar still using sensible heat storage materials. *Desalination* 2017; 410: 91-98.
- (13) Jareanjit J., Naemsai T., Improvement of solar ethanol distillation using ultrasonic waves. *KKU Engineering Journal* 2016; 43(3): 120-126.
- (14) Vorayos N., Kiatsirirot T., Performance analysis of solar ethanol distillation. *Renewable Energy* 2006; 31(15): 2543-2554.
- (15) Jareanjit J., Siangsukone P., Wongwailikhit K., Tiansuwan J., Management of ethanol waste from the solar distillation process: Experimental and theoretical studies. *Energy Conversion and Management* 2015; 89: 330-338.

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง Performance Testing of Small Diesel Engine Using Coconut Oil and Soybean Oil

อาจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรีองาม*
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

*Corresponding Author. E-mail : fengpppn@ku.ac.th

(Received: February 20, 2018; Revised: March 15, 2018; Accepted: April 20, 2018)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ได้นำน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลืองที่ยังไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ มาเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล สูบเดียว ยี่ห้อ YANMAR รุ่น TA 120-XL (1) ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์กับแท่น Dynamometer พบว่า (1.1) เมื่อใช้น้ำมันดีเซล ที่ความเร็วรอบ 1,437 rpm จะได้แรงบิดสูงที่สุดเท่ากับ 40.17 Nm และที่ความเร็วรอบ 2,163 rpm จะได้กำลังสูงที่สุดเท่ากับ 8.92 kW มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุดที่ความเร็วรอบ 2,056 rpm เท่ากับ 387.28 g/kWh มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดที่ความเร็วรอบ 2,163 rpm เท่ากับ 4.13 L/h (1.2) เมื่อใช้น้ำมันมะพร้าว ที่ความเร็วรอบ 1,400 rpm จะได้แรงบิดสูงที่สุดเท่ากับ 38.65 N m และที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm จะได้กำลังสูงที่สุดเท่ากับ 8.79 kW มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,900 rpm เท่ากับ 485.73 g/kWh มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm เท่ากับ 4.54 L/h (1.3) ส่วนน้ำมันถั่วเหลือง ที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm จะได้แรงบิดสูงที่สุดเท่ากับ 39.08 Nm และที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm จะได้กำลังสูงที่สุดเท่ากับ 9.0 kW มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,800 rpm เท่ากับ 478.09 g/kWh มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm เท่ากับ 4.6 L/h (2) ทดสอบกับรถไถเดินตาม โดยติดตั้งเครื่องยนต์บนโครงสร้างของรถไถเดินตาม (2.1) ใช้ล้อยาง เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 2 km/h พบว่า น้ำมันดีเซลมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันถั่วเหลือง คือ 0.31 kg/h และน้ำมันมะพร้าวมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากที่สุด คือ 0.35 kg/h (2.2) และเมื่อเปลี่ยนเป็นล้อเหล็ก เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 2.33 km/h พบว่า เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.31, 0.32 และ 0.35 kg/h ตามลำดับ

คำสำคัญ: เครื่องยนต์ดีเซล น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเชื้อเพลิง รถไถเดินตาม

Abstract : This research present the using non refined coconut oil and soybean oil in one cylinder diesel engine YANMAR model TA 120-XL. (1) Performance testing of engine with Dynamometer, the result showed that (1.1) Diesel oil: at rotational speed 1,437 rpm found out that maximum torque was 40.17 Nm, at velocity 2,163 rpm found out that maximum power was 8.92 kW, at rotational speed 2,056 rpm found out that specific fuel consumption rate was 387.28 g/kWh and at rotational speed 2,163 rpm found out that the maximum fuel consumption rate was 4.13 l/h. (1.2) Coconut oil: at rotational speed 1,400 rpm found out that maximum torque was 38.65 Nm, at rotational speed 2,200 rpm found out that maximum power was 8.79 kW, at rotational speed 1,900 rpm found out that specific fuel consumption rate was 485.73 g/kWh, at rotational speed 2,200 rpm found out that the maximum fuel consumption rate was 4.54 l/h. (1.3) Soybean oil: at rotational speed 1,600 rpm found out that maximum torque was 39.08 Nm, at rotational speed 2,200 rpm found out that maximum power was 9.0 kW, at rotational speed 1,800 rpm found out that specific fuel consumption rate was 478.09 g/kWh and at rotational speed 2,200 rpm found out that the maximum fuel consumption rate was 4.6 l/h. (2) Testing with power tiller, the engine was installed on the structure of power tiller with (2.1) rubber tire moving at 2 km/h, the result was using diesel oil and soybean oil have the same fuel consumption 0.31 kg/h. Coconut oil was maximum fuel consumption of 0.35 kg/h. (2.2) The engine was installed on the structure of power tiller with cage wheel moving at 2.33 km/h. The result were using diesel oil, soybean oil and coconut oil had fuel consumption was 0.31 kg/h, 0.32 kg/h and 0.35 kg/h, respectively.

Keywords: Diesel Engine, Coconut Oil, Soybean Oil, Fuel Oil, Power Tiller

1. บทนำ

ปัจจุบันวิกฤตการณ์น้ำมันเชื้อเพลิงได้ส่งผลกระทบกับการดำเนินชีวิตของผู้คนและเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากราคาของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นมากและความต้องการในการใช้น้ำมันก็เพิ่มมากขึ้น รวมถึงปัญหาทางภาคการเกษตรด้านผลผลิตล้นตลาด ราคาตกต่ำ ทำให้หน่วยงานและองค์กรต่างๆ พยายามที่จะแสวงหาแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น กระทรวงการประกาศให้เรื่องพลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ จากรายงานผลการศึกษาวิจัยเพื่อค้นหาชนิดของเชื้อเพลิงมาใช้ทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลทำได้หลายวิธี เช่น การใช้น้ำมันดีเซลและแก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงร่วม [1] การผสมแอลกอฮอล์กับน้ำมันดีเซลโดยตรงในอัตราส่วนต่างๆ [2] หรือการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาทำเป็นไบโอดีเซล [3] และการนำน้ำมันพืชมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ 1) ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ โดยการนำน้ำมันพืชมาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และด่าง ได้น้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งอยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก 2) ไบโอดีเซลแบบลูกผสม คือการนำน้ำมันก๊าดมาผสมน้ำมันพืช (Veggie/Kero Mix) เป็นการลดความหนืดของน้ำมันพืชด้วยน้ำมันก๊าด เหมาะกับการใช้น้ำมันอย่างเร่งด่วน หรือใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนักและใช้งานในภูมิอากาศเขตร้อน อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าดและน้ำมันพืชขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นที่ใช้งาน แต่เนื่องจากน้ำมันก๊าดมีราคาแพงจึงผสมได้ในสัดส่วนที่น้อย ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และ 3) ไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันพืชโดยตรง (Straight Vegetable Oil) คือการนำน้ำมันพืชบริสุทธิ์เดินเครื่องยนต์ดีเซล

การใช้งาน จำเป็นต้องใช้ใช้น้ำมันดีเซลในการเริ่มต้นทำงานและใช้ก่อนหยุดเครื่องยนต์ และจำเป็นต้องมีการอุ่นน้ำมันพืช อุณหภูมิของน้ำมันที่อุ่นอย่างน้อย 60-70°C

แนวทางในการนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงเป็นวิธีการที่ได้น้ำมันในราคาที่ถูกลง ตรงกับความต้องการในยุคปัจจุบัน [4] แต่ในด้านของคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงนั้นพบว่า ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจะมีค่าความหนืดมากกว่าน้ำมันดีเซล จึงทำให้คนส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำมันไบโอดีเซลนิยมกับเครื่องยนต์ทางการเกษตรมากกว่า เนื่องจากมีความเร็วรอบต่ำ [5] ซึ่งการใช้น้ำมันพืชโดยตรงเดินเครื่องยนต์ดีเซลนี้เป็นแนวทางที่นำมาศึกษาหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยการใช้น้ำมันพืชที่ได้จากน้ำมันพืช 100% มาทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ขนาด 12 แรงม้า เพื่อเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพการทำงานที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันพืชตัวอย่างกับเครื่องยนต์ดีเซล ในการศึกษาใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลืองในการทดสอบ โดยที่น้ำมันมะพร้าวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพันธะเดี่ยว มากกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆ ส่วนประกอบเป็น C12:0 และ C14:0 มาก ในขณะที่น้ำมันอื่นๆ เป็น C16-C18 เสียมาก เช่น น้ำมันปาล์มมี C16:0 และ C18:1 มากที่สุด (ตัวเลข C:x:y นั้น ค่า x คือจำนวนคาร์บอนในห่วงโซ่โมเลกุล ส่วนค่า y คือจำนวนแขนเกาะที่เป็นพันธะคู่) ความหนืดก็ค่อนข้างต่ำกว่าน้ำมันอื่น จุดเกิดหมอกที่ 26°C [6] ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองนั้นเป็นน้ำมันที่มีจำหน่ายทั่วไป และมีกรดไขมันอิ่มตัวค่อนข้างต่ำ (น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันอิ่มตัวสูง) แต่มีค่าความหนาแน่นและความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันมะพร้าว

จากการศึกษางานวิจัยพบว่า การใช้น้ำมันพืชโดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นส่วนใหญ่มักจะเป็นการทดสอบโดยไม่ได้มีการอุ่นน้ำมันพืช [7-9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลืองเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล เมื่อใช้เดินเครื่องยนต์ทางการเกษตรขนาดเล็กสูบเดียวที่มีการติดตั้งชุดอุ่นน้ำมันเพิ่ม และเพื่อให้เกษตรกรมีทางเลือกในการใช้น้ำมันพืชเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซล โดยไม่ต้องดัดแปลงน้ำมัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวัดกำลังของเครื่องยนต์ผ่านไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) การใช้ต้องดำเนินการทดสอบปรับตั้ง ค่าความถูกต้องของอุปกรณ์ทดสอบก่อนการทดสอบจริง ผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเมื่อใช้น้ำมันมะพร้าว หรือน้ำมันถั่วเหลืองเป็นเชื้อเพลิงเทียบกับน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ ยี่ห้อ YANMAR รุ่น TA 120-XL ผ่านเครื่องไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

2.1 การคำนวณหาแรงบิด (Torque)

แรงบิด (Torque) คือ กำลังงานที่ได้จากการหมุนของเครื่องยนต์แต่ละรอบโดยไม่คำนึงถึงความเร็วรอบเครื่องยนต์และจำนวนรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงกำลังของเครื่องยนต์ จึงจำเป็นต้องทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของน้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$T = W \times R \quad (1)$$

เมื่อ

T = แรงบิดของเครื่องยนต์ (Nm)

W = แรงที่กระทำบนแขนเครื่องทดสอบ (N)

R = ความยาวของแขนเครื่องทดสอบ (m)

2.2 การคำนวณหาค่ากำลัง (Power)

กำลัง (Power) คืออัตราการทำงานเทียบกับเวลา ซึ่งคำนวณได้จาก

$$P = \frac{2 \times \pi \times T \times N}{60 \times 1000} \quad (2)$$

เมื่อ

P = กำลัง (kW)

T = แรงบิด (Nm)

N = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

2.3 การคำนวณหาอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption) คือการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงต่อหน่วยเวลา โดยวัดจากมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เข้าเครื่องยนต์ต่อเวลาที่กำหนด ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\dot{m}_f = \frac{\text{fuel}}{\text{time}} \quad (3)$$

เมื่อ

$\dot{m}_f$ = อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)

fuel = มวลของน้ำมันเชื้อเพลิง (kg)

time = เวลา (h)

หรือเมื่อ

$\dot{m}_f$ = อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (l/h)

fuel = ปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิง (l)

time = เวลา (h)

2.4 การคำนวณหาอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption)

อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) คือ การวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในการใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตงานออกมา โดยการเปรียบเทียบอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่เข้าเครื่องยนต์ต่อหน่วยกำลังที่เครื่องยนต์ให้ออกมา สามารถคำนวณได้จาก

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (4)$$

เมื่อ

SFC = อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)

$\dot{m}_f$ = อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)

P = กำลัง (kW)

2.5 อุณหภูมิของไอเสีย (Exhaust Temperature)

เป็นการบอกประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ โดยมีความสัมพันธ์กับแรงดันน้ำมันเชื้อเพลิง หรือการไหลของอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ สำหรับเครื่องยนต์ที่ผ่านการปรับแต่ง นอกจากน้ำมันเครื่องแล้ว ยังมีอีกเรื่องที่สำคัญคือ ปริมาณการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงจะมากจะน้อย สามารถวัดได้จากมาตรวัดอุณหภูมิท่อไอเสียนี้ ซึ่งหากมีการปรับน้ำมันให้น้อยลง จะทำให้อุณหภูมิของท่อไอเสียเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็นในทางตรงกันข้าม หากปรับให้ปริมาณน้ำมันมากขึ้น อุณหภูมิของท่อไอเสียก็จะต่ำลง ดังนั้นมาตรวัดอุณหภูมิไอเสีย จึงสามารถบอกข้อมูลของรถในขณะวิ่งได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป มาตรวัดอากาศไหลเข้า หรือว่ามาตรวัดแรงดันน้ำมันเชื้อเพลิง ก็ใช้บอกข้อมูลในทางเดียวกัน

3. หลักการออกแบบถังน้ำมันพืชและการอุ่นน้ำมัน

การใช้น้ำมันพืช 100% ในการเดินเครื่องยนต์นั้น ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ไม่เหมือนน้ำมันดีเซล คือ ความหนืด และจุดติดไฟ จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติเหล่านี้ของน้ำมันพืชให้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะไม่ดัดแปลงน้ำมันพืช เพื่อที่เกษตรกรสามารถนำน้ำมันพืชมาใช้ติดกับเครื่องยนต์ดีเซลได้ทันที ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการอุ่นน้ำมันพืชเพื่อให้ความหนืดของน้ำมันพืชลดลง และเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันพืชให้ใกล้จุดติดไฟ ให้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลได้ ซึ่งในการออกแบบต้องการอุณหภูมิของน้ำมันพืชก่อนเข้าปั้มน้ำมันเชื้อเพลิง

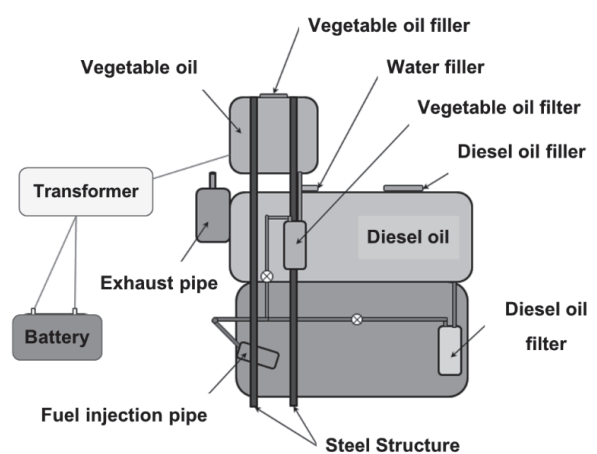
ประมาณ 60-70°C และเพื่อไม่ให้น้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลผสมกันก่อนเข้าปั้มน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะถ้าน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซลแล้วจะเป็นการดัดแปลงน้ำมันพืช ดังนั้นจึงสร้างถังน้ำมันพืชขึ้นเพื่อเป็นภาชนะแยกน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซล และเพื่ออุ่นน้ำมันพืชก่อนใช้งานได้

การไหลของน้ำมันพืช เริ่มจากน้ำมันพืชในถังน้ำมันพืชไหลเข้ากรองน้ำมันพืช แล้วเข้าสู่หม้ออุ่นน้ำมันพืช ในช่วงนี้น้ำมันพืชจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อปิดวาล์วน้ำมันดีเซล และเปิดวาล์วน้ำมันพืช น้ำมันพืชที่ร้อนจะเข้าสู่ปั้มน้ำมันเชื้อเพลิงและเข้าห้องเผาไหม้ต่อไป

3.1 แบบที่ 1

อุ่นน้ำมันพืชโดยใช้ไฟฟ้า มีอุปกรณ์ประกอบคือ 1) ถังน้ำมันพืช 2) กรองน้ำมันพืช 3) หม้ออุ่นน้ำมันพืช 4) หม้อแปลงไฟฟ้า 5) Regulator (ไดชาร์จ) และ 6) แบตเตอรี่

ลักษณะการทำงาน เริ่มต้นจากการเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลก่อน ในตอนนี้ น้ำมันพืชจะถูกให้ความร้อนโดยหม้ออุ่นน้ำมันพืช อาศัยหลักของกาต้มน้ำ ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ แบตเตอรี่เมื่อใช้ไปชักรักไฟก็จะหมด จึงใช้ Regulator ต่อพ่วงกับมัลติเพล็กซ์ของเครื่องยนต์ เพื่อปั่นไฟเก็บในแบตเตอรี่ และเมื่อน้ำมันร้อนถึง 60°C จะทำการปิดวาล์วน้ำมันจากถังน้ำมันดีเซล แล้วเปิดวาล์วน้ำมันจากถังน้ำมันพืชให้เข้าถังน้ำมันเชื้อเพลิงแทน และจะรักษาอุณหภูมิน้ำมันพืชไว้ไม่เกิน 70°C ดังแสดงในภาพที่ 1



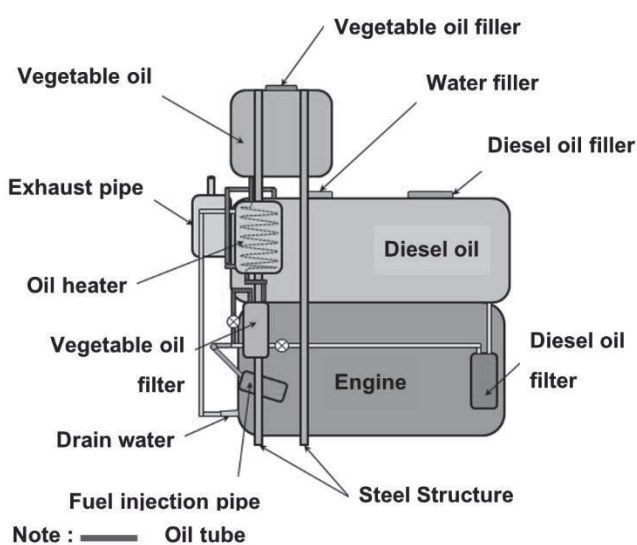
ภาพที่ 1 แผนผังส่วนประกอบของชุดอุ่นน้ำมันพืชแบบที่ 1

อุปกรณ์ที่ติดตั้งเพิ่มเหล่านี้เมื่อติดตั้งแล้วจะเป็นการเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์มาก พร้อมกับการติดตั้งทำได้ลำบาก และเมื่อเกษตรกรร่นาแนวทางนี้ไปใช้ จะเป็นการสิ้นเปลือง ไม่คุ้มกับต้นทุนในการดัดแปลงเครื่องยนต์

3.2 แบบที่ 2

อุ่นน้ำมันพืชโดยใช้ความร้อนจากหม้อน้ำของตัวเครื่องยนต์แบบน้ำไหลวน มีอุปกรณ์ประกอบคือ 1) ถังน้ำมันพืช 2) กรองน้ำมันพืช 3) หม้ออุ่นน้ำมันพืช แบบที่ 2 นี้ มีการออกแบบให้น้ำจากหม้อน้ำของเครื่องยนต์เข้ามาในหม้ออุ่นน้ำมันพืช โดยให้น้ำในหม้อน้ำเครื่องยนต์มีการไหลวน ภายในหม้ออุ่นน้ำมันพืชจะมีชุดท่อทองแดงที่มีน้ำมันพืชไหลในท่อ ซึ่งน้ำร้อนและน้ำมันพืชจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกัน ซึ่งเป็นการนำความร้อนที่จะสูญเสียกลับมาใช้

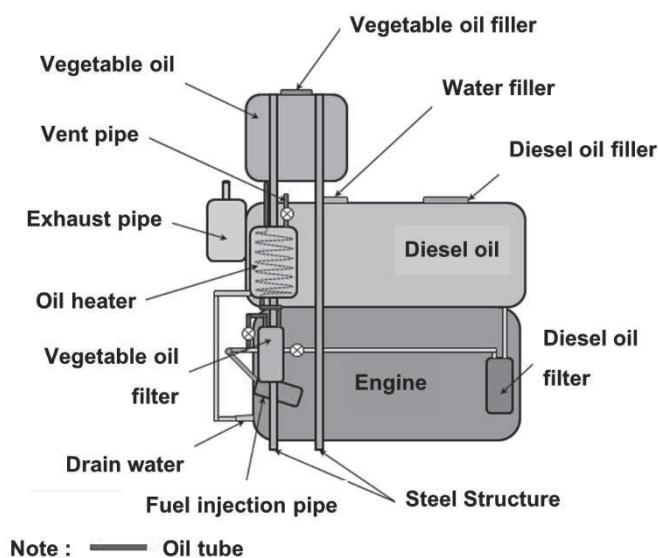
ลักษณะการทำงาน เริ่มต้นเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซล ในระหว่างนี้ น้ำในหม้อน้ำของเครื่องยนต์จะเริ่มร้อน และทำให้น้ำมันพืชร้อนขึ้น เมื่อน้ำมันพืชร้อนถึง 60°C ทำการปิดวาล์วน้ำมันจากถังน้ำมันดีเซล แล้วเปิดวาล์วน้ำมันจากถังน้ำมันพืชเข้าสู่ปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนผังส่วนประกอบของชุดอุ่นน้ำมันพืชแบบที่ 2

3.3 แบบที่ 3

อุ่นน้ำมันพืชโดยใช้ความร้อนจากหม้อน้ำของตัวเครื่องยนต์แบบน้ำไม่ไหลวน มีอุปกรณ์ประกอบคือ 1) ถังน้ำมันพืช 2) กรองน้ำมันพืช 3) หม้ออุ่นน้ำมันพืช แบบที่ 3 นี้ มีการออกแบบเหมือนกับแบบที่ 2 ต่างกันที่ น้ำในหม้อน้ำเครื่องยนต์ไม่ไหลวน เพราะระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์นี้ ใช้หลักของน้ำเย็นแทนที่น้ำร้อน น้ำร้อนจะลอยตัวขึ้น มาที่รังผึ้งแล้วพัดลมก็เป่าระบายความร้อนออก น้ำจึงไม่มีแรงดันมากพอที่จะไหลในหม้ออุ่นน้ำมันพืช จึงออกแบบให้หม้ออุ่นน้ำมันพืชอยู่ระดับเดียวกับหม้อน้ำของเครื่องยนต์ และให้น้ำในหม้อน้ำเครื่องยนต์แผ่ความร้อนไปหาหม้ออุ่นน้ำมันพืช ลักษณะการทำงานคล้ายแบบที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังส่วนประกอบของชุดอุ่นน้ำมันพืชแบบที่ 3

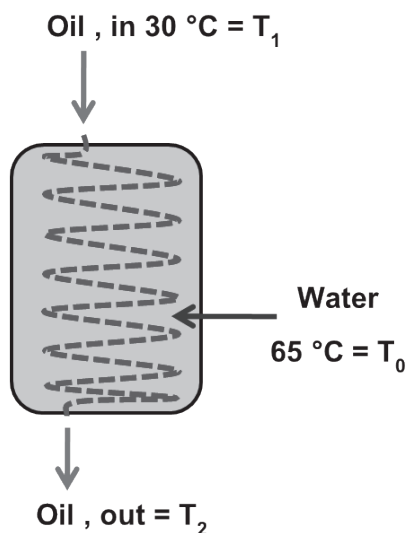
การทดสอบเบื้องต้น พบว่า ชุดอุ่นน้ำมันพืชแบบที่ 3 ให้อุณหภูมิ 60°C คงที่มากที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบที่ 3 ในการทดสอบต่อไป

3.4 การออกแบบหม้ออุ่นน้ำมันพืช น้ำมันพืช

- ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) = 2.1 kJ/kg·K
- อัตราการไหลของน้ำมัน ($\dot{m}$) = 0.1×10^{-3} kg/s
- อุณหภูมิน้ำมันทางเข้า (T_1) = 30°C
- เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำมัน (d) = 9.52 mm
- ความยาวท่อทองแดง (L) = 15 m

น้ำร้อน

- อุณหภูมิน้ำร้อน (T_0) = 65°C
- ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) = 4.184 kJ/kg·K
- ความหนืด (μ) = 489×10^{-6} Ns /m²
- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) = 650×10^{-3} W/mK
- ความหนาแน่น (ρ) = 995 kg/m³
- ความเร็วในการไหลของน้ำ (v) = 0.01 m/s
- เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำร้อน (D) = 16 mm
- อุณหภูมิน้ำมันที่ทางออก (T_2) = ?



ภาพที่ 4 การถ่ายเทความร้อนของชุดอุ่นน้ำมันพืช

การคำนวณการถ่ายเทความร้อน ใช้สมการการพา
ความร้อนแบบบังคับ

$$\frac{T_2 - T_1}{T_0 - T_1} = 1 - \exp\left(-\frac{hA_s}{\dot{m} C_p}\right) \quad (5)$$

$$\frac{hD}{k} = 0.023 \left(\frac{vD\rho}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^{0.4} \quad (6)$$

เมื่อ

A_s = พื้นที่ผิวท่อทองแดง (m²)

คำนวณได้ $T_2 = 59.5^\circ \text{C}$ เป็นอุณหภูมิน้ำมันพืชที่
ต้องการใช้กับเครื่องยนต์ เมื่อทดสอบได้ทำการวัดอุณหภูมิ
น้ำมันที่ทางออกแล้วได้ค่าเท่ากับ 60°C ซึ่งตรงกับค่าที่
คำนวณได้

4. การทดสอบ

แบ่งการทดสอบย่อย ดังนี้

1. การทดสอบติดตั้งเครื่องยนต์กับแท่น Dynamo
meter ทดสอบการใช้น้ำมันมะพร้าว 100% น้ำมัน
ถั่วเหลือง 100% และน้ำมันดีเซล วัดค่าแรงบิด กำลัง
อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และอุณหภูมิไอเสีย

2. การทดสอบกับรถไถเดินตาม โดยติดตั้งเครื่องยนต์กับ
ชุดโครกรถไถเดินตาม วัดอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมัน
เชื้อเพลิง และอุณหภูมิไอเสีย ทดสอบทั้งล้อยางและล้อเหล็ก

4.1 การทดสอบติดตั้งเครื่องยนต์กับแท่น Dynamo-
meter

อุปกรณ์

1) Electric Dynamometer, TAKACHIHO รุ่น
S-4

2) PS Meter, Denshigokyo รุ่น TDM-HR-15L
สำหรับวัดค่าแรงบิดของ Dynamometer

3) Diesel Engine Tachometer, ONO SOKKI รุ่น GE-450 สำหรับวัดความเร็วรอบเครื่องยนต์

4) Digital Thermometer, CHINO รุ่น CD 700 สำหรับวัดอุณหภูมิไอเสีย

5) Flow Meter, ONO SOKKI รุ่น FM-1500 สำหรับวัดอัตราการความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

6) เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ยี่ห้อ YANMAR รุ่น TA 120-XL

7) น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันดีเซล

วิธีการทดสอบ

ติดตั้งเครื่องยนต์ต้นกำลัง เป็นเครื่องยนต์ ยี่ห้อ YANMAR รุ่น TA 120-XL บนแท่นทดสอบ แล้วต่อเข้า Electric Dynamometer และติดตั้งประกอบเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่าต่างๆ ในระหว่างปฏิบัติการทดสอบ คือ แรงบิด ความเร็วรอบ (ประมาณ 1,000-2,300 rpm) กำลัง และอัตราการความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ดำเนินการทดสอบโดย

1) เดินเบาเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่องยนต์ก่อนทำการทดสอบ

2) ตั้งความเร็วเครื่องยนต์ให้ได้ความเร็วรอบตามที่กำหนด เลื่อนคันเร่งไปจนสุดความเร็วรอบเครื่องยนต์ประมาณ 2,300 rpm

3) ทำการทดสอบหาค่ากำลังสูงสุด โดยการค่อยๆ เพิ่มโหลด Dynamometer ที่กระทำต่อเครื่องยนต์ พร้อมทั้งวัดค่าแรงบิดและความเร็วรอบที่เกิดขึ้น จนกระทั่งได้ค่ากำลังสูงสุด

4) ที่จุดให้ค่ากำลังสูงสุด ทำการบันทึกค่าแรงบิดและค่าความเร็วรอบที่เกิดขึ้นที่ Dynamometer บันทึกค่าความเร็วรอบเครื่องยนต์ และอัตราการความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

5) ทำการเพิ่มโหลดขึ้นเป็นลำดับ โดยการเพิ่มโหลดแต่ละครั้งเพื่อทำให้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ลดลงประมาณ 100 rpm ในแต่ละครั้งนั้นทำการวัดและ

บันทึกค่าแรงบิดและความเร็วรอบของ Dynamometer ความเร็วรอบเครื่องยนต์ และอัตราการความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

6) การเพิ่มโหลดกระทำไปจนกระทั่งครอบคลุมค่าที่ให้แรงบิดสูงสุด จากนั้นทำการลดโหลดเพื่อกลับไปยังตำแหน่งที่ให้ค่ากำลังสูงสุดอีกครั้งหนึ่ง

7) ปรับโหลดเพื่อให้แรงบิดลดลงไปประมาณ 85% ของแรงบิดในจุดที่ให้กำลังสูงสุด แล้วทำการวัดและบันทึกค่าแรงบิดและความเร็วรอบของ Dynamometer ความเร็วรอบเครื่องยนต์ และอัตราการความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ จากนั้นทำซ้ำโดยปรับโหลดให้ลดลง 75% 50% และ 25% ตามลำดับ

8) ปรับโหลดเพื่อให้ค่าแรงบิดลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ แล้วทำการบันทึกความเร็วรอบ Dynamometer ความเร็วรอบเครื่องยนต์ และอัตราการความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์หาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบที่กำหนด

9) เดินเบาเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่องยนต์ก่อนทำการเปลี่ยนชนิดน้ำมันและนำความร้อนที่ได้จากเครื่องยนต์ไปอุ่นน้ำมันพืช

10) เปลี่ยนจากน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันมะพร้าว โดยปิดวาล์วน้ำมันดีเซลแล้วเปิดวาล์วน้ำมันมะพร้าว เดินเครื่องยนต์ต่อจนน้ำมันดีเซลที่ค้างในสายหมด ทำการทดสอบขั้นตอนที่ 2-9 บันทึกผลการทดลอง

11) ทำการเปลี่ยนน้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันถั่วเหลือง และทำการทดสอบขั้นตอนที่ 2-9 ซ้ำ บันทึกผลการทดลอง

4.2 การทดสอบติดตั้งเครื่องยนต์บนรถไถเดินตาม อุปกรณ์

1) เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ยี่ห้อ YANMAR รุ่น TA 120-XL

2) โครงรถไถเดินตาม ชุดล้อยางและล้อเหล็ก

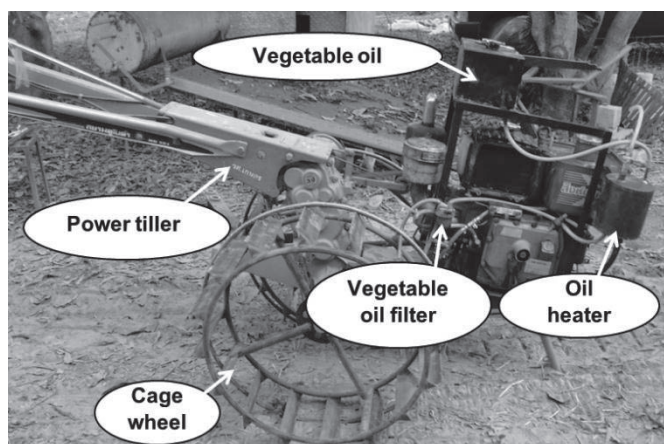
3) ชุด Flow Meter สำหรับวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

4) Digital Thermometer, CHINO รุ่น CD 700 สำหรับวัดอุณหภูมิไอเสีย

5) น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันดีเซล

วิธีการทดสอบ

ติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กเป็นต้นกำลัง บนชุดโครงรถไถเดินตาม พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ Flow Meter และ Digital Thermometer ดังแสดงในภาพที่ 5 และดำเนินการทดสอบโดย



ภาพที่ 5 เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ยี่ห้อ YANMAR รุ่น TA 120-XL ขนาด 12 แรงม้า ติดตั้งบนรถไถเดินตาม (ล้อเหล็ก)

1) เดินเบาเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่องยนต์ก่อนทำการทดสอบ

2) ตั้งความเร็วเครื่องยนต์ให้ได้ความเร็วรอบ 1,250 rpm แล้วขับรถไถเดินตามเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัดระยะทางที่เคลื่อนที่ อุณหภูมิไอเสียและอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

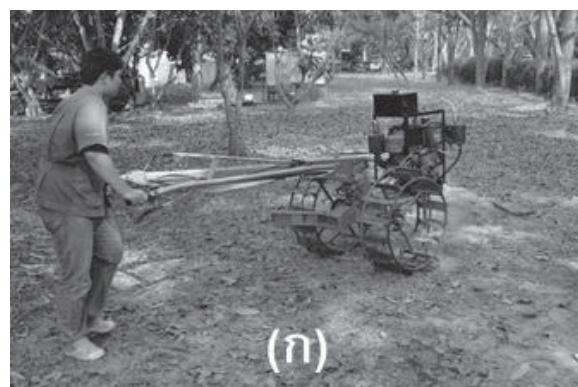
3) เดินเบาเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่องยนต์ก่อนทำการเปลี่ยนชนิดน้ำมันและนำความร้อนที่ได้จากเครื่องยนต์ไปอุ่นน้ำมันพืช

4) เปลี่ยนจากน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันมะพร้าว โดยปิดวาล์วน้ำมันดีเซลแล้วเปิดวาล์วน้ำมันมะพร้าว เดินเครื่องยนต์ต่อจนน้ำมันดีเซลที่ค้างในสายหมด

5) ตั้งความเร็วเครื่องยนต์ให้ได้ความเร็วรอบตามที่กำหนด แล้วขับรถไถเดินตามเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัดอุณหภูมิไอเสียและอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 โดยเปลี่ยนจากน้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันถั่วเหลือง นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์หาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบที่กำหนด

7) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 โดยเปลี่ยนจากล้อยางเป็นล้อเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 (ก) รถไถเดินตามเคลื่อนที่ด้วยล้อเหล็ก

(ข) รถไถเดินตามเคลื่อนที่ด้วยล้อยาง

4.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

หาระยะเวลาคืนทุน โดยพิจารณาจากราคาน้ำมัน ณ วันที่ทำการทดสอบ ดังนี้ ราคาน้ำมันดีเซล 30.09 บาท/ลิตร น้ำมันมะพร้าว 48.04 บาท/ลิตร และน้ำมันถั่วเหลือง 27.46 บาท/ลิตร

ระยะเวลาคืนทุน คือ เวลาที่ต้องการเพื่อให้การลงทุนเริ่มต้นได้รับการคืนทุน โดยไม่คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$PBP = \frac{CF_0}{YCF} \quad (7)$$

เมื่อ

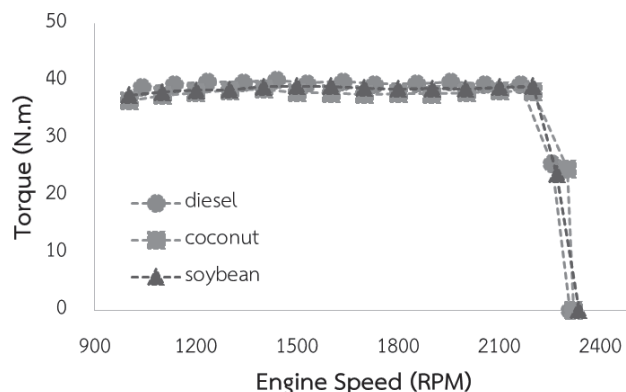
CF_0 = ค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดน้ำมัน (บาท)

YCF = กำไร (บาท/วัน)

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

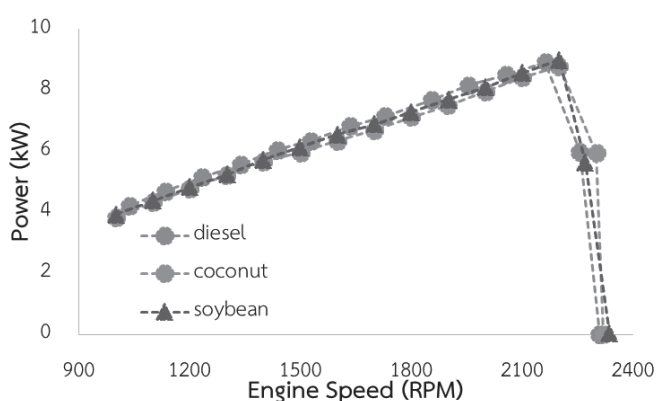
5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ติดตั้งบนแท่น Dynamometer

ผลการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก เมื่อใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันต่างๆ เปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันต่างๆ พบว่าในช่วงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,000-2,300 rpm แรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันพืชจะมีค่าต่ำกว่าแรงบิดที่ใช้ น้ำมันดีเซล โดยที่ น้ำมันมะพร้าวมีแรงบิดเฉลี่ยต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 4.05% และน้ำมันถั่วเหลืองเฉลี่ยต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 2.63% น้ำมันดีเซลที่ความเร็วรอบ 1,437 RPM จะได้แรงบิดสูงสุดเท่ากับ 40.17 Nm น้ำมันมะพร้าวที่ความเร็วรอบ 1,400 rpm จะได้แรงบิดสูงสุดเท่ากับ 38.65 Nm และน้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ 1,499 rpm จะได้แรงบิดสูงสุดเท่ากับ 39.08 Nm ดังแสดงในภาพที่ 7



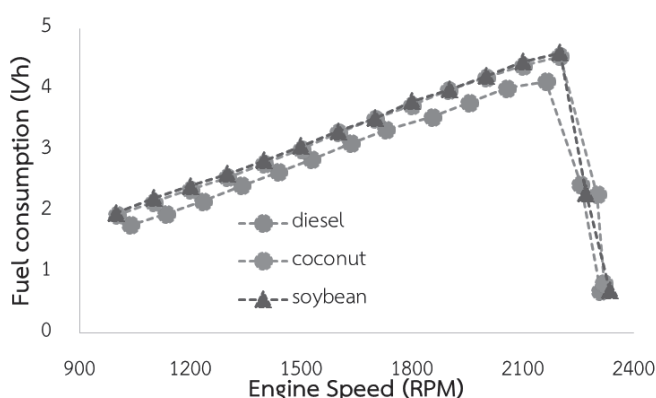
ภาพที่ 7 แรงบิดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อใช้น้ำมันดีเซล น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลืองเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

กำลังของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล โดยที่น้ำมันดีเซลมีกำลังสูงสุดที่ความเร็วรอบ 2,163 rpm เท่ากับ 8.91 kW น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm เท่ากับ 8.79 kW และ 9.0 kW ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ของกำลังและความเร็วรอบมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับงานวิจัยของ [10,11]



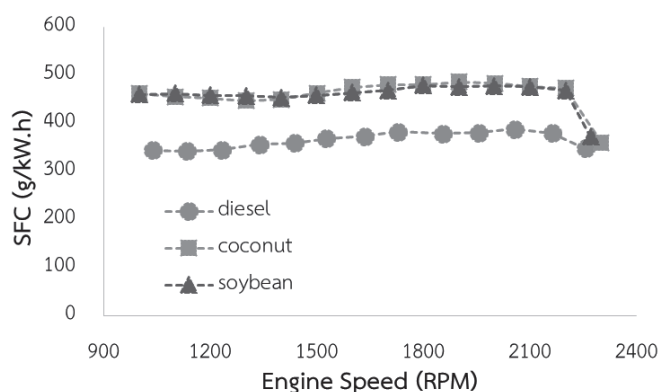
ภาพที่ 8 กำลังของเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อใช้น้ำมันดีเซล น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลืองเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เมื่อน้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่น้ำมันดีเซลมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดที่ความเร็วรอบ 2,163 RPM เท่ากับ 4.13 L/h น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm เท่ากับ 4.54 L/h และ 4.6 L/h ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า ในช่วงความเร็วรอบ 1,038-2,310 rpm อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยใช้น้ำมันมะพร้าวสูงกว่าใช้น้ำมันดีเซล 13.26% และน้ำมันมะพร้าวมากกว่าน้ำมันดีเซล 13.51% ดังแสดงในภาพที่ 9



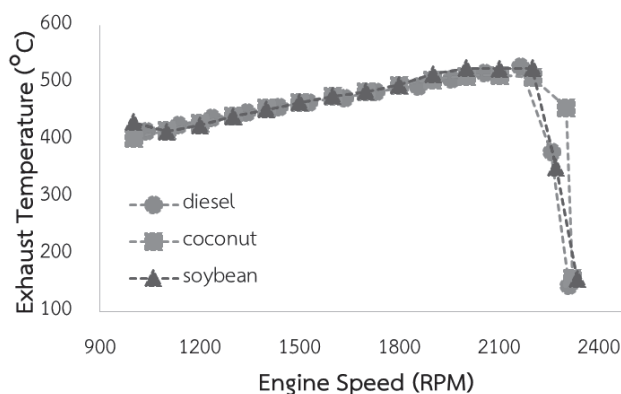
ภาพที่ 9 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อน้ำมันดีเซล น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ พบว่า ในช่วงความเร็วรอบ 1,001-2,056 rpm อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะโดยใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลืองสูงกว่าใช้น้ำมันดีเซล โดยที่น้ำมันมะพร้าวมากกว่าน้ำมันดีเซล 27.96% และน้ำมันถั่วเหลืองมากกว่าน้ำมันดีเซล 27.42% ทั้งนี้เพราะค่าความร้อนของน้ำมันพืชต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เครื่องยนต์จึงใช้เชื้อเพลิงมากกว่าเพื่อให้สามารถทำงานได้ แต่ในช่วงความเร็วรอบ 2,256-2,310 rpm อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อน้ำมันดีเซล น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ในภาพที่ 11 เป็นการแสดงอุณหภูมิไอเสีย พบว่า น้ำมันพืชมีอุณหภูมิไอเสียใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล โดยที่อุณหภูมิไอเสียสูงสุดอยู่ในช่วงความเร็วรอบ 2,200-2,100 RPM และเมื่อความเร็วรอบลดลงอุณหภูมิไอเสียก็มีแนวโน้มลดลง ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิไอเสียเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยของ [10,11]

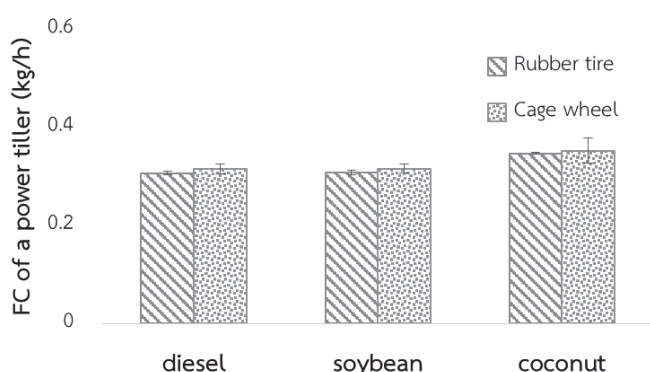


ภาพที่ 11 ผลกระทบของชนิดน้ำมันเชื้อเพลิงต่ออุณหภูมิไอเสีย ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ดีเซล

5.2 ผลการทดสอบอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กติดตั้งกับไถเดินตาม

ในการเกษตรนอกจากจะใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังประยุกต์ใช้ในการทำงานอื่นๆ แล้ว ส่วนใหญ่ยังใช้รถไถเดินตามเพื่อการฉุดลากหรือลากจูง สำหรับการทำนาหรือเคลื่อนที่ในดินที่เหลว ล้อของรถไถเดินตามที่เป็นล้อเหล็กช่วยพยุงไม่ให้รถจมขณะใช้งาน ส่วนล้อยางเหมาะสำหรับใช้งานในไร่หรือบนถนน ซึ่งการเคลื่อนที่จะมีความสิ้นเปลืองมากกว่า

กรณีล้อยาง รถไถเดินตามเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 2 km/h ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,250 rpm เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันถั่วเหลือง คือ 0.31 kg/h และน้ำมันมะพร้าวอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงคือ 0.35 kg/h และกรณีล้อเหล็ก รถไถเดินตามเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 2.33 km/h ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,250 rpm ก็ได้ผลคล้ายกัน คือ เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว มีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.31 0.32 และ 0.35 kg/h ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กติดตั้งกับไถเดินตามเคลื่อนที่ด้วยล้อยางและล้อเหล็ก

5.3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ถ้าใช้เครื่องยนต์ดีเซลสูบน้ำวันละ 8 ชั่วโมง ใช้ความเร็วรอบในช่วง 1,200-1,500 rpm จะมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดังนี้ น้ำมันดีเซล 2.48 l/h น้ำมันมะพร้าว 2.64 l/h และน้ำมันถั่วเหลือง 2.69 l/h

ค่าใช้จ่ายสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละวัน ดังนี้ น้ำมันดีเซล 597 บาท/วัน น้ำมันมะพร้าว 1,014.6 บาท/วัน และ น้ำมันถั่วเหลือง 590.9 บาท/วัน ดังนั้นการใช้น้ำมันมะพร้าวมีค่าใช้จ่ายมากกว่าการใช้น้ำมันดีเซล ซึ่งไม่คุ้มทุน แต่ถ้าใช้น้ำมันถั่วเหลืองแทนน้ำมันดีเซลจะจ่ายน้อยลงวันละ 6.1 บาท กำหนดให้ต้นทุนในการสร้างชุดอุ้นต้นแบบมีราคา 2,460 บาท ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุนจะเท่ากับ 404 วันทำงาน

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 12 แรงม้าที่ใช้น้ำมันพืชบนแท่น Dynamometer ผลการทดสอบพบว่า แรงบิดต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเพียง 2-4% และกำลังของเครื่องยนต์มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล เป็นผลมาจากการอุ้มน้ำมันพืชช่วยให้ค่าความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันพืชลดลง อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของน้ำมันพืชมากกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 28% เนื่องจากค่าความร้อนของน้ำมันพืชต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และอุณหภูมิไอเสียน้ำมันพืชมีอุณหภูมิไอเสียใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

การทดสอบบนรถไถเดินตามโดยใช้ล้อเหล็กและล้อยางนั้นมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันถั่วเหลืองมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าการใช้น้ำมันมะพร้าวประมาณ 13% ในกรณีล้อยาง และประมาณ 10-13% ในกรณีล้อเหล็ก ทั้งนี้เพราะน้ำมันถั่วเหลืองมีค่าความร้อนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว เมื่อนำมาอุ้नให้มีอุณหภูมิ 60-70°C ก่อนใช้งานเพื่อลดความหนืด จึงทำให้น้ำมันถั่วเหลืองมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากกว่า

แม้ว่าน้ำมันพืชจะมีราคาแพงเป็นข้อเสียทำให้การใช้ไขมันพืชแทนน้ำมันดีเซลนั้นอาจจะไม่คุ้มทุนหรือคืนทุนแต่ต้องใช้ระยะเวลานาน แต่ในช่วงที่ราคาน้ำมันดีเซลมีราคาสูง การติดตั้งชุดอุ่นน้ำมันพืชซึ่งมีต้นทุนประมาณ 2,460 บาท เข้ากับเครื่องยนต์ดีเซลจะสามารถช่วยให้เกษตรกรมีทางเลือกในการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยไม่ต้องดัดแปลงน้ำมัน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปีงบประมาณ 2553 รหัสโครงการ ว-ท (ด) 188.53

8. บรรณานุกรม

- (1) พลิชรุ้ มื้อสันทด, วิชิต บัวแก้ว และพิชัย อัมภมมงคล, 2550. การพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กให้สามารถใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงร่วม. วารสารทางวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ปีที่ 5 : 146-155.
- (2) ไพญญ์ ลิหล้าน้อย, อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง และพิชัย อัมภมมงคล, 2550. การศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ดีโซลล์ชนิดบิวทานอลเป็นส่วนผสม. วารสารทางวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ปีที่ 5 : 135-145.
- (3) ปเสฏฐา สารลักษณ์, 2554. การทดสอบการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชไขแล้ว. วารสารทางวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ปีที่ 9: 1-17.
- (4) กระทรวงพลังงาน, 2551. รู้เฟื่องเรื่องพลังงาน (Online) <http://www.energy.go.th>.
- (5) คุณานันต์ ศักดิ์กำบัง และเกียรติฟ้า ตั้งใจจิต, 2556. การศึกษาสมรรถนะและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันไก่. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น, ปีที่ 18(4) : 616-627.
- (6) ทวีช จิตสมบูรณ์, 2544. โอกาสและปัญหาจากการใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันดีเซลในประเทศไทย. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 15: EM20-EM29.
- (7) ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย. 2545, ผลของอุณหภูมิน้ำมันพืชต่อสมรรถนะและสารปลดปล่อยในเครื่องยนต์ดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- (8) ประสูตร เฉลียวศิลป์. 2548, พลังงานทางเลือก ใช้น้ำมันมะพร้าวหมักเติมทดแทนน้ำมันดีเซล. วารสารเกษตรกรรมธรรมชาติ, ฉบับที่ 3 : 13-15.
- (9) พิชัย สราญรมย์. 2544, ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสบูดำ (Online) <http://aopdm01.doe.go.th/data/physicnut21.htm>.
- (10) Zafer Utlu and Mevlut Sureyya Koc-ak. 2008, The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying on direct injection diesel engine performance and exhaust emission. Renewable Energy, Vol. 33: 1936-1941.
- (11) Saddam H. Al-Iwayzy and Talal Yusaf. 2013, Chlorella protothecoides Microalgae as an Alternative Fuel for Tractor Diesel Engines. Energies, Vol.6: 766-783.

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟด้วยไลน์แชทบอท

The Increasing Efficiency for POS System in the Coffee Shop Business with LINE Chat Bot

กานดา ศรีอินทร์

คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตหนองคาย

Corresponding Author. Email : kanda@kku.ac.th

(Received: April 16, 2018; Revised: May 7, 2018; Accepted: May 25, 2018)

บทคัดย่อ : การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟและนำแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทมาเป็นเครื่องมือในการเพิ่มประสิทธิภาพและอำนวยความสะดวกในการรายงานผลและสรุปยอดขายของสินค้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทให้มีความสามารถในการโต้ตอบอัตโนมัติ ด้วยการพัฒนา LINE API Chat Bot ที่สามารถควบคุมและแสดงผลชุดคำสั่งตามที่ใช้บริการร้องขอได้ การวิจัยใช้ระเบียบวิธีการวิจัยและพัฒนา โดยเน้นการพัฒนาซอฟต์แวร์ต้นแบบเพื่อให้ระบบที่ออกแบบและพัฒนาสามารถรองรับความต้องการของกลุ่มผู้ประกอบการธุรกิจร้านกาแฟได้ ผลของการพัฒนาระบบนั้นครอบคลุมฟังก์ชันงานหลัก ประกอบด้วย ฟังก์ชันการลงทะเบียนสมาชิกและการกำหนดสิทธิ์ของผู้ใช้งาน การแสดงผลข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า การจัดการข้อมูลสินค้า การคำนวณการขายสินค้า รายงานยอดขาย การพิมพ์ใบสั่งซื้อสินค้า การจัดการสต็อกสินค้า การรายงานยอดขายและรายการสินค้าผ่าน LINE API Chat Bot ผลการประเมินความพึงพอใจด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันงานของระบบจากผู้เชี่ยวชาญในการพัฒนาระบบพบว่าอยู่ในระดับดี ($\bar{x}=4.49$) และผลการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบในภาพรวมจากผู้ประกอบการธุรกิจ พบว่าอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}=4.52$)

คำสำคัญ: ระบบบริหารจัดการหน้าร้าน ธุรกิจร้านกาแฟ ไลน์ แชทบอท

Abstract : The objective of this research is to design and develop point of sale (POS) system in the coffee shop business. The LINE application chat bot is applied to the POS system in order to facilitate the report of product sales and display the order set as requested by the user. In the research methodology, we focuses on development of prototype software so that the design and development system meet the requirements of the coffee shop business operators. The results of the development of the coffee shop POS system primarily serve the main functions including, 1) user registration and permission, 2) product category and information, 3) product management, 4) daily and annual sales reports, 5) bills payment, 6) stock management and 7) order report and item lists with the LINE API Chat Bot. In the performance evaluation of POS system, the result show the satisfaction of function test of system, derived from expert staff, obtain a good level ($\bar{x}=4.49$). Furthermore, the satisfaction of the usability test, provided coffee shop operators, yield a very good level ($\bar{x}= 4.52$).

Keywords: POS System, Coffee Shop, LINE, Chat Bot

1. บทนำ

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่มีกลิ่นและรสเป็นเอกลักษณ์ ส่งผลให้กระแสดื่มกาแฟจึงได้รับความนิยมมานานหลายปีและมียุ่ทั่วโลก แนวโน้มของการดื่มกาแฟนั้นยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนได้จากจำนวนผู้เข้าร่วมงาน Thailand Coffee Fest 2017 ซึ่งเป็นมหกรรมกาแฟที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในเอเชียแปซิฟิก จัดโดยสมาคมกาแฟพิเศษไทย ได้มีการเปิดเผยภาพรวมธุรกิจกาแฟที่ผ่านมามีมูลค่ากว่า 15,000 ล้านบาท และมีแนวโน้มเติบโตได้อีกร้อยละ 15-20 โดยเฉพาะตลาดกาแฟพิเศษที่มีเอกลักษณ์เฉพาะและมีคุณภาพสูงขยายตัวร้อยละ 3-5 ต่อปี [1] ปัจจุบันพฤติกรรมของผู้บริโภคได้ให้ความสนใจและนิยมการดื่มกาแฟเพิ่มมากขึ้น โดยกระแสนิยมการดื่มกาแฟของคนไทยเริ่มเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่คนไทยนิยมดื่มกาแฟสำเร็จรูปเป็นส่วนใหญ่ แต่ในปัจจุบันนิยมเข้าร้านกาแฟสดควบคู่ที่มีการตกแต่งร้านให้หรูหราทันสมัย สะดวกสบาย มีบรรยากาศที่รื่นรมย์เหมาะสำหรับการดื่มกาแฟมากขึ้น โดยมีอัตราการเสียการดื่มกาแฟ 200 แก้ว/คน/ปี [2] จากกระแสดูความนิยม

การดื่มกาแฟในระยะที่ผ่านมาส่งผลให้ธุรกิจร้านกาแฟในประเทศไทยขยายตัวอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุผลให้มีจำนวนร้านกาแฟหรือผู้ประกอบการธุรกิจร้านกาแฟเพิ่มขึ้นจำนวนมาก และหากร้านใดมีจำนวนลูกค้าและยอดขายที่เพิ่มขึ้นก็จะมีกาขยายสาขาอย่างแพร่หลาย ซึ่งขณะนี้ในประเทศไทยมีธุรกิจแฟรนไชส์ร้านกาแฟมากกว่า 110 ยี่ห้อ ทำให้เกิดการแข่งขันสูง [3],[4] และในอนาคตคาดว่า ธุรกิจร้านขายกาแฟจะมีการเติบโตและขยายตัวสูง โดยการขยายตัวของธุรกิจร้านขายกาแฟจะมีความตอบสนองต่อพฤติกรรมของคนรุ่นใหม่ที่ชอบการดื่มกาแฟและมักให้ความสำคัญกับรสชาติ ความหอม ตลอดจนบรรยากาศในการตกแต่งร้านที่มีความสุนทรีย์และตั้งอยู่ในทำเลชุมชนหรือย่านการค้าเพิ่มขึ้น โดยมีกลุ่มลูกค้าเป้าหมายหลักไม่เฉพาะแต่วัยทำงานเท่านั้นยังรวมไปถึงกลุ่มนักศึกษา นักธุรกิจ และนักท่องเที่ยว [5] โดยส่วนใหญ่รูปแบบของธุรกิจร้านกาแฟจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ โดยธุรกิจขนาดเล็กจะเป็นลักษณะกิจการเจ้าของคนเดียวหรือการให้บริการในรูปแบบของบุคคลธรรมดาที่เน้นการสร้างแบรนด์ของร้านกาแฟให้เป็นที่รู้จักและสามารถดำเนินธุรกิจต่อไปได้อย่างยั่งยืน

ในการดำเนินธุรกิจร้านกาแฟจำเป็นต้องสร้างความยั่งยืนของธุรกิจเพื่อให้เกิดผลตอบแทนที่มีความคุ้มค่า ดังนั้น ผู้ประกอบการจึงต้องให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการธุรกิจให้มีความเป็นมืออาชีพเพื่อความสำเร็จที่ยั่งยืน โดยตัวชี้วัดความสำเร็จของธุรกิจจำเป็นต้องอาศัยกลยุทธ์ที่เหมาะสมทั้งในเรื่องของทำเลที่ตั้ง การคำนึงถึงคุณภาพและความคุ้มค่าที่ลูกค้าจะได้รับ การนำนวัตกรรมเข้ามาปรับใช้ การรักษาฐานลูกค้าเก่าและสร้างฐานลูกค้าใหม่ การออกแบบและตกแต่งร้าน การสร้างแบรนด์และเอกลักษณ์ให้โดดเด่นเป็นที่รู้จักและจดจำในโลกออนไลน์ รวมถึงความสามารถในการบริหารจัดการที่ดีทั้งทางด้านการบริหารคน ระบบบัญชี การเงิน และสำหรับยุค 4.0 นี้ การนำเทคโนโลยีสารสนเทศและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์มาใช้ในการบริหารจัดการข้อมูลการขายและการให้บริการถือเป็นปัจจัยพื้นฐานในการทำธุรกิจ

การดำเนินธุรกิจร้านกาแฟทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีความจำเป็นต้องมีการบริหารจัดการข้อมูลและการให้บริการต่างๆ เช่น การจัดเก็บข้อมูลการขาย ยอดขาย ผลกำไร ต้นทุน การพิมพ์เสร็จให้ลูกค้า รวมถึงยอดรายการสั่งซื้อวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการทำธุรกิจ ทั้งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตและผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยการจัดเก็บข้อมูลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น เพื่อการดูรายงานยอดขาย ยอดสินค้าคงเหลือ วัตถุดิบคงเหลือ รายงานเหล่านี้มีประโยชน์สำหรับผู้จัดการหรือเจ้าของร้าน สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนการทำธุรกิจในอนาคตว่าทำอย่างไรจึงจะได้ผลกำไรมากที่สุด และใช้เป็นข้อมูลประกอบในการตัดสินใจการทำธุรกิจ เช่น ควรจะลงทุนเพิ่มขึ้นหรือควรเปิดสาขาเพิ่มขึ้นหรือไม่ [6] โดยปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อรองรับการทำงานด้านนี้ เช่น POS Software หรือระบบขายสินค้าหน้าร้าน ซึ่งมีความสามารถในการบันทึกการขาย คำนวณยอดขายและสรุปรายงานที่เกี่ยวข้องได้ โดยบางระบบจะมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เก็บเงินปลายทางเพื่อความสะดวกในการใช้งานอีกด้วย โดยส่วนใหญ่

ผู้ประกอบการสามารถใช้บริการระบบ POS ที่ให้บริการทั่วไปได้ โดยสามารถเลือกรูปแบบของระบบที่มีความเหมาะสมตามสภาพของธุรกิจและฟังก์ชันการใช้งาน ซึ่งจะมีการคิดค่าบริการที่แตกต่างตามความสามารถของระบบ ตั้งแต่การให้บริการฟรี การจ่ายเป็นรายเดือน หรือการจ่ายทั้งระบบ เป็นต้น โดยแต่ละรูปแบบจะมีข้อดี ข้อด้อยแตกต่างกันไป ทั้งนี้ในบางระบบอาจมีฟังก์ชันงานไม่ตรงตามความต้องการ หรือบางฟังก์ชันเกินความจำเป็นที่ต้องการใช้งาน แต่ต้องจ่ายค่าบริการแบบเหมารวม ซึ่งเมื่อพิจารณาราคารวมแล้วอาจเป็นราคาที่สูงเกินความจำเป็นสำหรับธุรกิจร้านกาแฟขนาดเล็ก หรืออาจเกิดความเสี่ยงต่อการรั่วไหลของข้อมูลทางธุรกิจ และโอกาสที่ระบบอาจจะล่มทำให้การดำเนินการของร้านหยุดชะงักได้

นอกจากนี้โอกาสที่จะดำเนินธุรกิจร้านกาแฟให้ประสบความสำเร็จยังจำเป็นต้องใช้การตลาดออนไลน์ (Digital Marketing) ผ่านช่องทางอินสตาแกรมและไลน์ เป็นเครื่องมือสื่อสารกับผู้บริโภค ซึ่งปัจจุบันพบว่า มีคนไทยใช้งานมากถึง 7.1 ล้านคน และ 44 ล้านคน ตามลำดับ พร้อมกันนั้นยังจำเป็นต้องมีการสร้างชุมชนออนไลน์ หรือ Community ที่มีรสนิยมและความชอบในทิศทางเดียวกัน เช่น การกำหนดตำแหน่งทางการตลาดเป็นร้านกาแฟสำหรับกลุ่มคนที่ชื่นชอบในการปั่นจักรยาน กลุ่มคนที่ชอบการสะสมของเก่า กลุ่มคนที่ชอบการตกแต่ง หรือกลุ่มคนรักสัตว์ เป็นต้น [2] จากพฤติกรรมประกอบอาชีพของคนรุ่นใหม่ ที่นิยมประกอบธุรกิจส่วนตัวมากขึ้น ทั้งร้านค้าออนไลน์และผู้ประกอบการธุรกิจส่วนตัวในลักษณะของร้านอาหาร คาเฟ่ ร้านกาแฟ ไอศกรีมและเบเกอรี่ เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่ากลุ่มผู้ประสบความสำเร็จและผู้ล้มเหลวอาจมีความใกล้เคียงกันในสัดส่วน 50:50 โดยมีปัจจัยสำคัญที่ชี้วัดคือ ความรู้เกี่ยวกับข้อมูลธุรกิจในด้านต่างๆ ยิ่งไปกว่านั้นผู้ประกอบการใหม่ยังมักประสบปัญหาและข้อจำกัดต่างๆ อีกมาก เช่น ปัญหาการขาดแคลนบุคลากร ขาดความรู้ด้านการบริหารเงินทุนหมุนเวียน ขาดการวางแผนการตลาดอย่างเป็นระบบ ขาดการนำ

นวัตกรรมและนำเสนอบริการรูปแบบใหม่ที่ตอบโจทย์ความต้องการของลูกค้า จากจำนวนผู้แข่งขันในตลาดธุรกิจร้านอาหารที่เพิ่มมากขึ้น ร้านต่างๆ ที่เคยประสบความสำเร็จก็จำเป็นต้องสร้างชื่อเสียงและฐานลูกค้าเดิมให้คงอยู่ ยังต้องให้ความสำคัญในเรื่องความน่าเชื่อถือของคุณภาพ ราคาที่ได้มาตรฐาน และมีแนวทางในการจัดการแบบมืออาชีพ ที่สามารถตอบสนองไลฟ์สไตล์ของลูกค้าให้ได้ ดังนั้น ผู้ประกอบการในธุรกิจร้านอาหารจำเป็นต้องปรับตัวให้ทันยุคสมัยและมีการเตรียมความพร้อมที่ดี [4]

จากสภาพปัญหาข้างต้นส่งผลให้ผู้วิจัยได้เลือกกรณีศึกษาเป็นธุรกิจร้านอาหารและมีแนวคิดในการนำนวัตกรรมและนำเสนอบริการรูปแบบใหม่ที่ตอบโจทย์ความต้องการเฉพาะกลุ่มของลูกค้า โดยนำนวัตกรรมทางเทคโนโลยีสารสนเทศมาประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบบริหารจัดการหน้าร้านสำหรับธุรกิจร้านอาหาร โดยใช้กรณีศึกษาของบริษัท Paws Café ซึ่งเป็นธุรกิจร้านอาหารและเบเกอรี่ สำหรับกลุ่มคนรักสัตว์มาเป็นกรณีศึกษา โดยจากสภาพปัญหาในอดีตที่ร้านค้าต่างๆ ไม่อนุญาตให้สัตว์เลี้ยงเลี้ยงเข้าไปในร้าน ส่งผลให้เจ้าของแบรนด์ Paws Café เกิดแนวคิดในการทำธุรกิจร้านอาหารสำหรับคนรักสัตว์ และเมื่อมีจำนวนลูกค้าเพิ่มมากขึ้น ทางร้านจึงประสบปัญหาเกี่ยวกับการบริหารจัดการ การขายสินค้าและการคำนวณยอดขายในแต่ละวัน เนื่องจากให้พนักงานหน้าร้านเป็นผู้จดบันทึกไว้ในสมุดบิล และเมื่อนำมาคำนวณรายการขายและสรุปรายยอดขายในแต่ละวันส่งผลให้เกิดความผิดพลาด ขาดการจดจ่ารายละเอียดที่ครบถ้วน และมีการคำนวณยอดขายที่คลาดเคลื่อน อีกทั้งมีการสูญหายของรายการบันทึกการขายในสมุดบิลและกระดาษ จากสภาพปัญหาของความผิดพลาดต่างๆ ส่งผลให้ไม่สามารถสรุปรายยอดขายที่มีความถูกต้องได้ตามความต้องการ

ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการออกแบบและพัฒนาระบบการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านอาหาร โดยนำหลักการทำงานของระบบ POS มาประยุกต์

ใช้ในกรณีศึกษาร้าน Paws Café ซึ่งประกอบไปด้วยระบบการให้บริการลูกค้าหน้าร้าน (Front-End System) ให้มีการจัดการข้อมูลอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การจองคิว การสั่งเครื่องดื่ม การคิดค่าบริการ การพิมพ์ใบเสร็จให้ลูกค้าไปจนถึงการชำระเงิน ส่งผลให้ธุรกิจสามารถให้บริการลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงระบบการบริหารจัดการหลังร้าน (Back-End System) ตั้งแต่การบริหารจัดการวัตถุดิบ การบริหารจัดการเมนูและรายการสินค้าต่างๆ ไปจนถึงการเงิน การรายงานยอดขายประจำวัน/ประจำเดือนหรือตามช่วงเวลาที่ต้องการได้ อีกทั้งผู้ประกอบการธุรกิจร้านอาหารสามารถตรวจสอบรายละเอียดต่างๆ ได้ เช่น การรายงานยอดขายทั้งทางเว็บไซต์และแอปพลิเคชันออนไลน์ที่สามารถตรวจสอบยอดสินค้าที่ขายได้ในแต่ละวันหรือรายการเมนูที่ขายดี ทำให้ผู้จัดการหรือเจ้าของร้านมีความสะดวกในการบริหารจัดการการขายสินค้าได้ง่ายขึ้น โดยการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์และออกแบบมาจากความต้องการของผู้ใช้งาน มีความครอบคลุมทุกฟังก์ชันงานสำหรับการบริหารหน้าร้านสำหรับผู้ประกอบการมือใหม่ได้อย่างง่าย สะดวก สามารถนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหา ลดต้นทุน รวมถึงพัฒนาการประกอบธุรกิจร้านอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจจะดำเนินธุรกิจร้านอาหารในอนาคตได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสำรวจปัญหาและวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานที่มีส่วนเกี่ยวข้องต่อการพัฒนาระบบ
- 2) เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านอาหาร
- 3) เพื่อประเมินความสามารถตามฟังก์ชันการทำงานของระบบ และประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1) ระบบขายสินค้าหน้าร้าน

ระบบขายสินค้าหน้าร้าน (Point of Sale : POS System) เป็นระบบงานคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาช่วยระบบการขายสินค้าในปัจจุบัน มีความสามารถในการควบคุมที่สำคัญของธุรกิจการขายสินค้าหน้าร้าน เช่น การบันทึกข้อมูลการขายประจำวัน การบันทึกค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อมีการขายสินค้าหรือการให้บริการ การติดตามสินค้าคงคลัง การรายงานธุรกิจ การบัญชีและการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวกับการขายสินค้า ซึ่งการทำงานของระบบขายหน้าร้านจะเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีหลายด้านและอุปกรณ์หลายตัว เช่น อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ การอ่านบาร์โค้ด การอ่านแถบแม่เหล็ก หรือหลายๆ เทคโนโลยีผสมกัน [7] ระบบขายสินค้าหน้าร้านนำหลักการของเครื่องคิดเงิน (Cash Register) มาเขียนโปรแกรมพัฒนาบนคอมพิวเตอร์ แล้วเพิ่มเติมความสามารถต่างๆ ที่เครื่องคิดเงินทำไม่ได้ เช่น สามารถตัดสต็อกได้ ดูความเคลื่อนไหวต่างๆ ของสินค้า หรือระบบสมาชิก ตลอดจนดูข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตได้ เป็นต้น ลักษณะการทำงานของระบบขายสินค้าหน้าร้าน ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนของโปรแกรม (Software) มีหน้าที่เก็บข้อมูลการขาย และข้อมูลคลังสินค้าเป็นหลัก โดยจะเก็บข้อมูลทุกอย่างเกี่ยวกับการขายทั้งหมด เช่น ข้อมูลของสมาชิก ยอดซื้อสะสมของลูกค้าที่มาใช้บริการในแต่ละวัน ดังนั้นระบบขายสินค้าหน้าร้านที่ดีจำเป็นต้องใช้งานโปรแกรมฐานข้อมูลขนาดใหญ่โดยเฉพาะ เช่น MySQL Server, SQL Server เป็นต้น 2) ส่วนของอุปกรณ์ (Hardware) ซึ่งประกอบด้วย POS Terminal, Monitor, Slip Printer, Barcode Scanner, Cash Drawer, Customer Display เป็นต้น โดยในส่วนของโปรแกรมนั้นทางผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะเลือกประเภทของโปรแกรมเก็บเงินหน้าร้านที่มีความเหมาะสมกับธุรกิจและตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน เช่น ประเภทของโปรแกรมเก็บเงินหน้าร้านโดยเฉพาะ หรือโปรแกรมบัญชีที่มีส่วนของหน้าร้าน เป็นต้น

[7], [8] ปัจจุบันผู้ประกอบการในหลายกิจการได้มีการใช้งานระบบ POS System เพื่อส่งเสริมประสิทธิภาพด้านการบริหารหน้าร้านผ่านทางเว็บไซต์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น บน Android, แท็บเล็ตพีซี รวมถึงสมาร์ทโฟน เพื่ออำนวยความสะดวกในการเรียกใช้งานทั้งระบบการขายหน้าร้านและการบริหารงานระบบหลังร้านได้

3.2) Chat Bot (แชทบอท)

Chat Bot (แชทบอท) คือ โปรแกรมประยุกต์ที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ Bot หรือ Chat Bot เป็นบริการที่ทำงานโดยถูกตั้งเงื่อนไขในการทำงานเอาไว้ล่วงหน้า โดยแชทบอทได้รับการพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีต่างๆ เช่น การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing) การสังเคราะห์เสียงพูด (Speech Synthesis) และเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) โดยผู้ใช้งานสามารถปฏิสัมพันธ์ผ่านทางสนทนาได้ [9] ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีใหม่ทาง Machine Learning ที่เพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาความสามารถของแชทบอทให้นำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมบริการ และนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้มากยิ่งขึ้น เช่น การให้บริการข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสินค้าและบริการ การทำหน้าที่ดูแลเสมือน Call Center การเป็นตัวช่วยปิดการขาย การใช้โปรแกรมสนทนา เกมออนไลน์ สื่อสังคมออนไลน์ อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวและโรงแรม บริการทางการแพทย์ และอุตสาหกรรมการบิน โดยการให้บริการข้อมูลทางสายการบิน และเป็นช่องทางในการสื่อสารกับลูกค้า เป็นต้น [10], [11], [12] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำเทคโนโลยีของแชทบอทมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาในหลายๆ ด้าน เช่น การใช้ประโยชน์ของแชทบอทเพื่อให้ข้อมูลหรือรายละเอียดเกี่ยวกับบริษัท การใช้แชทบอทตอบคำถามพื้นฐานและเพื่อการสนทนาแทนพนักงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ แชทบอทยังเป็นช่องทางในการติดต่อสื่อสารกับองค์กร รองจาก

การติดต่อแบบ Face-to-Face เนื่องจากความสะดวกสบาย และไม่มีข้อจำกัดด้านอายุ [10], [13] จากการวิจัยในโลกของธุรกิจ e-Commerce พบว่า การพูดคุยกับแชทบอท สามารถช่วยให้ลูกค้าตัดสินใจง่ายขึ้นได้อย่างยิ่งอีกด้วย เพราะช่วยคลายกังวลสงสัยเกี่ยวกับสินค้าได้อย่างทันท่วงที และมีผลสำคัญต่อการตัดสินใจซื้อสินค้าได้นอกจากนี้ยังมีการนำแชทบอทมาช่วยในการบอกสูตรอาหารหรือส่วนผสมตามรายการต่างๆ การใช้แชทบอทเพื่อส่งคู่มือฟรีสำหรับคนที่ชื่นชอบดื่มในการแนะนำร้านใหม่ๆ รวมถึงใช้ในการแชร์คอลเลกชันแฟชั่นใหม่ของร้านค้าชื่อดังต่างๆ เป็นต้น [12]

3.3) LINE API Chat Bot

LINE (ไลน์) เป็นแอปพลิเคชันสำหรับการสนทนาบนอุปกรณ์การสื่อสารรูปแบบต่างๆ เช่น สมาร์ทโฟน คอมพิวเตอร์ และแท็บเล็ตพีซี ผู้ใช้สามารถสื่อสารด้วยการพิมพ์ข้อความจากอุปกรณ์การสื่อสารเครื่องหนึ่งไปสู่อีกเครื่องหนึ่งได้ ด้วยความสามารถที่หลากหลายและการรองรับการใช้งานของผู้ใช้หลายๆ ด้าน ส่งผลให้ไลน์ได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งานทั่วโลก ปัจจุบันไลน์มีจำนวนผู้ใช้งานทั่วโลกกว่า 217 ล้านคน โดยมีแนวโน้มที่สูงขึ้นจากการเปิดให้บริการตั้งแต่ปี 2554 เป็นต้นมา โดยมีผู้ใช้งานในไทยกว่า 44 ล้านคน เป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากประเทศญี่ปุ่น [14] นอกจากบริการแบบ Instant Messaging ที่สามารถส่งข้อความโต้ตอบหากัน ยังมีจุดเด่นที่ทำให้ไลน์แตกต่างกับแอปพลิเคชันสำหรับการสนทนาแบบอื่นๆ คือ รูปแบบของ “สติ๊กเกอร์” (Sticker) ที่แสดงอารมณ์และความรู้สึกของผู้ใช้ที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังมีฟีเจอร์ Timeline ที่ผู้ใช้สามารถแบ่งปันข้อมูล อัปเดตสถานการณ์ต่างๆ ผ่านการโพสต์รูปภาพ และการตั้งสถานะ โดยที่เพื่อนสามารถเข้ามาคอมเมนต์ได้ [15] “จากจุดมุ่งหมายหลักของ LINE ที่ต้องการนำเสนอบริการและการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เปรียบเสมือนศูนย์กลางหรือช่องทางหลักในการเชื่อมโยงผู้คน ข้อมูลข่าวสารและบริการต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูล

และบริการที่ใช้งานในชีวิตประจำวันได้ด้วยแอปพลิเคชันไลน์เพียงแอปพลิเคชันเดียว” ปัจจุบัน LINE ได้พัฒนาแชทบอทขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนแอปพลิเคชัน โดยผู้ให้บริการไม่ต้องโหลดแอปพลิเคชันอื่นเพิ่มเติมโดย LINE Bot หรือ LINE@ Account ที่ใช้ LINE Message API ซึ่งเป็น API ของ LINE ได้เปิดให้บริการแก่นักพัฒนาที่ LINE Business Center โดยเจ้าของ LINE@ จะทำโปรแกรมไว้เบื้องหลังเพื่อให้ LINE@ Account นั้นสามารถตอบโต้ข้อความกับการสนทนาแทนคนได้โดยอัตโนมัติ ดังนั้นลักษณะข้อความที่สนทนากับ LINE Bot จะเป็นการตั้งโปรแกรมไว้ล่วงหน้าทั้งสิ้น [16] โดยส่วนใหญ่การใช้บริการ LINE Bot จะมีความเหมาะสมกับรูปแบบของธุรกิจหรือบริการที่ต้องให้บริการข้อมูลแบบอัตโนมัติ เช่น LINE FINANCE ซึ่งนับเป็นจุดเริ่มต้นของบริการจาก LINE ที่มีการนำแชทบอทมาใช้ โดยเป็นบริการผู้ช่วยทางการเงินในรูปแบบ Official Account ซึ่งเปิดให้เชื่อมระบบของธุรกิจเข้ากับ API โดยทั่วไปจะรู้จักในชื่อบริการ Messaging API จะมีการให้ข้อมูลด้านการเงิน เช่น หุ้น กองทุน การเงินและการลงทุน และตัวอย่างกรณีศึกษาแบรนด์คอนอร์ของบริษัท Unilever ที่ได้นำเอา LINE แชทบอทมาใช้โดยให้บริการสูตรการทำอาหารต่างๆ เช่น เมื่อมีคนเข้ามาสอบถามถึงวิธีการทำอาหารเมนูใน Official Account ของคอนอร์ ระบบจะโต้ตอบกลับอัตโนมัติเพื่อแสดงให้เห็นถึงสูตรของการทำอาหารเมนูนั้นคืออะไรและเป็นอย่างไร ด้วยรูปแบบการให้บริการที่เรียบง่ายจึงมีผู้ใช้งานกว่า 1.5 ล้านคน และนับตั้งแต่ที่คอนอร์ได้นำแชทบอทมาให้บริการนั้นสามารถสร้างยอดขายได้มากขึ้นถึง 50% [17] นอกจากนี้ยังมีบริการ LINE@ DEKA.IN.TH [BOT] เพื่อค้นหาคำพิพากษาศาลฎีกาสำหรับผู้สนใจในข้อมูลดังกล่าวอีกด้วย [18] และผลจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแอปพลิเคชัน LINE นั้นพบว่า โดยส่วนใหญ่จะศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการใช้และความพึงพอใจที่ได้รับจากแอปพลิเคชัน LINE ของคนวัยทำงาน และลักษณะทางประชากรศาสตร์ที่มีความแตกต่างกันส่งผลต่อพฤติกรรม

และความพึงพอใจจากแอปพลิเคชัน LINE [19], [20] เป็นต้น ขณะทำงานวิจัยที่สอดคล้องกับนำประโยชน์ของ แชนบอทมาช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านธุรกิจนั้น ยังมีไม่มากนัก

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1) ขั้นตอนการพัฒนาระบบการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟ

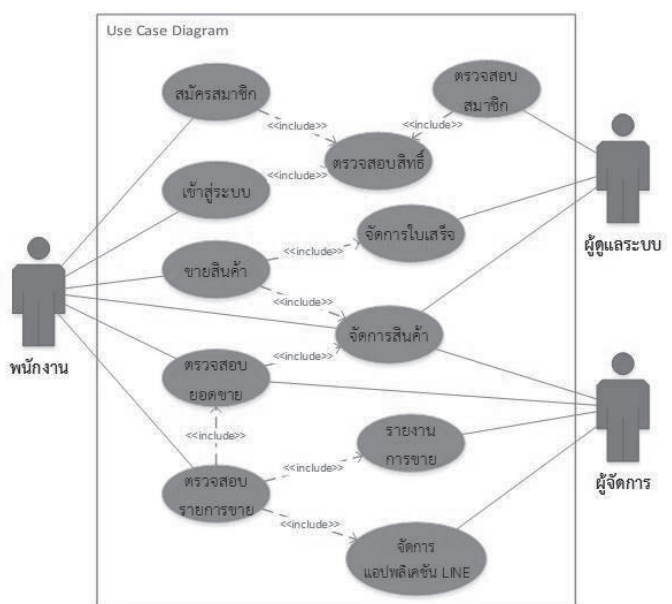
การวิจัยเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟด้วย LINE Chat Bot ได้ดำเนินการวิจัยโดยใช้แบบแผนวิธีการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) ซึ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบเป็นไปตามวงจรการพัฒนาระบบแบบ SDLC โดยเลือกใช้รูปแบบวิธีการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบวิวัฒนาการ เน้นการพัฒนาซอฟต์แวร์ต้นแบบ (Prototype Method) เพื่อให้ระบบที่ออกแบบและพัฒนาสามารถรองรับความต้องการของกลุ่มผู้ประกอบการธุรกิจร้านกาแฟได้และสามารถขยายให้เป็นระบบที่ปฏิบัติงานได้จริงในอนาคต ผู้วิจัยได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีขั้นตอนในการพัฒนาระบบดังนี้

4.1.1) การสำรวจปัญหาและระบุความต้องการเบื้องต้น (Problem Definition) โดยสำรวจปัญหาและความต้องการของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาระบบ ได้แก่ เจ้าของกิจการหรือผู้ประกอบการ ผู้จัดการร้าน พนักงานผู้ให้บริการและลูกค้าผู้ใช้บริการ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาสภาพปัจจุบันของการให้บริการ สถิติการใช้บริการ ยอดขายสินค้าและสภาพปัญหาที่เกิดจากการทำงานจริง รวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบบริหารจัดการหน้าร้าน รูปแบบการให้บริการของธุรกิจร้านกาแฟ และรูปแบบการพัฒนาชุดคำสั่งใน LINE API Chat Bot

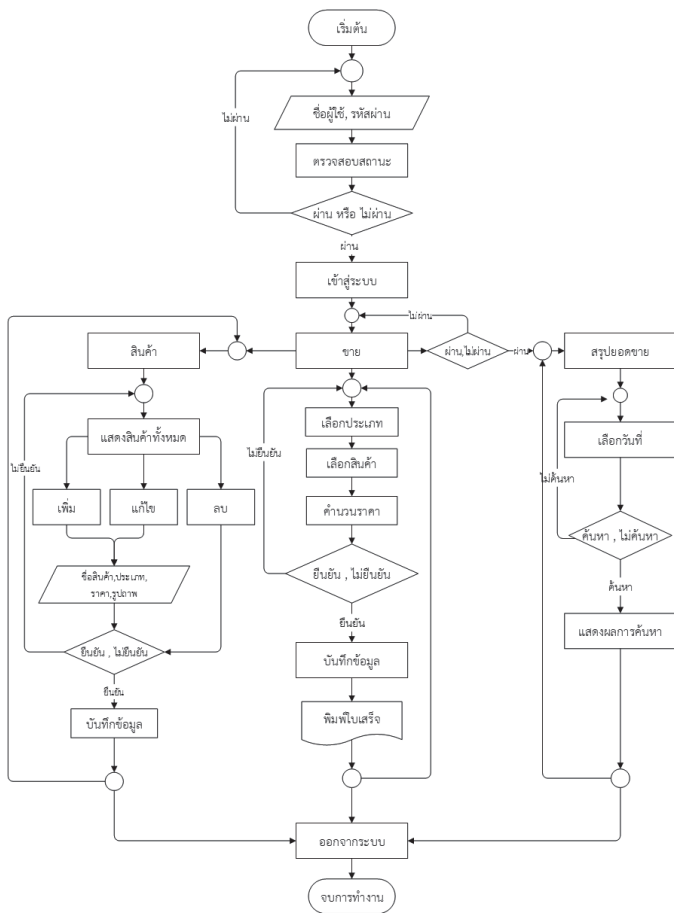
4.1.2) การวางแผนในการพัฒนาระบบที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาความสามารถของระบบที่

สามารถทำได้ การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ การพิจารณาเครื่องมือ เทคโนโลยีและทรัพยากรที่ใช้ในการพัฒนาระบบ ได้แก่ ภาษาโปรแกรม PHP, JavaScript, CSS, Bootstrap, Visual Studio Code, Adobe Photoshop CS, XAMPP Control Panel v3.2.2, และ LINE API Chat Bot รวมถึงการวางแผนเกี่ยวกับระยะเวลาและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาระบบ เป็นต้น

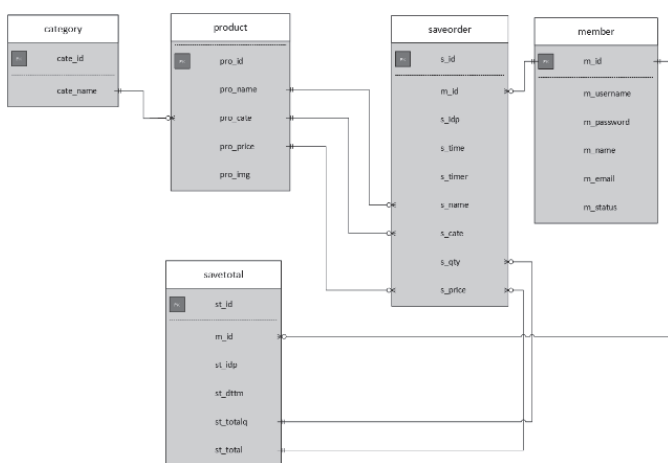
4.1.3) การวิเคราะห์ความต้องการและออกแบบระบบ โดยนำความต้องการของผู้ใช้แต่ละกลุ่มมาวิเคราะห์และออกแบบระบบเป็นฟังก์ชันงานที่เกี่ยวข้อง โดยนำเสนอการวิเคราะห์ระบบเพื่อแสดงฟังก์ชันงานหลักในรูปแบบ Use Case Diagram และ Flow Chart ดังภาพที่ 1 และภาพที่ 2 ในส่วนของการออกแบบฐานข้อมูลประกอบด้วย รายการข้อมูลที่สำคัญได้แก่ ข้อมูลสมาชิก ข้อมูลประเภทสินค้า รายละเอียดสินค้า รายการสั่งซื้อ รายการขาย ยอดขาย เป็นต้น ดังภาพที่ 3 หลังจากนั้นทำการออกแบบส่วนติดต่อระหว่างผู้ใช้กับระบบ (User Interface) และออกแบบการแสดงผลข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงและใช้งานได้ง่าย



ภาพที่ 1 แสดงการออกแบบ Use Case Diagram ของระบบ



ภาพที่ 2 แสดง Flow Chart การทำงานทั้งหมดของระบบ



ภาพที่ 3 แสดงการออกแบบ Entity Relationship Diagram (ERD)

โดยสรุปการวิเคราะห์ความต้องการของระบบที่เกี่ยวข้องกับผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการ และพนักงาน มีดังนี้

ความต้องการของระบบ

- ฟังก์ชันสมาชิกและการกำหนดสิทธิ์ของผู้ใช้งาน
- ฟังก์ชันการแสดงผลข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า
- ฟังก์ชันการจัดการข้อมูลสินค้า (Add, Delete, Update)
- ฟังก์ชันการคำนวณการขายสินค้า
- ฟังก์ชันการรายงานยอดขาย
- ฟังก์ชันการพิมพ์ใบสั่งซื้อสินค้า
- ฟังก์ชันการจัดการสต็อกสินค้า
- ฟังก์ชันการรายงานการขายผ่านทางแอปพลิเคชัน

LINE

การวิเคราะห์ตามขอบเขตการดำเนินงานของผู้ที่เกี่ยวข้องในระบบได้แก่

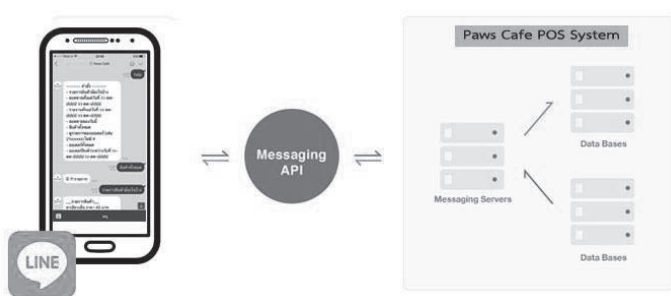
ผู้ดูแลระบบและเจ้าของกิจการ สามารถจัดการข้อมูล ต่างๆ ที่ต้องการได้ รวมถึงการกำหนดสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูลให้กับผู้ใช้ระบบ สามารถตรวจสอบการรายงานการขายผ่านทางแอปพลิเคชัน LINE ได้

ผู้จัดการ สามารถขายสินค้า จัดการข้อมูลสินค้า ประเภทสินค้า การตรวจสอบข้อมูลการขายสินค้า ยอดขาย และการจัดการสต็อกสินค้า รวมถึงการกำหนดสิทธิ์ให้แก่สมาชิกเพื่อเข้าสู่ระบบได้

พนักงาน สามารถเข้าสู่ระบบได้โดยต้องได้รับสิทธิ์ในการเข้าถึงระบบจากผู้ดูแลระบบ หรือผู้จัดการ สามารถขายสินค้าและออกไปเสร็จสิ้นค้าในระบบได้ และสามารถจัดการข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้าได้

4.1.4) การพัฒนาระบบ (Development/Coding) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ 1) การเขียนชุดคำสั่งในส่วนของ POS System พัฒนาด้วยภาษา PHP, JavaScript, CSS, Bootstrap และเชื่อมต่อฐานข้อมูล MySQL ประกอบด้วยฟังก์ชันการจัดการสมาชิก การจัดการข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า การขายสินค้า การจัดการใบสั่ง

ซื้อสินค้า การรายงานยอดขายสินค้า และการจัดการสต็อกสินค้า เป็นต้น และส่วนที่ 2) LINE API Chat Bot โดยเป็นการจัดการชุดคำสั่งของ LINE Messaging API ที่เป็นตัวกลางสำหรับการเชื่อมต่อ Server ของผู้ประกอบการเข้ากับ LINE Chat ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อส่งข้อความและโต้ตอบกับผู้ใช้ผ่าน LINE Chat ได้ โดยเน้นการควบคุมคำสั่งที่เกี่ยวกับ LINE@ Account ซึ่งเป็นบัญชีไลน์ในรูปแบบของธุรกิจ (Business Account) และการจัดการ LINE@ ที่เปิดใช้ Messaging API ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงการทำงาน LINE Messaging API Chat Bot

โดยโครงสร้างการทำงานของ LINE Messaging API จะเกี่ยวกับการส่งความต้องการเพื่อร้องขอ Webhook API เพื่อส่ง HTTPS Request มายัง URL เพื่อขอช่องทางในการติดต่อกับผู้ให้บริการเพื่อพิจารณาข้อความการตอบกลับ และการทำงานในส่วน Push and Reply Message API เพื่อแสดงการส่งและตอบกลับข้อความอัตโนมัติ รวมถึงการจัดการ Chat Extension เพื่อการปรับแต่งรูปแบบของข้อความในแชทตามที่ต้องการ นอกจากนี้ได้พัฒนางานในส่วน Front-End และ User Interface ให้สามารถเข้าถึงและใช้งานได้ง่าย และพัฒนาให้ครอบคลุมทุกฟังก์ชันงานที่เกี่ยวข้อง

4.1.5) การทดสอบและบูรณาการระบบ (Testing/ System Integration) มีเป้าหมายเพื่อทดสอบระบบให้ตรงตามความต้องการของผู้ให้บริการ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การทดสอบการทำงานของระบบให้ตรงตามคุณสมบัติของฟังก์ชัน (Functional

Testing) โดยแยกการทดสอบออกเป็นระบบย่อย ได้แก่ ระบบจัดการสมาชิก ระบบจัดการข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า ระบบการขายสินค้า ระบบจัดการใบสั่งซื้อสินค้า ระบบการรายงานยอดขายสินค้า และระบบจัดการสต็อกสินค้า โดยพิจารณาจากผลลัพธ์จริงว่าเป็นไปตามผลลัพธ์ที่คาดหวังไว้หรือไม่ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบทุกฟังก์ชันงานนั้นมีความสอดคล้องกันทุกกรณี และส่วนที่ 2) การทดสอบความพึงพอใจในการใช้งานระบบ (Usability Test) โดยทำการทดสอบจากผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้อง และนำผลที่ได้จากการทดสอบย้อนกลับ (Feedback) มาปรับปรุงแก้ไขพัฒนาระบบให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

4.1.6) การบำรุงรักษาระบบ โดยทำการตรวจสอบข้อมูลและความถูกต้องระหว่างการจัดตั้งระบบ และส่งมอบเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบ และคู่มือการใช้งานระบบ

โดยสรุปขั้นตอนการพัฒนาระบบตามวงจรการพัฒนาระบบแบบ SDLC แสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 สรุปขั้นตอนการพัฒนาระบบตามวงจรการพัฒนาระบบแบบ SDLC

ระยะ	สรุปกิจกรรม
1) การสำรวจปัญหาและระบุความต้องการ (Problem Definition)	1) สำรวจปัญหาและความต้องการของผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง 2) ศึกษาสภาพปัจจุบันและปัญหาของการให้บริการ
2) การวางแผนในการพัฒนาระบบ (Planning)	1) การพิจารณาความสามารถของระบบ และศึกษาความเป็นไปได้ของระบบ 2) การพิจารณาเครื่องมือ/เทคโนโลยีและทรัพยากรที่ใช้ 3) การวางแผนเกี่ยวกับระยะเวลาและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาระบบ

ระยะ	สรุปกิจกรรม
3) การวิเคราะห์ความต้องการและออกแบบระบบ (Analysis/Design)	1) สรุปผลการวิเคราะห์ความต้องการของระบบ 2) ออกแบบฟังก์ชันงานที่เกี่ยวข้อง 3) ออกแบบจำลองโครงสร้างฐานข้อมูล 4) ออกแบบส่วนติดต่อระหว่างผู้ใช้กับระบบ 5) ออกแบบการแสดงผลข้อมูล
4) การพัฒนาระบบ (Development)	1) การเขียนชุดคำสั่งในส่วน POS System 2) การเขียนชุดคำสั่งในส่วน LINE API Chat Bot
5) การทดสอบและบูรณาการระบบ (Testing/System Integration)	1) การทดสอบการทำงานของระบบให้ตรงตามคุณสมบัติของฟังก์ชัน (Functional Testing) 2) การทดสอบความพึงพอใจในการใช้งานระบบ (Usability Test)
6) การบำรุงรักษาระบบ	1) การตรวจสอบข้อมูลและความถูกต้อง 2) การส่งมอบเอกสารที่เกี่ยวข้องกับระบบ

4.2) กลุ่มตัวอย่างและเครื่องมือในการวิจัย

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการเก็บข้อมูล แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1) กลุ่มผู้เชี่ยวชาญในการประเมินความสามารถตามฟังก์ชันงานของระบบ จำนวน 5 คน โดยเลือกแบบจำเพาะเจาะจงที่มีความเชี่ยวชาญในการพัฒนาระบบ 3 คน และการวิเคราะห์ระบบสารสนเทศ 2 คน ส่วนที่ 2) กลุ่มพนักงานผู้ให้บริการในธุรกิจร้านกาแฟ Paws Café ซึ่งในเขตพื้นที่จังหวัดขอนแก่น จำนวน 10 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบจำเพาะเจาะจง ประกอบด้วยเจ้าของกิจการ 1 คน ผู้จัดการร้าน จำนวน 2 คน และพนักงานร้านจำนวน 7 คน ทั้งนี้เนื่องจากการพัฒนาระบบต้นแบบ จึงต้องการกลุ่มตัวอย่างที่มีความเหมาะสมเฉพาะกลุ่มธุรกิจที่เกี่ยวข้อง จึงได้เลือกเฉพาะเจาะจงเพียงกลุ่มพนักงานในธุรกิจร้านกาแฟที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

และในอนาคตหากระบบมีความเหมาะสมในการทดลองใช้งานจะเป็นโอกาสอันดีในการขยายกลุ่มตัวอย่างในรูปแบบธุรกิจที่คล้ายคลึงกันต่อไป ทั้งนี้เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ 1) เว็บไซต์แอปพลิเคชันเพื่อการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟ และแอปพลิเคชัน LINE Chat Bot 2) แบบประเมินความพึงพอใจด้านการดำเนินงานได้ตามฟังก์ชันงานของระบบ (Functional Test) และการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ (Usability Test) การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\text{Mean}=\bar{x}$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.)

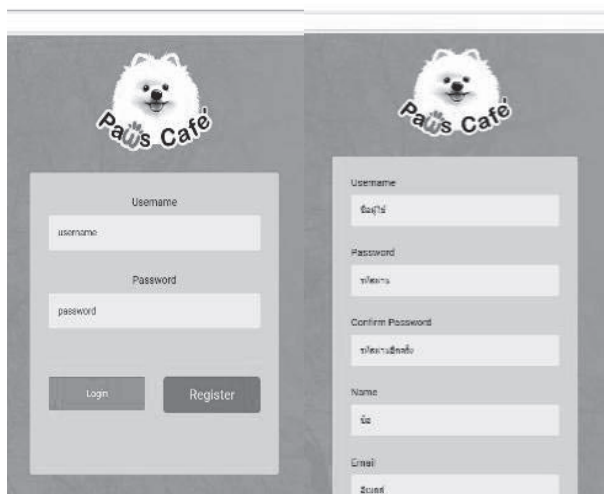
5. ผลการดำเนินงาน

5.1) ผลการพัฒนาเว็บไซต์แอปพลิเคชันเพื่อการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟ

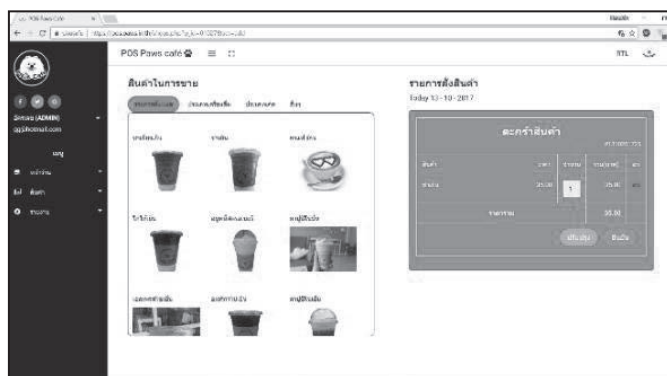
ได้ออกแบบและพัฒนาเว็บไซต์แอปพลิเคชันเพื่อการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟ เพื่อเป็นซอฟต์แวร์ต้นแบบที่สามารถรองรับความต้องการของกลุ่มผู้ประกอบการธุรกิจร้านกาแฟได้ โดยมีฟังก์ชันการทำงานของระบบที่สำคัญได้แก่ 1) การลงทะเบียนสมาชิกและการกำหนดสิทธิ์ของผู้ใช้งาน 2) การแสดงผลข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า 3) การจัดการข้อมูลสินค้า 4) การคำนวณการขายสินค้า 5) การรายงานยอดขาย 6) การพิมพ์ใบสั่งซื้อสินค้า 7) การจัดการสต็อกสินค้า โดยมีรูปตัวอย่างการทำงานที่เกี่ยวข้องในฟังก์ชันงานดังภาพที่ 5-10 ดังต่อไปนี้

5.1.1) การลงทะเบียนสมาชิกและการกำหนดสิทธิ์ของผู้ใช้งาน โดยผู้ที่เกี่ยวข้องในระบบได้แก่ ผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการ และพนักงาน สามารถลงทะเบียนสมาชิกและเข้าสู่ระบบเพื่อใช้งานในส่วนระบบงานที่เกี่ยวข้องได้ดังภาพที่ 5

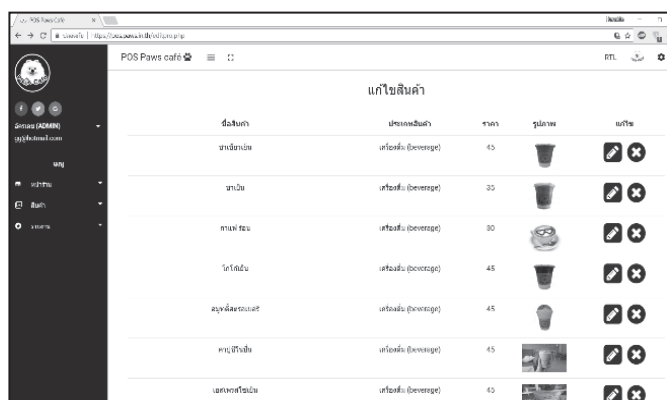
5.1.2) การแสดงผลข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า โดยระบบสามารถแสดงรายการสินค้าตามประเภทของสินค้าที่ต้องการได้ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ส่วนการลงทะเบียนเพื่อเข้าใช้งานระบบ



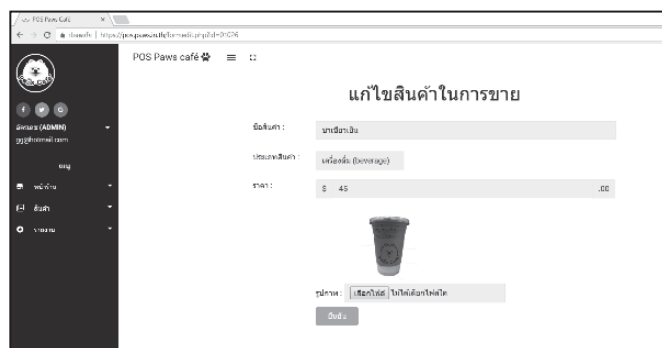
ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างรายการสินค้าภายในร้าน



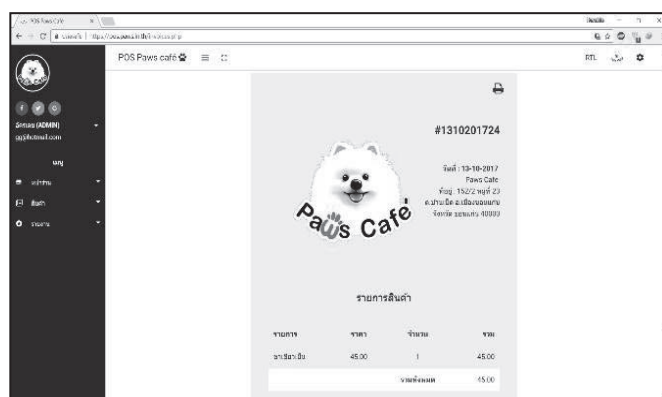
ภาพที่ 7 แสดงรายการสินค้าที่ต้องการจัดการแก้ไขหรือลบข้อมูล

5.1.3) การจัดการข้อมูลสินค้า โดยระบบสามารถจัดการข้อมูลการเพิ่ม ลบ แก้ไขและการค้นหารายการสินค้าที่ต้องการได้ ดังภาพที่ 7 และ 8

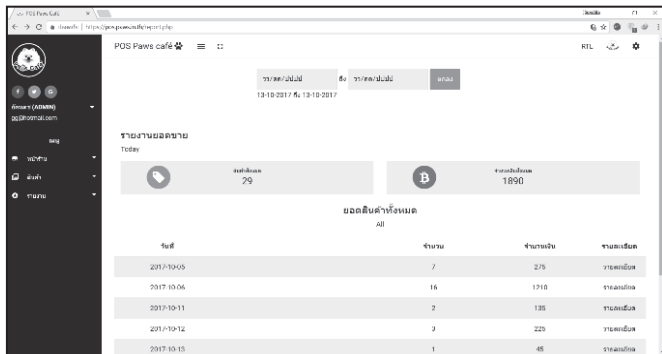
5.1.4) การคำนวณการขายสินค้า การพิมพ์ใบสั่งซื้อสินค้าและการรายงานยอดขาย โดยระบบสามารถคำนวณการขายสินค้าได้ในแต่ละรายการตามการสั่งซื้อสินค้า และสามารถจัดพิมพ์ใบสั่งซื้อสินค้าและแสดงรายงานยอดขายสินค้าในแต่ละวัน เดือน หรือตามช่วงเวลาที่กำหนดได้ ดังภาพที่ 9-11



ภาพที่ 8 แสดงการแก้ไขข้อมูลสินค้า



ภาพที่ 9 แสดงรายการสั่งซื้อสินค้า



POS Paws Café

รายงานยอดขาย Today

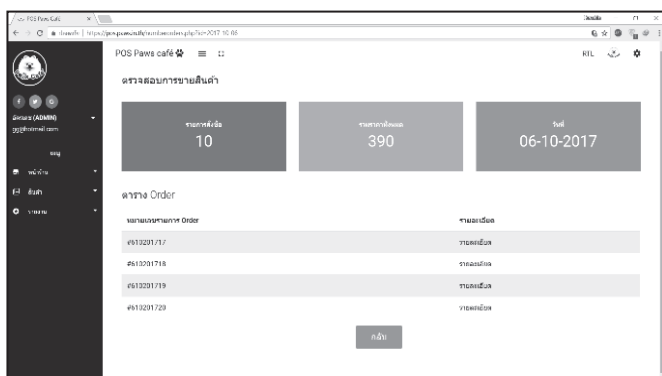
ยอดขายรวม 29

ยอดขายรวม 1890

แสดงสินค้าทั้งหมด

วันที่	จำนวน	จำนวนเงิน	รายละเอียด
2017-10-05	7	275	รายการสินค้า
2017-10-06	16	1710	รายการสินค้า
2017-10-11	2	135	รายการสินค้า
2017-10-12	3	225	รายการสินค้า
2017-10-13	1	45	รายการสินค้า

ภาพที่ 10 แสดงรายงานยอดขายสินค้า



POS Paws Café

รายงานยอดขายสินค้า

ยอดขายรวม 10

ยอดขายรวม 390

วันที่ 06-10-2017

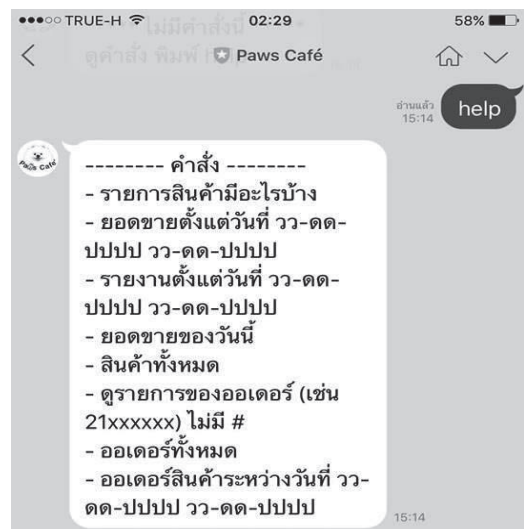
รายการ Order

หมายเลขรายการ Order	รายละเอียด
0612201717	รายการสินค้า
0612201718	รายการสินค้า
0612201719	รายการสินค้า
0612201720	รายการสินค้า

ภาพที่ 11 แสดงรายงานสั่งซื้อสินค้าในแต่ละวัน

5.2) ผลการพัฒนา LINE API Chat Bot

ผลการทำงานในส่วนของฟังก์ชัน LINE Messaging API Chat Bot ซึ่งเป็นการให้บริการโต้ตอบอัตโนมัติระหว่างผู้ใช้งานและแอปพลิเคชัน LINE เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟให้สามารถอำนวยความสะดวกในการดูรายละเอียดการขายสินค้าและการรายงานยอดขายอีกช่องทางหนึ่งที่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยลักษณะการทำงานของ LINE Messaging API Chat Bot นั้นผู้วิจัยได้เขียนชุดคำสั่งเพื่อควบคุมการแสดงผลให้แอปพลิเคชันสามารถแสดงคำสั่งที่กำหนดไว้ และสามารถโต้ตอบกลับแบบอัตโนมัติได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างคำสั่งที่เกี่ยวข้อง ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงตัวอย่างคำสั่งที่สามารถโต้ตอบกับแชทบอท

โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าแอปพลิเคชันด้วยการเพิ่ม LINE@ Paws Café หรือสแกนคิวอาร์โค้ดไลน์ (QR Code) ที่กำหนดไว้เพื่อเข้าสู่ระบบ และเมื่อเข้าสู่ระบบได้สามารถพิมพ์คำสั่งเพื่อขอความช่วยเหลือตามที่ต้องการ ระบบจะทำการค้นหารูปแบบคำสั่งและการแสดงผลที่ตรงตามความต้องการให้ได้ ดังภาพที่ 13-14



ภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างการใช้รายการคำสั่งที่ต้องการโต้ตอบกับแชทบอท



ภาพที่ 14 แสดงผลการค้นหารายการสินค้าและยอดขายตามคำสั่งที่ได้ตอบกับแชทบอท

5.3) ผลการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ

5.3.1) ผลการประเมินความพึงพอใจด้านการทำงานตามฟังก์ชันงาน (Functional Test) ของระบบบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟด้วย LINE Chat Bot จากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ออกแบบ และพัฒนาระบบสารสนเทศ จำนวน 5 คน แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันงานของระบบ

รายการประเมิน	ผลการประเมิน		
	$\bar{X}$	SD	แปลผล
1) การลงทะเบียนสมาชิกและการกำหนดสิทธิ์ของผู้ใช้งาน	4.43	0.59	ดี
2) การแสดงผลข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า	4.52	0.64	ดี
3) การจัดการข้อมูลสินค้า (เพิ่ม, ลบ, แก้ไข, ค้นหา)	4.49	0.55	ดี
4) การคำนวณการขายสินค้า	4.43	0.41	ดี
5) การรายงานยอดขาย	4.61	0.68	ดีมาก
6) การพิมพ์ใบสั่งซื้อสินค้า	4.47	0.57	ดี
7) การจัดการสต็อกสินค้า	4.34	0.49	ดี
8) การรายงานผลผ่าน LINE API Chat Bot	4.65	0.71	ดีมาก
รวม	4.49	0.58	ดี

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าผลการประเมินความพึงพอใจด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันงานของระบบจากผู้เชี่ยวชาญในภาพรวมมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.49$ และ $SD=0.58$)

5.3.2) ผลการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ (Usability Test) โดยทำการประเมินจากกลุ่มพนักงานผู้ให้บริการในธุรกิจร้านกาแฟ Paws café ในเขตพื้นที่จังหวัดขอนแก่น จำนวน 10 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบจำเพาะเจาะจง ประกอบด้วย เจ้าของกิจการ 1 คน ผู้จัดการร้าน จำนวน 2 คน และพนักงานร้านจำนวน 7 คน แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ (Usability Test)

รายการประเมิน	ผลการประเมิน		
	$\bar{x}$	SD	แปลผล
ความง่ายต่อการใช้ระบบ	4.75	0.68	ดีมาก
ความถูกต้องของข้อมูล	4.52	0.58	ดีมาก
ความเหมาะสมของการใช้ตัวอักษรสีและรูปภาพ	4.46	0.55	ดี
ความชัดเจนของข้อความที่แสดงผล	4.43	0.66	ดี
ความเหมาะสมของการจัดวางรูปแบบการแสดงผลข้อมูล	4.47	0.52	ดี
ความรวดเร็วในการประมวลผลข้อมูล เช่น การคำนวณ การแสดงรายงานยอดขาย	4.54	0.63	ดีมาก
ความปลอดภัยของข้อมูล	4.44	0.57	ดี
ความสะดวกในการใช้งานและประสิทธิภาพของการรายงานผลผ่าน LINE API Chat Bot	4.58	0.61	ดีมาก
รวม	4.52	0.60	ดีมาก

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าผลการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ (Usability Test) จากผู้ให้บริการในภาพรวมมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}$ =4.52 และ SD=0.60) โดยมีความพึงพอใจในระดับที่ดีมาก ในประเด็นด้านความง่ายต่อการใช้ระบบ ความถูกต้องของข้อมูล ความรวดเร็วในการประมวลผลข้อมูล และความพึงพอใจในประสิทธิภาพของการรายงานผลผ่าน LINE API Chat Bot

6. อภิปรายผลการวิจัย

ด้วยพฤติกรรมผู้บริโภคที่คุ้นเคยกับการแชทมากขึ้นในโลกโซเชียลส่งผลให้หลายธุรกิจหันมาให้ความสำคัญกับการปรับกระบวนการลูกค้าสัมพันธ์แบบดั้งเดิมให้เข้ากับยุคสมัยมากขึ้น แชทบอทจึงถือเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญสำหรับการตอบโต้ทั้งงานด้านธุรกิจ การขาย การสร้างความสัมพันธ์กับลูกค้าและกลุ่มผู้ใช้บริการที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงการสร้างแบรนด์อีกด้วย [12] โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าข้อมูลและสารสนเทศประเภทการรายงานยอดขายในรูปแบบต่างๆ ที่ได้รับตามการร้องขอจากผู้ให้บริการที่เกี่ยวข้องนั้น ระบบสามารถทำการรายงานยอดขายและแสดงถึงประสิทธิภาพของการรายงานผลผ่านแอปพลิเคชัน LINE Chat Bot ได้ในระดับดีมาก โดยผู้ประกอบการต่างๆ ให้ความสำคัญกับประเด็นความง่ายต่อการใช้ระบบ ความถูกต้องของข้อมูล และความรวดเร็วในการประมวลผลข้อมูล ซึ่งมีความสอดคล้องกับกรณีศึกษาจากงานวิจัยของ Pounder และคณะ [21] ที่ค้นพบว่า ผู้ใช้บริการนั้นรู้สึกดีใจที่ได้รับการตอบกลับอย่างรวดเร็วหลังจากสนทนากับแชทบอท 52% เช่นเดียวกับงานวิจัยของบริษัท Nuance Communication [22] ที่ศึกษากลุ่มตัวอย่างจากคนที่มีอายุมากกว่า 18 ปี พบว่าโดยส่วนใหญ่ผู้ตอบแบบสอบถามชื่นชอบที่จะใช้แชทบอทเพื่อที่จะเพิ่มความเร็วในการค้นหาข้อมูลมากถึง 89% และพบมีความต้องการให้แชทบอทให้บริการเฉพาะรายบุคคล (Personalized Customer Services) มากถึง 73% และต้องการให้การบริการลูกค้าเป็นไปในเชิงรุก มีการนำเสนอข้อมูลและแนะนำข้อมูลที่เป็นประโยชน์ 64% เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่ผู้ใช้บริการแอปพลิเคชันไลน์นั้นจะให้ความสำคัญในประเด็นด้านความเร็ว ความครบถ้วนด้านมีเดีย ความสนุกสนาน ความคิดเห็นที่มีต่อไอทีที่ส่งผลต่อการยอมรับแอปพลิเคชันไลน์ ความสะดวกในการใช้งานและความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการส่วนตัวของผู้ใช้บริการได้ในระดับมาก ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของศักรินทร์ ต้นสุพงษ์ [23] และรัชนิพร

นันทคุณากร [24] ในด้านปัจจัยและความพึงพอใจที่ส่งผลต่อการยอมรับแอปพลิเคชันไลน์ เป็นต้น อีกทั้งด้านการพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อสนับสนุนการทำงานให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุขญา แสงจันทร์นันท์ และศักดา จันทรประเสริฐ [25] ในแง่การสร้างแอปพลิเคชันที่มาจากทฤษฎีการวิเคราะห์และออกแบบระบบจากความต้องการจากผู้ใช้งานและสารสนเทศที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริหารในอนาคตเพื่อการปรับปรุงพัฒนาการให้บริการที่ดีขึ้นได้ ดังนั้นสรุปได้ว่าการนำเซพทอมาใช้กับองค์กรสามารถสร้างประโยชน์ในทางธุรกิจได้ในหลายแง่มุม อีกทั้งมีความสามารถในการทำงานได้บนโทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ตพีซี โน้ตบุ๊ก และคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้ง่ายในการเข้าถึงกลุ่มผู้ใช้หรือลูกค้าจำนวนมากได้ และช่วยอำนวยความสะดวกในการสื่อสารระหว่างบุคคลได้ สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของการให้บริการที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นเซพทอถือเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญสำหรับงานบริการลูกค้าในอนาคตได้

7. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟด้วย LINE Chat Bot กรณีศึกษาร้าน Paws Café มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟและนำแอปพลิเคชัน LINE Chat Bot มาเป็นเครื่องมือที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการรายงานสรุปยอดขายของสินค้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ด้วยการพัฒนาชุดคำสั่งในการจัดการ LINE Messaging API Chat Bot ที่สามารถควบคุมและแสดงผลชุดคำสั่งตามที่ผู้ใช้บริการร้องขอได้ โดยการวิจัยใช้ระเบียบวิธีการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) สำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบเป็นไปตามแนวทางของวงจรการพัฒนาระบบ (SDLC) โดยเน้นการพัฒนาซอฟต์แวร์ต้นแบบเพื่อให้ระบบที่ออกแบบและพัฒนาสามารถ

รองรับความต้องการของกลุ่มผู้ประกอบการธุรกิจร้านกาแฟได้และสามารถขยายให้เป็นระบบที่ปฏิบัติงานได้อย่างสมบูรณ์ในอนาคตได้ ผลของการพัฒนาระบบบริหารจัดการหน้าร้านของธุรกิจร้านกาแฟนั้นครอบคลุมฟังก์ชันงานหลักประกอบด้วย ฟังก์ชันการลงทะเบียนสมาชิก และการกำหนดสิทธิ์ของผู้ใช้งาน การแสดงผลข้อมูลสินค้าและประเภทสินค้า การจัดการข้อมูลสินค้า การคำนวณการขายสินค้า รายงานยอดขาย การพิมพ์ใบสั่งซื้อสินค้า การจัดการ สต็อกสินค้า และการรายงานผลยอดขายและรายการสินค้า ผ่าน LINE API Chat Bot และได้ประเมินความสามารถตามฟังก์ชันการทำงานของระบบ (Functional Test) และประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ (Usability Test) โดยผลจากการประเมินความสามารถตามฟังก์ชันการทำงานของระบบพบว่าระบบสามารถทำการรายงานยอดขายและแสดงถึงประสิทธิภาพของการรายงานผลผ่าน LINE API Chat Bot ได้ในระดับดีมาก และมีภาพรวมของความสามารถในการทำงานได้ตามฟังก์ชันงานหลักต่างๆ อยู่ในระดับดี และผลการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบในภาพรวมอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{x}=4.52$) โดยให้ความสำคัญกับความง่ายต่อการใช้ระบบ ความถูกต้องของข้อมูล ความรวดเร็วในการประมวลผลข้อมูล และความพึงพอใจในประสิทธิภาพของการรายงานผลผ่าน LINE API Chat Bot ในระดับที่ดีมาก

8. เอกสารอ้างอิง

- (1) Voice TV, 2560. ปี 2560 ธุรกิจร้านกาแฟยังเติบโตได้อีก (สืบค้นจาก) <https://www.voicetv.co.th/read/466497>.
- (2) MGR Online, 2559. ปัจจัยและความท้าทาย...แจ้งเกิด “ธุรกิจร้านกาแฟ” เจาะตลาด 3 หมื่นล้าน (สืบค้นจาก) <http://www.manager.co.th/iBizChannel/ViewNews.aspx?NewsID=9590000114761>.
- (3) ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2557. ถึงเวลาธุรกิจร้านกาแฟต้องปรับตัว (สืบค้นจาก) <http://thaismenews.com/index.php?modules=article&file=view&id=1398328651>.
- (4) Nuttachit, 2560. ตลาดร้านกาแฟโต กสิกรไทยขอเปิดตลาดสินเชื่อ (สืบค้นจาก) <http://marketeer.co.th/archives/117436>.

- (5) Foodstory, 2560. เริ่มต้นเปิดร้านกาแฟ (สืบค้นจาก) <https://www.foodstory.co/blog/open-coffee-cafe>.
- (6) พัชรดา ไพเราะ, 2556. การออกแบบฐานข้อมูลธุรกิจร้านกาแฟและเบเกอรี่. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- (7) ชาคิต จองไว, 2555. โปรแกรมขายสินค้า กรณีศึกษา ร้านค้าคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ. สารนิพนธ์ วท.ม., สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- (8) บริษัทเจ้าพระยาคอมพิวเตอร์ จำกัด, 2554. ระบบ POS คืออะไร? (สืบค้นจาก) http://www.chaophayacomputech.com/news/news_content_id=25570226-1.php.
- (9) ธนัทธ นุศราทิศ, 2559. อิทธิพลของการสื่อสารเนื้อหาโปรแกรมลูกค้าสัมพันธ์ผ่านสื่อ Chatbot ต่อระดับการมีส่วนร่วมของลูกค้า. สารนิพนธ์ วท.ม., การบริหารการตลาด, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- (10) Wallace, R., 2011. Chatbot (สืบค้นจาก) <https://www.chatbots.org/chatbot/>.
- (11) ชุมพล โมฆรัตน์, วรางคณา อุ่นชัย และสุกัญญา มารแพ, 2016. แอปพลิเคชันแชทบอทเพื่อการวินิจฉัยโรคเบาหวานด้วยออนไลน์. The 20th International Computer Science and Engineering Conference 2016, ICSEC 2016, Chiangmai, Thailand, 14 - 17 December 2016 page 519-524.
- (12) กรุงเทพธุรกิจ, 2560. ทำไม่ต้อง CHATBOT (สืบค้นจาก) <http://www.bangkokbiznews.com/blog/detail/641779>.
- (13) myclever™ Agency, 2016. Chat bots a consumer research study. (สืบค้นจาก) <https://www.mycleveragency.com/media/download/0c44f0c083879818a0d2347ab948752b>.
- (14) Voice TV, 2560. คนไทยใช้ LINE อันดับสองของโลก (สืบค้นจาก) <https://www.voicetv.co.th/read/472506>.
- (15) กฤษณี เสือใหญ่ และ พัทธนี เขยจรยา, 2559. พฤติกรรมการใช้แอปพลิเคชันไลน์ ความพึงพอใจและการนำไปใช้ประโยชน์ของคนในกรุงเทพมหานคร. การประชุมสัมมนาวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2559 คณะนิเทศศาสตร์และนวัตกรรมการจัดการ, 1 กรกฎาคม 2559, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- (16) Samrid, 2560. LINE BOT คืออะไร (สืบค้นจาก) <https://samrid.com/waht-is-line-bot/>.
- (17) นิตยสารดิจิทัล เอจ, 2559. เทรนด์การใช้ Bot กำลังมาแทนที่ App (สืบค้นจาก) <https://www.digitalagemag.com/เทรนด์การใช้-bot-กำลังมาแทนที่-app/>.
- (18) ฎีกา, 2560. ค้นหาฎีกาด้วย LINE BOT (สืบค้นจาก) <https://deka.in.th/deka-line-bot.php>.
- (19) เกศปรียา แก้วแสนเมือง และพรจิต สมบัติพานิช, 2559. พฤติกรรมการใช้และความพึงพอใจจากแอปพลิเคชันไลน์ (Line) ของผู้ทำงานในเขตกรุงเทพมหานคร. สารนิพนธ์ วารสารศาสตร์ มหาบัณฑิต (การจัดการการสื่อสารองค์กร), มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์.
- (20) ศุภศิลป์ กุลจิตต์เจืองวงศ์, 2556. ไลน์รูปแบบการสื่อสารบนความสร้างสรรค์ของสมาร์ทโฟน: ข้อดีและข้อจำกัดของแอปพลิเคชัน. วารสารนักบริหาร: Executive Journal, ปีที่ 33, ฉบับที่ 4 : 42-54.
- (21) Pounder et al, 2016. Humanity in the machine report. (สืบค้นจาก) https://www.mindshareworld.com/sites/default/files/MINDSHARE_HUDDLE_HUMANITY_MACHINE_2016_0.pdf.
- (22) Nuance Communication, Inc, 2016. Majority of Consumers Want Intelligent, Personalized Dialogue with Customer Service. (สืบค้นจาก) <https://www.nuance.com/about-us/newsroom/press-releases/opus-intelligent-assistants-and-authentication-conference-2016.html>.
- (23) ศักรินทร์ ต้นสุพงษ์, 2558. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับแอปพลิเคชันไลน์. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการจัดการ, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร.
- (24) รัชนิพร นันทคุณากร, 2558. การศึกษาความพึงพอใจในการใช้แอปพลิเคชันจากไลน์ของนักศึกษาคณะวิทยาการจัดการ. จุลนิพนธ์หลักสูตรบริหารธุรกิจบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- (25) สุขภา แสงจันทร์นันท์ และศักดา จันทร์ประเสริฐ, 2558. การวิเคราะห์และออกแบบระบบสารสนเทศเพื่อสนับสนุนงานสรรหาคัดเลือกบุคลากร กรณีศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงงานทอวนเดชาพานิช โรงงาน 1 จังหวัดขอนแก่น. วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ปีที่ 13, 147-157.

การศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลผู้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของ กองทัพบก โดยใช้เทคนิคการจัดกลุ่มและแสดงผลด้วยกราฟดาต้าวิซวลไลเซชัน A Study and Data Analytics for Selected AFAPS (Army Cadet) Candidates Using Classification Technique and Graph Data Visualization

พันโทหญิง รุ่งรัศมี สุวรรณวัฒนา^{1*}
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ มั่งสิงห์²

¹*กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

²สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

*Corresponding Author. E-mail: rungrasamee.su@crma.ac.th

(Received: November 27, 2017; Revised: December 26, 2018; Accepted: June 6, 2018)

บทคัดย่อ : การศึกษาครั้งนี้ได้ออกแบบการศึกษาด้วยวิธีวิจัยแบบผสมวิธีจากเอกสาร (Document Research) และแบบการอธิบายต่อเนื่อง (Explanatory Sequential Mixed Methods) จากการศึกษาเอกสารและข้อมูล เพื่อนำเสนอตัวแทนข้อมูลด้วยกราฟดาต้าวิซวลไลเซชัน มุ่งเน้นที่การเลือกตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจงเป็นหลัก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์และการค้นพบรูปแบบของผู้ที่ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ระหว่างปีการศึกษา 2554-2558 จำนวน 1,226 เรคอร์ด ผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดในการวิเคราะห์ข้อมูลและจำแนกข้อมูลด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ สถิติพื้นฐาน และแสดงผลด้วยกราฟดาต้าวิซวลไลเซชันในการเล่าเรื่องที่ผ่านมา และกำหนดปัจจัยพื้นฐานออกได้เป็น 7 ปัจจัยหลัก ได้แก่ อายุ เกรดเฉลี่ยระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 วุฒิการศึกษาตอนสอบเข้า สถาบันการศึกษาเดิม จังหวัดสถานศึกษา ภูมิภาค สถานภาพครอบครัว โดยข้อมูลปัจจัยพื้นฐานเหล่านี้เป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ส่งผลให้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหาร ผลการศึกษาพบว่า จากการจำแนกตามปัจจัยอายุ พบว่า อายุ 17 ปี คือ ผู้ที่เข้ารับการศึกษามีจำนวนสูงสุดในแต่ละปีการศึกษา สามารถอนุมานได้ว่าเมื่อการสังสมประสบการณ์ ความรู้ ทักษะ ความสามารถในระดับหนึ่งแล้วจะสามารถผ่านการทดสอบได้สูง ด้วยการพยากรณ์ข้อมูลแนวโน้มจำนวนผู้ได้เข้ารับการศึกษ โดยใช้วิธีคาดคะเนแนวโน้มจากสมการแนวโน้มเชิงเส้น พบว่า มีจำนวนผู้เข้ารับการศึกษามีเกณฑ์เพิ่มขึ้น คิดเป็น 20.23 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้ผ่านการสอบและเข้ารับการศึกษาคือ 245 คน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานข้อมูลคือ 1.79 เนื่องจากค่าเฉลี่ยข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหรือความต้องการจากหน่วยขึ้นตรงร้องขอในแต่ละปีการศึกษา และการจำแนกตามปัจจัยเกรดเฉลี่ยระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์แนวโน้มผลการเรียนแทนค่าด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อนำข้อมูลเข้าโดยใช้เครื่องมือการทำเหมืองข้อมูลด้วย RapidMiner และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับพบว่า แนวโน้มของกลุ่มข้อมูลเกรดเฉลี่ยช่วง 3.50-4.00 อยู่ในระดับดีมาก มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูล และค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 3.51 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานข้อมูลคือ 0.40 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ผลการศึกษาทั้งสองนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบการตัดสินใจ

และวางแผนนำเสนอในการจัดการข้อมูล และการแสดงผลด้วยกราฟดาต้าวิซวลไลเซชันทำให้มองเห็นด้วยภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น สามารถอนุมานได้ว่า อายุและเกรดเฉลี่ยในระดับ ม.3 มีส่วนสำคัญอันดับต้นของผู้เข้ารับการศึกษา และสามารถนำไปเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์พฤติกรรมและการจัดกลุ่มทางการเรียนต่อไปได้

คำสำคัญ: ดาต้าวิซวลไลเซชัน กราฟ การจัดกลุ่ม การทำเหมืองข้อมูล

Abstract : This study was designed based on Document Research and Explanatory Sequential Mixed Methods to represent data with visualization and to focus on selecting specific specimens. The purpose of this study was to analyze the relationship and the pattern of those who were selected as an Army Cadet from 2554-2558. The researcher proposed the concept of data analysis and classification using tree-based decision-making and statistical data visualization. There are seven main attributes for the analysis: age, GPA., degree, school, province, region and family status. These attributes have effects on being selected as a Pre-cadet. By classification by age, the highest number of students in each academic year is 17. It can be deduced that when one acquires knowledge, skill, and ability, one has high test scores and is selected. By forecasting trend data, the number of people admitted to the program was an Army Cadet. By predicting trend from linear equation, it was found that the number of selected candidates was 20.23% increase. The mean was 245 and the standard deviation was 1.79. Depending on the external factors or requests from military units which requested directly in each academic year. To classify students by the factors of grade point average of Mathayomsuksa 3, this study represents relationship between the learning outcomes by using the exponential function. When importing data using the RapidMiner data mining tool, then the results are compared. The researcher found that trends of the GPA ranging from 3.50 to 4.00, which are very good. The mean was 3.51 and the standard deviation of the data was 0.40 which was acceptable. The results of this study are part of analysis of the decision making data and the planning of the information presented to the military personnel. It can be assumed that the average age at the Mathayomsuksa 3 level is the most important and ability to learn and it can be used as model for learning group. Data visualization makes the results of analysis more justified.

Keywords: Data Visualization, Graph, Classification, Data Mining

1. บทนำ

การศึกษาทางทหารนับเป็นรากฐานเพื่อการพัฒนา นายทหารที่มีความเพียบพร้อมทั้งด้านวิชาการและ วิชาทหาร และในปัจจุบันทหารมีบทบาทและทำหน้าที่ สำคัญอย่างยิ่ง มีความมั่นคงเป็นปึกแผ่นมาอย่างยาวนาน เริ่มต้นตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2411 [1] สถาบันการศึกษา ของทหารและตำรวจของประเทศไทยมีกระบวนการสอบ และผ่านการคัดเลือกผู้สมัครที่เป็นบุคคลพลเรือนก่อนเข้า เป็นนักเรียนทหารหรือตำรวจเป็นประจำทุกปีการศึกษา ข้อความสำคัญประการหนึ่งตามคำบอกเล่าว่า “กว่าจะ เป็นนักเรียนนายร้อย” ย่อมมีนัยสำคัญหลายประการ โดย คำว่า “นักเรียนนายร้อย” นั่นคือ ผู้ที่จะสำเร็จการศึกษา ออกไปเป็นนายทหารสัญญาบัตรหลักของกองทัพ [2] กระบวนการหล่อหลอมจึงเน้นให้นักเรียนมีความพร้อม อย่างรอบด้าน ประมาณต้นเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน ในแต่ละปีการศึกษามีจำนวนผู้สมัครสอบที่จบชั้นมัธยมศึกษา ปีที่ 3 ขึ้นไป อายุไม่เกิน 17 ปี ต้องสอบผ่านการคัดเลือก เข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนกองทัพบก โดย ผ่านรอบภาควิชาการจำนวนโดยประมาณ 700 คน และ ผ่านการทดสอบร่างกายตรวจร่างกาย และสอบสัมภาษณ์ ประมาณ 200 คน จากยอดผู้สมัครในแต่ละปีทั้งสิ้น ประมาณ 20,000 คน และผนวกรวมกับกลุ่มนักเรียน นายสิบเหล่าวิทยากรต่างๆ ที่ได้รับการคัดเลือกจากผู้ที่มี ความรู้ความสามารถ โดยประมาณ 20 คน ประการสำคัญ คือ ผู้วิจัยได้มองย้อนกลับไปถึงภูมิหลังของนักเรียน นายร้อย ได้แก่ การศึกษาหรือการเริ่มต้นทางการศึกษา [3] คุณภาพทางการเรียน ได้แก่ ผลการเรียนหรือเกรด เฉลี่ย ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีเรื่องราว (Story) มีความน่าสนใจ อย่างยิ่งและมีความต่อเนื่องกันจนกลายเป็นข้อมูลที่มี จำนวนปริมาณมากขึ้น สามารถนำมาเล่าเรื่องราวจนเกิด การค้นพบความรู้ในฐานข้อมูล (Knowledge Discovery in Database: KDD) หรือรูปแบบข้อมูล (Pattern Data) [4] สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการสนับสนุนการวางแผน และตัดสินใจของผู้บังคับบัญชาได้ในอนาคต

เนื่องจากปัจจุบันได้มีการรายงานสรุปประจำปี การศึกษาและรูปแบบร้อยละ [5] เพื่อรวบรวมจัดทำสรุปเป็น ลายลักษณ์อักษรหลังจากจบสิ้นกระบวนการคัดเลือกแล้ว และนำเสนอข้อมูลสารสนเทศเพื่อรายงานสรุปผลเพื่อ การบริหารจัดการเบื้องต้นและผู้บังคับบัญชามองเห็น สารสนเทศในมิติต่างๆ ข้อมูล สารสนเทศ และองค์ ความรู้ และสามารถทำนายแนวโน้มของการสมัครเป็นนักเรียน นายร้อยและสอบผ่านการคัดเลือกเข้ารับการศึกษ โดย ข้อมูลต่างๆ เหล่านั้นถ้านำมาวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อการค้น พบความรู้หรือพบรูปแบบใหม่ ที่อาจจะบ่งชี้ให้ทราบถึง กลุ่มของผู้สมัครสอบจึงมีความจำเป็นและเป็นประโยชน์ อย่างมากต่อหน่วยงานทางทหารและตำรวจ จะเกิด ประโยชน์สูงสุดเมื่อถุณำมาวิเคราะห์ ประยุกต์ใช้ในบริบท ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทข้อมูลทางการศึกษา [6-8] ได้แก่ ข้อมูลของนักเรียนนายร้อยซึ่งจัดอยู่ในระดับ อุดมศึกษา เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งที่ได้รวบรวมจากการบันทึก ไว้ในแต่ละปี อาจจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ต่างๆ ตาราง หรือฐานข้อมูล เมื่อปริมาณข้อมูลมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น พบว่า ความรู้จากการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) [9] มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการสกัดหรือสืบค้น ความรู้ที่น่าสนใจในข้อมูลปริมาณมาก [10] สามารถนำมาใช้ ประกอบการตัดสินใจของผู้บังคับบัญชาในการวางแผน งานทั้งระยะสั้นและระยะยาว ผู้วิจัยได้ศึกษาและประยุกต์ ตัวแบบนักเรียนนายร้อยด้วยวิธีการรวมกลุ่ม (Clustering) และการค้นพบตัวแบบที่เกี่ยวข้องกันในลักษณะและ สถานภาพของนักเรียนนายร้อย เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ ในองค์ประกอบของนักเรียนนายร้อย โดยจัดให้เป็น กระบวนการที่อยู่ในส่วนหลัง (Back State) และแสดงผล ด้วย “กราฟดาต้าวิซวลไลเซชัน” ที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการเป็นตัวแทนข้อมูลสารสนเทศ [11] จัดให้เป็น กระบวนการที่อยู่ในส่วนหน้า (Front State) เพื่อถ่ายทอด การเล่าเรื่องด้วยการมองเห็นด้วยภาพได้

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาและวิเคราะห์เอกสาร (Document Research) รายงานเป็นหลัก รายงาน

สถานภาพนักเรียนเตรียมทหาร กลุ่มตัวอย่างได้แก่ ชุดข้อมูลผู้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 ด้วยการทำให้เหมือนข้อมูลและแสดงผลด้วยกราฟตาต้าวิซวลไลเซชัน เพื่อการอธิบายและการค้นพบความสัมพันธ์ของผู้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารเท่านั้น

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ และการค้นพบรูปแบบผู้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ด้วยการวิเคราะห์และจำแนกข้อมูลโดยใช้เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจและแสดงผลด้วยกราฟตาต้าวิซวลไลเซชัน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

วิจักขณ์ ศรีสังจะเลิศวาจา และดุขุฎี ประเสริฐธิตพิงษ์ (2557) [5] ได้นำเสนอบทบาทและความสำคัญของการทำให้เหมือนข้อมูลทางการศึกษา ได้อธิบายให้สามารถเข้าใจและกระชับมากขึ้นว่า การทำให้เหมือนข้อมูลการวิซวลไลเซชัน มีเป้าหมายสองด้าน ได้แก่ ด้านการทำนาย (Predictive Data Mining) สำหรับค้นหาตัวแบบที่อธิบายจากข้อมูลที่ได้เตรียมการไว้ ด้วยวิธีการจำแนกประเภท (Classification) ทำนาย (Prediction) หรือคาดคะเน (Estimation) ปรากฏการณ์หรือข้อมูลที่เกิดขึ้น ด้านการอธิบาย (Descriptive Data Mining) เป็นการผลิตสารสนเทศใหม่บนพื้นฐานของชุดข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อวิเคราะห์ทำความเข้าใจข้อมูลเดิม โดยค้นหารูปแบบ และความสัมพันธ์ที่ซ่อนอยู่ภายในชุดข้อมูล จะเห็นได้ ว่าการทำเหมือนข้อมูลจะต้องอาศัยข้อมูลปริมาณมากซึ่ง อาจจะเก็บอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น ฐานข้อมูล คลังข้อมูล ไฟล์เวิร์กชีท (Worksheet File) และเว็บ (Web) เป็นต้น ความรู้และการใช้ประโยชน์จากการทำให้เหมือนข้อมูลทางการศึกษานั้น ผู้บริหารสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้มาใช้เป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจและวางแผน

งาน และให้ความเห็นว่าข้อมูลองค์ประกอบพื้นฐานการศึกษามีหลายองค์ประกอบที่มีความความสัมพันธ์ซับซ้อนและปริมาณข้อมูลมาก การทำให้เหมือนข้อมูลจะช่วยสกัดความรู้จากความสัมพันธ์ที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล ค้นหากลุ่มเป้าหมายที่เข้าเรียน การทำนายสมรรถนะนักศึกษา เพื่อเป็นการแนะนำกระบวนเรียนที่เหมาะสมแก่นักศึกษา และปรับปรุงหลักสูตรให้สอดคล้อง พัฒนาศักยภาพของสถาบันการศึกษาในอนาคตได้

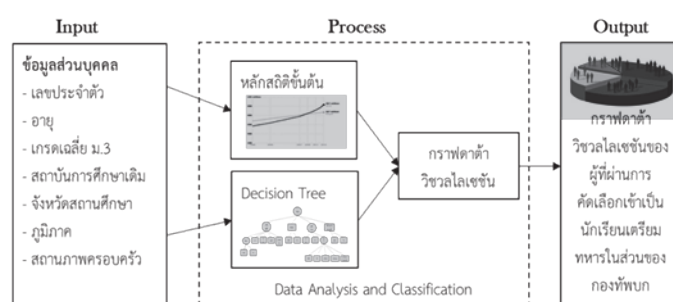
Matthew Michael Brehmer (2560) [6] ได้นำวิซวลไลเซชันมาใช้ในบทสรุปของงาน โดยเรียงลำดับงานในการวิเคราะห์ข้อมูล จากคำถามหลัก 2W1H ทำไม ข้อมูลถึงจะมองเห็นด้วยภาพ งานอะไรบ้างที่ขึ้นต่อกัน ในกระบวนการอินพุตและเอาต์พุต และวิธีการแสดงงานในแง่ของการเข้ารหัสภาพและตัวเลือกการออกแบบปฏิสัมพันธ์กัน มาช่วยแก้ปัญหาการเชื่อมโยงข้อมูล ความน่าสนใจ และการเข้ารหัสภาพ และตัวเลือกการออกแบบปฏิสัมพันธ์กัน การจำแนกประเภทจากเครื่องมือในการวิเคราะห์การศึกษาการสัมภาษณ์แต่ละคนที่มองเห็นมิติข้อมูลที่ลดลงด้วยในด้านต่างๆ ในโดเมนแอปพลิเคชันผลวิเคราะห์สิ่งที่พบ จากการอธิบายงานด้วยการเปรียบเทียบ และการ Cross-Pollination ตัวเลือกการออกแบบภาพในโดเมนแอปพลิเคชัน การ Mapping ใช้การประยุกต์แบบย้อนกลับ การประเมินผลการศึกษาล้างการใช้งานเครื่องมือวิเคราะห์ภาพในด้านสื่อเชิงสืบสวนและการศึกษาออกแบบวิซวลไลเซชันในด้านการจัดการพลังงานจำแนกตามลำดับงานได้ 5 หมวดหมู่ที่เกี่ยวข้องกันกับแสดงผลข้อมูลที่ลดลงอย่างมาก ผลคือ การจำแนกประเภทนั้นวัตถุประสงค์เพื่อแจ้งการออกแบบเครื่องมือและเทคนิคใหม่ สำหรับการแสดงผลข้อมูลนี้ ประเมินประสิทธิภาพของการจำแนกประเภทเครื่องมือวิซวลไลเซชันสำหรับการตรวจสอบการเก็บรวบรวมเอกสารข้อความขนาดใหญ่ ได้ศึกษาลักษณะงานที่เป็นนามธรรมสองแบบที่เกี่ยวกับการทำให้เหมือนเอกสาร และออกแบบนำเสนอเป็นบทเรียนด้วยเครื่องมือวิซวลไลเซชันสำหรับเอกสารข้อมูล

พรรณา บุตรเอก และสุรเดช บุญลือ (2557) [11] ได้ศึกษาตัวแบบพยากรณ์โอกาสสำเร็จการศึกษาของนักศึกษาชุดข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่นำมาใช้ทดสอบเป็นข้อมูลของนักศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตร 4 ปี สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ ระหว่างปีการศึกษา 2547-2551 จำนวนทั้งสิ้น 138 ระเบียน 18 คุณลักษณะ ชุดข้อมูลที่ได้นำมาใส่ตัวแบบพยากรณ์โอกาสสำเร็จการศึกษาของนักศึกษา ซึ่งจะใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM) เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) และเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ (BP-ANN) พยากรณ์ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่ใช้เคอร์เนลฟังก์ชันแบบ SVM-NP SVM-RBF และ SVM-PUK ให้ค่าความแม่นยำในการพยากรณ์เท่ากันที่ร้อยละ 87.68 โดยการทดสอบประสิทธิภาพตัวแบบจะใช้วิธีไขว้ทบ 15 ส่วน ส่วนตัวแบบพยากรณ์ C4.5 และ BP-ANN ให้ค่าความแม่นยำร้อยละ 83.33 และ 84.36 ตามลำดับ สรุปได้ว่าตัวแบบพยากรณ์ SVM-PK เป็นตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์โอกาสสำเร็จการศึกษาของนักศึกษา

Zhou Feiner และคณะ [12] [13] ได้แบ่งกลุ่มการนำเสนอข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม ตามเป้าหมายของการใช้งาน ได้แก่ กลุ่มการแจ้งให้ทราบ ประกอบด้วยรายละเอียดของข้อมูล และการสรุปข้อมูล (Summarization) และกลุ่มการใช้งาน ประกอบด้วย การสำรวจข้อมูล (Data Exploration) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลจากแหล่งที่มา การค้นหา การจัดอันดับ วัตถุประสงค์สำคัญในการผสมผสานงานสำหรับการประเมินวิซวลไลเซชัน ได้แก่ การระบุ (Identify) โดยอ้างอิงหลักการของสถานที่ (Where) อะไรบ้าง (What) หรือ ใคร (Who) และเมื่อไร (When) [14] การเปรียบเทียบ (Compare) ระหว่างค่าหรือชนิด เวลา การจัดอันดับ (Rank) ได้แก่ อันดับหนึ่งหรืออันดับสุดท้าย ดีที่สุดหรือแย่ที่สุด โกลที่สุทธหรือโกลที่สุทธ อีกประการที่สำคัญคือ การเกี่ยวเนื่อง

กัน (Associate) อาทิ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแนวโน้มกับเวลา อาทิ เป็นเหตุเป็นผลกัน

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ผู้วิจัยได้ออกแบบแนวคิดกระบวนการการศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ดังภาพที่ 1 และกำหนดตัวแปรอิสระได้แก่ ปัจจัยส่วนบุคคล แบ่งออกเป็น อายุ เกรดเฉลี่ย ม.3 วุฒิมัธยมศึกษาตอนสอบเข้า สถาบันการศึกษาเดิม จังหวัด สถานศึกษา สถานภาพครอบครัว และตัวแปรตาม ได้แก่ ปีการศึกษา



ภาพที่ 1 แนวคิดกระบวนการในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ได้ออกแบบการศึกษาด้วยวิธีวิจัยแบบผสมวิธีจากเอกสาร (Document Research) และแบบการอธิบายต่อเนื่อง (Explanatory Sequential Mixed Methods) จากการศึกษาเอกสารและข้อมูลได้แก่ วิธีการแบบเฉพาะเจาะจง เพื่อศึกษาและค้นหาข้อมูลเชิงลึกในการขยายผลการศึกษาและนำผลที่ได้มาประมวลในการวางแผนด้านการศึกษาทางทหารของผู้บังคับบัญชาสำหรับนักเรียนทหาร [15] จากการศึกษาวิเคราะห์เอกสารและข้อมูล ได้ออกแบบการจัดการข้อมูลโดยร่างแนวคิดกระบวนการในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย กระบวนการอินพุต คือ ข้อมูลส่วนบุคคล กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการจำแนกกลุ่ม ประกอบด้วยหลักสถิติขั้นต้นและแผนภาพต้นไม้ตัดสินใจ และกระบวนการเอาต์พุตด้วยการแสดงผลการมองเห็นด้วยภาพเชิงกราฟค่าตัวแปรอิสระ

4.1 การจัดเตรียมข้อมูล

การวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังจากกลุ่มตัวอย่างผู้ที่ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 จำนวนข้อมูล 1,226 เรคอร์ด โดยใช้วิธีการแบบผสมผสาน ประกอบด้วย การสัมภาษณ์แบบเจาะลึกรายบุคคล (In-Depth Interview) จากผู้เชี่ยวชาญ และผู้วิจัยเป็นเครื่องมือในการศึกษาข้อมูลจากเอกสาร (Documents) แผ่นงาน (Worksheets) ฐานข้อมูล (Database) เนื้อหา (Content) แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ การคัดเลือกข้อมูล (Select Data) การทำความสะอาดข้อมูล (Cleansing Data) และการถ่ายโอนข้อมูล (Transform Data) มีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การคัดเลือกข้อมูล ที่จะนำมาใช้โดยเลือกเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จำนวน 7 คุณลักษณะ คือ กลุ่มตัวอย่างผู้ที่ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 จำนวนเรคอร์ดทั้งสิ้นคือ 1,226 ได้แก่ 243 245 245 245 248 คน ตามลำดับ และกำหนดข้อมูลที่สมบูรณ์พร้อมนำไปวิเคราะห์

4.1.2 การทำความสะอาดข้อมูล เพื่อเตรียมความพร้อมข้อมูลด้วยวิธีการดังนี้

(ก) จัดการค่าว่าง (Null) โดยใส่ค่า 0

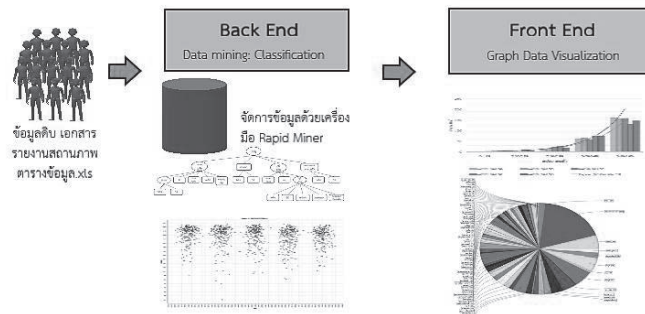
(ข) ปรับข้อมูลใส่ค่าเพื่อความเหมาะสม

(ค) จัดการค่าในคอลัมน์ “เลขประจำตัว”

จะต้องเป็นค่าที่ไม่ซ้ำกัน และคอลัมน์ที่อยู่หัวแถวกำหนด “สถานศึกษาเดิม” “สถานภาพครอบครัว แทนค่าว่างด้วยอื่นๆ” ดังนั้น ทุกแถวจะต้องมีค่าเดียว

(ง) ตัดเรคคอร์ดข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องและไม่สมบูรณ์ออก

4.1.3 การถ่ายโอนข้อมูล นำตารางที่ใช้ในการวิเคราะห์มาเชื่อมโยงกัน ให้มีความพร้อมนำไปใช้งาน



ภาพที่ 2 แผนภาพการถ่ายโอนข้อมูล

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

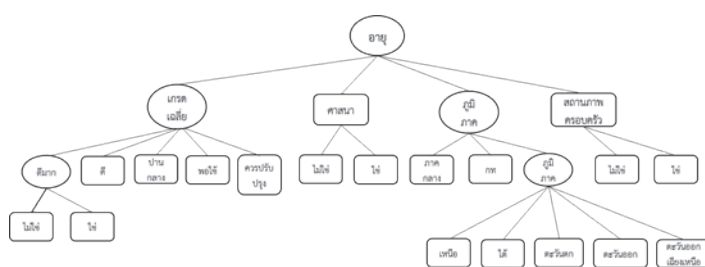
เป็นขั้นตอนเพื่อการค้นหารูปแบบในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาแบบผสมผสานได้ออกแบบการวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของรูปแบบหรือความหมายที่ซ่อนเร้นอยู่ เพื่อหาข้อสรุปเชิงนามธรรมจนเกิดองค์ความรู้จากระดับล่างขึ้นสู่ระดับบน เรียกว่า “การสร้างทฤษฎีจากข้อมูล (Grounded Theory Approach)” [16] การคัดกรองที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งนี้ โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อมูลด้วยต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) และกราฟตาข่ายวิลโลว์ (Willow Network) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลและแสดงความสัมพันธ์ของแอตทริบิวต์ นำเสนอข้อมูลด้วยกราฟแทนการใช้ข้อความ จากการกำหนดให้มีปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ 7 ปัจจัย ข้อมูลส่วนบุคคลที่ผ่านการจัดเตรียมและปรับปรุงแล้ว ประกอบด้วย 7 คุณลักษณะ ได้แก่ เลขประจำตัว อายุ เกรดเฉลี่ย ม.3 วุฒิมัธยมศึกษาตอนสอบเข้าสถาบันการศึกษาเดิม จังหวัดสถานศึกษา ภูมิภาค สถานภาพครอบครัว ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้นำเข้าเพื่อทำการทดสอบครั้งนี้

ลำดับ	ปัจจัย	สถานะ
1	อายุ	นำเข้า
2	เกรดเฉลี่ย	นำเข้า
3	วุฒิการศึกษาตอนสอบเข้า	นำเข้า
4	สถาบันการศึกษาเดิม	นำเข้า
5	จังหวัดสถานศึกษา	นำเข้า
6	ภูมิภาค	นำเข้า
7	สถานภาพครอบครัว	นำเข้า

หมายเหตุ: พัฒนามาจาก “ปัจจัยในการทดสอบหาความสัมพันธ์ของแอตทริบิวต์” [6]

ผู้วิจัยได้ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้จำแนกภูมิภาคของประเทศไทย ยึดตามอักษรานุกรมภูมิศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน เล่ม 6 ภาคผนวก 2522 แบ่งออกได้เป็น 6 ภูมิภาค ได้แก่ ภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคใต้

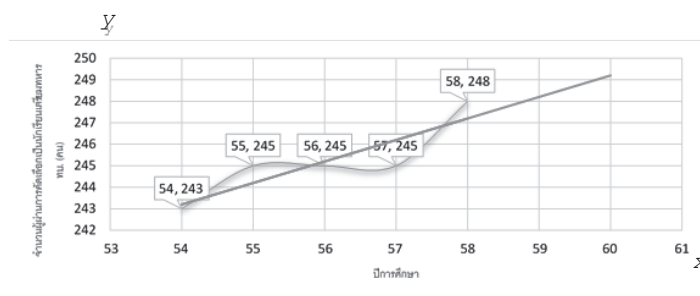


ภาพที่ 3 ออกแบบแผนภาพต้นไม้ตัดสินใจ

จากตารางที่ 1 การนำปัจจัยที่ใช้นำเข้าเพื่อทำการทดสอบ มาออกแบบการวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลด้วยแผนภาพต้นไม้ตัดสินใจ ดังแสดงในภาพที่ 3

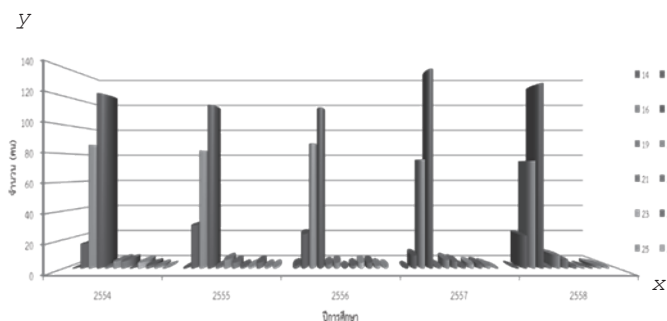
5. ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังของนักเรียนเตรียมทหาร ในส่วนของกองทัพบกที่จำแนกตามปัจจัยสามารถแสดงผลแทนค่าข้อมูลด้วยกราฟตาตัววิซวลไลเซชัน



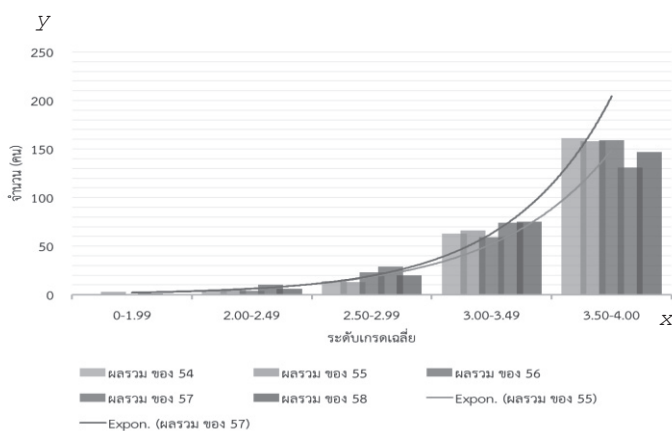
ภาพที่ 4 การพยากรณ์ข้อมูลแนวโน้มจำนวนผู้ได้เข้ารับการศึกษาคือ เป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558

ค่าการพยากรณ์ข้อมูลแนวโน้มจำนวนผู้ได้เข้ารับการศึกษาคือ เป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 ด้วยวิธีคาดคะเนแนวโน้ม จากสมการแนวโน้มเชิงเส้น พบว่า ปีการศึกษา 2558 (แกน x) มีจำนวนผู้เข้ารับการศึกษาคือเพิ่มขึ้น จำนวน 3 คน (แกน y) คิดเป็น 20.23 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 245 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานข้อมูลคือ 1.79 เนื่องจากข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหรือความต้องการจากหน่วยขึ้นตรงร้องขอในแต่ละปีการศึกษา กราฟตาตัววิซวลไลเซชันแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติพื้นฐานจำแนกตามปัจจัยของผู้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก



ภาพที่ 5 จำแนกตามอายุของผู้เข้ารับการศึกษานักเรียนเตรียมทหารในส่วนกองทัพบก

จากภาพที่ 5 โดยการจำแนกตามอายุ พบว่านักเรียนอายุ 17 ปีที่แทนข้อมูลด้วยกราฟแท่งสีม่วง คือผู้เข้ารับการศึกษามีจำนวนสูงสุด (แกน x) ในแต่ละปีการศึกษา (แกน y) สามารถอนุมานได้ว่าการสั่งสมประสบการณ์ความรู้ทักษะความสามารถในระดับหนึ่งแล้วจะสามารถผ่านการทดสอบได้สูง



ภาพที่ 6 จำแนกตามปัจจัยเกรดเฉลี่ยในระดับ ม.3 กับความสัมพันธ์เชิงแนวโน้มผลการเรียน

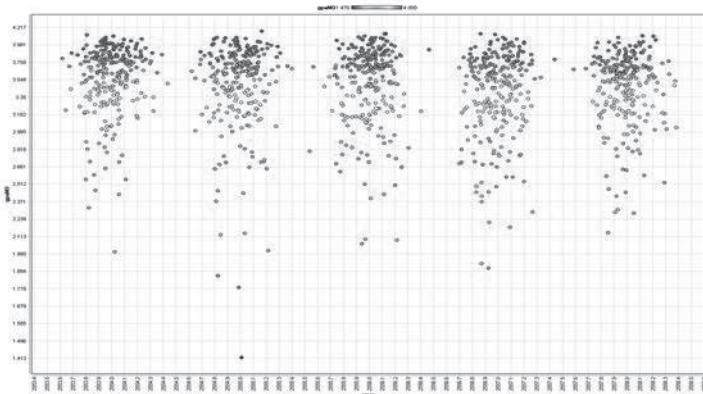
ผลการจำแนกตามปัจจัยผลการเรียนเกรดเฉลี่ยในระดับ ม.3 กับความสัมพันธ์เชิงแนวโน้มผลการเรียน ด้วยฟังก์ชันเอกซ์-โพเนนเชียล (Exponential Function) [15,16] ด้วยนิยามกราฟของฟังก์ชัน คือ

$$f(x) = ax, \quad a > 0 \text{ and } a \neq 1 \quad (1)$$

ฟังก์ชัน ax เมื่อ a คือ จำนวนที่ทำให้ฟังก์ชัน ax เท่ากับอนุพันธ์ของตัวเอง (โดยที่ a มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 2.718) มีลักษณะตั้งชันขึ้นและมีอัตราเพิ่มค่าความชันยิ่งขึ้นเมื่อ x เพิ่มขึ้น (x คือ ค่าที่เกิดขึ้นจริง, ค่าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงคงตัวในตัวแปรอิสระ ส่งผลให้เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนทิศทางเดียวกันกับตัวแปรตาม คือ เมื่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราร้อยละ) และกราฟจะวางตัวอยู่เหนือแกน x เสมอ

ในปีการศึกษา 2555 และ 2557 สามารถคาดการณ์ได้ว่า เกรดเฉลี่ยในระดับ ม.3 (แกน x) ของปีการศึกษาถัดไปของข้อมูลผู้ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนกองทัพบกนั้น อยู่ในระดับดีมากคือ ช่วง 3.50-4.00 โดยในปีการศึกษา 2554 จำนวน 161 คน (แกน y) ปีการศึกษา 2555 จำนวน 158 คน ปีการศึกษา 2556 จำนวน 159 คน ปีการศึกษา 2557 จำนวน 131 คน และปีการศึกษา 2558 จำนวน 147 คน ตามลำดับ ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 พบว่า ค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วง 0-1.99 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1 คน ช่วง 2.00-2.49 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6 คน ช่วง 2.50-2.99 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20 คน ช่วง 3.00-3.49 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 67 คน และช่วง 3.50-4.00 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 151 คน และคาดคะเนได้ว่านักเรียนเตรียมทหาร คือ บุคคลที่มีความรู้ความสามารถสูงมากทั้งวิชาการและสมรรถภาพร่างกายมีความสมบูรณ์และพร้อมเข้ารับการการศึกษาทางวิชาการและทางทหารดังภาพที่ 6

เมื่อนำข้อมูลเข้าโดยใช้เครื่องมือการทำเหมืองข้อมูลด้วย Rapid Miner และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักสถิติเบื้องต้น ด้วยการทดสอบด้วยปัจจัยเกรดเฉลี่ย ม.3 (แกน y) ในแต่ละปีการศึกษา (แกน x) พบว่า แนวโน้มของกลุ่มข้อมูลที่แสดงผลด้วยภาพปริมาณกลุ่มใกล้เคียงกันมากที่สุด จากผลการแสดงค่าข้อมูลสารสนเทศด้วยกลุ่มสีแดง คือ ช่วงระดับ 3.50-4.00 อยู่ในระดับดีมาก มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลได้ และค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 3.50 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานข้อมูลคือ 0.40 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

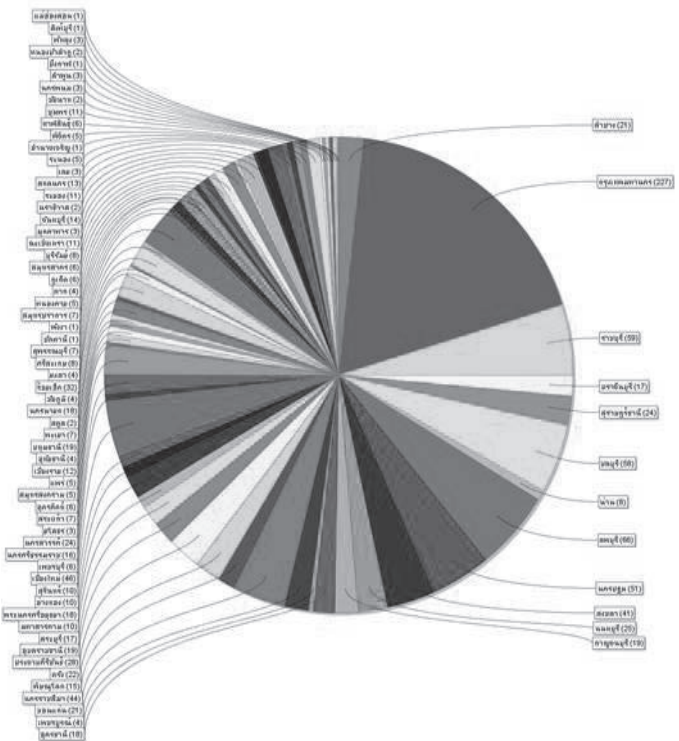


ภาพที่ 7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องมือการทำเหมืองข้อมูล เพื่อจำแนกกลุ่มข้อมูลด้วยปัจจัยเกรดเฉลี่ย ม.3

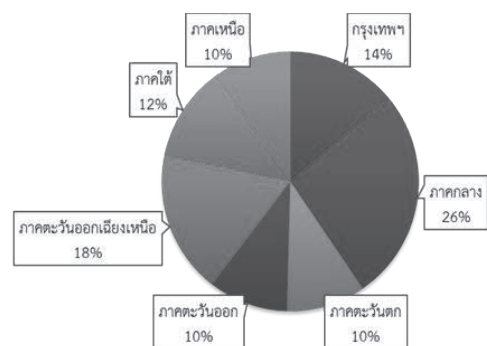
จากภาพที่ 7 จำนวนผู้ที่ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบก ในแต่ละจังหวัดของประเทศไทย ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558

จากการจำแนกด้วยจังหวัดของประเทศไทย ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 จากภาพที่ 8 นั้น พบว่ามีจำนวนผู้ที่ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบกมากที่สุด คือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร คิดเป็น 18.52 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ จังหวัดลพบุรี คิดเป็น 5.38 เปอร์เซ็นต์ และลำดับที่สาม คือ จังหวัดราชบุรี คิดเป็น 4.18 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนทั้งหมด 1,226 คน และดังภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับวุฒิการศึกษาและภูมิภาค (แกน x) พบว่า ภาคกลางมีจำนวนผู้เข้ารับการศึกษาสูงที่สุด (แกน y) โดยใช้คุณวุฒิการศึกษาอื่นๆ สามารถอนุมานได้ว่าบุคคลผู้นั้นได้เตรียมความพร้อมทางวิชาการเพื่อสอบเข้าเป็นนักเรียนทหารและสรุปยอดเป็นร้อยละในแต่ละภูมิภาค ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558

ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 คิดเป็นร้อยละ 26 พบว่า ภูมิภาคกลางมีผู้ที่ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนของกองทัพบกมากที่สุดรวมกรุงเทพมหานคร รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตกตามลำดับ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับวุฒิการศึกษาและภูมิภาค



ภาพที่ 9 สรุปยอดเป็นร้อยละในแต่ละภูมิภาค ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558

6. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษครั้งนี้ได้นำความรู้และการจัดการข้อมูลเทคโนโลยีสารสนเทศมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารรายงานด้วยการจำแนกข้อมูลด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ และแสดงผลให้มองเห็นด้วยภาพทางสายตาด้วยกราฟดาต้าวิชวลไลเซชันพบว่า รูปแบบที่ได้สามารถนำมาสังเคราะห์ข้อมูลได้ว่า

20 อันดับแรกของผู้ที่ผ่านการคัดเลือกเข้าเป็นนักเรียนเตรียมทหารในส่วนกองทัพบก ระหว่างปีการศึกษา 2554 – 2558 อายุเฉลี่ยแรกเข้า 14 – 15 ปี มีผลการเรียนเกรดเฉลี่ยในระดับ ม.3 ค่าเฉลี่ยที่ 3.92 ศึกษาอยู่ในภาคกลางและกรุงเทพมหานครเป็นส่วนใหญ่ และสถานภาพครอบครัวส่วนใหญ่อยู่ด้วยกัน 95 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกตามอายุพบว่า อายุ 17 ปี คือผู้ที่เข้ารับการศึกษามีจำนวนสูงสุดในแต่ละปีการศึกษาสามารถอนุมานได้ว่า นักเรียนเตรียมทหารเป็นผู้ที่มีความรู้ ความสามารถ สติปัญญา ทักษะ ความเพียรพยายามมานะและตั้งใจอย่างยิ่ง จากการส่งสมประสบการณ์ในระดับหนึ่งแล้ว จะสามารถผ่านการทดสอบทั้งทางสติปัญญา สมรรถภาพ ร่างกายมีประสิทธิภาพพร้อมเข้ารับการศึกษ ผลการจำแนกตามปัจจัยผลการเรียนเกรดเฉลี่ยในระดับ ม.3 กับความสัมพันธ์แนวโน้มผลการเรียนพบว่า แนวโน้มของกลุ่มข้อมูลเกรดเฉลี่ยช่วง 3.50-4.00 อยู่ในระดับดีมาก มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูล และค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 3.51 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานข้อมูลคือ 0.40 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยกองทัพได้บุคคลที่มีความพร้อมทั้งสติปัญญา ร่างกาย และจิตใจในการเข้ารับการศึกษาด้านการทหารนี้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทัพบกที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาเพื่อพัฒนาบุคลากรด้านการศึกษา กองสถิติและประเมินผล โรงเรียนเตรียมทหาร กองสถิติและทะเบียนประวัติ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กสป.ร.ร.จปร.) ที่สนับสนุนข้อมูลเอกสารรายงาน ประกอบกับข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กวฟ.ส.กศ.ร.ร.จปร.) ที่ให้การสนับสนุนอำนวยความสะดวกการจัดทำเอกสาร หนังสือขอความอนุเคราะห์ และสนับสนุนเวลาในการทำงานวิจัย

8. บรรณานุกรม

- (1) ประวัติโรงเรียนเตรียมทหาร. (สืบค้นจาก) <http://www.afaps.ac.th>. และ <https://th.wikipedia.org/wiki/โรงเรียนเตรียมทหาร>.
- (2) ข้อมูลโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. (สืบค้นจาก) http://www2.crma.ac.th/e_book/Thai.asp.
- (3) T. Thilagaraj, N. Sengottaiyan, 2017. *A Review of Educational Data Mining in Higher Education System*, p. 349–358.
- (4) C. C. Yang, T. Dorbin Ng, 2011. *Analyzing and Visualizing Web Opinion Development and Social Interactions with Density-Based Clustering*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 6, p. 1144–1155.
- (5) วิจิษฐ์ ศรีสังจะเลิศวาจา และ ดุษฎี ประเสริฐดิถีพงษ์, 2557. *การทำเหมืองข้อมูลทางการศึกษา (Educational Data Mining)*, วารสารวิชาการ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 20, เดือน ก.ค.-ก.ย..
- (6) Matthew Michael Brehmer, 2016. *Why Visualization? Task Abstraction for Analysis and Design*, A Dissertation-Doctor of Philosophy, The University of British Columbia., A Dissertation-Doctor of Philosophy, The University of British Columbia.
- (7) กาญจนา หฤพรพงษ์, 2558. *แบบจำลองเพื่อช่วยทำนายผลการย้ายสาขาวิชา โดยการจำแนกประเภทข้อมูล กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์*, The Tenth National Conference on Computing and Information Technology, NCCIT, น. 239–244.
- (8) K. Kohli, S. Birla, 2016. *Data Mining on Student Database to Improve Future Performance*, International Journal of Computer Applications, Vol. 15, p. 42–46.
- (9) อีรพงษ์ สังข์ศรี, 2557. *การวิเคราะห์พฤติกรรมสำหรับการเลือกสมัครสาขาวิชาเรียนและการเปรียบเทียบตัวแบบพยากรณ์จำนวนนักศึกษาใหม่โดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล*, The National Conference on Computing and Information Technology, NCCIT.
- (10) A. Satyanarayan, D. Moritz, K. Wongsuphasawat, and J. Heer, 2017. *Vega-Lite: A Grammar of Interactive Graphics*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Volume: 23, Issue: 1, p.341 – 350.
- (11) พรรณิภา บุตรเอก และ สุรเดช บุญลือ, 2557. *การพยากรณ์โอกาสสำเร็จการศึกษาของนักศึกษาโดยใช้ซอฟต์แวร์เวกเตอร์แมชชีน*, Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University, ฉบับที่ 6, น. 40–49.

- (12) S. Henderson, S. Feiner, 2011. Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 10, p.1355–1368.
- (13) Y. Guo, X. Zhou, A.L. Porter, D.K.R. Robinson, 2015. Tech mining to generate indicators of future national technological competitiveness: Nano-Enhanced Drug Delivery (NEDD) in the US and China, Technological Forecasting and Social Change, p.168–180.
- (14) กาญจนา โชคเหรียญสุขชัย, 2560. กระบวนการทัศนการวิจัยสื่อสารมวลชน สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (15) ภัทรพงศ์ พงศ์ภัทรกานต์, วิชัย พัวรุ่งโรจน์, คมยุทธ ไชยวงษ์สุชาติ, พรหมโคตร และปาริชาติ แสงระฆัง, 2560. การใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยในการใช้บริการห้องสมุดของนักศึกษา, Pulinet Journal, Vol. 4, No. 2, p.10-18.
- (16) G.K. Rockswold (2012). COLLEGE ALGEBRA with Modeling & Visualization. 4 th ed. Pearson Education, Inc., p.396.

คอนกรีตกำลังสูงผสมด้วยเถ้าจากวัสดุชีวมวลบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ Hight Strength Concrete Mixed Ashes from Biomass Materials Using Microwave Curing

ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล^{1*}
ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน¹
รัฐศักดิ์ พรหมมาศ²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
วิทยาเขตวังไกลกังวล

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

*Corresponding Author. E-mail: thaweesak.run@rmutr.ac.th

(Received: May 7, 2018; Revised: June 11, 2018; Accepted: June 22, 2018)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูง ที่ใช้เถ้าจากวัสดุชีวมวลเป็นส่วนผสม โดยทำการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อทำให้เกิดความร้อนและมีการถ่ายเทมวลออกจากคอนกรีต เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลเฉพาะกำลังอัด โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลเฉพาะกำลังอัดกับการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยวิธีธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มที่อายุ 28 วัน จากการศึกษาการรับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงพบว่า เมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์สูงจะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่ำ โดยที่คลื่นไมโครเวฟกำลังสูงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังต่ำ ซึ่งเกิดอัตราการถ่ายเทมวลที่เหมาะสม

คำสำคัญ: การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ คอนกรีตกำลังสูง วัสดุชีวมวล

Abstract : This research is a study of high strength concrete by using a mixture of ashes from biomass materials, cured with a microwave to build up heat in side and mass transfer from the concrete. The objective of this study to explained mechanical properties, particularly compression strength of concrete. To compare the mechanical properties of concrete with a compressive high strength of natural curing time at 28 days. The study of physical properties and compressive strength of high strength concrete was found that. Curing of concrete using microwave at high power is required to take time to curing than the low watt microwave.

Keywords: Microwave Curing, High Strength Concrete, Biomass Materials

1. บทนำ

คอนกรีตกำลังสูงมีบทบาทในวงการก่อสร้างของไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่นิยมก่อสร้างอาคารสูงโดยใช้คอนกรีตกำลังสูงสำหรับเทเสาอาคารหรือในงานโครงสร้างอื่นๆ ที่ต้องการความแข็งแรงหรือโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักมากเป็นพิเศษเพื่อให้ได้ขนาดของโครงสร้างที่เล็กกว่าการใช้คอนกรีตกำลังปกติ ดังนั้น การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงให้มีคุณสมบัติทางการรับกำลังอัดที่สูงขึ้นและมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดีที่สุดโดยมีระยะเวลาในการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่สั้นลง โดยปกติหากยึดตามมาตรฐานการใช้งานคอนกรีตจะต้องมากกว่า 24 ชั่วโมงในการพัฒนาคุณสมบัติ ดังนั้น การลดระยะเวลาในการพัฒนากำลังรับแรงอัดจึงมีความสำคัญ แต่ด้วยเทคโนโลยีการบ่มเร่งกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงในช่วงต้นด้วยวิธีต่างๆ ในปัจจุบันนี้มีข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่น การบ่มคอนกรีตโดยเพิ่มความชื้น มีข้อเสีย คือ มักจะเกิดรอยร้าวของดินเหนียวที่นำมาใช้และต้องทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีตหลังบ่มเสร็จและการบ่มด้วยการเร่งกำลังโดยใช้ไอน้ำให้ความชื้นและความร้อนในการบ่มคอนกรีตซึ่งมีข้อเสีย คือ เวลาที่ใช้บ่มต้องไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และคอนกรีตมีการแปรผันของคุณสมบัติมากเนื่องจาก การกระจายความร้อนในคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น การนำเอาเทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้ในการเร่งกำลังอัดในช่วงต้นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงและมีการกระจายความร้อนสม่ำเสมอเนื่องจากองค์ความรู้ทางด้านการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นไปที่การหาความสัมพันธ์เชิงเวลาและเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทดลองเป็นหลักส่วนกลไกพื้นฐานของการถ่ายเทมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้พลังงานความร้อนกับคอนกรีตนั้นยังไม่มีการศึกษาทดลองจึงเกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษา

การบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยเตาอบไมโครเวฟ ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนได้ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่วัสดุจากทุกทิศทางโดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายสู่วัสดุเมื่อคลื่นไปกระทำทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นและเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วและรักษาคุณภาพของวัสดุไว้ได้อย่างครบถ้วนซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟ แนวคิดที่จะศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยความร้อนในระยะเวลาสั้นๆ ด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกำลังอัดที่ดีขึ้นและลดระยะเวลาในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาคุณสมบัติทางกลในด้านกำลังอัด และคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตกำลังสูง [1]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมวัสดุชีวมวลจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมวัสดุชีวมวลจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟและเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลในสัดส่วนต่างๆ และกำลังไมโครเวฟที่ใช้บ่มคอนกรีต

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จตุวุฒิ สันตาวิสูทธิ์ (2547) [2] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงตามเป้าหมายที่ อายุ 24 ชั่วโมง โดยเลือกกำลังรับแรงอัดให้อยู่ในช่วง 400-600 ksc และคอนกรีตสดมีค่าการยุบตัวไม่น้อยกว่า 5 cm โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซีลีกาฟุ่ม หินบะซอลท์ ขนาด 3/8 นิ้ว ทรายแม่น้ำ สารลดน้ำพิเศษประเภท F การทดสอบใช้ส่วนผสมพื้นฐาน 5 กลุ่ม แต่ละกลุ่มใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 4 ค่า ระหว่าง 0.24 – 0.45 ซึ่งพบว่า กำลังรับแรงอัดช่วง 400-600 ksc ที่อายุ 24 ชั่วโมงสามารถใช้ส่วนผสมต่อลูกบาศก์เมตรที่ประกอบด้วย

ปูนซีเมนต์ 580 kg ซิลิกาฟูม 65 kg (11.21% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) สารลดน้ำพิเศษ 18 kg (3.10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) หิน 980 kg และปรับทรายตามปริมาณน้ำผลการทดสอบสามารถแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 5 กราฟ จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอ่านค่ากำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต้องการได้ โดยกำลังรับแรงอัดที่ 400 ksc ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.312 และปรับทรายเป็น 590 kg/m³ และกำลังรับแรงอัดที่ 600 ksc ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.26 และปรับทรายเป็น 680 kg/m³

อภิเดช หล้าปัน (2547) [3] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 24 ชั่วโมง โดยใช้ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน ทรายแม่น้ำ หิน สารลดน้ำพิเศษประเภท F สารเร่งการก่อตัวประเภท C การทดสอบใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ 0.16 0.18 และ 0.20 การบ่มคอนกรีตใช้การบ่มด้วยน้ำและ การบ่มด้วยไอน้ำ โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 18 19 และ 20 ชั่วโมง หลังจากแกะแบบที่อายุ 5 4 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.20 ซิลิกาฟูม 23 เปอร์เซ็นต์ใช้สารลดน้ำพิเศษ 2 เปอร์เซ็นต์ใช้สารเร่งการก่อตัว 1.5 เปอร์เซ็นต์และบ่มด้วยไอน้ำเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง จะทำให้กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมงสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 1,044 ksc

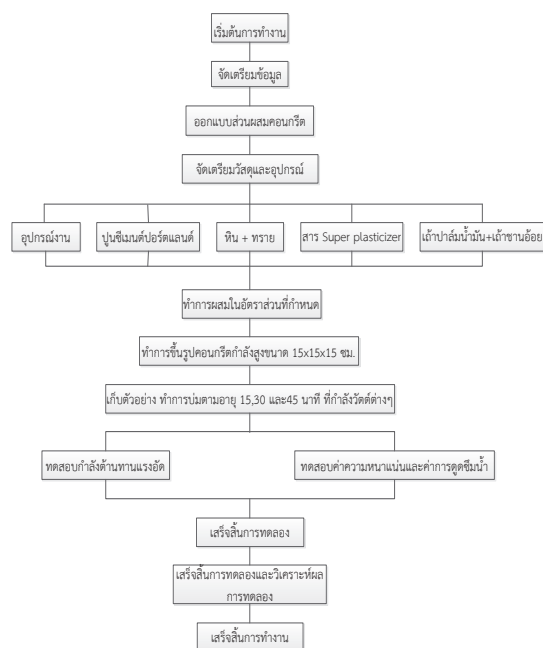
ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ (2550) [4] ได้ทำการศึกษาการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องโดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้น ระหว่างการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นผลที่ได้ นำไปเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งผ่านการบ่มในน้ำและอากาศโดย ตัวแปรที่ใช้คือ จำนวนแมกนีตรอน (กำลังวัตต์) ระยะเวลาในการบ่มและสัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งเกิดจากองค์ประกอบ ระหว่าง ซีเมนต์ น้ำ ทราย และหิน นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลของ

ปริมาณอากาศและสารผสมเพิ่มชนิด สารหน่วงการก่อตัว ผลการศึกษาพบว่า พลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

พงศธร จันทรตรี (2552) [5] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าขานอ้อยโดยศึกษา กำลังอัด กำลังดึง โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยซึ่งมีค่า W/B เท่ากับ 0.5 และ 0.3 ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังปกติและกำลังสูงได้ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถพัฒนากำลังอัด กำลังดึง โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมให้มีค่ากำลังสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน ส่วนอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้ค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ทั้งนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้ค่ากำลังอัดและกำลังดึงมีค่าสูงสุด

4. วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยเตาอบไมโครเวฟที่ใช้วัสดุชีวมวลในการผสมโดยมุ่งศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานความร้อนแต่ละความร้อนคือ กำลังวัตต์มาใช้ในการบ่มคอนกรีตกำลังสูงและของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชนมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่การจัดเตรียมวัสดุ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต การทดสอบกำลังอัด และการดูดซึมของน้ำ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงาน ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

และได้มีการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงไว้ที่ 450 ksc ของส่วนผสมการออกแบบคอนกรีตกำลังอัดสูง ตามมาตรฐาน ACI 211.4R [6] ที่ไม่ใช้วัสดุชีวมวลแทนที่ซีเมนต์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงไว้ที่ 450 กก/ชม.2 ของส่วนผสมการออกแบบคอนกรีตกำลังสูง ตามมาตรฐาน ACI 211.4R [6]

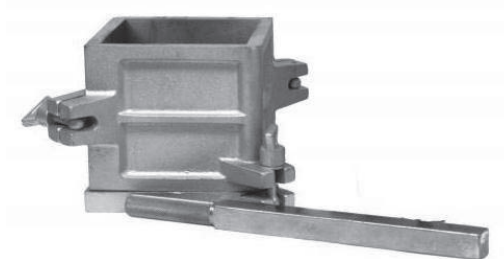
รายการ	ส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง (kg /m ³)						
	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	เถ้าขาน น้อย	หิน	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำ พิเศษ
ส่วนผสมพื้นฐาน	563.33	0	0	1166.4	524.0	169	13.52
สัดส่วนที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันกับเถ้าขาน้อยตามสัดส่วนต่างๆ							
5:15	450.664	28.167	84.499	1166.40	524.0	169	13.52
10:10	450.664	56.33	56.33	1166.40	524.0	169	13.52
15:5	450.664	84.499	28.167	1166.40	524.0	169	13.52

4.1 การจัดเตรียมข้อมูล

เพื่อให้งานวิจัยมีผลการทดสอบที่สมบูรณ์ขึ้น โดยทางผู้วิจัยกำหนดใช้ส่วนผสมต่างๆ สำหรับการขึ้นรูปคอนกรีต ซึ่งแสดงในตารางที่ 1

4.1.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือเครื่องใช้

- แบบหล่อคอนกรีต ขนาด 15x15x15 ซม. ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แบบหล่อคอนกรีต

- เครื่องทดสอบการรับกำลังอัดขนาด 200 Ton Model STS-C905V ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

- เตอบไมโครเวฟ Samsung กำลังวัตต์ 1150 Watts Model ME711K ใช้สำหรับบ่มคอนกรีตขนาด 15x15x15 ซม. ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เตอบไมโครเวฟ

4.1.2 ทำการผสมคอนกรีตตามสัดส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 1 ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การผสมคอนกรีต

4.1.3 แกะแบบหล่อคอนกรีต แล้วนำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน และนำคอนกรีตไปบ่มที่ระยะเวลา 90 120 และ 150 นาที โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 450 720 และ 900 Watts ตามลำดับ ด้วยเตอบไมโครเวฟ ดังรูปที่ 4

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

4.2.1 วิเคราะห์หาความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์การดูดซึม โดยใช้สมการ

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1)$$

โดยที่

ρ คือความหนาแน่นของวัสดุมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

คือมวล (Mass) หรือน้ำหนักที่แท้จริง มีหน่วยเป็นกรัม (g)

V คือปริมาตร (Volume) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำแทนค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำ (% Absorption)

W_1 คือน้ำหนักอิฐที่แห้ง มีหน่วยเป็นกรัม (g)

W_2 คือน้ำหนักอิฐที่ดูดซึมน้ำ มีหน่วยเป็นกรัม (g)

4.2.2 วิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะที่ต้องการด้านลักษณะทั่วไปและความต้านทานแรงอัดใช้สถิติในการหาความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย โดยใช้สูตร

$$F = \frac{P}{A} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3)$$

เมื่อ

F คือความต้านทานแรงอัด, กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

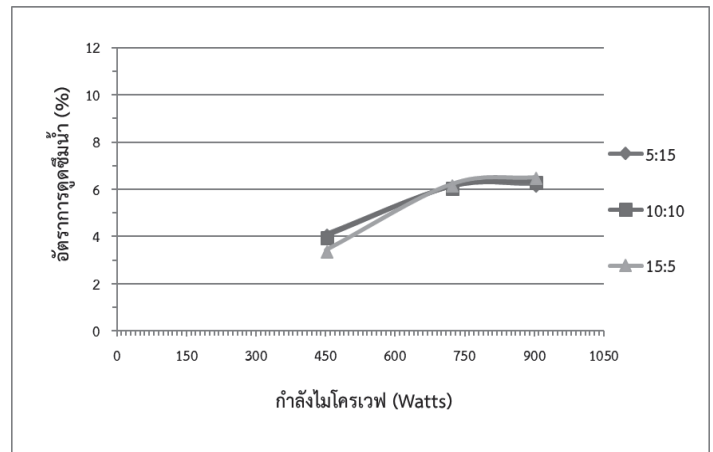
P คือแรงอัดที่ทำให้ชิ้นทดสอบวิบัติ, กิโลกรัม (kg)

A คือพื้นที่รับแรงอัด, ตารางเซนติเมตร (cm²)

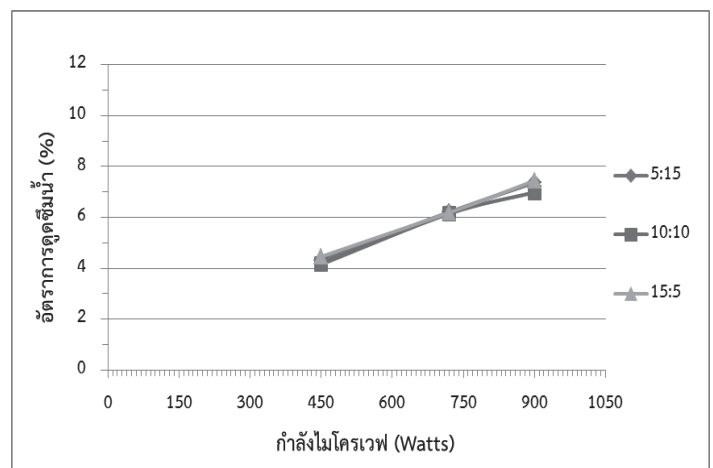
5. ผลการศึกษา

การทดสอบคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลครั้งนี้ได้ทำการศึกษา คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟแล้วนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งได้ทำการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตโดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ทรายหยาบโดยร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 ใช้หินขนาด 3/4 นิ้ว และใช้เถ้าปาล์มน้ำมันกับเถ้าขานอ้อยแทนที่ซีเมนต์ด้วยสัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 ตามลำดับ โดยน้ำหนักของวัสดุประสานซึ่งกำหนด Water Cement Ratio (w/c) เท่ากับ 0.35 เมื่อขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วนำคอนกรีตมาบ่มที่ระยะเวลา 90 120 และ 150 นาที โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 450 720 และ 900 Watts ที่ได้จากการบ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟ มาเปรียบเทียบกับคอนกรีตมาตรฐานที่ไม่ใช้วัสดุชีวมวลแทนที่ซีเมนต์ โดยใช้วิธีการบ่มในน้ำที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

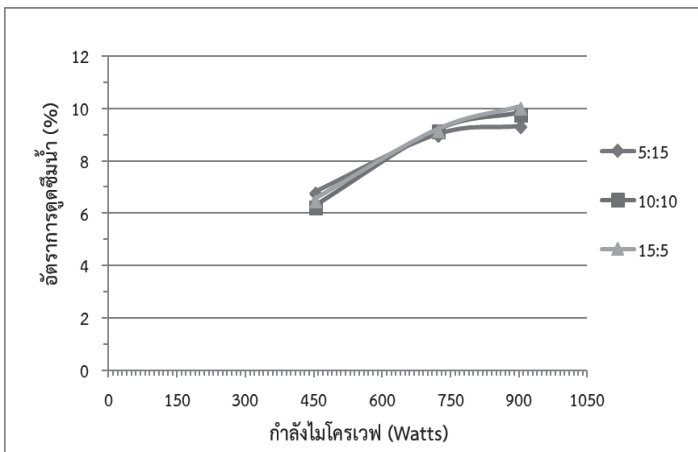
ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6 ภาพที่ 7 และภาพที่ 8 ดังนี้



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟที่ระยะเวลา 90 นาที



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟ 120 นาที

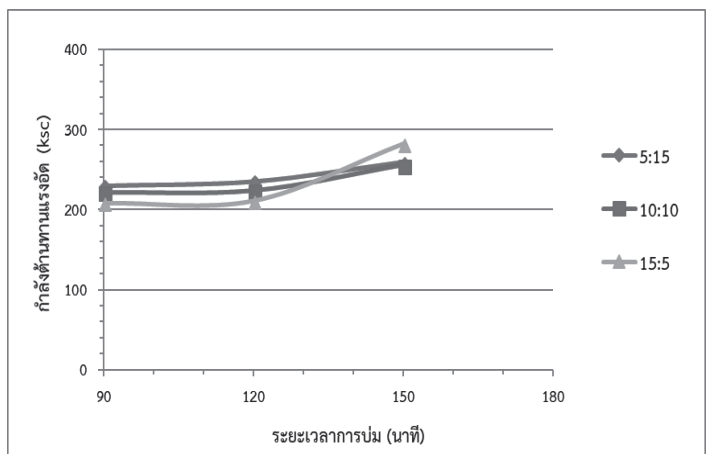


ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟ 120 นาที

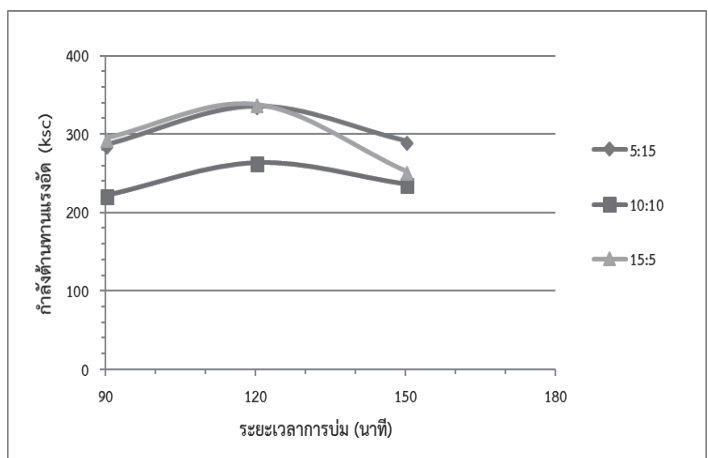
จากภาพที่ 6 ภาพที่ 7 และภาพที่ 8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟต่างๆ โดยมีสัดส่วนผสม 5:15 10:10 และ 15:5 (ถ้าปาล์ม น้ำมัน:ถ้าชานอ้อย) ตามลำดับ และใช้กำลังไมโครเวฟ 450 750 และ 900 Watts จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที สัดส่วนผสมของถ้าปาล์ม น้ำมันและถ้าชานอ้อย ทั้งสามสัดส่วนผสมมีแนวโน้มที่ร้อยละของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้น ปริมาณร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตก็ยิ่งมากขึ้นด้วย ซึ่งสัดส่วนผสม 15:5 มีร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุด ที่กำลังไมโครเวฟ 450 720 และ 900 Watts และสัดส่วนผสม 5:15 และ 10:10 มีร้อยละการดูดซึมน้ำค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจากค่าร้อยละการดูดซึมน้ำนั้นจะส่งผลให้ทราบว่าสัดส่วนผสม 15:5 เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มมาก ซึ่งปริมาณความชื้นภายในตัวอย่างคอนกรีตนั้นลดลงและคุณสมบัติทางกายภาพของปาล์มจะมีรูปร่างกลมติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้เมื่อใช้ส่วนผสมถ้าปาล์มในปริมาณ

ที่มากกว่าก็จะทำให้ตัวอย่างคอนกรีตเกิดช่องว่างและความพรุนภายในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น จึงส่งผลทำให้มีปริมาณร้อยละการดูดซึมน้ำสูง และถ้าหากตัวอย่างคอนกรีตมีปริมาณร้อยละการดูดซึมน้ำสูงก็จะส่งผลให้คอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลงด้วยเช่นกัน

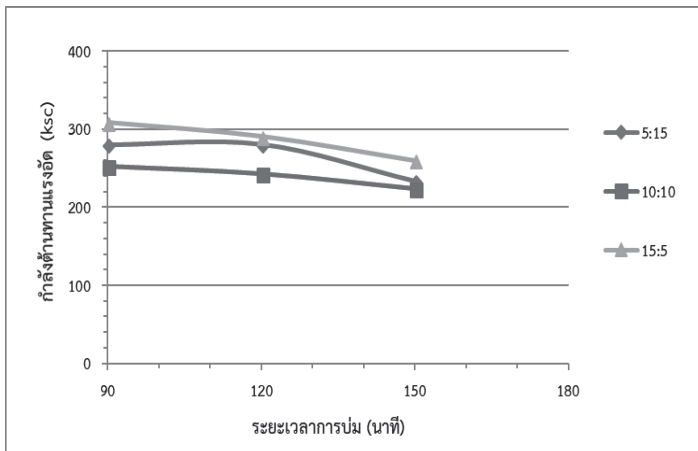
ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟ ตามกำลังวัตต์และระยะเวลาการบ่ม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9 ภาพที่ 10 และภาพที่ 11 ดังนี้



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการบ่มด้วยไมโครเวฟ (450 Watts)



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการบ่มด้วยไมโครเวฟ (720 Watts)



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการปั๊มด้วยไมโครเวฟที่ 900 Watts

จากภาพที่ 9 ภาพที่ 10 และภาพที่ 11 จะเห็นว่าเมื่อทำการปั๊มคอนกรีตด้วยเตาอบไมโครเวฟ ที่กำลัง 450 Watts และ 900 Watts ตามลำดับ และระยะเวลาการปั๊มเริ่มต้นที่ 90 120 และ 150 นาที ตามลำดับ จากสัดส่วนผสมที่ใช้ถ้าปาล์มน้ำมันและถ้าขานอ้อยแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสัดส่วนผสมที่ใช้แทนที่คือ 5:15 10:10 และ 15:5 (ถ้าปาล์มน้ำมัน:ถ้าขานอ้อย) จะพบว่า ที่สัดส่วนผสม 15:5 มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 282.27 kg/cm^2 ที่ใช้กำลังไมโครเวฟ 450 Watts และใช้เวลาในการปั๊ม 150 นาที เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟ 720 Watts จะเห็นว่า สัดส่วนผสม 15:5 จะมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 338.10 kg/cm^2 โดยใช้เวลา 120 นาที และเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟ 900 Watts ที่สัดส่วนผสม 15:5 จะมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 310 kg/cm^2 โดยใช้เวลา 90 นาที จากกราฟทั้งสามสามารถเห็นได้ว่า ที่กำลังไมโครเวฟ 720 Watts ที่ใช้ระยะเวลาในการปั๊ม 120 นาที พบว่า คอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดได้ดีที่สุด เนื่องจากเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟต่ำการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นของคอนกรีต กลายเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการระเหยออกมาอย่างช้าๆ ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างเหมาะสม จึงทำให้

สามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตได้ดี แต่เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟมากกว่า 720 Watts และระยะเวลาในการปั๊มมากกว่า 120 นาทีขึ้นไป จะทำให้คอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลงอย่างรวดเร็ว โดยส่งผลมาจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในคอนกรีตกลายเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ทำให้ลักษณะภายนอกของคอนกรีตที่ทดสอบเกิดการแตกร้าวบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ที่เกิดจากการระเหยของความชื้นในคอนกรีตมีปริมาณมากเกินไปส่งผลทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และส่งผลทำให้คอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลง

6. สรุปและอภิปรายผล

การปั๊มคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลที่ทำการปั๊มด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อต้องการหาอัตราส่วนผสมระยะเวลาในการปั๊มและกำลังวัตต์ที่เหมาะสมที่สามารถทำให้อ่อนคอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ดีที่สุด โดยจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบการปั๊มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์ต่างๆ มาเปรียบเทียบกับการปั๊มในน้ำที่ 28 วัน โดยที่ก่อนคอนกรีตจะต้องมีค่ากำลังต้านทานรับแรงอัด 450 กก/ซม.^2 ขึ้นไปสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการปั๊มก่อนคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลโดยการนำเอาพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการควบคุมความชื้นในก้อนคอนกรีตตามเวลาและวัตต์ที่ทำการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนผสมถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 ต่อ ถ้าขานอ้อยร้อยละ 5 โดยใช้กำลังไมโครเวฟที่ 720 Watts ที่ระยะเวลาในการปั๊ม 120 นาที เป็นสัดส่วนผสมคอนกรีต และเป็นระยะเวลาในการปั๊มที่ดีและเหมาะสมโดยที่มีค่าของกำลังต้านทานแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ 338.10 kg/cm^2 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วน

ผสมในการออกแบบคอนกรีตกำลังอัดสูง ตามมาตรฐาน ACI 211.4R ที่ไม่ใช้วัสดุขี้เถ้าแทนที่ซีเมนต์ โดยทำการบ่มในน้ำที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเท่ากับ 487.64 kg/cm^2 มีร้อยละการดูดซึมน้ำจากการทดสอบการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ จะได้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 10.06 ที่ใช้สัดส่วนผสม 15:5 โดยใช้ระยะเวลาในการบ่มที่ 150 นาที และใช้กำลังไมโครเวฟ 900 Watts ส่วนการบ่มในน้ำที่อายุ 28 วัน มีปริมาณการดูดซึมน้ำร้อยละ 3.61 ซึ่งการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟในการทดสอบมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่สูงมากกว่า เนื่องจากการนำพลังงานไมโครเวฟเข้ามาไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างของคอนกรีตในระยะเวลาที่รวดเร็วจะส่งผลต่อปริมาณซีเมนต์กับน้ำ คือปริมาณความชื้นในวัสดุน้อยจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration) และวัสดุขี้เถ้าที่ใช้เป็นส่วนผสมถ้าปาล์มน้ำมันกับเถ้าขาน้อยจะต่างกัน โดยที่เถ้าปาล์มจะมีรูปร่างกลมติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่เท่ากัน แต่เถ้าขาน้อยจะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนทำให้คอนกรีตเกิดช่องว่างและความพรุนสูงภายในเนื้อคอนกรีตมาก เมื่อนำมาทดสอบด้วยการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ให้ความร้อนจากภายในวัสดุซึ่งมีการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาณคอนกรีตโดยที่ความชื้นที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตถูกไล่ออกโดยการแทรกตัวตามช่องว่างภายในออกสู่ผิวคอนกรีต ส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ ภายในโครงสร้างมีผลต่อการดูดซึมน้ำที่มาก และกำลังต้านทานแรงอัดที่ต่ำแต่พลังงานไมโครเวฟก็สามารถควบคุมความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตและสามารถเร่งกำลังต้านทานการรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นได้ในช่วงต้น โดยควบคุมที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์เป็นสำคัญ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

8. บรรณานุกรม

- (1) Prinya, C., Chai, J. (2009). Cement Pozzolan and Concrete. Concrete Association. Bangkok.
- (2) จตุภูมิ สันตวิสุทธิ และคณะ. 2547. การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงตามเป้าหมายที่อายุ 24 ชั่วโมง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- (3) อภิเดช หล้าปัน และคณะ. 2547. การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- (4) ณัฐภูมิ สุวรรณภูมิ และคณะ. 2550. การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง. หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต).
- (5) พงศธร จันทรตรี. 2552. การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าขาน้อย. วิทยานิพนธ์ (เทคโนโลยีโยธา). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- (6) American Society for Testing and Materials, (2015) "ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 1-5.

การแก้ปัญหาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีนด้วยวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง Vaccine Cold Chain Network Problem Using Hybrid Central Force Optimization

คณน สุจาริ

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลธัญบุรี

ศูนย์นวัตกรรมโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลธัญบุรี

Corresponding Author. E-mail: Kanon.suj@rmutr.ac.th

(Received: March 18, 2018; Revised: June 1, 2018; Accepted: July 26, 2018)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีนโดยใช้วิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง โดยการประยุกต์ใช้วิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางแบบดั้งเดิมร่วมกับวิธีการค้นหาแบบทาбуและวิธีค้นหาแบบเพื่อนบ้าน ในขั้นตอนการสร้างผลเฉลยเริ่มต้นและขั้นตอนการพัฒนาผลเฉลยตามลำดับ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการแก้ปัญหาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีน สำหรับการกำหนดเส้นทางการจัดส่งวัคซีนให้มีระยะทางรวมน้อยที่สุด ขอบเขตของงานวิจัยคือ กำหนดเส้นทางการจัดส่งวัคซีนของสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค 1 จังหวัดเชียงใหม่ การวัดประสิทธิภาพการจัดส่งวัคซีนของวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง เปรียบเทียบกับวิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางแบบดั้งเดิมและการจัดส่งวัคซีนในปัจจุบัน การวิเคราะห์ผลของงานวิจัยนี้เสนอวิธีฟูลแฟคทอเรียลสำหรับสังเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดส่งวัคซีน โดยผลเฉลยของวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลางมีระยะทางสั้นกว่าวิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางแบบดั้งเดิมและการจัดส่งวัคซีนในปัจจุบัน 22 กิโลเมตร และ 119 กิโลเมตร ตามลำดับ

คำสำคัญ: เครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็น วิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง วิธีการค้นหาแบบทาбу วิธีค้นหาแบบเพื่อนบ้าน

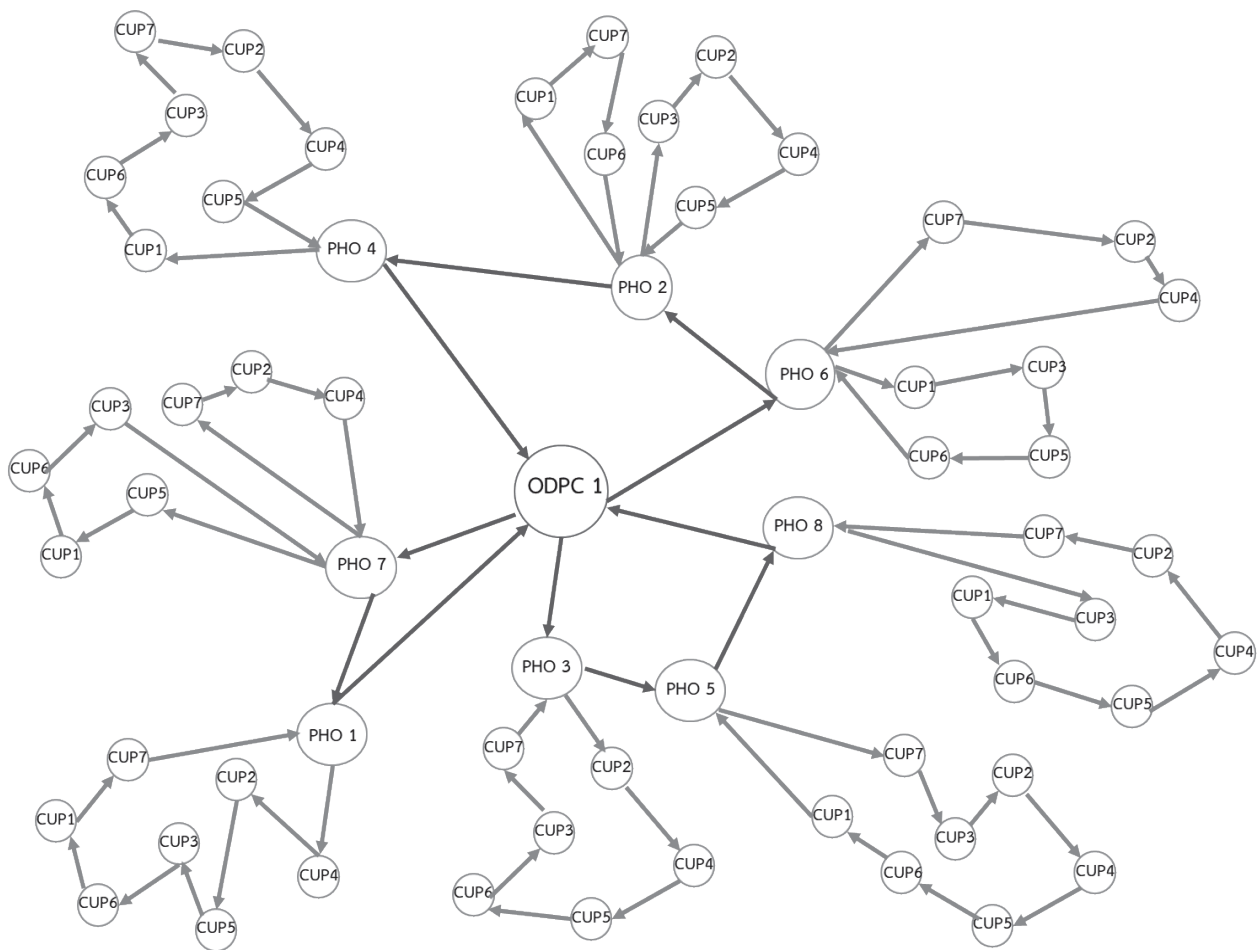
Abstract : This research proposes the solution for solving vaccine cold chain network via Hybrid Central Force Optimization (HCFO). The proposed algorithm is the structure of central force optimization. Both tabu search and nearest neighbor search are to insert in initial solution and developing solution process respectively. This approach is to improve the potential for vaccine cold chain network problem that is to rearrange routes with the minimizing total distances. The scope of this research is to focus on the Office disease prevention and control area 1 (Chiang Mai). The experiments were conducted to compare the efficiency of the hybrid algorithm with the traditional algorithm and real situation. The results of this research provide a full factorial design approach for appropriate parameters in the supply vaccine. The HCFO can rearrange routes shorter than the other methods 22 kilometers and 117 kilometers respectively.

Keywords: Vaccine Cold Chain Network, Central Force Optimization, Tabu Search, Nearest Neighbor Search

1. บทนำ

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) ประกาศคำจำกัดความของห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีนว่า การรักษาคุณภาพของวัคซีนตั้งแต่โรงงานผลิตวัคซีน การจัดส่งวัคซีน การเก็บรักษาวัคซีน ตลอดเส้นทางจนถึงผู้รับวัคซีน [1] เนื่องจากว่าคุณภาพของวัคซีนขึ้นอยู่กับการควบคุมอุณหภูมิของการเก็บวัคซีน เพราะวัคซีนแต่ละชนิดเก็บที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เช่น วัคซีน HB วัคซีน JE วัคซีน DTP เก็บอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 2-8 องศาเซลเซียส วัคซีน OPV เก็บช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส วัคซีน MMR วัคซีน BCG เก็บที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ดังนั้น อุณหภูมิ ความร้อน ความเย็น และแสง มีผลต่อคุณภาพวัคซีนทั้งสิ้น สำหรับวัคซีนในประเทศไทย ถูกส่งมารวมกันที่กรมควบคุมโรค (Department of Disease Control : DDC) กระทรวงสาธารณสุข ซึ่งมาจากแหล่งผลิตวัคซีนทั้งภายในประเทศและภายนอกประเทศ วัคซีนจากกรมควบคุมโรคที่อยู่กรุงเทพมหานคร ถูกส่งไปยังสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค (Office of Disease Prevention and Control : ODPC) ซึ่งมีอยู่

ทั้งหมด 13 แห่งทั่วประเทศ กระจายอยู่ตามจังหวัดขนาดใหญ่ หลังจากนั้นวัคซีนจากสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค ถูกส่งไปยังสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด (Province Health Office : PHO) แต่ละจังหวัดของเขตสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค วัคซีนจากสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด ส่งไปยังโรงพยาบาลหรือศูนย์ประสานงานการปฐมพยาบาลเบื้องต้น (Contracting Unit for Primary Care : CUP) ตามเขตรับผิดชอบ [2] งานวิจัยนี้นำเสนอการวางแผนจัดส่งวัคซีนของสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค เขต 1 จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งรับผิดชอบพื้นที่ 8 จังหวัดภาคเหนือ คือ เชียงใหม่ เชียงราย พะเยา แม่ฮ่องสอน ลำพูน ลำปาง แพร่ และน่าน ซึ่งแต่ละจังหวัดมีสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 8 แห่ง โดยแต่ละแห่งมีศูนย์ประสานงานการปฐมพยาบาลเบื้องต้นกระจายอยู่ตามพื้นที่ชุมชน ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างเครือข่ายการจัดส่งวัคซีนของสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค เขต 1 จังหวัดเชียงใหม่ ดังภาพที่ 1 แสดงการจัดส่งวัคซีนจาก ODPC ไปยัง PHO และจาก PHO ไปยัง CUP ตามลำดับ โดยการจัดส่งวัคซีนของ ODPC 1 ตามความต้องการของ



ภาพที่ 1 ตัวอย่างเครือข่ายการจัดส่งวัคซีนของ OPDC

PHO ซึ่งคำนึงถึงความจุของรถห้องเย็นขนส่งวัคซีนและ PHO จัดส่งวัคซีนไปยัง CUP ในเขตความรับผิดชอบของแต่ละ PHO งานวิจัยนี้หาข้อมูลระยะทางจาก Google Map ซึ่งเป็นภูมิสารสนเทศ ที่เป็นการทำข้อมูลเชิงพื้นที่ และการใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม [3] เป็นข้อมูลเส้นทางการเดินทางจริง ซึ่งมีระยะทางและจำนวนโรงพยาบาล

ทั้งหมด 102 โรงพยาบาล [4] โดยตารางที่ 1 แสดงระยะทางจาก OPDC 1 ถึงแต่ละ PHO โดยจังหวัดน่านเป็นจังหวัดที่มีระยะทางการจัดส่งไกลที่สุด โดยปัญหาห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีนจัดอยู่ในกลุ่มของปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางจริง ซึ่งมีการจัดส่งสินค้า (วัคซีน) ไปยังลูกค้า (สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาล)

ตารางที่ 1 ระยะทางและจำนวนโรงพยาบาลของ
ODPC 1

สำนักงานสาธารณสุขจังหวัด	ระยะทาง	จำนวน โรงพยาบาล
จังหวัดเชียงใหม่	8.3 กม.	24 โรงพยาบาล
จังหวัดเชียงราย	200 กม.	18 โรงพยาบาล
จังหวัดพะเยา	158 กม.	9 โรงพยาบาล
จังหวัดน่าน	328 กม.	15 โรงพยาบาล
จังหวัดแม่ฮ่องสอน	250 กม.	7 โรงพยาบาล
จังหวัดลำพูน	19.6 กม.	8 โรงพยาบาล
จังหวัดลำปาง	97.7กม.	13 โรงพยาบาล
จังหวัดแพร่	197 กม.	8 โรงพยาบาล

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางเดินทางจัดเป็นปัญหาแบบ Non Polynomial Hard (NP Hard) ซึ่งมีความซับซ้อนสำหรับแก้ปัญหา โดยงานวิจัยการจัดเส้นทางเดินทางเดินทางมีการค้นคว้าอย่างแพร่หลาย โดยมีการเพิ่มเงื่อนไขและข้อจำกัด เช่น รูปแบบการขนส่ง จำนวนจุดที่ไปส่งสินค้า จำนวนยานพาหนะในการส่ง ปริมาณที่ขนส่งได้ ข้อจำกัดด้านเวลาสำหรับการส่งสินค้า ทำให้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางเดินทาง ได้รับความนิยมและมีการพัฒนาจนมีความหลากหลายมากขึ้นตามไปด้วย แม้มีการศึกษามากมายอย่างยาวนาน [5] โดยเมื่อก่อนวิธีแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางเดินทาง ใช้วิธีแบบ Exact Algorithm เช่น Linear Programming (LP) หรือ Dynamic Programming (DP) ซึ่งเหมาะกับปัญหาปริมาณของข้อมูลไม่มาก เพราะใช้เวลาคำนวณไม่นาน แต่เนื่องจากในปัจจุบันข้อมูลมีความซับซ้อนและข้อมูลมีปริมาณมากขึ้น ทำให้วิธีแบบเดิมใช้เวลาในการคำนวณด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ปัญหาการจัด

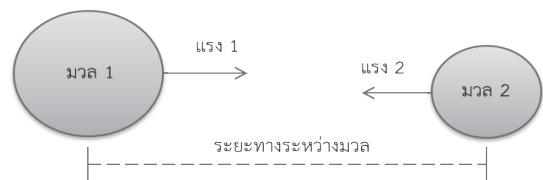
เส้นทางเดินทางแบบความจุรถขนส่งมีจำกัด ได้รับความนิยมมากที่สุด [6] วิธีแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางเดินทางแบ่งวิธีการแก้ปัญหาออกเป็น 3 ประเภท คือ วิธีแรก คือ วิธีแก้ปัญหาแบบสมการคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถหาผลเฉลยได้ดีที่สุดเนื่องจากใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เหมาะสมกับปัญหาที่มีขนาดเล็ก เพราะใช้เวลาในการหาผลเฉลยใช้เวลานาน โดยมีเวลาการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็น Exponential ตามขนาดของปัญหา วิธีการแบบที่สอง คือ วิธีแก้ปัญหาแบบเฉพาะเจาะจงกับชนิดของปัญหา (Specific Approach) เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาแบบเฉพาะเจาะจงจึงไม่สามารถนำไปประยุกต์แก้ปัญหาอื่นได้ และไม่รับรองผลเฉลยที่ดีที่สุดเพราะผลเฉลยมาจากการประมาณ (Approximation) เช่น วิธี Pert และ CPM วิธีการแบบที่สาม คือวิธีแก้ปัญหาแบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) หรือเรียกว่า วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีปริมาณข้อมูลมาก ปัญหาที่มีความสลับซับซ้อนสูง เพราะวิธีการนี้มีความยืดหยุ่นในการแก้ปัญหา และมีการเรียนรู้การสร้างผลเฉลย การพัฒนาผลเฉลยด้วยตัวของอัลกอริทึมเอง เหมาะกับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) แต่หัวใจสำคัญคือการประยุกต์วิธีแก้ปัญหากับปัญหาให้มีความเหมาะสม วิธีเมตาฮิวริสติกถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในหลายสาขาวิชา เช่น วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ บริหารธุรกิจ การจัดการทรัพยากร เป็นต้น โดยส่วนมากวิธีการเมตาฮิวริสติกพัฒนามาจากแนวคิดพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และสังคม วิธีเมตาฮิวริสติกที่พัฒนามาจากหลักการหรือกฎทางฟิสิกส์ เช่น วิธี Gravity Search Algorithm (GSA) [7], วิธี Intelligent Water Drops Algorithm (IWD) [8], วิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง หรือ Central Force Optimization (CFO) เป็นต้น วิธีที่พัฒนามาจากพื้นฐานทางชีววิทยาหรือจากพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต เช่น วิธี Ant Colony Optimization (ACO) [9], วิธี Cuckoo Search (CS)

[10], Particle Swarm Optimization (PSO) [11] และวิธีการทางพันธุกรรมหรือ Genetic Algorithm (GA) [12] เป็นต้น วิธีที่พัฒนามาจากพื้นฐานทางเคมี เช่น วิธี Artificial Chemical Reaction Optimization (ACROA) [13] วิธีที่พัฒนามาจากพื้นฐานทางสังคมวิทยา เช่น วิธี Imperialist Competitive Algorithm (ICA) [14], วิธีการค้นหาแบบทาปู [15] และวิธีการค้นหาแบบเพื่อนบ้าน [16] วิธีที่พัฒนามาจากพื้นฐานทางมานุษยดนตรีวิทยา เช่น วิธี Harmony Search Algorithm (HSA) [17] จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการแบ่งวิธีเมตาฮิวริสติกด้วยพื้นฐานการพัฒนา แต่ถ้าแบ่งด้วยวิธีการสร้างประชากรเริ่มต้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบสุ่ม (Random) ซึ่งความน่าจะเป็นเท่ากันเช่น GA, PSO และแบบความน่าจะเป็นไปยังตำแหน่งถัดไปเช่น ACO, CFO [18] โดยหลักการสำคัญของวิธีเมตาฮิวริสติก คือการเรียนรู้ด้วยตัวของอัลกอริทึม จากประสบการณ์หรือผลเฉลยก่อนหน้า ซึ่งแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบนำเอาผลเฉลยก่อนมาพัฒนาต่อ เช่นวิธี GA วิธี PSO ซึ่งนำผลเฉลยจากการคำนวณครั้งก่อนมาเก็บเป็นผลเฉลยเริ่มต้นของการคำนวณถัดมาและวิธีการนำผลเฉลยครั้งก่อนมาแทนเป็นตัวเลขเพื่อสร้างผลเฉลยรอบถัดไป เช่น วิธีของกลุ่ม ACO การจัดเส้นทางการจัดส่งวัคซีนในปัจจุบัน ยังขาดการวางแผนการจัดส่งที่ดี โดยกำหนดจัดส่งอาทิตย์ละ 1 ครั้ง โดยเลือกจากระยะทางที่ใกล้ที่สุดจัดส่งก่อน ทำให้ผลรวมของระยะทางรวมมีค่ามาก ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและด้านเวลาจากระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังมีปัญหาขอบเขตของผลเฉลยขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีของกลุ่ม เมตาฮิวริสติก ซึ่งงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง งานวิจัยนี้มีหัวข้อดังต่อไปนี้ หัวข้อที่ 1 บทนำ แสดงถึงทฤษฎีและความเป็นมาของปัญหา หัวข้อที่ 2 แนวคิดวิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง วิธีการค้นหาแบบทาปูและวิธีการค้นหาแบบเพื่อนบ้าน หัวข้อที่ 3 สมการวัตถุประสงค์และเงื่อนไขของสมการ หัวข้อที่ 4 ปัญหาวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง

สำหรับปัญหาเครือข่ายโซ่อุปทานเย็นของวัคซีน หัวข้อที่ 5 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง หัวข้อที่ 6 สรุป หัวข้อ 7 กิตติกรรมประกาศ โดยได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อมูลจากงานวิจัยจากระบบคลังข้อมูลด้านการแพทย์และสุขภาพ (HDC) หัวข้อ 8 เอกสารอ้างอิง สำหรับทำวิจัย

2. แนวคิดวิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง วิธีการค้นหาแบบทาปูและวิธีค้นหาแบบเพื่อนบ้าน

แนวคิดวิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางมาจากกฎแรงโน้มถ่วงของนิวตัน (Newton's Universal Law of Gravitation) อธิบายไว้ว่าแรงที่ดึงดูดระหว่างมวลโดยขนาดของแรงขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างมวลและขนาดของมวล โดยมีค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วง (Gravity Constant) ซึ่งแปรผันตามสภาพแวดล้อม เช่น โลก ดวงจันทร์ ดาวพุธ เป็นต้น โดยกำหนดมวลทั้ง 2 อยู่บนโลกกำหนดค่าคงที่แรงโน้มถ่วงที่ 9.807 m/s^2 ซึ่งแรงดึงดูดระหว่างมวลแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แรงดึงดูดระหว่างมวลขนาดต่างกัน

วิธี CFO เป็นหนึ่งในวิธีของเมตาฮิวริสติก ซึ่งถูกนำเสนอโดย R.A. Formato ในปี 2007 วิธีการนี้อยู่บนพื้นฐานของหลักกลศาสตร์อนุภาคในสนามแรงโน้มถ่วง ซึ่งตามหลักของฟิสิกส์อนุภาคเคลื่อนที่ในระนาบ 3 มิติ คือ x, y, z และขนาดของมวลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีแรงดึงดูดมากกว่ามวลขนาดเล็ก ซึ่งในหลักการของวิธี CFO อนุภาคแต่ละอนุภาคที่เคลื่อนที่แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยหลักการของวิธี CFO ไม่ใช้การสุ่ม แต่จะใช้ความน่าจะเป็นสำหรับการสร้างผลเฉลยและนิยมนำไปแก้ปัญหาทาง

$$\sum_{j=0}^M X_{jq}^l - \sum_{m=0}^M X_{jq}^l = 0 (q=1 \dots M) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K Y_i^k = 1 \quad (i=1, 2, 3, \dots, K) \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^L Y_j^l = 1 \quad (j=1, 2, 3, \dots, L) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N c_i^v Y_i^K \leq a_k^v \quad (k=1 \dots K) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^M c_j^v Y_j^L \leq a_L^v (l=1 \dots L) \quad (9)$$

$$Y_i^k \leq \sum_{i=1}^N X_{ij}^k \quad (i=1 \dots N), (k=1 \dots K) \quad (10)$$

$$Y_j^l \leq \sum_{j=1}^M X_{jm}^l \quad (j=1 \dots M), (l=1 \dots L) \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N X_{ij}^k \geq 1 \quad (j=1, 2, 3, \dots, N) \quad (12)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^M X_{jm}^l \geq 1 \quad (m=1, 2, 3, \dots, M) \quad (13)$$

$$U_i - U_j + N \sum_{k=1}^K X_{ij}^k \leq N-1, \quad \forall_{i,j} = (2, \dots, N) \quad (14)$$

$$U_j - U_m + N \sum_{l=1}^L X_{jm}^l \leq N-1, \quad \forall_{j,m} = (2, \dots, N) \quad (15)$$

สมการที่ 1 คือผลรวมระยะทางทั้งหมดของการจัดส่งวัคซีน จาก ODPC ถึง CUP เงื่อนไขที่ 2 แสดงถึงรถขนส่งวัคซีนจาก ODPC i ไปยัง PHO j เงื่อนไขที่ 3 แสดงถึงรถขนส่งวัคซีนจาก PHO j ไปยัง CUP m เงื่อนไขที่ 4

กับเงื่อนไข 5 เชื่อกันไว้ว่า PHO j และ CUP m ได้รับวัคซีน เงื่อนไขที่ 6 และเงื่อนไขที่ 7 เชื่อกันว่ารถส่งวัคซีน k และ l ผ่าน PHO j และ CUP m ตามลำดับ เงื่อนไขที่ 8 และ เงื่อนไขที่ 9 การขนส่งวัคซีนต้องไม่เกินจำนวนความจุของรถ k และ l เงื่อนไขที่ 10 และ 11 รถขนส่งวัคซีนต้องผ่าน PHO j และ CUP m เงื่อนไขที่ 12 กับ เงื่อนไข 13 ทั้ง PHO j และ CUP m ต้องได้รับการส่งวัคซีนอย่างน้อย 1 ครั้ง ตามความต้องการ เงื่อนไขที่ 14 และ เงื่อนไขที่ 15 เป็นการป้องกันการเกิดทัวร์ย่อย เพื่อให้รถจัดส่งวัคซีนตรงตามเงื่อนไข

4. วิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลางสำหรับปัญหาเครือข่ายโซุ่ปทานเย็นของวัคซีน

กำหนดข้อมูลระยะทางของ ODPC 1 ไปยัง PHO และ PHO ไปยัง CUP ข้อมูลเป็นแบบตารางระยะทางแสดงระยะทางระหว่างจุด ซึ่งเก็บข้อมูลจาก Google Map เก็บข้อมูลความต้องการวัคซีนของ CUP ถูกส่งความต้องการไปยัง PHO และ PHO ส่งความต้องการวัคซีนไปยัง ODPC ซึ่งต้องคำนึงถึงความสามารถในการบรรทุกวัคซีนของรถจัดส่งวัคซีน กำหนดค่าตัวแปร $\bar{R}_j$ คือค่าความน่าจะเป็นสำหรับการเลือก PHO และ CUP ในการจัดส่งวัคซีนมีลักษณะเป็นเวกเตอร์ ซึ่งในหลักการของ HCFO เปรียบเสมือนอนุภาคเคลื่อนที่ในระนาบและ $\bar{a}_j$ คือค่าเวกเตอร์ความเร่งของอนุภาค ซึ่งเริ่มต้นกำหนดค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากขั้นตอนการหาผลเฉลยเริ่มต้น เมื่อนำตัวแปร $\bar{a}_j$ แทนในสมการที่ 16 เพื่อทำให้ความน่าจะเป็นสำหรับการเลือก PHO และ CUP เท่ากัน ซึ่งสามารถแทนด้วยเลขค่าคงที่ตัวอื่นได้ ยกเว้นเลข 0 โดยงานวิจัยของ Formato R.A. กำหนดให้เป็น 1 [19] เพื่ออำนวยความสะดวกเข้าใจ

4.1 ขั้นตอนการสร้างผลเฉลยเบื้องต้น

เริ่มจากกำหนด ODPC 1 เป็นจุดเริ่มต้นของการจัดส่งวัคซีนและเป็นจุดสุดท้ายเมื่อการจัดส่งวัคซีนเสร็จแล้ว หลังจากนั้นกำหนดความน่าจะเป็นในการเลือก PHO ที่ส่งวัคซีนเป็นลำดับถัดไปจากสมการของวิธี HCFO

$$\overline{R}_{ij} = \overline{V}_{ij}t + \frac{1}{2}\overline{a}_{ij}t^2 + n_{ij}, \quad j > 1 \quad (16)$$

โดยที่ $\overline{V}_j$ คือค่าความเร็วเริ่มต้นที่เป็นเวกเตอร์ซึ่งกำหนดค่าเริ่มต้นไว้ที่ 1 และ t คือเวลาซึ่งเริ่มต้นกำหนดให้เป็นค่าคงที่เท่ากับ 1 และ n_{ij} คือหนึ่งส่วนระยะทางจาก ODPC i ไป PHO j หลังจากแทนค่าในสมการ 16 เพื่อสร้างค่าความน่าจะเป็นของเส้นทางที่เป็นไปได้โดยเลือกจากวงล้อเสี่ยงทาย (Roulette wheel) สำหรับเลือก PHO j ที่ไปส่ง และเช็คความต้องการวัคซีนของ PHO ที่ไปส่งแล้วนำไปหักจาก วัคซีนที่บรรทุกไป เลือก PHO ในการส่งวัคซีนถัดไปจนครบเส้นทางหรือวัคซีนที่บรรทุกไปหมด จำเป็นต้องกลับไปนำวัคซีนที่ ODPC 1 ใหม่ แล้วจัดส่งวัคซีนตามหลักการข้างต้น ต่อจนครบทุกความต้องการของ PHO แล้วคำนวณระยะทางของการเดินทางขนส่งวัคซีนทั้งหมด บันทึกค่าผลเฉลย ตามหลักการข้างต้น แต่ละ PHO จัดส่งวัคซีนไปยัง CUP ภายในจังหวัดแต่ละจังหวัด ทำการรวบรวมระยะทางสำหรับการจัดส่งของแต่ละ PHO มารวมกับระยะทางจาก ODPC 1 ถึง PHO เป็นผลรวมระยะทางทั้งหมด กำหนดให้เป็นผลเฉลยเริ่มต้น หลังจากนั้นคำนวณเส้นทางใหม่ทำให้ครบตามจำนวนที่กำหนดเป็นผลเฉลยเบื้องต้น โดยหลักการผลเฉลยเริ่มต้นควรกระจายครอบคลุมทั้งขอบเขตของปัญหา ซึ่งสมการวัตถุประสงค์สามารถแทนด้วยระยะทางที่ผ่านตั้งแต่เริ่มต้นคือ ODPC 1 ไปยัง PHO และกลับมายัง ODPC และจาก PHO ไปยัง CUP และกลับมายัง PHO อีกครั้งซึ่งแทนด้วยสมการดังนี้

$$M = f(R_{0i}, R_{ij}, R_{jk}, \dots, R_{X0}) \quad (17)$$

โดยการสร้างผลเฉลยเริ่มต้นของวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง สำหรับปัญหาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็นสร้างในรูปแบบของอาร์เรย์ 2 มิติ ไม่สมมาตร เนื่องจากจำนวนจุดส่งวัคซีนของแต่ละ PHO ไม่เท่ากัน แสดงดังภาพที่ 3 แกน X แสดงจำนวนของ CUP ที่ต้องจัดส่งของแต่ละ PHO ซึ่งมีปริมาณในการจัดส่งไม่เท่ากัน แกน Y แสดงจำนวน PHO ที่จัดส่งจาก ODPC 1 ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 8 PHO โดยแต่ละ PHO ได้ทำการจัดส่งวัคซีนไปยัง CUP ในเขตความรับผิดชอบของแต่ละ PHO โดยใช้วิธีการสุ่ม CUP สำหรับการเลือกจุดส่ง หลังจากสร้างตารางแบบไม่สมมาตรเสร็จแล้วก็นำมาประมวลผลหาระยะทางของแต่ละ PHO ไปยัง CUP แล้ว นำระยะทางมารวมกัน ซึ่งก็คือค่าผลเฉลยของสมการวัตถุประสงค์

4.2 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบทาбу

วิธีการค้นหาแบบทาбуถูกประยุกต์ใช้สำหรับการป้องกันการสร้างเส้นทางการจัดส่งวัคซีนเริ่มต้นซ้ำกัน เพื่อเพิ่มโอกาสสำหรับการกระจายผลเฉลยเริ่มต้น และเพิ่มโอกาสสำหรับหาผลเฉลยที่ดีขึ้น โดยการกำหนดผลเฉลยที่ถูกสร้างขึ้นมาไว้ในทาбуลิสต์ เพื่อเช็คเส้นทางและป้องกันการซ้ำ เริ่มจากตรวจสอบเส้นทางการจัดส่งวัคซีนของกระบวนการข้างต้น เปรียบเทียบกับเส้นทางในทาбуลิสต์ที่เก็บไว้ ถ้าเส้นทางการจัดส่งวัคซีนซ้ำกันก็ยกเลิกเส้นทางนั้นและสร้างเส้นทางใหม่จากกระบวนการข้างต้น

	CUPs								
PHO1	3	4	1	2	6	8	9	5	7
PHO2	2	6	1	7	5	3	4		
PHO3	3	5	7	8	1	4	2	6	
PHO4	4	6	9	7	8	1	2	3	5
PHO5	5	4	3	1	2				
PHO6	5	6	1	4	3	2			
PHO7	7	5	1	6	2	3	4		
PHO8	4	6	7	2	5	1	3		

ภาพที่ 3 ตัวอย่างการสร้างผลเฉลยเริ่มต้น

4.3 ขั้นตอนการวนรูปและการตรวจสอบเงื่อนไข

หลังจากกระบวนการสร้างผลเฉลยเริ่มต้นของวิธี HCFO ขั้นตอนต่อมาคือ วนรูปเพื่อพัฒนาผลเฉลยจากผลเฉลยเริ่มต้น โดยนำค่าจากผลเฉลยเริ่มต้นมาคำนวณสำหรับหาความน่าจะเป็น โดยที่คำนวณค่าความเร่งใหม่จากสมการดังนี้

$$\overrightarrow{a_{new}} = \frac{GM^\alpha}{(r_{ij})^\beta} \quad (18)$$

ค่า G เป็นค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงของโลกกำหนดเท่ากับ 9.807 m/s^2 ค่า M คือค่าระยะทาง จากสมการที่ 17 ส่วนค่า α กำหนดให้ $\alpha > 0$ และค่า β กำหนดให้ $\beta > 0$ วิธี HCFO กำหนดให้ทั้งสองค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 ตามลำดับ [18] วิธี HCFO กำหนดการควบคุมค่าความเร่งให้อยู่ในขอบเขต เพื่อโอกาสสร้างผลเฉลยใหม่ที่ดีมีมากขึ้น โดยกำหนดค่าดังนี้

$$\overrightarrow{a_{max}} = M - \frac{1}{2}(M - r_{ij}) \quad (19)$$

โดยที่

$$\overrightarrow{a_{min}} = \frac{\overrightarrow{a_{max}}}{2} \quad (20)$$

$$\text{ถ้า } \overrightarrow{a_{new}} < \overrightarrow{a_{min}} \text{ ดังนั้น } \overrightarrow{a_{new}} = \overrightarrow{a_{min}} \quad (21)$$

$$\text{ถ้า } \overrightarrow{a_{min}} < \overrightarrow{a_{new}} < \overrightarrow{a_{max}} \text{ ดังนั้น } \overrightarrow{a_{new}} = \overrightarrow{a_{new}} \quad (22)$$

$$\text{ถ้า } \overrightarrow{a_{new}} > \overrightarrow{a_{max}} \text{ ดังนั้น } \overrightarrow{a_{new}} = \overrightarrow{a_{max}} \quad (23)$$

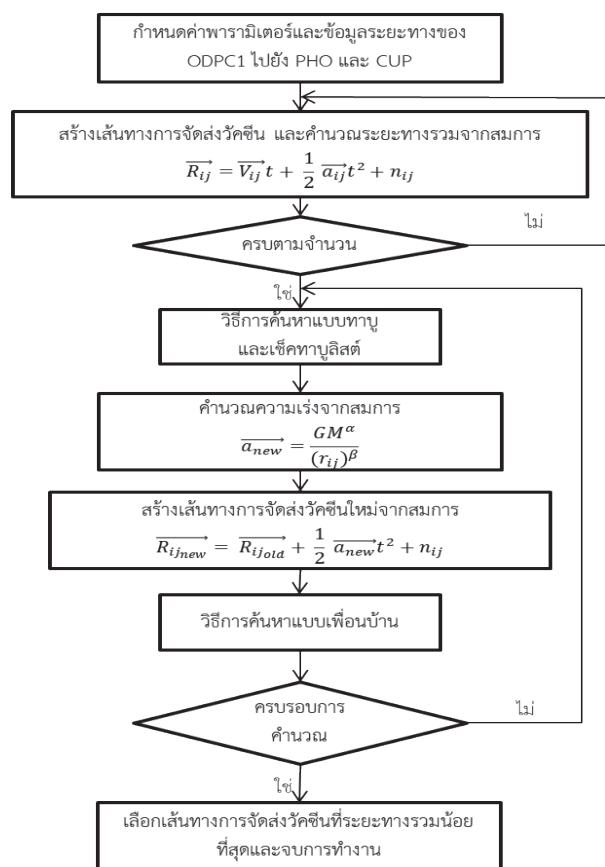
หลังจากได้ค่าความเร่งใหม่สำหรับในรอบการคำนวณถัดไปสามารถนำไปแทนในสมการหาความน่าจะเป็นดังต่อไปนี้

$$\overrightarrow{R_{ij_{new}}} = \overrightarrow{R_{ij_{old}}} + \frac{1}{2} \overrightarrow{a_{new}} t^2 + n_{ij}, \quad j > 1 \quad (24)$$

4.4 การประยุกต์วิธีค้นหาแบบเพื่อนบ้าน

หลังจากกระบวนการหาผลเฉลยของการจัดส่งวัคซีนแล้วขั้นตอนถัดมาคือ นำเส้นทางผลเฉลยมาเข้าสู่กระบวนการค้นหาแบบเพื่อนบ้าน ซึ่งเลือกเส้นทางที่มีระยะทางรวมของการจัดส่งวัคซีนน้อยที่สุดของรอบการคำนวณนั้น มาสู่ตำแหน่งของการสลับจุดส่ง โดยกำหนดสุ่ม 1 ตำแหน่ง แล้วสลับตำแหน่ง ข่าย-ขวาและเลือกเส้นทางที่ให้ค่าระยะทางน้อยที่สุดหลังจากนั้นกลับไปยังขั้นตอนการสร้างผลเฉลยเริ่มต้นเพื่อสร้างผลเฉลยใหม่

และผ่านกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพกระบวนการทำงานของวิธี HCFO ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของ HCFO

5. ผลการทดลอง

โปรแกรมของงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาด้วยภาษา Visual Basic 2012 Express Edition โปรแกรม Minitab 18 เวอร์ชันทดลองใช้ 30 วันสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ Intel core i7 3.40 GHz Ram 8 GB งานวิจัยนี้กำหนดให้วิธี HCFO มีจำนวนพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ รอบการคำนวณต่อตำแหน่งเริ่มต้น I/PP (Iteration / Probe Positions) หน่วยเป็นครั้ง ค่าถ่วงน้ำหนักมวล (α) และค่าถ่วงน้ำหนักระยะทางระหว่างมวล (β) โดยมีการตรวจสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยทดสอบสมมติฐาน 4 ตัว

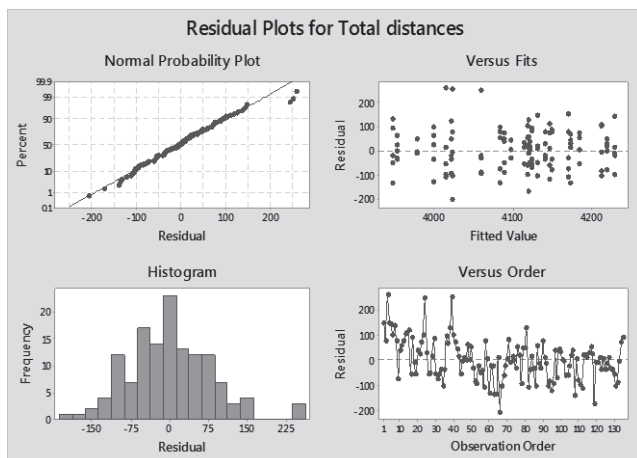
คือ การทดสอบสมมติฐานกราฟแท่งฮิสโตแกรมส่วนตกค้าง การทดสอบสมมติฐานความปกติส่วนตกค้าง การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนที่มีค่าคงที่และการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ [20] การออกแบบการทดลองเป็นแบบ Full Factorial Design 3 ระดับ (3^k) โดย k เป็นจำนวนปัจจัย ซึ่งทั้งวิธี CFO และ HCFO ใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวกันซึ่งงานวิจัยนี้แสดงพารามิเตอร์ของ HCFO ในตารางที่ 2 เนื่องจากจำนวนพารามิเตอร์ 3 ตัว ทำให้เป็น 33 กำหนดจำนวนรอบการทำงานซ้ำ 5 ครั้งเพื่อลดความแปรปรวนของการทดลอง ทำให้มีจำนวนการทดลอง 135 ครั้ง

ตารางที่ 2 ค่า 3 ระดับของพารามิเตอร์ของ CFO และ HCFO

	ระดับ		
ปัจจัย CFO และ HCFO	ต่ำ	กลาง	สูง
I/PP	50/200	100/100	200/50
α	1	2	3
β	1	2	3

การตรวจสอบสมมติฐานทั้ง 4 เป็นการทดสอบสมมติฐานของวิธี CFO และวิธี HCFO โดยกำหนดการวิเคราะห์การกระจายตัวของเศษเหลือ (Residual) โดยพิจารณากราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) และกราฟแท่ง (Histogram Plot) พบว่ามีการแจกแจงแบบปกติ กราฟ Versus Fits และกราฟ Versus Order สามารถสรุปข้อมูลได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแปรแบบปกติและข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันแสดงดังภาพที่ 5 ซึ่งมีลักษณะแบ่งเป็น 4 กราฟคือ กราฟ Normal Probability Plot ช่องซ้ายบน กราฟ Versus

Fits อยู่ช่องซ้ายล่าง กราฟ Histogram Plot อยู่ช่องซ้าย
ล่างและกราฟ Versus Order อยู่ช่องซ้ายล่าง ตามลำดับ



ภาพที่ 5 การทดสอบสมมติฐานของ HCFO

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการละเมิดสมมติฐาน ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนรูปแบบสมการเชิงเส้น (ANOVA General Linear Model) โดยวิเคราะห์จากค่า P-Value ที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นไว้ที่ 95% จากการออกแบบการทดลอง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการหาผลเฉลี่ยของวิธี CFO และ HCFO คือ ค่าถ่วงน้ำหนักระยะทางระหว่างมวล เท่ากับ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

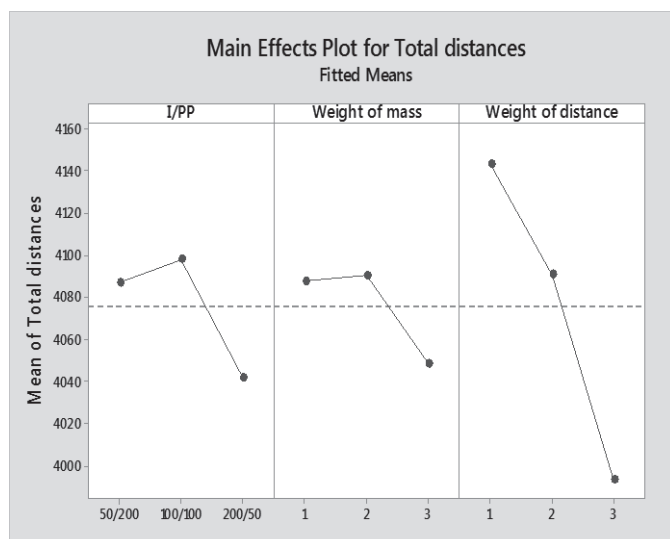
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ CFO

Source	DF	SS	MS	F	P
<i>I/PP</i>	2	79476	39738	2.51	0.086
α	2	49281	24641	1.56	0.215
β	2	521050	260525	16.47	0.000
<i>I/PP</i> * α	4	34679	8670	0.55	0.701
<i>I/PP</i> * β	4	112938	28235	1.79	0.137
α * β	4	28234	7059	0.45	0.775
<i>I/PP</i> * α * β	8	100656	12582	0.8	0.608
Error	108	1707881	15814		
Total	134	2634197			

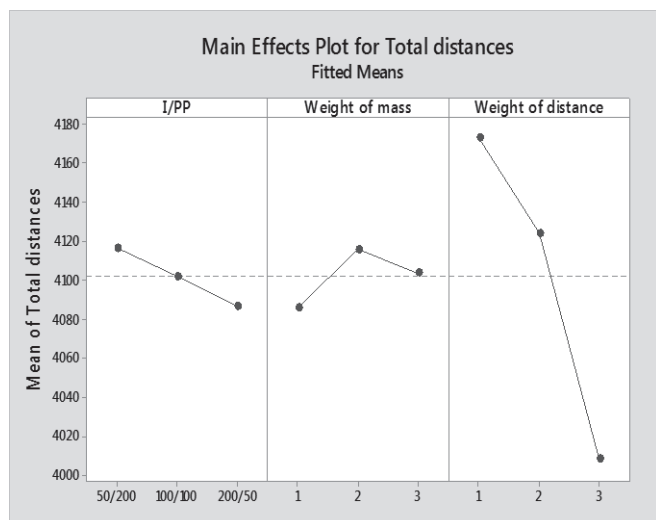
ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ HCFO

Source	DF	SS	MS	F	P
<i>I/PP</i>	2	19454	9727	1.18	0.312
α	2	19953	9976	1.21	0.303
β	2	642919	321459	38.94	0.000
<i>I/PP</i> * α	4	60825	15206	1.84	0.123
<i>I/PP</i> * β	4	8791	2198	0.27	0.899
α * β	4	13720	3430	0.42	0.797
<i>I/PP</i> * α * β	8	51075	6384	0.77	0.627
Error	108	891510	8255		
Total	134	1708247			

จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 สามารถนำข้อมูลมาแสดงผลเป็นกราฟ Main Effect Plot ของวิธี CFO และ HCFO เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการเฉลยของปัญหาห้วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีน ซึ่งแสดงว่าปัจจัย ค่าถ่วงน้ำหนักระยะทางระหว่างมวลหรือ β มีผลต่อการหาผลเฉลยที่ดี



ภาพที่ 6 ปัจจัยผลกระทบหลักของ CFO



ภาพที่ 7 ปัจจัยผลกระทบหลักของ HCFO

จากภาพที่ 6 และภาพที่ 7 แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อการหาผลเฉลย คือ ระยะทางระหว่างมวล (β) เนื่องจากว่ามีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และค่าเฉลี่ยระยะทางน้อยที่สุด โดยกำหนด ชุดของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับประมวลผลการแก้ปัญหาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีน โดยกำหนดให้ วิธี CFO กำหนดให้ I/PP เท่ากับ 200/50 ค่าถ่วงน้ำหนักมวล เท่ากับ 3 และค่าถ่วงน้ำหนักระยะทางระหว่างมวล เท่ากับ 3 วิธี HCFO กำหนดให้ I/PP เท่ากับ 200/50 ค่าถ่วงน้ำหนักมวล เท่ากับ 1 และค่าถ่วงน้ำหนักระยะทางระหว่างมวล เท่ากับ 3 หลังจากได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับประมวลผลการแก้ปัญหาห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีนแล้ว กำหนดให้ประมวลผลแต่ละวิธี จำนวน 20 ครั้ง ซึ่งผลเฉลยของการประมวลผลด้วยวิธี CFO สามารถหาเส้นทางการจัดส่งวัคซีนได้ระยะทางสั้นกว่าสถานการณ์จริง 97 กิโลเมตร และวิธี HCFO สามารถหาเส้นทางการจัดส่งวัคซีนได้ระยะทางสั้นกว่าสถานการณ์จริง 119 กิโลเมตร จากการทดลองพบว่าวิธีการค้นหาแบบทาคูและวิธีการค้นหาแบบเพื่อนบ้านทำให้ประสิทธิภาพของวิธี HCFO ดีกว่าวิธี CFO ประมาณ 22 กิโลเมตร ระยะทางรวมและเวลาการประมวลผลของแต่ละวิธีแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การสรุปผลจากการประมวลผล

วิธี	ผลรวมระยะทาง	เวลาประมวลผล
HCFO	3804 กม.	24.65 วินาที
CFO	3826 กม.	21.36 วินาที
การขนส่งปัจจุบัน	3923 กม.	-

จากตารางที่ 5 เวลาของการประมวลผลสรุปได้ว่าวิธี HCFO ใช้เวลาการคำนวณมากกว่าวิธี CFO เนื่องจากวิธี HCFO เพิ่มขึ้นตอนการค้นหาแบบทาบ และ การค้นหาแบบเพื่อนบ้านทำให้เวลาประมวลผลมากกว่าวิธี CFO อยู่ 3.29 วินาที

6. สรุปผล

ปัญหาเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเย็นของวัคซีนจัดเป็นปัญหาที่องค์การอนามัยโลกให้ความสำคัญ เนื่องจากว่าการรักษาคุณภาพของวัคซีนตั้งแต่โรงงานที่ผลิตไปจนถึงผู้ใช้ที่รับการรักษาต้องมีการควบคุมทั้งอุณหภูมิ การจัดเก็บวัคซีนที่เหมาะสม ความร้อน ความเย็นและแสง มีผลต่อคุณภาพของวัคซีนทั้งสิ้น การวางแผนการจัดส่งที่ดีเพื่อให้วัคซีนรักษาคุณภาพและปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของคนที่ใช้ จึงถือเป็นเรื่องที่สำคัญ งานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยคือ การจัดส่งวัคซีนจากสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค เขต 1 จังหวัดเชียงใหม่ไปยังสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด 8 แห่ง และจัดส่งไปยังศูนย์ประสานงานการปฐมพยาบาลเบื้องต้น 102 แห่ง โดยนำเสนอวิธีเมตาฮิวริสติก ชื่อว่าวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลางและกำหนดให้จัดส่งวัคซีนครบทุกจุดส่ง ซึ่งกำหนดให้มีการเปรียบเทียบการหาผลเฉลยของวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลางกับวิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางแบบดั้งเดิม และการจัดส่งวัคซีนในปัจจุบัน การทดลองกำหนดให้มีการออกแบบการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีไฮบริดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง สำหรับการประมวลผลหาผลเฉลยและสามารถสร้างผลเฉลยที่มีระยะทางของการจัดส่งวัคซีนสั้นกว่าวิธีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางแบบดั้งเดิมและการจัดส่งวัคซีนในปัจจุบัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นความต้องการของวัคซีนมีความแปรปรวนของแต่ละช่วงเวลา ทำให้ความต้องการวัคซีนแตกต่างกัน จึงไม่มีความจำเป็นต้องส่งครบทุกจุดส่งแต่เลือกส่งเฉพาะจุดส่งที่มีความต้องการวัคซีนหรือสร้างแบบจำลองเพื่อกำหนดจุดพักวัคซีนตามศูนย์ประสานงานการปฐมพยาบาลเบื้องต้นที่มีความพร้อม

ด้านการจัดเก็บและรักษาคุณภาพของวัคซีนเพื่อสามารถป้องกันการขาดแคลนวัคซีนและสามารถจัดส่งวัคซีนได้ทันที

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และได้รับข้อมูลสำหรับงานวิจัยจากระบบคลังข้อมูลด้านการแพทย์และสุขภาพ (HDC)

8. บรรณานุกรม

- (1) World Health Organization (WHO), 2017. Vaccine cold chain. <http://www.who.int/immunization/documents>
- (2) แพทย์พรณ ภูริปัญญา, 2555. แนวทางการดำเนินงานโครงการสร้างเสริมภูมิคุ้มกันโรคด้วยวัคซีนด้วยระบบ VMI. สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ ๖ จังหวัดขอนแก่น.
- (3) พลเอกหญิง ศาสตราจารย์ ดร.สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี, 2559. ภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ. วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, เล่มที่ : 14 เลขหน้า 1-8.
- (4) กรมป้องกันและควบคุมโรค, 2559. พื้นที่ความรับผิดชอบ ของสำนักงานป้องกันและควบคุมโรค, <http://odpc1.ddc.moph.go.th/area01.html>
- (5) เครือวัลย์ จำปาเงิน, 2547. การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อจัดเส้นทางเดินรถสำหรับการขนส่งสินค้าเพื่อการบริโภคสู่ร้านค้าปลีกในสถานบริการน้ำมันจังหวัดนนทบุรี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (6) Jaegere N., Defraeye M., I. Van Nieuwenhuyse, 2013. Vehicle routing problem: state of the art classification and review, KU Leuven.
- (7) Rashedi E., Nezamabadi H., Saryadi S, 2009. Gravitational Search Algorithm, Information sciences, Vol 179: pp 2232-2248.
- (8) Shah-Hossemimi H., 2009. Optimization with the Nature-Inspired Intelligent Water Drops Algorithm, Evolutionary computation, Wellington Pinheiro dos Santos (Ed.).
- (9) Dorigo M. and Gambardella L. M., 1997. Ant Colony System: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem, IEEE Transaction, Vol. 1, pp. 53-66.
- (10) Xin S.Y., Suash D., 2010. Cuckoo search via Lévy flights, Mathematical Modeling and Numerical Optimization, Vol. 1(4), pp. 210-214.

- (11) Kennedy J., Eberhart R.C., 1995. The Particle swarm optimization, IEEE Transaction, Vol. 4, pp. 1942-1948.
- (12) Goldberg D.E., 1989. Genetic Algorithm in Search, The Optimisation and Machine Learning, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC.
- (13) Alatas B., 2012. A novel chemistry based the metaheuristic optimization method for mining of classification rules, Expert system with application, Vol. 39, pp. 11080-11088.
- (14) Gargari A.E., Lucas C., 2007. Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vol.7, pp. 4661-4666.
- (15) Glover F., 1986. Future paths for integer programming and link to artificial intelligence, computers and operation research, Vol 13, No. 5, pp. 533-549.
- (16) Knuth D., 1973. The Art of Computer Programming, Vol.3, Stanford University, ADDISON-WESLEY: An Imprint of Addison Wesley Longman inc.
- (17) Lee K.S, Geem Z.W., 2005. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: Harmony search theory and practice, Computer Methods in Applied mechatronic and Engineering, Vol.194, pp. 3902-3933.
- (18) คณณ สุจาวี, สกิตเทพ สังข์ทอง, จีรัตน์ จิตธรรมมา, 2559. การออกแบบเครือข่ายห่วงโซ่อุปทานเลือดโดยใช้วิธีแรงเข้าสู่จุดศูนย์กลาง, การประชุมวิชาการถ่ายทอดงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2559. หน้า 2-10.
- (19) Formato R.A., 2007, Central force optimization: A new metaheuristic with applications in applied electromagnetics, Progress in electromagnetics research, Vol 77, pp.425-491.
- (20) Montgomery DC., 2001. Design and analysis of experiments, 5th edition, New York, John Wiley and Sons.

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการมีท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่รับก๊าซธรรมชาติจากพม่า
บริเวณอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี
Environmental Impacts of Gas Transmission Pipeline from Myanmar in
Tong Pha Phum and Sai Yok District, Kanchanaburi Province

ภัทรกร ชัยสินธุ์^{1*}
สามัคคี บุญยะวัฒน์²
สมนิมิตร พุกงาม³
สันติ แสงเลิศไสว⁴

¹*โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁴คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*Corresponding Author. E-mail: nufai_cotton@hotmail.com

(Received: April 20, 2018; Revised: June 20, 2018; Accepted: July 26, 2018)

บทคัดย่อ : แหล่งก๊าซธรรมชาติที่สำคัญของภาคตะวันตกของประเทศไทย คือ ยาดานา ซอติกา และเยตากุน จากพม่าขนส่งผ่านระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติมายังประเทศไทย บริเวณอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี โดยลูกค้าหลักคือโรงไฟฟ้าราชบุรี หากเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและชุมชนจากการดำเนินงานระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติย่อมส่งผลกระทบต่อมาตรการความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญระดับชาติ จึงเป็นที่มาของการวิจัยในครั้งนี้ การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ จากการมีระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ และเพื่อศึกษาและติดตามผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในระยะก่อนก่อสร้าง ระยะก่อสร้างและระยะดำเนินการของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติ บริเวณอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี จากการมีท่อส่งก๊าซธรรมชาติ บริเวณอำเภอทองผาภูมิ และ อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากรายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการตรวจสอบคุณภาพ ของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากแหล่งยาดานา (สหภาพพม่า) โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดัน ณ สถานีควบคุมก๊าซ Block Valve Waste 7 (BVW 7) โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดันก๊าซหน่วยที่ 4 ณ สถานีควบคุมก๊าซ BVW7 และโครงการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก จากชายแดนไทย-สหภาพพม่า มายังสถานีควบคุมก๊าซที่ BVW1 และลงพื้นที่เพื่อเก็บตัวอย่างตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม คือ คุณภาพอากาศในบรรยากาศ (ไนโตรเจนไดออกไซด์; NO₂, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์; SO₂, คาร์บอนมอนอกไซด์; CO และฝุ่นละอองรวม; TSP) คุณภาพอากาศจากปล่องระบายอากาศ (ออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปแบบของไนโตรเจนไดออกไซด์; NO_x ในรูปของ NO₂, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์; SO₂, คาร์บอนมอนอกไซด์และ TSP) ระดับเสียง (ระดับเสียงเฉลี่ย 24 ชั่วโมง; Leq24hr และระดับเสียงสูงสุด; Lmax) คุณภาพน้ำทิ้ง (pH, อุณหภูมิ, ของแข็งแขวนลอย; SS, Biochemical Oxygen Demand; BOD และ Chemical Oxygen Demand; COD) นอกจากนี้ยังสัมภาษณ์ 2

กลุ่มตัวอย่าง คือกลุ่มหน่วยงานราชการและผู้นำชุมชนและกลุ่มครัวเรือน จำนวน 110 ตัวอย่าง สำหรับอำเภอทองผาภูมิ และ จำนวน 607 ตัวอย่าง สำหรับอำเภอไทรโยค รวม 717 ตัวอย่าง จากผลการวิจัยพบว่า ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมสำคัญในระยะก่อนก่อสร้างคือ เรื่องเสียง ในระยะก่อสร้างคือฝุ่นและในระยะดำเนินการคือเรื่องเสียง สำหรับผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ตั้งแต่ระยะก่อนก่อสร้าง ระยะก่อสร้าง และระยะดำเนินการ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมดทุกรายการตรวจวัด และจากแบบสอบถามที่ใช้ในการสัมภาษณ์กลุ่มหน่วยงานราชการและผู้นำชุมชน และกลุ่มครัวเรือนในพื้นที่ศึกษา จำนวนรวม 717 ตัวอย่าง พบว่า ไม่มีความวิตกกังวลในผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยจากกิจกรรมของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ มีข้อเสนอแนะที่ได้คือ สนับสนุนกิจกรรมมวลชนสัมพันธ์ในพื้นที่อย่างต่อเนื่อง ประชาสัมพันธ์กิจกรรมของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง และสนับสนุนคนท้องถิ่นเข้าทำงาน

คำสำคัญ: ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

Abstract : Natural gas resources at western of Thailand are from Yadana Zawtika and Yetagun, from Republic of the Union of Myanmar. Gas transmission supply is done by pipeline, start at Tong Pha Phum district and Sai Yok district, Kanchanaburi province. Major customers is Ratchaburi Power Plant. So environmental and social impact is very important for sustainability energy management of Thailand. Therefore, this is research proposal. The objective of this research is to analyse significant Environmental Impact Assessment from gas transmission pipeline and to study and monitor environmental impact of gas transmission pipeline in pre-construction period, construction period and monitoring period from gas transmission pipeline in Tong Pha Phum and Sai Yok district, Kanchanaburi Province. The research is collected secondary data from Environmental Impact Assessment operation and final report that submitted by Environmental Impact Evaluation Bureau from project of gas transmission pipeline from Yadana resource (Myanmar), project of gas transmission pipeline for installation compressor at Block Valve Waste 7 (BVW7), project of gas transmission pipeline for installation new compressor unit 4 at BVW7 and project of onshore gas transmission pipeline from boundary of Thailand and Myanmar at BVW1. This research collects environmental data of Air quality (Nitrogen dioxide; NO₂, Sulfur dioxide; SO₂, Carbon monoxide; CO and Total Suspended Solid; TSP), Air stack quality (Oxide of Nitrogen as Nitrogen dioxide; NO_x as NO₂, Sulfur dioxide; SO₂, Carbon monoxide; CO and Total Suspended Solid; TSP), Sound level (Leq 24 hr and Lmax), Effluent of wastewater treatment (pH, temperature, Suspended Solid, Biochemical Oxygen Demand; BOD and Chemical Oxygen Demand; COD). Interview 2 groups are group of governments and community leaders and group of people 110 samples for Tong Pha Phum district and 607 samples for Sai Yok district. Total are 717 samples. The result is significant aspect of environmental impacts in pre-construction period is noise, construction period is dust and monitoring period is noise. All parameters of environmental analysis test report in pre-construction

period, construction period and monitoring period had qualified with standard. Result of interview group of governments and community leaders and group of people. Total are 717 samples show that people do not concern effect of safety and environmental operation from gas transmission pipeline and have suggestion from interview was continued support activity of community, provide information of gas transmission pipeline activity to community and support local employee.

Keywords: Environmental Impact, Gas Transmission Pipeline

1. บทนำ

ก๊าซธรรมชาติ นับเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด การขุดเจาะเพื่อเสาะหาก๊าซธรรมชาติแหล่งใหม่ ใช้เวลานานค่อนข้างสูง ทั้งยังมีความเสี่ยงที่จะขุดเจอแหล่งก๊าซธรรมชาติที่มีปริมาณน้อย ไม่คุ้มค่ากับการลงทุน สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยี การขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม ส่งผลให้หลากหลายประเทศทั่วโลก จำเป็นต้องเสาะหาแหล่งก๊าซธรรมชาติใหม่ๆ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น สำหรับประเทศไทยนั้นร้อยละ 80 ของความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติ สามารถผลิตได้ในประเทศ มาจากทะเลฝั่งอ่าวไทย ได้แก่ แหล่งเอราวัณ แหล่งบงกช แหล่งอาทิตย์ แหล่งเบญจมาศ แหล่งทานตะวัน และแหล่งปลาทอง เป็นต้น และบริเวณพื้นที่ทับซ้อนได้แก่ แหล่งพัฒนาร่วมไทย-มาเลเซีย (Join Development Area; JDA) รวมถึงพื้นที่บนบกในประเทศ ได้แก่ แหล่งน้ำพอง อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น และแหล่งภูฮ่อม อำเภอหนองแสง จังหวัดอุดรธานี และอีกร้อยละ 20 นำเข้าจากต่างประเทศ จำแนกเป็นร้อยละ 16 นำเข้าจากประเทศพม่าและร้อยละ 4 นำเข้าจากตะวันออกกลาง อเมริกาใต้ ออสเตรเลีย ในรูปก๊าซธรรมชาติเหลว [1]

ประเทศไทย มีปริมาณสำรองก๊าซธรรมชาติจากทุกแหล่งที่พิสูจน์แล้วประมาณ 2,128 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุต คิดเป็นเฉพาะปริมาณสำรองก๊าซธรรมชาติของ

ประเทศไทยประมาณ 11.1 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุต (จากแหล่งน้ำพอง แหล่งบงกช และแหล่งเอราวัณ) รายละเอียดดังตารางที่ 1 ขณะที่ อัตราการบริโภคก๊าซธรรมชาติของประเทศไทยประมาณ 0.0045 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน

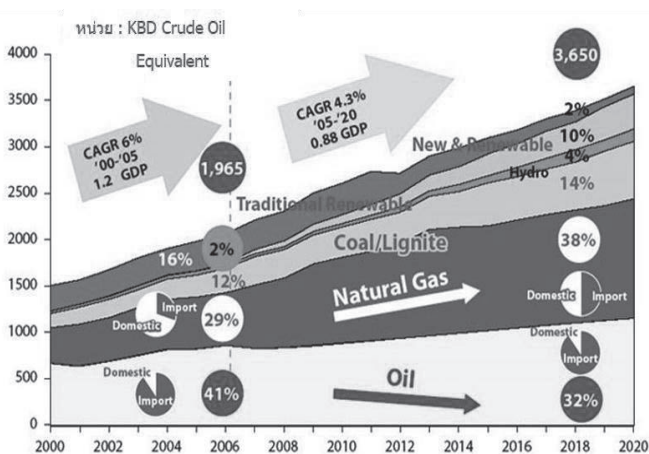
ตารางที่ 1 ขนาดแหล่งก๊าซธรรมชาติของประเทศไทย และประเทศเพื่อนบ้าน

ประเทศ	แหล่ง	ปริมาณสำรอง (ล้านล้าน ลูกบาศก์ฟุต)	อัตราการผลิต (ล้านลูกบาศก์ ฟุตต่อวัน)
พม่า	Yadana	6.5 ¹	800
	Yetagun	4.4 ¹	440
	Shwe	3.5 ¹	400
	Natuna	210 ¹	-
ไทย	น้ำพอง	0.4 ²	16
	บงกช	6.8 ²	1,172
	เอราวัณ	3.9 ²	344
รวม		11.1	3,172

ที่มา: กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ [2]

หมายเหตุ 1. ปริมาณ Recoverable Reserves
2. ปริมาณ Total Ultimate Recovery (Cumulative Production + Proved + Probable + Possible)

จากการประเมินปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติที่นับวันมีแต่จะเพิ่มขึ้น โดยกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ ตามประกาศกระทรวงพลังงานคาดการณ์ความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติของประเทศไทย ปี ค.ศ. 2018 คือร้อยละ 38 ของแหล่งพลังงานทั้งหมด [3] ดังภาพที่ 1 แหล่งก๊าซธรรมชาติจากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น ประเทศพม่า มีบทบาทสำคัญในการเป็นแหล่งพลังงานหลักให้กับระบบท่อก๊าซธรรมชาติทางภาคตะวันตกของประเทศไทย โดยขนส่งผ่านระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากประเทศพม่าและต่อท่อผ่านอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี เข้ามายังประเทศไทย โดยลูกค้าหลัก คือโรงไฟฟ้าราชบุรี หากเกิดปัญหากับระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติบริเวณนี้จะส่งผลกระทบต่ออย่างใหญ่หลวงต่อประชาชน หน่วยงานราชการ รัฐวิสาหกิจ และแหล่งอุตสาหกรรม



ภาพที่ 1 โครงสร้างการใช้พลังงานในอนาคตของประเทศไทย
ที่มา: ประกาศกระทรวงพลังงาน (2556)

เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในด้านสิ่งแวดล้อมและสังคม ควรใช้หลักบูรณาการ คือกระบวนการสร้างและค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อเท็จจริง และพฤติกรรม เพื่อที่สามารถเชื่อมโยงวิถีชีวิตของคนกับสิ่งแวดล้อม ได้อย่างสมบูรณ์และสมดุลในทุกด้าน โดยใช้ความรู้จาก

หลากหลายสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องมาผสมผสานเข้าด้วยกัน หรือนำสิ่งที่สัมพันธ์กันมาจัดให้เกิดการเรียนรู้อย่างเป็นองค์รวม มาปรับใช้หรือวางแผนปรับปรุงแก้ไข ให้เกิดประโยชน์ได้จริงในชีวิตประจำวันอย่างมีคุณภาพ [4]

การพัฒนาแบบยั่งยืน (Sustainable Development) คือ รูปแบบของการพัฒนาที่สนองความต้องการของคนในรุ่นปัจจุบันโดยไม่ทำให้คนรุ่นต่อไปในอนาคตต้องประนีประนอม ยอมลดทอนความสามารถในการที่จะตอบสนองความต้องการของตนเอง การอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้ เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน ดำเนินการอนุรักษ์พื้นที่ป่าไม้ของประเทศ โดยสนับสนุนให้เจ้าหน้าที่ของรัฐประสานความร่วมมือกับประชาชนในพื้นที่ ให้ราษฎรมีส่วนร่วมรักษาผืนป่าในท้องถิ่นของตน ทั้งการปลูกป่าเพิ่มเติม การบำรุงรักษาและ การป้องกันการลักลอบตัดทำลาย [5] กรอบการบริหารจัดการอย่างยั่งยืน อ้างอิงมาจากแนวทางการดำเนินการในระดับสากล ซึ่งครอบคลุมทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม (Sustainability Management) ภายใต้หลักบรรษัทภิบาลที่ดี เพื่อให้เกิดการดำเนินงานที่สอดคล้องกันในทุกธุรกิจ โดยกำหนดเป้าหมาย และแนวทางการดำเนินงานให้ทุกธุรกิจนำไปปฏิบัติ เพื่อจัดทำแนวทางปฏิบัติการพัฒนายั่งยืนให้เป็นคู่มือการดำเนินการในทุกมิติ อันจะส่งผลสู่การนำไปปฏิบัติอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดความเชื่อมโยงของการดำเนินงาน ในแต่ละเรื่องที่อาจมีหลายหน่วยงานรับผิดชอบร่วมกัน [6]

สำหรับโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติในประเทศไทย มีกรณีตัวอย่าง การศึกษาผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อม (ระยะก่อสร้าง) โครงการก่อสร้างท่อส่งก๊าซธรรมชาติเส้นที่ 4 (ระยะอง-แก้งค้อย) พบว่า ผู้รับเหมาดำเนินมาตรการที่ปฏิบัติได้ตามที่ระบุในมาตรการ และมีการรายงานผลด้านความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อมอย่างครบถ้วน ทั้งยังมีการจัดทำเอกสารรายงานที่จำเป็นส่งหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องอย่างครบถ้วน [7] ปัจจุบันระบบขนส่ง

ก๊าซธรรมชาติทางท่อสายประธานของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) มีความยาวโดยรวมประมาณ 4,225 กิโลเมตร จำแนกเป็นท่อส่งก๊าซธรรมชาติในทะเลประมาณ 2,241 กิโลเมตร และท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบกสายประธาน ความยาวประมาณ 1,315 กิโลเมตร ท่อส่งก๊าซไปยังโรงไฟฟ้า ความยาวประมาณ 158 กิโลเมตร ท่อส่งก๊าซไปยังกลุ่มลูกค้าอุตสาหกรรม ความยาวประมาณ 511 กิโลเมตร [8] โดยระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติในทะเลทำหน้าที่ลำเลียงก๊าซธรรมชาติที่ผลิตได้จากแหล่งก๊าซธรรมชาติทั้งในอ่าวไทยและสหภาพพม่า ไปยังโรงแยกก๊าซธรรมชาติและโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก รวมทั้งขนส่งก๊าซธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติไปยังพื้นที่เป้าหมายที่ต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบ เช่น โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม และภาคการคมนาคมขนส่ง ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แนวท่อก๊าซธรรมชาติในประเทศไทย

ที่มา: บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) (2556)

จากการศึกษาและการดำเนินงานร่วมกับ โครงการ ท่อส่งก๊าซธรรมชาติหลายๆ โครงการ งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ส่งผลต่อชุมชนบริเวณอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยคจังหวัดกาญจนบุรี เนื่องจากเป็นพื้นที่ติดกับประเทศพม่า ทั้งยังมีลักษณะการใช้ที่ดินที่หลากหลาย ตั้งแต่ เกษตรกรรม ชุมชน อุตสาหกรรม มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนเพื่อทราบแนวทางแก้ไขหรือป้องกันที่เป็นระบบเพื่อลดผลกระทบของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ส่งผลต่อชุมชนบริเวณอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยคจังหวัดกาญจนบุรี

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ จากการมีระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ และเพื่อศึกษาและติดตามผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในระยะก่อนก่อสร้าง ระยะก่อสร้างและระยะดำเนินการของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติ บริเวณอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี จากการมีท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทรรศิน ศรีวรภาพงศ์ (2550) [9] ได้ดำเนินการสำรวจความพึงพอใจของผู้นำชุมชนและตัวแทนครัวเรือนที่มีต่องานมวลชนสัมพันธ์ บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) โครงการวังน้อย แก่งคอย โดยใช้กรอบแนวคิดหาค่าความแตกต่างระหว่างข้อมูล ด้วยวิธีการวิจัยเชิงปริมาณ โดยใช้แบบสอบถามวัดระดับความพึงพอใจ ซึ่งใช้สถิติพรรณนาและเชิงอนุมานด้วย T-Test, One Way ANOVA และ Scheffe มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการคัดค้านหรือต่อต้านจากชุมชน

Bent Sherar (2011) [10] ได้ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนของระบบ

ท่อส่งก๊าซธรรมชาติ มีด้วยกันหลายปัจจัย เช่น การกัดกร่อนในสภาวะไร้ออกซิเจน การกัดกร่อนในสภาวะที่มีออกซิเจน การกัดกร่อนที่เริ่มจากสภาวะไร้ออกซิเจน แล้วเปลี่ยนมาเป็นสภาวะที่มีออกซิเจน รวมทั้งจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน ล้วนส่งผลกระทบต่อ การกัด-กร่อน ส่งผลให้ท่อส่งก๊าซธรรมชาติเสื่อมก่อนสภาพความเป็นจริง การค้นพบและหาทางป้องกันปัจจัยเหล่านี้จะช่วยยืดอายุท่อส่งก๊าซธรรมชาติได้

Ruby SEIS (2013) [11] ได้ศึกษาผลจากการดำเนินการขุดเจาะเพื่อวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่มลรัฐเนวาดา ประเทศสหรัฐอเมริกา มีการวิจัยและเก็บตัวอย่างดิน สิ่งแวดล้อม และชั้นหิน รวมทั้งสภาวะแวดล้อมในปัจจุบันที่เป็นอยู่ โดยเปรียบเทียบกับ การวางแนวท่อในอดีตและวิธีการแบบปัจจุบัน เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และวิถีชีวิตของชุมชนน้อยที่สุด

4. วิธีดำเนินการศึกษา

พื้นที่ศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือบริเวณพื้นที่วางท่อส่งก๊าซธรรมชาติผ่านอำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี โดยนำข้อมูลจากรายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมาตรการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม จาก 4 โครงการ คือโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากแหล่งยาดานา [12] (สหภาพพม่า) โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดัน ณ สถานีควบคุมก๊าซ Block Valve Waste (BVW7) โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดันก๊าซหน่วยที่ 4 ณ สถานีควบคุมก๊าซ BVW7 [13] และโครงการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก จากชายแดนไทย-สหภาพพม่ามายังสถานีควบคุมก๊าซที่ BVW1 [14] มาเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดด้านสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน

การดำเนินงานท่อส่งก๊าซธรรมชาติ จากแหล่งยาดานา ได้เริ่มก่อสร้างตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 และดำเนินการเมื่อปี พ.ศ. 2549 หลังจากนั้นเมื่อความต้องการก๊าซธรรมชาติของประเทศไทยมีมากขึ้น จึงได้มีส่วนขยาย

ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติเพิ่มเติม อีก 3 ครั้ง ดังนี้ ครั้งที่ 1 มีการขยายแนวท่อเพื่อรับก๊าซธรรมชาติบริเวณ BVW7 อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี เพื่อรับก๊าซเพิ่มเติมจากแหล่งขุดก๊าซ ครั้งที่ 2 กรณีมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความดัน (Compressor) เพิ่มเติมอีก 1 เครื่อง บริเวณ BVW7 อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี และครั้งที่ 3 มีการขยายแนวท่อเพื่อรับก๊าซธรรมชาติบริเวณ BVW1 อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เพื่อรับก๊าซเพิ่มเติมจากแหล่งเขตากุน และจากการปรับปรุงแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติเพิ่มเติมดังกล่าว จึงส่งผลให้รายการตรวจวัดบางพื้นที่ไม่ครอบคลุมทั้งสามช่วงระยะเวลา แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประวัติการดำเนินงานท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากสหภาพพม่า

ลำดับ	ชื่อท่อ	EIA ฉบับสมบูรณ์ (พ.ศ.)	ระยะก่อสร้าง (พ.ศ.)	ระยะดำเนินการ (พ.ศ.)
1	ท่อ ยาดานา	2542	2543-2548	2549 – ปัจจุบัน
2	BVW7 ครั้งที่ 1	2545	2550-2551	2552 – 2555
3	BVW7 ครั้งที่ 2	2556	2556-2557	2558 – ปัจจุบัน
4	BVW1	2556	2556-2557	2558 – ปัจจุบัน

ทำการรวบรวมข้อมูลในส่วนของการสำรวจความคิดเห็นและทัศนคติชุมชนจากรายงานการศึกษผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก จากชายแดนไทย-สหภาพพม่า พ.ศ. 2556 และโครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดันก๊าซหน่วยที่ 4 ณ สถานีควบคุมก๊าซ BVW7 พ.ศ. 2556 และลงพื้นที่เพื่อสัมภาษณ์ผู้นำชุมชนและชาวบ้าน เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลปัจจุบัน โดยสอบถามถึง

ความพึงพอใจและผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงจากการมีท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ดังมีขั้นตอนในการศึกษาวิจัยดังนี้

4.1 การรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

4.1.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

รวบรวมข้อมูลรายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมจาก 4 โครงการ คือโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากแหล่งยานา (สหภาพพม่า) โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดัน ณ สถานีควบคุมก๊าซ BVW7 โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดันก๊าซหน่วยที่ 4 ณ สถานีควบคุมก๊าซ BVW7 และโครงการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก จากชายแดนไทย-สหภาพพม่ามายังสถานีควบคุมก๊าซที่ BVW1

4.1.2 การสำรวจทัศนคติชุมชน

รวบรวมผลการสำรวจทัศนคติชุมชนจากรายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมจาก 4 โครงการ คือโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากแหล่งยานา (สหภาพพม่า) โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดัน ณ สถานีควบคุมก๊าซ BVW7 โครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดันก๊าซหน่วยที่ 4 ณ สถานีควบคุมก๊าซ BVW7 และโครงการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก จากชายแดนไทย-สหภาพพม่า มายังสถานีควบคุมก๊าซที่ BVW1 รวมทั้ง รายงานผลกิจกรรมมวลชนสัมพันธ์ ปี 2558-2560 ของศูนย์ปฏิบัติการระบบท่อเขต 8 จังหวัดกาญจนบุรี บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)

4.2 การเก็บข้อมูลพื้นที่

4.2.1 ออกแบบสอบถาม จำนวน 2 ชุด สำหรับประชากรเป้าหมาย คือ

- สำหรับหน่วยงานราชการและผู้นำชุมชน (ตารางที่ 3)

1) อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ประกอบด้วย หมู่ที่ 1 บ้านอีต่อง ตำบลปิปลอก จำนวน 10 ราย

2) อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรีประกอบด้วย หมู่ที่ 3 บ้านลุ่มผึ้ง หมู่ที่ 4 บ้านหนองซอน หมู่ที่ 5 บ้านสามัคคีธรรมหมู่ที่ 6 บ้านไทรทอง หมู่ที่ 7 บ้านพุน้อย หมู่ที่ 8 บ้านเสรีธรรม หมู่ที่ 9 บ้านไทรรัตน์ หมู่ที่ 11 บ้านหินงามพุลู และเทศบาลตำบลวังโพธิ์ จำนวน 15 ราย

- สำหรับหัวหน้าครัวเรือนบริเวณ อำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี (ตารางที่ 3)

พื้นที่ศึกษาของโครงการอ้างอิงตามมาตรการในรายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมของแต่ละพื้นที่ โดยครอบคลุมพื้นที่ศึกษาในรัศมี 500 เมตร จากกึ่งกลางของแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติ สำหรับพื้นที่หมู่ที่ 1 บ้านอีต่อง ตำบลปิปลอก อำเภอทองผาภูมิ จำนวน 280 ครัวเรือน และ 5 กิโลเมตร จากกึ่งกลางของแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติ สำหรับตำบลวังโพธิ์ หมู่บ้านถ้ากระแสะ และถ้าชะนี (จำนวน 775 ครัวเรือน) ตำบลลุ่มสุม (จำนวน 3,323 ครัวเรือน) อำเภอไทรโยค จำนวน 4,098 ครัวเรือน ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่าง ของ Yamane [15] ตามสมการที่ 1

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

เมื่อ

n = ขนาดของหน่วยตัวอย่างกลุ่มเป้าหมาย

N = ประชากรทั้งหมด

e = ระดับความมีนัยสำคัญ

โดยกำหนดระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เท่ากับ ร้อยละ 5 สรุปรายงานตัวอย่างทั้งหมดในการสัมภาษณ์ในงานวิจัยครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนประชากรทั้งหมดและจำนวนแบบสอบถามที่ลงพื้นที่สัมภาษณ์ อำเภอทองผาภูมิและอำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

เป้าหมาย	จำนวนประชากร		จำนวนแบบสอบถาม	
	ทองผาภูมิ	ไทรโยค	ทองผาภูมิ	ไทรโยค
ราชการ	5	6	5	6
ผู้นำชุมชน	5	9	5	9
ครัวเรือน	280	4,098	165	365
รวม	293	4,113	178	380

ที่มา: กรมการปกครอง [16]

จากตารางสรุปได้ว่า จำนวนแบบสอบถามทั้งหมดของอำเภอทองผาภูมิ คือ 178 ชุด (มีเพียงตำบลปิล็อกที่มีท่อส่งก๊าซธรรมชาติพาดผ่าน และมีจำนวนครัวเรือนทั้งหมด 100 ครัวเรือน ผู้วิจัยจึงสัมภาษณ์ ทั้ง 100 ครัวเรือน คิดเป็น 100%) และอำเภอไทรโยค จำนวน 380 ชุด

4.2.2 สิ่งแวดล้อม

- ตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ บริเวณ BVW1 อำเภอทองผาภูมิและบริเวณ BVW7 อำเภอไทรโยค โดยใช้พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด คือ ไนโตรเจน-ไดออกไซด์ (NO_2), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และฝุ่นละอองรวม (TSP)

- ตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายอากาศ บริเวณ BVW1 อำเภอทองผาภูมิและ

บริเวณ BVW7 อำเภอไทรโยค โดยใช้พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด คือ ออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปของไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x ในรูปของ NO_2), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และฝุ่นละอองรวม (TSP)

- ตรวจวัดระดับเสียงทั่วไป ใช้ 2 พารามิเตอร์คือ ระดับเสียงเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ($\text{Leq } 24 \text{ hr}$) และระดับเสียงสูงสุด (Lmax) บริเวณ BVW1 อำเภอทองผาภูมิและบริเวณ BVW7 อำเภอไทรโยค

- ตรวจวัดคุณภาพน้ำทั้งบริเวณ BVW1 อำเภอทองผาภูมิและบริเวณ BVW7 อำเภอไทรโยค โดยใช้พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ของแข็งแขวนลอย (SS), อุณหภูมิ, BOD และ COD

4.3 วิเคราะห์ข้อมูล

4.3.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

นำผลตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ คุณภาพอากาศจากปล่องระบายอากาศ ระดับเสียงทั่วไป และคุณภาพน้ำทั้ง จากข้อ 4.2.2 มาวิเคราะห์ผล เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของผลตรวจวัดที่ได้กับค่ามาตรฐาน โดยใช้ข้อมูลของปี 2557-2560 (ตรวจวัดทุก 6 เดือน) เทียบกับรายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ระยะก่อนก่อสร้าง ระยะก่อสร้างและระยะดำเนินการ ดังมี วิธีการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมและมาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 วิธีการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

รายการตรวจวัด	มาตรฐานการวิธีวิเคราะห์	กฎหมายที่ใช้อ้างอิง
1. คุณภาพอากาศในบรรยากาศ		
1.1 NO ₂	U.S. EPA RFNA-1194-099	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 33 พ.ศ. 2552 [17]
1.2 SO ₂	U.S. EPA EQSA-0495-100	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 21 พ.ศ. 2544 [18]
1.3 CO	U.S. EPA 088	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 พ.ศ. 2538 [19]
1.4 TSP	U.S. EPA Method 802	
2. คุณภาพอากาศจากปล่องระบายอากาศ		
2.1 NO _x as NO ₂	U.S. EPA Method 7	มาตรฐานค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2549 [20]
2.2 SO ₂	U.S. EPA Method 6	
2.3 CO	U.S. EPA Method 10	
2.4 TSP	U.S. EPA Method 5	
3. ระดับเสียง		
3.1 L _{eq} 24hr 3.2 L _{max}	ISO 1996 ISO 1996	มาตรฐานระดับเสียงทั่วไปตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 15 พ.ศ. 2540 [21]

4.3.2 การสำรวจทัศนคติชุมชน

สอบถามเพื่อรับทราบถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงจากการดำเนินงานของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งสำรวจความพึงพอใจและข้อเสนอแนะจากชุมชนในพื้นที่

4.4 ขั้นตอนสรุปผลที่ได้จากงานวิจัย

วิธีการวิจัยของงานวิจัยนี้ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วิธีการวิจัย

5. ผลการศึกษา

5.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

รายละเอียดจุดตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมบริเวณตำบลลุ่มสุม อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี แสดงได้ดังตารางที่ 5 และอำเภอทองผาภูมิ แสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 จุดตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม บริเวณ
อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	จุดตรวจวัด	ความถี่ในการตรวจวัด
คุณภาพอากาศในบรรยากาศ	1. โรงเรียนบ้านหลุกกั้ง	ทุก 6 เดือน
	2. โรงเรียนบ้านลุ่มผึ้ง	ทุก 6 เดือน
คุณภาพอากาศจากปล่องระบาย	1. Gas Turbine Unit 1	ทุก 6 เดือน
	2. Gas Turbine Unit 2	ทุก 6 เดือน
ระดับเสียง	1. โรงเรียนบ้านหลุกกั้ง	ทุก 6 เดือน
	2. บ้านใกล้เคียงโครงการ	ทุก 6 เดือน
คุณภาพน้ำทิ้ง	จุดปล่อยน้ำทิ้งโครงการ	ทุก 6 เดือน

ตารางที่ 6 จุดตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม บริเวณ
อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	จุดตรวจวัด	ความถี่ในการตรวจวัด
คุณภาพอากาศในบรรยากาศ	1. ชุมชนบ้านอิต้อง	ทุก 6 เดือน
	2. เหมืองแร่บ้านอิต้อง	ทุก 6 เดือน
คุณภาพอากาศจากปล่องระบาย	1. Gas Turbine Unit 1	ทุก 6 เดือน
	2. Gas Turbine Unit 2	ทุก 6 เดือน
ระดับเสียงรอบสถานีควบคุมความดัน	1. ริมรั้วโครงการทิศเหนือ	ทุก 6 เดือน
	2. ริมรั้วโครงการทิศใต้	ทุก 6 เดือน
	3. ริมรั้วโครงการทิศตะวันออก	ทุก 6 เดือน
	4. ริมรั้วโครงการทิศตะวันตก	ทุก 6 เดือน
คุณภาพน้ำทิ้ง	จุดปล่อยน้ำทิ้งโครงการ	ทุก 6 เดือน

พารามิเตอร์ของแต่ละรายการตรวจวัด ในแต่ละจุดตรวจวัดจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับมาตรการที่ระบุไว้ในรายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการตรวจสอบ

คุณภาพสิ่งแวดล้อมของแต่ละโครงการ จากผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมพบว่าบริเวณ ตำบลลุ่มสุม อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี และบริเวณตำบลปลี๊ยก อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี มีผลการตรวจวัดต่ำสุดและสูงสุดในระยะก่อนก่อสร้าง ระยะก่อสร้างและระยะดำเนินการก่อสร้างก๊าซธรรมชาติดังนี้ (สำหรับผลที่ระบุว่าเป็น NOT Detected; N/D หมายความว่า ผลที่ได้มีค่าต่ำมากไม่สามารถตรวจวัดได้)

5.1.1 ผลตรวจวัดคุณภาพอากาศ ในบรรยากาศ อำเภอไทรโยค บริเวณโรงเรียนบ้านหลุกกั้งพบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะก่อสร้างและดำเนินการมีค่าสูงสุดในเนื่องมาจากการทดสอบระบบของเครื่องเพิ่มความดันในระยะก่อสร้าง และจากการใช้งานเครื่องเพิ่มความดันอย่างต่อเนื่องในระยะดำเนินการ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ
บริเวณโรงเรียนบ้านหลุกกั้ง อำเภอไทรโยค
จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	0.0006	0.0062	0.17
	ก่อสร้าง	0.0062	0.0197	0.17
	ดำเนินการ	0.0062	0.0197	0.17
SO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.30
	ก่อสร้าง	0.0067	0.0086	0.30
	ดำเนินการ	0.0067	0.0086	0.30
CO (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	30
	ก่อสร้าง	0.69	0.99	30
	ดำเนินการ	0.6	1.34	30
TSP (mg/m ³)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.33
	ก่อสร้าง	0.031	0.041	0.33
	ดำเนินการ	0.031	0.041	0.33

5.1.2 ผลตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศอำเภอไทรโยค บริเวณโรงเรียนบ้านลุ่มผึ้ง พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด เนื่องมาจากมีการใช้งานเครื่องเพิ่มความดันอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ บริเวณ โรงเรียนบ้านลุ่มผึ้ง อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	0.0009	0.0056	0.17
	ก่อสร้าง	0.0044	0.0199	0.17
	ดำเนินการ	0.0044	0.0199	0.17
SO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.30
	ก่อสร้าง	0.0054	0.0065	0.30
	ดำเนินการ	0.0001	0.008	0.30
CO (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	30
	ก่อสร้าง	0.32	0.75	30
	ดำเนินการ	0.55	1.24	30
TSP (mg/m ³)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.33
	ก่อสร้าง	0.02	0.055	0.33
	ดำเนินการ	0.016	0.08	0.33

5.1.3 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ อำเภอทองผาภูมิ บริเวณชุมชนบ้านอิต้อง พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะก่อสร้างค่าที่ได้มีค่าสูงสุด เนื่องมาจาก การทดสอบระบบเครื่องเพิ่มความดัน จึงส่งผลให้ในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ บริเวณชุมชนบ้านอิต้อง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.17
	ก่อสร้าง	0.02	0.05	0.17
	ดำเนินการ	0.01	0.03	0.17
TSP (mg/m ³)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.33
	ก่อสร้าง	0.09	0.14	0.33
	ดำเนินการ	0.08	0.14	0.33

5.1.4 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ อำเภอทองผาภูมิ บริเวณเหมืองแร่บ้านอิต้อง พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะก่อสร้างและดำเนินการมีค่าสูงสุด เนื่องมาจากมีการใช้งานเครื่องเพิ่มความดันอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ บริเวณเหมืองแร่บ้านอิต้อง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.17
	ก่อสร้าง	0.005	0.03	0.17
	ดำเนินการ	0.005	0.03	0.17
TSP (mg/m ³)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	0.33
	ก่อสร้าง	0.09	0.14	0.33
	ดำเนินการ	0.08	0.14	0.33

5.1.5 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบาย อำเภไทรโยค บริเวณ Gas Turbine จุดที่ 1 พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องมาจากการใช้งานเครื่องเพิ่มความดันอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายบริเวณ Gas Turbine จุดที่ 1 อำเภไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NOx ในรูป NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	200
	ก่อสร้าง	13	111	200
	ดำเนินการ	14	144.04	200
SO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	60
	ก่อสร้าง	0.1	0.3	60
	ดำเนินการ	N/D	0.3	60
CO (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	690
	ก่อสร้าง	36	86	690
	ดำเนินการ	12	100	690
TSP (mg/m ³)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	320
	ก่อสร้าง	4	10	320
	ดำเนินการ	1.27	18	320

หมายเหตุ: N/D คือ ผลที่ได้มีค่าต่ำมากไม่สามารถตรวจวัดได้

5.1.6 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบาย อำเภไทรโยค บริเวณ Gas Turbine จุดที่ 2 พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องมาจากการใช้งานเครื่องเพิ่มความดันอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณ

ความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบาย ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายบริเวณ Gas Turbine จุดที่ 2 อำเภไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NOx ในรูป NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	200
	ก่อสร้าง	20	109	200
	ดำเนินการ	15	156.19	200
SO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	60
	ก่อสร้าง	0.1	0.3	60
	ดำเนินการ	N/D	0.3	60
CO (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	690
	ก่อสร้าง	20	51	690
	ดำเนินการ	10	40.6	690
TSP (mg/m ³)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	320
	ก่อสร้าง	2	5	320
	ดำเนินการ	1	19	320

หมายเหตุ: N/D คือ ผลที่ได้มีค่าต่ำมากไม่สามารถตรวจวัดได้

5.1.7 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายอำเภทองพภูมิ บริเวณ Gas Turbine จุดที่ 1 พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะก่อสร้างมีค่าสูงสุดเนื่องมาจากการทดสอบระบบเครื่องเพิ่มความดัน จึงส่งผลให้ในระยะก่อสร้างมีค่าสูงสุด เมื่อระบบเสถียรแล้ว ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายอากาศที่ได้ มีค่าต่ำมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายบริเวณ Gas Turbine จุดที่ 1 อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NOx ในรูป NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	200
	ก่อสร้าง	N/D	17.59	200
	ดำเนินการ	N/D	N/D	200
SO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	60
	ก่อสร้าง	N/D	N/D	60
	ดำเนินการ	N/D	N/D	60

5.1.8 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบาย อำเภอทองผาภูมิ บริเวณ Gas Turbine จุดที่ 2 พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องจากปล่องระบายอากาศบริเวณ Gas Turbine จุดที่ 2 มีปัญหาจากงานบำรุงรักษา จึงส่งผลให้มีค่าสูงสุด เมื่อมีการปรับปรุงระบบแล้ว ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายอากาศที่ได้ มีค่าต่ำมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายบริเวณ Gas Turbine จุดที่ 2 อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
NOx ในรูป NO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	200
	ก่อสร้าง	N/D	N/D	200
	ดำเนินการ	N/D	27.99	200
SO ₂ (ppm)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	60
	ก่อสร้าง	N/D	N/D	60
	ดำเนินการ	N/D	N/D	60

5.1.9 ผลการตรวจวัดระดับเสียง อำเภอไทรโยค บริเวณบ้านหลุ่งกึ่ง พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องจากมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีการขนส่งก๊าซธรรมชาติผ่านท่อมากขึ้น จึงส่งผลให้ระดับเสียงในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลการตรวจวัดระดับเสียง บริเวณบ้านหลุ่งกึ่ง อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
Leq 24 hr dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	47.5	56.5	70
	ก่อสร้าง	47.5	53	70
	ดำเนินการ	41	66.8	70
Lmax dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	85.3	95.5	115
	ก่อสร้าง	84.6	104.5	115
	ดำเนินการ	80.1	104.1	115

5.1.10 ผลการตรวจวัดระดับเสียง อำเภอไทรโยค บริเวณบ้านลุ่มผึ้ง พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องจากมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีการขนส่งก๊าซธรรมชาติผ่านท่อมากขึ้นจึงส่งผลให้ระดับเสียงในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 16

หมายเหตุ: N/D คือ ผลที่ได้มีค่าต่ำมากไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ 16 ผลการตรวจวัดระดับเสียง บริเวณบ้านลุ่มฝั่ง
อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
Leq 24 hr dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	49.3	50.5	70
	ก่อสร้าง	44.7	63.2	70
	ดำเนินการ	42	65.4	70
Lmax dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	91.3	100.4	115
	ก่อสร้าง	72.2	96.5	115
	ดำเนินการ	72.2	111.1	115

5.1.11 ผลการตรวจวัดระดับเสียง อำเภอทองผาภูมิ บริเวณริมรั้วโครงการทิศเหนือ พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องจากมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีการขนส่งก๊าซธรรมชาติผ่านท่อมากขึ้น จึงส่งผลให้ระดับเสียงระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการตรวจวัดระดับเสียง บริเวณริมรั้ว
โครงการทิศเหนือ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัด
กาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
Leq 24 hr dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	70
	ก่อสร้าง	50.9	63.6	70
	ดำเนินการ	49	70	70
Lmax dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	115
	ก่อสร้าง	63.6	97.6	115
	ดำเนินการ	68.3	101.1	115

5.1.12 ผลการตรวจวัดระดับเสียง อำเภอทองผาภูมิ บริเวณริมรั้วโครงการทิศใต้ พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องจากมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีการขนส่งก๊าซธรรมชาติผ่านท่อมากขึ้น จึงส่งผลให้ระดับเสียงระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ผลการตรวจวัดระดับเสียง บริเวณริมรั้ว
โครงการทิศใต้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัด
กาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
Leq 24 hr dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	70
	ก่อสร้าง	53.3	58.8	70
	ดำเนินการ	51.2	60.7	70
Lmax dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	115
	ก่อสร้าง	68.7	90.1	115
	ดำเนินการ	64.4	104.1	115

5.1.13 ผลการตรวจวัดระดับเสียง อำเภอทองผาภูมิ บริเวณริมรั้วโครงการทิศตะวันออก พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุดเนื่องจากมีปริมาณความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีการขนส่งก๊าซธรรมชาติผ่านท่อมากขึ้นจึงส่งผลให้ระดับเสียงระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการตรวจวัดระดับเสียง บริเวณริมรั้ว
โครงการทิศตะวันออก อำเภอทองผาภูมิ
จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
Leq 24 hr dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	70
	ก่อสร้าง	51.1	51.6	70
	ดำเนินการ	43	59.3	70
Lmax dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	115
	ก่อสร้าง	74.2	99.8	115
	ดำเนินการ	63.3	101	115

5.1.14 ผลการตรวจวัดระดับเสียง อำเภอทองผาภูมิ บริเวณริมรั้วโครงการทิศตะวันตก พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะก่อสร้างมีค่าสูงสุดเนื่องมาจาก บริเวณริมรั้วโครงการทิศตะวันตกนั้นอยู่ใกล้พื้นที่ก่อสร้าง จึงส่งผลให้ระดับเสียงจากงานติดตั้งและก่อสร้างระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ในระยะก่อสร้างมีค่าสูงสุด ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการตรวจวัดระดับเสียง บริเวณริมรั้ว
โครงการทิศตะวันตก อำเภอทองผาภูมิ
จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
Leq 24 hr dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	70
	ก่อสร้าง	46.5	69.6	70
	ดำเนินการ	46.7	56.3	70
Lmax dB(A)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	115
	ก่อสร้าง	74	110	115
	ดำเนินการ	53.7	99.7	115

5.1.15 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโครงการ BVW7 อำเภอไทรโยค พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด เนื่องมาจากการสะสมของน้ำทิ้งที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสีย ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโครงการ
BVW7 อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
pH	ก่อนก่อสร้าง	-	-	5.5 – 9.0
	ก่อสร้าง	6.35	7.87	5.5 – 9.0
	ดำเนินการ	6.00	8.47	5.5 – 9.0
SS (mg/l)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	50
	ก่อสร้าง	3.3	13.6	50
	ดำเนินการ	2	45.4	50
อุณหภูมิ (°C)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	40
	ก่อสร้าง	24	30	40
	ดำเนินการ	25	30	40
BOD (mg/l)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	20
	ก่อสร้าง	0.5	2	20
	ดำเนินการ	1	19	20
COD (mg/l)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	120
	ก่อสร้าง	15	35	120
	ดำเนินการ	5	117	120

5.1.16 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโครงการ BVW1 อำเภอทองผาภูมิ พบว่าทุกค่าที่ทำการตรวจวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา โดยในระยะดำเนินการมีค่าสูงสุด เนื่องมาจากการสะสมของน้ำทิ้งที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสีย ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโครงการ
BWV1 อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี

รายการตรวจวัด	ระยะ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่ามาตรฐาน
pH	ก่อนก่อสร้าง	-	-	5.5 – 9.0
	ก่อสร้าง	7.03	7.9	5.5 – 9.0
	ดำเนินการ	6.87	8.2	5.5 – 9.0
SS (mg/l)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	50
	ก่อสร้าง	9	15	50
	ดำเนินการ	5	17	50
อุณหภูมิ (°C)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	40
	ก่อสร้าง	22	27	40
	ดำเนินการ	25	31	40
BOD (mg/l)	ก่อนก่อสร้าง	-	-	20
	ก่อสร้าง	0.5	2	20
	ดำเนินการ	10	19	20

5.2 ผลการสำรวจทัศนคติ

การสำรวจทัศนคติและความคิดเห็นด้วยแบบสอบถาม ดำเนินการระหว่างวันที่ 15-21 ตุลาคม 2559 สำหรับอำเภอทองผาภูมิ ได้จำนวนผู้ให้สัมภาษณ์จริงทั้งหมด 110 ราย ครอบคลุมผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่อยู่ในรัศมี 500 เมตร จากแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติ แยกกลุ่มเป้าหมายออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มหน่วยงานราชการและผู้นำชุมชนจำนวน 10 ราย และกลุ่มครัวเรือนจำนวน 100 ราย การนำเสนอเป็นการนำเสนอความคิดเห็นของประชาชนเกี่ยวกับผลกระทบที่ได้รับและการแก้ไขปัญหาจากโครงการ โดยมีประเด็นการรับรู้ข้อมูลข่าวสารโครงการ ความมั่นใจของชุมชนต่อระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ด้านระบบความปลอดภัย ความวิตกกังวลต่อโครงการ และความสำคัญของการมีส่วนร่วมของชุมชนในการเฝ้าระวัง และมีส่วนร่วมในการดูแลรักษาพื้นที่ตามแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ผลสำรวจพบว่า ผู้ให้สัมภาษณ์

ทุกคน ทราบถึงโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติและมีความมั่นใจในการดำเนินงานด้านคุณภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมของโครงการ และไม่พบผลกระทบเชิงลบด้านสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ต่อชุมชนมากยิ่งขึ้น ดังนี้

- ควรสนับสนุนกิจกรรมการพัฒนาด้านสังคมชุมชนอย่างต่อเนื่อง

- ควรดูแลปรับปรุงซ่อมแซมระบบการส่งกระแสไฟฟ้า (สายไฟชำรุด หม้อแปลงเก่า) เนื่องจากมีความกังวลอาจเกิดกระแสไฟฟ้ารั่ว ไฟฟ้าลัดวงจร

- ควรมีมาตรการป้องกันดูแลด้านความปลอดภัยให้มากยิ่งขึ้น

- ควรมีการแจ้งแผนป้องกันเหตุต่างๆ ให้ประชาชนในพื้นที่รับทราบล่วงหน้าเช่นเดิมอย่างต่อเนื่อง

สำหรับอำเภอไทรโยค ได้จำนวนผู้ให้สัมภาษณ์ทั้งหมด 607 ราย ครอบคลุมผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่อยู่ในรัศมี 5 กิโลเมตรจากพื้นที่ศึกษาโครงการ แยกกลุ่มเป้าหมายออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มหน่วยงานราชการและผู้นำชุมชนจำนวน 29 ราย และกลุ่มครัวเรือนจำนวน 578 ราย โดยมีประเด็นการรับรู้ข้อมูลข่าวสารโครงการ ความวิตกกังวลต่อโครงการ ผลกระทบจากการดำเนินโครงการ และความสำคัญของการมีส่วนร่วมของชุมชนในการเฝ้าระวัง และมีส่วนร่วมในการดูแลรักษาพื้นที่ตามแนวท่อส่งก๊าซ ผลปรากฏว่า ทุกคน ทราบถึงโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติและมีความมั่นใจในการดำเนินงานด้านคุณภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม ทั้งยังไม่พบผลกระทบเชิงลบด้านสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ต่อชุมชนมากยิ่งขึ้น ดังนี้

- การสนับสนุนแจกทุนการศึกษาแก่เด็กนักเรียน
- การสนับสนุนกิจกรรมวันเด็ก
- การสมทบเงินทุนสร้างอาคารเรียน ห้องสมุดโรงเรียน

- การสนับสนุนกิจกรรมทางศาสนา เช่น ทอดกฐิน
- การจัดนิทรรศการให้ความรู้แก่เด็ก
- การซ่อมแซมอุกฉิม
- การทำความสะอาดบริเวณพื้นที่วัดในวันสำคัญ
- การสนับสนุนกรวยเพื่อความปลอดภัย

6. สรุปและอภิปรายผล

ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม ได้แก่ คุณภาพอากาศ คุณภาพน้ำทิ้ง และระดับเสียงโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติ บริเวณตำบลลุ่มสุม อำเภอยะโฮร์โยคและบริเวณตำบลปลีอก อำเภอยะโฮร์โยค จังหวัดกาญจนบุรี เป็นไปตามมาตรฐานทั้งหมดและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งในระยะก่อนก่อสร้าง (ก่อน พ.ศ. 2556) ระยะก่อสร้าง (พ.ศ. 2556 - 2558) และระยะดำเนินการท่อส่งก๊าซธรรมชาติ (พ.ศ. 2558 - 2560) ซึ่งผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติ คือ เสียงและฝุ่นจากการคมนาคมขนส่ง โดยผู้ให้สัมภาษณ์สามารถรับรู้ได้ด้วยการสังเกตและพบเห็นด้วยตนเองในขณะที่มีการก่อสร้าง ทั้งนี้สอดคล้องกับข้อมูลผลตรวจวัดด้านสิ่งแวดล้อม คือระดับเสียงและ TSP ในระยะก่อสร้างมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับระยะเวลาช่วงอื่นๆ โดยโครงการได้มีมาตรการควบคุมการดำเนินงานที่เป็นไปตามมาตรฐาน จึงส่งผลให้ผลการตรวจวัดด้านสิ่งแวดล้อม ไม่เกินค่ามาตรฐานและไม่ได้รับข้อร้องเรียนจากชุมชน จากผลกระทบดังกล่าว

จากการสัมภาษณ์ผู้นำชุมชนและชาวบ้าน บริเวณอำเภอยะโฮร์โยค และอำเภอยะโฮร์โยค จังหวัดกาญจนบุรี พบว่า มีความมั่นใจในการดำเนินงานด้านคุณภาพความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม ดังมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้

- อยากให้มีการประชาสัมพันธ์ การดำเนินกิจกรรมด้านความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง

- สนับสนุนทุนการศึกษา และกิจกรรมของชุมชน
- รับคนท้องถิ่นเข้าทำงาน หรือสนับสนุนผลิตภัณฑ์ท้องถิ่น
- ควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อมให้ได้มาตรฐานอย่างต่อเนื่อง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สามัคคี บุญยะวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนิมิตร พุกงาม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติ แสงเลิศไสว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนคณาจารย์ สาขาวิชาการใช้ที่ดินและการจัดการทรัพยากรธรรมชาติ อย่างยั่งยืนทุกท่าน และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่โครงการ สาขาวิชาการใช้ที่ดินและการจัดการทรัพยากรธรรมชาติ อย่างยั่งยืน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

8. บรรณานุกรม

- (1) บริษัท ปตท. (มหาชน) จำกัด., 2555. ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ (สืบค้นจาก) <http://www.pttplc.com/th/about/business/ptt-owned-business/gas-unit/pages/transmission-pipeline.aspx>.
- (2) กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2556. รายงานประจำปี พ.ศ. 2556. กระทรวงพลังงาน.
- (3) ประกาศกระทรวงพลังงาน, 2556. ยุทธศาสตร์กระทรวงพลังงาน (พ.ศ. 2557-2561). กระทรวงพลังงาน.
- (4) ประกอบ มณีโรจน์, 2544. เรียนรู้สู่การปฏิบัติการวิจัยในชั้นเรียน. กรุงเทพมหานคร : บี.อี.ซี.
- (5) สำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 4 สาขาพิษณุโลก, 2550. สถานการณ์ป่าไม้และการจัดการ. พิษณุโลก.
- (6) John Elkington, 1977. Cannibals with forks: The Triple Bottom line of 21 th Century Business. University College London.
- (7) เมธี ขาครนิพิท, 2556. การปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมก่อสร้าง: ศึกษากรณีโครงการก่อสร้างท่อส่งก๊าซธรรมชาติเส้นที่ 4 (ระยอง-แก่งคอย). กรุงเทพมหานคร.
- (8) บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), 2556. ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ 30 ปี. กรุงเทพมหานคร.

- (9) ทรรดิน ศรีวราพงศ์, 2550. ความพึงพอใจของผู้นำชุมชนและตัวแทนครัวเรือนที่มีต่องานมวลชนสัมพันธ์ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) โครงการวังน้อย – แก่งคอย. กรุงเทพมหานคร.
- (10) Bent Sherar, 2011. The Effect of the Environment on the Corrosion Products and Corrosion Rates on Gas Transmission Pipelines. The University of Western Ontario London, Ontario, Canada.
- (11) Ruby SEIS, 2013. Supplemental Environmental Impact Statement Nevada. United State of America.
- (12) บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน), 2556. รายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก จากชายแดนไทย – สหภาพพม่า พ.ศ. 2556 ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- (13) บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน), 2556. รายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโครงการติดตั้งเครื่องเพิ่มความดันก๊าซหน่วยที่ 4 ณ สถานี ควบคุมก๊าซ BVW7 พ.ศ. 2556ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- (14) บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน), 2556. รายงานผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโครงการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบก จากชายแดนไทย-สหภาพพม่า มายังสถานีควบคุมก๊าซที่ BVW1พ.ศ. 2556 ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- (15) Yamane Taro, 1973. Statistics: An Introductor Analysis. Japan.
- (16) กรมการปกครอง, 2558. สถิติประชากรและบ้าน จังหวัดกาญจนบุรี. กระทรวงมหาดไทย.
- (17) ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 33 พ.ศ. 2552 เรื่องกำหนดมาตรฐานค่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยทั่วไป, 2552. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 126 ตอนพิเศษ 114 ง.
- (18) ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 21 พ.ศ. 2544 ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ชั่วโมง, 2544. สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ชั่วโมง, 2544. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 118 ตอนพิเศษ 39 ง.
- (19) ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 พ.ศ. 2538 ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป, 2538. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 112 ตอนที่ 42 ง.
- (20) ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 15 พ.ศ. 2540 เรื่องกำหนดมาตรฐานระดับเสียงโดยทั่วไป, 2540. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 114 ตอนที่ 27 ง.
- (21) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารปนเปื้อนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน, 2549. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 123 ตอนพิเศษ 125 ง.
- (22) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกนอกโรงงาน, 2539. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 113 ตอนที่ 52 ง.

การศึกษาคุณสมบัติของผนังเบาจากถุงกระดาษปูนซีเมนต์ A Study of Light Wall Properties of Cement Paper Bags

สุธน รุ่งเรือง^{1*}
ณิชาภา มินาบูลย์²
รัฐศักดิ์ พรหมมาศ³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

²สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

³สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

*Corresponding Author. E-mail : suthon.r@rmutr.ac.th

(Received: June 25, 2018; Revised: July 6, 2018; Accepted: July 26, 2018)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา “การศึกษาคุณสมบัติผนังเบาจากถุงกระดาษปูนซีเมนต์” โดยการนำถุงปูนที่ได้มายุ่อยให้ละเอียด ทำการผสมกับกาวผง และกาวลาเท็กซ์ ตามอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักวัสดุที่ใช้ ทำการขึ้นรูปโดยมีขนาด $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$ แบบวิธีอัดร้อน โดยใช้กาวทั้งสองชนิดเป็นวัสดุประสานการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล ตามมาตรฐาน มอก.966-2547 ผลการวิจัยพบว่าแผ่นผนังเบาที่ใช้กาวผงอัตราส่วนร้อยละ 15 เมื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ด้านความหนาแน่น ความชื้น การดูดซึมน้ำ และการพองตัวตามความหนา ผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล ด้านค่าความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และความต้านทานแรงดึงผิวพบว่าค่าความต้านทานแรงดัดต่ำกว่าค่าความต้านทานแรงดึงผิว ผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และจากการทดสอบการดูดซับเสียง พบว่าผนังเบามีค่าความดังของเสียงในทุกช่วงความถี่ โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 10.29 dB เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับเสียง กับแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง และยิปซัมบอร์ด พบว่าแผ่นผนังเบาจากถุงปูนซีเมนต์สามารถดูดซับเสียงได้ดีกว่า เนื่องจากผนังเบาจากถุงกระดาษปูนซีเมนต์นั้นมีความพรุนมากกว่า และมีความแข็งน้อยกว่าวัสดุทั้งสองชนิด จึงสามารถดูดซับเสียงได้ดีกว่า ด้านต้นทุนพบว่า ราคาต้นทุนการผลิตเฉพาะค่าวัสดุขนาด $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$ เฉลี่ยเท่ากับ 32 บาท/แผ่น ซึ่งมีต้นทุนการผลิตเฉพาะค่าวัสดุที่ถูกกว่าแผ่นผนังเบาที่ขายตามท้องตลาดชนิดธรรมดา

คำสำคัญ: ผนังเบา ถุงกระดาษปูนซีเมนต์ ดูดซับเสียง

Abstract : This research was conducted to study the lightweight wall panels made from waste cement bags by following processes: grinding them, then mixing them with powdered glue and latex glue at the ratio of 5%, 10% and 15% of the weight of materials used, after that making heat extrusion at the size of $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$ and using powdered glue and latex glue as bonding materials. This wall panel was tested of physical properties and mechanical properties in accordance with TIS.966-2547 standard. The research result was found that when testing physical properties on density, moisture,

water absorption and thickness swelling, the lightweight wall panel using powdered glue at the ratio of 15% could fulfill the standard. Regarding the test result of mechanical properties on bending resistance, modulus of elasticity and surface tensile strength, it was found that the tensile strength perpendicular to the surface passed the criteria set by the standard. Additionally, the test of sound absorption was found that the lightweight wall panel had the average sound level in every frequency at 10.29 dB. When comparing the values of sound absorption with the medium density fiberboard and gypsum board, it was found that the lightweight wall panel made from cement bags had better sound absorption because the lightweight wall panel made from cement bags was more porous and less rigid, therefore, both types of panels to be compared had better sound absorption. Regarding the cost, it was found that the production cost of material sized $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$ was average at 32 Baht per sheet, the production cost of material was cheaper than the general lightweight wall panels sold in the market.

Keywords: Lightweight Wall, Cement Bags, Sound Absorbing Walls

1. บทนำ

งานก่อสร้างในประเทศไทยได้ก้าวรุดหน้า และเพิ่มปริมาณขึ้นมาก แต่สิ่งที่เกิดขึ้นเป็นเงาตามการปฏิบัติงานในงานก่อสร้าง คืออุบัติเหตุซึ่งการเกิดอุบัติเหตุในแต่ละครั้งก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งชีวิต และทรัพย์สินอย่างประมาณค่ามิได้ ความสูญเสียจากงานก่อสร้างในปัจจุบันได้ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นทุกขณะ และมีคนงานจำนวนมากที่ยังเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายจากงานก่อสร้าง ดังนั้นการป้องกันอุบัติเหตุและการลดอุบัติเหตุ จึงเป็นเรื่องที่ต้องรีบเร่งและให้มีการปฏิบัติอย่างจริงจังทั้งนี้เพื่อลดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินที่อาจจะเกิดขึ้น

ในปัจจุบัน ปัญหามลพิษทางเสียงเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นพร้อมกับความเจริญโดยเฉพาะในเมืองหลักซึ่งประกอบด้วยเขตต่างๆ เช่น เขตงานก่อสร้าง เขตธุรกิจการค้า เขตอุตสาหกรรม เขตที่พักอาศัย และเขตที่มีการจราจรหนาแน่น โดยจากผลการศึกษาพบว่า การพักอาศัย หรือทำงาน อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดเสียงเป็นเวลานานย่อมส่งผลเสียต่อสุขภาพ โดยระดับของความรุนแรง

ขึ้นอยู่กับสภาพลักษณะของเสียงและระดับความดังของเสียงที่บุคคลสัมผัส ประกอบกับระยะเวลาในการสัมผัสเสียงนั้น [1] ซึ่งอันตรายของเสียงแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. อันตรายของเสียงต่อระบบการได้ยิน ส่วนใหญ่เป็นอันตรายที่เกิดขึ้นกับหูชั้นในที่อวัยวะรับเสียง ซึ่งเป็นอวัยวะที่ละเอียดอ่อนและเปราะบางมาก โดยจะมีการเคลื่อนไหวสั่นสะเทือนอยู่ตลอดเวลาที่ได้ยินเสียง เสียงยิ่งดังมากก็จะยิ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของอวัยวะรับเสียงมากขึ้น อันเป็นเหตุให้เกิดการฉีกขาดของเนื้อเยื่อหรือเกิดการทำลายเซลล์ประสาท ทำให้เกิดอาการหูตึงหรือหูหนวกได้ [2]

2. อันตรายของเสียงต่อสุขภาพทั่วไปอาจทำให้เกิดอาการกล่าวคือ ความดันโลหิตสูง โรคกระเพาะอาหาร เกิดแผลในกระเพาะอาหาร โรคหัวใจ มีความเครียดสูง เป็นต้น ดังมีรายงานผลการศึกษาสุขภาพคนงานในโรงงาน ซึ่งมีเสียงความถี่ 250-4000 Hz ระดับ 82-89 dB และคนงานในโรงงานที่มีระดับเสียง 92-99 dB พบว่ามีความผิดปกติ

ในการทำงานของระบบประสาท กล่าวคือ ทำให้เกิดการอ่อนเพลีย กินอาหารไม่ได้ ไม่ค่อยรู้สึกตัว โดยกลุ่มแรกมีจำนวน 29.4% และกลุ่มหลังมีจำนวน 43% [3]

3. ผลกระทบของเสียงทางด้านอื่นๆ เช่น รบกวนการนอนหลับ สร้างความรำคาญ (Annoyance) รบกวนการทำงานและลดประสิทธิภาพของการทำงาน รบกวนการติดต่อสื่อสารและอื่นๆ ดังรายงานผลของเสียงรบกวนที่มีต่อการทำงาน [4]

ด้วยอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจึงได้มีการนำกำแพงกันเสียงเข้ามาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยกำแพงกันเสียงที่ใช้ในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 ชนิด ประกอบด้วย ชนิดกระจายเสียง (Dispersive Type) เป็นแผ่นทึบเสียงที่มีการสะท้อนเสียงแบบแพร่กระจายตามทิศทางมุมของกำแพงที่ออกแบบไว้ ชนิดสะท้อนเสียง (Reflective Type) เป็นแผ่นทึบเสียงซึ่งจะมีการสะท้อนของเสียงในทิศทางตรงข้ามกับแผ่นกันเสียง และชนิดดูดซับเสียง (Absorptive Type) ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจาก เป็นแผ่นทึบเสียงที่ประกอบด้วยวัสดุดูดซับเสียง จะไม่มีการสะท้อนเสียงออกมา ทำให้บริเวณที่อยู่ตรงข้ามไม่ได้รับผลกระทบจากเสียงดัง [5] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการทดลองนำวัสดุต่างๆ มาใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียง โดยสาเหตุที่วัสดุสามารถดูดซับเสียงได้เนื่องจาก เมื่อเสียงตกกระทบวัตถุใดๆ ก็ตาม เสียงส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อน อีกส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน และส่งผ่านเข้าไปในวัตถุทำให้พลังงานลดลง เนื่องจากถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะของวัตถุอันนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่พยายามนำวัสดุเหลือใช้มาพัฒนาเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม ใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ผู้ทำวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำงานวิจัย คุณสมบัติผนังเบาจากถุงกระดาษปูนซีเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางการกำจัดถุงกระดาษปูนซีเมนต์ และนอกจากนี้คนส่วนมากยังขาดความสนใจ อีกทั้งยังขาดความรู้เกี่ยวกับปัญหาขยะที่เกิดขึ้น จึงไม่สามารถบริหารจัดการขยะได้ดี จึงทำให้ส่งผลกระทบ

ต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เพิ่มภาระในการบริหารจัดการขยะ เพื่อหาแนวทางในการนำขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้างไปทำให้เกิดประโยชน์ ช่วยลดค่าใช้จ่าย และที่สำคัญคือ ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมด้านมลพิษทางเสียงต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติผนังเบาจากถุงกระดาษปูนซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนการร้อยละ 5 10 และ 15

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย ความหนาแน่น ความชื้น การดูดซึมและการพองตัวตามความหนา
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกล ความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น
3. ศึกษาการดูดซับเสียง
4. ศึกษาต้นทุนการผลิต

3. เอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา

พนุชศติ เย็นใจ และคณะ [6] การผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเหลือทิ้งของไม้เสม็ดขาว ชนิดและปริมาณของกาวที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด ตลอดจนทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล

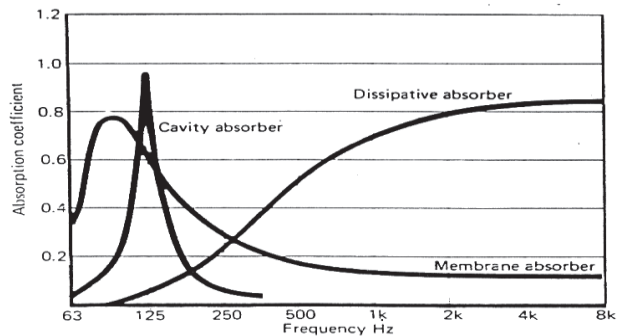
กศยา สุวรรณวิหค และคณะ [7] ได้ศึกษาเพื่อหาวัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติโดยการนำใบสนคาริเบียและขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ นำวัตถุดิบทุกชนิดนำมาบดเป็นผงและผสมให้เข้ากันความร้อนเป็นแผ่นไม้พลาสติกแล้วนำมาผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเป็นแผ่นไม้พลาสติก นำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล

ณัฐจักรณ์ กิจพาณิชย์เจริญ [8] ได้นำต้นกล้วยมาทำไม้อัดชนิดอัดราบที่สามารถทำการทดสอบ คือ ความต้านทานแรงดัด และโมดูลัสยืดหยุ่น ตามมาตรฐานมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของไม้ชนิดต่างๆ เพื่อเป็นการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนกันได้ พบว่าไม้อัดชนิดอัดราบจากต้นกล้วยและไม้ขึ้นทั่วไป มีคุณสมบัติแตกต่าง

กัน ราคาถูกกว่าไม้ทั่วไป และจะเป็นการประหยัดค่าวัสดุ ชนิดผ้าเพดาน

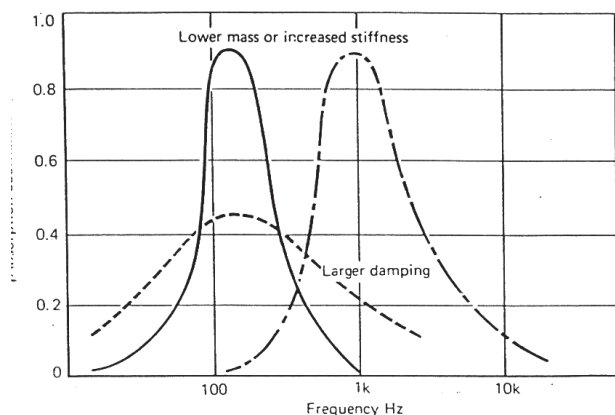
ด้านองค์ประกอบที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเสียงของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Coefficient of Elasticity) และค่าต้านทานเสียง (Acoustic Impedance) [12] โดยสามารถจำแนกประเภทของวัสดุดูดซับเสียงออกได้เป็น 3 ประเภทตามกลไกการดูดซับเสียงได้แก่

1. วัสดุดูดซับเสียงประเภทเมมเบรน (Membrane Absorber) ได้แก่ แผ่นโลหะบาง ไม้อัดพลาสติก กระดาษยิปซัมบอร์ด เป็นต้น โดยวัสดุเหล่านี้จะเกิดการสั่นตัวด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของเสียงที่ตกกระทบและเนื่องจากวัสดุเหล่านี้ไม่สามารถยืดหยุ่นได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปเนื่องจากการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานความร้อนให้แก่วัสดุนั้นๆ ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงได้ดีที่ความถี่ต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 1 เนื่องจากที่ความถี่ต่ำพลังงานเสียงจะทำให้เมมเบรนเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่ความถี่สูง ในขณะที่คลื่นความถี่สูงมักจะถูกสะท้อนออกจากเมมเบรน ทำให้มีการสูญเสียพลังงานให้กับเมมเบรนน้อยมากแต่อย่างไรก็ตาม หากนำวัสดุที่เป็นเมมเบรนมาใช้ร่วมกับวัสดุพูน ก็จะทำให้สามารถดูดกลืนคลื่นเสียงที่มีช่วงความถี่กว้างได้ดีมากขึ้น [12]



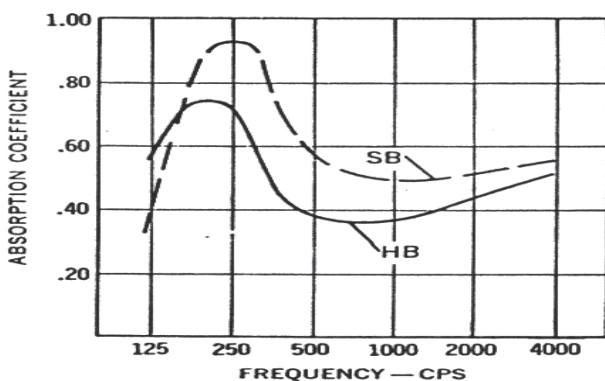
ภาพที่ 1 การดูดซับเสียงของวัสดุที่มีกลไกในการดูดซับเสียงแบบต่างๆ ตามช่วงของความถี่ [12]

นอกจากนี้ค่าความสามารถในการดูดซับเสียงสูงสุดของเมมเบรนยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานความร้อนของวัสดุอีกด้วย กล่าวคือ ถ้าความสามารถในการถ่ายเทพลังงานความร้อนของวัสดุมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเสียงสูงสุดของเมมเบรนมีค่าลดลง แต่จะครอบคลุมช่วงความถี่ได้กว้างมากขึ้น [13] ดังแสดงในภาพที่ 2

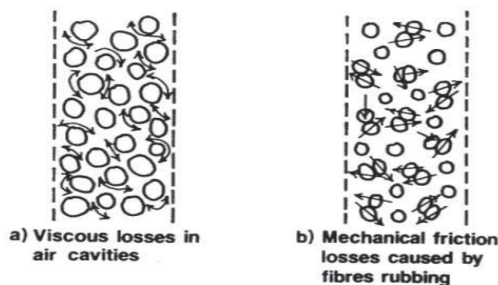


ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับเสียงกับความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานความร้อนวัสดุพูนเมื่อนำมาใช้ร่วมกับเมมเบรน [13]

2. วัสดุดูดซับเสียงประเภทเป็นโพรง/ช่อง (Resonator or Cavity Absorber) เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นช่อง/โพรงที่ขนาดแตกต่างกันในผนัง หรือโครงสร้างของวัตถุ ซึ่งแต่ละช่องเรียกว่า “Sound Box” โดยวัสดุประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz โดยจะสามารถดูดซับเสียงได้สูงสุดในช่วงความถี่ 100-300 Hz และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น [12] ดังแสดงในภาพที่ 1 แต่หากมีการผสมวัสดุดูดซับเสียงชนิดอื่น เช่น โยแก้ว หรือใยหิน ลงไปในช่องว่างภายใน Sound Box จะทำให้มีความสามารถในการดูดซับเสียงในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น [15] ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุโพรงช่อง (HB ไม้ไผ่แก้ว และ SB ไม้ไผ่แก้ว) [15]



ภาพที่ 4 แสดงกลไกการสลายตัวของพลังงานเสียงเนื่องจากความหนืดและแรงเสียดทาน [15]

นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ รวมทั้งการอัดและการขยายของคลื่นเสียง ในระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในวัสดุพูน เป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ปรากฏการณ์ทั้ง 2 ชนิดนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมากเมื่อเสียงที่ตกกระทบมีความถี่สูง

3. วัสดุดูดซับเสียงประเภทเส้นใย (Fiber) หรือวัสดุที่มีรูพรุน (Porous or Dissipative Absorber) ซึ่งวัสดุชนิดนี้สามารถหาได้ง่าย ราคาถูกและมีอยู่มากในประเทศไทย เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ตัวอย่าง เช่น กาบมะพร้าว ฟางข้าว ต้นข้าวโพด [16] โดยวัสดุเหล่านี้จะมีช่องว่างภายใน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าขนาดความยาวของคลื่นเสียงมาก ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จึงเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้เป็นอย่างดี โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุพูน คือ เมื่อเสียงตกกระทบบนวัสดุเหล่านี้ โมเลกุลของอากาศจะเกิดการสั่นตัวภายในช่องว่างของวัสดุพูน โดยมีความถี่ของการสั่นเท่ากับความถี่ของเสียงที่ตกกระทบ การสั่นตัวของโมเลกุลของอากาศนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเสียดทานและความหนืด (Frictional and Viscous Loss) โดยมีลักษณะการสูญเสียพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 4

4. วิธีดำเนินการศึกษา

วิธีการดำเนินการงานวิจัยนี้แบ่งออก 2 ส่วนคือ การเตรียมวัสดุและการขึ้นรูป การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล

4.1 ศึกษากระบวนการทำแผ่นผนังเบา

โดยมีขั้นตอนการผลิตดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดถุงปูนซีเมนต์ที่เหลือทิ้ง โดยการนำไปแช่น้ำ 24 hr จากนั้นนำถุงปูนที่ได้มายุ่ยขนาดไม่น้อยกว่า ½ นิ้ว จากนั้นนำตัวอย่างมาอบโดยใช้ไมโครเวฟให้แห้งพอประมาณ [9] และเข้าเตาอบที่

อุณหภูมิ 100°C เพื่อให้ความชื้นไม่เกินร้อยละ 5 เป็นเวลา 4 hr

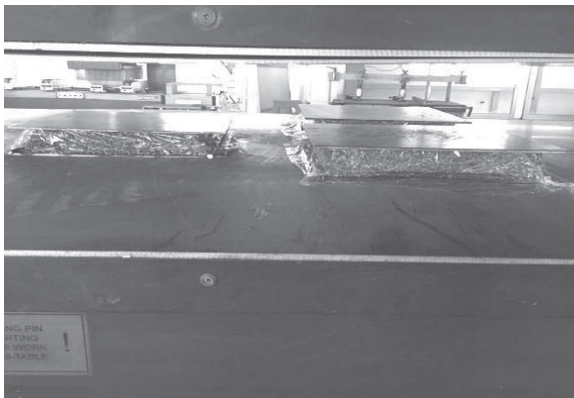
2. นำถุงปูนซีเมนต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาเข้าเครื่องตีย่อยอีกครั้ง เพื่อเยื่อกระดาษให้ละเอียด

3. นำตัวอย่างมาผสมกาวตามอัตราส่วนที่ต้องการโดยการฉีดพ่นกาว [10]

4. เตรียมต้นแบบสำหรับขึ้นรูปผนังเบาโดยเป็นเครื่องอัดร้อน ซึ่งสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ อุณหภูมิที่ 50-55 °C

5. เตรียมวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปแผ่นผนังเบาขนาดแผ่น 30 X 30 X 1 cm³ ในอัตราส่วนถุงปูนซีเมนต์ร้อยละ 95 วัสดุประสานร้อยละ 5, 10 และ 15 [10]

6. นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแบบขนาด 30 X 30 X 1 cm³ จากนั้นนำไปขึ้นรูป



ภาพที่ 5 แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบอัดร้อน

4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล

การหาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลโดยการนำชิ้นตัวอย่างทดสอบหาค่าเฉลี่ยตามมาตรฐาน มอก.876-2547 [11]

1. ทดสอบความหนาแน่นตัวอย่าง คำนวณหาค่าตามสูตร

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

เมื่อ

m คือมวล (g)

V คือปริมาตร (cm³)

2. ทดสอบการดูดซึมตัวอย่างหาค่าเฉลี่ย คำนวณหาค่าตามสูตร

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

W_1 คือน้ำหนักก่อนแช่น้ำ (g)

W_2 คือน้ำหนักหลังแช่น้ำ (g)

3. ทดสอบการขยายตัวทางความหนาหาค่าเฉลี่ย คำนวณหาค่าตามสูตร

$$\text{การขยายตัวทางความหนา (\%)} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

t_1 คือความหนาก่อนแช่น้ำ (mm)

t_2 คือความหนาหลังแช่น้ำ (mm)

4. การทดสอบค่าต้านทานแรงดัด คำนวณหาค่าตามสูตร

จากสูตร

$$f_m = \frac{F_{max} l}{2bt^2} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ

 f_m คือความต้านทานแรงดัด (MPa) F_{max} คือแรงกดสูงสุดที่ขึ้นทดสอบรับได้ (N) l_l คือระยะห่างของแท่งรองรับ (mm) b คือความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวขึ้นทดสอบ (mm) t คือความหนาที่จุดกึ่งกลางของขึ้นทดสอบ (mm)

5. การทดสอบค่าความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า
คำนวณค่าตามสูตร

$$f_t = \frac{F}{WL} \quad (5)$$

เมื่อ

 f_t คือความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า (MPa) F คือแรงดัดสูงสุด (N) W คือความกว้างของขึ้นทดสอบ (mm) L คือความยาวของขึ้นทดสอบ (mm)

6. การคำนวณค่ามอดุลัสยืดหยุ่นตามสูตร

$$E_m = \frac{l_l^3 (F_2 - F_1)}{4bt^3 (a_2 - a_1)} \quad (6)$$

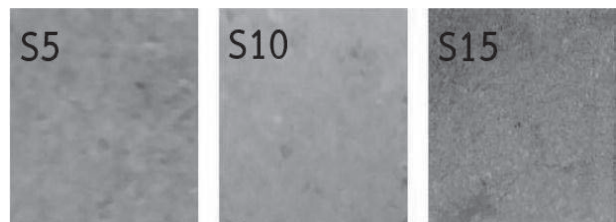
เมื่อ

 E_m คือมอดุลัสยืดหยุ่น (MPa) l_l คือระยะห่างของแท่งรองรับ (mm) $F_2 - F_1$ คือแรงกดที่เพิ่มขึ้น ในช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นตรง (N) b คือความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของขึ้นทดสอบ (mm) t คือความหนาที่จุดกึ่งกลางของขึ้นทดสอบ (mm) $a_2 - a_1$ คือระยะแอนตัวที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง (mm)

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการทดสอบทางกายภาพโดยการขึ้นรูปแบบอัด

ลักษณะของชิ้นงานมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ผิวลื่น สีผนังเบาเหมือนสีของฉากระบายปูนซีเมนต์ โดยหากเพิ่มปริมาณความมากขึ้นสีผนังเบาจะเข้มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 7

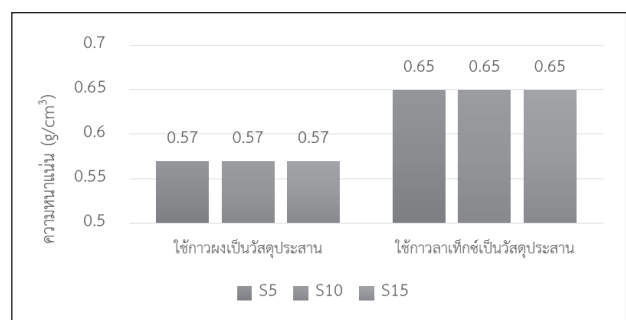


ภาพที่ 6 ลักษณะชิ้นงานตามส่วนผสมโดยการขึ้นรูปแบบอัด

5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฉากระบายปูนซีเมนต์หลังการปรับสภาพแล้ว พบว่ามีความหนาแน่นเท่ากับ 75 g/cm^3 และการดูดซึมน้ำของฉากระบายปูนซีเมนต์หลังการปรับสภาพแล้วเท่ากับร้อยละ 120

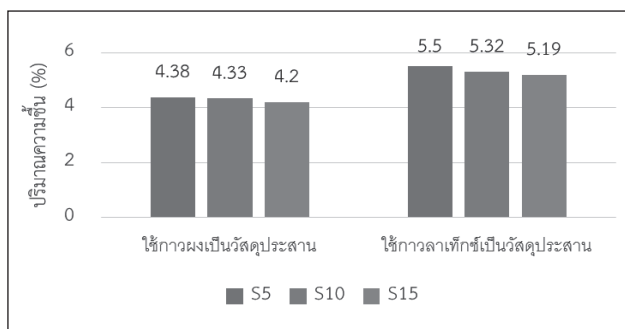
ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น



ภาพที่ 7 ปริมาณความหนาแน่นของแผ่นผนังเบา

จากภาพแผ่นผนังเบาที่ใช้กาวยางเป็นวัสดุประสาน มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 0.57 และผนังเบาใช้กาวลาเท็กซ์เป็นวัสดุประสานค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 0.65 เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.966-2547 โดยค่าความหนาแน่นแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลางอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.8 g/cm³

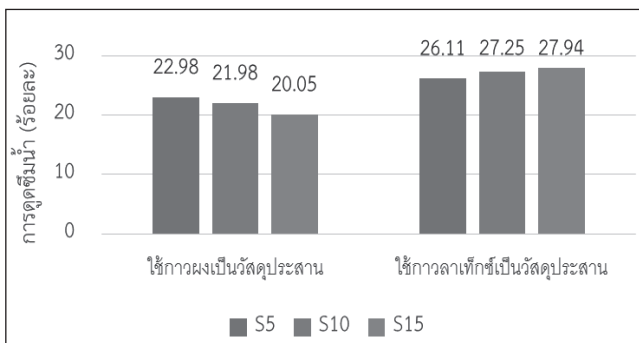
ผลการทดสอบหาค่าปริมาณความชื้น



ภาพที่ 8 ปริมาณความชื้นของแผ่นผนังเบา

จากภาพที่ 8 ค่าความชื้นของแผ่นผนังเบา โดยใช้กาวยางเป็นวัสดุประสาน มีค่าปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 4.20 ถึง 4.38 และโดยใช้กาวลาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน มีค่าปริมาณความชื้นอยู่ที่ระหว่างร้อยละ 5.19 ถึง 5.50 ซึ่งอยู่ในช่วงที่มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 966-2547

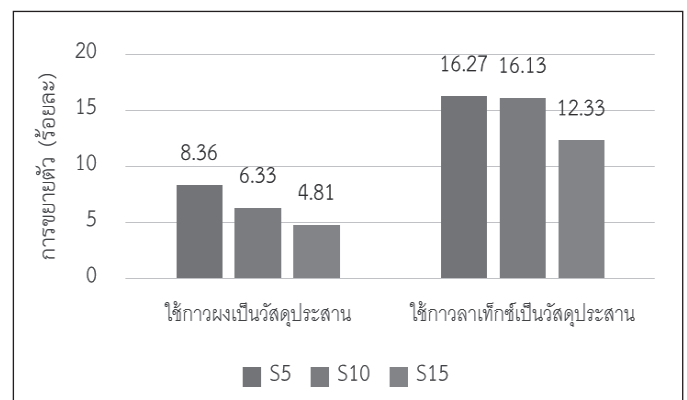
ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นผนังเบา



ภาพที่ 9 อัตราการดูดซึมน้ำของแผ่นผนังเบา

จากภาพที่ 9 แผ่นผนังเบาที่ใช้กาวยางเป็นวัสดุประสาน มีอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 20.05 ถึง 22.98 เนื่องจากกาวยางมีคุณสมบัติในการกั้นน้ำได้ดี เมื่อแห้งตัว และเมื่อเพิ่มกาวในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้แผ่นผนังเบาดูดซึมน้ำได้น้อยลงและช้าลง ส่วนแผ่นผนังเบาที่ใช้กาวลาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน มีอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 26.11 ถึง 27.94 เนื่องจากกาวลาเท็กซ์มีคุณสมบัติในการละลายในน้ำได้ดี และเมื่อเพิ่มกาวในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้แผ่นผนังเบาสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นและเร็วขึ้น

ผลการทดสอบค่าการขยายตัวตามความหนา

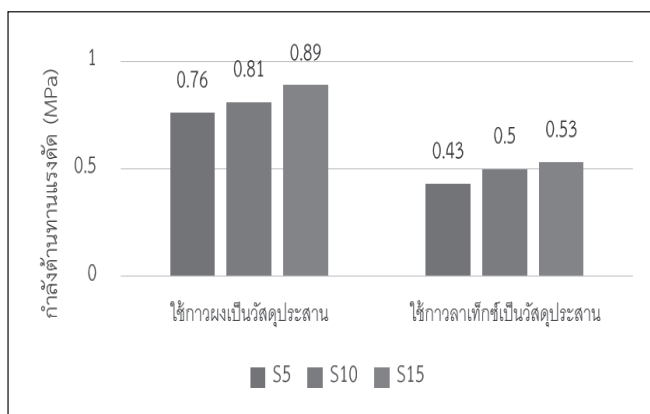


ภาพที่ 10 การขยายตัวตามความหนาที่ 2 ชั่วโมง

จากภาพที่ 10 แผ่นผนังเบาโดยใช้กาวยางเป็นวัสดุประสาน มีค่าการขยายตัวตามความหนาอยู่ระหว่างร้อยละ 4.81 ถึง 8.36 และโดยใช้กาวลาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน มีค่าการขยายตัวตามความหนาอยู่ระหว่างร้อยละ 12.33 ถึง 16.27 ซึ่งผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 966-2547

5.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

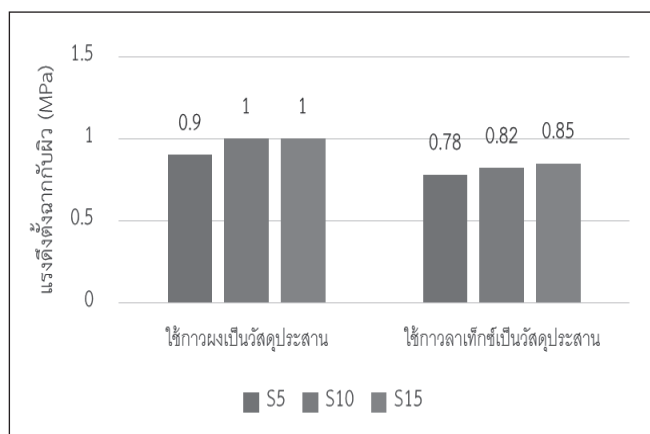
ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดัด



ภาพที่ 11 กำลังต้านทานแรงดัดของแผ่นผนังเบา

จากภาพที่ 11 ค่ากำลังต้านทานแรงดัดของแผ่นผนังเบา โดยใช้การผึ่งเป็นวัสดุประสานมีค่ากำลังต้านทานแรงดัดอยู่ระหว่าง 0.76 ถึง 0.89 MPa และแผ่นผนังเบาโดยใช้การลวกไอน้ำเป็นวัสดุประสานมีค่ากำลังต้านทานแรงดัดอยู่ระหว่าง 0.43 ถึง 0.53 MPa ซึ่งน้อยกว่าข้อกำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 966-2547

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดัดผิวหน้า

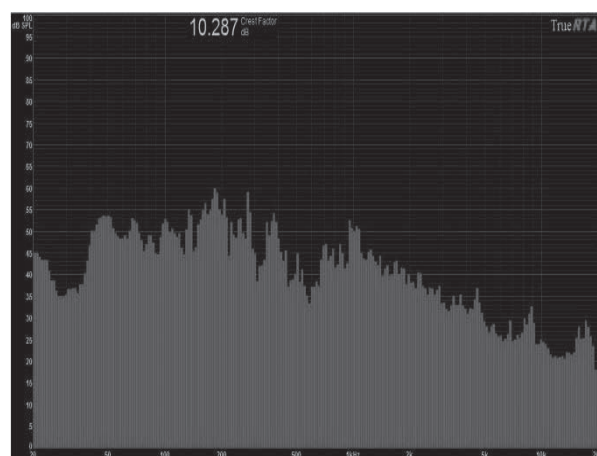


ภาพที่ 12 การต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวของแผ่นผนังเบา

จากภาพที่ 12 ค่าความต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นผนังเบา โดยใช้การผึ่งเป็นวัสดุประสานมีค่าความต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าอยู่ระหว่าง 0.90 ถึง 1.00 MPa และแผ่นผนังเบาโดยใช้การลวกไอน้ำเป็นวัสดุประสานมีค่าความต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าอยู่ระหว่าง 0.78 ถึง 0.85 MPa ซึ่งผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 966-2547

จากภาพที่ 13 ในการทดสอบการดูดซับเสียง ของแผ่นผนังเบาจากถุงปูนซีเมนต์ในแต่ละช่วงความถี่ พบว่าในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 1 kHz มีค่าความดังเฉลี่ยของเสียงอยู่ระหว่าง 43 ถึง 52 dB ในขณะที่ช่วงความถี่ 1 KHz ถึง 20 kHz มีค่าความดังเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 25 ถึง 44 dB และผลการทดสอบการดูดซับเสียงทุกช่วงความถี่ เฉลี่ยเท่ากับ 10.29 dB

ผลการทดสอบการดูดซับเสียงของแผ่นผนังเบา



ภาพที่ 13 ค่าการดูดซับเสียง ของแผ่นผนังเบาจากถุงปูนซีเมนต์ ขนาด 30 x 30 x 1 cm³

6. สรุปผลและอภิปรายผล

การวิจัยนี้แบ่งจากอุปกรณ์กระดาดปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง เพื่อหาแนวทางการผลิตผนังเบา โดยการนำอุปกรณ์กระดาดฯ ดังกล่าวที่ได้มามีอยู่ให้ละเอียดแล้วจึงทำการผสมกับกาวยา และกาวยาเท็กซ์ ตามอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 ของน้ำหนักวัสดุที่ใช้ โดยการขึ้นรูปแบบอัดร้อนขนาด $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$ และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล ตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 สรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้

6.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ค่าปริมาณความหนาแน่นของแผ่นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง ที่ใช้กาวยาเป็นวัสดุประสาน และที่ใช้กาวยาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 มีปริมาณความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งการใช้ปริมาณกาวยาที่พอดีทำให้อัตราส่วนผสมในการขึ้นรูปไม่แห้งหรือเหลวเกินไป ทำให้ปริมาณความหนาแน่นผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากการอัดขึ้นรูปได้ผลที่ดี จึงทำให้มีค่าความหนาแน่นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ค่าปริมาณความชื้นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง ที่ใช้กาวยาเป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 15 และที่ใช้กาวยาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 มีปริมาณความชื้นน้อยที่สุด ซึ่งมีปริมาณความชื้นผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากแผ่นผนังเบาที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม และมีค่าความหนาแน่นที่ดี

ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำแผ่นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง ที่ใช้กาวยาเป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 และที่ใช้กาวยาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 15 มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดและผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากแผ่นผนังเบาที่มีค่าความหนาแน่นที่ดี

ผลการทดสอบค่าการขยายตัวตามความหนาแน่นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง ที่ใช้กาวยาเป็นวัสดุประสาน และที่ใช้กาวยาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน ที่

อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 มีค่าการขยายตัวทางความหนาแน่นมากที่สุดและผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากมีค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

6.2 คุณสมบัติเชิงกล

ค่าการต้านทานแรงดัด แผ่นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง ที่ใช้กาวยาเป็นวัสดุประสาน และที่ใช้กาวยาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 15 มีค่าการต้านทานแรงดัดมากที่สุดซึ่งถือว่ายังไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งค่าการต้านทานแรงดัดที่ทดสอบไม่ผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

ค่าการต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าจากการทดสอบแผ่นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง ที่ใช้กาวยาเป็นวัสดุประสาน และที่ใช้กาวยาเท็กซ์เป็นวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 15 มีค่าการต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้ามากที่สุด ซึ่งค่าการต้านทานแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์และวัสดุประสานสามารถยึดเกาะกันได้ดี

ผลการทดสอบค่าการดูดซับเสียงของแผ่นผนังเบาเสียงจากการทดสอบการดูดซับเสียงของแผ่นผนังเบา จากผลการทดสอบการดูดซับเสียงทุกช่วงความถี่เฉลี่ยเท่ากับ 10.29 dB เมื่อเทียบกับ ยิปซัมบอร์ด เท่ากับ 15.34 dB แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง เท่ากับ 15.00 dB จะเห็นได้ว่าผลิตแผ่นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้ง มีความสามารถในการดูดซับเสียงได้ดีกว่าวัสดุอื่น ดังนั้นเราสามารถนำไปใช้งานได้จริงในช่วงความถี่ต่ำ 50 -100 Hz และ 200 -500 Hz

6.3 ต้นทุนการผลิต

แผ่นผนังเบาจากอุปกรณ์ปูนซีเมนต์ที่เหลืทิ้งขนาด $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$ ราคาต้นทุนการผลิตเฉพาะค่าวัสดุ เฉลี่ยเท่ากับ 32 บาท/แผ่น ส่วนแผ่นผนังเบาที่ขายตามท้องตลาดชนิดธรรมดา ขนาด $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$ ราคา 72 บาท/แผ่น ซึ่งเมื่อเทียบกันแล้วแผ่นผนังเบาที่ผลิตขึ้น มีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่า

6.4 ข้อเสนอแนะ

การผสมส่วนผสมควรคลุกเคล้าให้เข้ากันให้ทั่วก่อนจะนำขึ้นรูปหากผสมไม่ดีจะทำให้แผ่นวัสดุที่ออกมาไม่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่เรียบ ส่งผลให้การทดสอบคุณสมบัติได้ผลไม่แน่นอน และในการขึ้นรูปแบบอัดต้องศึกษาเพิ่มเติมถึงกระบวนการอัด และความเหมาะสมของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ยังไม่ได้นำไปประยุกต์ใช้ในโรงงาน เพื่อเป็นการพัฒนาคุณสมบัติของผนังเบาจากถุงซีเมนต์เหลือทิ้งใช้ จึงควรมีการพัฒนาต่อยอดการวิจัย โดยการนำข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัยนำไปปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความเหมาะสม และนำไปใช้ในงานได้จริงต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- (1) Cowan, J.P. 1994. Handbook of Environmental Acoustics. Van Nostrand Reinhold: International Thomson Publishing Company.
- (2) เกษม จันทรแก้ว. 2541. เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. โครงการ สหวิทยาการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- (3) Welch, B. L. 1970. Physiological Effects of Noise. New York-London: Plenum Press.
- (4) Harmelink, M. D. 1970. Noise and Vibration Control for Transportation System. D.H.O.Report No. RR 168, Canada: Ontario Department of Highways.
- (5) Lewis, H.Bell and Douglas, H.Bell. 1994. Industrial Noise Control. 2nd ed. New York. Marcel Dekker, Inc.
- (6) พูนศักดิ์ เอ็นใจ ทองกลด จารุสมบัติ ชีระ วีนิน. 2559. ศึกษาการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษเหลือทิ้งของไม้เสม็ดขาว, วารสารวิจัยและพัฒนาโลยอลกรรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 11ฉบับที่ 2: 131-140.
- (7) นาวาอากาศเอกหญิง กุศยา สุวรรณวิท, นาวาอากาศโทหญิง สันสนีย์ เหมาคม, นักเรียนนายเรืออากาศ อธิชัย นิมมา, นักเรียนนายเรืออากาศ ปิยะวัฒน์ ดวงพิบูลย์, 2559, การศึกษาการใช้วัสดุผสมของไบสนครีเปียและพอลิเอทีลีนเป็นวัสดุทดแทนไม้, วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปีที่ 11 : 45-50.
- (8) ณัฐจักรณ์ กิจพานิชย์เจริญ และอุรุพงษ์ สิริมย์. 2553. กำลังของแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบที่ต่ำ จากต้นกล้วย. โครงการทางวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- (9) รัฐศักดิ์ พรหมมาศ, โสภิตา สังข์สุนทร, นิชาภา มีลาบุลย์, 2560. การอบแห้งข้าวสารขุบสีสมุนไพรด้วยคลื่นไมโครเวฟ, วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า 15: 79-89.
- (10) วรธรรม อุ่นกิตติชัย, 2541. อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดและกรรมวิธีการผลิต, เอกสารการวิจัย เลขที่ ร.514, กรุงเทพฯ: กลุ่มพัฒนาอุตสาหกรรมกรมป่าไม้ สำนักงานวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- (11) สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2547. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ มอก.876-2547, กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- (12) David, A.Harris. (1991). Noise Control Manual. New York. Van Nostrand Reinhold.
- (13) Walker MB. (1995). Larousse dictionary of science and technology. Great Britain: Clays.
- (14) Doelle L.L. and Arch.M. (1972). Environmental Acoustic. (n.p.) McGraw-Hill Book Company.
- (15) Yerges LF. (1969). Sound, noise and vibration control. New York: Van Nostrand Reinhold.
- (16) Olivo, C.T. and T.P. Olivo. (1978). Fundamentals of Applied Physics. New York. Delmar Publishers.
- (17) วชิระ แสงรัศมี, 2555. วัสดุตกแต่งและเฟอร์นิเจอร์จากเยื่อกระดาษเหลือใช้ทางเลือกใหม่, วารสารวิจัยและสารสถาปัตยกรรม/การผังเมือง. JARS 9(2):95-104.
- (18) โสภิตา สังข์สุนทร, ดนุสรณ์ ขาติเชยแดง, วัชพงศ์ บุญครอง และสมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, 2559. ผลของการใช้ไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศในการอบแห้งสับปะรด(กรณีศึกษา: กำลังไมโครเวฟ), วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า 14: 159-170.

โหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำสำหรับเครื่องทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน Submersible Load Cells for Triaxial Tests

ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ*
ชนม์พิสิทธิ์ ยาท่วม
ชนกันต์ โคจรนา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding Author. Email : Piyachatc@eng.buu.ac.th

(Received: August 17, 2018; Revised: September 21, 2018; Accepted: September 24, 2018)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและการออกแบบโหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำขนาด 5 kN สำหรับเครื่องทดสอบหาค่าแรงเฉือนของดินแบบสามแกนซึ่งจะถูกออกแบบให้สามารถบรรจุโหลดเซลล์ดังกล่าวเข้าไปภายในเซลล์ทดสอบเพื่อตัดปัญหาความผิดพลาดในการวัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งเหล็กกดด้านบน (Piston) กับเซลล์ทดสอบ ในการออกแบบจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การเสียรูปเพื่อหาความหนาของแผ่นวัดแรงที่เหมาะสมและตำแหน่งที่ดีที่สุดที่จะใช้ในการติดตั้งชุดสเตรนเกจ การศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานและแรงดันน้ำที่มีผลต่อการอ่านค่าแรงในแนวตั้งของโหลดเซลล์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจะทดสอบโดยการสอบเทียบการรับน้ำหนักของโหลดเซลล์ผ่านสปริงที่ทำการสอบเทียบแล้ว โดยอุปกรณ์ทั้งสองจะถูกบรรจุเข้าไปในเซลล์ทดสอบค่าแรงเฉือนของดินแบบสามแกน การสอบเทียบนั้นทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบและทำการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงกดจากผลการทดสอบพบว่าโหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำที่ได้รับการออกแบบในงานวิจัยนี้มีความเป็นเส้นตรงและความแม่นยำดีมาก อีกทั้งยังสามารถกำจัดผลกระทบของแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบต่อการวัดค่าแรงกดในแนวตั้งรวมทั้งกำจัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานทำให้การวัดค่าแรงกดมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: โหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำ การทดสอบแรงอัดแบบสามแกน แรงในแนวตั้ง แรงเสียดทาน

Abstract : The main purpose of this research is to study and design a 5 kN artificial submersible load cell of triaxial tests. In order to eradicate the effect of the skin friction between piston bar and the triaxial cell on measured vertical load, this load cell was designed to install inside the triaxial cell. The finite element method was not only used to determine the suitable model geometry and the thickness of diaphragm but also the position for installation of strain gauges. The effect of skin friction and confining pressure were evaluated by a particular calibration method which the load cell and the calibrated spring were all placed inside the triaxial cell. The calibration processes were performed under several confining pressures and for loading and unloading conditions. According to the testing results, this artificial submersible load cells has very good linearity and accuracy and there is no effect on confining pressure and skin friction for measurement the high-accurate vertical load.

Keywords: Submersible Load Cells, Triaxial Compression Tests, Vertical Stress, Friction

1. บทนำ

งานด้านการทดสอบในสาขาวิศวกรรมปฐพีส่วนใหญ่เน้นที่จะเน้นไปที่การหาค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินเป็นหลัก ซึ่งการทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct Shear Test) และการทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน (Triaxial Test) ซึ่งทั้งสามการทดสอบนี้จะมีการจำลองเงื่อนไขสถานะแวดล้อม (Boundary Condition) ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามทั้งสามการทดสอบนั้นจะต้องมีการวัดค่าของแรงกระทำในแนวแกน ซึ่งในอดีตจะนิยมใช้มาตรวัดแรงแบบวงแหวน (Proving Ring) ซึ่งทำหน้าที่ไม่ต่างจากสปริงที่มีความเป็นอีลาสติคเชิงเส้นสูง (Linear Elastic) เมื่อมีแรงกดในแนวแกนมากกระทำก็จะเกิดการยุบตัวซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าแรงกระทำ ดังนั้นผู้ทดสอบจะทราบค่าแรงกระทำได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยอ่านได้จากการยุบตัวของไดอัลเกจ (Dial Gauge) แต่เนื่องจากมาตรวัดแรงแบบวงแหวนนั้นจะต้องอาศัยการอ่านด้วยตาซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดทั้งด้านการอ่านค่าและจังหวะการอ่านตามเวลาที่

กำหนด หรือในกรณีที่การทดสอบนั้นต้องใช้ระยะเวลาการทดสอบยาวนาน จึงไม่สะดวกที่จะต้องคอยเข้ามาอ่านค่าตามเวลาที่กำหนด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถทำการวัดแรงได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกทั้งยังมีความสะดวกในการใช้งานเนื่องจากสามารถเก็บค่าแรงกดตามเวลาที่กำหนดแบบอัตโนมัติซึ่งอุปกรณ์นี้เรียกว่า “โหลดเซลล์” (Load Cell) โหลดเซลล์ คือ อุปกรณ์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานทางกลให้กลายเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage) จะต้องอาศัยเซนเซอร์ที่เรียกว่า “สเตรนเกจ” (Strain Gauge) ซึ่งมักจะต่อกันเป็นวงจรแบบ “Full-Bridge” เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรมีความชัดเจนที่สุด การนำโหลดเซลล์มาใช้งานในการทดสอบด้านวิศวกรรมปฐพีมักจะพบเห็นในการทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน ซึ่งจะต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) และระบบเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (Data Acquisition) การติดตั้งโหลดเซลล์เข้าไปในเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกนนั้นแต่เดิมมักจะติดตั้งบริเวณด้านบนของเซลล์ทดสอบ (Triaxial Cell) และส่งถ่ายแรงผ่านแท่งกดลงสู่ตัวอย่างดิน โดยที่ระหว่าง

ผิวสัมผัสของแท่งกด (Piston) กับตัวเซลล์ทดสอบนั้นจะมีระบบป้องกันการรั่วซึมของน้ำโดยใช้โอริง (O-Ring) ร่วมกับสารหล่อลื่น (Grease) เพื่อลดแรงเสียดทาน แต่อย่างไรก็ตามการวัดแรงระบบนี้ก็หลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการวัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทานไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการนำเอาโหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำ (Submersible Load Cells) เข้ามาใช้โดยโหลดเซลล์ชนิดนี้ถูกออกแบบเพื่อติดตั้งภายในเซลล์ทดสอบ จึงสามารถตัดปัญหาความผิดพลาดในการวัดแรงในแนวแกนเนื่องจากแรงเสียดทานออกไปได้ Lai [3] ได้สรุปข้อดีของการติดตั้งโหลดเซลล์ทั้งสองระบบไว้ดังนี้

1.1 กรณีติดตั้งโหลดเซลล์ไว้ภายนอก

- 1) เนื่องจากความต้องการในการใช้งานโหลดเซลล์จะใช้เฉพาะตอนเงื่อนไขตัวอย่างเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถใช้โหลดเซลล์เพียงตัวเดียวในการทดสอบแทนที่จะต้องใช้โหลดเซลล์หนึ่งตัวสำหรับเซลล์ทดสอบหนึ่งเซลล์
- 2) การติดตั้งแบบนี้จะสามารถเข้าถึงโหลดเซลล์ได้ง่ายเนื่องจากอยู่ภายนอก
- 3) ไม่เกิดปัญหาในเรื่องของการกัดกร่อน (Corrosion) และลัดวงจรในสายสัญญาณ

1.2 กรณีติดตั้งโหลดเซลล์ไว้ภายใน

- 1) ในการทดสอบแบบทำซ้ำ (Cyclic Shear Tests) สามารถตัดความผิดพลาดในการวัดแรงที่สำคัญซึ่งจะเกิดขึ้นในขณะที่แท่งกดสลับทิศทางการกดอันจะทำให้ทิศทางของแรงเสียดทานเกิดการสลับทิศทางเช่นกัน
- 2) ในการทดสอบแบบไดนามิก (Dynamic Tests) จะสามารถลดผลกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยได้
- 3) ในการทดสอบความคืบ (Creep) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานบริเวณผิวแท่งกดนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งการติดตั้งโหลดเซลล์ไว้ภายในนั้นจะทำให้การทดสอบมีความสะดวกมากขึ้นเนื่องจากจะทราบผลของแรงเสียดทานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

4) การติดตั้งโหลดเซลล์ไว้ภายในจะทำให้ผลการวัดมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

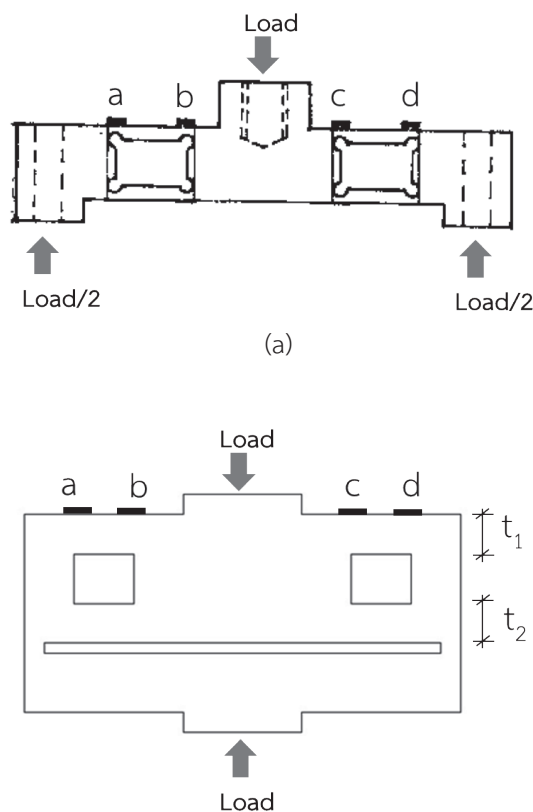
แต่อย่างไรก็ตามโหลดเซลล์ชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูงและต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อประดิษฐ์โหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำสำหรับเครื่องทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกนขึ้น นอกจากนั้นยังทำการตรวจสอบประสิทธิภาพ ความแม่นยำ รวมทั้งศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวแกนอีกด้วย

2. การออกแบบโหลดเซลล์

2.1 รูปแบบโหลดเซลล์

รูปแบบโหลดเซลล์ที่นำมาเป็นพื้นฐานในการพัฒนาและออกแบบในการศึกษานี้เป็นโหลดเซลล์ที่ถูกใช้งานโดย Kongkitkul [1] ซึ่งรูปแบบได้รับการปรับปรุงและพัฒนาจากโหลดเซลล์ของ Tatsuoka และคณะ [2] ดังแสดงในภาพที่ 1

จากรูปแบบทั้งสองจะพบว่าหลักการออกแบบนั้นไม่ได้มีความแตกต่างใดๆ คือยังคงอาศัยหลักการเสียรูปของคานช่วงเดียวที่รับแรงที่จุดกึ่งกลางคานแต่จะแตกต่างกันที่รูปแบบของ Kongkitkul [1] จะเป็นลักษณะคานสองชั้นเชื่อมต่อกันโดยมีระยะห่างที่เหมาะสมจึงทำให้มีเสถียรภาพในการรับแรงมากกว่าและสามารถย้ายไปติดตั้งในอุปกรณ์อื่นๆ ได้สะดวกกว่า ในกรณีที่แรงกระทำเป็นแรงอัดจะทำให้จุด a และ d เกิดความเค้นดึง (Tensile Strain) สูงสุด ส่วน จุด b และ c เกิดความเค้นอัด (Compressive Strain) สูงสุด ดังนั้นตำแหน่งดังกล่าวจะถูกติดตั้งสเตรนเกจซึ่งจะทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่ออกมามีความไวตัว (Sensitive) สูงสุด

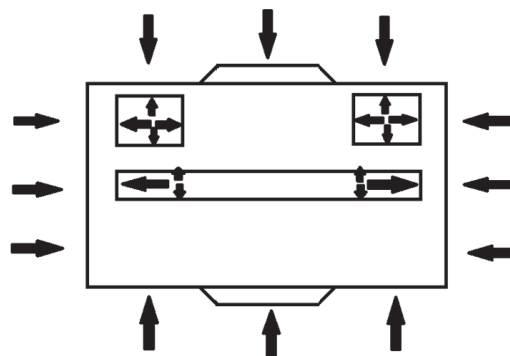


ภาพที่ 1 รูปแบบโหลดเซลล์ (a) Tatsuoka และคณะ [2] และ (b) Kongkitkul [1]

2.2 ลักษณะการสมมูลของแรงดันน้ำ

จากข้อดีของการติดตั้งโหลดเซลล์ไว้ภายในเซลล์ทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้จึงต้องการออกแบบโหลดเซลล์ที่สามารถทำงานอยู่ภายใต้สถานะแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบ (Confining Pressure หรือ Cell Pressure) สำหรับการทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกนนั้น เมื่อการเฉือนใช้ทางเดินของหน่วยแรงแบบดั้งเดิม (Conventional Triaxial Stress Path) ระหว่างการเฉือนดิน ค่าแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบจะคงที่ แต่กรณีที่ใช้ทางเดินของหน่วยแรงที่แตกต่างออกไป ค่าแรงดันน้ำภายในเซลล์จะไม่คงที่ระหว่างการเฉือนซึ่งขึ้นอยู่กับมุมของเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) ที่ใช้ ดังนั้นโหลดเซลล์ที่บรรจุอยู่ภายในเซลล์ทดสอบนอกจากจะต้องมีการป้องกันการ

ซึมผ่านของน้ำเข้ามาในวงจรไฟฟ้าและสายสัญญาณแล้ว ยังต้องปราศจากผลกระทบใดๆ สำหรับการวัดแรงในแนวดิ่งเนื่องจากแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างทำการเฉือน จากภาพที่ 2 จะพบว่า เมื่อมีแรงดันน้ำกระทำกับโหลดเซลล์จะเกิดสถานะสมมูลที่จุดวัดแรง (a, b, c และ d ในภาพที่ 1) และไม่เกิดการเสียรูป ดังนั้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก เนื่องจากแรงดันน้ำกระทำเท่ากันทุกทิศทางและโหลดเซลล์ที่ออกแบบนั้นมีช่องทะลุหากัน ดังนั้นโหลดเซลล์รูปแบบนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะไม่มีผลกระทบใดๆ ในการวัดแรงในแนวดิ่งเนื่องจากแรงดันน้ำรอบข้างที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 2 โหลดเซลล์เมื่อถูกแรงดันน้ำกระทำเท่ากันทุกทิศทาง

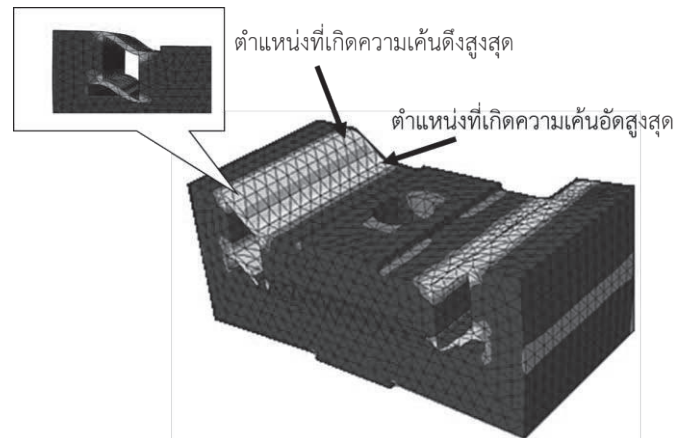
2.3 การออกแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การออกแบบโหลดเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นทำโดยผู้วิจัยหลายท่าน ซึ่งมีรูปแบบแตกต่างกันออกไป (สุภกิจ รูปขันธ์ [5], สราวุธ เรืองกิจตระการ [6] และเพิ่มศักดิ์ เกตุพนวม [7]) งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบโหลดเซลล์เช่นกันโดยอาศัยรูปแบบเดียวกับ Kongkitkul [1] จากหัวข้อ 2.1 ได้แสดงรูปแบบโหลดเซลล์และบริเวณที่จะเกิดความเค้นดึงและอัดสูงสุด แต่สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ค่าความหนาของ t_1 และ t_2 (ภาพที่ 1(b)) ที่เหมาะสมเนื่องจากต้องการรักษาคุณสมบัติการยืดหยุ่นแบบเป็นเส้นตรง (Linear Elastic) ของตำแหน่งวัดแรง (จุด a, b, c และ d ในภาพที่ 1) เมื่อได้รับแรงกระทำสูงสุด อีกทั้ง

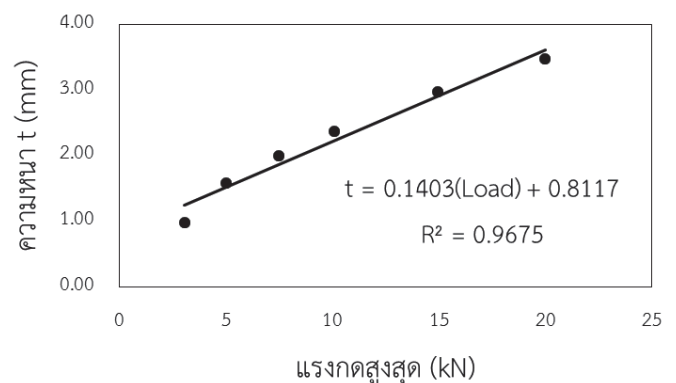
ยังต้องการให้ผลการวัดมีความละเอียดสูงสุดเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นโดยค่าดังกล่าวจะต้องไม่เกินค่าจุดคลาก (Yield Stress) ในที่นี้ใช้สแตนเลสเกรด 304 มาเป็นวัสดุขึ้นรูปโพลดเซลล์ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Constitutive Model) จะใช้แบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง (Linear Elastic) และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จะใช้ความหนา $t_1 = t_2 = t$ การวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนความหนา t ที่ตำแหน่งวัดแรงตั้งแต่ 1 ถึง 3.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการหาค่าแรงกดสูงสุดที่โพลดเซลล์รับได้โดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรขึ้นบนชิ้นส่วนของโพลดเซลล์ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 3 พบว่าตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุดนั้นจะต้องวัดห่างจากมุมแต่ละด้านเป็นระยะเท่ากับความหนา t และความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนา t นั้นแสดงในภาพที่ 4

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของสแตนเลสเกรด 304

ประเภทข้อมูล	ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์
Density (kg/m^3)	8000
Young's Modulus (GPa)	190
Yield Strength (MPa)	240
Tensile Strength (MPa)	520
Poisson's ratio	0.29

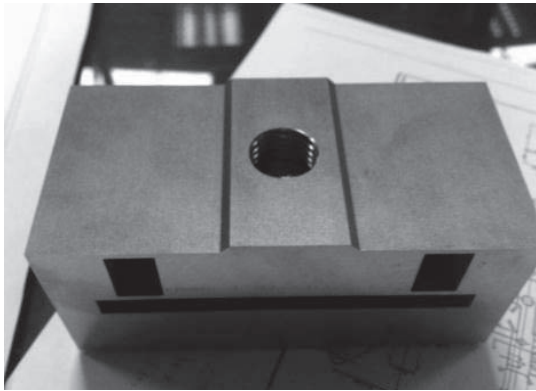


ภาพที่ 3 ลักษณะการเสียรูปจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

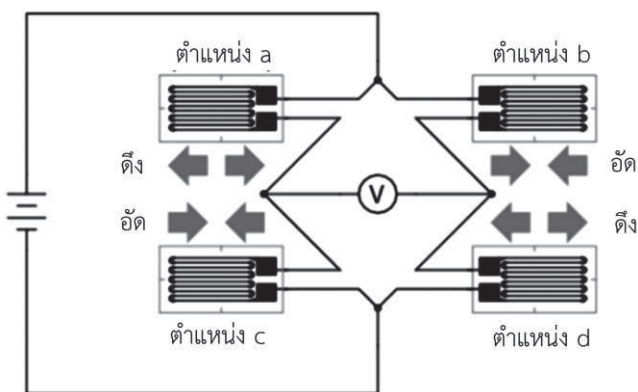


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนา t

ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการโพลดเซลล์ที่สามารถรับแรงในแนวตั้งได้ 5 kN เมื่อนำไปแทนในสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนา t พบว่า จะต้องใช้ความหนา $t_1 = t_2 = 1.51$ มิลลิเมตร ซึ่งในที่นี้จะเพิ่มความหนาเข้าไปอีก 30 เปอร์เซ็นต์เป็นค่าความปลอดภัย ดังนั้นจะใช้ $t = 1.95$ มิลลิเมตร หรือ 2.0 มิลลิเมตร ทั้งนี้หลังจากการวิเคราะห์หาความหนาแล้วก็จะทำการขึ้นรูปโลหะด้วยเครื่อง Wire Cut ดังแสดงในภาพที่ 5 หลังจากนั้นทำการติดตั้งชุดสเตรนเกจในตำแหน่งที่กำหนดแล้วทำการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าแบบ Full-Bridge ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 โหลดเซลล์ที่ถูกขึ้นรูปโดยเครื่อง Wire cut



ภาพที่ 6 การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าแบบ Full-Bridge

3. การสอบเทียบภายใต้แรงดันบรรยากาศ

การสอบเทียบภายใต้แรงดันบรรยากาศทำโดยใช้เครื่อง Oedometer ที่มีอัตราส่วนการให้แรงเท่ากับ 1 : 10 เพื่อสร้างแรงกดในแนวตั้งให้กับโหลดเซลล์ เมื่อโหลดเซลล์ถูกกดก็จะเกิดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น แต่เนื่องจากสัญญาณมีขนาดเล็กมากจึงต้องนำสัญญาณที่ได้ส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นส่งสัญญาณที่ขยายแล้วไปยัง Data Acquisition (DAQ) เพื่อแปลงจาก

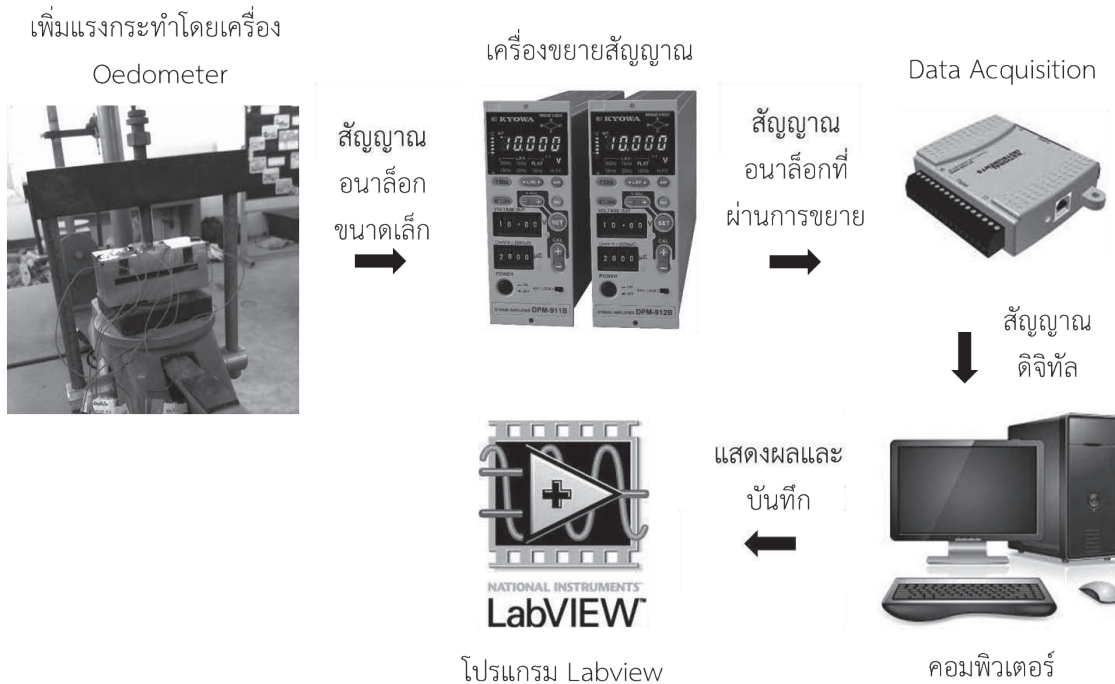
สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบอนาล็อก (Analog) ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) และส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงค่าและบันทึกผลด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยผังอุปกรณ์นั้นแสดงในภาพที่ 7

การสอบเทียบนี้เพื่อดูความเป็นเส้นตรง (Linearity) และค่าความละเอียดในการวัดโดยจะทำทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงกระทำ ค่าแรงกดสูงสุดที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 4 kN และทำการเพิ่มแรงขึ้นและลดแรงลงครั้งละ 0.25 kN ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวดิ่งกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้แสดงดังภาพที่ 8 และสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงมีค่า $R^2 = 0.9999$ ได้ดังสมการที่ 1

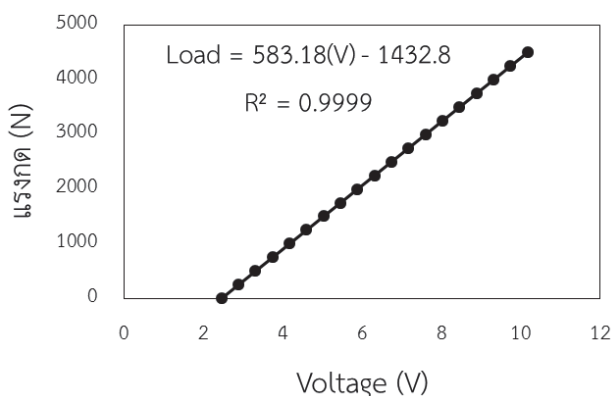
$$\Delta \text{ Axial Load} = 583.18 \times \Delta \text{ Volt}_{out} \quad (1)$$

4. การทดสอบประสิทธิภาพโหลดเซลล์ภายใต้สถานะแรงดันน้ำ

เนื่องจากโหลดเซลล์นี้ต้องนำไปบรรจุในเซลล์ของเครื่องทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกน ซึ่งจะต้องทำงานภายใต้แรงดันน้ำในสถานะต่างๆ ดังได้อธิบายไปในตอนต้น ดังนั้นในขั้นตอนการทดสอบนี้ ทั้งวงจรไฟฟ้าและสายสัญญาณจะต้องถูกป้องกันการซึมของน้ำ ไม่เช่นนั้นน้ำจะสามารถเข้าไปในจุดที่ติดตั้งชุดสเตรนเกจซึ่งมีวงจรไฟฟ้า เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการการลัดวงจรและสร้างความเสียหายกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้ ในที่นี้จะใช้ SB-TAPE (Coating Materials) ปิดทับจุดที่ติดตั้งชุดสเตรนเกจรวมไปถึงจุดต่อระหว่างสายสัญญาณกับตัวโหลดเซลล์เพื่อไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในสายสัญญาณได้



ภาพที่ 7 ผังอุปกรณ์และวิธีที่ใช้ในการสอบเทียบโหลดเซลล์ภายใต้แรงดันบรรยากาศ



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวดิ่งกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

เพื่อจำลองสภาวะที่โหลดเซลล์จะถูกแรงดันน้ำกระทำโดยรอบ ถึงอัดแรงดันน้ำที่สามารถสร้างแรงกดให้กับโหลดเซลล์และสร้างแรงดันน้ำโดยรอบโหลดเซลล์จึงถูกออกแบบและสร้างขึ้นดังภาพที่ 9 โดยมีองค์ประกอบหลักๆ คือ

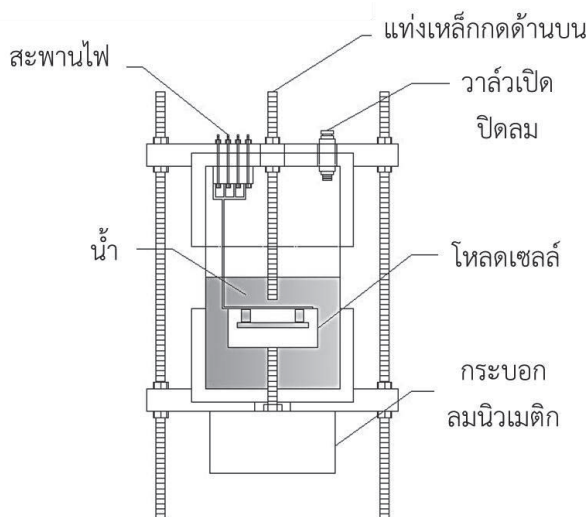
1) ถังอัดความดันซึ่งสร้างขึ้นจากท่อ PVC ที่ทนแรงดันน้ำได้ 13 bar ปิดหัวและท้ายด้วยฝาปิดท่อ PVC ซึ่งจะถูกบีบอัดด้วยแผ่นเหล็กวงกลมหนา 20 มิลลิเมตร และใช้เสาสตัดเกลียวตลอด (Full Thread Stud Bolt) ในการสร้างแรงกด เพื่อความปลอดภัยและป้องกันไม่ให้ฝาปิดท่อ PVC โกงตัว การสร้างแรงดันน้ำนั้นจะทำการอัดแรงดันลมผ่านช่องที่ติดตั้งวาล์วเปิดปิดบริเวณด้านบนของถังเพื่อให้ลมไปกดผิวของน้ำซึ่งเติมเข้าไปก่อนหน้านี้ โดยปริมาณน้ำที่ใส่เข้าไปจะต้องเพียงพอที่จะท่วมตัวโหลดเซลล์ทั้งหมด

2) สะพานไฟซึ่งมีหน้าที่นำสัญญาณไฟฟ้าจากโหลดเซลล์ที่บรรจุอยู่ในถังแรงดันน้ำออกมาเข้าสู่อุปกรณ์ขยายสัญญาณโดยไม่ทำให้เกิดการรบกวนของแรงดันและต้องไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้า โดยสะพานไฟนี้ทำขึ้นจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและถูกสอดใส่ด้วยแท่งสแตนเลสจำนวนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณ

3) กระบอกลมนิวเมติก (Pneumatic Cylinder) ซึ่งจะถูกยึดกับแผ่นเหล็กด้านล่าง ส่วนปลายของแท่งกด

จะถูกยึดเข้ากับโหลดเซลล์เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งโดยด้านบนของโหลดเซลล์จะมีแท่งกดอีกแท่งซึ่งจะถูกยึดไว้กับแผ่นเหล็กด้านบน เมื่อทำการอัดลมเข้าไปในกระบอกนิวเมติก โหลดเซลล์จะยกตัวขึ้นไปกดกับแท่งเหล็กด้านบน ซึ่งเป็นวิธีสร้างแรงในแนวแกนให้กับโหลดเซลล์

ชุดควบคุมแรงดันลมจะทำหน้าที่จ่ายแรงดันลมให้กับกระบอกลมนิวเมติกที่ติดตั้งอยู่ด้านล่าง นอกจากนั้นยังมีหน้าที่จ่ายแรงดันลมให้กับถังอัดแรงดันเพื่อสร้างแรงดันน้ำที่กระทำโดยรอบโหลดเซลล์ การสั่งงานชุดควบคุมลมจะกระทำผ่านระบบคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกและแม่นยำ เมื่อพิจารณาหน้าตัดของกระบอกลมดังแสดงในภาพที่ 10 การคำนวณค่าแรงดันลมที่ต้องจ่ายให้กับกระบอกนิวเมติกเพื่อสร้างแรงกดที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2



ภาพที่ 9 ถังอัดแรงดันน้ำ

$$\frac{Load_{calculate}}{1000 \times A_n} + \frac{Y \times A_l}{A_n} = P \quad (2)$$

โดยที่

$Load_{calculate}$ คือค่าแรงกดที่ต้องการกดลงบนโหลดเซลล์ (N)

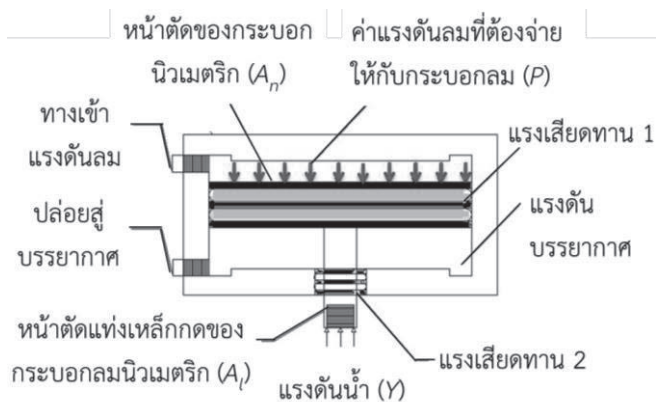
A_n คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกนิวเมติก (m^2)

A_l คือพื้นที่หน้าตัดของแท่งเหล็กกดของกระบอกลมนิวเมติก (m^2)

Y คือค่าแรงดันน้ำในถังอัดแรงดัน (kPa)

P คือค่าแรงดันลมที่ต้องจ่ายให้กับกระบอกลมนิวเมติก (kPa)

ขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มจากการปล่อยแรงดันลมเข้าไปในถังอัดแรงดันเพื่อสร้างแรงดันน้ำ ค่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง 0 – 750 kPa ซึ่งจะทำให้เปลี่ยนแปลงครั้งละ 50 kPa ในทุกครั้งที่มีการทดสอบ เมื่อได้ค่าแรงดันน้ำที่ต้องการก็ทำการเพิ่มแรงดันลมเข้าไปในกระบอกลมนิวเมติกเพื่อเพิ่มแรงกดให้กับโหลดเซลล์ ในที่นี้ทำการให้แรงกดเบื้องต้น (Pre-Loading) กับโหลดเซลล์ก่อนที่ 600 N (จากการคำนวณด้วยสมการที่ 2) เพื่อให้ระบบแนบสนิทกัน จากนั้นเพิ่มแรงกดไปจนถึง 4,100 N



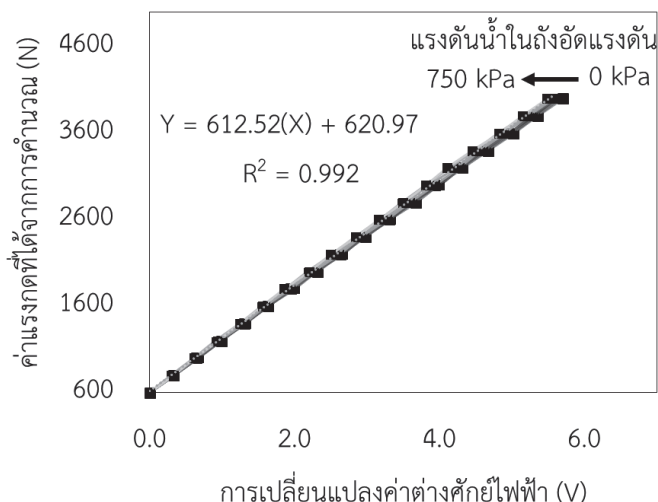
ภาพที่ 10 รูปตัดกระบอกลมนิวเมติก

ภาพที่ 11 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวดิ่งที่คำนวณได้จากสมการที่ 2 กับการเปลี่ยนแปลงค่าต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโหลดเซลล์ภายใต้แรงดันน้ำที่กระทำต่อโหลดเซลล์ที่แตกต่างกัน พบว่ายังมีความเป็นเส้นตรงที่ดีและมีค่าความชัน (Slope) เฉลี่ยอยู่ที่ 612.52

ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ

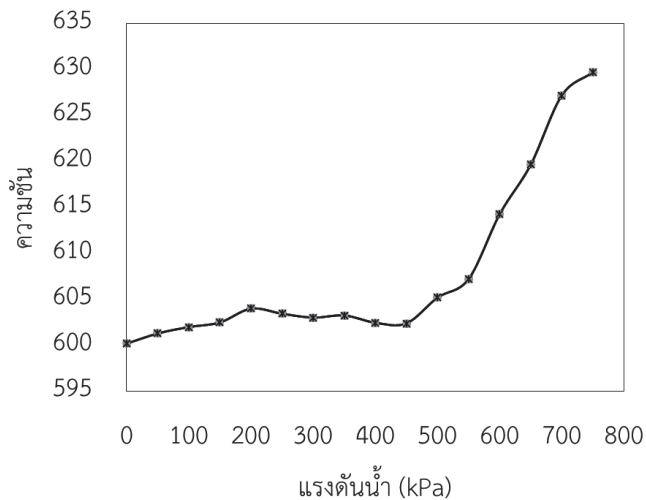
ในแต่ละการทดสอบ กับค่าแรงดันน้ำที่กระทำโดยรอบ โหลดเซลล์เพื่อดูผลกระทบของแรงดันต่อการวัดแรงใน แนวตั้ง

เมื่อนำความชันของกราฟ (ภาพที่ 8) ที่ทำการสอบ เทียบภายใต้แรงดันบรรยากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 583.18 มาเปรียบเทียบกับค่าความชันเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ ครั้งนี้จะพบว่ามีความแตกต่างกันถึง 5.03% ซึ่งเป็นผล มาจากการทดสอบนี้มีการย้ายตำแหน่งอุปกรณ์ทดสอบ และเปลี่ยนตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าทำให้อัตราส่วนการ ขยายไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาภาพที่ 11 จะพบว่าเมื่อเพิ่ม แรงดันน้ำในถังอัดแรงดัน เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าแรงกดที่ต้องการ ให้ตกลงบนโหลดเซลล์ ($Load_{calculate}$) มีแนวโน้มเอียง ไปทางซ้าย และเมื่อพิจารณาภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่าความ ชันเส้นกราฟในแต่ละการทดสอบมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่าง ชัดเจนเมื่อแรงดันน้ำในถังเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงในจุดที่การ เปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน จะต้องใช้แรงกดลง บนโหลดเซลล์ ($Load_{calculate}$) ที่คำนวณจากสมการที่ 2 มากขึ้นเมื่อแรงดันน้ำในถังมีค่าสูงขึ้น นั่นเป็นผลมาจาก ค่าแรงเสียดทานในกระบอกกลมนิวมेटริกซึ่งจะเกิดขึ้นได้ 2 ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งค่าแรงเสียดทานดัง กล่าวจะแปรผันตรงกับค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบ ซีลลัม (Seal) ของกระบอกกลมนิวมेटริกนั้นจะมีคุณสมบัติ พิเศษคือ ยังมีแรงดันมากกระทำมากขึ้นเท่าไร ระบบซีล ก็จะถูกบีบอัดให้แน่นยิ่งขึ้นทำให้ค่าแรงเสียดทานที่ เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย

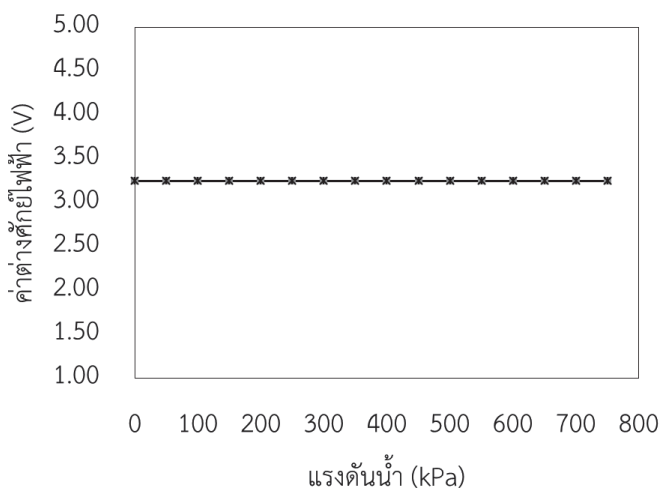


ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวตั้งกับความต่าง ศักย์ไฟฟ้าที่ค่าแรงดันน้ำแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามเพื่อคลายข้อสงสัยว่าโหลดเซลล์นี้ มีผลกระทบใดๆ ต่อแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบเพิ่มเติมโดยพิจารณาเฉพาะ ผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีผลต่อสัญญาณไฟฟ้าขาออก ของโหลดเซลล์ เริ่มจากการถอดแท่งเหล็กด้านบนที่ ทำหน้าที่กดโหลดเซลล์ออกไป จากนั้นเพิ่มแรงดันลมให้ กับกระบอกนิวมेटริกที่ 800 kPa ดังนั้นปลายกระบอก ลมจะยืดตัวจนสุดและอยู่นิ่งกับที่โดยไม่มีแรงกระทำใดๆ ด้านบน จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันเข้าไปในถังอัดแรงดัน ตั้งแต่ 0-750 kPa โดยกระทำครั้งละ 50 kPa ผลปรากฏว่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลใดๆ กับค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโหลดเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 13 ดังนั้นโหลดเซลล์นี้จึงไม่มีผลกระทบใดๆ เมื่อแรงดันน้ำ รอบข้างเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของกราฟในแต่ละผลการทดสอบกับค่าแรงดันน้ำที่กระทำกับโพลีเอสเตอร์



ภาพที่ 13 ผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีผลต่อสัญญาณไฟฟ้าขาออกของโพลีเอสเตอร์

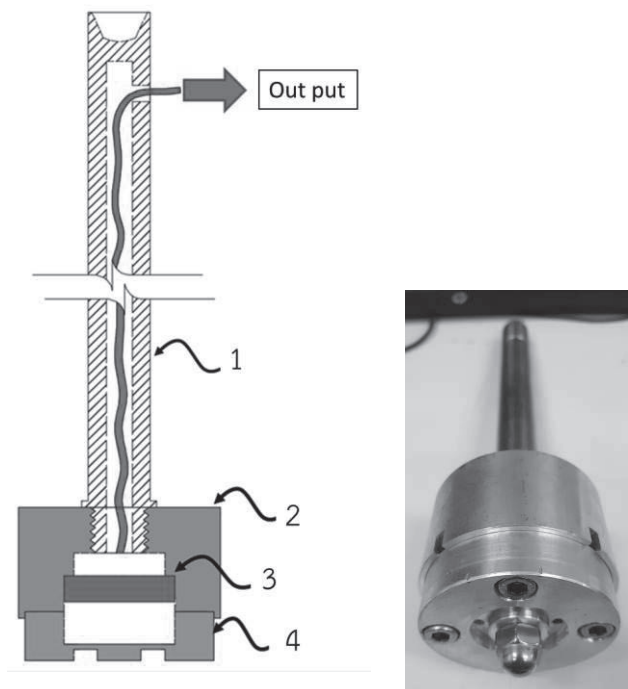
5. การศึกษาผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานต่อการวัดค่าแรงในแนวตั้ง

จากหัวข้อที่ผ่านมา งานวิจัยนี้ได้ศึกษาในเรื่องผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวตั้งของโพลีเอสเตอร์ที่แรงดันน้ำที่ได้ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำเอาโพลีเอสเตอร์ไปติดตั้งในเซลล์ทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกนแล้วทำการศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการ

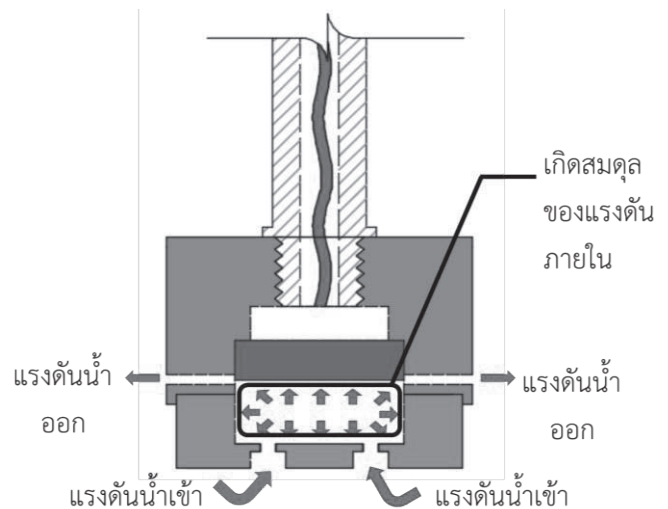
วัดแรงในแนวตั้ง แต่กลับพบว่าไม่สามารถทำได้เนื่องจากไม่สามารถนำสัญญาณไฟฟ้าออกมาจากเซลล์ทดสอบได้ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและประดิษฐ์โพลีเอสเตอร์ตัวใหม่ที่สามารถนำสัญญาณไฟฟ้าจากโพลีเอสเตอร์ออกมาได้อย่างสะดวกดังแสดงในภาพที่ 14 โพลีเอสเตอร์แบบใหม่นี้จะมีรูปทรงเป็นวงกลมโดยแบ่งกั้นด้านบน (หมายเลข 1 ในภาพที่ 14) นั้นทำมาจากสแตนเลสเกรด 304 ที่เจาะรูยาวตลอดเพื่อจะสามารถร้อยสายสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปได้ ที่ผิวด้านข้างจะเจียรระไน (Grinding) ให้เรียบเพื่อลดแรงเสียดทานโดยหมายเลข 2 คือ ฝาครอบกันน้ำมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำไหลเข้ามาในสายสัญญาณและใช้เป็นตัวยึดชิ้นส่วนวัดแรงและสะพานไฟ (หมายเลข 4 และ 3 ตามลำดับ) หมายเลข 3 คือสะพานไฟ ทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงดันน้ำ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะใช้อะคริลิกที่ถูกฝังด้วยสกรูขนาด 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว ที่ผิวสัมผัสระหว่างอะคริลิกกับสกรูจะทำการป้องกันการรั่วซึมด้วยเทปพันเกลียว อุปกรณ์นี้มีหน้าที่นำสัญญาณจากชุดเซนเซอร์เกสส่งไปที่สายสัญญาณโดยไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรและการรั่วซึมน้ำ และหมายเลข 4 คือ ชิ้นส่วนวัดแรงที่จะต้องออกแบบขนาดและนำเอาชุดเซนเซอร์เกสมาติดตั้ง

โดยการออกแบบจะออกแบบให้ระบบน้ำมีการไหลเข้าและออกดังแสดงในภาพที่ 15 เมื่อแรงดันน้ำคงที่ ชิ้นส่วนวัดแรงจะอยู่ในสมดุลจากแรงดันน้ำภายนอกและภายในตัวโพลีเอสเตอร์ ทำให้ไม่เกิดการเสียรูปในจุดวัดแรง ดังนั้นในทางทฤษฎีก็จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดเซนเซอร์เกสอันเนื่องจากแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปภายในเซลล์ทดสอบ การหาขนาดความหนาของจุดวัดแรงที่เหมาะสมจะอาศัยหลักการวิเคราะห์ทั้งหมดที่กล่าวมาในตอนต้นโดยภาพที่ 16 แสดงวิธีการใส่เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมและภาพที่ 17 แสดงให้เห็นจุดที่เกิดความเค้นดึงและอัดสูงสุดเมื่อชิ้นส่วนวัดแรงรับแรงกระทำสูงสุดซึ่งการวิเคราะห์จะทำได้ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความหนาของจุดวัดแรง จากนั้นจะทำการหาค่าแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้ชิ้นส่วนวัดแรงเกิดแรงเค้นสูงสุดใกล้เคียงความเค้นที่จุดคลาก (Yield Stress) ของวัสดุ ซึ่งในการศึกษานี้ ชิ้นส่วนวัดแรงทำมาจากอลูมิเนียมเกรด 7075 ซึ่งสามารถรับความเค้นที่จุดคลากได้เท่ากับ 503 MPa จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของจุดวัดแรงกับแรงกดสูงสุดนั้นแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งจะได้ออกมาเป็นสมการความสัมพันธ์ โดยในการออกแบบนี้ต้องการให้โหลดเซลล์สามารถรับแรงกดสูงสุดเท่ากับ 5 kN โดยไม่ทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปถาวร แล้วเพิ่มความหนา 30% เพื่อเป็นสัดส่วนความปลอดภัย ดังนั้นจะใช้ความหนาเท่ากับ $t = 1.9 \text{ mm}$ หรือ 2.0 mm



ภาพที่ 14 โหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำที่สามารถบรรจุเข้าไปในเซลล์ทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน

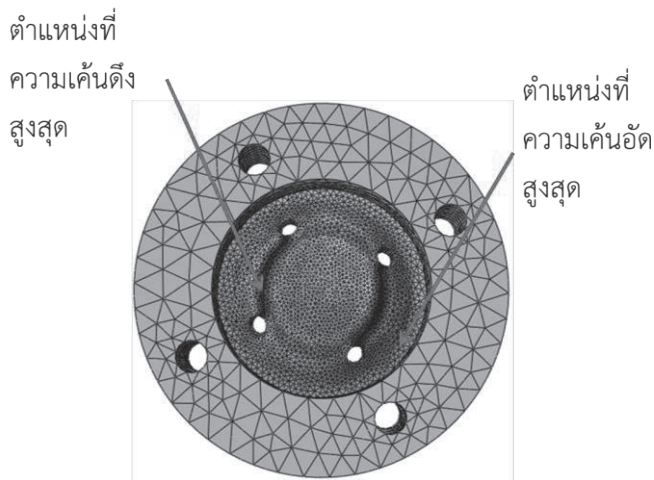


ภาพที่ 15 โหลดเซลล์เมื่อถูกแรงดันน้ำกระทำเท่ากันทุกทิศทาง

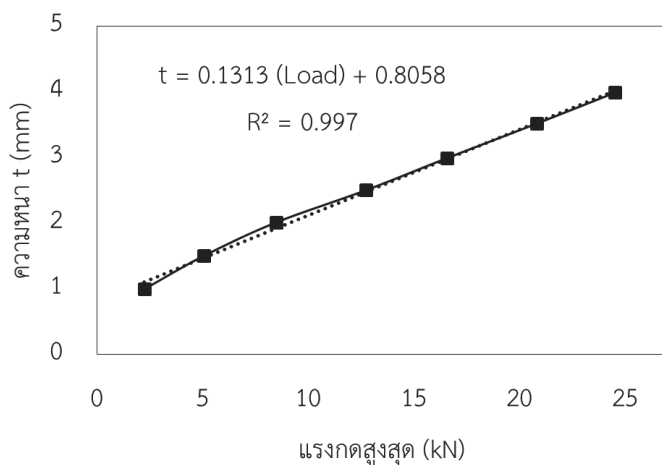
หลังจากทำการประกอบโหลดเซลล์แล้วจะต้องมีการทดสอบการรั่วซึมของน้ำซึ่งใช้อุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 19 การทดสอบนี้จะทำการสร้างแรงดันน้ำขนาด 500 kPa ด้วย Bladder ผ่าน Volume Change Unit แล้วเข้าสู่เซลล์ทดสอบที่ติดตั้งชุดประกอบโหลดเซลล์แล้ว จากนั้นคงค่าแรงดันน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยสามารถอ่านค่าปริมาณการรั่วซึมได้จากอุปกรณ์วัดปริมาณการไหลของน้ำ (Volume Change Unit) จากการทดสอบพบว่าไม่มีการรั่วซึมของน้ำ



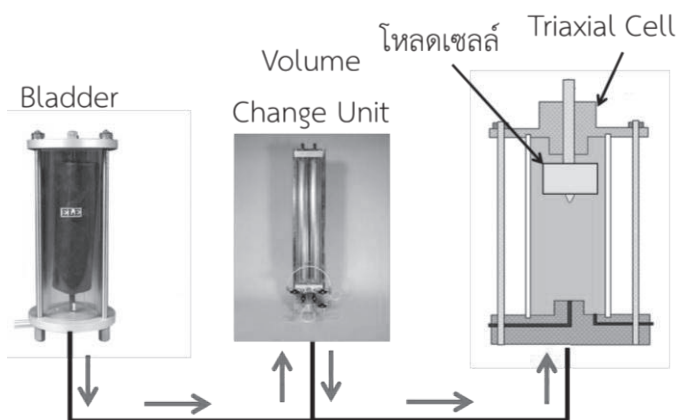
ภาพที่ 16 เจือ้นไขสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์แบบที่ 2



ภาพที่ 17 ลักษณะการเสียรูปจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์แบบที่ 2

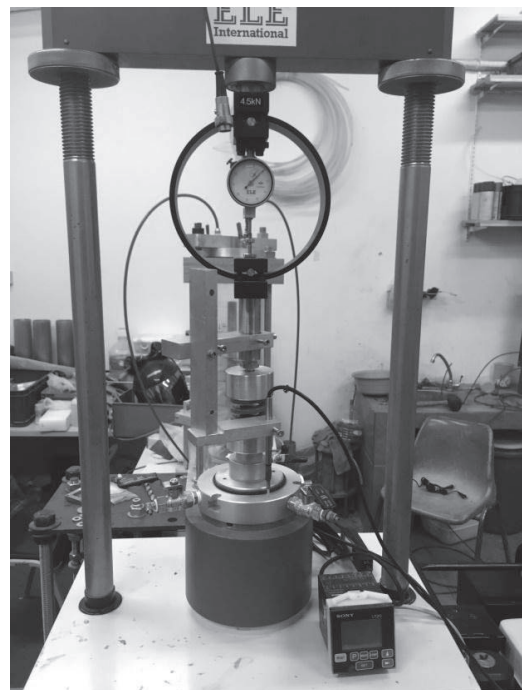


ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนาของจุดวัดแรง



ภาพที่ 19 การทดสอบการรั่วซึมของน้ำ

การสอบเทียบโหลดเซลล์ที่ติดตั้งอยู่ภายในเซลล์ทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกนได้อย่างถูกต้องนั้น ในงานวิจัยนี้ใช้สปริงที่มีความยืดหยุ่นสูงนำมาติดตั้งไว้ภายในเซลล์ทดสอบ และเพื่อที่จะสามารถทราบค่าแรงกดที่เกิดขึ้นกับสปริง จะต้องทำการสอบเทียบการรับแรงกดของสปริงกับมาตรวัดแรงแบบวงแหวน (Proving Ring) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของสปริงกับแรงกดในแนวตั้งดังแสดงในภาพที่ 20 จากผลการสอบเทียบพบว่าสปริงมีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยได้ค่า $R^2 = 0.9984$

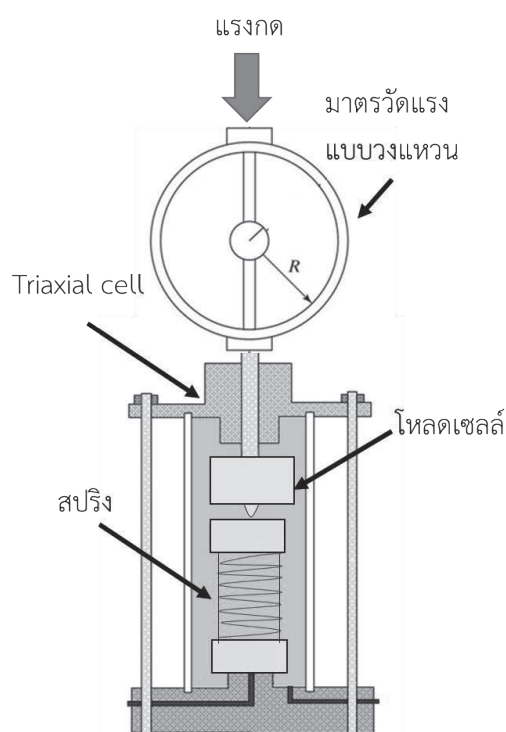


ภาพที่ 20 การสอบเทียบสปริงกับมาตรวัดแรงแบบวงแหวน

จากนั้นจะทำการประกอบชิ้นส่วนเข้าไปในเซลล์ทดสอบดังแสดงในภาพที่ 21 เพื่อทำการสอบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโหลดเซลล์กับแรงกดของสปริงและเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดค่าแรงในแนวตั้ง ในการทดสอบนี้จะใช้ค่าแรงกดสูงสุดที่ 2.5 kN เนื่องจากหากมากกว่านี้ ระยะการยุบตัวของสปริงจะเกินระยะสูงสุดที่

อุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่ใช้จะวัดได้ ผลจากการทดสอบที่ค่าแรงดันบรรยากาศพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโพลีเซลล์กับค่าแรงกดที่อ่านได้จากสปริงนั้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดีและมีค่า $R^2 = 0.9985$ ดังนั้นโพลีเซลล์ที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่นี้มีความเป็นเส้นตรงดีมาก ส่วนผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นจริงภายในเซลล์ทดสอบนั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงกดที่อ่านได้จากสปริงซึ่งบรรจุอยู่ภายในเซลล์ทดสอบกับค่าแรงกดที่อ่านได้จากมาตรวัดแรงแบบวงแหวนที่ติดตั้งไว้ภายนอก การที่สปริงติดตั้งอยู่ภายในเซลล์ทดสอบทำให้การวัดแรงกดผ่านสปริงจะไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นและถือว่าเป็นแรงประสิทธิภาพซึ่งเปรียบเสมือนแรงกดที่เกิดขึ้นจริงในตัวอย่างดินระหว่างทำการเงื่อนไข แตกต่างจากมาตรวัดแบบวงแหวนที่ถูกติดตั้งไว้ภายนอกและจะได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 22 พบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดแรงกดในแนวตั้งแบบการเพิ่มขึ้นของแรง (Loading) เกิดขึ้นระหว่าง 0 - 0.3% ซึ่งถือว่าน้อยมาก แต่สำหรับช่วงการลดลงของแรงกด (Unloading) จะพบว่าค่าของแรงกดที่เกิดขึ้นในสปริงจะมีค่ามากกว่าค่าแรงกดที่อ่านได้จากมาตรวัดแรงแบบวงแหวนซึ่งติดตั้งไว้ภายนอกเซลล์ทดสอบโดยความผิดพลาดในช่วงนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 5% ซึ่งมากกว่าช่วงการเพิ่มขึ้นของแรงกดอย่างมีนัยสำคัญและสามารถอธิบายจากหลักการสมดุลของแรงในแนวตั้งเมื่อทิศทางการเคลื่อนที่ของแท่งกดและโพลีเซลล์เกิดการสลับทิศทางการเคลื่อนที่กันทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสเกิดการสลับทิศด้วยเช่นกัน (แรงเสียดทานจะมีทิศทางการตรงข้ามกับการเคลื่อนที่) จากผลการทดสอบนี้พบว่า อิทธิพลของแรงเสียดทานในช่วงการลดลงของแรงกดนั้นมีมากกว่าช่วงการเพิ่มขึ้นของแรงกด สำหรับการทดสอบนี้ไม่มีอิทธิพลของแรงเฉื่อยเข้ามาเกี่ยวข้องเนื่องจากการวัดแรงจะทำในสภาวะหยุดนิ่งเท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่นำเซลล์ทดสอบดังกล่าวไปทดสอบ

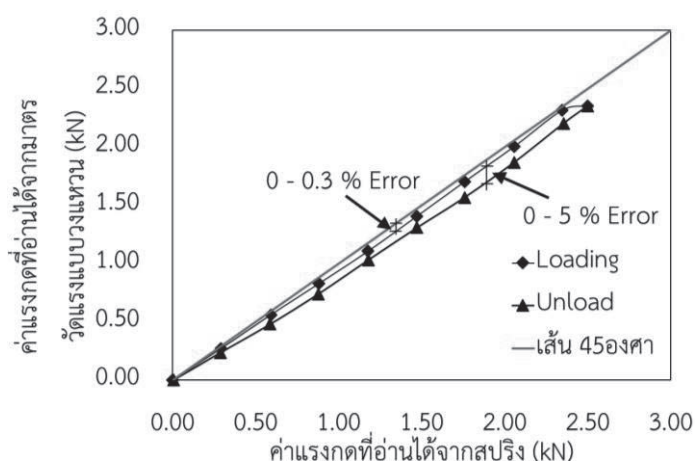
ทรายหลวม (Loose Sand) หรือ ดินเหนียวอัดตัวปกติ (NC-Clay) ถ้าติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงไว้ภายนอก ผลที่ได้ยังมีความถูกต้องแม่นยำดี แต่ถ้าในกรณีที่เป้นทรายแน่นหรือดินเหนียวชนิดอัดตัวมากกว่าปกติ (OC-Clay) ผลกระทบในช่วง Hardening นั้นจะค่อนข้างน้อยแต่จะส่งผลอย่างชัดเจนในการวัดแรงช่วง Softening



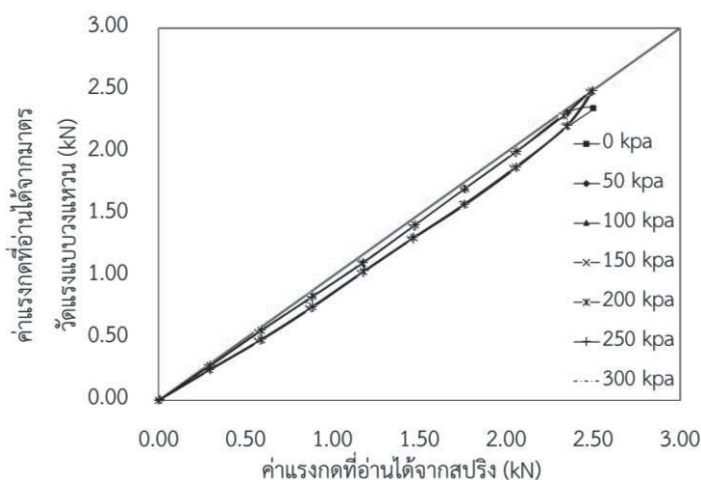
ภาพที่ 21 การสอบเทียบโพลีเซลล์และหาผลกระทบของแรงเสียดทานต่อการวัดแรงในแนวตั้ง

นอกจากนั้นยังได้มีการทดสอบผลกระทบของแรงดันน้ำต่อความผิดพลาดของการวัดแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงเสียดทานซึ่งผลได้แสดงในภาพที่ 23 พบว่าแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบที่เปลี่ยนไปไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อความผิดพลาดในการวัดแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงเสียดทาน และสุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการวัดแรงในแนวตั้งของโพลีเซลล์ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่ จากภาพที่ 24 พบว่าโพลีเซลล์มีความแม่นยำ (Accuracy) และเป็น

เส้นตรงดีโดยสามารถพิจารณาได้จากค่า $R^2 = 0.9984$ และการติดตั้งโหลดเซลล์ไว้ภายในเซลล์ทดสอบสามารถกำจัดความผิดพลาดเนื่องจากแรงเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยที่แรงดันน้ำที่เปลี่ยนไปไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อประสิทธิภาพของการวัดแรงในแนวดิ่งเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่าแรงดันน้ำแตกต่างกันกับค่าแรงกดที่อ่านได้จากสปริงไม่มีการเปลี่ยนแปลงและค่าความชันของเส้นกราฟค่อนข้างคงที่ ซึ่งจากค่าความชันเฉลี่ยและการหาขนาดความกว้างของสัญญาณรบกวน (Noise) สามารถนำไปใช้คำนวณค่าความละเอียด (Resolution) ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 0.048% ของแรงกระทำสูงสุดที่ออกแบบไว้ โดยที่โหลดเซลล์ทั่วไปตามท้องตลาดส่วนใหญ่จะมีค่าความละเอียดอยู่ที่ 0.05% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้และใช้งานกันอย่างกว้างขวาง

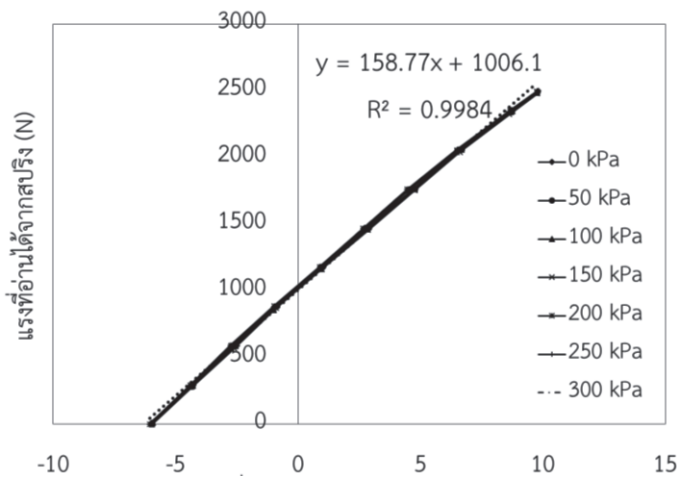


ภาพที่ 22 ผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวดิ่งที่ค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 0 kPa



ภาพที่ 23 ผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวดิ่งที่ค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 0 ถึง 300 kPa

เมื่อทำการเปรียบเทียบภาพที่ 24 กับภาพที่ 11 จะพบว่าวิธีการทดสอบโดยการใช้แรงกดจากเฟรมทดสอบแล้วทำการอ่านค่าแรงกดประสิทธิภาพจากสปริงโดยตรงนั้นให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณค่าแรงกดจากสมการที่ 2 อย่างมาก เนื่องจากสปริงไม่มีผลกระทบของแรงเสียดทานเนื่องจากแรงดันภายในเซลล์ทดสอบซึ่งแตกต่างกันอย่างมากกับกระบอกลมนิวเมตริกที่จะเกิดผลกระทบอย่างชัดเจนเมื่อแรงดันภายในถังทดสอบเปลี่ยนไป ดังนั้นการสอบเทียบโดยการบรรจุสปริงเข้าไปในเซลล์ทดสอบเพื่อเป็นตัวเทียบแรงกดมาตรฐานจะให้ค่าแรงกดที่กระทำต่อโหลดเซลล์ที่ถูกต้องและแม่นยำกว่า



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวตั้งกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่าแรงดันน้ำแตกต่างกัน

6. สรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) โหลดเซลล์ที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นมานี้สามารถทนต่อแรงดันน้ำได้และไม่มีผลกระทบใดๆ จากแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งมีความแม่นยำและความละเอียดเพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้

2) โหลดเซลล์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้กับเครื่องทดสอบหาแรงเฉือนของดินแบบสามแกนได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีต้นทุนต่ำประมาณ 4,000 บาท อีกทั้งยังสามารถนำเอาหลักการที่ใช้ในการออกแบบนี้ไปออกแบบโหลดเซลล์ขนาดอื่นๆ ที่เหมาะสมกับการทดสอบอื่นๆ ได้ต่อไปในอนาคต

3) การบรรจุโหลดเซลล์เข้าไปในเซลล์ทดสอบนั้นสามารถกำจัดข้อผิดพลาดในการวัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทานและทำให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

4) การคำนวณแรงกระทำของกระบอกกลมนิวเมตริกนั้นเป็นเรื่องยากและมีความผิดพลาดสูง ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นค่าแรงกดมาตรฐานในการสอบเทียบ

5) ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดแรงกดในแนวตั้งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงไว้ภายนอกเซลล์ทดสอบแบบการเพิ่มขึ้นของแรง (Loading) จะเกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 0 - 0.3%

และในช่วงการลดลงของแรงกด (Unloading) จะเกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 0 - 5% ซึ่งส่งผลกระทบกับการวัดแรงกดในแนวตั้งค่อนข้างน้อยสำหรับการทดสอบดินเหนียวอัดตัวปกติและทรายหลวม แต่จะส่งผลกระทบอย่างมากเมื่อใช้ทดสอบดินเหนียวชนิดอัดตัวมากกว่าปกติและทรายแน่น

7. ข้อเสนอแนะ

1) ผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดและแรงกดของโอริง (O-Ring) ที่ใช้ป้องกันการรั่วซึมของน้ำ ชนิดและคุณภาพของสารหล่อลื่นที่ใช้ และความเรียบบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเซลล์ทดสอบกับแท่งกดตัวอย่าง ดังนั้นเซลล์ทดสอบแต่ละตัวอาจมีผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน

2) ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) ความคงทนของระบบป้องกันน้ำซึม รวมถึงผลเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโหลดเซลล์เพิ่มเติม ในกรณีต้องการใช้งานระยะยาวและไม่ต้องการทำการสอบเทียบบ่อยครั้ง

3) ความละเอียดของการวัดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณภาพของสายดินและสายส่งสัญญาณ ความยาวของสายส่งสัญญาณ อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าอื่นๆ รอบบริเวณที่ทดสอบ คุณภาพของวงจรขยายสัญญาณ รวมถึงกำลังการขยายสัญญาณ

8. บรรณานุกรม

- (1) Kongkitkul W. (2004). Effects of material viscous properties on the residual deformation of geosynthetic-reinforced sand. Ph.D. Thesis. The University of Tokyo, Japan.
- (2) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. & Fukushima, S. (1986). Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, Soils and Foundations, 26(1), pp. 65-84.
- (3) Lai, J. (2004). Advanced geotechnical laboratory. Department of construction engineering. Chaoyang University of Technology, Taiwan.

- (4) Chao L.P. and Chen K.T. (1997). Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors, *International Journal of Sensors and Actuators*, 63, pp.105-112.
- (5) สุกกิจ รูปพันธ์ (2547). การศึกษาออกแบบโหลดเซลล์ชนิดคอลัมน์ โดยวิธีการทดลองและระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- (6) สราวุธ เรืองกิจตระการ (2549). การศึกษารูปทรงของโหลดเซลล์ โดยใช้เทคนิคของไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- (7) เพิ่มศักดิ์ เกตุนวม (2550). การออกแบบโหลดเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปัจจัยสำเร็จในการบริหารโครงการก่อสร้างประเภทสัญญาราคาต่อหน่วย Critical Success Factors in Construction Project Management: A Unit Price Contract

ดร.สุรางคณา ตรังคานนท์*
ปองคุณ ตูลยกันิชก์
พีรพล ไชยมล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

*Corresponding Author. E-mail : tsurangkana@eng.psu.ac.th

(Received: August 4, 2018; Revised: September 21, 2018; Accepted: September 28, 2018)

บทคัดย่อ : สัญญางานโครงการก่อสร้างในประเทศไทย ปัจจุบันพบว่ามีการใช้สัญญาประเภทราคาต่อหน่วยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการกระจายความเสี่ยงที่ค่อนข้างยุติธรรมระหว่างคู่สัญญาและสามารถเริ่มงานได้ทันที แม้ว่าปริมาณงานก่อสร้างยังไม่สามารถคำนวณให้ครบถ้วนได้ โดยสัญญาประเภทนี้เหมาะกับงานด้านวิศวกรรมโยธาที่มีลักษณะซ้ำๆ เช่น งานถนน งานขุดดิน และงานคอนกรีต เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า งานก่อสร้างที่ทำสัญญาดังกล่าวจำนวนมากเกิดปัญหาในการส่งมอบงานล่าช้า ใช้ต้นทุนในการก่อสร้างเกินกว่างบประมาณที่ได้จัดสรรไว้และคุณภาพของงานไม่ตรงตามความต้องการของผู้ว่าจ้าง ดังนั้นการศึกษานี้จึงตั้งเป้าหมายไปที่การจำแนกปัจจัยสำเร็จที่สำคัญที่ส่งผลให้การบริหารโครงการก่อสร้างประเภทสัญญาราคาต่อหน่วยประสบผลสัมฤทธิ์ โดยการใช้วิธีการศึกษาเพื่อทำการศึกษา 10 หน่วยงานที่อายุขององค์กรมากกว่า 5 ปี และมีประสบการณ์ในการบริหารโครงการก่อสร้างประเภทสัญญาราคาต่อหน่วย โดยที่ผลการศึกษาพบว่าภายใต้ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ ทางด้านเกณฑ์ประสิทธิภาพ เกณฑ์ประสิทธิผล และเกณฑ์ความพึงพอใจของเจ้าของโครงการจะมีปัจจัยสำเร็จสำคัญอยู่ในทุกๆ ช่วงของวงจรชีวิตโครงการ โดยช่วงริเริ่มโครงการพบว่าปัจจัยสำเร็จที่สำคัญคือ ประสบการณ์การบริหารโครงการของเจ้าของโครงการ การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ เงินทุนหมุนเวียน และทัศนคติของเจ้าของโครงการที่มีต่อความเสี่ยง ในขณะที่ช่วงระยะกลางพบว่า วิธีการประมูลที่โปร่งใส ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบ การออกแบบให้ตรงความต้องการของเจ้าของงาน แบบก่อสร้างง่าย และสะดวกต่อการนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ความสามารถในการวางแผนและออกแบบ ผู้รับเหมาที่เชื่อถือได้ ทักษะการทำงานของคนงาน และสภาพอากาศเป็นปัจจัยสำเร็จที่สำคัญ ในช่วงระยะสุดท้ายพบว่า การประเมินผลการดำเนินงานของเจ้าของโครงการ การรับประกันผลงานและวางเงินค้ำประกันผลงาน ตลอดจนการทุจริตในการตรวจรับงาน ล้วนเป็นปัจจัยสำเร็จที่สำคัญในระยะนี้

คำสำคัญ: ปัจจัยสำเร็จที่สำคัญ ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ การบริหารโครงการก่อสร้าง ประเภทสัญญาจ้างแบบราคาต่อหน่วย

Abstract : The application of unit price contract in construction industry is generally used in Thailand particularly in civil works since it fairly provides risk allocation between the contracting parties. This includes project initiation with no clear the quantities of project works. However, it was found that the unit price construction projects fail to meet project deadline, overshoot project budget, and are unable to perform owners' requirements. This study aims to identify critical success factors in unit price contract. The research methodology is case study. The units of analysis are organizations. Ten organizations were selected. Their organizations have been operated more than 5 years and have worked in unit price construction projects. The results show that critical success factors embed in every stage of project lifecycle against the success criteria of project progress, efficiency, effectiveness, and owners' satisfaction. In initial phase, owners' experience in project management, feasibility study, working capital and owners' risk attitude are the critical success factors. In intermediate phase, the critical success factors consist of transparent bidding method, appropriate project schedule and specifications, project design against owners' requirements, simple project design and constructability, designers' ability in project design and planning, reliable contractors, workers' skill and weather. In final phase, owners' evaluation on project performance, contractors' performance bond and guarantee on work, and corruption in project approval are all the critical success factors.

Keywords: Critical Success Factors, Success Criteria, Project Management, Unit Price Contract

1. ที่มาและความสำคัญ

สัญญาประเภทราคาต่อหน่วย (Unit Price Contract) เป็นสัญญาประเภทหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายภายในประเทศไทย [1] เพราะเป็นสัญญาที่คิดค่าใช้จ่ายเป็นราคาต่อหน่วยงานที่ได้ทำจริง ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ยุติธรรมแก่ทั้งผู้ว่าจ้างและผู้รับจ้าง (ผู้รับเหมา) แม้ว่าอาจมีงานเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายหลัง อันเนื่องจากรูปแบบและรายการประกอบแบบไม่ชัดเจนหรือ ปริมาณความต้องการเนื้องานที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ไม่ทราบปริมาณงานที่แน่นอน [1-2]

แต่อย่างไรก็ตามพบว่า แม้ว่าจะมีการกระจายความเสี่ยงที่ค่อนข้างยุติธรรมดังที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่ก็ยังพบว่าโครงการงานก่อสร้างที่ใช้การบริหารสัญญาประเภทราคาต่อหน่วยยังมีความล่าช้าและไม่สามารถดำเนินการ

ให้เสร็จสิ้นได้ภายในงบประมาณที่กำหนดไว้ เนื่องจากมีความผิดพลาดในเรื่องของรายการก่อสร้างที่ไม่ครบถ้วนหรือปริมาณงานที่คำนวณไว้ก่อนทำสัญญามีความคลาดเคลื่อนมาก ตลอดจนการเข้าใจต่อเกณฑ์การวัดปริมาณงาน (Method of Measurements) ระหว่างผู้ว่าจ้างและผู้รับเหมาไม่ตรงกัน ซึ่งล้วนแต่ส่งผลให้การบริหารโครงการประเภทสัญญาราคาต่อหน่วยนี้ไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของการบริหารโครงการได้ โดยเฉพาะในแง่ของประสิทธิภาพในการบริหารจัดการโครงการ [2] จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การศึกษาเรื่องปัจจัยสำเร็จที่ส่งผลต่อการบริหารโครงการทั้งในประเทศและต่างประเทศนั้น เป็นการศึกษาปัจจัยสำเร็จตามลักษณะประเภทของงานก่อสร้าง [3] ตามลักษณะทั่วไปในการบริหารโครงการ [4-5, 8] ตามลักษณะประเภทสัญญา

ระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการ (Project Delivery System; PDS) [6-7] และตามลักษณะขนาดของโครงการ [9] นอกจากนี้แม้ว่าจะมีการศึกษาปัจจัยสำเร็จที่ส่งผลต่อโครงการก่อสร้างตามลักษณะประเภทสัญญาวิธีการชำระเงิน (Payment Method) แต่ก็เป็นสัญญาประเภทรับรองวงเงินก่อสร้างสูงสุด (Guaranteed Maximum Price) และกำหนดเป้าหมายค่าใช้จ่าย (Target Cost) [10] ซึ่งไม่ใช่สัญญาประเภทราคาต่อหน่วยที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย

2. วัตถุประสงค์

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงได้กำเนิดขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่า ปัจจัยใดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อ ความสำเร็จของโครงการที่ทำสัญญาประเภทราคาต่อหน่วย เพื่อนำผลที่ได้มาจัดทำเป็นข้อเสนอแนะให้แก่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียของโครงการที่ทำสัญญาประเภทนี้

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 สัญญาประเภทราคาต่อหน่วย (Unit Rate or Unit Price Contract)

สัญญาประเภทราคาต่อหน่วยเป็นสัญญาประเภทหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มสัญญาที่ถูกแบ่งตามประเภทวิธีการชำระเงิน (Payment Method) ที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทย เนื่องจากคิดมูลค่าสัญญาตามค่าใช้จ่ายที่ได้ทำจริงตามราคาต่อหน่วยของแต่ละรายการที่ได้ตกลงกันไว้ในสัญญาหรือบัญชีแสดงปริมาณงาน (Bill of Quantities) ดังนั้นแม้ว่าปริมาณงานจะเปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากความต้องการของเจ้าของงาน หรือความไม่ชัดเจนของแบบและรายการงานก่อสร้าง ผู้รับเหมาจะไม่ได้เป็นผู้รับผิดชอบความเสี่ยงดังกล่าวแต่เพียงผู้เดียว นอกจากนี้ในงานก่อสร้างที่ใช้ประเภทสัญญาต่อหน่วยนี้ ผู้รับเหมาสามารถที่จะเริ่มทำงานได้ทันทีที่มีการลงนามในสัญญาโดยไม่จำเป็นต้องรู้ปริมาณงานที่แน่นอน [1-2]

สัญญาประเภทนี้นิยมใช้กับงานที่มีลักษณะเหมือนเดิมและทำซ้ำๆ กัน เช่น งานถนน งานดิน และงานคอนกรีต เป็นต้น [11] ดังนั้นเกณฑ์การวัดปริมาณงาน (Method of Measurements) จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก และต้องกำหนดให้ชัดเจนก่อนที่จะทำสัญญา เนื่องจากการเบิกจ่ายคิดตามปริมาณผลงานที่ได้ทำจริงจากเกณฑ์การวัดปริมาณงานที่เหมือนกัน ซึ่งต้องอาศัยผู้ควบคุมงานที่มีความรับผิดชอบสูงเพราะต้องคอยตรวจสอบผลงานที่ได้จริงตลอดระยะเวลาสัญญา [1-2, 11]

แต่อย่างไรก็ตาม งานก่อสร้างประเภทสัญญาต่อหน่วยสามารถส่งผลให้งบประมาณในการดำเนินงานคลาดเคลื่อนได้หากมีความผิดพลาดในการคำนวณปริมาณงานก่อนทำสัญญาหรือรายการก่อสร้างต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ไม่ครอบคลุมรายการงานก่อสร้างทั้งหมดทำให้เกิดปัญหาในการตกลงราคาใหม่ ซึ่งไม่เพียงส่งผลต่องบประมาณเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อระยะ เวลาในการก่อสร้าง [1-2]

3.2 เกณฑ์การวัดความสำเร็จโครงการ (Success Criteria)

โครงการเป็นส่วนหนึ่งขององค์กรที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้องค์กรสามารถบรรลุแผนเชิงกลยุทธ์ที่ได้ตั้งไว้เมื่อองค์กรไม่สามารถใช้วิธีการดำเนินงานปกติได้ [12] ไพโรจน์ ภัทรนรากุล (2543) [13] กล่าวว่า การประเมินผลเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในการดำเนินงานขององค์กรเพราะเป็นกลไกสำคัญที่จะสร้างหลักประกันในการบริหารจัดการที่ดี และได้นำเสนอเกณฑ์ที่ใช้วัดผลการดำเนินงานในระบบเปิดทั้งในเชิงผลผลิต (Outputs) ผลลัพธ์ (Outcomes) และผลกระทบ (Impacts) 7 เกณฑ์ ประกอบด้วย เกณฑ์สัมฤทธิ์ผลและการบรรลุวัตถุประสงค์ของนโยบาย (Achievement) เกณฑ์ความเสมอภาค (Equality) และความเป็นธรรมในสังคม (Social Equality) เกณฑ์ความสามารถและคุณภาพในการให้บริการ (Capability and Service Quality) เกณฑ์ความรับผิดชอบต่อหน่วยงาน (Accountability) เกณฑ์การสนองตอบความต้องการของประชาชน (Responsive-

ness) เกณฑ์ความพึงพอใจของลูกค้าหรือประชากรกลุ่มเป้าหมาย (Client's Satisfaction) และเกณฑ์ผลเสียหายต่อสังคม (Social Damage)

ในส่วนของการประเมินผลการดำเนินงานโครงการ นักวิจัยได้นำเสนอความคิดเห็นในหลากหลายมิติด้วยกัน โดยในช่วงแรกของการศึกษาเรื่องเกณฑ์การพิจารณาความสำเร็จของโครงการจะใช้เกณฑ์ทางด้านเวลา ต้นทุน และ คุณภาพ เป็นหลัก ต่อมาความสำเร็จของโครงการได้ถูกพิจารณาในหลากหลายมิติและซับซ้อนมากขึ้น [14-15] เช่น Shenbor และคณะ ได้แบ่งเกณฑ์ที่ใช้วัดผลการดำเนินงานของโครงการออกเป็น 3 มิติ คือ มิติการบรรลุวัตถุประสงค์ด้านการออกแบบ มิติผลกระทบต่อลูกค้า และมิติผลประโยชน์ขององค์กร [16] ผลการศึกษาของ Westerveld (2003) ชี้ให้เห็นว่า นอกจากเกณฑ์ทางด้านเวลา ต้นทุน และคุณภาพแล้ว ความพึงพอใจของลูกค้า ทีมงานของโครงการ ผู้ใช้โครงการ คู่สัญญา และผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในโครงการ ได้ถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งในการวัดผลสัมฤทธิ์ของโครงการเช่นกัน [14] Alias และคณะ (2014) ได้ผลลัพธ์ของงานวิจัยคล้ายคลึงกับ Westerveld (2003) [14] แต่ได้จำแนกความพึงพอใจของลูกค้าทางด้านบริการ และสินค้า ออกจากกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ความสามารถในการคาดการณ์ เหตุการณ์งานก่อสร้าง ข้อบกพร่อง และเวลาในการดำเนินงาน ถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดผลสัมฤทธิ์ของโครงการ เช่นเดียวกัน [15]

โดยสรุปจะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันในหลายมิติ ระหว่างการวัดผลสัมฤทธิ์ขององค์กรและโครงการ เนื่องจากโครงการเป็นส่วนหนึ่งขององค์กรที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์บางประการขององค์กร [12]

3.3 ปัจจัยสำเร็จหรือปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จ (Critical Success Factors, CSFs)

การศึกษาเรื่องปัจจัยสำเร็จ (Critical Success Factors, CSFs) ได้ถูกริเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1982 โดยที่ปัจจัยสำเร็จหมายถึงกลุ่มปัจจัยที่ใช้ในการคาดการณ์ได้ถึงผลสำเร็จของโครงการ [4] หลังจากปี ค.ศ. 1982

เป็นต้นมา การศึกษาเรื่องปัจจัยสำเร็จได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [5] โดย Chan และคณะ ได้ศึกษาปัจจัยสำเร็จจาก 43 บทความ ตามลักษณะทั่วไปในการบริหารโครงการก่อสร้าง [4] พบว่า สามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยสำเร็จได้ออกเป็น 5 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ (Human-Related Factors) กลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ (Project-Related Factors) กลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนในการดำเนินการโครงการ (Project Procedures) กลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานบริหารโครงการ (Project Management Actions) และ กลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอก (External Environment) [4] ในขณะที่ Sanvido และคณะ ใช้ Integrated Building Process Model ในการวิเคราะห์หา ปัจจัยสำเร็จจาก 16 โครงการ พบว่า มี 4 กลุ่มปัจจัยสำเร็จ คือ คณะทำงานที่ดี สัญญาโครงการที่ยืดหยุ่น ประสบการณ์การบริหารโครงการ และข้อมูลที่มีประโยชน์ทันการณ์และ เหมาะสม เพิ่มเติมจากนี้คือ Saqib และคณะ [8] พบว่าเมื่อใช้ การวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยวิธีการคำนวณค่าดัชนีวิกฤต (Criticality Index) กลุ่มปัจจัยสำเร็จที่สำคัญเรียงตามลำดับค่าดัชนีดังกล่าว ประกอบด้วย ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผู้รับเหมา (Contractor-Related Factors) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผู้จัดการ โครงการ (Project Manager-Related Factors) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดซื้อจัดจ้าง (Procurement-Related Factors) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับทีมออกแบบ (Design Team-Related Factors) ปัจจัยทางด้านการบริหารโครงการ (Project Management Factors) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมทางด้านธุรกิจและการทำงาน (Business and Work Environment Related Factors) และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลูกค้าโครงการ (Client-Related Factors)

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาปัจจัยสำเร็จในเชิงลึก โดยแบ่งแยกย่อยตามลักษณะต่างๆ เช่น การศึกษาปัจจัยสำเร็จของ งานประเภทโครงการบ้านจัดสรรของผู้รับเหมา

ที่มีผลต่อเกณฑ์ความสำเร็จด้านเวลา [3] พบว่าประกอบด้วย 10 ปัจจัย คือ เงินทุนที่เพียงพอ ความสามารถของผู้ควบคุมงาน ปัจจัยจำนวนแรงงาน ช่างฝีมือที่เพียงพอ การจัดการและความพร้อมด้านวัสดุ ความพร้อมของแบบและรายการประกอบแบบ การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการก่อสร้าง นโยบายของผู้ประกอบการ การจัดการด้านข้อมูลและการประสานงาน การประชุมเพื่อควบคุมการก่อสร้าง ความเข้าใจวัตถุประสงค์ และรูปแบบการดำเนินการของโครงการ ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาปัจจัยสำเร็จตามลักษณะประเภทสัญญาระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการ (Project Delivery System; PDS) พบว่า สำหรับโครงการที่มีระบบการจัดทำและส่งมอบโครงการโดยวิธี ออกแบบ-ก่อสร้าง (Design and Build Projects) [6] ปัจจัยสำเร็จคือ การตระหนักถึงภาระหน้าที่และความรับผิดชอบของคณะทำงาน (Project Team Commitment) ความสามารถและศักยภาพของผู้รับเหมา (Contractor's Competencies) การประเมินความเสี่ยงและผลที่คาดว่าจะได้รับ (Risk and Liability Assessment) ความสามารถและศักยภาพของลูกค้า (Client's Competencies) ความต้องการของผู้ใช้งานสิ่งปลูกสร้าง (End-Users' Needs) และข้อจำกัดที่ถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานสิ่งปลูกสร้าง (Constraints Imposed by End-Users) ในส่วนของการจัดซื้อจัดจ้างโดยวิธีการร่วมลงทุนระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนในกิจการของรัฐพบว่า ปัจจัยสำเร็จประกอบด้วย ความเอื้ออำนวยของสภาพเศรษฐกิจ (Economic Viability) การจัดสรรความเสี่ยงอย่างเหมาะสม โดยใช้ข้อตกลงทางสัญญาที่น่าเชื่อถือ (Appropriate Risk Allocation via Reliable Contractual Arrangement), ข้อตกลงและเงื่อนไขทางการเงินของโครงการมีความเป็นไปได้ (Sound Financial Package) สภาพแวดล้อมการลงทุนเหมาะสม (Favorable Investment Environment) และกิจการค้าร่วมน่าเชื่อถือและมีความเชี่ยวชาญทางด้านเทคนิค (Reliable Concessionaire Consortium with Strong Technical Strength) [7]

สำหรับการศึกษาปัจจัยสำเร็จตามลักษณะขนาดของโครงการโดยเฉพาะโครงการขนาดใหญ่ พบว่า มี 4 องค์ประกอบที่สำคัญคือ ความเข้าใจ (Comprehension) ความสามารถ (Competence) ความตระหนักถึงหน้าที่และความรับผิดชอบ (Commitment) และการสื่อสาร (Communication) [9]

นอกจากนี้แม้ว่าจะมีการศึกษาปัจจัยสำเร็จที่ส่งผลต่อโครงการก่อสร้างตามลักษณะประเภทสัญญาวิธีการชำระเงิน (Payment Method) แต่ก็เป็นสัญญาประเภทรับรองวงเงินก่อสร้างสูงสุด (Guaranteed Maximum Price) และกำหนดเป้าหมายค่าใช้จ่าย (Target Cost) ซึ่งปัจจัยสำเร็จในการบริหารโครงการตามสัญญาลักษณะนี้ประกอบด้วย การกระจายความเสี่ยงและต้นทุนที่เหมาะสม (Reasonable Share of Cost Saving and Risks) ความตั้งใจที่จะทำงานร่วมกัน (Partnering Spirit) การคัดเลือกคณะทำงานที่เหมาะสม (Right Selection of Project Team) การให้คำจำกัดความขอบเขตงานที่ชัดเจนของลูกค้า (Well Defined Scope of Work in Client's Brief) และผู้รับเหมามีส่วนเกี่ยวข้องตั้งแต่ต้นในการออกแบบ (Early Involvement of Contractor in Design) [10]

3.4 การบริหารโครงการ (Project Management)

การบริหารโครงการคือ การประยุกต์ใช้ความรู้ ทักษะ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำกิจกรรมโครงการเพื่อให้บรรลุ วัตถุประสงค์โครงการ โดยที่กิจกรรมโครงการดังกล่าวจะกระจายอยู่ตามวงจรชีวิตโครงการ (Project Life Cycle) ในแต่ละช่วงซึ่งประกอบด้วย ช่วงริเริ่ม (Initial) ช่วงระยะกลาง (Intermediate) และช่วงสุดท้าย (Final) [12] นอกจากนี้ ยังพบว่า วงจรชีวิตโครงการสามารถแบ่งได้หลายช่วงขึ้นอยู่กับ รายละเอียดในการพัฒนาโครงการ เช่น องค์กร เหลืองบุตรนาถ แบ่งช่วงวงจรชีวิตโครงการตามขั้นตอนในการดำเนินโครงการออกเป็น 4 ขั้นตอนประกอบด้วย ช่วงขั้นตอนแนวคิดและการริเริ่ม ช่วงขั้นตอนการออกแบบและพัฒนา

โครงการ ช่วงขั้นตอนดำเนินการหรือช่วงขั้นตอนก่อสร้าง และช่วงขั้นตอนการทดสอบและส่งมอบงาน [17] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามแทบไม่มีวงจรชีวิตของโครงการใดเลยที่เหมือนกันทุกขั้นตอน [12]

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้วงจรชีวิตโครงการของสถาบันการบริหารโครงการเป็นกรอบในการศึกษาปัจจัยสำเร็จต่างๆ ในการบริหารโครงการ เนื่องจากสถาบันดังกล่าวเป็นสถาบันที่ได้รับการยอมรับทั่วโลก

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 วิธีการศึกษา

เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการค้นหาว่าปัจจัยใดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการที่ทำสัญญาประเภทราคาต่อหน่วย การศึกษารายกรณี (Case Study) ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากเป็นการศึกษาเชิงคุณภาพที่เน้น การสำรวจและค้นหาทำให้ได้รับความรู้จากบุคคล กลุ่มบุคคล องค์กร สังคม และปรากฏการณ์เฉพาะที่สนใจ ทำให้สามารถพัฒนาแนวความคิดบนพื้นฐานของเหตุการณ์หรือกระบวนการที่เฉพาะเจาะจงได้อย่างละเอียดโดยการเชื่อมโยงส่วนประกอบย่อยเข้าด้วยกัน [18-19] ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้เพื่อให้ได้เข้าใจเชิงลึกต่อปัจจัยสำเร็จในการบริหารโครงการก่อสร้างประเภทสัญญาราคาต่อหน่วย

4.2 กลุ่มตัวอย่าง

ทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่สนใจเฉพาะปัจจัยสำเร็จ ของโครงการก่อสร้างที่ใช้สัญญาต่อหน่วย การคัดเลือกกลุ่ม ตัวอย่างโดยวิธีดังกล่าว จะทำให้ได้ข้อมูลจากบุคคลที่มีความรู้ และประสบการณ์เฉพาะด้านดังที่ต้องการ [20] โดยได้ทำการคัดเลือกจากผู้รับเหมาหรือเจ้าของโครงการที่ได้เคยทำการก่อสร้างโดยใช้สัญญาดังกล่าวมามากกว่า 5 ปี และมีพื้นที่ก่อสร้างโครงการและที่ตั้งบริษัทอยู่ในภาคใต้ เนื่องจากเข้าถึงสะดวกและมีงบประมาณและเวลาที่จำกัดในการทำวิจัย

ในการคัดเลือกลักษณะจะคัดเลือกผู้ประกอบการจำนวน 10 ราย เนื่องจากจำนวนกรณีศึกษา 4-10 กรณี เป็นจำนวนที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการวิเคราะห์ข้อมูลและนำผลที่ได้ไปพัฒนาเป็นทฤษฎี [21] ว่าด้วยเรื่องปัจจัย สำเร็จส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างที่ใช้ สัญญาต่อหน่วยอย่างไร

โดยเบื้องต้นได้ทำการตรวจสอบบัญชีรายชื่อผู้ประกอบการและองค์การที่ขอรับบริการวิชาการ หรือ ทำงานร่วมกับภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบัน แล้วทำการรวบรวมรายชื่อดังกล่าวในเบื้องต้น จากนั้นทำการสัมภาษณ์ทางโทรศัพท์เพื่อให้ทราบข้อมูล เฉพาะของผู้ประกอบการหรือ องค์กรแล้วทำการจด บันทึกเพื่อตรวจสอบ และคัดเลือกตามคุณลักษณะของ ผู้ประกอบการหรือองค์กรที่ได้วางไว้ จากนั้นได้มีการ โทรศัพท์เพื่อขอให้มีส่วนร่วมในวิจัย ซึ่งท้ายสุดมีผู้ประกอบการ และองค์กรตอบรับเข้าร่วมการวิจัย 10 หน่วยงาน

4.3 เครื่องมือและวิธีการเก็บข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลได้มีการจัดทำระเบียบการศึกษารายกรณี (Case Study Protocol) ขึ้นมา เพื่อให้การ เก็บข้อมูลแต่ละครั้งมีรูปแบบและวิธีการที่เหมือนกัน เช่น แบบรายการเพื่อกรอกข้อมูลกรณีศึกษา บทสัมภาษณ์กึ่ง โครงสร้าง (Semi-Structure Interview) รายชื่อเอกสาร ที่ต้องขอดู และรายชื่อเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ต้องนำไป สัมภาษณ์และเยี่ยมชมโครงการ ตลอดจนรูปแบบการ เขียนรายงานกรณีศึกษา เป็นต้น การจัดทำระเบียบการ ศึกษากรณีนี้นี้สำคัญมาก เนื่องจากจะทำให้ผลการ ศึกษาที่ได้มีความน่าเชื่อถือ (Reliability) ในกรณีที่ทำการ ศึกษากรณีสองกรณี (Multiple-Case Study) [19]

เครื่องมือและวิธีการที่ใช้ในการเก็บข้อมูลประกอบด้วย การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-Depth Interview) กับ ผู้จัดการ โครงการหรือวิศวกรโครงการ การสังเกตการณ์ (Observation) ขณะที่ทำการสัมภาษณ์และการไป

โครงการก่อสร้างเพื่อดูแลลักษณะงานและการทำงาน ตลอดจนการตรวจสอบเอกสาร (Document Examination) ที่สามารถเข้าถึงได้ ซึ่งการเก็บข้อมูลจากหลายๆ แหล่งจัดเป็นการตรวจสอบข้อมูลแบบตรวจสอบสามเส้า (Triangulation) ในแต่ละกรณีศึกษาเพื่อให้ได้รับข้อมูลที่น่าเชื่อถือ ซึ่งจะส่งผลให้ผลการศึกษาที่ได้รับมีความเที่ยงตรงตามเนื้อหา (Construct Validity) [19-20]

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้วิธี Categorical Aggregation [19] และการใช้แบบจำลองเชิงตรรกะ (Use Logic Models) โดยเริ่มจากการตรวจสอบหาข้อเท็จจริงตามลำดับเหตุการณ์ (Chronologies) [20] ที่เกิดขึ้นในวงจรโครงการแล้วลงรหัสข้อมูลทันที จากนั้นรวบรวมสิ่งที่ได้เพื่อระบุกลุ่มของปัจจัยจากการเปรียบเทียบว่ามีความเหมือนและแตกต่างในแต่ละรายการอย่างไร แล้วทำการตรวจสอบดูกลุ่มปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงเหตุผลซึ่งกันและกัน แล้วนำผลความสัมพันธ์เชิงเหตุผลนั้นมาพัฒนาเป็นรูปแบบจำลองของเหตุการณ์ที่เชื่อมโยงกัน การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการสร้างแบบจำลองเชิงตรรกะนี้เป็นไปเพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงภายใน (Internal Validity) ของผลการวิจัยที่ได้ [19-20]

5. ผลการศึกษา

จากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับบุคลากรภายในหน่วยงานทั้ง 10 หน่วยงาน รวมไปถึงการสังเกตการณ์และสำรวจพื้นที่โครงการ ตลอดจนขอศึกษาเอกสารการคำนวณปริมาณงาน เพื่อเบิกจ่ายเงินตามสัญญาพบว่า ข้อมูลพื้นฐานของแต่ละหน่วยงานเป็นดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยผู้รับเหมาก่อสร้าง 8 องค์กร เป็นบริษัทที่ปรึกษา 1 องค์กร และเป็นหน่วยงานรัฐ 1 องค์กร ทุกหน่วยงานก่อตั้งมามากกว่า 5 ปี มูลค่างานสูงสุดที่เคยทำขึ้นอยู่กับประเภทงานก่อสร้าง โดยพบว่าประเภทงานที่นิยมใช้สัญญาประเภทราคาต่อหน่วยส่วนใหญ่ คืองานที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างและปรับปรุงถนน งานสะพาน

และงานสถาปัตยกรรมอาคาร เช่น งานก่ออิฐ ฉาบปูน ปูกระเบื้อง ทำฝ้าเพดาน และทาสี เป็นต้น ในกรณีที่เป็นงานถนนและสะพาน สัญญาประเภทราคาต่อหน่วยจะใช้ระหว่างหน่วยงานที่เป็นเจ้าของโครงการและผู้รับเหมาหลัก ในขณะที่งานก่อสร้างประเภทอาคาร สัญญาประเภทราคาต่อหน่วยจะใช้ระหว่างหน่วยงานที่เป็นผู้รับเหมาหลักและผู้รับเหมาช่วง

นอกจากนี้พบว่า ปัจจัยสำเร็จและเกณฑ์วัดความสำเร็จ โครงการของแต่ละหน่วยงานเป็นไปดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบความเหมือน และความแตกต่างของปัจจัยสำคัญที่เกิดขึ้น ปัจจัยเรื่องประสบการณ์บริหารโครงการของเจ้าของโครงการ การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ เงินทุนหมุนเวียนของเจ้าของโครงการ และสภาพเศรษฐกิจที่เอื้ออำนวยเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการในช่วงของการริเริ่มโครงการที่มีการระดมมากที่สุด ในช่วงระยะกลาง วิธีการประมูลที่โปร่งใส ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบ แบบก่อสร้างที่ง่ายและสะดวกต่อการนำไปใช้ในการก่อสร้าง สภาพอากาศ ทักษะคนงาน ความสามารถในการบริหารจัดการคนและเครื่องจักร ความสามารถในการดูแลเรื่องระบบความปลอดภัยในโครงการ และความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงาน เป็นปัจจัยสำเร็จที่สำคัญ ในระยะสุดท้ายของวงจรชีวิตโครงการ การรับประกันและวางเงินค้ำประกันผลงาน การประเมินผลการดำเนินการและการทุจริตในการส่งมอบงาน เป็นปัจจัยสำคัญที่ได้รับการกล่าวถึงมากที่สุดตามลำดับ

สำหรับเกณฑ์ความสำเร็จที่ใช้วัดพบว่า มี 3 กลุ่มประกอบด้วย เกณฑ์ประสิทธิภาพ เกณฑ์ประสิทธิผล และ เกณฑ์ความพึงพอใจ โดยเกณฑ์ประสิทธิภาพจะถูกนำมาใช้ใน การพิจารณาช่วงระยะกลางของวงจรชีวิตโครงการ โดยใช้วัด ความก้าวหน้าของงานโครงการตลอดระยะเวลาที่ทำงานว่า โครงการได้ใช้ทรัพยากรภายในงบ

ประมาณและระยะเวลา ตามที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ภายใต้คุณภาพที่ยอมรับได้ ในขณะที่เกณฑ์ประสิทธิผลทางด้านการดำเนินงานเสร็จภายในระยะเวลา สัญญาและงบประมาณคุณภาพตรงตามวัตถุประสงค์และรายการประกอบแบบและเกณฑ์ความพึงพอใจทางด้านความพึงพอใจของเจ้าของโครงการและผู้ใช้ง้างปลูกสร้างจะถูกนำไปใช้วัดความสำเร็จของโครงการเมื่อได้ทำการแล้วเสร็จ

จากปัจจัยที่ได้มาดั่งตารางที่ 2 และ 3 เมื่อนำปัจจัยเหล่านั้นมาจัดกลุ่มเพื่อความสัมพันธ์ และสร้างแบบจำลองเชิงตรรกะของปัจจัยสำเร็จในโครงการก่อสร้างที่ใช้สัญญาประเภทราคาต่อหน่วยได้ดั่งภาพที่ 1 โดยในช่วงริเริ่มโครงการ ปัจจัยสำเร็จแรกคือ การมีประสบการณ์ลงทุนหรือบริหารโครงการของเจ้าโครงการจะนำไปสู่

ปัจจัยสำเร็จแฝง (แสดงปัจจัยแฝงโดยใช้เส้นประ (Dashed Line) เป็นกรอบ) ความละเอียดรอบคอบในการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการที่เป็นปัจจัยสำเร็จปัจจัยต่อมา ซึ่งในการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการนั้นจะต้องมีการวิเคราะห์ตลาดและลูกค้าเป้าหมายโครงการ การวิเคราะห์สภาพเศรษฐกิจว่าเอื้ออำนวยหรือไม่ การจำแนกปัจจัยเสี่ยงและการจัดสรรความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นและการวิเคราะห์ทางการเงินเพื่อพิจารณาหาค่าใช้จ่ายในการพัฒนาโครงการและการหาแหล่งที่มาของเงินทุนเพื่อให้ช่วงการก่อสร้างโครงการจะได้มีเงินทุนหมุนเวียนจนโครงการเสร็จสิ้น จากนั้นจึงพิจารณาเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมา

ตารางที่ 1 ข้อมูลลักษณะเฉพาะของหน่วยงาน

คุณลักษณะ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ประเภทธุรกิจ	รับเหมา ก่อสร้าง และขนส่ง	รับเหมาก่อสร้าง ถนนและจำหน่าย หิน	รับเหมาก่อสร้าง ถนน	ออกแบบและ เป็นที่ปรึกษา ควบคุมงาน ก่อสร้าง	รับเหมาก่อสร้าง งานอาคาร	หน่วยงานรัฐ	รับเหมาก่อสร้าง ถนน	รับเหมาก่อสร้าง ออกแบบ จัดทำ และติดตั้งงาน ระบบวิศวกรรม	รับเหมาก่อสร้าง งานอาคาร	รับเหมาก่อสร้าง ถนนและสะพาน
ประสบการณ์	57	18	8	18	6	-	38	29	19	29
มูลค่าสูงสุด (ล้านบาท)	200	400	5	500	500	-	600	4,000	20	50
สถานะ	ผู้รับเหมาหลัก	ผู้รับเหมาหลัก	ผู้รับเหมาหลัก	ที่ปรึกษา	ผู้รับเหมาหลัก	เจ้าของโครงการ	ผู้รับเหมาหลัก	ผู้รับเหมาหลัก	ผู้รับเหมาหลัก	ผู้รับเหมาหลัก
คู่สัญญา	ผู้รับเหมาช่วง	หน่วยงานรัฐ	หน่วยงานรัฐ	-	ผู้รับเหมาช่วง	ผู้รับเหมาหลัก	หน่วยงานรัฐ	หน่วยงานเอกชน	หน่วยงานเอกชน	หน่วยงานรัฐ
ประเภทงาน	งานสถาปัตย์ ๓ เช่น ก่ออิฐ ฉาบ ปูน ปูกระเบื้อง และทาสีฝ้า เพดาน	ถนนและระบบ รางระบายน้ำ	ตีเส้นจราจร ปรับปรุงเส้น จราจร และ ติดตั้งป้าย	ศึกษา -	งานสถาปัตย์ ๓ เช่น ปูกระเบื้อง และทาสี เป็น ต้น	งานก่อสร้าง ถนน 4 ช่อง จราจร ตามแบบ มาตรฐานกรม ทางหลวง	ก่อสร้างถนน ปรับปรุงถนน และซ่อมแซม ถนน	ก่อสร้างอาคาร ขนาดใหญ่ที่ ต้องใช้ความ รวดเร็วในการ ก่อสร้าง	ก่อสร้างโกดัง และงานอาคาร ขนาดเล็กทั่วไป	ก่อสร้างและ ปรับปรุงงานถนน และสะพาน

ตารางที่ 2 ปัจจัยสำเร็จ (Critical Success Factors) ของหน่วยงาน

วงจรโครงการ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	1. ประสิทธิภาพการบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของ โครงการ 2. เงินทุนที่เพียงพอของเจ้าของ โครงการ 3. สภาพเศรษฐกิจที่เอื้ออำนวย 4. การกำหนดกลุ่มลูกค้าเป้าหมายของโครงการ	1. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 2. ความละเอียดรอบคอบของ เจ้าของโครงการ 3. สภาพเศรษฐกิจที่เอื้ออำนวย 4. เงินทุนที่เพียงพอของเจ้าของ โครงการ	1. ทัศนคติของ เจ้าของโครงการ ที่มีต่อความเสี่ยง 2. ประสิทธิภาพ การเลือกลงทุน ของ เจ้าของโครงการ 3. การศึกษาความ เป็นไปได้ของ โครงการ 4. การทุจริตเพื่อให้ ได้งานในการประมูล ของผู้รับเหมา 5. สภาพเศรษฐกิจ ที่เอื้ออำนวย	1. ประสิทธิภาพ การเลือกลงทุน ของเจ้าของ โครงการ 2. การวิเคราะห์ การตลาดของ เจ้าของโครงการ 3. การวิเคราะห์ กลุ่มลูกค้าโครงการ การของเจ้าของ โครงการ 4. ขนดองคกร ของเจ้าของ โครงการ 5. ทัศนคติของ เจ้าของโครงการ ที่มีต่อความเสี่ยง 6. ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของโครงการ 7. เงินทุนที่เพียงพอของเจ้าของ โครงการ	1. การเลือกกลุ่ม ลูกค้าเป้าหมาย ของเจ้าของ โครงการ 2. เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมา 3. เงินทุนที่เพียงพอของเจ้าของ โครงการ 4. ทัศนคติของ เจ้าของโครงการ ที่มีต่อความเสี่ยง 5. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 6. ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของโครงการ 7. การกำหนด ขอบเขตของ โครงการให้ ชัดเจน	1. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ - เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมา โครงการ - เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมา - ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของ โครงการ 2. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 3. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 4. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 5. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 6. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 7. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ	1. ความรู้เรื่อง โครงสร้างของ สิ่งปลูกสร้างของ เจ้าของโครงการ 2. ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของ โครงการ 3. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 4. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 5. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 6. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 7. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ	1. เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมา 2. สภาพเศรษฐกิจที่เอื้ออำนวย 3. เงินทุนที่เพียงพอของเจ้าของ โครงการ 4. ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของ โครงการ 5. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 6. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 7. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ	1. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 2. เงินทุนที่เพียงพอของเจ้าของ โครงการ 3. การจัดหา และจัดสรรความ เสี่ยงของเจ้าของ โครงการ 4. ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของ โครงการ 5. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 6. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 7. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ	1. การวางแผน การทำงานให้ เหมาะสมกับ โครงการของ เจ้าของโครงการ 2. ความละเอียดรอบคอบของ เจ้าของ โครงการ 3. ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของ โครงการ 4. สภาพเศรษฐกิจที่เอื้ออำนวย 5. การศึกษา ความเป็นไปได้ ของโครงการ 6. ประสิทธิภาพ การบริหารงาน ก่อสร้างของ เจ้าของ โครงการ

ช่วงริเริ่ม

ตารางที่ 2 ปัจจัยสำเร็จ (Critical Success Factors) ของหน่วยงาน (ต่อ)

วงจรโครงการ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	1. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 2. แบบก่อสร้างชัดเจนและง่ายต่อการนำไปใช้ในการก่อสร้าง 3. ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบ 4. ประสิทธิภาพการบริหารงาน 5. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา	1. ความเข้าใจในแบบก่อสร้างของเจ้าของโครงการ 2. ความสามารถในการออกแบบและวางแผนงานของเจ้าของโครงการ 3. การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าของผู้รับเหมาในการดำเนินงาน 4. การวางแผนการวัดผลและติดตามโครงการ 5. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 6. การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าของผู้รับเหมาในการดำเนินงาน 7. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา	1. ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบ 2. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 3. การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าของผู้รับเหมาในการดำเนินงาน 4. การวางแผนการวัดผลและติดตามโครงการ 5. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 6. การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าของผู้รับเหมาในการดำเนินงาน 7. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา	1. ผู้รับเหมาไว้วางใจได้ 2. ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบ 3. การออกแบบให้ตรงความต้องการของเจ้าของโครงการ 4. ประสิทธิภาพของการประเมินผลที่โปร่งใส 5. การบริหารงานโครงการของผู้รับเหมา 6. การบริหารโครงการของผู้รับเหมา 7. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา	1. การออกแบบให้ตรงความต้องการของเจ้าของโครงการ 2. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบ 3. การวางแผนการทำงาน 4. การออกแบบโครงการ 5. การกระจายงานในการออกแบบของผู้รับเหมา 6. ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบ 7. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 8. การบริหารโครงการของผู้รับเหมา	1. ความพร้อมของทีมงาน 2. การเลือกประเภทสัญญาที่เหมาะสมกับงานโครงการ 3. ประสิทธิภาพของทีมงาน 4. การออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการ 5. ผู้รับเหมาเข้าใจแบบก่อสร้าง 6. ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบ 7. การกระจายงานในการออกแบบของผู้รับเหมา 8. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา	1. ประสิทธิภาพของทีมงาน 2. การออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการ 3. การออกแบบให้ตรงความต้องการของเจ้าของโครงการ 4. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 5. การตรวจสอบงานของทีมงาน 6. ทักษะการก่อสร้าง 7. ประสิทธิภาพของทีมงาน 8. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา	1. การออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการ 2. การออกแบบให้ตรงความต้องการของเจ้าของโครงการ 3. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 4. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนโครงการ 5. การบริหารงานโครงการ 6. การกระจายงานในการออกแบบของผู้รับเหมา 7. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา	1. ประสิทธิภาพการบริหารโครงการ 2. วิธีการประเมินผลที่โปร่งใส 3. การออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการ 4. ทักษะการเสริมสร้างแรงจูงใจหรือรางวัลในการทำงาน 5. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนของทีมงาน 6. ความสามารถในการบริหารงานโครงการ 7. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา 8. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา	1. การออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการ 2. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนโครงการ 3. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา 4. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา 5. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา 6. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา 7. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา 8. การมีอยู่ของเทคโนโลยีที่ทันสมัยในการดำเนินงานของผู้รับเหมา

ตารางที่ 2 ปัจจัยสำเร็จ (Critical Success Factors) ของหน่วยงาน (ต่อ)

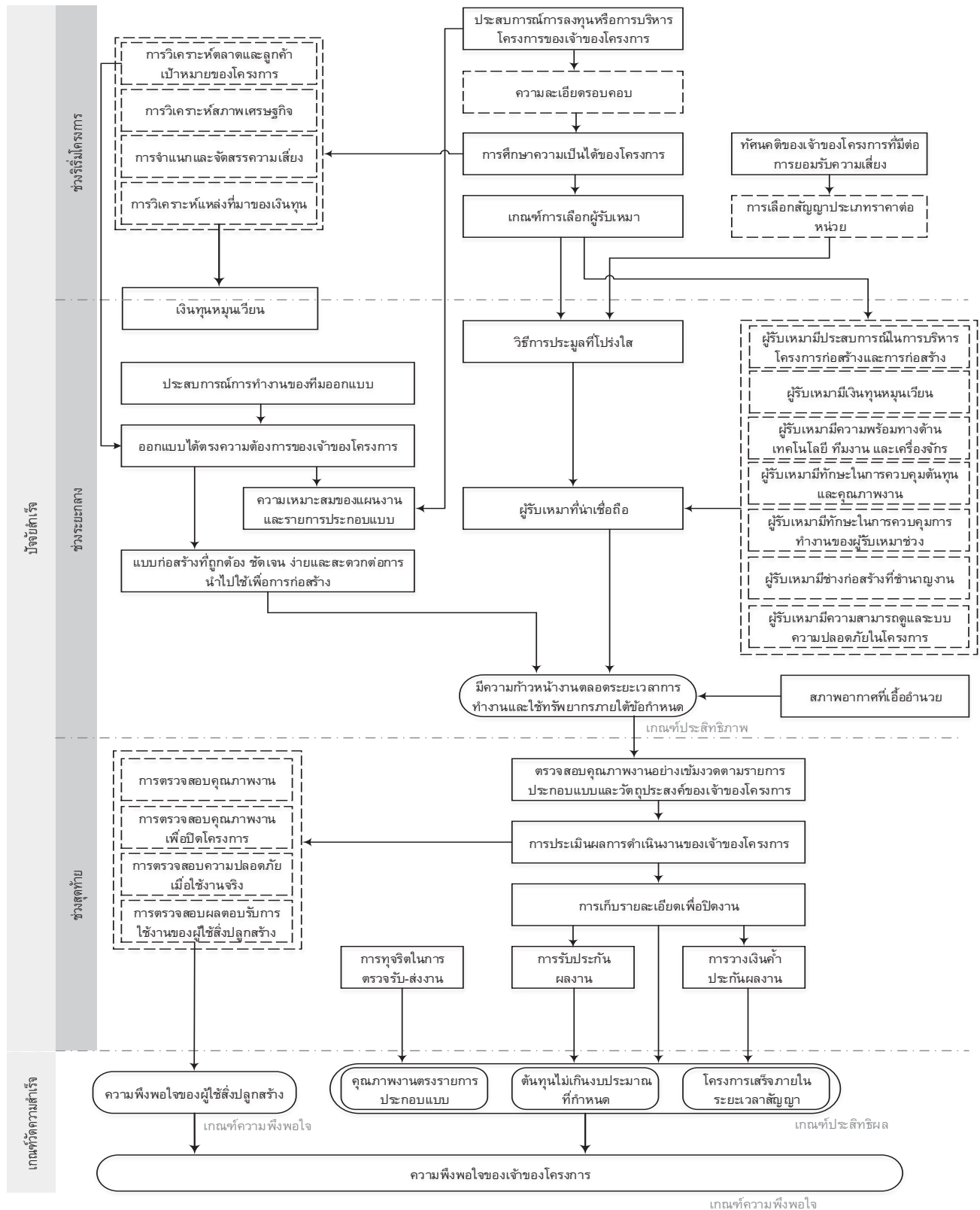
วงจรโครงการ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	9. ทักษะการทำงานของคนงาน 10. ความพร้อมของเครื่องจักรในการทำงาน 10. สภาพอากาศที่เอื้ออำนวย 11. ผู้ตรวจรับความก้าวหน้างาน	8. การบริหารจัดการ การทีมบุคลากร โครงการและเครื่องจักรของผู้รับเหมา 9. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา 10. ประสิทธิภาพในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา 11. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา 12. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา 13. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา 14. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพงานของผู้รับเหมา	9. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนของผู้รับเหมา 10. การทุจริตในการดำเนินงาน 11. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนของผู้รับเหมา 12. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนของผู้รับเหมา 13. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนของผู้รับเหมา 14. ความสามารถในการควบคุมต้นทุนของผู้รับเหมา	8. วิธีการจัดจ้าง 9. การบริหารเงินลงทุน 10. การบริหารเงินลงทุน 11. การบริหารเงินลงทุน 12. การบริหารเงินลงทุน 13. การบริหารเงินลงทุน 14. การบริหารเงินลงทุน	9. การบริหารจัดการ บุคลากร โครงการ ผู้รับเหมา 10. การบริหารเงินลงทุน 11. การบริหารเงินลงทุน 12. การบริหารเงินลงทุน 13. การบริหารเงินลงทุน 14. การบริหารเงินลงทุน	8. ระบบความปลอดภัย ประสิทธิภาพ ของเครื่องจักร ผู้รับเหมา 9. ความพร้อมและความรวดเร็วของข้อมูลในการทำงานของผู้รับเหมา 10. การบริหารโครงการ 11. การบริหารโครงการ 12. การบริหารโครงการ 13. การบริหารโครงการ 14. การบริหารโครงการ	9. ทักษะการบริหารโครงการ ของผู้จัดการโครงการ 10. ระบบความปลอดภัย ของผู้รับเหมา 11. ความพร้อมของข้อมูล ในการทำงานของผู้รับเหมา 12. การบริหารโครงการ 13. การบริหารโครงการ 14. การบริหารโครงการ	8. ความมุ่งมั่นในการทำงาน ของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง 9. ทักษะการทำงานของคนงาน 10. การติดตามความก้าวหน้า ในงานก่อสร้าง 11. สภาพอากาศที่เอื้ออำนวย 12. ความพร้อมของข้อมูล ในการทำงานของผู้รับเหมา 13. ความพร้อมของข้อมูล ในการทำงานของผู้รับเหมา 14. ความพร้อมของข้อมูล ในการทำงานของผู้รับเหมา	9. ทักษะการทำงาน 10. การบริหารโครงการ 11. การบริหารโครงการ 12. การบริหารโครงการ 13. การบริหารโครงการ 14. การบริหารโครงการ	7. ประสิทธิภาพการบริหาร ก่อสร้างของผู้รับเหมา 8. การบริหารโครงการ 9. การบริหารโครงการ 10. การบริหารโครงการ 11. การบริหารโครงการ 12. การบริหารโครงการ 13. การบริหารโครงการ 14. การบริหารโครงการ
ช่วงระยะกลาง										

ตารางที่ 2 ปัจจัยสำเร็จ (Critical Success Factors) ของหน่วยงาน (ต่อ)

วงจรโครงการ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ช่วงระยะ กลาง					14. ความ สามารถในการ ควบคุมต้นทุน และคุณภาพงาน ของผู้รับเหมา 15. เงินทุนหมุน เวียนของ ผู้รับเหมา	14.การบริหาร เงินทุนหมุน เวียนของ ผู้รับเหมา				
ช่วงสุดท้าย	1. การยอมรับค่า ดัชนีของผู้ใช้งาน สิ่งปลูกสร้างเพื่อ นำมาแก้ไข 2. การตรวจสอบ คุณภาพงาน อย่างเข้มงวดตาม รายการประกอบ แบบและ วัตถุประสงค์ โครงการ 3. ผู้รับเหมา ประกันผลงาน	1. การทุจริตใน การตรวจรับงาน 2. ผู้รับเหมา ประกันผลงาน 3. การตรวจสอบ คุณภาพงานเพื่อ ปิดโครงการ	1. ผู้รับเหมา ประกันผลงาน 2. การตรวจสอบ คุณภาพงาน	1. การทดสอบ การใช้งานจริง ของสิ่งปลูกสร้าง 2. การตรวจสอบ ความปลอดภัย ของสิ่งปลูกสร้าง 3. การรับประกัน ผลงานของผู้รับ เหมา 4. การทุจริตใน การตรวจรับงาน	1. เงินค่าประกัน ผลงาน 2. การเก็บราย ละเอียดงานเพื่อ ปิดโครงการ 3. การประกัน ผลงาน 4. การ ประเมินผล ดำเนินงานของ โครงการ	1. การ ตรวจสอบ ผลงานในการ ส่งงานครั้ง สุดท้ายของ ผู้รับเหมา 2. การ รับประกัน ผลงานของผู้รับ เหมา 3. การตอบรับ โครงการของผู้ ใช้งาน	1. เงินค่าประกัน ผลงาน 2. ผู้รับเหมา ประกันผลงาน 3. การ ประเมินผล ดำเนินงานของ โครงการ 4. การทำงาน ร่วมกันอย่างมี ประสิทธิภาพทุก ภาคส่วน	1. การ ประเมินผล ดำเนินงานของ โครงการ 2. เงินค่าประกัน ผลงาน 3. การตอบรับ โครงการของผู้ ใช้งาน	1. การทุจริตใน การตรวจรับ งาน 2. การ ประเมินผล ดำเนินงานของ โครงการ 3. เงินค่าประกัน ผลงาน	1. การ ประเมินผล ดำเนินงานของ โครงการ 2. เงินค่าประกัน ผลงาน 3. การเก็บราย ละเอียดงาน เพื่อปิดโครงการ 4. การทุจริตใน การตรวจรับ งาน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเกณฑ์วัดความสำเร็จ (Success Criteria) โครงการของหน่วยงาน

ปัจจัยสำเร็จ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
เกณฑ์ความพึงพอใจ	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ สิ่งปลูกสร้าง	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ สิ่งปลูกสร้าง	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ โครงการที่มีต่อ คุณภาพงาน	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ โครงการที่มีต่อ คุณภาพงาน	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ โครงการที่มีต่อ คุณภาพงาน	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ โครงการที่มีต่อ คุณภาพงาน	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ โครงการที่มีต่อ คุณภาพงาน	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ โครงการที่มีต่อ คุณภาพงาน	1. ความพึงพอใจของผู้ใช้ โครงการที่มีต่อ คุณภาพงาน	
เกณฑ์ประสิทธิภาพ	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด	1. บริหาร ทรัพยากรและ เวลาได้ภายใน ข้อกำหนด



ภาพที่ 1 แบบจำลองเชิงตรรกะของปัจจัยสำเร็จในโครงการก่อสร้างที่ใช้สัญญาประเภทราคาต่อหน่วย

สำหรับการเลือกใช้สัญญาประเภทราคาต่อหน่วย นั้นเกิดจากเจ้าของโครงการมีทัศนคติในเรื่องการยอมรับความเสี่ยงได้ระดับหนึ่งจึงใช้สัญญาประเภทนี้ โดยยอมให้เกิดค่าใช้จ่ายจริงตามเนื้องานที่เพิ่มขึ้น/ลดลง และเพื่อให้เกิดความยุติธรรมในการจัดสรรความเสี่ยงที่เกิดขึ้น

ในช่วงระยะกลางของวงจรชีวิตโครงการปัจจัย สำคัญที่สำคัญคือ วิธีการประมูลที่โปร่งใสเพราะจะทำให้ได้ผู้รับเหมา โครงการที่น่าเชื่อถือเข้ามาดำเนินการก่อสร้าง ซึ่งเกิดจากเกณฑ์การคัดเลือกที่ประกอบด้วย การมีประสบการณ์ในการก่อสร้างและบริหารงานก่อสร้าง มีเงินทุนหมุนเวียน มีความพร้อมทางด้านเทคโนโลยี ทีมงานและเครื่องจักร มีทักษะในการควบคุมต้นทุนและ คุณภาพงาน มีความสามารถในการควบคุมการทำงาน ของผู้รับเหมาช่วง มีช่างก่อสร้างที่ชำนาญงานและมีระบบ ความปลอดภัยในงานก่อสร้าง

นอกจากนี้ยังพบว่าประสบการณ์การทำงานของทีม ออกแบบจะส่งผลให้ได้แบบก่อสร้างที่ตรงความต้องการ ของเจ้าของโครงการที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ ตลาดและลูกค้า เป้าหมายของโครงการ และได้แบบ ก่อสร้างที่ถูกต้อง ชัดเจน ง่าย และสะดวกต่อการนำไปใช้เพื่อการก่อสร้าง ตลอดจนแผนงานและรายการ ประกอบแบบที่เหมาะสมเมื่อได้ประสานงานกับเจ้าของ โครงการ ผลของแบบก่อสร้างที่เหมาะสมและผู้รับเหมา ที่ไว้วางใจได้จะทำให้โครงการมีความก้าวหน้าตลอดระยะเวลาการทำงานและใช้ทรัพยากรภายใต้ข้อกำหนดของ โครงการ ทำให้โครงการประสบความสำเร็จตามเกณฑ์ ประสิทธิภาพ

สภาพอากาศส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการเช่นกัน แม้ว่าสภาพอากาศที่เอื้ออำนวยจะไม่ได้สนับสนุนให้ เกิดความสำเร็จของโครงการ แต่สภาพอากาศที่เลวร้าย สามารถส่งผลต่อความล้มเหลวของโครงการได้ ดังนั้น สภาพอากาศจึงส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการเช่นกัน ในช่วงสุดท้ายของวงจรชีวิตโครงการ การตรวจสอบ คุณภาพงานอย่างเข้มงวดตามรายการประกอบแบบและ

วัตถุประสงค์ของเจ้าของโครงการ การเก็บรายละเอียด งาน การรับประกันผลงาน การวางเงินค้ำประกันผลงานของผู้รับเหมา และการทุจริตเพื่อให้สามารถส่งมอบ งานได้เป็นปัจจัยสำเร็จที่สำคัญต่อโครงการ ในขณะที่ การประเมินผลการดำเนินงานของเจ้าของโครงการผ่าน กระบวนการต่างๆ เช่น การตรวจสอบคุณภาพ การตรวจสอบ ความปลอดภัยเมื่อใช้งานจริง และการตรวจสอบ ผลตอบรับการใช้งานสิ่งปลูกสร้างของผู้ใช้งานเป็นปัจจัย สำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการ ซึ่งจะนำไปสู่ ความสำเร็จตามเกณฑ์ความพึงพอใจของผู้ใช้งานและ เจ้าของโครงการ และความสำเร็จตามเกณฑ์ประสิทธิภาพ ที่สิ่งปลูกสร้างได้สร้างเสร็จตรงตามวัตถุประสงค์ของ โครงการและรายการประกอบแบบภายใต้ระยะเวลา สัญญาและงบประมาณที่กำหนด

6. สรุปและอภิปรายผล

จากกรณีศึกษาทั้ง 10 กรณีพบว่า ในช่วงระยะเริ่ม โครงการประสบการณ์ในการบริหารโครงการของเจ้าของ โครงการเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด โดยมี 8 กรณีศึกษาให้ ความคิดเห็นที่ตรงกันในเรื่องนี้ กล่าวคือ “ประสบการณ์ ในการบริหารโครงการของเจ้าของโครงการ” จะทำให้ การวางแผนดำเนินงานโครงการเป็นไปอย่างมีขั้นตอนที่ เหมาะสม โดยรู้ว่าจะต้องทำกิจกรรมงานใดบ้างและช่วง ระยะเวลาไหน แต่ละกิจกรรมงานต้องใช้เงินทุนเท่าไร วัสดุ อะไรที่มีในท้องถิ่น เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปอย่าง ต่อเนื่อง ผลที่ตามมาคือ ทำให้เกิดกิจกรรมการศึกษาความ เป็นไปได้ของโครงการที่มีการวิเคราะห์ความต้องการของ ลูกค้าหรือผู้ใช้สิ่งปลูกสร้าง ซึ่งทำให้ได้สิ่งปลูกสร้างที่เป็น ที่ต้องการที่แท้จริงของตลาดหรือผู้ใช้งาน มีการวิเคราะห์ สภาพเศรษฐกิจว่าเหมาะกับการลงทุนหรือไม่ มีการ วิเคราะห์การเงินว่ากระแสเงินสดเข้าที่ได้จากโครงการ มีลักษณะอย่างไร ต้นทุนทางการเงินและแหล่งที่มาของ เงินทุนใดที่เหมาะสมกับกระแสเงินสดเข้าของโครงการ ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลวิจัยที่ผ่านมา

[5, 8-9] โดย Sanvido และคณะ [5] ได้อธิบายผลของการขาดหายไปของปัจจัยประสพการณ์ในการบริหารโครงการของเจ้าของโครงการว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขอบเขตงานโครงการบ่อยครั้งและโครงการล่าช้า

ในช่วงระยะกลางของวงจรชีวิตโครงการ 9 ใน 10 กรณีศึกษามีความเห็นที่ “วิธีการประมูลที่โปร่งใส” เพื่อให้ได้ผู้รับเหมาที่น่าเชื่อถือและไว้วางใจได้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ ในขณะที่ปัจจัยสำเร็จอื่นๆ เช่น ประสพการณ์การบริหารโครงการของผู้รับเหมา ระบบรักษาความปลอดภัยของโครงการที่มีประสิทธิภาพ ทักษะคนงาน การมีเงินทุนหมุนเวียนที่เพียงพอ ความพร้อมของเทคโนโลยี ทีมงานและเครื่องจักรและความสามารถในการควบคุมต้นทุนและคุณภาพให้ได้ตามต้องการ เป็นผลที่ตามมาจากการบวนการสรรหาผู้รับเหมาที่มีคุณภาพ ซึ่งวิธีการประมูลที่โปร่งใสเพื่อให้ได้ผู้รับเหมาที่น่าเชื่อถือและไว้วางใจได้ถือปัจจัยสำเร็จที่สำคัญที่ได้กล่าวถึงในงานวิจัยของ Saqib และคณะ [8] และ Toor and Ogunlana [9] เช่นกัน แม้ว่าการงานของพวกเขาจะเน้นไปที่โครงการขนาดใหญ่ ในขณะที่ผลการศึกษานี้พบว่าผู้ให้สัมภาษณ์ให้ความสำคัญกับปัจจัยนี้สำหรับทุกขนาดของโครงการ

นอกจากนี้ยังพบว่า ทีมผู้ออกแบบและเจ้าของโครงการมีผลต่อปัจจัยสำเร็จการพัฒนา “ความเหมาะสมของแผนงาน และรายการประกอบแบบ” และ “แบบก่อสร้างที่ชัดเจน ถูกต้อง ง่าย และสะดวกต่อการนำไปใช้งานก่อสร้าง” เนื่องจากผู้รับเหมาสามารถนำแบบก่อสร้างไปใช้งานได้ทันที และสามารถนำเทคนิคงานก่อสร้างที่ทันสมัยและมีผลิตภาพ (Productivity) สูงมาใช้งานได้เนื่องจากงานมีลักษณะเหมือนเดิม และทำซ้ำๆ กัน เช่น งานถนน งานดิน งาน คอนกรีต และงานสถาปัตยกรรม เป็นต้น ดังนั้นถ้ามีความผิดพลาดของแบบก่อสร้าง จะส่งผลให้ปริมาณงานผิดพลาดตามแบบก่อสร้างสูงตามไปด้วย เนื่องจากงานลักษณะที่เหมือนกันหรือทำซ้ำๆ กันนี้สามารถทำได้คราวละมากๆ หรือในกรณีที่ลักษณะ

งานก่อสร้างเป็นงานที่ยากและสลับซับซ้อนประกอบกับวิธีการก่อสร้างที่ระบุไม่ชัดเจน มีความเป็นไปได้ว่างานเสร็จไม่ทันตามระยะเวลาที่กำหนด โดยที่ปัจจัยสำเร็จในเรื่องความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบและแบบก่อสร้างที่ชัดเจน ถูกต้อง ง่าย และสะดวกต่อการนำไปใช้งานก่อสร้าง ได้ถูกระบุเช่นกันในงานของ Saqib และคณะ [8]

ที่น่าประหลาดใจคือ “สภาพอากาศที่เอื้ออำนวย” ไม่เคยถูกระบุในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเลยว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลสำเร็จต่อโครงการ ในขณะที่ผลวิจัยนี้พบว่า 6 ใน 10 กรณีศึกษาระบุว่า ปัจจัยนี้ส่งผลสำเร็จต่อโครงการ ทำให้สรุปได้ว่าการเกิดขึ้นของสภาพอากาศที่เลวร้าย เช่น สภาวะฝนตกชุก จนทำให้เกิดสภาวะน้ำป่าไหลหลาก หรือน้ำท่วมขัง เป็นต้น ส่งผลต่อความล้มเหลวของการดำเนินงานโครงการก่อสร้างอย่างแน่นอน เพราะทำให้โครงการล่าช้า แต่ในขณะที่การมีอยู่ของปัจจัย “สภาพอากาศที่เอื้ออำนวย” ต้องมีปัจจัยสำเร็จอื่นๆ ประกอบเพื่อส่งผลให้โครงการประสบผลสำเร็จ

นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงสุดท้ายของวงจรชีวิตโครงการ ปัจจัยสำเร็จที่สำคัญที่สุดคือ “การรับประกันผลงาน” และ “เงินค้ำประกันผลงาน” ของผู้รับเหมา และ “การประเมินผลการดำเนินการของเจ้าของโครงการ” แม้ว่าปัจจัยทั้งสามนี้ไม่เคยถูกระบุในปัจจัยสำเร็จในวรรณกรรมที่ศึกษา แต่จากการสัมภาษณ์พบว่า “การรับประกันผลงานและเงินค้ำประกันผลงาน” จะส่งผลให้เจ้าของโครงการเกิดความเชื่อมั่นว่า ในกรณีที่หลังจากผู้รับเหมาส่งมอบงานแล้วและพบข้อบกพร่องของสิ่งปลูกสร้างภายหลัง ผู้รับเหมาจะเข้ามาดำเนินการแก้ไข ส่งผลให้การส่งงานของผู้รับเหมาสำเร็จและเจ้าของโครงการยอมรับโครงการ แต่อย่างไรก็ตาม เจ้าของโครงการมีปัจจัย “ประเมินผลการดำเนินการ” เป็นตัวตรวจสอบคุณภาพงานของผู้รับเหมาก่อนยอมรับโครงการ โดยการตรวจสอบคุณภาพด้วยตัวเองหรือตรวจสอบผ่านการร้องเรียนจากผู้ใช้งานโครงการ เป็นต้น

สิ่งสำคัญที่ได้ตั้งข้อสังเกตในงานวิจัยนี้คือ แม้ว่าจะมีเพียง 4 ใน 10 กรณีศึกษาที่กล่าวถึงการทุจริตเพื่อให้สามารถส่งงานได้ แต่จัดว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ผู้รับเหมาโครงการสามารถบรรลุถึงวัตถุประสงค์ของการดำเนินการโครงการที่จะต้องทำให้โครงการแล้วเสร็จภายในระยะสัญญาและงบประมาณเนื่องจากไม่เสียค่าปรับ ที่น่าสังเกตคือ องค์กรที่รับงานมูลค่าน้อยมีการทุจริตตั้งแต่ช่วงริเริ่มวงจรชีวิตของโครงการเพื่อให้ได้งาน และมีการทุจริตในช่วงระยะกลางของวงจรชีวิตของโครงการเพื่อให้การตรวจรับความก้าวหน้างานสำเร็จ นอกจากนี้ยังพบว่าผู้รับเหมาที่รับงานขนาดใหญ่จากองค์กรเอกชนมีการทุจริตเพื่อส่งมอบงานเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม ข้อสังเกตทั้งสองกรณีนี้ควรต้องมีการศึกษาในรายละเอียด เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่ามูลค่างานโครงการส่งผลต่อการทุจริตเพื่อให้ได้งานมากน้อยเพียงใด และการทุจริตในอุตสาหกรรมก่อสร้างของภาคเอกชนส่งผล กระทบต่อความสำเร็จของโครงการหรือไม่

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อค้นหาปัจจัยสำคัญและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของงานก่อสร้างประเภทสัญญาราคาต่อหน่วย โดยใช้การศึกษารายกรณีเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกของแต่ละปัจจัยสำคัญ รวมไปถึงเพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงตรรกะของปัจจัยสำคัญเหล่านั้นที่สามารถอธิบายได้ว่า ปัจจัยสำคัญส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการอย่างไร ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เกณฑ์วัดผลสำเร็จ ทางด้านประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และความพึงพอใจ ปัจจัยประสมการณ์การบริหารโครงการของเจ้าของโครงการ ปัจจัยการศึกษาความเป็นไปได้ และปัจจัยเงินทุนหมุนเวียนของเจ้าของโครงการ เป็นปัจจัยสำคัญในช่วงริเริ่มโครงการ ในขณะที่ปัจจัยวิธีการประมูลที่โปร่งใส ความเหมาะสมของแผนงานและรายการประกอบแบบ ผู้รับเหมาที่มีศักยภาพ และสภาพอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญในช่วงระยะกลางของวงจรชีวิตโครงการ สำหรับในช่วงระยะสุดท้ายของวงจรชีวิตโครงการพบว่า การรับประกันผลงานและการวาง

เงินค้ำประกันผลงานของผู้รับเหมา และการประเมินผลงานของเจ้าของโครงการเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงการประสบผลสำเร็จ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านเงินทุนในการทำวิจัย และขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านขององค์กรและหน่วยงานที่ให้ความกรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- (1) รังสรรค์ วงษ์บุญ, 2558. ประเภทของสัญญาการก่อสร้าง สำนักงานที่ปรึกษากฎหมายและวิศวกรรม (สืบค้นจาก) <http://rangson.com/html%20document/ce/ce006001contract.htm>.
- (2) วิวัฒน์ แสงเทียน, มนูญ นิโคโค และวิฑูรย์ เจียสกุล, 2527. การจัดการงานก่อสร้าง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- (3) นรุต ฤทธิมน้อย, 2549. การศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ ความสำเร็จด้านเวลาในการก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรร. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (4) Chan, A.P.C., Scott, D., and Chan, A.P.L., 2004. Factors Affecting the Success of a Construction Project. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 130: p. 153-155.
- (5) Sanvido, V., Grobler, F., Parfitt, K., Guvenis, M., and Coyle, M., 1992. Critical Success Factors For Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 118: p. 94-111.
- (6) Chan, A.P.C., Ho, D.C.K., and Tam, C.M., 2001. Design and Build Project Success Factors: Multivariate Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 127: p. 93-100.
- (7) Zhang, X., 2005. Critical Success Factors for Public-Private Partnerships in Infrastructure Development. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 131: p. 3-14.
- (8) Saqib, M., Farooqui, R.U., and Lodi, S.H., 2008. Assessment of Critical Success Factors for Construction Projects in Pakistan. *First International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-I)*, "Advancing

- and Integrating Construction Education, Research & Practice", Karachi, Pakistan, 4-5 August 2008: p. 392-404.
- (9) Toor, S.-ur-R. and Ogunlana, S.O., 2008. Critical COMs of success in large-scale construction projects: Evidence from Thailand construction industry. International Journal of Project Management, Vol. 26: p. 420-430.
- (10) Chan, D.W.M., Chan, A.P.C., and Lam, T.I., and Wong, J.M.W., 2010. Identifying the critical success factors for target cost contracts in the construction industry. Journal of Facilities Management, Vol. 8: p. 179-201.
- (11) กวี หวังนิเวศน์กุล, 2547. การบริหารงานวิศวกรรมก่อสร้าง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ซีเ็ดดยูเคชั่น.
- (12) Project Management Institute, 2004. A Guide to the Project Management Body of Knowledge, 3rd edition. Pennsylvania: Project Management Institute.
- (13) ไพโรจน์ ภัทรนรากุล, 2543. การประเมินผลในระบบเปิด: บทท้าทายสู่การบริหารจัดการที่ดี (Open System Evaluation: A Challenge for Good Governance). วารสารพัฒนบริหารศาสตร์, Vol. 40: p. 1-15.
- (14) Westerveld, E., 2003. The Project Excellence Model®: linking success criteria and critical success factors. International Journal of Project Management, Vol. 21: p. 411-418.
- (15) Alias, Z., Zawawi, E.M.A., Yusof, K., and NM. A., 2014. Determining Critical Success Factors of Project Management Practice: A conceptual Framework. AicQoL2014Kota Kinabalu, AMER International Conference on Quality of Life, The Pacific Sutera Hotel, Sutera Harbour, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, 4-5 January, 2014. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 153: 61-69.
- (16) Shenbor, A.J., Levy, O., and Dvir, D., 1997. Mapping the Dimensions of Project Success. Project Management Journal, 28: 179-201.
- (17) ณรงค์ เหลืองบุตรนาค, 2557. การบริหารงานวิศวกรรมก่อสร้าง (CONSTRUCTION MANAGEMENT). จัดพิมพ์โดย ผศ.ดร.ณรงค์ เหลืองบุตรนาค.
- (18) Yin, R.K., 2003. Case Study Research: Design and Methods, 3rd edition. London: Sage Publication, Inc.,.
- (19) ยาใจ พงษ์บริบูรณ์, 2010. การศึกษาแบบกรณีศึกษา : Case Study. วารสารศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, Vol. 33: p. 42-50.
- (20) Gay, L.R., and Airasian, P., 2000. Educational Research: Competencies for Analysis and Application, 6th edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.,.
- (21) Eisenhardt, K.M., 1989. Building Theories from Case Study Research. The Academy of Management Review, Vol. 14: p. 532-550.

Singly-Resonant OPO for CO₂/CH₄ Dial Transmitter for Use in Atmospheric Studies

Major Dr. Chat Chantjaroen

Department of Physics Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

Corresponding Author. Email : chat539@hotmail.com

(Received: July 31, 2018; Revised: September 21, 2018; Accepted: October 2, 2018)

Abstract : We report on a singly-resonant optical parametric oscillator (OPO) based on periodically poled MgO-doped LiNbO₃. The OPO was pumped by a Q-switch pulsed 1064-nm Nd:YAG laser and was seeded by an amplified 1571 nm DFB CW laser. The OPO is designed particularly for use as a laser source for a Differential Absorption Lidar (DIAL) for CO₂/CH₄ atmospheric concentration mapping. Maximum average output pulse energy of ~2 mJ and optical-to-optical conversion efficiency of up to ~20% have been achieved. Given the performance results of our frequency-agile OPO, we demonstrated a potential use of OPO in DIAL instruments for measurements of CO₂ (1571 nm) and CH₄ (1645 nm).

Keywords: Nonlinear Optics, Parametric Process, Optical Parametric Oscillator, Optical Parametric Amplifier, Differential Absorption Lidar

1. Introduction

The atmospheric concentration of carbon dioxide (CO₂) increased over 40% from 278 parts per million (ppm) in 1750 to a present value of over 404 ppm [1] while the atmospheric concentration of methane (CH₄) increased over 150% from 722 parts per billion (ppb) to over 1800 ppb over the same period [2]. The rate of increase of CO₂, averaged at 2.0 ppm/yr between 2002 and 2011, is the highest since direct CO₂ measurements began in 1958. In the fifth assessment report by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [3], the increases

in CO₂ emissions from fossil fuel burning and land use are listed as the dominant causes for the observed increase in atmospheric CO₂ concentration. The changes in the atmospheric CH₄ concentration are less well understood. From 1980 until the late 1990's, the atmospheric CH₄ concentration grew from approximately 1570 ppb to 1760 ppb. From the late 1990's until about 2007, the atmospheric CH₄ concentration remained relatively constant. Beginning in 2007, the atmospheric CH₄ concentration began to increase again from 1760 ppb to the current 1803 ppb [2, 4, 5]. Anthropogenic emissions of CH₄

account for between 50% and 65% of total emissions with fossil emissions resulting from leaks in the fossil fuel industry infrastructure while natural leaks account for approximately 30% of total CH_4 emissions [3].

Recognizing the importance of these carbon-based molecules, an initial United States (U.S.) Carbon Cycle Science Plan was developed in 1999 [6] and has been updated in 2011 [7]. This updated U.S. Carbon Cycle Science Plan is aimed at organizing national research efforts to address three overarching questions including: 1. How do natural processes and human actions affect the carbon cycle, 2. How do policy and management decisions affect the level of primary carbon containing gases CO_2 and CH_4 in the atmosphere, and 3. How are ecosystems, species, and natural resources impacted by increasing greenhouse gases. This U.S. Carbon Cycle Science Plan, along with two reports from the National Research Council [8, 9], recognize the need to develop remote sensing tools capable of both CO_2 and CH_4 observations from ground, aircraft, and space-based platforms as important observational tools for carbon cycle science.

Differential absorption lidar (DIAL) is an active remote sensing technique that has the potential for spatially mapping CO_2 and CH_4 that can address the need for remote sensing tools stated by the U.S. Carbon Cycle Science Plan and the National Research Council. The DIAL technique utilizes two closely spaced laser transmitter wavelengths, one centered on the molecular absorption feature of interest,

referred to as the on-line wavelength, and the second far removed from the absorption feature and referred to as the off-line wavelength. The difference between the scattered light at the on-line and off-line wavelengths can be used to retrieve the range information of the number density of the molecular species of interest [10]. The DIAL technique is an active remote sensing technique and offers several advantages over passive measurement techniques including high spatial resolution, high measurement specificity with minimal interference from other atmospheric constituents, lack of the need for external lighting, and relatively simple inversion methods for retrieval of number density profiles compared to passive sensor retrievals.

Research efforts to develop remote sensing instrumentation to meet the challenging accuracy and precision for CO_2 observations of better than 1% needed for carbon cycle studies [11] require leading researchers to consider many different instrument architectures. Instruments being developed for airborne deployment and future satellite deployment are utilizing an integrated path differential absorption (IPDA) measurement technique that provides a column averaged CO_2 number density [12, 13]. These instruments operate at either 1.57 μm or 2.0 μm and provide coarse range measurements by using several wavelengths across the absorption spectra and the pressure dependence of the absorption linewidth to retrieve profiles. Ground based instruments also employ the IPDA technique at both the 1.57 μm and 2.0 μm wavelengths. While

these instruments can provide the accuracy needed for carbon cycle science, they typically provide a column averaged CO_2 value and do not speak to the spatial distribution of the CO_2 . Initial work on pulsed DIAL instruments for ground-based CO_2 observations has been discussed in the literature with a handful of DIAL instruments demonstrating CO_2 profile retrievals [14-22]. Uchiumi et al. [14] developed a DIAL instrument that utilized a Ti:Sapphire laser to pump a Raman cell. Utilizing the second Stoke's line, the transmitter was able to produce an output wavelength ranging between 1.6 μm and 2.3 μm . CO_2 measurements between 300 m and 700 m range were obtained with approximately a ± 70 ppm error at 700 m. Kock et al. [15] describe a DIAL instrument based on a Ho:Tm:YLF laser operating at 2.05 μm . A single CO_2 concentration measurement was retrieved over 1200 m with an error of 9.9 ppm. Sakaizawa et al. [16] demonstrated a DIAL instrument for profiling atmospheric CO_2 based on an Nd:YAG pumped optical parametric oscillator (OPO). This instrument was able to measure CO_2 profiles to 5.2 km with a 5-hour integration time. Reported errors were less than 2%. Nagasawa et al. [17] demonstrated a DIAL instrument based on an Nd:YAG pumped optical parametric generator (OPG) combined with an optical parametric amplifier (OPA) laser transmitter. Daytime vertical profiles were made to 6 km with a 3-km range bin with errors of approximately 5 ppm. Johnson et al. [18] most recently reported on a DIAL instrument for carbon sequestration site

monitoring based on an injection seeded fiber amplifier. Horizontal profiles out to 2.5 km were obtained with a 50 ppm error. While these instruments have demonstrated CO_2 profiling ability, they do not meet the needed measurement accuracy for carbon cycle studies, require long integration times, and typically have a low range resolution.

Research efforts to develop remote sensing tools for CH_4 monitoring are in their infancy. A methane DIAL developed by Ikuta et al. [23] utilized a Nd:YAG laser to pump a Ti:Sapphire laser. The output from the Ti:Sapphire laser was then shifted to 1.67 μm using the nonlinear Raman scattering technique. This DIAL can detect 6000 ppm at 130 m, well above the needed sensitivity for atmospheric measurements. More recent work by Fix et al. [12] has demonstrated a potential laser source for CO_2 and CH_4 DIAL instruments. This laser utilizes a Nd:YAG pumped, injection seeded OPO in combination with an OPA. Shuman et al. [24] describe the development of a second laser source as another potential transmitter for CH_4 instruments based on a Nd:YAG pumped OPO. While work is underway to develop DIAL instruments for methane profiling, no DIAL instrument is currently operating routinely with the needed sensitivity.

Refaat et al. [25] have modeled the performance of DIAL instruments for monitoring CO_2 at 1571 nm and CH_4 at 1645 nm and conclude that 3 mJ pulses at a 1 kHz pulse repetition rate would allow atmospheric CO_2 and CH_4 measurements to be made beyond 3 km

(4 km) with a 5-minute averaging time with an error of less than 0.5% (1%). Research efforts leading to new laser sources capable of meeting the requirements set out by Refaat et al. [22] are needed for DIAL instruments to be capable of monitoring CO_2 and CH_4 with the required sensitivity to meet the remote sensing capability as stated by both the U.S. Carbon Cycle Science Plan and the National Research Council.

In this paper, a DIAL laser transmitter design capable of operating at both 1571 nm and 1645 nm is presented. Our initial design, operating at 1571 nm, uses a singly-resonant optical parametric oscillator (OPO) pumped by a Q-switch pulsed 1064 nm Nd:YAG laser and seeded by an amplified 1571 nm DFB CW laser. The OPO uses a linear cavity with a periodically poled lithium niobate crystal (PPLN) as a nonlinear gain material inside. The measured performance of the singly resonant OPO laser is compared with the SNLO model providing a prediction for further improvement in the laser transmitter design.

This paper is organized as follows. The experimental setup is described in section 2. Results from the laser performance are discussed in section 3. Finally, some brief concluding comments are presented in section 4.

2. Experimental setup

2.1 OPO system

A schematic of the OPO is shown in Fig. 1. A Big Sky Laser Ultra series flash-lamp-pumped Q-switch Nd:YAG laser of 1064 nm wavelength with 10-ns pulse duration and 20 Hz pulse

repetition frequency (PRF) was used as a pump laser. A Q-photronics distributed feedback (DFB) continuous wave (CW) laser of 1571 nm wavelength with 10 mW maximum power was used as a seed laser. The IPG Photonics fiber amplifier was used to amplify the seed power to about 160 mW. By applying a half-wave-plate and a Glan polarizer on both lasers, we could adjust the pump energy and seed power without changing their Gaussian beam properties and thus making the system alignment consistent. To maximize the system efficiency, the pump and seed beams were fully overlapped and focused at the same spot within the crystal. In addition to the design, another half-wave-plate was installed before the focusing lens in each beam path to increase the efficiency by allowing us to rotate and match the polarization direction of the beam to the optical axis of the crystal. The nonlinear crystal was a periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal with a 5% magnesium-oxide doped (Mg:LiNbO_3) by AdvR. The crystal was placed in a custom-built aluminum heater for temperature control needed for adjusting the output wavelengths in the quasi-phase-matching process. The linear cavity used in the OPO consisted of two mirrors—one flat and one concave with 500 mm radius of curvature. The flat mirror has a measured reflectivity of 99% at the seed wavelength (1571 nm) and 24% at the pump wavelength (1064 nm). The curved mirror has a measured reflectivity of 48% at the seed and 21% at the pump wavelength. The reflectivity at the idler wavelength (3297 nm) is

estimated to be 30% for both mirrors. The cavity length was 492 mm with the flat mirror located near the entrance face of the crystal.

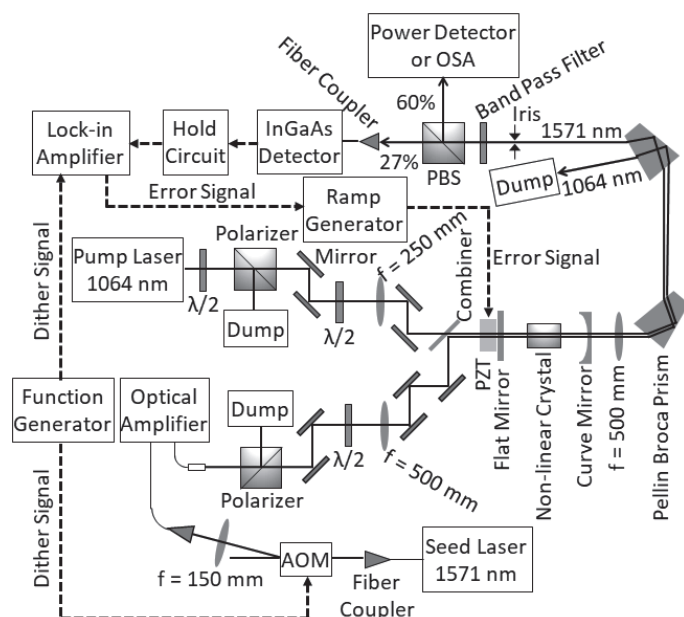


Fig. 1. Schematic of the OPO with the locking system.

For OPG and OPA, the locking system and the optical cavity are excluded, and the seed laser is bypassing the AOM and is fiber coupled directly into the optical amplifier. The seed laser is turned on for OPA and turned off for OPG.

As shown in Fig. 1, the flat mirror was mounted on a piezo-electric transducer (PZT) which was used to mechanically adjust the cavity length relevant to the signal received by the locking system. The locking system used a dither locking technique to adjust the cavity length that could maintain the cavity at resonance. The locking system was consisted of a function generator (Stanford Research Systems DS345)

and an acousto-optic modulator (AOM) (Isomet 1205C-2 modulator with 620C-80 driver) to modulate the seed laser. This modulated signal was then amplified and incident on the optical cavity. An InGaAs detector (New Focus 2011) was used to detect the cavity transmission output and convert the signal into an analog signal. A hold circuit was used to clean unwanted parts of this output signal before it was sent to the lock-in amplifier (Stanford Research Systems SR510). A ramp generator (Burleigh RC-44) was used to control a piezo-electric transducer (PZT) in accordance with the error signal sent from the log-in amplifier. Through contractions and expansions of the PZT in which the flat mirror is mounted, the cavity length can be adjusted to maintain the resonance. Two Pellin-Broca prisms were used to separate the output beam by wavelengths. The third focusing lens was designed to focus the output beam near the detector location, otherwise the highly-divergent beam was impossible to detect by the detector. An energy meter (Thorlabs model PM100D with an ES111C power detector) was used for the measurement of output energy. An optical spectrum analyzer (OSA) (Agilent model 86142B) was used for the measurement of output spectra. For measurement accuracy, the detector and OSA were blocked from wavelengths other than 1571 nm by surrounding them with a black box (not shown in the diagram) which had an entrance only through the iris and the band pass filter.

2.2 PPLN crystal analysis

Four PPLN crystals with poling periods of 30.860, 31.153, 31.250, and 31.546 μm were characterized in this project. To select a proper crystal that will produce the output signal wavelength near 1571 nm needed for CO_2 measurements, each crystal of different sizes was placed in a custom-built aluminum heater which was heated by a TEC and monitored by a thermal sensor. The crystal temperature scanning used the OPG setup and the output signal wavelength was measured by the OSA.

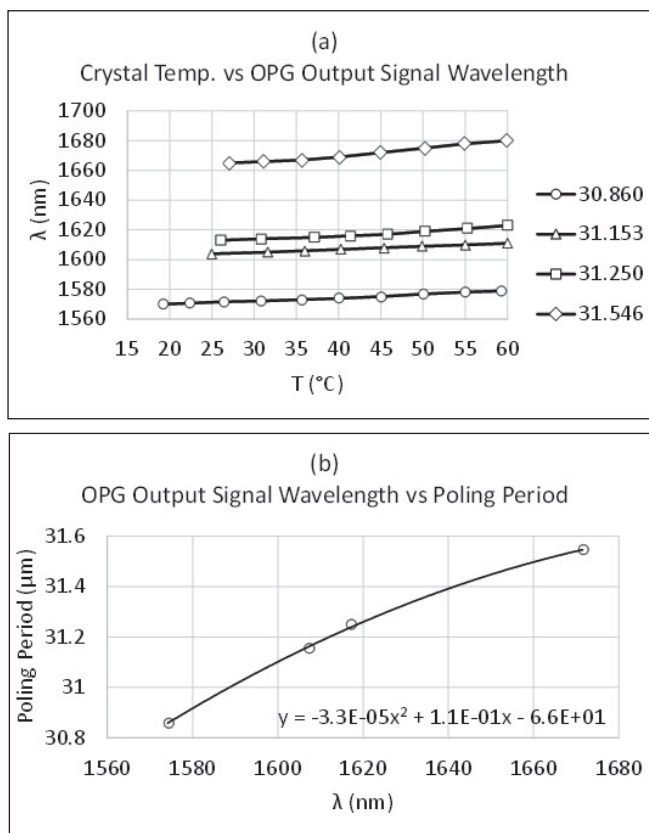


Fig. 2. (a) Temperature/wavelength tuning characteristics of the PPLN crystals with different poling periods (30.860, 31.153, 31.250, and 31.546 μm) in a 1064 nm pumped OPG setup. (b) Quadratic trend of the PPLN crystal poling period with respect to the average OPG output signal wavelength plotted in (a).

As shown in the temperature scanning results in Fig. 2(a), the 30.860- μm poling period crystal was selected to be used in the experiment since it could produce the output signal wavelength near 1571 nm needed for CO_2 measurements. The trend on how the output signal wavelength increases with respect to the poling periods of these crystals shown in Fig. 2(b) is used to estimate a poling period of 31.427 μm needed for CH_4 measurements near 1645 nm wavelength.

3. Results

3.1 Output spectra

OPG/OPA output spectra shown in Fig. 3 can be used to demonstrate how well the system is aligned by looking at two forms of overlaps—spectral overlap and spatial overlap. Spectral overlap is the overlap between the wavelengths of the spontaneous emission of the crystal and the seed laser. This may be evaluated by looking at the OPG output spectrum and the seed spectrum. Fig. 3(a) demonstrates a case of poor spectral overlap since the peak of OPG spectrum does not line up with the peak of the seed spectrum, while Fig. 3(b) and 3(c) demonstrate a case of good spectral overlap since the peak of the OPG spectrum lines up well with the peak of the seed spectrum. Spatial overlap is the overlap between the pump and seed beams within the crystal. This may be evaluated by comparing the features of the OPG and OPA output spectra. As shown in Fig. 3(b), the sidebands of the OPA spectrum, which is nearly as broad as the OPG spectrum, indicates a poor spatial overlap. Ideally a good spatial overlap should provide OPA sidebands that are narrower than the OPG spectrum as shown in Fig. 3(c).

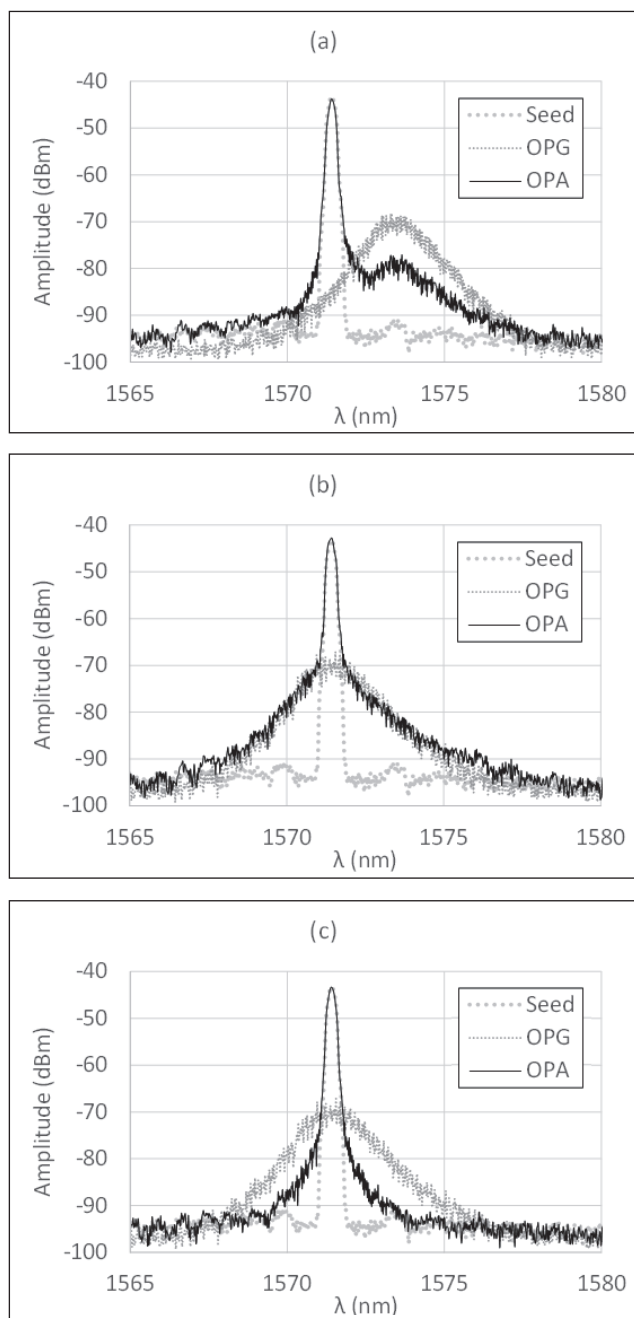


Fig. 3. Output spectra. (a) Demonstration of poor spectral overlap case. Notice how the peak of the OPG spectrum does not line up with the peak of the seed laser spectrum. (b) Demonstration of poor spatial overlap case. When the seed beam is not collinear with the pump beam, the output OPA spectrum becomes very broad at the bottom which could be as

broad as the OPG. However, the system has good spectral alignment since the peak of the OPG line up with the peak of the seed laser. (c) Demonstration of both good spectral and spatial overlap case. The peak of the OPG spectrum coincides with the peak of the seed laser spectrum and the sidebands of the OPA spectrum are much narrower than those of the OPG.

The broadening of the OPA sidebands in the case of poor spatial overlap is most likely the result of domination of the spontaneous emission over the stimulated emission when the seed beam is not collinear with the pump beam. It should be noted that the spectrum measurements shown in Fig. 3 cannot be used for comparison between the output intensities of OPG/OPA and the seed. It appears in these plots that the seed intensity is almost as high as the OPA intensity which is not the case. This is because the OSA captures and handles the OPG/OPA outputs, which are pulsed and the seed laser, which is CW, differently. For this reason, separate output energy measurements using a different instrument were performed to make the energy comparisons.

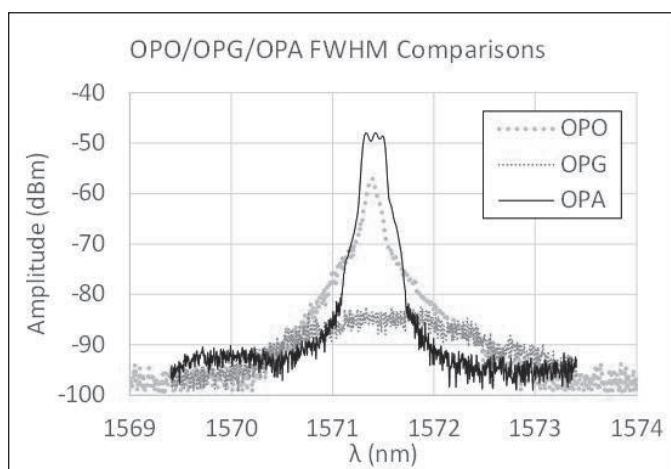


Fig. 4. FWHM comparisons between OPG, OPA, and OPO. For each plot, FWHM is the width of the feature measured at the amplitude of -3 dBm down from the peak.

Full width at half maximum (FWHM) for the OPG/OPA/OPO was measured from Fig. 4. In the plots, the OSA was set at the highest resolution of 0.06 nm with a high sensitivity of -90 dBm. Data in each plot are averaged between 5 to 10 pulses or until the pattern of the plot does not appear to change. In an amplitude unit of dBm, FWHM is measured at -3 dBm down from the peak of the spectrum. From the figure, the FWHM of the OPG, OPA, and OPO were measured to be 1.400, 0.2232, and 0.0941 nm, respectively. This makes the OPO the best option for a DIAL laser transmitter which requires a narrow linewidth.

It should be noted that the spectrum measurements by the OSA in Fig. 4 cannot be used for intensity comparison between the OPG/OPA and OPO. Although the OPO is built upon the OPA setup, adding an optical cavity will change the output beam shape and direction. Even with our best realignment efforts, the amount

of output beam that is fiber coupled into the OSA still reduces significantly. Consequently, the OPO peak appears smaller than the OPA peak, but this does not necessarily mean the OPA output energy is greater than that of the OPO. To compare output energies between the OPA and OPO, energy measurements were conducted separately. Nevertheless, FWHM determined from the OSA measurements can be used for comparison among OPG, OPA, and OPO.

3.2 Output energy

Results of the output energy measurements using a Thorlabs energy meter model PM100D with ES111C power detector are shown in Fig. 5. The plot in Fig. 5(a) is the output at the crystal exit location in which output measurements at the detector location have been corrected by the transmissions of all the optical elements along the path shown in Fig. 1. The optical-to-optical conversion efficiency shown in Fig. 5(b) is defined as a percentage ratio between the output signal energy and the input pump energy. At below 8 mJ input pump energies, the output energy and conversion efficiency from the OPO is the highest, which was expected. However, at above 8 mJ input pump energies, the OPO output energies drop down and become lower than that of OPG and OPA. This is likely due to the phase mismatch resulting from the increase of crystal temperature at higher input pump energies. The conversion efficiency reaches a maximum of about 18%, 19%, and 20% for OPG, OPA, and OPO, respectively. It should be noted that all experimental measurements are limited at 12 mJ input pump

energy to prevent damaging the crystal and all other optics.

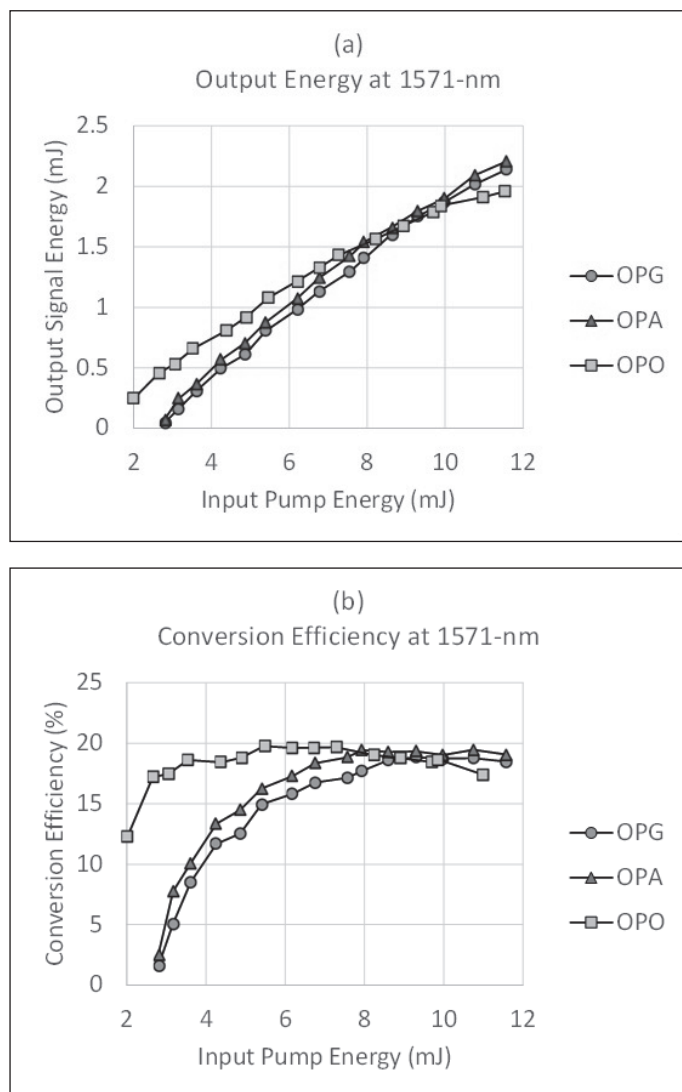


Fig. 5. (a) Output signal energy at 1571.406 nm wavelength of the OPG, OPA, and OPO. (b) The corresponding optical-to-optical conversion efficiency of OPG, OPA, and OPO.

3.3 SNLO comparison

To estimate the values of the effective nonlinear coefficient, d_{eff} , which acts as a gain term and the quasi phase mismatch factor, Δk , which acts as a loss term in the system, the

OPA experimental data is compared with the theoretical OPA model in SNLO developed at Sandia National Laboratory [26]. In the comparisons, all SNLO input parameters are entered based on our actual experimental setup. By varying the input values of the pump energy, d_{eff} and Δk , SNLO can calculate and predict the output signal energy of the system. The conversion efficiencies are calculated based on the output signal energy acquired from SNLO and plotted with the experimental data as shown in Fig. 6(a) for comparison. The best-fit result to the experimental data has $d_{eff} \approx 13$ pm/V and $\Delta k \approx 300$ m⁻¹ as shown by the red curve in the plot. It should be noted that, in the comparison, the experimental data at low input pump energies of below 3 mJ and at high input pump energies of above 7 mJ were neglected. The reason for neglecting the low pump energies is that the detector cannot accurately detect extremely low output energies and thus produces large errors. The reason for neglecting the high pump energies is because SNLO model does not take into account the effect of crystal saturation at high pump energies.

The estimated value of d_{eff} from SNLO OPA model was used along with other actual experiment parameters as SNLO OPO model inputs. It should be noted that the SNLO OPO model assumes a symmetric cavity. Therefore, the inputs for the flat mirror are modified as if they are for another curved mirror that would make the cavity symmetric. For SNLO OPO model, Δk is set to zero for the case of perfect

quasi-phase-matching. Results from the SNLO model in comparison with the OPO measurements are shown in Fig. 6(b) and 6(c). Although with a lot of noise, the theoretical prediction in SNLO and the experimental data show good agreement.

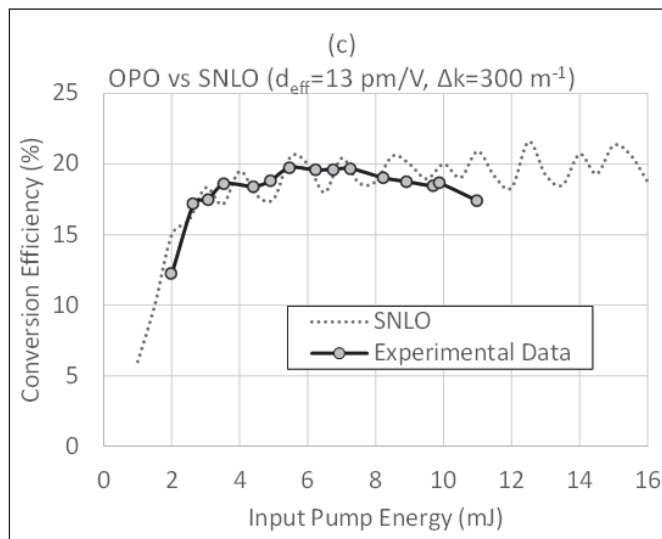
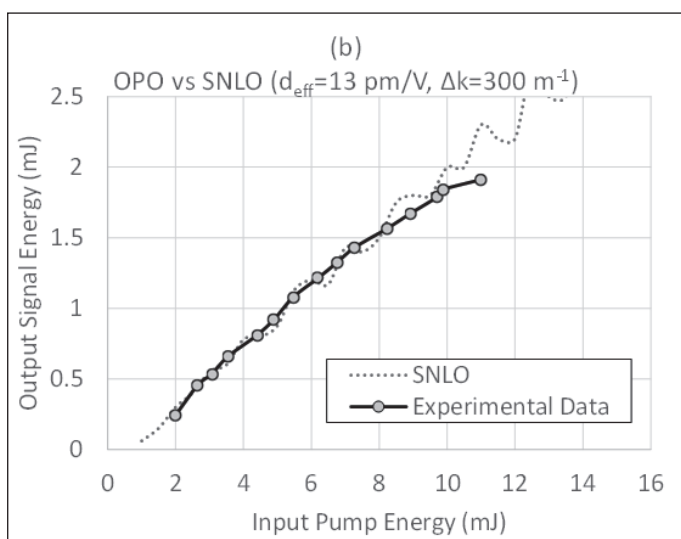
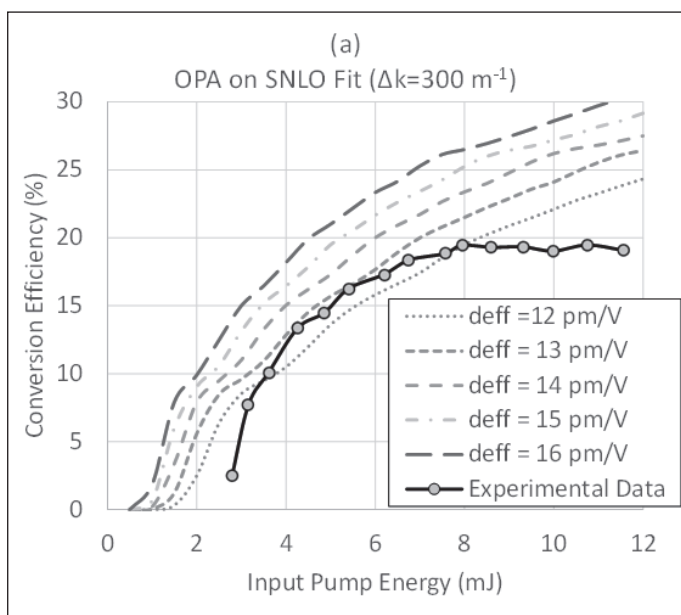


Fig. 6. (a) OPA conversion efficiency comparison between the experimental data and SNLO model. (b) OPO output signal energy comparison between the experimental data and SNLO model. (c) OPO conversion efficiency comparison between the experimental data and SNLO mode.

4. Conclusion

The goal of our development of the near-infrared OPO is to be used in the application of atmospheric studies by implementing it in a DIAL laser transmitter for the spatial mapping of CO_2 and CH_4 concentrations. We presented the first phase results of a singly-resonate OPO using a PPLN crystal in a linear cavity with a dither locking technique. The OPO was pumped with a Q-switch 1064 nm Nd:YAG laser and seeded with a 1571 nm DFB CW laser. We obtained an output signal at the on-line wavelength for a CO_2 DIAL of 1571.406 nm with a narrow linewidth of 0.0941 nm FWHM and 2 mJ averaged pulsed energy. The optical-to-optical conversion efficiency reached

about 20%. Good agreement between the theoretical prediction in SNLO and the experimental data confirms experimental success of the OPO. Further improvements of the OPO design based on the SNLO modeling could potentially meet the requirement of the DIAL transmitter.

5. Acknowledgement

I would like to thank Chulachomklao Royal Military Academy for providing financial support and opportunity to conduct this research. I would also like to thank Dr. Kevin Repasky and Montana State University for providing opportunity, facility, grant, and supports in many aspects.

6. References

- (1) E. Dlugokenchy and P. Tans, 2017. NOAA/ESRL <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>.
- (2) National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017. NOAA/ESRL <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi>.
- (3) P. Ciais, C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quere, R.B. Myneni, S. Piao, and P. Thornton, 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- (4) E. J. Dlugokencky, L. Bruhwiler, J. W. C. White, L. K. Emmons, P. C. Novelli, S. A. Montzka, K. A. Masarie, P. M. Lang, A. M. Croftwell, J. B. Miller, and L. V. Gatti, 2009. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. Geophys. Res. Lett., 36.
- (5) R.M. Measures and G. Pilon, 1972. A study of tunable laser techniques for remote mapping of specific gaseous constituents of the atmosphere. Opt. Quant. Electron., 4(2) : 141-153.
- (6) J. L. Sarmiento, J. Louis, and C. W. Steven, 1999. A U.S. carbon cycle science plan. Boulder, CO, USA : University Corporation for Atmospheric Research.
- (7) A. M. Michalak, B. J. Robert, M. Gregg, L. S. Christopher, and the Carbon Cycle Science Working Group, 2011. A U.S. Carbon Cycle Science Plan. Boulder, CO, USA : University Corporation for Atmospheric Research.
- (8) National Research Council, 2007. Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Generation and Beyond. USA : The National Academy Press.
- (9) National Research Council, 2010. Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements. USA : The National Academy Press.
- (10) L. S. Rothman, A. Barbe, D. C. Benner, L. R. Brown, C. Camy-Peyret, M. R. Carleer, K. Chance, C. Clerbaux, V. Dana, V. M. Devi, A. Fayt, J. M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, K. W. Jucks, W. J. Lafferty, J. Y. Mandin, S. T. Massie, V. Nemtchinov, D. A. Newnham, A. Perrin, C. P. Rinsland, J. Schroeder, K. M. Smith, M. A. H. Smith, K. Tang, R. A. Toth, J. Vander Auwera, P. Varanasi, and K. Yoshino, 2003. The HITRAN molecular spectroscopic database. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 82 : 5-44.
- (11) P. J. Rayner and D. M. O'Brien, 2001. The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions. Geophys. Res. Lett., 28 : 175.
- (12) A. Fix, C. Budenbender, M. Wirth, M. Quatrevalet, A. Amediek, C. Kiemle, and G. Ehret, 2011. Optical Parametric Oscillators and Amplifiers for Airborne and Spaceborne Active Remote Sensing of CO₂ and CH₄. Pro. SPIE, 8182 : 818206.
- (13) J. B. Abshire, H. Riris, C. J. Weaver, J. Moa, G. R. Allan, W. E. Hasselbrack, and E. V. Browell, 2013. Airborne measurements of CO₂ column absorption and range using a pulsed direct detection integrated path differential absorption lidar. Appl. Opt., 52 : 4446.
- (14) M. Uchiyumi, N. J. Vasa, M. Fujiwara, S. Yokoyama, M. Maeda, and O. Uchino, 2003. Development of DIAL for CO₂ and CH₄ in the atmosphere. Pro. SPIE, 4893 : 141.

- (15) G. J. Koch, B. W. Barnes, M. Petros, J. Y. Beyon, F. Amzajerdian, J. Yu, R. E. Davis, S. Ismail, S. Vay, M. J. Kavaya, and U. Singh, 2004. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂. Appl. Opt., 43 : 5092.
- (16) D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato, and T. Sakai, 2009. Development of a 1.6 μ m differential absorption lidar with quasi-phase matching optical parametric oscillator and photon counting detector for the vertical CO₂ profile. Appl. Opt., 48 : 748.
- (17) C. Nagasawa, M. Abo, Y. Shibata, T. Nagai, and M. Tsukamoto, 2011. Direct detection 1.6 μ m DIAL for measurements of CO₂ concentration profiles in the troposphere. Pro. SPIE, 8182 : 81820G.
- (18) W. Johnson, K. S. Repasky, and J. L. Carlsen, 2013. Micropulse differential absorption lidar for identification of carbon sequestration site leakage. Appl. Opt., 52 : 2994.
- (19) F. Gibert, P. H. Flamant, D. Bruneau, and C. Loth, 2006. Two micrometer heterodyne differential absorption lidar measurements of the atmospheric CO₂ mixing ratio in the boundary layer. Appl. Opt., 45 : 4448.
- (20) A. Amediek, A. Fix, M. Wirth, and G. Ehret, 2008. Development of an OPO system at 1.57 μ m for integrated path DIAL measurements of atmospheric carbon dioxide. Appl. Phys. B, 92 : 295.
- (21) S. Kameyama, M. Imaki, . Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa, and M. Nakajima, 2009. Development of a 1.6 μ m continuous wave modulation hard target differential absorption lidar system for CO₂ sensing. Opt. Lett., 34 : 1513.
- (22) T. F. Refaat, S. Ismail, G. J. Koch, M. Rubio, T. L. Mack, A. Notari, J. E. Collins, J. Lewis, R. De Young, Y. Choi, M. N. Abedin, and U. N. Singh, 2011. Backscatter 2 μ m Lidar Validation for Atmospheric CO₂ Differential Absorption Lidar Applications. IEEE Transactions on Geosciences and Remote, 49 : 572.
- (23) K. Ikuta, N. Yoshikane, N. Vasa, Y. Oki, M. Maeda, M. Uchiyumi, Y. Tsumura, J. Nakagawa, and N. Kawada, 1999. Differential Absorption Lidar at 1.67 μ m for remote sensing of Methane Leakage. Japanese J. Appl. Phys., 38 : 110.
- (24) T. Shuman, R. Burnham, A. R. Nehrir, S. Ismail, J. W. Hair, T. Refaat, 2013. Efficient 1.6 Micron Laser Source for Methane DIAL. Pro. SPIE, 8872 : 88720A.
- (25) T. F. Refaat, S. Ismail, A. R. Nehrir, J. W. Hair, J. H. Crawford, I. Leifer, and T. Shuman, 2013. Performance evaluation of a 1.6 μ m methane DIAL system from ground, aircraft and UAV platforms. Opt. Express, 21 : 30415-30432.
- (26) AS-Photonics, 2017. SNLO. <http://www.as-photonics.com/snlo>.

การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานราก ก่อนและหลังปรับปรุงเสริมกำลัง Reliability Analysis of Foundation Before and After Strengthening

ภาสกร บุญญาวิณี*
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหัส พุทธวรรณะ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

*Corresponding Author. Email : Passaworn.b@gmail.com

(Received: August 8, 2018; Revised: September 28, 2018; Accepted: October 12, 2018)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานรากก่อนและหลังการปรับปรุงเสริมกำลังโดยใช้ เสาเข็มเหล็กไมโครไพล์ โดยมีกรณีศึกษาเป็นอาคารเรียนรวมกลุ่มสังคมศาสตร์ (อาคาร A) ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ซึ่งโครงสร้างฐานรากของอาคารก่อนการปรับปรุงเสริมกำลัง มีฐานรากจำนวน 15 ฐานราก (P1-P15) ไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุก ($\phi_{DL}DL + \phi_{LL}LL$) ได้ ทำให้ต้องมีการปรับปรุงเสริมกำลังโครงสร้างฐานรากให้มีความแข็งแรงและสามารถใช้งานได้ตามปกติ การวิเคราะห์ใช้วิธีการคำนวณหาแรงกระทำ (Load, Q) และความต้านทาน (Resistance, R) ของฐานรากที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการปรับปรุงเสริมกำลัง เพื่อนำมาหาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ ก่อนและหลังการปรับปรุงเสริมกำลัง นำมาเปรียบเทียบกับค่าความแตกต่างกันเพียงใด จากนั้นจึงนำค่าดัชนีความน่าเชื่อถือหลังจากการปรับปรุงเสริมกำลังโครงสร้างฐานราก มาเทียบกับค่าดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย ผลของการปรับปรุงเสริมกำลังโครงสร้างฐานราก นั้นทำให้โครงสร้างฐานรากมีค่าดัชนีความน่าเชื่อถือหลังเสริมกำลังมากกว่าค่าดัชนีความน่าเชื่อถือก่อนเสริมกำลัง อีกทั้งยังมีบางฐานรากที่มีค่ามากกว่าค่าดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย การเสริมกำลังโครงสร้างฐานรากในครั้งนี้ จะทำให้โครงสร้างฐานรากสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่ออกแบบและมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: เสาเข็มเหล็กไมโครไพล์ โครงสร้างฐานราก ค่าดัชนีความปลอดภัย ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย

Abstract : The purpose of this research is the analysis of the structural reliability of the case study building foundations prior and posterior the improvement and strengthening by using Steel Micropile. The case study building is the Building A of Social Science Complex Building (SC2), Thammasat University, Rangsit Campus. From the calculation recheck, there are 15 foundations (P1-P15) of this building that must be repaired because their capacities cannot resist the factored design load ($\phi_{DL}DL + \phi_{LL}LL$) from the building. So, the foundations improvement and strengthening are required to guarantee that this building can be used effectively. By the reliability analysis process, both loads (Q) and resistances (R) of building foundations have to be calculated (prior and posterior the strengthening) and then the reliability indexes have been calculated in order to evaluate and compare the reliability indexes of building foundations (before and after improvement) each other and target reliability index and compute foundations safety as well. The results show that the structural reliability indexes after strengthening are more than target reliability index or not. The strengthening results the reliability indexes which improve after strengthening. Furthermore, there are some foundations which have their reliability indexes more than target reliability index as well, this structural strengthening method improves the foundation performance that can handle all loads occurred in real situation and make it safer.

Keywords: Steel Micropile, Building Foundation, Structural Reliability, Reliability Index

1. บทนำ

บทความนี้ผู้เขียนได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินหาความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานราก โดยมีอาคารกรณีศึกษา คือ อาคารสังคมศาสตร์ (อาคาร A) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ซึ่งฐานรากของอาคารกรณีศึกษาไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำได้ จึงได้ทำการคำนวณและหาวิธีเสริมกำลังโดย มีฐานรากทั้งหมด 15 ฐานด้วยกันที่ต้องทำปรับปรุงเสริมกำลังและทำการเสริม Steel Micropile ซึ่งฐานรากทั้ง 15 ฐานเดิมที่ล้วนเป็นฐานรากเดี่ยวทั้งสิ้น ซึ่งฐานราก F1 มีขนาด 1.6 m. x 1.6 m.

ใช้เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 m. ความยาว 30 m. และสามารถรับน้ำหนักปลอดภัยได้ไม่น้อยกว่า 130 ตัน/ตัน ดังภาพที่ 2 และฐานราก P1 – P15 คือ ฐานรากที่ทำการคำนวณออกแบบและทำการเสริมกำลังด้วยการใช้ Steel Micropile ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 m. ความยาว 30 m. และสามารถรับน้ำหนักปลอดภัย (Safe Load) ได้ไม่น้อยกว่า 40 ตัน/ตัน แล้วทำการขยายฐานรากเพื่อเสริมกำลังด้วย

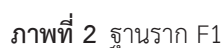
โดยภาพที่ 1 จะแสดงตำแหน่งของฐานราก P1 - P15 ที่ได้รับการปรับปรุงเสริมกำลัง [7]



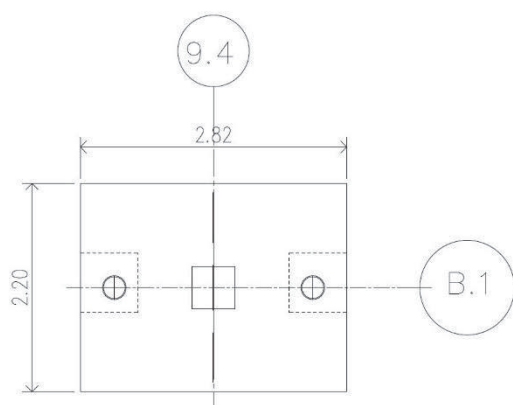
โดย

- (1) คือตำแหน่งของ P1, P2, P3 และ P4
- (2) คือตำแหน่งของ P5, P6, P7, P8, P9, P10, P12 และ P13
- (3) คือตำแหน่งของ P11
- (4) คือตำแหน่งของ P14
- (5) คือตำแหน่งของ P15

โดยรายละเอียดของฐานราก P1 - P15 ก่อนและ
หลังเสริมกำลังปรับปรุงจะแสดงดังต่อไปนี้

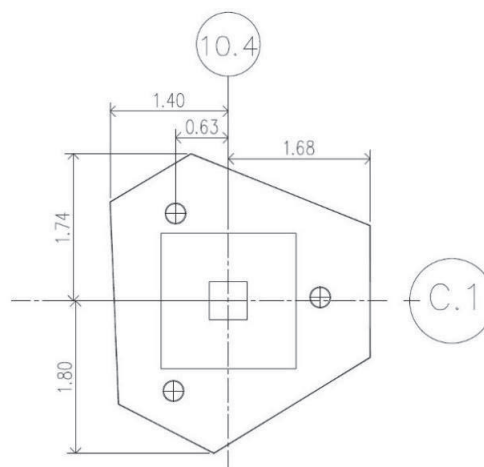


P1, P5, P12 ได้ทำการ ใช้ 2-Steel Micropiles
ในการเสริมกำลัง และขยายฐานรากเป็น 2.85 m. x 2.20 m.
ดังภาพที่ 3



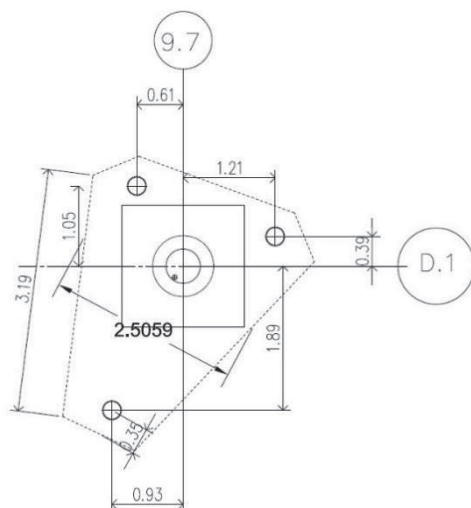
ภาพที่ 4 ฐานราก P2

P2 ได้ทำการ ใช้ 2-Steel Micropiles ในการเสริมกำลังและขยายฐานรากเป็น 2.82 m. x 2.20 m. ดังภาพที่ 4



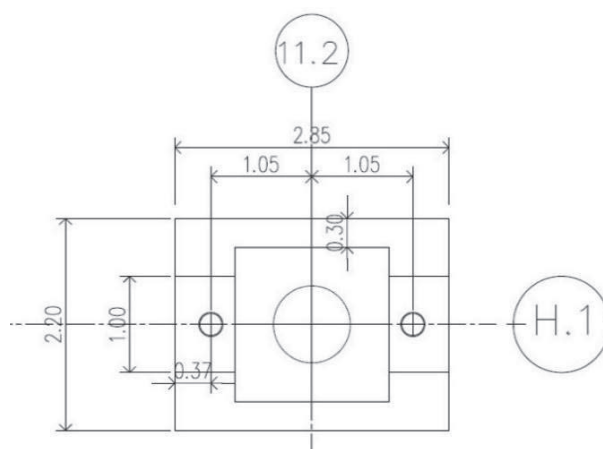
ภาพที่ 6 ฐานราก P4

P4 ได้ทำการ ใช้ 3-Steel Micropiles ในการเสริมกำลัง และขยายฐานรากเป็น 3.04 m. x 3.54 m. ดังภาพที่ 6



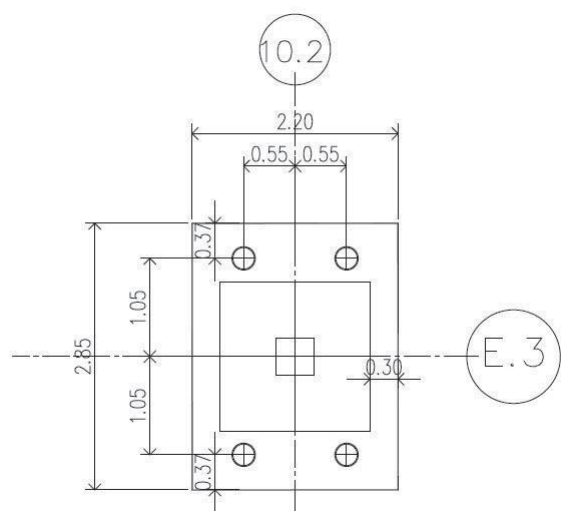
ภาพที่ 5 ฐานราก P3

P3 ได้ทำการ ใช้ 3-Steel Micropiles ในการเสริมกำลัง และขยายฐานรากเป็น 2.50 m. x 3.19 m. ดังภาพที่ 5



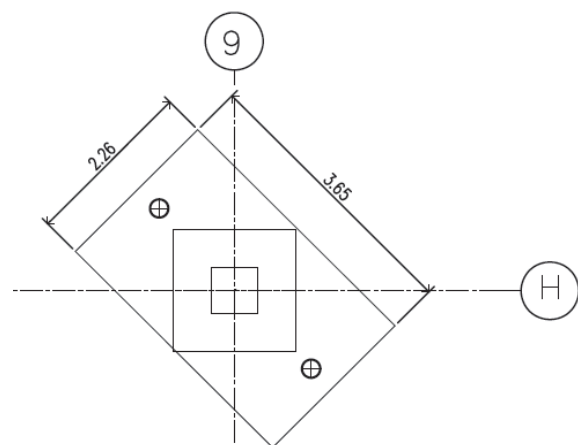
ภาพที่ 7 ฐานราก P6

P6 ได้ทำการ ใช้ 2-Steel Micropiles ในการเสริมกำลัง และขยายฐานรากเป็น 2.85 m. x 2.20 m. ดังภาพที่ 7



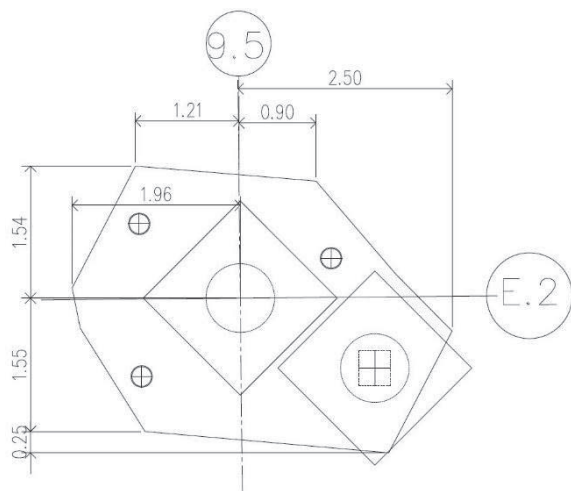
ภาพที่ 8 ฐานราก P7

P7 ได้ทำการ ใช้ 4-Steel Micropiles ในการเสริมกำลัง และขยายฐานรากเป็น 2.85 m. x 2.20 m. ดังภาพที่ 8



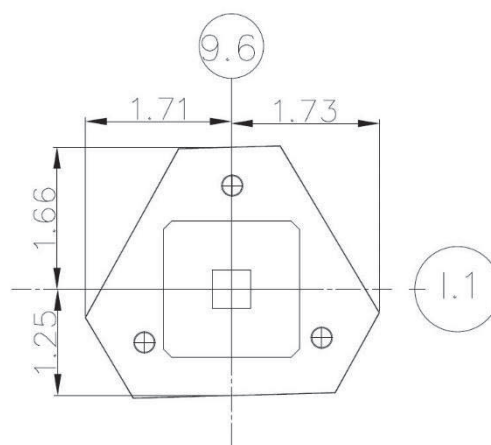
ภาพที่ 10 ฐานราก P9, P11, P13, P14, P15

P9, P11, P13, P14, P15 ได้ทำการ ใช้ 2-Steel Micropiles ในการเสริมกำลังและขยายฐานรากเป็น 2.26 m. x 3.65 m. ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 ฐานราก P8

P8 ได้ทำการ ใช้ 3-Steel Micropiles ในการเสริมกำลัง และขยายฐานราก ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 11 ฐานราก P10

P10 ได้ทำการ ใช้ 3-Steel Micropiles ในการเสริมกำลัง และขยายฐานรากเป็น 3.45 m. x 2.91 m. ดังภาพที่ 11

2. มาตรฐาน ACI (American Concrete Institute)

2.1 Dead Load (DL: น้ำหนักบรรทุกคงที่)

หมายถึงน้ำหนักบรรทุกที่กระทำอยู่กับที่ คงที่ตายตัว ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก หรือน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง

2.2 Live Load (LL: น้ำหนักบรรทุกจร)

หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่เป็นลักษณะมีการเคลื่อนย้าย เคลื่อนที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้ำหนักอยู่ตลอดเวลา หรืออยู่ชั่วคราว

โดยทางผู้ทำวิจัยได้ใช้ Load Factor ของน้ำหนักบรรทุกทั้ง 2 ประเภทซึ่งจะได้ค่าน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำกับโครงสร้าง (ACI 318-89) [6] เป็นดังนี้

$$\text{Total Load} = 1.4DL + 1.7LL \quad (1)$$

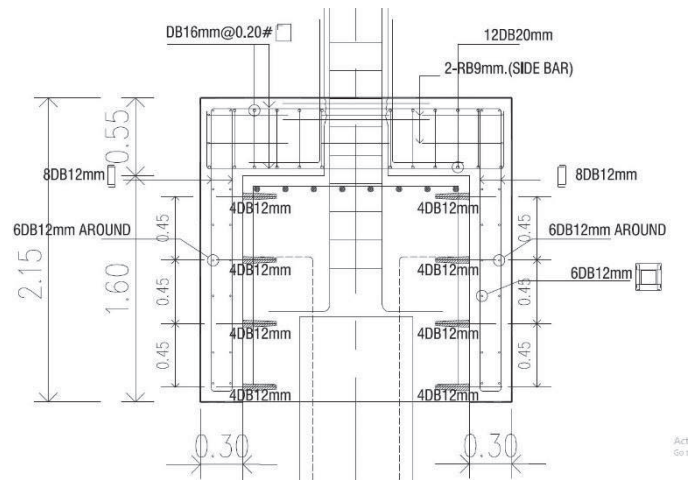
3. วิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานราก

3.1 น้ำหนักบรรทุก (Load Effects: Q)

ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือค่า แรงเฉือน (Shear) และ โมเมนต์ดัด (Moment)

3.2 ความต้านทานเชิงโครงสร้าง (Structural Resistance : R)

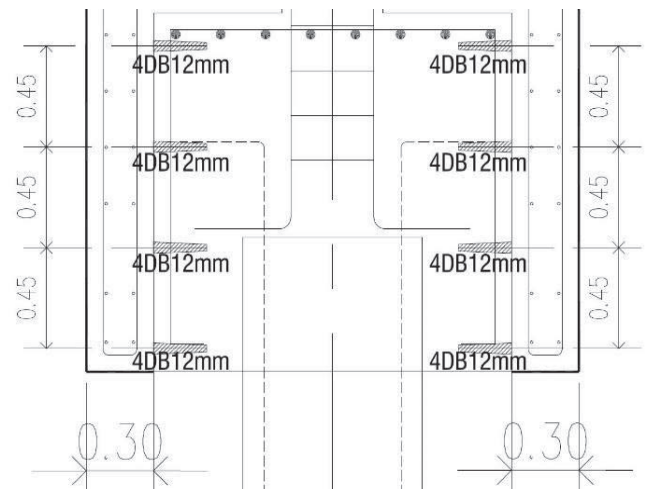
ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็น ค่าความต้านทานระบุที่คำนวณได้ตามทฤษฎี (Nominal Resistance : R_n) และมีการเสริมกำลังของโครงสร้างฐานราก 2 แบบ คือความต้านทานของ แรงเฉือน [6] และ ความต้านทานของ โมเมนต์ดัด [6] ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงเหล็กเสริมรับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

3.2.1 กำลังต้านแรงเฉือน (Shear Resistance)

โดยจะหาค่าความต้านทานจากเหล็กเสริม ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (4x2-4DB12)

โดยจะหาค่าได้จากสูตร (2)

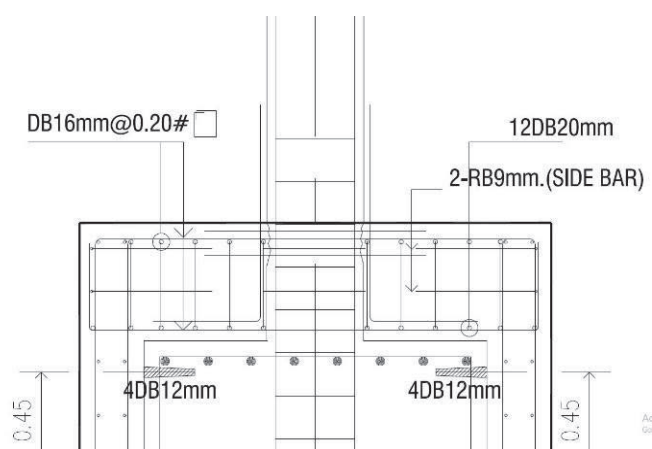
$$V_u = \phi \mu A_s f_y \quad (2)$$

โดย ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย, ϕ (Shear) = 0.85
 A_s คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมรับแรง
 เชือน

f_y คือกำลังครากของเหล็กเสริม (ACI 318-89) [6]

3.2.2 กำลังต้านโมเมนต์ดัด (Moment Resistance)

จะหาค่าความต้านทานจากเหล็กเสริม
 ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด(DB16@0.20#)

หาค่าได้จากสมการที่ (3) และค่า a จากสมการ (4)

$$M_u = \phi A_s f_y (d - a/2) \quad (3)$$

$$a = (A_s f_y) / (0.85 b f'_c) \quad (4)$$

โดย d คือความลึกประสิทธิภาพ

a คือระยะรับแรงอัดของคอนกรีต

b คือความกว้างของหน้าตัด

ค่า ϕ (Moment) = 0.90

$\mu = 1$

$f_y = 4,000$ ksc

ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน, $f'_c = 320$ ksc

3.3 ดรรชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index, β)

พิจารณาให้ R และ Q เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจาย
 ตัวแบบปกติ (Normal Distribution) โดยเราสามารถ
 หาค่า ความโน้มเอียงของน้ำหนักบรรทุก (Bias Factor
 for load) ดังสมการที่ (5) และ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน
 (Coefficient of Variation: COV) ดังสมการที่ (6) และ
 สามารถคำนวณค่าดรรชนีความปลอดภัยได้จากสมการที่
 (7) [5]

$$\text{Bias Factor, } \lambda = \frac{\bar{x}}{x_n} \quad (5)$$

$$\text{Coefficient of Variation, } COV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (6)$$

$$\text{Reliability Index, } \beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (7)$$

โดย $\bar{x}$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูล

x_n คือค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี

$\bar{R}$ คือค่าเฉลี่ยของกำลังต้านของโครงสร้าง
 (Structural Resistance)

$\bar{Q}$ คือค่าเฉลี่ยของผลกระทบน้ำหนักบรรทุก (Load
 Effect)

σ_R คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Structural
 Resistance

σ_Q คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Load Effect

3.4 ความน่าจะเป็นความปลอดภัยเชิงโครงสร้าง (Probability of Structural Safety)

โดยความปลอดภัยเชิงโครงสร้างนั้นค่าความน่าจะเป็น
 ของน้ำหนักบรรทุก (Q) จะมีค่าไม่เกินกว่าค่าความ
 น่าจะเป็นความต้านทานเชิงโครงสร้าง (R) จะเรียกว่า

(Probability of Survival: P_s) (Barker Puckett, 1997)
[5] ดังสมการที่ (8)

$$P_s = P(R > Q) \quad (8)$$

และค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติของโครงสร้าง
(Probability of Failure: P_f) (Nowak and Collins, 2000) [2] ดังสมการที่ (9)

$$P_f = 1 - P_s \quad (9)$$

4. ผลจากการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกและกำลังต้านทาน (Load and Resistance, Q and R)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบ Load & Resistance ของเสาเข็ม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 m. ความยาว 30 m.

Footing	Q ก่อนทำการ ขยายฐานราก (T)	Q หลังทำการ ขยายฐานราก (T)	R (T)
P1	175.49	130	130
P2	208.12	130	130
P3	239.78	130	130
P4	245.81	130	130
P5	214.60	130	130
P6	223.59	130	130
P7	272.85	130	130
P8	246.88	130	130
P9	225.62	130	130
P10	239.48	130	130
P11	164.72	130	130
P12	172.95	130	130
P13	161.47	130	130
P14	184.46	130	130
P15	182.62	130	130

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่า Shear ที่เกิดขึ้นกับค่าความต้านทาน Shear ของฐานรากหลังจากปรับปรุงเสริมกำลัง

Footing	Q (T)	R (T)
P1	70.51	353.78
P2	121.09	230.72
P3	170.16	230.72
P4	179.51	392.23
P5	131.13	353.78
P6	145.06	353.78
P7	221.42	538.36
P8	181.16	346.09
P9	95.62	107.45
P10	169.69	323.01
P11	34.72	107.45
P12	66.57	353.78
P13	31.47	107.45
P14	54.46	107.45
P15	52.62	107.45

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่า Moment ที่เกิดขึ้นกับค่าความต้านทาน Moment ของฐานรากหลังจากปรับปรุงเสริมกำลัง

Footing	Q (T-m)	R (T-m)
P1	31.73	68.76
P2	57.52	90.88
P3	106.63	292.17
P4	56.25	85.28
P5	59.01	68.76
P6	65.28	68.76
P7	99.64	123.29
P8	74.88	182.19
P9	85.22	123.45
P10	56.00	85.34
P11	33.37	127.44
P12	29.96	68.76
P13	31.22	127.44
P14	54.02	127.44
P15	52.20	127.44

5. ผลการวิเคราะห์หาตรรกะความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง

ตารางที่ 4 ค่า Bias Factor และ COV. ของ Load [1,3,4,6]

Load	Bias Factor	COV
Dead Load	1.05	0.16
Live Load	1.05	0.30

ตารางที่ 5 ค่า Bias Factor, COV และ ค่าเป้าหมาย Reliability Index, β_{Target} ของ Resistance [1,3,4,6]

Resistance	Bias Factor	COV	β_{Target}
Moment	1.14	0.15	3.0
Shear	1.10	0.21	3.5
Compression (Pile)	1.14	0.16	2.0

ตารางที่ 6 ค่า Reliability Index (β) ของทุก Limit States

Footing	Limit States	β ก่อนเสริม กำลัง	β หลังเสริม กำลัง	P_f ก่อนเสริม กำลัง	P_f หลังเสริม กำลัง
P1	Compression	-1.30	0	0.90	0.5
	Shear	-	3.74	-	9.20E-05
	Moment	-	3.26	-	5.57E-04
P2	Compression	-1.99	0	0.97	0.5
	Shear	-	2.0	-	2.28E-02
	Moment	-	2.07	-	1.92E-02
P3	Compression	-2.52	0	0.99	0.5
	Shear	-	1.01	-	1.56E-01
	Moment	-	3.98	-	3.45E-05

ตารางที่ 6 ค่า Reliability Index (β) ของทุก Limit States (ต่อ)

Footing	Limit States	β ก่อนเสริม กำลัง	β หลังเสริม กำลัง	P_f ก่อนเสริม กำลัง	P_f หลังเสริม กำลัง
P4	Compression	-2.60	0	0.99	0.5
	Shear	-	2.35	-	9.39E-03
	Moment	-	1.89	-	2.94E-02
P5	Compression	-2.11	0	0.98	0.5
	Shear	-	2.81	-	2.48E-03
	Moment	-	0.72	-	2.36E-01
P6	Compression	-2.26	0	0.98	0.5
	Shear	-	2.60	-	4.66E-03
	Moment	-	0.24	-	4.05E-01
P7	Compression	-2.95	0	0.99	0.5
	Shear	-	2.59	-	4.80E-03
	Moment	-	0.99	-	1.61E-01
P8	Compression	-2.62	0	0.99	0.5
	Shear	-	2.01	-	2.22E-02
	Moment	-	3.63	-	1.42E-04
P9	Compression	-2.30	0	0.98	0.5
	Shear	-	0.39	-	3.48E-01
	Moment	-	1.7	-	4.46E-02
P10	Compression	-2.51	0	0.99	0.5
	Shear	-	2.00	-	2.28E-02
	Moment	-	1.92	-	2.74E-02
P11	Compression	-1.03	0	0.84	0.5
	Shear	-	3.07	-	1.07E-03
	Moment	-	4.76	-	9.68E-07

ตารางที่ 6 ค่า Reliability Index (β) ของทุก Limit States (ต่อ)

Footings	Limit States	β ก่อนเสริม กำลัง	β หลังเสริม กำลัง	P_f ก่อนเสริม กำลัง	P_f หลังเสริม กำลัง
P12	Compression	-1.24	0	0.89	0.5
	Shear	-	3.80	-	7.23E-05
	Moment	-	3.45	-	2.80E-04
P13	Compression	-0.95	0	0.82	0.5
	Shear	-	3.23	-	6.19E-04
	Moment	-	4.89	-	5.04E-07
P14	Compression	-1.51	0	0.93	0.5
	Shear	-	2.09	-	1.83E-02
	Moment	-	3.54	-	2.00E-04
P15	Compression	-1.47	0	0.92	0.5
	Shear	-	2.18	-	1.46E-02
	Moment	-	3.64	-	1.36E-04

หมายเหตุ – หมายถึงไม่มีค่าในช่วงนั้น

6. สรุปผล

จากการศึกษาการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานราก ก่อนและหลังปรับปรุงเสริมกำลัง พบว่าความน่าเชื่อถือของโครงสร้างฐานรากก่อนปรับปรุงนั้นมีค่าน้อยมาก โดยที่ฐานราก P3 P4 P7 P8 P10 มีค่า Probability of Failure มากที่สุดอยู่ที่ 0.99 เนื่องจากเป็นฐานรากที่มีน้ำหนักที่มากกระทำมากหากเทียบกับฐานรากอื่น โดยหากไม่ทำการปรับปรุงเสริมกำลังจะทำให้มีโอกาสในการวิบัติมาก ซึ่งหลังจากการปรับปรุงเสริมกำลังแล้ว

พบว่าค่า Probability of Failure น้อยที่สุดคือ P13 มีความน่าเชื่อถืออยู่ที่ 5.04×10^{-7} และฐานรากอื่นๆ ที่ได้รับการเสริมกำลังปรับปรุงยังมีค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้างที่มากขึ้น ซึ่งทำให้โครงสร้างโดยรวมของอาคารมีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอความขอบคุณ บริษัท แพลน คอนซัลแตนท์ส์ จำกัด บริษัท ปทุม เพอร์นิเจอร์ (1994) จำกัด เป็นอย่างสูงสำหรับข้อมูลต่างๆที่ครบถ้วน และขอบคุณนายวสันต์ แสงศรี และ นายพัฒนายุ ภูผาสวรรณ และรวมถึงบุคลากรทุกท่านของบริษัทที่ให้ความรู้ต่างๆ มากมายซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องทำให้บทความฉบับนี้สมบูรณ์ และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- (1) AASHTO, 1994. *LRFD Bridge Design Specifications*, 1st ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- (2) Andrzej Nowak, Kevin Collins, 2000. *Reliability of Structures*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- (3) Bruce Ellingwood, *Development of a probability based load criterion for American national standard a58*.
- (4) B. Scott, B. J. Kim, R. Salgado M. ASCE, 2003. *Assessment of Current Load Factors for Use in Geotechnical Load and Resistance Factor Design*.
- (5) Richard M. Barker, Jay A. Puckett, 1997. *Design of Highway Bridges*. John Wiley & Sons, Inc.
- (6) Portland Cement Association. *Notes on ACI 318-89, building code requirements for reinforced concrete* Dissertation-Doctor of Philosophy, The Univ.
- (7) พันเอก วินัฐ อินทราสุวรรณ, 2548. การใช้เข็มไมโครแบ็กปีนฐานราก (Solving Foundation Settlement Problem by Using Micro Piles), *วารสารวิชาการ กองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า*, ปีที่ 3, พ.ศ. 2548.

การศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการเดินระบบเมมเบรนและ
โฟโตคะตะไลติกเมมเบรนเพื่อบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล

The Study of the Optimum Contact Time of Membrane and Membrane
Photo Catalytic Reactor for Hospital Wastewater Treatment

วัสสา คงนคร^{1*}
อมรรัตน์ หวลกะสิน¹
ปรียา หละดำ¹
ศศิวิมล สมณกิจ¹
มณฑนา บริพันธ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²สถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

*Corresponding Author. Email : Watsa.k@psu.ac.th

(Received: August 16, 2018; Revised: September 28, 2018; Accepted: October 12, 2018)

บทคัดย่อ : บทความนี้เป็นการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ โดยทำการผลิตเมมเบรนเซรามิกส์และเมมเบรนโฟโตคะตะไลติกที่ใช้เมมเบรนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทำงานร่วมกับแสงยูวีในการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งระบบเมมเบรนกรองเป็นแบบ Outside-in โดยใช้อัตราการไหลที่ศึกษาแตกต่างกัน คือ 38 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ และระยะเวลาสัมผัสเป็น 1.25 2.6 และ 5.3 นาที ตามลำดับ พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการบำบัด คือ 1.25 นาที ที่อัตราการไหล 120 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีค่าฟลักซ์เป็น 198 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของระบบบ่อเติมอากาศ ระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน คิดเป็นร้อยละ 78.13 79.69 และ 94.14 ตามลำดับ และไม่พบโคลิฟอร์มทั้งหมดและพีคัลโคลิฟอร์มทั้งหมดในระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนเนื่องจากกลไกการแตกตัวของไฮดรอกซิลเรดิคัลทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และจุลินทรีย์โดยตรงโดยมีแสงยูวีเป็นตัวร่วมในปฏิกิริยา จึงทำให้มีค่าซีโอดีต่ำสุดและไม่พบเชื้อโรค

คำสำคัญ: เมมเบรน โฟโตคะตะไลติกเมมเบรน น้ำเสียโรงพยาบาล ประสิทธิภาพของระบบ

Abstract : This article is to study the optimum contact time of membrane and photocatalytic membrane reactor (PMRs) systems for hospital wastewater treatment. The wastewater is collected from Songklanagarind Hospital. The ceramic membrane and photocatalytic membrane by titanium dioxide are prepared. Membrane reactor system used ceramic membrane with UV light to treatment. The PMRs used the membrane coating with titanium dioxide combined with UV light. The filtration system was outside-in mode. The different flow rates of 38, 60 and 120 ml per minute, respectively. The contact time was 5.3, 2.6 and 1.25 minutes, respectively. The study found that the optimal contact time was 1.25 minutes at 120 ml per minute and flux obtained about 198 LMH. COD removal efficiency of the aerated lagoon, membrane and PMRs systems were 78.13%, 79.69% and 94.14%, respectively. Total coliforms and faecal coliforms were not found in the PMRs. This is due to the hydroxyl radical breakdown mechanism, which reacts directly by UV light with organic matter and microorganisms.

Keywords: Membrane, Photocatalytic Membrane, Hospital Wastewater, Performance Efficiency

1. บทนำ

ปัจจุบันการเข้าถึงการรักษาพยาบาลเพิ่มสูงขึ้น วัฒนาการทางการแพทย์เพิ่มสูงขึ้นเพื่อรองรับการพัฒนาคุณภาพชีวิตให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในกิจกรรมการให้บริการทางการแพทย์ย่อมก่อให้เกิดของเสียเกิดขึ้นโดยน้ำเสียเป็นกลุ่มหลักของโรงพยาบาล ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดเพียง ร้อยละ 72.8 และไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ร้อยละ 22 ซึ่งคิดเป็นการบำบัดด้วยระบบแบบคลองวนเวียน บ่อฝังถึงกรองไร้อากาศ ระบบตะกอนเร่งและระบบบ่อเติมอากาศ คิดเป็น ร้อยละ 55.7 26.3 11.7 5.3 และ 1 ตามลำดับ [1] ซึ่งการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลนิยมใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากคลอรีนสามารถทำลายเชื้อโรคได้มากถึง 99% แต่เป็นที่ทราบกันดีว่า คลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั่วไป [2] นอกจากนี้คลอรีนยังเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้หลายประเทศเริ่มมีการศึกษาหาทางเลือกใหม่ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลที่มีประสิทธิภาพดีกว่าและมีอันตรายน้อย

กว่า เช่น การใช้โอโซน การใช้โอโซนเป็นต้น [3-5] ในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา งานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีนาโนวัสดุได้มีการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษสิ่งแวดล้อม ซึ่งในที่นี้ได้นำเทคโนโลยีเมมเบรนร่วมกับยูวีและเมมเบรนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัสดุนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการเดินระบบและศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และการฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการนำเทคโนโลยีเมมเบรนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลต่อไป

2. ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม

2.1 น้ำเสียจากโรงพยาบาล

น้ำเสียจากโรงพยาบาลส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการรักษาผู้ป่วยและกิจกรรมสนับสนุนการให้บริการต่างๆ ภายในโรงพยาบาล ปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำเสียเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกระบบบำบัดน้ำเสีย ดังนี้

2.1.1 ปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ

ปริมาณน้ำเสียในโรงพยาบาลมีความสำคัญต่อการออกแบบและควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียและการพิจารณากระบวนการระบายน้ำเสียซึ่งแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบระบบท่อแยก และแบบการระบายน้ำเสียรวมกับน้ำฝน โดยปัจจุบันโรงพยาบาลที่ศึกษาในที่นี้เป็นระบบท่อแยก

ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นอยู่กับขนาดของโรงพยาบาล คือ จำนวนเตียงและจำนวนผู้รับบริการ โดยทั่วไปโรงพยาบาลมีน้ำเสียเฉลี่ย 800 ลิตรต่อเตียงต่อวัน [6] 660-1,500 ลิตรต่อเตียงต่อวัน [7]

2.1.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสีย

ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่เกิดจากโรงพยาบาลจะมีลักษณะสมบัติคล้ายกับน้ำเสียที่เกิดจากชุมชนในลักษณะคุณสมบัติกายภาพและเคมี แต่จะมีลักษณะพิเศษที่สำคัญ คือ สารเคมี และส่วนประกอบของกลุ่มยา กลุ่มฮอร์โมน และเชื้อโรคที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคที่สูงกว่าน้ำเสียชุมชน โดยทั่วไปเชื้อก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียด้วยระบบบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ 2 ประการ [8] ได้แก่

(1) การกำจัดเชื้อก่อโรคด้วยการบำบัดน้ำเสียโดยตรง เช่น ถังแบบแอนแอโรบิก สามารถลดปริมาณเชื้อก่อโรคโดยการตกตะกอน และการฆ่าเชื้อโรคลดปริมาณพยาธิได้ร้อยละ 70 ถังเติมอากาศสามารถลดเชื้อก่อโรคโดยวิธีปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและแสงแดด เป็นต้น ถังตกตะกอน สามารถกำจัดเชื้อก่อโรคจะเกิดจากการตกตะกอนพร้อมกับของแข็งในถัง โดยปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียของระบบบำบัด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียของระบบบำบัดทั่วไป [9]

พารามิเตอร์	ปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำเสีย		การกำจัด	
	ต่ำสุด (MPN/100 mL)	สูงสุด (MPN/100 mL)	การบำบัดขั้นต้น (ร้อยละ)	การบำบัดขั้นที่ 2 (ร้อยละ)
โคลิฟอร์มทั้งหมด	1×10^6	4.9×10^7	< 10	90 – 99
ฟีคัลโคลิฟอร์ม	3.4×10^5	4.5×10^6	35	90 – 99

(2) การกำจัดเชื้อก่อโรคที่หลงเหลือจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยตรงด้วยกระบวนการฆ่าเชื้อก่อโรคในขั้นตอนสุดท้ายก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น การใช้คลอรีน ยูวี และโอโซน [7] เป็นต้น

ซึ่งการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคได้มีการศึกษาเพิ่มขึ้น [10, 11] แต่ด้วยระบบมีราคาแพง โดย Ferret et al. [10] ประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยการทำนายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบโอโซนในการทำลายเชื้อโรคจากโรงพยาบาล พบว่าราคาที่เหมาะสมอยู่ที่ 3.2 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งถือว่าสูงเมื่อเทียบกับการศึกษาโดยหน่วยงานวิจัยพลังงานและพัฒนาแห่งรัฐนิวยอร์ก [12] ที่ประเมินราคาค่าใช้จ่ายในการฆ่าเชื้อโรคของการใช้สารคลอรีนและยูวีอยู่ที่ 0.41 และ 0.52 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

2.2 กระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนเป็นการกรองผ่านเยื่อแผ่นโดยอาศัยแรงดันขับเคลื่อน ซึ่งมีหลายขนาดแบ่งตามประเภทของรูพรุนและแรงดันขับเคลื่อน เช่น ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน เป็นต้น โดยในที่นี้ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชัน

2.2.1 ไมโครฟิลเตรชัน

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อแยกอนุภาคขนาดไมครอน หรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบนี้สามารถกักอนุภาคแขวนลอยและจุลชีพได้ โดยมีขนาด

ช่องว่าง (Pore size) ประมาณ 0.03 – 10 ไมครอน ค่า MWCO (Molecular weight cut off) มากกว่า 100,000 ดาลตัน ใช้ความดันต่ำประมาณ 100 – 400 KPa (15 – 60 psi) โดยประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย [13]

2.2.2 ระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน

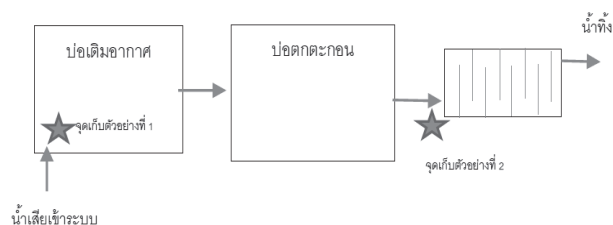
เป็นวิธีใหม่ที่ได้รับความสนใจในระดับอุตสาหกรรมเป็นวงกว้าง โดยกระบวนการเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสและกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน ซึ่งกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นกระบวนการดูดซับโฟตอน (hv) ที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำประกอบด้วย ระดับพลังงาน 2 ระดับ คือแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบคอนดักชัน (Conduction band) โดยมีการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรเจนและอิเล็กตรอนภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งพบว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบเมมเบรนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย [14, 15]

3. วิธีการทดลอง/วิธีการวิจัย

3.1 การเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

3.1.1 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

เก็บน้ำตัวอย่างแบบจ้วงที่จุดปลายท่อน้ำเสียเข้าระบบ และจุดน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเติมคลอรีนของระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ดังภาพที่ 1 โดยระบบบำบัดน้ำเสียเป็นแบบระบบบ่อเติมอากาศตามด้วยบ่อตกตะกอนและบ่อเติมคลอรีน ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดปริมาตรและระยะเวลากักพัก ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 1 จุดเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ขนาดและปริมาตรของระบบบำบัดน้ำเสียแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

หน่วยปฏิบัติการ	ขนาด (กxยxล)	ปริมาตร (ลบ.ม.)	ระยะเวลากักพัก (วัน)
บ่อเติมอากาศ	60x116x3.5	24,360	12.8
บ่อตกตะกอน	60x85x2.0	10,200	5.4
บ่อเติมคลอรีน	4x6x1.5	36	0.02

3.1.2 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

นำตัวอย่างมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังนี้ คือ ค่าพีเอช ค่าตะกอนแขวนลอย ค่าความขุ่น ค่าความสกปรกของสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี โคลิฟอร์มทั้งหมด และพีคัลโคลิฟอร์ม ตามลำดับ โดยวิธีวิเคราะห์ลักษณะตัวอย่างน้ำเสียเป็นไปตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย [16] ตามข้อกำหนดของค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด [17]

3.2 การเตรียมระบบเมมเบรนและโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนและการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยา

เมมเบรนเซรามิกระดับไมโครฟิลเตรชันถูกเตรียมด้วยโซลูชันผสมร่วมกับเบนโทไนท์ที่อัตราส่วนร้อยละ 93 ต่อ 7 โดยน้ำหนัก แล้วบดตัวให้ละเอียดโดยใช้หลักการหมุนของหม้อบดเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง แล้วผสมเป็นสารละลายใส่ในเบ้าหลอมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำตัวอย่างเซรามิกเมมเบรนไปอบแห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 110°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าพ่นที่อุณหภูมิ 1,100°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 4 °C ต่อนาที [18]

การเตรียมระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน โดยนำเมมเบรนที่ได้จากการเตรียมข้างต้นมาปิดผิวภายนอกเมมเบรนด้วยพาราฟิล์มแล้วเทสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในเมมเบรน 30 วินาที แล้วเทออกจำนวน

10 รอบ นำไปอบที่ 80°C เป็นเวลา 5 นาที ทำซ้ำ 10 รอบ เมื่อครบ 10 รอบ นำไปอบที่ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [19] แล้วติดตั้งหลอดไฟอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ใช้บรรจุในเมมเบรนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียของทั้งสองระบบ

การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยานำตัวอย่างของเซรามิกเมมเบรนที่เคลือบและไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์วิเคราะห์ด้วยด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, WEGA/TESCAN)

3.3 การเดินระบบเมมเบรนและโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน

3.3.1 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ระบบเมมเบรนและโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนป้อนตัวอย่างน้ำเสียด้วยเครื่องสูบน้ำแบบปั๊มรีดสายยางด้วยอัตราการไหล 38 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดภายในเมมเบรนเพื่อควบคุมให้ระยะเวลาสัมผัสในการฆ่าเชื้อโรคด้วยหลอดไฟอัลตราไวโอเลต อยู่ที่ 5.3 2.6 และ 1.25 นาที ตามลำดับ โดยเมมเบรนจะถูกบรรจุในถังปฏิกรณ์ขนาด 8 ลิตร แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนและโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน

3.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยระบบเมมเบรนและโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน

เป็นการนำตัวอย่างน้ำเสียจาก 2 จุด คือ น้ำเสียที่เข้าระบบ และน้ำเสียก่อนเข้าบ่อเติมคลอรีนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และการฆ่าเชื้อโรคด้วยระบบเมมเบรนร่วมกับแสงอัลตราไวโอเลตและโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน ตามลำดับ

3.3.3 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่าง

การเดินระบบทุกระบบที่ดำเนินการทดลองจะเก็บตัวอย่างที่น้ำปลายท่อเพมิเอทที่ผ่านการบำบัดตามเวลา ดังนี้คือ ช่วงเวลาที่ 0 1 3 5 15 30 45 และ 60 นาที ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางเคมี คือ ค่าพีเอช ค่าตะกอนแขวนลอย ค่าความขุ่น ค่าความสกปรกของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี ตามลำดับ และตัวอย่างที่เวลา 0 1 5 และ 60 นาที วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางชีวภาพ คือ โคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัล โคลิฟอร์ม ตามลำดับ

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลสงขลานครินทร์

โรงพยาบาลสงขลานครินทร์เป็นโรงพยาบาลขนาด 853 เตียง มีระบบท่อรวบรวมน้ำเสียเป็นแบบระบบท่อแยก มีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็น 1,600 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นอัตราการผลิตน้ำเสียอยู่ที่ 1.88 ลิตรต่อเตียงต่อวัน โดยสูงกว่าค่าเฉลี่ยโดยทั่วไปเนื่องจากเป็นโรงพยาบาลรักษาผู้ป่วยระดับตติยภูมิที่มีจำนวนผู้ป่วยนอกค่อนข้างสูง ซึ่งลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนและหลังบำบัดแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 46.08 และประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นอยู่ที่ร้อยละ 76.9 และ 81.3 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ ถึงแม้ว่าน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าต่ำกว่าความสามารถรองรับ

น้ำเสียที่อยู่ 1,905 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [20] นั้น แต่พบว่าระยะเวลาที่ตกตะกอนนั้นต่ำกว่าช่วงค่าที่กำหนด คือ น้อยกว่า 10 วัน ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำเนื่องจากระบบบำบัดแบบบ่อเติมอากาศไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความหนืดสูงหรือย่อยสลายได้ยากซึ่งมักปนเปื้อนในน้ำเสียโรงพยาบาล [11] ค่าโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์มถึงแม้ไม่มีมาตรฐานกำหนดแต่ไม่ควรตรวจพบค่าดังกล่าว

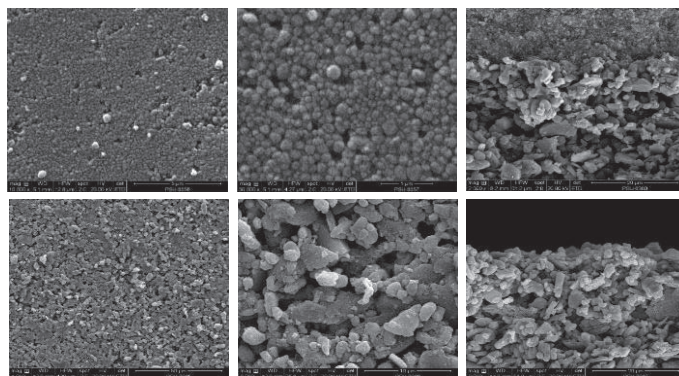
ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล สงขลาครินทร์

พารามิเตอร์	น้ำเสีย ก่อนเข้า ระบบ	น้ำทิ้ง หลังออก ระบบ	ประสิทธิภาพ ระบบ (%)	ค่ามาตรฐาน
pH	6.78	6.93	-	5-9
SS (mg/L)	117	27	76.92	ไม่เกิน 30
COD (mg/L)	173.6	93.6	46.08	ไม่กำหนด
Turbidity (NTU)	107	20	81.31	ไม่กำหนด
TCB (MPN/100mL)	1.6×10^7	27	99.99	ไม่กำหนด
FCB (MPN/100 mL)	1.6×10^7	22	99.99	ไม่กำหนด

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเมมเบรน

ภาพถ่ายโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเมมเบรนแบบเคลือบและไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวเมมเบรนแสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งพบความหนาของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเป็น 9.5 ไมโครเมตรที่แยกเห็นชั้นชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hamid et al. [21] ที่มีชั้นความหนาของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเป็น 6 ไมโครเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวจะมีผลต่อค่าฟลักซ์ของระบบ อีกทั้งปริมาณ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สูงขึ้นทำให้เกิด

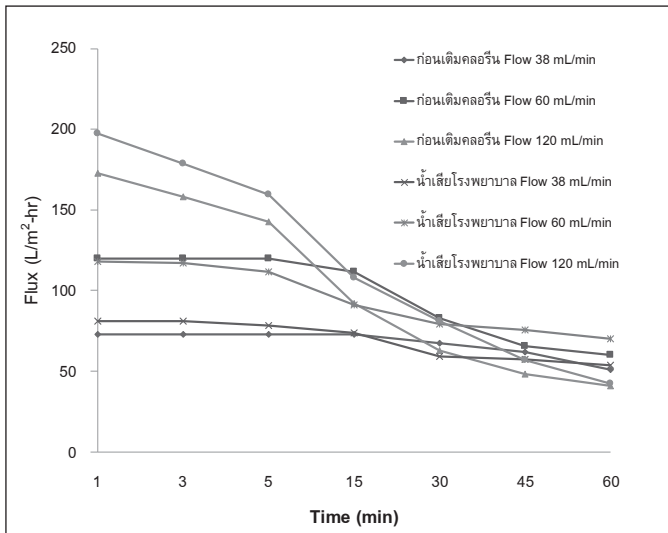
ปฏิกิริยาโฟโตคะตาไลติกได้ดีมากขึ้นและเพิ่มบทบาทในการย่อย (Catalytic Activity) สูงขึ้น ทำให้สามารถทำลายสารอินทรีย์และฆ่าเชื้อโรคได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเมมเบรนแบบเคลือบและไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวเมมเบรน

4.3 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

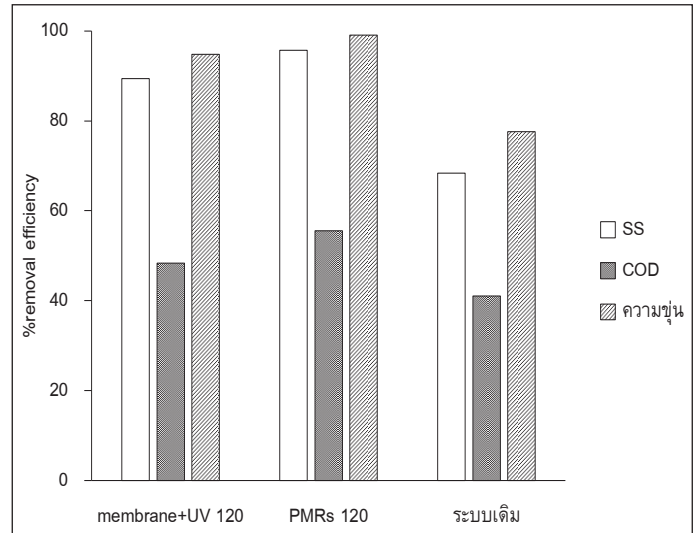
การเดินระบบ จากภาพที่ 4 พบว่าน้ำเสียก่อนเข้าระบบและน้ำเสียที่ผ่านระบบก่อนเติมคลอรีนให้ค่าฟลักซ์ที่สูงสุดที่อัตราการไหลที่ 120 มิลลิลิตรต่อนาที เป็น 198 และ 175 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งค่าฟลักซ์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลาอันเกิดจากการอุดตันที่ผิว [14] โดยจากการทดสอบสรุปได้ว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมอยู่ที่ 1.25 นาที อัตราการไหลที่ 120 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาที่เหมาะสมในการเดินระบบควรอยู่ที่ 15 นาที



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ต่อเวลาของน้ำเสียก่อนและหลังบำบัด ที่อัตราการไหล 38 60 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน

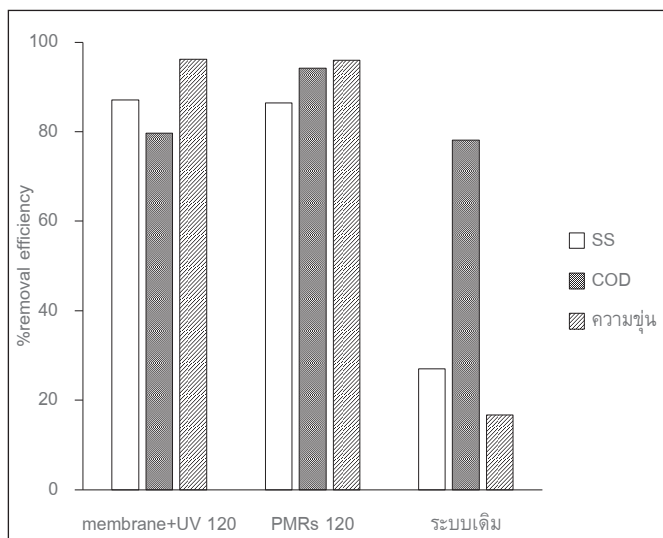
การศึกษาประสิทธิภาพของระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน ดังภาพที่ 5 โดยพบว่าระบบเมมเบรนสามารถกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดีและค่าความขุ่นได้ร้อยละ 89.42 48.39 และ 94.83 ตามลำดับ โดยระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบเมมเบรน ซึ่งสามารถกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดีและค่าความขุ่นได้ร้อยละ 95.73 55.53 และ 99.08 ตามลำดับ



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดีและค่าความขุ่นของน้ำเสียระบบเมมเบรน ระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนและระบบเดิมของน้ำเสียโรงพยาบาล

4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งก่อนการเติมคลอรีนด้วยระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้งก่อนเติมคลอรีน ดังภาพที่ 6 โดยพบว่า ระบบเมมเบรนสามารถกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดีและค่าความขุ่นได้ร้อยละ 87.14 79.69 และ 96.21 ตามลำดับ โดยระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า ซึ่งสามารถกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดีและค่าความขุ่นได้ร้อยละ 86.49 94.14 และ 96.92 ตามลำดับ โดยค่าซีโอดีที่ผ่านระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนนั้นยังมีค่าที่ 96.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าแข็งแขวนลอย ค่าซีโอดีและค่าความขุ่นของน้ำทั้งระบบเมมเบรน ระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนและระบบเดิมของน้ำทั้งก่อนเติมคลอรีน

จากข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งด้วยระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าระบบเมมเบรนเนื่องจากกลไกการเกิดโฟโตคะตะไลติกโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่สูงกว่า 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดช่องว่าง (hole, h^+) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์และเกิดอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นที่แถบคอนดักชัน โดยช่องว่างจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) และอิเล็กตรอนจะจับกับออกซิเจนกลายเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($^{\circ}O_2^-$) ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ในรูปของค่าซีโอดี ความขุ่นและของแข็งแขวนลอย [22, 23] อีกทั้งยังพบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำทิ้งที่ดีกว่าการบำบัดน้ำเสียโดยตรงนั้นสามารถยืนยันถึงค่าของแข็งแขวนลอยที่เข้าระบบมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ [14,15]

4.6 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของระบบ

ในการฆ่าเชื้อโรคของระบบเมมเบรน ระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนพบว่า สามารถตรวจพบค่าโคลิฟอร์มทั้งหมดในระบบเมมเบรนร่วมกับการฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวี มีค่าเป็น 8 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และไม่พบฟีคัลโคลิฟอร์ม โดยระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนไม่ตรวจพบค่าโคลิฟอร์มทั้งหมดและ ฟีคัลโคลิฟอร์ม ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการฆ่าเชื้อของระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนที่สูงกว่าระบบเมมเบรนร่วมกับรังสียูวี ทั้งนี้เพราะจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิลขึ้น ซึ่งโมเลกุลทั้งสองนี้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ว่องไวจะเข้าปฏิกิริยากับผนังเซลล์แบคทีเรีย เริ่มจากทำลายชั้น Outer Membrane จากนั้นจะซึมผ่านส่วน Peptidoglycan และสุดท้ายจะทำลายชั้น Cytoplasmic Membrane ที่ทำหน้าที่ห่อหุ้ม Cytoplasm เมื่อไม่มีสิ่งใดห่อหุ้ม Cytoplasm เซลล์ของแบคทีเรียจึงแตกเป็นผลให้เซลล์แบคทีเรียตาย และจากผลของการทำปฏิกิริยาจากการย่อย Outer Membrane และ Cytoplasmic Membrane ทำให้ได้น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา [5, 15, 24]

5. สรุปผล

จากการศึกษาโดยนำระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ โดยทำการเปรียบเทียบระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับระบบเมมเบรนและระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรน พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมอยู่ที่ 1.25 นาที อัตราการไหลที่ 120 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าเหมาะสมและประสิทธิภาพของระบบระบบโฟโตคะตะไลติกเมมเบรนสูงกว่าระบบเมมเบรนร่วมกับรังสียูวี ทั้งในส่วนของการบำบัดทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ ทั้งนี้พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียมมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของทั้งสองระบบ เพราะเมื่อน้ำขุ่นก็จะทำให้แสงส่องผ่านได้ไม่ดี ส่งผลต่อประสิทธิภาพใน

การฆ่าเชื้อโรคด้วยแต่ก็ยังถือว่ามีประสิทธิภาพดีเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานและระบบบำบัดแบบเดิม อย่างไรก็ตามควรมีการพัฒนากระบวนการที่สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยเบื้องต้น รวมถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วยเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้และขอขอบคุณสถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. บรรณานุกรม

- (1) สมชาย สกุลอริยาภรณ์, 2540. การพัฒนารูปแบบการกำจัดน้ำเสียในโรงพยาบาลของกระทรวงสาธารณสุข. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 20, ฉบับที่ 3 หน้า 65-74.
- (2) Ferlay, J., Soerjomataram, I., Ervik, M., Dikshit, R., Eser, S., and Mathers, C., 2013. Cancer Incidence and Mortality Worldwide: IARC Cancer Base No. 11.
- (3) Álvarez-Torrellas S., Peres, J.A., Gil-Ilvarez, V., Ovejero, G., and, J. García., 2017. Effective adsorption of non-biodegradable pharmaceuticals from hospital wastewater with different carbon materials. Chemical Engineering Journal, 320: 319-329.
- (4) Petri, A., Sergei, P., Timo, V., Mänttäri M., Kallioinen, M., and Marjatta, L.- K., 2018. Hospital wastewater treatment with pilot-scale pulsed corona discharge for removal of pharmaceutical residues. Journal of Environmental Chemical Engineering, 6: 1569 -1577.
- (5) Arslan, A., Veli, S., and Bingöl, D., 2014. Use of response surface methodology for pretreatment of hospital wastewater by O3/UV and O3/UV/H2O2 processes. Separation and Purification Technology, 132: 561 - 567.
- (6) กรมควบคุมมลพิษ, 2550. คู่มือการจัดการน้ำเสียอาคารประเภท ก ประเภทโรงพยาบาล ศูนย์ช่วยเหลือให้ปฏิบัติตามกฎหมายสิ่งแวดล้อม (Online) <http://www.ptech.pcd.go.th>.

- (7) Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel H. David., 2004. Wastewater engineering treatment and reuse 4th edition. Metcalf & Eddy, Inc. The McGraw-Hill Companies.
- (8) สุบัณฑิต นิมรัตน์, 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (9) สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2538. โครงการศึกษาเพื่อจัดลำดับความสำคัญการจัดการน้ำเสียชุมชน, เล่มที่ 2 ฉบับสมบูรณ์. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเทคอินเตอร์เนชั่นแนลจำกัด. หน้า 3-31 – 3-57.
- (10) Fabian, I, Kevin, S., J., Juri, L., Linda, G., Ulf, N., Thomas, A., T., Torsten, Schmidt, C., and Jochen, T., 2018. Comprehensive analysis of antagonistic endocrine activity during ozone treatment of hospital wastewater. Science of the Total Environment, 624: 1443-1454.
- (11) Ferre,-A., J., Valcárcel, Y., Negreira, N., Lempez de Alda, M., Barceló, D., Cardona, S., C., and Navarro,-L., J., 2016. Ozonation of hospital raw wastewaters for cytostatic compounds removal. Kinetic modelling and economic assessment of the process. Science of the Total Environment, 556: 70-79.
- (12) New York State Energy Research and Development Authority, 2004. Evaluation of Ultraviolet (UV) radiation disinfection technologies for wastewater treatment plant effluent.
- (13) Manouchehri, M. and Kargari, A., 2017. Water recovery from laundry wastewater by the cross flow microfiltration process: A strategy for water recycling in residential buildings. Journal of Cleaner Production, 168: 227-238.
- (14) Zhang, W., Ding, L., Luo, J., Jaffrin, M. Y., and Tang, B., 2016. Membrane fouling in photocatalytic membrane reactors (PMRs) for water and wastewater treatment: A critical review. Chemical Engineering Journal, 302: 446-458.
- (15) Chakraborty, S., Loutatidou, S., Palmisano, Gi., Kujawa, J., Mavukkandy, M. O., Al-Gharabli, S., Curcio, E., and Arafat, H.A., 2017. Photocatalytic hollow fiber membranes for the degradation of pharmaceutical compounds in wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering, 5: 5014-5024.
- (16) American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22rd Edition.

- (17) ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ลงวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2548.
- (18) Bhongsuwan, D., and Bhongsuwan, T., 2007. Slip casting of alumina for membrane application. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 6: 37-45.
- (19) Guo, B., Pasco, V., E., Xagorarakis, I., and Tarabara, V., V., 2015. Virus removal and inactivation in a hybrid microfiltration-UV process with a photocatalytic membrane. *Separation and Purification Technology*, 149; (27), 245-254.
- (20) โรสนา กาซอ, 2552. การศึกษาการจัดการน้ำเสียชุมชนในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- (21) Hamid, R., M., Mehran, A., and Toraj, M., 2018. Synthesis, characterization and performance evaluation of an optimized ceramic membrane with physical separation and photocatalytic degradation capabilities. *Ceramics International*, 44; 10281-10292.
- (22) Goswami, D.,Y., Trivedi, D.,M., and Block, S.,S., 1997. Photocatalytic disinfection of indoor air. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 119; 92-96.
- (23) Gaya, U.,I., and Abdullah, A.,H., 2008. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1; 1-12.
- (24) Kaishu Guan., 2003. Relationship between photocatalytic activity, hydrophilicity and self-cleaning effect of TiO₂/SiO₂ films, *Surface and Coatings Technology*, 191: 155-160.

คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์บทความ

วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้และผลงานทางวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ในทุกแขนง โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่มีประโยชน์ต่อการวิชาการ การพัฒนาประเทศ และงานที่สามารถประยุกต์ใช้ในทางทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงของชาติ มีกำหนดออกในเดือนธันวาคมของแต่ละปี ผู้นิพนธ์สามารถส่งบทความมาตีพิมพ์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นสมาชิกของวารสารหรือเป็นบุคลากรของกองทัพไทย

วารสารฯ รับผิดชอบต้นฉบับทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ผลงานที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ จะต้องมีความน่าสนใจ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เป็นองค์ความรู้ใหม่ หรือนำเสนอองค์ความรู้เดิมในมุมมองใหม่ ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด

วารสารฯ รับผิดชอบบทความดังต่อไปนี้

1. บทความวิจัย (Research Articles) เป็นบทความที่นำเสนอผลการดำเนินการวิจัยอย่างเป็นระบบ และได้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัย ประกอบด้วยชื่อเรื่องและรายละเอียดผู้เขียน บทคัดย่อ และเนื้อหางานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ วิธีการวิจัย ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ สมมติฐาน (ถ้ามี) ขอบเขตการวิจัย ระเบียบวิธีวิจัย ผลการวิจัย สรุปและข้อเสนอแนะ และบรรณานุกรม
2. บทความปริทัศน์ (Review Articles) เป็นบทความที่เขียนจากการรวบรวมความรู้ในเรื่องที่น่าสนใจในปัจจุบัน เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ผ่านกระบวนการ วิเคราะห์ สังเคราะห์ เปรียบเทียบ และ/หรือ วิจัย เพื่อให้เกิดเป็นองค์ความรู้ใหม่ มุมมองใหม่ ประกอบด้วย บทนำ เนื้อหา วิจัย สรุป และบรรณานุกรม

การส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

ผู้นิพนธ์สามารถส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารฯ ได้ 2 ช่องทางคือ

1. จัดส่งบทความผ่านอีเมลล์ crmajournal@crma.ac.th
2. จัดส่งบทความผ่านเว็บไซต์ <http://kmlo.crma.ac.th/journal>

การดำเนินงานของกองบรรณาธิการวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ จะจัดให้มีการกลั่นกรองเพื่อคัดเลือกรับบทความที่อยู่ในขอบข่ายของการตีพิมพ์ของวารสารฯ และมีระดับคุณภาพที่ยอมรับได้ โดยบทความที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ ต้องผ่านเกณฑ์การประเมินจากผู้กลั่นกรองและประเมินบทความอย่างน้อย 2 คนจากผู้กลั่นกรองและประเมินบทความจำนวน 3 คนและ/หรือ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นรายกรณี สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับอย่างมีเงื่อนไข ผู้นิพนธ์ของบทความนั้นต้องดำเนินการแก้ไขให้เสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่กองบรรณาธิการระบุ เมื่อบทความได้ถูกตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารฯ แล้วบทความดังกล่าวจะถูกนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ของวารสารฯ ด้วย ผู้นิพนธ์แต่ละคนจะได้รับเล่มวารสาร ที่มีบทความของตนอยู่ จำนวนคนละ 1 เล่ม การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง กองบรรณาธิการฯ ขอสงวนสิทธิ์ในการรับหรือปฏิเสธบทความเข้าสู่กระบวนการประเมินคุณภาพ โดยผู้ทรงคุณวุฒิ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณากลั่นกรองคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Double Blind Review) และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการฯ

ลิขสิทธิ์

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสารฯ

บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

1. ผู้นิพนธ์ต้องรับรองว่าผลงานที่ส่งมานั้นเป็นผลงานใหม่และไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน
2. ผู้นิพนธ์ต้องรายงานข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นจากการทำวิจัย ไม่บิดเบือนข้อมูล หรือให้ข้อมูลที่เป็นเท็จ
3. ผู้นิพนธ์ต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่น หากมีการนำผลงานเหล่านั้นมาใช้ในผลงานของตนเอง รวมทั้งจัดทำบรรณานุกรมท้ายบทความ
4. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ใน “คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์บทความ”
5. ผู้นิพนธ์ที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคน ต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในการดำเนินการวิจัยจริง
6. ผู้นิพนธ์ต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัยนี้ (ถ้ามี)
7. ผู้นิพนธ์ต้องระบุผลประโยชน์ทับซ้อน (ถ้ามี)

บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการ (Duties of Editors)

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาคุณภาพของบทความ เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารฯ
2. บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลผู้นิพนธ์ และผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ แก่บุคคลอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ
3. บรรณาธิการต้องตัดสินใจคัดเลือกบทความมาตีพิมพ์หลังจากผ่านกระบวนการประเมินบทความแล้ว โดยพิจารณาจากความสำคัญ ความใหม่ ความชัดเจน และความสอดคล้องของเนื้อหา กับนโยบายของวารสารฯ
4. บรรณาธิการต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่อื่นมาแล้ว

5. บรรณาธิการต้องไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความ เพราะความสงสัยหรือไม่แน่ใจ โดยให้ผู้นิพนธ์หาหลักฐานมาพิสูจน์ข้อสงสัยนั้นๆ ก่อน
6. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ ผู้ประเมิน และทีมผู้บริหาร
7. บรรณาธิการต้องมีการตรวจสอบบทความในด้านการคัดลอกผลงานผู้อื่น (Plagiarism) อย่างจริงจัง เพื่อให้แน่ใจว่าบทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ไม่มีการคัดลอกผลงานของผู้อื่น หากตรวจพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่นในกระบวนการประเมินบทความ บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการประเมิน และติดต่อผู้ประพันธ์หลักทันที เพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ “ตอบรับ” หรือ “ปฏิเสธ” การตีพิมพ์บทความนั้นๆ

บทบาทและหน้าที่ของผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

1. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องรักษาความลับ และไม่เปิดเผยข้อมูลบางส่วนหรือทุกส่วนของบทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาแก่บุคคลอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ (Confidentially)
2. หลังจากได้รับบทความจากบรรณาธิการ และผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ ตระหนักว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ เช่น เป็นผู้ร่วมโครงการ หรือรู้จักผู้นิพนธ์เป็นการส่วนตัว หรือเหตุผลอื่นๆ ที่ทำให้ไม่สามารถให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอย่างอิสระได้ ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความควรแจ้งให้บรรณาธิการทราบ และปฏิเสธการประเมินบทความนั้นๆ
3. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความชำนาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้นๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับในการตัดสินบทความ
4. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องระบุผลงานวิจัยที่สำคัญๆ และสอดคล้องกับบทความที่กำลังประเมิน แต่ผู้นิพนธ์ไม่ได้อ้างถึงเข้าไปในการประเมินบทความด้วย นอกจากนี้หากมีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานอื่นๆ ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบด้วย



แบบฟอร์มขอส่งบทความเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า

ตำแหน่ง / สังกัด

ตำแหน่งทางวิชาการ ☐ ผศ. ☐ รศ. ☐ ศ.

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย (Research Article) ☐ บทความปริทัศน์ (Review Article)

ชื่อเรื่องภาษาไทย.....

.....

คำสำคัญ

ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ.....

.....

Keywords (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียน (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อผู้เขียน (ภาษาอังกฤษ).....

.....

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้..... หมู่ที่..... ซอย..... ถนน.....

ตำบล..... อำเภอ..... จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์.....

โทรศัพท์..... โทรศัพท์มือถือ..... โทรสาร.....

E-mail.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้

1. เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความ (ถ้ามี) จริง
2. ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด

ลงนาม.....

(.....)



จักปกป้องดาวแดนทั่วทุกทิศ
 ภารกิจเกียรติภูมิสืบประสงค์
 เพื่อชาติไทยยืนหยัดอย่างมั่นคง
 คุณธรรมพร้อมธำรงวิชาการ

