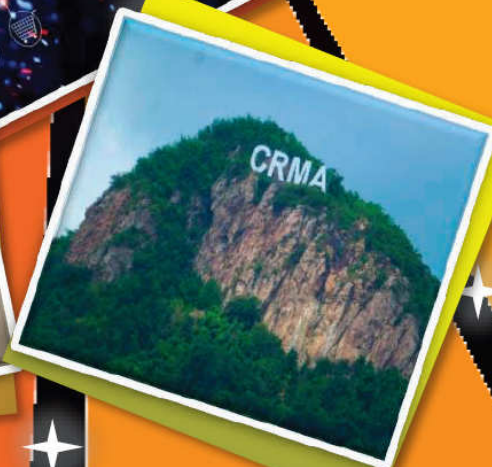
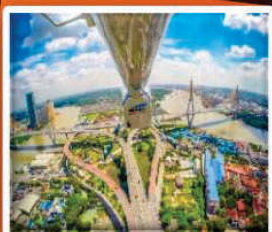
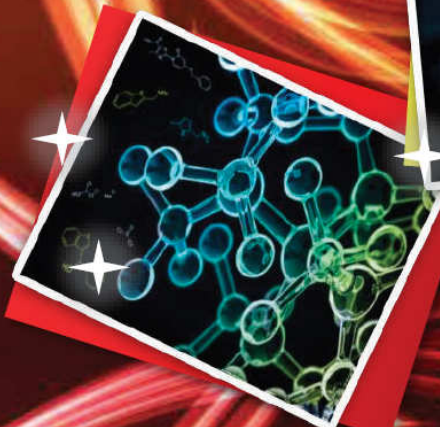




# วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ปีที่ 17 (2562)

**CRMA Journal Vol.17 (2019)**



ISSN 2350-9600



วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปีที่ 17 (2562)

CRMA Journal Vol.17 (2019)

<http://veel.crma.ac.th/Journal>

ISSN 2350-9600

#### จัดทำโดย

สภาคณาจารย์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์

พลเอกหญิง ศ.ดร.สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า  
กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี  
ที่ปรึกษา

|                     |               |
|---------------------|---------------|
| พลโท ญัฐวุฒิ        | ขุนหะนันท์    |
| พลตรี ศุภชัย        | ศรีหอม        |
| พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย | สุขแสงพนมรุ่ง |

#### วัตถุประสงค์

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

#### ขอบเขต

1. การวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. การวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงทางทหาร

#### กำหนดการออกวารสาร

ปีละ 1 ฉบับ ในเดือนธันวาคม

#### บรรณาธิการ

พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนังสือ

#### กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ  
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช  
พลอากาศตรี ศ.ดร.นพพล หาญกล้า  
ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์  
ศ.ดร.ปิติ สุนทรสุขกุล  
ศ.ดร.อรรถกร เก่งพล  
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์  
ผศ.ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์  
ผศ.ดร.ธีรพจน์ เวศพันธุ์  
ผศ.ดร.สราวุธ เวชกิจ  
พันเอก ผศ.ดร.ชวน จันทวาลย์  
พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง  
พันเอก รศ.ดร.ปรีชา อภิวัฒน์ตระกูล  
พันเอก ผศ.ดร.ญัฐพร นุตยะสกุล  
พันเอก รศ.ดร.นราเทพ พุกกะหิรัญ

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

#### ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (ภายนอก)

พันเอก ผศ.ดร.ประเวทย์ มงคลศิริ  
พันเอก ดร.สมโภช ปิ่นทังกูร  
ศ.ดร.จงรักษ์ ผลประเสริฐ  
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์  
รศ.ดร.พานิช อินต๊ะ  
รศ.ดร.สุวรรณา บุญตานนท์  
รศ.ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล

ข้าราชการบำนาญ  
กรมแผนที่ทหาร  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
มหาวิทยาลัยมหิดล  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รศ.ดร.สุนิตย์ สุขสำราญ  
รศ.ชาติ เจียมไชยศรี  
ผศ.ดร.ตระการ ประภัสพงษา  
ผศ.ดร.อรพิน โกมุติบาล  
ผศ.ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์  
ผศ.ดร.ธีรพจน์ เวศพันธ์  
ผศ.ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์  
ผศ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ

ผศ.ดร.กำพล วรดิษฐ์  
ผศ.ดร.วราภรณ์ กลิ่นบุญ  
ผศ.ดร.นิศากร สมสุข  
ผศ.ดร.รัฐศักดิ์ พรหมมาศ  
ผศ.ดร.อมร ไชยสัตย์  
ผศ.ดร.ประมวล ชูรัตน์  
ดร.สายสุนีย์ จำรัส  
ดร.ศุภิดา สังข์สุนทร  
ดร.จิระพงษ์ พนาวงศ์  
ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน  
ดร.กุลปราโมช ประทุม

ดร.สุภาวดี ปาทยานานนท์  
ดร.อรุณรัตน์ คำแหงพล  
Prof. Fujihiko Matsumoto  
Dr. Takeshi Ohbuchi

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
มหาวิทยาลัยมหิดล  
มหาวิทยาลัยสวนดุสิต  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี  
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย  
มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา  
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์  
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา  
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ  
Asia-Pacific Space Cooperation Organization,  
Beijing, China  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร  
National Defense Academy, Japan (Volunteer)  
National Defense Academy, Japan (Volunteer)

#### ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (ภายใน)

พันเอก ผศ.ภาคภูมิ รุจิเสนีย์  
พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนึ่งสี  
พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง  
พันเอกหญิง ผศ.ดร.กฤตยาภรณ์ เจริญผล  
พันโทหญิง รศ.ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา  
พันตรีหญิง ดร.ปวีณา วัตบัว

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

#### คณะผู้จัดทำวารสาร

พันเอก ผศ.ภาคภูมิ รุจิเสนีย์  
พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง  
พันเอกหญิง ผศ.ดร.กฤตยาภรณ์ เจริญผล  
พันโทหญิง พัดชา เพิ่มพิพัฒน์  
พันตรีหญิง ดร.ปวีณา วัตบัว  
ร้อยโทหญิง กังสดาล อินทกุล  
ร้อยโทหญิง สาริศา เขียววงา

พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนึ่งสี  
พันเอกหญิง ผศ.วาสนา รุจิเสนีย์  
พันโทหญิง รศ.ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา  
พันโท ฐานันท์ มานวงศ์  
พันตรี กนก เจริญชัยประกิจ  
ร้อยโท ดร.ปริญญญา เกียรติภัชชัย  
ร้อยตรีหญิง ปิพิชญา พันธระ

## บทบรรณาธิการ

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

ผลของการพัฒนาอย่างจริงจัง ทำให้ในปีเดียวกันนั้น “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” ได้รับการคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-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 และอยู่ในเกณฑ์ที่จะได้รับการคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูลระดับสูงขึ้นต่อไปคือ ASEAN Citation Index (ACI)

สำหรับ “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า พ.ศ. 2562” ฉบับนี้มีบทความทางวิชาการจากผลงานวิจัยจำนวน 14 บทความ เป็นผลงานอาจารย์และนักวิชาการภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า 5 บทความ เป็นผลงานอาจารย์และนักวิชาการภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าร่วมกับสถาบันภายนอก 1 บทความ และเป็นผลงานอาจารย์และนักวิชาการสถาบันภายนอก 8 บทความ ทั้งหมดผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) แล้ว

ผู้สนใจ “วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” และวารสารวิชาการของโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าฉบับอื่น ทั้งเก่าและใหม่ ได้แก่ “วารสารวิชาการ สภาอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า” ฉบับปีที่ 1-16 สามารถอ่านและดาวน์โหลดได้ทาง <http://veel.crma.ac.th/Journal> หรือ [www.crma.ac.th](http://www.crma.ac.th) สำหรับอาจารย์และนักวิชาการที่สนใจส่งบทความทางวิชาการสามารถติดต่อกับกองบรรณาธิการได้ทาง URL นี้เช่นเดียวกัน

พันเอก รศ.ดร.

(ผเดิม หนังสือ)

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. 037-393-484 โทรมือถือ 081-832-5860





# สารบัญ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ☆ การลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงโดยใช้งานตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า<br>สูงสุดภายในกองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า<br>พันตรี พงศ์กฤษณ์ รุ่งสุข                                                                                                               | 1  |
| ☆ การออกแบบโปรแกรมด้วยภาษา Python เพื่อใช้งานร่วมกับโปรแกรม<br>Quantum Geographic Information System ในการวางแผนติดตั้งวิทยุ<br>ถ่ายทอดทางยุทธวิธี Design of Python Programs Used with Quantum<br>Geographic Information System in Combat Microwave Link Planning<br>พันตรี กนก เจริญชัยประกิจ | 19 |
| ☆ An Adaptively Biased Linear MOS Transconductor for Low Power Application<br>Major Assistant Professor Pravit Tongpoon                                                                                                                                                                        | 32 |
| ☆ A Practical System for Pig Farm Wastewater Treatment<br>Jirayu Pairin<br>Pichaya Rachdawong<br>Chackrit Nuengchamong                                                                                                                                                                         | 42 |
| ☆ การประยุกต์ใช้สารที่มีคุณสมบัติการวาวแสงในการตรวจหาวัตถุระเบิดทีเอ็นที<br>พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืองศักดิ์ อยู่ชา<br>พันโทหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมวรรณ ปานสีทา<br>พันตรีหญิง เพ็ญธนา สมานพันธุ์<br>ศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินธิ์                                             | 49 |
| ☆ การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาแบบอัตโนมัติของกองทัพอากาศ<br>นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ อนุรักษ์ โชติติลล                                                                                                                                                                                  | 61 |
| ☆ การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศในเวลาจริงจากกล้องมัลติสเปกตรัมสำหรับการเกษตร<br>เรืออากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์                                                                                                                                                            | 75 |

- ☆ การประยุกต์ใช้แบบจำลองพหุคูณกำลังประเภทพหุคูณใช้เส้นเปลี่ยน สูญสั่นไปหรือมีราคาต่ำ (ส.ส.ต.) 86  
นาวาโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนินทร์รัฐ สิทธิเวชธนาศิริ
- ☆ การศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้ในระบบชลประทานไร่นา 100  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวัฒน์ ปลาเงิน  
พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวน จันทวาลย์
- ☆ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของกระดาษเคลือบสารโพลีเอสเตอร์คลอไรด์กับปริมาณความชื้น  
เมล็ดข้าวเปลือก 117  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม
- ☆ กลไกการบินแบบแมลงสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก 129  
นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมษันท์ ธรรมวิชัย
- ☆ ผลการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุลที่มีต่อทักษะการโต้แย้ง  
ทางวิทยาศาสตร์ และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 140  
โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก  
เรือเอกหญิง กมลวรรณ ตี้อยู่เจริญพร
- ☆ การบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้พืชร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน 153  
พันเอกหญิง พนิดา ปัญญาติลก
- ☆ Synthesis, Structure and Solvatochromic Properties of Novel Diacetylene  
Rhodamine-Based Solvatochromic Dye 165  
Prangtip Chansri  
Banchob Wanno  
Chatthai Kaewtong



การลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงโดยใช้งานตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า  
สูงสุดในกองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
Electricity Cost per kW-h Reduction by Using Peak Electricity Demand  
Controller in Department of Electrical Engineering,  
Chulachomkiao Royal Military Academy

พันตรี พงศ์กฤษณ์ รุ่งสุข  
Major Pongkrit Roongsook

อาจารย์ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Lecturer of the Academic Division, Chulachomkiao Royal Military Academy

Corresponding Author: krit\_010@hotmail.com

(Received: September 24, 2018, Revised: November 20, 2018, Accepted: November 23, 2018)

**บทคัดย่อ :** บทความนี้นำเสนอการลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยการลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในกองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ในภาคเรียนที่ 2 ปี 2558 การประเมินผลการใช้งานของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบ่งเป็น 2 ช่วง นั่นคือการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ในช่วงสองเดือนแรกและการตัดยอดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดที่เกิน 33 กิโลวัตต์ โดยใช้ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงสองเดือนสุดท้าย ในช่วงแรกพบว่าค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยต่อสัปดาห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์มีค่า 44.76 กิโลวัตต์ โดยที่ร้อยละของโหลดแพคเตอร์มีค่า 54.80 หลังจากใช้งานตัวควบคุมดังกล่าวในช่วงสุดท้าย พบว่าค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยต่อสัปดาห์ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์มีค่า 42.62 กิโลวัตต์ โดยที่ร้อยละของโหลดแพคเตอร์มีค่า 53.50 แม้ว่าตัวควบคุมดังกล่าวจะสามารถลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดลงได้ แต่ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงก็ไม่ได้ลดลงตาม ทั้งนี้เพราะปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อสัปดาห์ในช่วงสุดท้ายมีค่าน้อยกว่าในช่วงแรกดังนี้ 911.94 และ 981.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/สัปดาห์ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้ร้อยละของโหลดแพคเตอร์ในช่วงที่สองไม่ได้ดีกว่าในช่วงแรก อย่างไรก็ตามถ้าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถตัดค่ายอดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ให้เกิน 33 กิโลวัตต์ได้จริง ร้อยละของโหลดแพคเตอร์ในช่วงสุดท้ายจะได้รับการแก้ไขในทางทฤษฎีเป็น 69.08 และต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง จะลดลงได้อีกประมาณ 3.27 เปอร์เซนต์ หรือ 0.1662 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

**คำสำคัญ :** ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด การตัดยอด โหลดแพคเตอร์ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อสัปดาห์ การลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงาน

**Abstract :** This paper presents the reduction of electricity cost per kilowatt-hour by reducing the maximum peak demand within the department. of electrical engineering, Chulachomklao Royal Military Academy in the second semester of 2015. The practical implementation evaluation of a peak electricity demand controller is divided into two periods. These are data collection to identify the average electricity demand characteristics per day over a period of weeks in the first two months and peak clipping over 33 kilowatts by using the controller in the last two months. For the first period, the average peak demand per week at 95% confidence level was 44.76 kilowatts with a percentage of the load factor was 54.80. After using the peak demand controller in the second period, the average peak demand per week at 95% confidence level was 42.62 kilowatts with a percentage of the load factor was 53.50. Even though the controller can reduce the peak demands, but the cost per kilowatt-hour does not decrease. The main reason is that the average electricity consumption per week in the last period was lower than the first period of 911.94 and 981.06 kilowatts-hours per week, respectively which result in the percentage of load factor in the second period was not better than the first period. However, if the controller can cut the peak demand to no more than 33 kilowatts, the percentage of the load factor will be theoretically revised to 69.08 and the cost per kilowatt-hour will be approximately decreased up to 3.27 percent or 0.1662 Bath per kilowatt-hour.

**Keywords :** Peak Demand Controller, Peak Clipping, Load Factor, Average Electricity Consumption per Week, Reduction of Electricity Cost per Kilowatt-Hour

## 1. บทนำ

การจัดการค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าฝั่งผู้ใช้ (Demand Side Management) ให้สอดคล้องกับกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าในฝั่งผู้ผลิตและการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งหรือระบบจำหน่ายในช่วงเวลานั้น ๆ ได้รับการศึกษาและการยอมรับกันในวงกว้างแล้วว่าช่วยลดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) เช่น แรงดันตก ความถี่ไม่คงที่ ไฟดับ รวมทั้งการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย นอกจากนี้ยังช่วยแก้ปัญหา ด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบไฟฟ้า (Power System Economics) เช่น การลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้แก่การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาด[1] การดำเนินการจัดการค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าฝั่งผู้ใช้สามารถทำได้หลายแนวทางขึ้นอยู่กับกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของฝั่งผู้ใช้ซึ่งมีความแตกต่างกันตามปัจจัยด้าน สังคม เศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และการทำงานประจำของผู้ใช้ [3] จากมุมมองของฝั่งผู้ผลิตวิธีสร้างแรงจูงใจด้วยโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า (Incentive-Based Approach by Rate Structure) เช่น อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการควบคุมกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของกิจการขนาดกลางและกิจการขนาดใหญ่ให้สอดคล้องกับกำลังการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลานั้น ๆ แต่ไม่สามารถสร้างแรงจูงใจให้ฝั่งผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มบ้านเรือนอยู่อาศัยได้เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มกิจการขนาดกลางและกิจการขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพราะปัจจัยเดียวเท่านั้นคือ ระดับความพึงพอใจต่ออุณหภูมิที่สบายของฝั่งผู้ใช้ (User's satisfaction in Term of Thermal Comfort) ต่อภาระโหลดประเภท HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning) ที่มีผลต่อกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของฝั่งผู้ใช้กลุ่มบ้านเรือนอยู่อาศัยเกือบทั้งหมด [3],[8]

การจัดการค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand Management) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตัดยอด (Peak Clipping) เป็นหนึ่งในอีกหลายวิธีที่มีประสิทธิภาพ

สำหรับการควบคุมกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของกลุ่มบ้านเรือนอยู่อาศัยที่ใช้อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา (TOU) เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลานั้นๆ [4] งานวิจัยในด้านนี้แบ่งออกเป็นสองแนวทางใหญ่ๆคือ แนวทางที่ฝั่งผู้ใช้เป็นผู้ควบคุมกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับเงื่อนไขเวลาและราคาของอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา (TOU) โดยลำพัง [5],[6] และแนวทางที่ทั้งฝั่งผู้ใช้และฝั่งผู้ผลิตร่วมกันเป็นผู้ควบคุมกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับเงื่อนไขเวลาและราคาของอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา (TOU) โดยอาศัยตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถสื่อสารกันได้ระหว่างฝั่งผู้ใช้และฝั่งผู้ผลิต [1],[7],[8] อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวก็ยังไม่ปรากฏรายงานผลการทดสอบประสิทธิภาพการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในทางปฏิบัติเมื่อติดตั้งกับระบบไฟฟ้าจริง

ส่วนการศึกษา (สกศ.) โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา (TOU) ตามหลักเกณฑ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) [2] จากการตรวจสอบรายงานค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนพบว่า สกศ.ฯ มีสัดส่วนค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand Charge) ต่อค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนโดยเฉลี่ยสูงเกินกว่า 10% ดังนั้นการลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงโดยการควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดจึงเป็นแนวทางแก้ปัญหาที่เป็นระบบและสอดคล้องกับนโยบายการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของกองทัพบก ในขั้นต้นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการแก้ไขความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ สกศ.ฯ ได้ดำเนินการที่กองวิศวกรรมไฟฟ้า (กวฟ.ฯ) ซึ่งเป็นหน่วยขึ้นตรงหนึ่งของ สกศ.ฯ ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลตลอดภาคเรียนที่ 1 ปี 2558 พบว่าสัดส่วนค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนโดยเฉลี่ยคือ 22.27% และพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของนักเรียนนายร้อยที่ถูกกำหนดจากตารางสอนคือปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสัดส่วนดังกล่าว นอกจากนี้ในทางทฤษฎี

กฟ.๑ ยังมีศักยภาพที่จะทำการลดต้นทุนค่าไฟฟ้ารายเดือนลงได้อีกไม่เกิน 12% เมื่อร้อยละของโหลดแพคเตอร์ก่อนแก้ไข คือร้อยละ 50.66 [9]

บทความนี้นำเสนอผลงานวิจัยการลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงโดยใช้ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกฟ.๑ ในภาคเรียนที่ 2 ปี 2558 (1 ก.ย. ถึง 20 ธ.ค.) และได้แบ่งการนำเสนอเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. รายละเอียดเกี่ยวกับตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด
2. การประเมินผลการใช้งานของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งประกอบด้วย 2.1 กราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ทั้งสองช่วงการทดลองและ 2.2 ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบสัปดาห์และร้อยละของโหลดแพคเตอร์ทั้งสองช่วงการทดลอง
3. ผลกระทบของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วย 3.1 การคำนวณต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงและ 3.2 การวิเคราะห์ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงโดยใช้ร้อยละของโหลดแพคเตอร์ กรณีศึกษาของ กฟ.๑

## 2. รายละเอียดเกี่ยวกับตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

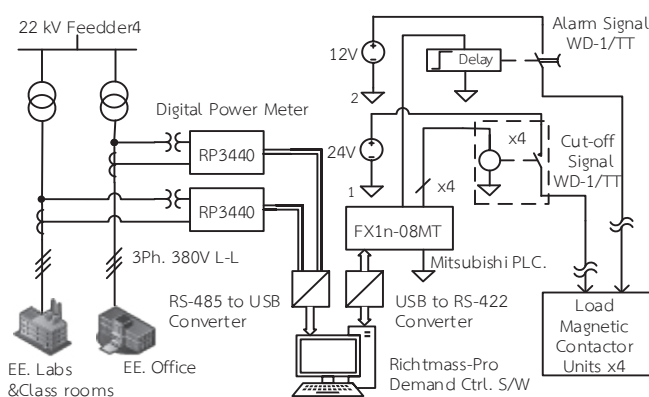
### 2.1 การออกแบบและติดตั้ง

ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ติดตั้งภายใน กฟ.๑ ดังแสดงในภาพที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้ (1) มิเตอร์วัดข้อมูลด้านไฟฟ้าแบบดิจิทัลรุ่น Richtmass RP 3440 จำนวน 2 ชุดติดตั้งบริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักของสำนักงาน กฟ.๑ และโรงประลองไฟฟ้าโดยเชื่อมมิเตอร์ดังกล่าวสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม RS-485 (2) โปรแกรมสำเร็จรูป Richtmass-ProTM [10] ซึ่งติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลลงสู่ฮาร์ดดิสก์และใช้ควบคุมการตัดยอด

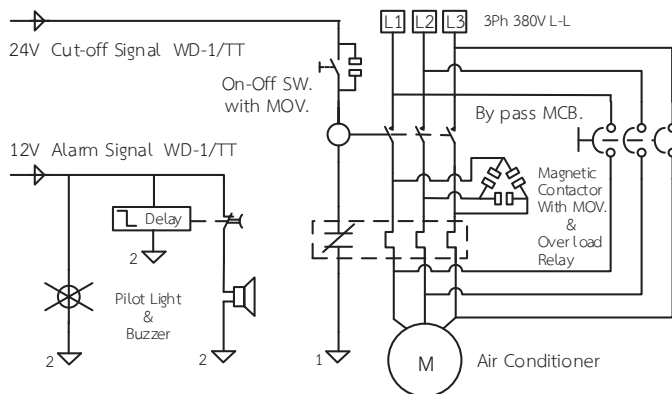
ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยขั้นตอนวิธีคาดการณ์ (Predictor Algorithm) ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม RS-422ไปสู่ตัวควบคุมพีแอลซี (Programmable Logic Controller) รุ่น Mitsubishi FX 1n-08MT ทำยี่สิบสองแรงดันกระแสตรง 24 โวลต์ไปตัดต่อภาระโหลดเครื่องปรับอากาศออกจากแหล่งจ่ายด้วยอุปกรณ์ตัดต่อแบบหน้าสัมผัสแม่เหล็ก (Magnetic Contactor) และ

3. อุปกรณ์ตัดต่อแบบหน้าสัมผัสแม่เหล็กจำนวน 4 ชุดรับแรงดันกระแสตรง 24 โวลต์และ 12 โวลต์ผ่านสายสัญญาณ WD-1/TT อีสระ 2 วงจรไปตัดต่อภาระโหลดเครื่องปรับอากาศและแจ้งเตือนในห้องต่าง ๆ พร้อมเบรกเกอร์ยกเลิกการควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้เมื่ออุณหภูมิห้องร้อนเกินไป ดังแสดงในภาพที่ 2

จากข้อมูลการทดลองช่วง 1 ของงานวิจัยนี้พบความเป็นไปได้ที่จะควบคุมขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 15 นาที ให้ต่ำกว่า 33 กิโลวัตต์โดยใช้การตัดต่อภาระโหลด



ภาพที่ 1 แผนผังการติดตั้งตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด ส่วนที่ 1 (ภาครับ) และส่วนที่ 2 (ภาคประมวลผล) กรณีศึกษา กฟ.๑



ภาพที่ 2 วงจรอุปกรณ์ตัดต่อแบบหน้าสัมผัสแม่เหล็ก ส่วนที่ 3 (ปฏิบัติ)

เครื่องปรับอากาศที่ใช้งานเป็นประจำในช่วงเวลาราชการของห้องพักเจ้าหน้าที่ กวฟ.๑ รวมทั้งสิ้น 4 ชุด (พื้นที่ได้กราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของเจ้าหน้าที่ กวฟ.๑ ตลอดภาคการศึกษาที่ 2/2558 รายละเอียดดังตารางที่ 1 และในหัวข้อ 3.1) ซึ่งสามารถทำการตัดยอดสูงสุดได้รวม 11.35 กิโลวัตต์หรือประมาณ 25% ของค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่มีค่า 44.76 กิโลวัตต์ นอกจากนี้การตั้งค่าตัวแปรเวลาต่างๆ (Time Parameters) ให้แก่โปรแกรมสำเร็จรูป Richtmass-ProTM ก็มีวัตถุประสงค์เพื่อการเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลด (Load Leveling) และการให้ลำดับความสำคัญแก่ภาระโหลดแต่ละตัว (Load Prioritization) ในห้องต่างๆ (รายละเอียดดังตารางที่ 1 และในหัวข้อ 2.3)

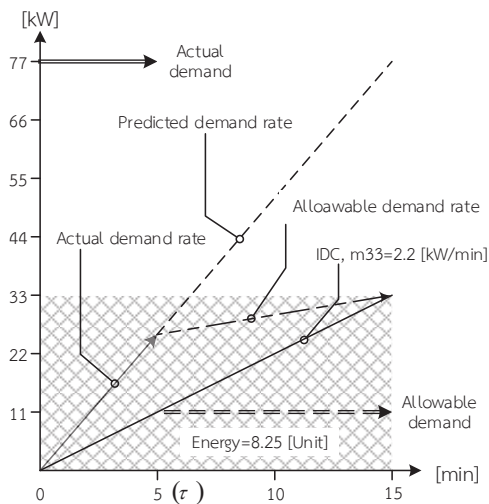
2.2 การตัดยอดโดยใช้หลักการของขั้นตอนวิธีคาดการณ์สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูป Richtmass-ProTM

ขั้นตอนวิธีคาดการณ์ (Predictor Algorithms) เป็นอีกหนึ่งในขั้นตอนวิธีที่นิยมใช้กับตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดนอกเหนือจากขั้นตอนวิธีเส้นโค้ง

ภาระโหลดในอุดมคติ (Ideal Load Curve Algorithms) และขั้นตอนวิธีตัวเปรียบเทียบความถี่ (Frequency Comparator Algorithms) ทั้งนี้เพราะขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะอนุญาตให้ภาระโหลดใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดในระหว่างทำการควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาที ให้ใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า นอกจากนี้ยังช่วยลดจำนวนครั้งในการตัดภาระโหลด (Load Shedding Action) และลดเวลาของภาระโหลดที่ไม่ถูกใช้งานขณะถูกตัด (Unavailable Time of shaded Load) ได้เหมาะสมกับเงื่อนไขการทำงานมากกว่าเมื่อเทียบกับสองวิธีที่ได้กล่าวมา [4] อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีการคาดการณ์จะให้สมรรถนะที่ดีขึ้นผู้ใช้งานต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่พึงประสงค์ ได้แก่ (1) คุณสมบัติความราบเรียบ (Smoothing Characteristic) ของค่ายอด (2) การเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลด (Load Leveling) และ (3) การให้ลำดับความสำคัญแก่ภาระโหลดแต่ละตัว (Load Prioritization)

หลักการทำงานที่สำคัญของขั้นตอนวิธีคาดการณ์ของโปรแกรมสำเร็จรูป Richtmass-ProTM (กรณีกำหนดค่าความต้องการกำลังสูงสุดไว้ที่ 33 กิโลวัตต์ ค่าร้อยละที่ยอมรับได้ (Percent Tolerance) คือ 2% และคาบเวลาการคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand Period) คือ 15 นาที) เริ่มต้นจากการกำหนดเส้นโค้งความต้องการกำลังสูงสุดในอุดมคติ (Ideal Demand Curve : IDC) เป็นค่าคงที่มีค่า 33 กิโลวัตต์ ซึ่งมีความชันคงที่ตามสมการที่ (1) คือ 2.2 กิโลวัตต์/นาทียและมีพลังงานใน 15 นาทีตามสมการที่ (2) คือ 8.25 กิโลวัตต์-ชั่วโมง (ส่วนแรง) ลงบนกราฟที่แกนนอนแทนคาบเวลาการควบคุมค่าความต้องการสูงสุดและแกนตั้งแทนกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3





ภาพที่ 3 ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าที่อนุญาตให้ใช้ได้ในแต่ละคาบเวลาการควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของขั้นตอนวิธีคาดการณ์

เมื่อโปรแกรมดังกล่าวทำงานจะวัดค่าความต้องการกำลังจริงในหน่วยกิโลวัตต์ (Actual Demand) พร้อมๆ ระยะเวลาที่เกิดขึ้น (เช่น 77 กิโลวัตต์-ชั่วโมงเป็นเวลา 5 นาทีดังแสดงในภาพที่ 3) แล้ววาดกราฟอัตราความต้องการกำลังไฟฟ้าแท้จริงในหน่วยกิโลวัตต์/นาที (Actual Demand Rate) ตามสมการที่ (1) จากนั้นคำนวณผลต่างพลังงานที่อนุญาตให้ใช้ได้ซึ่งต้องน้อยกว่า 8.25 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ( $Energy_{MAX}$ ) ต่อจากนั้นวาดกราฟอัตราความต้องการกำลังไฟฟ้าที่อนุญาตให้ใช้ได้ (Allowable Demand Rate) ตามสมการที่ (3) ซึ่งความชันของกราฟดังกล่าวอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้แต่ในกรณีภาพที่ 3 ต้องลดลงน้อยกว่าความชันของกราฟอัตราความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ถูกคาดการณ์ไว้ (Predicted Demand Rate) ท้ายที่สุดโปรแกรมดังกล่าวจะเริ่มขั้นตอนตัดภาระโหลดออกตามตารางที่ 1 และถ้าการกำหนดค่าคุณสมบัติที่สำคัญทั้ง 3 ประการดังที่กล่าวมาข้างต้นให้แก่โปรแกรมดังกล่าวทำได้เหมาะสมแล้ว ผลการวัดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าที่อนุญาตให้ใช้ได้ (Allowable Demand) จะมีค่าลดลงและกราฟอัตราความต้องการกำลังไฟฟ้าที่อนุญาต

ให้ใช้ได้ก็จะวิ่งเข้าสู่ค่าความต้องการกำลังสูงสุดที่ 33 กิโลวัตต์ตามที่กำหนดไว้ด้วยสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (3) [4]

$$Slope = \frac{dp(\tau)}{d\tau} \quad (1)$$

$$Energy = \int_{t=0}^{\tau} p(t) dt \quad [kW-h] \quad (2)$$

$$Energy_{MAX} \leq \int_{t=0}^{\tau} p(t) dt + [p(\tau)(T_{int} - \tau)] \quad [kW-h] \quad (3)$$

โดย

$\tau$  คือ เวลาในปัจจุบัน [min]

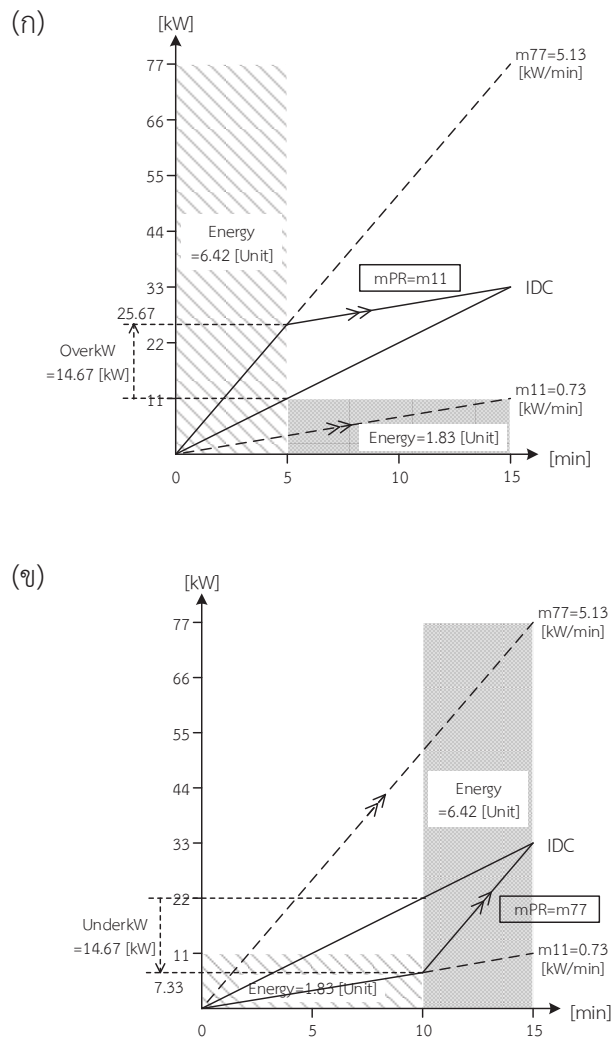
$p(\tau)$  คือ กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ [kW]

$T_{int}$  คือ คาบเวลาการคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า [min]

ภาพที่ 4 (ก) แสดงตัวอย่างการตัดภาระโหลดของขั้นตอนวิธีคาดการณ์เมื่อใช้ภาระโหลดขนาด 77 กิโลวัตต์เป็นเวลา 5 นาทีหรือใช้พลังงานไปแล้ว 6.42 กิโลวัตต์-ชั่วโมงปรากฏกำลังไฟฟ้าส่วนมากเกิน (OverkW) ที่มีค่า 14.67 กิโลวัตต์ และโปรแกรมดังกล่าวได้คำนวณส่วนต่างของพลังงานที่อนุญาตให้ใช้ได้คือ 1.83 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากนั้นดำเนินขั้นตอนการเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลดตามเงื่อนไขลำดับความสำคัญของภาระโหลดแต่ละตัว ดังนั้นภาระโหลดจะถูกไล่ตัดออกไปเรื่อย ๆ จนกว่าผลการวัดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าแท้จริงจะต่ำกว่าค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าที่อนุญาตให้ใช้ได้ที่มีค่า 11 กิโลวัตต์ โปรแกรมดังกล่าวจึงจะยกเลิกขั้นตอนการตัดภาระโหลดแม้เวลาจะเกิน 15 นาทีก็ตาม (เมื่อกำหนดให้ MaxCut=0)

ในทางตรงข้ามภาพที่ 4(ข) แสดงตัวอย่างการต่อภาระโหลดของขั้นตอนวิธีคาดการณ์เมื่อใช้ภาระโหลดขนาด 11 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 10 นาที หรือใช้พลังงานไปแล้ว 1.83 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ปรากฏกำลังไฟฟ้าส่วนน้อยเกิน (UnderkW) ที่มีค่า 14.67 กิโลวัตต์และโปรแกรมดังกล่าวได้คำนวณส่วนต่างของพลังงานที่อนุญาตให้ใช้ได้คือ 6.42 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากนั้นดำเนินขั้นตอนการเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลดตามเงื่อนไขลำดับความสำคัญของภาระ

โหลดแต่ละตัว ดังนั้นภาระโหลดจะถูกไล่ตื้อเข้าไปเรื่อย ๆ จนกว่าผลการวัดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าแท้จริงจะสูงกว่าค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าที่อนุญาตให้ใช้ได้ที่มีค่า 77 กิโลวัตต์ โปรแกรมดังกล่าวจึงจะยกเลิกขั้นตอนการต่อภาระโหลด



ภาพที่ 4 การควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของขั้นตอนวิธี คาดการณ์ (ก) ขณะภาระโหลดมากเกินไป (ข) ขณะภาระ โหลดน้อยเกินไป

### 2.3 การเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลดและการให้ ลำดับความสำคัญแก่ภาระโหลดแต่ละตัว

การกำหนดค่าตัวแปรให้โปรแกรมสำเร็จรูป Ritschtmass-Pro<sup>TM</sup> สำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย (1) ค่าความต้องการกำลังสูงสุดที่ 33 กิโลวัตต์ (2) ค่าร้อยละความผิดพลาดที่ยอมรับได้คือ 2% หรือ  $33 \pm 0.7$  กิโลวัตต์ (3) คาบเวลาการควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าคือ 15 นาที หรือ 900 วินาที และ (4) ค่าตัวแปรเวลาตามตารางที่ 1 ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์คือ ความราบเรียบของค่ายอด การเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลด และการให้ลำดับความสำคัญแก่ภาระโหลดแต่ละตัว เมื่อ CutkW หมายถึงค่าขอบบนของ OverkW ก่อนเริ่มตัดภาระโหลด OnkW หมายถึงค่าขอบล่างของ UnderkW ก่อนเริ่มต่อภาระโหลด MinCut หมายถึงค่าระยะเวลาที่ภาระโหลดถูกตัดน้อยที่สุด MaxCut หมายถึงค่าระยะเวลาที่ภาระโหลดถูกตัดมากที่สุด (MaxCut=0 หมายถึงระยะเวลาไม่มีขอบเขต) MinOn หมายถึงค่าระยะเวลาที่ภาระโหลดถูกต่อน้อยที่สุด DlyCut หมายถึงค่าระยะเวลาหน่วงก่อนเริ่มตัดภาระ โหลดตัวต่อไป DlyStart หมายถึงค่าระยะเวลาหน่วงก่อน เริ่มต่อภาระโหลดตัวต่อไป Cut/OnFreq หมายถึง ความถี่ สูงสุดของภาระโหลดที่จะถูกตัดต่อโดยมีความสัมพันธ์ตาม สมการที่ (4) [10]

$$Cut / OnFreq = \frac{1}{MinOn + MinCut} \quad [Hz] \quad (4)$$

เป้าหมายที่ควรจะได้รับเมื่อกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ให้กับโปรแกรมสำเร็จรูป Ritschtmass-Pro<sup>TM</sup> ตามย่อหน้า ที่ผ่านมา ประกอบด้วย (1) ห้อง ผอ.กวฟ.ฯ ถูกกำหนด ให้เป็นห้องที่มีลำดับความสำคัญมากที่สุด (Highest Priority Load) โดยภาระโหลดจะถูกต่อกลับคืนให้อย่าง ไม่มีเงื่อนไขเมื่อค่า MaxCut=360 วินาที แต่ห้องอื่นๆ ที่มีค่า MaxCut=0 หรือระยะเวลาการตัดโหลดไม่มี ขอบเขตจะถูกกำหนดให้เป็นห้องที่มีลำดับความสำคัญ น้อยที่สุด (Lowest Priority Load) ทั้งนี้เพราะปัจจัย

ระดับความพึงพอใจต่ออุณหภูมิที่สบายของผอ.กฟ.๑ จะถูกนำมาพิจารณาก่อนนายทหารสัญญาบัตรและนายทหารประทวนตามลำดับเสมอ (2) ณ เวลาใดๆ ถ้าภาระโหลดมากเกินไปและค่า  $OverkW \geq 0.7$  กิโลวัตต์ (ค่าร้อยละความผิดพลาดที่ยอมรับได้) โปรแกรมดังกล่าวจะเริ่มทยอยตัดภาระโหลดห้องน.ป.ปฏิบัติการเป็นลำดับแรกเมื่อค่า  $OverkW \geq 1$  กิโลวัตต์ (กำหนดด้วยค่า  $CutkW = 1$  กิโลวัตต์) ไปสิ้นสุดที่ห้อง ผอ.กฟ.๑ เมื่อค่า  $OverkW \geq 4$  กิโลวัตต์ (กำหนดด้วยค่า  $CutkW = 4$  กิโลวัตต์) โดยการตัดภาระโหลดแต่ละครั้งจะถูกคั่นด้วยค่า  $DlyCut = 10$  วินาที (ไม่อนุญาตให้ตัดภาระโหลดทุกห้องพร้อมกัน) (3) ณ เวลาใดๆ ถ้าภาระโหลดน้อยเกินไปและค่า  $UnderkW \geq 0.7$  กิโลวัตต์ (ค่าร้อยละความผิดพลาดที่ยอมรับได้) โปรแกรมดังกล่าวจะเริ่มทยอยต่อภาระโหลดห้อง ผอ.กฟ.๑ เป็นลำดับแรกเมื่อค่า  $UnderkW \geq 1$  กิโลวัตต์ (กำหนดด้วยค่า  $OnkW = 1$  กิโลวัตต์) ไปสิ้นสุดที่ห้องพักอาจารย์รวมเมื่อค่า  $UnderkW \geq 4$  กิโลวัตต์ (กำหนดด้วยค่า  $OnkW = 4$  กิโลวัตต์) โดยการต่อภาระโหลดแต่ละครั้งจะถูกคั่นด้วยค่า  $DlyStart = 20$  วินาที (ไม่อนุญาตให้ต่อภาระโหลดทุกห้องพร้อมกัน) และ (4) ภาระโหลดในห้องพัก

**ตารางที่ 1** พิกัดภาระโหลด คุณสมบัติที่พึงประสงค์ และการกำหนด ค่าตัวแปรต่างๆ ให้โปรแกรมสำเร็จรูป Richtmass-ProTM

| Priority Ranking<br>of Loads<br>Air conditioner<br>[Room] | Load Leveling  |                        | Smoothing Characteristic<br>(DlyCut=10,DlyStart=20[sec]) |                  |                 |                         |
|-----------------------------------------------------------|----------------|------------------------|----------------------------------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------|
|                                                           | Demand<br>[kW] | CutkW<br>/OnkW<br>[kW] | MinCut<br>[sec.]                                         | MaxCut<br>[sec.] | MinOn<br>[sec.] | Cut/On<br>Freq.<br>[Hz] |
| 1. ผอ.กฟ.๑                                                | 2.5            | 4/1                    | 180                                                      | 360              | 360             | .0018                   |
| 2. พักอาจารย์รวม                                          | 4.1            | 3/4                    | 300                                                      | 0                | 360             | .0015                   |
| 3. น.ปฏิบัติการ                                           | 2.25           | 2/2                    | 300                                                      | 0                | 360             | .0015                   |
| 4. น.ป.ปฏิบัติการ                                         | 2.5            | 1/3                    | 300                                                      | 0.               | 360             | .0015                   |

อาจารย์รวมซึ่งมีค่า Demand=4.1 กิโลวัตต์และค่า Cut/On Freq=0.0015 เฮิร์ตซ์จัดเป็นภาระโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งไม่ควรจะได้รับความเครียดจากความถี่ของการตัดต่อภาระโหลดเมื่อเทียบกับภาระโหลดขนาดเล็กในห้องอื่นที่มีค่า Demand=2.5 กิโลวัตต์ ยกเว้นห้อง ผอ.กฟ.๑ ซึ่งจัดเป็นภาระโหลดขนาดเล็กเพียงตัวเดียวที่มีค่า Cut/OnFreq =0.0018 เฮิร์ตซ์ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สบายของห้อง ผอ.กฟ.๑ มีความสำคัญมากทำให้ระยะเวลาที่ภาระโหลดถูกตัดต้องลดลงมาจนมีค่า MinCut=180 วินาที

**ตารางที่ 2** จำนวนวันที่ใช้สร้างกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ของกฟ.๑ ภาคการศึกษา 2/58 (ทั้งสองช่วงการทดลอง)

| จำนวนวัน<br>ช่วง 1/ช่วง 2 | จ.    | อ.    | พ.    | พ.    | ศ.    | ส.    | อา.   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ตามปฏิทิน                 | 9/7   | 10/6  | 9/7   | 9/7   | 10/6  | 10/6  | 10/6  |
| ตัดออก                    | 4/3   | 7/5   | 7/5   | 7/5   | 5/4   | 7/5   | 6/5   |
| %ใช้ได้จริง               | 44/43 | 70/83 | 78/71 | 78/71 | 50/67 | 70/83 | 60/83 |

### 3. การประเมินผลการใช้งานของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การประเมินผลการทดลองลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงโดยใช้ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ กฟ.๑ ในภาคเรียนที่ 2 ปี 2558 แบ่งเป็น 2 ช่วงโดย (1) การประเมินผลการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันและค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบสัปดาห์ในช่วงสองเดือนแรก (1 กันยายน 2558 ถึง 6 พฤศจิกายน 2558) และ (2) การประเมินผลการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันและค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบสัปดาห์ในช่วงสองเดือนสุดท้าย (7 พฤศจิกายน 2558 ถึง 20 ธันวาคม 2558) ซึ่งกรณีนี้ได้ดำเนินการตัดยอดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วโดยใช้ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบ

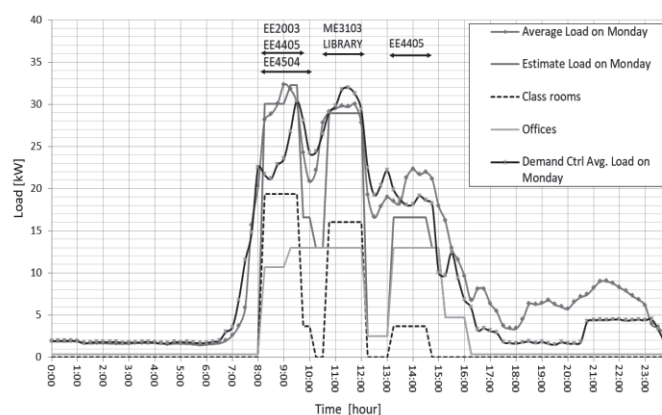
สัปดาห์และค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับวันในรอบสัปดาห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Student's t-distribution กับร้อยละของโหลดแพคเตอร์หรือ [9] อย่างไรก็ตามพบว่าข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าบางวันใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลไม่ได้ เช่น วันที่เกิดไฟฟ้าดับ วันหยุดราชการ วันงานพิธีหรือวันกิจกรรม และวันสอบประจำภาคดังแสดงในตารางที่ 2 จำนวนวันที่ใช้สร้างกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ทั้งสองช่วง

### 3.1 กราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ทั้งสองช่วงการทดลอง

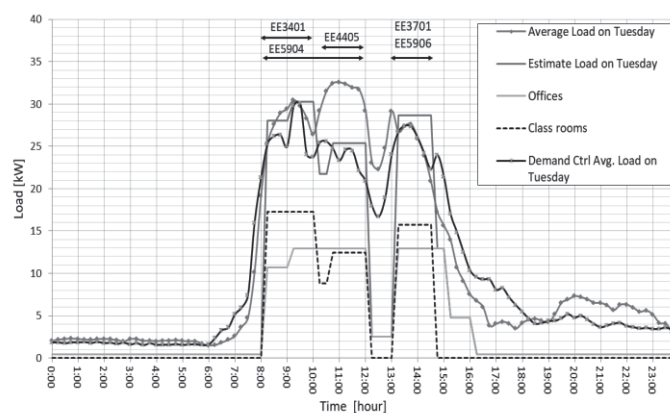
กราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ที่สร้างจากข้อมูลผลการทดลองทั้ง 2 ช่วงนี้ให้ค่าที่สอดคล้องกับกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้ารวมที่คาดการณ์ได้ (Coincident demand หรือกราฟ Estimated Load) ซึ่งในกรณี กวฟ.๑ คือผลรวมของขนาดของกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของ นนร. (กราฟ Classrooms) ร่วมกับกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของ เจ้าหน้าที่ กวฟ.๑ (กราฟ Offices) ตลอดภาคการศึกษาที่ 2/58 โดยข้อมูลส่วนใหญ่ที่ใช้ในการสร้างกราฟทั้งสองนี้มาจาก ปฏิทินการศึกษา ตารางสอน เช่น วิชาความน่าจะเป็นและกระบวนการแบบสุ่มมีรหัสวิชา EE2003 [11] การสังเกตและจำนวนวันตามตารางที่ 2 ดังนั้นผลการเปรียบเทียบกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ของช่วง 1 (กราฟ Average Load) และช่วง 2 (กราฟ Demand Ctrl Avg Load) และกราฟพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้ารวมที่คาดการณ์ได้ของกวฟ.๑ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5 ถึงภาพที่ 9

ผลการทดลองยืนยันชัดเจนว่าค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง (08.00น.-16.00น.) และค่ายอดเฉลี่ยในช่วงสองเดือนแรกมีค่าสูงกว่าช่วงสองเดือนสุดท้ายโดยกราฟ Average Load ของช่วง 1 นั้นเกือบทั้งหมดมีค่าสูงกว่ากราฟ Demand Ctrl Avg Load ของช่วง 2 เสมอ ทั้งนี้เกิดจากสองเหตุผลหลักคือ (1) การใช้งานตัวควบคุม

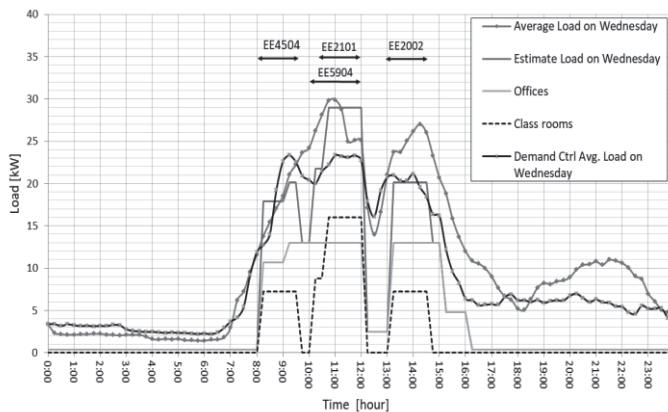
ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาราชการ 08.00น.-16.00 น. (2) ผลของอุณหภูมิที่เย็นลงในช่วงสองเดือนสุดท้าย (พ.ย.และธ.ค.) โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเวลา 19.00น.-24.00น. ซึ่งตามปกติแล้วเป็นช่วงเวลาที่ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดต้องหยุดทำงาน



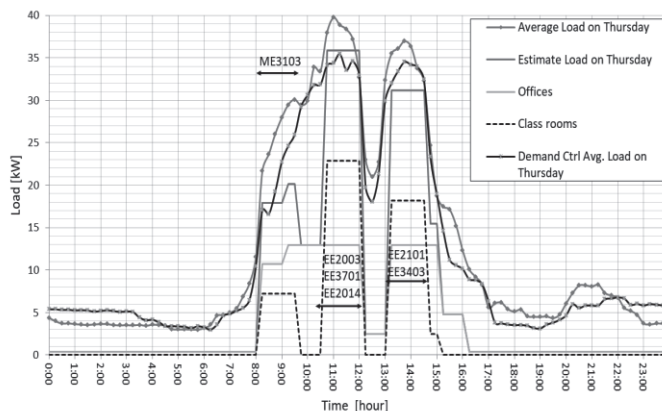
ภาพที่ 5 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง 184.3 และ 181.2 ยูนิทยอดเฉลี่ยคือ 32.3 kW 9.00 น.ช่วง 1 และ 31.9 kW 11.30 น. ช่วง 2 ของวันจันทร์



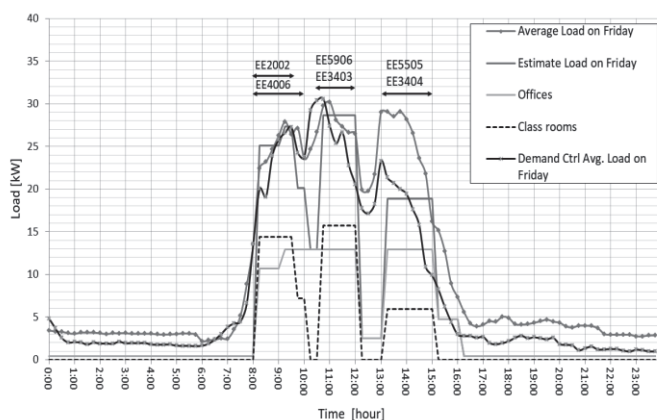
ภาพที่ 6 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง 200.8 และ 191.2 ยูนิทยอดเฉลี่ยคือ 32.6 kW 11.00น.ช่วง 1 และ 30.1 kW 9.30 น.ช่วง 2 ของวันอังคาร



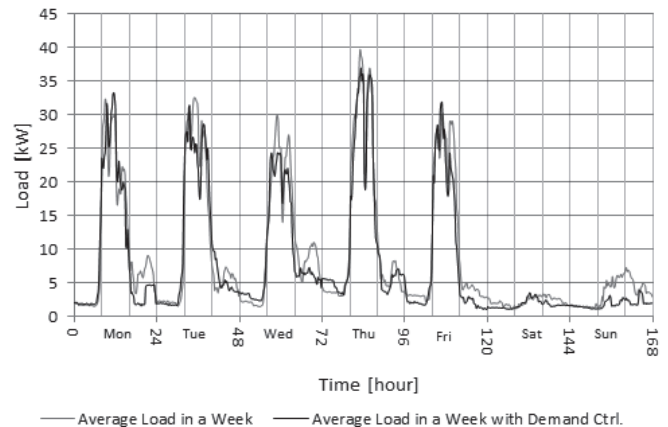
ภาพที่ 7 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง 174.6 และ 156.0 ยูนิต ยอดเฉลี่ยคือ 29.9 kW 11.00 น. ช่วง 1 และ 23.3 kW 11.00 น. ช่วง 2 ของวันพุธ



ภาพที่ 8 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง 231.4 และ 217.2 ยูนิต ยอดเฉลี่ยคือ 39.7kW 11.00 น. ช่วง 1 และ 35.4kW 11.15 น. ช่วง 2 ของพฤหัสบดี



ภาพที่ 9 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8 ชั่วโมง 189.8 และ 166.2 ยูนิต ยอดเฉลี่ยคือ 30.2 kW 11.00 น. ช่วง 1 และ 30.6 kW 10.45 น. ช่วง 2 ของวันศุกร์



ภาพที่ 10 ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยช่วง 1 และช่วง 2 (ชดเชยอุณหภูมิ) มีค่า 981.06 ยูนิตและ 911.94 ยูนิต ตามลำดับ

ภาพที่ 10 ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อสัปดาห์เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาราชการ (08.00น.ถึง 16.00น.) ของทุกวันหรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์คือพื้นที่ใต้กราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ของช่วง 1 และช่วง 2 โดยผลการคำนวณระบุว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อสัปดาห์ในช่วง 1 และช่วง 2 มีค่า 981.06 และ 911.94 กิโลวัตต์-ชั่วโมงตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวในช่วง 2 นี้ ได้ผ่านการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เย็นลงแล้วด้วยสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิ หรือ หรือกล่าวได้ว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อสัปดาห์ช่วง 2 มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วง 1 ประมาณ 7.58%

### 3.2 ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบสัปดาห์ และร้อยละของโหลดแพคเตอร์ทั้งสองช่วงการทดลอง

เพื่อให้ผลการคำนวณต้นทุนพลังงานไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงในช่วง 2 ของการทดลองมีความแม่นยำและมีสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดลองใกล้เคียงกับช่วง 1 สามารถนำข้อมูลทั้ง 2 ช่วงมาใช้เปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เย็นลงในช่วงสองเดือนสุดท้ายที่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ ค่า

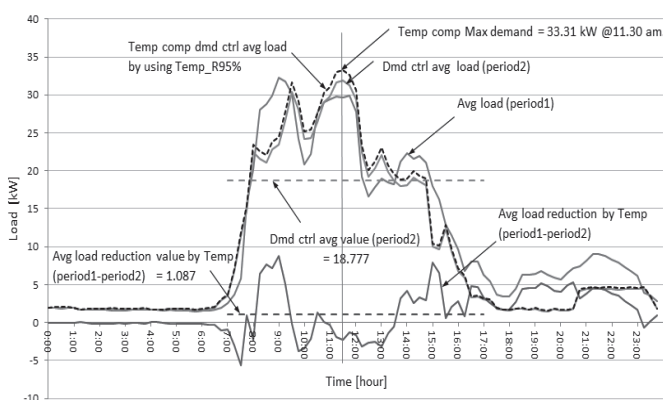


ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด และค่าร้อยละของโหลดแพคเตอร์ โดยใช้สมมุติฐานคือตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าจริงโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์มีค่าต่ำกว่า 33 กิโลวัตต์ ดังนั้นอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าจริงโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ช่วง 1 และช่วงที่ 2 เทียบกับค่าเฉลี่ยของกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าจริงโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ก็คือ สัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิ หรือ %Temp R ตามสมการที่ (5)

$$\%Temp\_R = \frac{\frac{1}{41} \sum_{k=29}^{69} (Avg\ load_k - Dmd\ ctrl\ avg\ load_k)}{\frac{1}{41} \sum_{k=29}^{69} Dmd\ ctrl\ avg\ load_k} \times 100 \quad (5)$$

โดย

$Avg\ load_k$  คือ ค่ากราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าจริงช่วง 1  
 $Dmd\ ctrl\ avg\ load_k$  คือ ค่ากราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าจริงช่วง 2  
 $k$  คือ ลำดับคาบเวลาทุก 15 นาที เริ่มจาก 00.00น ถึง 24.00 น. หรือ 1 ถึง 96



ภาพที่ 11 การลดผลของอุณหภูมิที่เย็นลงในช่วง 2 วันจันทร์ โดยใช้ %Temp\_R95% และเกิดยอดสูงสุดขนาด 33.31 kW ที่ 11.30น.

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ค่าเฉลี่ยผลต่างทั้งสองช่วง และ %Temp\_R95%

| ค่าของกราฟ                           | จ.                                                                                                                                                                                                                                                                                   | อ.     | พ.     | พฤ.    | ศ.     |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Avg load reduction value by temp[kW] | 1.087                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0.951  | 2.939  | 2.397  | 3.160  |
| Dmd ctrl avg value [kW]              | 18.777                                                                                                                                                                                                                                                                               | 20.132 | 16.001 | 21.903 | 16.613 |
| %Temp_R                              | 5.790                                                                                                                                                                                                                                                                                | 4.723  | 18.365 | 10.945 | 19.023 |
| %Temp_R95% (Lower)                   | $\geq \bar{x} - t_{\alpha, n-1} \times \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right); \alpha = 0.05, t_{0.0025, 4} = 2.776$ $; \bar{x} = \frac{5.790 + 4.723 + 18.365 + 10.945 + 19.023}{5} = 11.77$ $\geq 11.77 - 2.776 \times \left( \frac{6.04}{\sqrt{5}} \right) \text{ or } \geq 4.28$ |        |        |        |        |

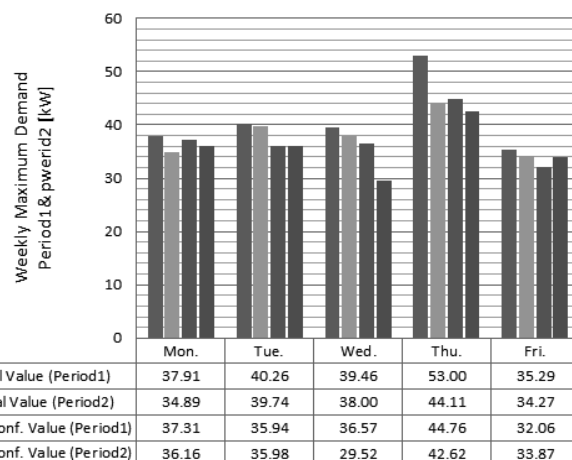
ภาพที่ 11 ตัวอย่างการลดผลของอุณหภูมิที่เย็นลงของกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยแต่ละวันในรอบสัปดาห์ช่วง 2 วันจันทร์โดยใช้สัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ขอบล่าง) หรือ คือ 4.28% ซึ่งการคำนวณค่าดังกล่าวหาได้จากข้อมูลกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ภาพที่ 5 ถึงภาพที่ 9 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 เมื่อช่วงเวลาที่พิจารณา คือ 07.00น.-17.00น.

การวิเคราะห์หาขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบสัปดาห์เริ่มต้นจากการคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละวันตามจำนวนวันของภาคการศึกษาที่ 2/58 ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งสองช่วงการทดลองซึ่งข้อมูลดังกล่าวในช่วงที่ 2 ได้ผ่านการลดผลของอุณหภูมิที่เย็นลงในช่วงสองเดือนสุดท้ายแล้วด้วย คือ 4.28% จากนั้นคำนวณค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ขอบบน) ดังแสดงในตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ขนาดของความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด  
ในแต่ละวันในรอบสัปดาห์ของ กวฟ.๑ ภาค  
การศึกษา 2/58 (ทั้งสองช่วงการทดลอง)

| วัน | ช่วง | ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย [kW-hr] |        |          | ค่ายอดสูงสุด |            |
|-----|------|---------------------------------------|--------|----------|--------------|------------|
|     |      | เฉลี่ย 8ชม.                           | Peak   | Off Peak | @95%[kW]     | % $F_{LD}$ |
| จ.  | 1    | 184.33                                | 193.89 | 63.07    | 37.31        | 61.76      |
|     | 2    | 181.25                                | 175.49 | 58.96    | 36.16        | 62.66      |
| อ.  | 1    | 200.85                                | 206.06 | 60.67    | 35.94        | 69.85      |
|     | 2    | 191.22                                | 199.00 | 61.28    | 35.98        | 66.43      |
| พ.  | 1    | 174.64                                | 211.34 | 51.81    | 36.57        | 59.70      |
|     | 2    | 156.03                                | 176.39 | 56.07    | 29.52        | 66.07      |
| พฤ. | 1    | 231.44                                | 245.56 | 66.74    | 44.76        | 64.64      |
|     | 2    | 217.19                                | 230.19 | 71.59    | 42.62        | 63.71      |
| ศ.  | 1    | 189.81                                | 190.91 | 58.45    | 32.06        | 74.00      |

จากข้อมูลในตารางที่ 4 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดร่วมกับวันในรอบสัปดาห์ดังแสดงในภาพที่ 12 กรณีช่วง 1 พบว่าวันพฤหัสบดีเป็นวันเดียวในรอบสัปดาห์ที่เกิดขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดและที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 44.76 กิโลวัตต์ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้ว 63% จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. และกรณีช่วง 2 พบว่าวันพฤหัสบดีก็เป็นวันเดียวในรอบสัปดาห์ที่เกิดขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดและที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 42.62 กิโลวัตต์ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้ว 40% จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 13.45 น. หรือกล่าวได้ว่าขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของวันพฤหัสบดีในช่วง 2 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับช่วง 1 ประมาณ 5.02% ท้ายที่สุดขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของวันพฤหัสบดียังถูกใช้เป็นตัวแทนข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1



**ภาพที่ 12** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับวันในรอบสัปดาห์ของ กวฟ.๑ ภาคการศึกษาที่ 2/58

จากข้อมูลผลการทดลองและการคำนวณค่าร้อยละของโหลดแพคเตอร์หรือค่า ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่ากราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ใดที่มีความราบเรียบมาก (ความแตกต่างระหว่างขนาดของความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา 08.00-16.00 น. มีค่าน้อย) จะส่งผลให้ค่า มีค่าสูงเข้าใกล้ค่า 100 เมื่อเทียบกับกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าดังกล่าวที่ไม่ราบเรียบตามสมการที่ (6) และมีเพียงสองวันในรอบสัปดาห์คือวันจันทร์และวันพุธเท่านั้นที่ค่า มีค่าเพิ่มมากขึ้น และที่เหลืออีกสามวัน ค่า มีค่าลดลง ส่งผลให้ภาพรวมของค่าเฉลี่ยห้าวันทำการในรอบสัปดาห์ (40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ช่วง 08.00น.-16.00 น. วันจันทร์ถึงวันศุกร์) ช่วง 2 มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วง 1 เหตุผลเพราะการใช้งานของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดช่วง 2 แม้จะทำให้ขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ลดลงได้จริงประมาณ 5.02% แต่ก็ยังน้อยกว่าการลดลงของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อสัปดาห์ช่วง 2 ที่ลดลงไปประมาณ 7.58% จากเหตุผลดังกล่าวและสมการที่ (6) พบ ว่าตัวหารจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวตั้ง ดังนั้นอัตราส่วนของเฉลี่ยห้าวันทำการช่วง 2 จึงแย่ง

$$\begin{aligned}\%F_{LD} &= \frac{\text{Average load} \times 4 \times T}{\text{Peak load} \times T} \times 100 \\ &= \frac{\text{Units energy served}}{\text{Peak load} \times T} \times 100\end{aligned}\quad (6)$$

โดย

$\text{Average load} \times 4 \times T$  คือ พลังงานไฟฟ้า  $T \text{ W-hr}$

$T$  คือ จำนวนชั่วโมงที่ทำงาน  $[hr]$

**ตารางที่ 5** ร้อยละของโหลดแพ็คเกจและค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ ในช่วง P, OP ของ กวฟ.ฯ ภาคการศึกษา 2/58

| วัน    | ช่วง | ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย [kW-hr] |         |          | ค่ายอดสูงสุด @95% [kW] | %F <sub>LD</sub> |
|--------|------|---------------------------------------|---------|----------|------------------------|------------------|
|        |      | เฉลี่ย 8 ชม.                          | Peak    | Off Peak |                        |                  |
| จ.     | 1    | 184.33                                | 193.89  | 63.07    | 37.31                  | 61.76            |
|        | 2    | 181.25                                | 175.49  | 58.96    | 36.16                  | 62.66            |
| อ.     | 1    | 200.85                                | 206.06  | 60.67    | 35.94                  | 69.85            |
|        | 2    | 191.22                                | 199.00  | 61.28    | 35.98                  | 66.43            |
| พ.     | 1    | 174.64                                | 211.34  | 51.81    | 36.57                  | 59.70            |
|        | 2    | 156.03                                | 176.39  | 56.07    | 29.52                  | 66.07            |
| พ.จ.   | 1    | 231.44                                | 245.56  | 66.74    | 44.76                  | 64.64            |
|        | 2    | 217.19                                | 230.19  | 71.59    | 42.62                  | 63.71            |
| ศ.     | 1    | 189.81                                | 190.91  | 58.45    | 32.06                  | 74.00            |
|        | 2    | 166.24                                | 156.00  | 49.05    | 33.87                  | 61.36            |
| จ.-ศ.  | 1    | 981.06                                | 1047.76 | 300.76   | 44.76                  | 54.80            |
|        | 2    | 911.94                                | 937.07  | 296.95   | 42.62                  | 53.50            |
| จ.-อา. | 1    | -                                     | -       | 438.89   | -                      | -                |
|        | 2    | -                                     | -       | 385.87   | -                      | -                |

#### 4. ผลกระทบของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

จากการสังเกตและลองผิดลองถูกทำให้เชื่อได้ว่าสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ขั้นตอนวิธีคาดการณ์สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูป Richtmass-ProTM ซึ่งประกอบด้วย (1) การลดความเครียดของภาระโหลด (Load Stress) เนื่องจากการตัดต่อโหลด (2) การลดขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด และ (3) การลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย เหล่านี้ล้วนมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติที่พึงประสงค์ตามตารางที่ 1 คือ (1) ความราบเรียบ (ของกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้า) (2) การเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลด และ (3) การให้ลำดับความสำคัญแก่ภาระโหลดแต่ละตัว (การกำหนดค่าดังกล่าว ทำโดยวิธีอ้อมจากตัวแปรคุณสมบัติที่พึงประสงค์ในข้อ 1 และ 2 ร่วมกัน) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด และคุณสมบัติที่พึงประสงค์

| คุณสมบัติที่พึงประสงค์                  | ตัวแปร    | ค่า |      | ค่ายอด [kW] | ยูนิต [kw-hr] | ความเครียดของโหลด |
|-----------------------------------------|-----------|-----|------|-------------|---------------|-------------------|
|                                         |           | มาก | น้อย |             |               |                   |
| ความสม่ำเสมอ                            | MaxCut    | √   |      | ลด          | ลด            | ลด                |
|                                         | [sec]     |     | √    | เพิ่ม       | เพิ่ม         | เพิ่ม             |
|                                         | Cut/On    | √   |      | ลด          | เพิ่ม         | เพิ่ม             |
|                                         | Freq.[Hz] |     | √    | เพิ่ม       | ลด            | ลด                |
| การเรียงลำดับการตัดต่อภาระโหลด          | CutkW     | √   |      | เพิ่ม       | เพิ่ม         | ลด                |
|                                         | [kW]      |     | √    | ลด          | ลด            | เพิ่ม             |
|                                         | OnkW      | √   |      | ลด          | ลด            | ลด                |
|                                         | [kW]      |     | √    | เพิ่ม       | เพิ่ม         | เพิ่ม             |
| การให้ลำดับความสำคัญแก่ภาระโหลดแต่ละตัว | High Pri. | √   |      | เพิ่ม       | เพิ่ม         | ลด                |
|                                         | Load[kW]  |     | √    | เพิ่มมาก    | เพิ่มมาก      | ลด                |
|                                         | Low Pri.  | √   |      | ลดมาก       | ลดมาก         | เพิ่ม             |
|                                         | Load[kW]  |     | √    | ลด          | ลด            | เพิ่ม             |

4.1 การคำนวณต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง  
งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนเฉพาะ กวฟ.๑ แบบประเภทที่ 4 หรือกิจการขนาดใหญ่และอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU) ที่แรงดันระบบจำหน่าย 22-33 กิโลโวลต์ ตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) พ.ศ.2550 เพื่อใช้เป็นแนวทางศึกษาและพัฒนาการจัดการปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในภาพรวมของ สกศ.ร.ร.จปร. และลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ในภายหน้า ซึ่งตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้างกล่าวกำหนดให้ค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนประกอบด้วย 4 องค์ ประกอบ คือ (1) ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand Charge) (2) ค่าพลังงานไฟฟ้า (Energy Charge) (3) ค่าบริการรายเดือนซึ่งค่าเหล่านี้เรียกรวมกันว่าค่าไฟฟ้าพื้นฐาน และ (4) ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ประกอบด้วย (4.1) ค่าองค์ ประกอบกำลัง (Power Factor Surcharge) (4.2) ค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft) (4.3) ภาษีมูลค่า เพิ่มตามสมการที่ (7.1) และ (7.2) [2],[9]

ค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือน

$$= \text{ค่าไฟฟ้าฐาน} + \text{ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์} + \text{ค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft)} + \text{ภาษีมูลค่าเพิ่ม [บาท]} \quad (7.1)$$

ค่าไฟฟ้าฐาน

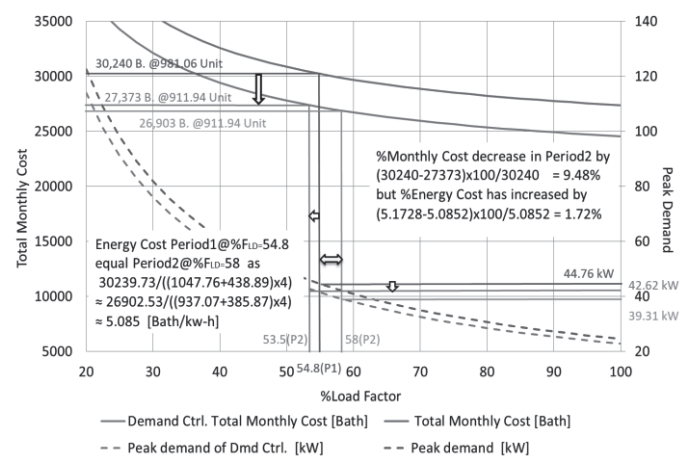
$$= \text{ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า} + \text{ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้า} + \text{ค่าบริการ [บาท]} \quad (7.2)$$

ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง [บาท/kW-h]

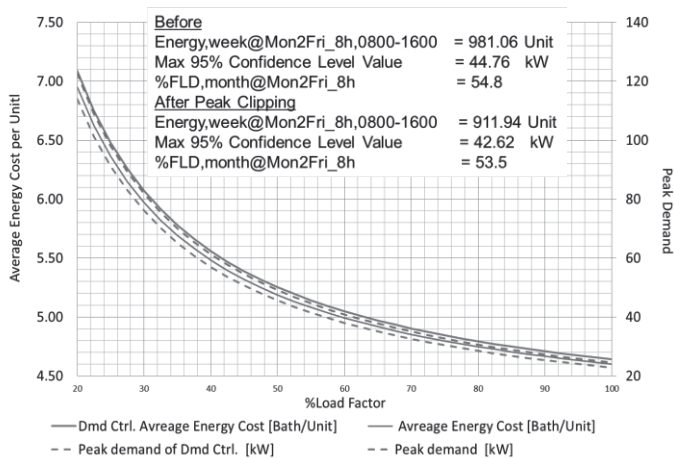
$$= \frac{\text{ค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือน}}{[\text{Avg. Energy P (M - F)} + \text{Avg. Energy OP (M - Su)}] \times 4} \quad (7.3)$$

จากตารางที่ 5 และสมการที่ 7 การคำนวณค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนและต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ในภาคเรียนที่ 2 ปี 2558 (กันยายน ถึง ธันวาคม) ทั้งช่วง 1 และ 2 ของ กวฟ.๑ มีผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 7

[12] (เมื่ออัตราค่าไฟฟ้าใช้คือ (1) ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุดคือ 132.93 บาทต่อกิโลวัตต์ (2) ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าช่วงเวลา P คือ 3.6796 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (3) ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าช่วงเวลา OP คือ 2.176 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (4) ค่าบริการคือ 312.24 บาทต่อเดือน (5) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์คือ 56.07 บาทต่อกิโลวัตต์ (6) ค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft) คือ 0.4638 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง และ (7) ภาษีมูลค่าเพิ่มคือ 7%) โดยผลการคำนวณยืนยันว่าต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ช่วง 2 เมื่อเทียบกับช่วง 1 มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.72% แม้ว่าค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่เรียกเก็บรายเดือนจะลดลงประมาณ 9.48% และขนาดความต้องการกำลัง ไฟฟ้าสูงสุดได้ลดลงถึง 5.02% แล้วก็ตามดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนและขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด กับร้อยละของโหลดแฟคเตอร์



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงและขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด กับ ร้อยละโหลดแพคเตอร์

นอกจากนี้ค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนและต้นทุนไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงจะมีแนวโน้มลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้นโดยแปรผันตรงกับการลดลงของขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดและแปรผกผันกับการเพิ่มขึ้นของร้อยละของโหลดแพคเตอร์ ดังภาพที่ 13 และภาพที่ 14 สำหรับงานวิจัยนี้ยังพบว่ากราฟค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนในภาพที่ 13 และกราฟต้นทุนไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงในภาพที่ 14 จะเป็นกราฟคนละเส้นกันและมีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองเหตุผลเพราะค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ของช่วง 1 มีค่ามากกว่าช่วง 2

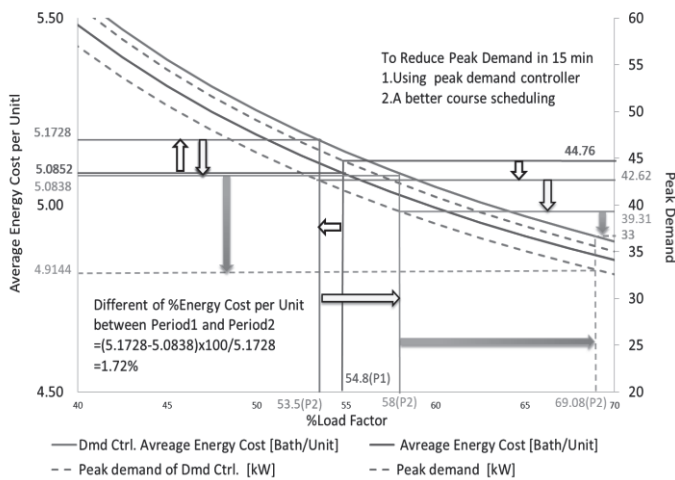
#### 4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยใช้ร้อยละของโหลดแพคเตอร์

พิจารณาภาพที่ 13 การวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่เรียกเก็บรายเดือนและขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเทียบกับร้อยละของโหลดแพคเตอร์ ยืนยันว่าร้อยละของการลดลงของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ประมาณ

7.58% เมื่อเทียบกับร้อยละการลดลงของขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในช่วง 2 คือประมาณ 5.02% ไม่เพียงพอ ที่จะทำให้อัตราส่วนของเฉลี่ยห่าวันทำการในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ดีขึ้นกว่าเดิมได้ (ร้อยละ 54.8) ส่งผลให้ต้นทุนไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงช่วง 2 เพิ่มขึ้นประมาณ 1.72% อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงช่วงที่ 2 มีค่าเท่ากับช่วง 1 แล้ว ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดควรจะทำการลดขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดลงไม่เกิน 39.32 กิโลวัตต์เพื่อแก้ไขอัตราส่วนของ เฉลี่ยห่าวันทำการในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ให้ดีขึ้นกว่าเดิมเป็นร้อยละ 58

จากภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงและขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเทียบกับร้อยละของโหลดแพคเตอร์ เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟดังกล่าวในช่วงร้อยละของโหลดแพคเตอร์ที่สนใจ คือ ร้อยละ 40 ถึง 70 ดังแสดงในภาพที่ 15 ผลการคำนวณได้ยืนยันความสอดคล้องกับภาพที่ 13 อีกครั้งว่าต้นทุนไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงช่วงที่ 2 จะมีค่าเท่ากับช่วง 1 ได้ ก็ต่อเมื่อได้แก้ไขค่า เฉลี่ยห่าวันทำการในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ให้เป็นร้อยละ 58 แต่ในทางทฤษฎีตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดควร จะทำการลดขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดลงไม่เกิน 33 กิโลวัตต์ (ตามที่ถูกกำหนดไว้ก่อนในโปรแกรมสำเร็จรูป Richtmass-Pro<sup>TM</sup>) ซึ่งควรส่งผลให้ค่า %FLD เฉลี่ยห่าวันทำการในรอบสัปดาห์ช่วง 2 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 69.08 และต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงช่วง 2 จะลดลงเหลือ 4.9144 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือจะประหยัดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงได้สูงสุดถึง 3.27% หรือประมาณ 0.1662 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ( $\approx 896.8$  บาทต่อเดือน) เมื่อเทียบกับช่วง 1 ตามตารางที่ 7 แก้ไขช่วง 2 และภาพที่ 16

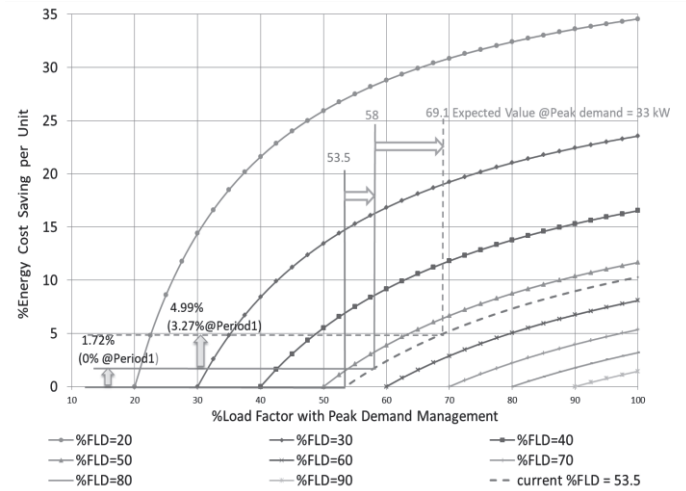




ภาพที่ 15 การแก้ไขต้นทุนค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงของการทดลองช่วง 2 ให้เท่ากับช่วง 1 โดยเพิ่มร้อยละโหลดแพคเตอร์

ตารางที่ 7 รายละเอียดค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บรายเดือนของ กวฟ.๑ ช่วงภาคเรียนที่ 2 ปี 2558 ทั้งสองช่วง (กันยายน ถึง ธันวาคม)

| ช่วง<br>(%F <sub>LD</sub> ) | ค่าไฟฟ้า<br>ฐาน[บาท] | ค่า Pf.<br>[บาท] | ค่า Ft.<br>[บาท] | Vat7%<br>[บาท] | ค่าไฟฟ้าราย<br>เดือน<br>[บาท] | ต้นทุน<br>[บาท<br>/kW-hr] |
|-----------------------------|----------------------|------------------|------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|
| ช่วง1<br>(=54.8)            | 25503.38             | 0                | 2758.04          | 1978.30        | 30239.73                      | 5.0852                    |
| ช่วง2                       | 23127.90             | 0                | 2454.32          | 1790.76        | 27372.98                      | 5.1728                    |
| (=53.5)<br>แก้ไข            | 22688.23             | 0                | 2454.32          | 1759.98        | 26902.53                      | 5.0838                    |
| (=58.0)<br>แก้ไข            | 21850.14             | 0                | 2454.32          | 1701.31        | 26005.78                      | 4.9144                    |
| (=69.1)                     |                      |                  |                  |                |                               |                           |



ภาพที่ 16 ช่วงของต้นทุนพลังงานไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงที่สามารถประหยัดได้ ต่อการแก้ไขร้อยละของโหลดแพคเตอร์ช่วง 2 ให้เพิ่มขึ้น

**OKAY!** TURN On/Off AIR CON.? (เปิด/ปิดแอร์..อย่างไร)

● เปิดแอร์    ปิดสวิทช์ 1    และ    ปิดสวิทช์ 2

● ปิดแอร์    ปิดสวิทช์ 1    และ    ปิดสวิทช์ 2

**TOO HOT !** (ร้อนจัง..ยกเลิกได้ไหม)

● ได้ครับ...

ปิดสวิทช์ 1    และเปิดสวิทช์ 2

**SAVE EARTH** (รักษาสภาพโลก)

♥ เสี่ยงเตือน ปีบ... คือ กวฟ.๑ ใช้ไฟฟ้ามามากไป  
 ไก่จะโดนค่าปรับ(ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด)  
 ขอบภัย..... อาจต้องหยุดเดิน แอร์ หอทั้ง 15 นาที

แจ้งศูนย์ช่วยเหลือลูกค้าที่ศูนย์เพิ่มพื้นที่ ๑.๒. พต.ช.อุบล รุ่งสุ 089-5522170 โครงการ การจัดการปริมาณไฟฟ้าเพื่อเสริมความมั่นคงทางพลังงานของ กองบริหารการไฟฟ้าฯ ร.จ.ภ.

ภาพที่ 17 ป้ายรณรงค์ให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าของ กวฟ.๑

พิจารณาภาพที่ 16 กราฟช่วงของต้นทุนไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงที่สามารถประหยัดได้ที่ร้อยละของโหลดแพคเตอร์ช่วง 2 คือ ร้อยละ 53.5 พบว่าในทางทฤษฎี กวฟ.๑ ยังมีความเป็นไปได้ที่จะลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ลงได้อีกไม่เกิน 8.28% อย่างไรก็ตามการจะบรรลุเป้าหมายดังกล่าวได้ จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือของบุคลากรภายในกองวิชานี้ปฏิบัติตามป้ายรณรงค์ให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าของ กวฟ.๑ ดังแสดงในภาพที่ 17 อย่างจริงจังไม่ยกเลิการทำงานของตัวเองเพื่อความ

ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด แม้ว่าเครื่องปรับอากาศจะหยุดทำงานและอุณหภูมิห้องอาจจะสูงเกินระดับความพึงพอใจต่ออุณหภูมิที่สบายตัวของฝั่งผู้ใช้ในแต่ละคน

## 5. สรุปผล

การประเมินผลการทดลองลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงโดยใช้งานตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบ่งเป็นสองช่วงโดย ช่วง 1 ดำเนินการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างกราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันในรอบสัปดาห์ (1 กันยายน 2558 ถึง 6 พฤศจิกายน 2558) และช่วง 2 ดำเนินการตัดยอดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดที่เกิน 33 กิโลวัตต์ โดยใช้ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (7 พฤศจิกายน 2558 ถึง 20 ธันวาคม 2558) พบว่า (1) ผลของอุณหภูมิที่เย็นลงในช่วงสองเดือนสุดท้ายส่งผลให้กราฟลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ให้มีค่าลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการลดผลของอุณหภูมิด้วยการหาร้อยละของค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ลดลงในช่วงที่ตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดหยุดทำงาน ( $\%Temp\_R95\%=4.28$ ) และ (2) ตัวควบคุมดังกล่าวไม่สามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงได้แม้ว่าจะลดค่าขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยที่ความเชื่อมั่น 95% ลงได้จริง (44.76 กิโลวัตต์ในช่วง 1 เป็น 42.62 กิโลวัตต์ในช่วง 2) แต่ค่าร้อยละของโหลดแพคเตอร์กลับแยลง (ร้อยละ 54.80 ในช่วง 1 เป็นร้อยละ 53.50 ในช่วง 2) ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบสัปดาห์ช่วง 2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าช่วง 1 (911.94 และ 981.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/สัปดาห์ ตามลำดับ) นั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าร้อยละของโหลดแพคเตอร์ไม่เพิ่มขึ้นตามทฤษฎีแม้ว่าขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยที่ความเชื่อมั่น 95% มีค่าลดลง ที่ท้ายที่สุดงานวิจัยนี้ได้ยืนยันว่าตัวควบคุมดังกล่าวจะสามารถตัดค่ายอดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ให้เกิน 33 กิโลวัตต์ได้ และร้อยละของโหลดแพคเตอร์ช่วง 2 จะได้รับการแก้ไข

ในทางทฤษฎีเป็นร้อยละ 69.08 ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงลดลงได้อีกประมาณ 3.27% ถ้าหากบุคลากรทุกคนภายใน กวฟ.ฯ ไม่ได้รับอนุญาตให้สามารถยกเลิกการทำงานของตัวควบคุมค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังกล่าว

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจาก กองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กทพ.ร.จปร.) ประจำปี 2558

## 7. บรรณานุกรม

- (1) M. Ali, A. Yousaf, F. Usman, 2017. Design and Simulation of Load Control & Monitoring System through Demand Side Management Technique, The 8<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress, IEEE Conference, Amman Jordan.
- (2) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, มิถุนายน 2555, โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า <http://www.pea.co.th>.
- (3) M.F. Chipango, O.M. Popoola, J.L. Munda, 2017. Peak Demand Control System Using Load Prioritization for Domestic Households, IEEE Africon, Cape Town, South Africa.
- (4) H. Jorje, M. Martin, A. Gomes, 1993. Maximum Demand Control: A Survey and Comparative Evaluation of Different Methods, IEEE Transactions on Power System, Vol. 8, No. 3.
- (5) T.X. Nghiem, M. Behl, R. Mangharam, 2012. Scalable Scheduling of Building Control Systems for Peak Demand Reduction, American Control Conference, Montreal Canada.
- (6) S. Masri, A.R. Abd Halim, 2014. Demand Control & Monitoring System as the Potential of Energy Saving, IEEE Student Conference on Research and Development, Batu Ferringhi, Malaysia.
- (7) L.I. Minchala, J. Armijos, D. Pesantez, 2016. Design and Implementation of a Smart Meter with Demand Response Capabilities, Applied Energy Symposium and Forum, REM2016, Elsevier Energy Procedia 103 Maldives, April 2016. p.105-200.

- (8) S. Pholboon, M. Sumner, P. Kounnos, 2016. Community Power Flow Control for Peak Demand Reduction and Energy Cost Savings, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Ljubljana Slovenia.
- (9) พงศ์กฤษณ์ รุ่งสุข 2528 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการแก้ไขความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ปีที่13 หน้า 133-145.
- (10) บริษัทแสงชัยมิเตอร์,คู่มือการใช้งานโปรแกรม Richtmass Pro ฉบับสมบูรณ์, <http://www.sangchaimeter.com>.
- (11) หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (ปรับปรุง พ.ศ. 2558), [http://kmo.crma.ac.th/qa\\_edu56](http://kmo.crma.ac.th/qa_edu56).
- (12) พงศ์กฤษณ์ รุ่งสุข 2558 การจัดการปริมาณไฟฟ้าเพื่อการแก้ไขค่าความต้องการกำลังสูงสุดของกองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ กองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.

# การออกแบบโปรแกรมด้วยภาษา Python เพื่อใช้งานร่วมกับโปรแกรม Quantum Geographic Information System ในการวางแผนติดตั้งวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธี Design of Python Programs Used with Quantum Geographic Information System in Combat Microwave Link Planning

พันธุ์ กนก เจริญชัยประกิจ  
Major Kanok Charoenchaiprakt

อาจารย์ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Lecturer of the Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

Corresponding Author: [lightlord56@hotmail.com](mailto:lightlord56@hotmail.com)

(Received: September 9, 2018, Revised: November 7, 2018, Accepted: November 23, 2018)

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความล่าช้าในการวางแผนติดตั้งวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธี ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากภาษา Python เพื่อใช้งานควบคู่กับโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ Quantum Geographic Information System (QGIS) โดยกระบวนการวิจัยเป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลจากตำราเรียนของโรงเรียนทหารสื่อสาร คู่มือราชการสนามของกองทัพบก และเอกสารเกี่ยวกับการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ต่าง ๆ เพื่อนำไปพัฒนากระบวนการวางแผนการติดตั้งวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธี การวิจัยนี้จึงมีประโยชน์สำหรับเจ้าหน้าที่ ฝ่ายอำนวยการ และผู้บังคับหน่วยทหารสื่อสาร เพื่อใช้ในการฝึกวางแผนการติดตั้งระบบวิทยุถ่ายทอดสำหรับสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการหลัก อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่ออาจารย์โรงเรียนทหารสื่อสารและอาจารย์โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนสำหรับนักเรียนเหล่าทหารสื่อสารในวิชาการสื่อสารประเภทสาย และนักเรียนนายร้อยสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารในวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ การวิจัยนี้พบว่า สามารถนำค่าระยะทางและความสูงภูมิประเทศที่ได้จากโปรแกรม QGIS มาวาดภาพสัญญาณด้านข้างและนำมาคำนวณหาความเชื่อถือได้ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจากภาษา Python ในแบบวิธีการทางวิศวกรรมไฟฟ้า สำหรับการทดสอบใช้งานโปรแกรมทำได้โดยการวัดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทางที่ 50 กิโลเมตร (ระยะทางไกลสุดสำหรับการเชื่อมต่อสถานีวิทยุถ่ายทอด) บนโปรแกรม QGIS ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะทางมีผลกระทบกับค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรในกระบวนการวางแผน คือ ข้อ 1 ค่าความสูงเส้นโค้งผิวโลกที่นำมาวาดภาพสัญญาณ ผลที่ได้จากการทดสอบ มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 14 เซนติเมตร ข้อ 2 รัศมีของ Fresnel Zone อันดับหนึ่ง ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.1 เซนติเมตร และข้อ 3 ค่าลดทอนในอากาศว่าง ผลที่ได้จากการทดสอบ มีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.05 dB หรือ 1.01 เฑา ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในข้อ 1 และ 2 ไม่มีนัยสำคัญต่อการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ของระบบเมื่อเทียบกับสเกลที่ใช้ในการคำนวณที่มีหน่วยเป็นเมตร สำหรับในข้อ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่า 1.01 เฑา ซึ่งมีค่าประมาณ 1 ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก

**คำสำคัญ :** ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ภาพสัญญาณด้านข้าง การคำนวณระดับสัญญาณเชื่อมต่อของสถานีวิทยุ ภาษาไพธอน

**Abstract:** The purpose of this research is to reduce time in microwave link planning by specific programs written by a Python programming language in order to be used with Quantum Geographic Information System (QGIS). The study method is to analyze and compare the contents in the Signal student textbook of Signal school, field manuals of Royal Thai Army, and other civilian documents about Path calculation or Link budget in order to develop the process of the combat microwave link planning. The benefits of this research are for Signal officers, staffs and commanders to train about the combat microwave link planning that supports the operations units. In addition, this research facilitates the instructors and lecturers as a teaching media for Signal students of Signal school in the subject of Wire Communication and for Electrical Engineering cadets of Chulachomklao Military Academy in the subject of Microwave Engineering. This research is found that the distances and elevations between 2 microwave link stations can be collected by QGIS, and then be calculated on Path profile and Path calculation in an Electrical Engineering approach by Python programs. To verify the use of these programs in the combat microwave link planning, the experiments are set to test the error of acquired distances from QGIS that affects: 1. earth curvature in the Path profile process, 2. 1st Fresnel zone radius, and 3. free space loss. The maximum acquired distance is 50 kilometers (maximum range of a microwave link). The results are: 1. error of the height of earth curvature is not more than 14 centimeters that is insignificant compare to the unit of kilometers in calculation, 2. error of 1st Fresnel zone radius is not more than 12 centimeters that is insignificant compare to the unit of meters in calculation, and 3. error of free space loss is not more than 0.05 dB or 1.01 that is a small change in the calculation.

**Keywords:** Geographic information system, Path profile, Path calculation, Python



## 1. บทนำ

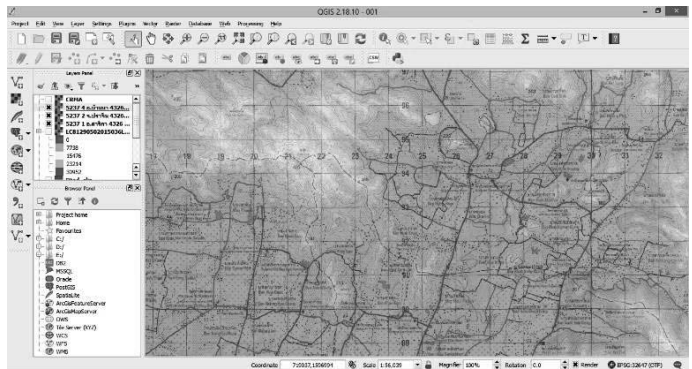
เพื่อให้การบริการทางการสื่อสารสอดคล้องกับภารกิจที่ต้องอาศัยความคล่องตัวและความรวดเร็วในการปฏิบัติการ เช่น การปฏิบัติการรบด้วยวิธีรุก วิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธีจะต้องมีความคล่องตัวในการเคลื่อนย้ายสถานีตลอดเวลา แตกต่างจากวิทยุถ่ายทอดที่ใช้ในงานทั่วไปที่ทำการติดตั้งประจำที่

การดำเนินการวางแผนการจัดตั้งสถานีวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธีจะต้องทำการคำนวณค่าความเชื่อถือได้เพื่อให้ทราบถึงประเภทของการบริการข้อมูล เช่น เสียง (Voice) โทรพิมพ์ (Teletype) และข้อมูลคอมพิวเตอร์ (Data) ซึ่งกระบวนการคำนวณหาค่าความเชื่อถือได้ระหว่างสถานีวิทยุถ่ายทอดสองสถานีนั้น ผู้วางแผนจะต้องพิจารณาว่าสายอากาศของสถานีรับและส่งไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างเส้น Line of Sight หรืออยู่ในรัศมี Fresnel Zone อันดับที่หนึ่ง กระบวนการตรวจสอบว่าสายอากาศนั้นอยู่ในลักษณะดังกล่าวหรือไม่ จะต้องทำภาพสัณฐานด้านข้าง (Path Profile) ระหว่างสถานีรับและส่งด้วยกราฟตามแนวความโค้งของผิวโลก เมื่อได้สถานที่ตั้งสถานีวิทยุถ่ายทอดทั้ง 2 สถานีแล้ว จึงนำระยะทางระหว่างสถานี รวมถึงค่าปัจจัยต่างๆ มาคำนวณหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบ (Path Calculation) เพื่อดูประสิทธิภาพของการบริการข้อมูลที่ได้ออกมาแล้วข้างต้น

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการวางแผนการจัดตั้งสถานีวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธี คือ 1. ความล่าช้าในการอ่านข้อมูลบนแผนที่กระดาษ และ 2. โปรแกรมที่ใช้ในการวาดภาพสัณฐานด้านข้างรวมถึงการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ในปัจจุบันโปรแกรม Excel ถูกนำมาใช้ในกระบวนการวางแผน ข้อเสียของโปรแกรมนี้นี้ คือ เป็นโปรแกรมที่มีลิขสิทธิ์และมีอุปสรรคต่อการพัฒนาต่อยอดโปรแกรมทางด้านวิศวกรรม

โปรแกรม Quantum Geographic Information System (GIS) ซึ่งเป็นโปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบรหัสเปิด สามารถนำมาแก้ปัญหาล่าช้าในการ

อ่านข้อมูลบนแผนที่กระดาษ ด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ดังนั้น ผู้วางแผนสามารถนำเข้าข้อมูลแผนที่ได้หลากหลายรูปแบบ รวมถึงการปรับแต่งค่าการแสดงผลของแผนที่ให้เหมาะสมกับการพิจารณาเลือกที่ตั้งสถานีวิทยุถ่ายทอด



ภาพที่ 1 โปรแกรม QGIS

โปรแกรม QGIS มีความสามารถในการดึงข้อมูลระยะทางและความสูงภูมิประเทศจากแผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Elevation Model) เพื่อนำมาสร้างภาพสัณฐานด้านข้างแบบทั่วไป ซึ่งภาพสัณฐานที่ได้นั้นไม่มีการปรับแก้ความสูงเนื่องจากความโค้งของผิวโลก ดังนั้น ภาพสัณฐานด้านข้างที่สร้างจาก QGIS ไม่สามารถนำมาพิจารณาสิ่งกีดขวางบนเส้น Line of sight ระหว่างสายอากาศของสถานีวิทยุถ่ายทอดตามหลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

เพื่อตอบสนองต่อการคำนวณทางวิศวกรรม ผู้วิจัยได้จัดทำโปรแกรม Path Profile และ Path Calculation ด้วยภาษา Python สำหรับใช้งานควบคู่กับโปรแกรม QGIS และสามารถทดแทนโปรแกรมที่สร้างด้วย Excel ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ Geographic Information System (GIS) เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีสารสนเทศ (Geo-information Technology) ที่ประกอบไปด้วย 1. การรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing:

RS) 2. ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning systems: GPS) และ 3. ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) [1] ซึ่งรองศาสตราจารย์สรศักดิ์ กลิ่นดาว กรรมการตรวจแบบเรียนวิชาภูมิศาสตร์ กรมวิชาการกระทรวงศึกษาธิการ ได้ให้นิยาม GIS ไว้ 3 ประการ ดังนี้ (1) เครื่องมือคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ประกอบสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ (2) ระบบสารสนเทศที่ใช้กับข้อมูลเชิงพื้นที่ และ (3) การวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้กับข้อมูลเชิงพื้นที่ [2]

เนื่องจาก GIS เป็นระบบที่ทำงานด้วยโปรแกรมเฉพาะทางบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมนี้นั้นมีทั้งแบบที่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ เช่น ArcGIS และ Global mapper เป็นต้น และแบบที่ไม่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ในการใช้งาน หรือที่เรียกว่า Open-source software เช่น Quantum GIS (QGIS), Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) และ MapWindow เป็นต้น ในการวิจัยนี้ใช้โปรแกรม QGIS ในการทดลอง เพราะไม่เสียค่าใช้จ่ายในการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ทั้งระบบปฏิบัติการ Windows, Linux และ MacOS จึงสามารถรองรับกับการเปลี่ยนรูปแบบการใช้งานระบบปฏิบัติการของภาครัฐให้เป็นระบบปฏิบัติการ Linux ที่ไม่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ในการใช้งาน

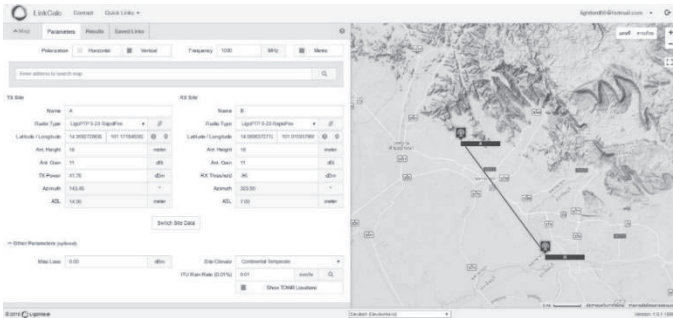
โปรแกรม QGIS มี Plugin หรือโปรแกรมย่อยที่เป็นเสมือนเครื่องมือที่ช่วยในการทำงานในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เช่น Plugin ชื่อ “Georeferencer” สามารถแปลงแผนที่รูปภาพนามสกุล JPEG หรือ TIFF ให้เป็นไฟล์นามสกุล GeoTIFF ด้วยการใส่พิกัดทางภูมิศาสตร์ลงในไฟล์ภาพแผนที่ด้วยตนเอง เป็นต้น ในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่มีไฟล์แผนที่ โปรแกรม QGIS มี Plugin ชื่อ “Open-layers plugin” ที่สามารถนำเข้าแผนที่แบบออนไลน์จากผู้ให้บริการต่าง ๆ เช่น Open Street Map, Google Maps และ Bing Maps เป็นต้น ดังนั้น หน่วยงานทางทหารสามารถทำการสแกนแผนที่กระดาษที่สร้างขึ้นเองหรือที่มีอยู่เพื่อทำการใส่พิกัดทางภูมิศาสตร์เพื่อใช้งานร่วมกับแผนที่ออนไลน์บนโปรแกรม QGIS ได้

ภาษา Python เปิดใช้งานอย่างเป็นทางการครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2534 (ค.ศ. 1991) พัฒนาโดย Guido van Rossum นักเขียนโปรแกรมชาว Dutch บริษัทและหน่วยงานที่สำคัญระดับโลก เช่น Google, IBM, Industrial Light & Magic, Microsoft, NASA, Red Hat, Verizon, Xerox และ Yahoo! ได้เลือกภาษา Python ในการดำเนินกิจการ [3]

ภาษา Python ถูกจัดเป็นภาษาขั้นสูง (High-Level Language) เช่นเดียวกับภาษา Visual Basic, C# และ Java ที่มีลักษณะการใช้งานใกล้เคียงกับภาษามนุษย์ โดยเฉพาะภาษา Python ซึ่งถูกออกแบบการใช้งานให้ใกล้เคียงกับภาษาอังกฤษมากกว่าภาษาอื่น ดังนั้น การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python จึงง่ายและรวดเร็วกว่าภาษาอื่น จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ภาษา Python จึงเหมาะกับการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้งานในยุคปัจจุบัน

ในส่วนของชุดวิทยุถ่ายทอดที่มีใช้งานอยู่ในกองทัพบก เป็นชุดวิทยุถ่ายทอด แบบ RL-4 Series ที่มีความถี่การใช้งานอยู่ในช่วง 610-1,850 MHz กำลังส่งมีให้เลือก 2 โหมด คือ 1. กำลังต่ำที่ 1 W และ 2. กำลังสูงที่ 15 W สายส่งสัญญาณยาว 35 เมตร มีค่าความลดทอนของสัญญาณ เท่ากับ 4 dB สายอากาศแบบ Corner reflector มีอัตราขยายตั้งแต่ 11-19.8 dB (ขึ้นอยู่กับรุ่นที่ใช้งาน) ซึ่งสามารถประกอบกับเสาอากาศ รุ่น TAM-18 สูง 18 เมตร

สำหรับโปรแกรมการคำนวณหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบ สามารถหาใช้งานได้บนสื่อออนไลน์และโปรแกรมที่มาพร้อมกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์วิทยุถ่ายทอด เช่น เว็บไซต์ ALL ABOUT CIRCUIT, เว็บไซต์ Radio Link Budget Calculator และเว็บไซต์ LinkCalc เป็นต้น [4-6] ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้มีการใช้แบบจำลองในการคำนวณที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการวิจัยนี้ เป็นการออกแบบโปรแกรมให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานกับวิทยุถ่ายทอดทางทหารที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน



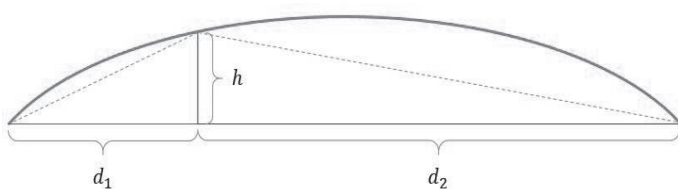
ภาพที่ 2 หน้าต่างโปรแกรมจากเว็บไซต์ LinkCalc

### 3. การออกแบบโปรแกรม Path profile

โปรแกรม Path Profile เป็นโปรแกรมในการวาดภาพพื้นฐานด้านข้างบนกราฟเส้นโค้งผิวโลก ที่ค่า  $K = 3/4$  ซึ่งสามารถคำนวณค่าความสูงเส้นโค้งผิวโลกได้ดังสมการด้านล่าง [7]

$$h = \frac{d_1 d_2}{12.75K} \quad (1)$$

โดย  $h$  คือ ความสูงที่เกิดจากความโค้งของผิวโลก หน่วยเป็น เมตร,  $K$  คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ  $4/3$  และ ค่า  $d_1$  และ  $d_2$  คือ ระยะทางในแนวนอน หน่วยเป็น กิโลเมตร ดังแสดงในภาพด้านล่าง

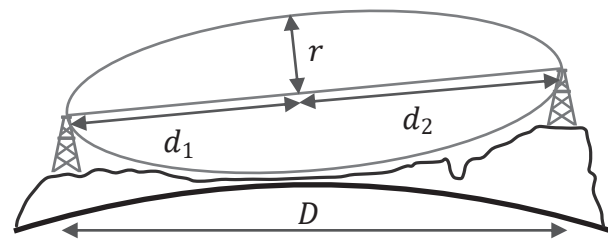


ภาพที่ 3 ภาพแสดงค่าตัวแปรในการวาดกราฟเส้นโค้งผิวโลก

สมการต่อไปเป็นสมการคำนวณค่ารัศมี Fresnel zone อันดับที่หนึ่ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง [4]

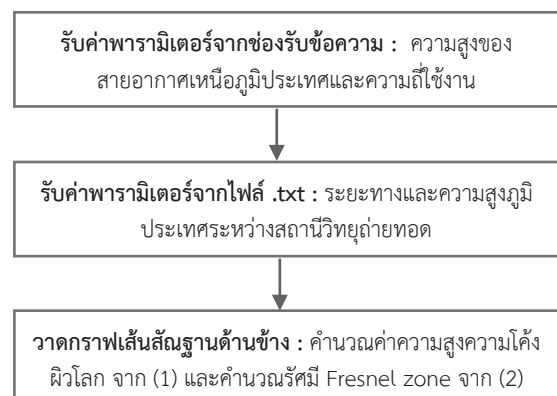
$$r = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{D}} \quad (2)$$

โดย  $r$  คือ รัศมีของ Fresnel zone อันดับที่หนึ่ง หน่วยเป็น เมตร,  $\lambda$  คือ ความยาวของคลื่น หน่วยเป็น เมตร, ค่า  $d_1$  และ  $d_2$  คือ ระยะทางของเส้น Line of sight หน่วยเป็น เมตร และค่า  $D$  คือ ระยะทางรวมของเส้น Line of sight หน่วยเป็น เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $d_1 + d_2$  ดังแสดงในภาพด้านล่าง



ภาพที่ 4 ภาพแสดงเส้นรัศมี Fresnel zone

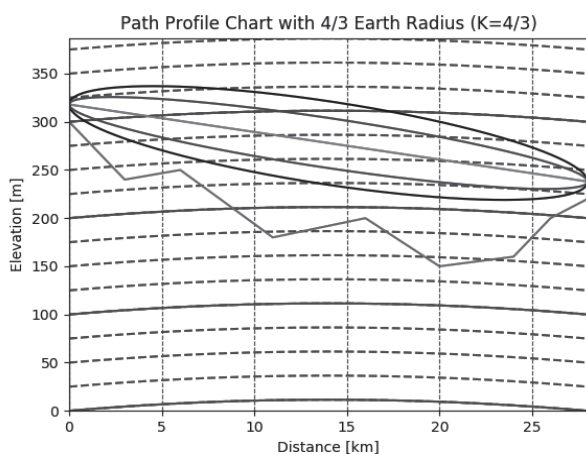
ในการวาดเส้น Line of Sight ผู้วางแผนจะต้องทราบความสูงของเสาอากาศ เพื่อนำไปกำหนดลงบนตารางกราฟเส้นโค้งผิวโลก ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าหน้าตาของโปรแกรม Path Profile ต้องประกอบด้วย (1) เฟรมรับค่าตัวแปรของวิทยุถ่ายทอด ได้แก่ ความสูงของเสาอากาศและความถี่ที่ใช้งาน (2) เฟรมรับค่าระยะทางและความสูงภูมิประเทศที่ได้จากโปรแกรม QGIS ซึ่งบันทึกอยู่ในรูปของไฟล์ .txt และ 3. เฟรมปุ่มคำสั่งในการคำนวณและแสดงผล รวมถึงปุ่มปิดโปรแกรม โดยมีแผนผังและหน้าตาของโปรแกรกดังภาพด้านล่าง



ภาพที่ 5 แผนผังโปรแกรม Path profile

ภาพที่ 6 หน้าต่างโปรแกรม Path profile

เมื่อทำการป้อนค่าตัวแปรในโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว หลังจากกดปุ่ม “Plot” โปรแกรมจะแสดงรูปภาพพื้นฐานด้านข้างประกอบไปด้วยเส้นความสูงภูมิประเทศ เส้น Line of Sight และเส้นรัศมี Fresnel Zone อันดับหนึ่งที่มีย่านขนาด 100 และ 60 เปอร์เซนต์ ดังแสดงในภาพด้านล่าง



ภาพที่ 7 หน้าต่างแสดงผลของโปรแกรม Path profile

#### 4. การออกแบบโปรแกรม Path calculation

การคำนวณหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบหรือการทำ Path Calculation ประกอบไปด้วยการคำนวณค่าของระบบ (System Value) ค่าความลดทอนรวมในอากาศ (Total Attenuation) ค่าขอบการจางหาย (Fade Margin) และการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ของระบบ (Reliability) โดยเป็นไปตามสมการด้านล่าง [8]

ค่าของระบบ (System value)

$$S.V. = P_{out} - FL_{tx} + AG_{tx} + AG_{rx} - FL_{rx} - P_{th} \quad (3)$$

โดยที่  $S.V.$  คือ ค่าของระบบ มีหน่วยเป็น dBm,  $P_{out}$  คือ กำลังส่งสัญญาณของวิทยุถ่ายทอด ณ สถานีส่งสัญญาณ มีหน่วยเป็น dBm,  $FL_{tx}$  และ  $FL_{rx}$  คือ ค่าการลดทอนกำลังในสายส่งสัญญาณของสถานีส่งสัญญาณและรับสัญญาณ หน่วยเป็น dB,  $AG_{tx}$  และ  $AG_{rx}$  คือ กำลังขยายของสายอากาศของสถานีส่งสัญญาณและรับสัญญาณ มีหน่วยเป็น dB และ  $P_{th}$  คือ กำลังงานต่ำสุดที่เครื่องรับสามารถรับได้ หน่วยเป็น dBm

ค่าความลดทอนรวมในอากาศ (Total Attenuation)

$$A_{total} = A_s + A_a \quad (4)$$

โดยที่  $A_{total}$  คือ ค่าการลดทอนรวมในอากาศ มีหน่วยเป็น dB,  $A_s$  คือ ค่าการลดทอนในอากาศว่าง หน่วยเป็น dB และ  $A_a$  คือ ค่าการลดทอนอื่นๆ หน่วยเป็น dB สำหรับการคำนวณค่าการลดทอนในอากาศว่าง ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากสมการด้านล่าง

$$A_s = 32.44 + 20 \log D + 20 \log f \quad (5)$$

โดยที่  $A_s$  คือ ค่าการลดทอนในอากาศว่าง หน่วยเป็น dB,  $D$  คือ ระยะทางระหว่างสถานี หน่วยเป็น กิโลเมตร และ  $f$  คือ ความถี่ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล หน่วยเป็น MHz

ค่าขอบการจางหาย (Fade margin)

$$M.G. = S.V. - A_{total} \quad (6)$$

โดยที่  $M.G.$  คือ ค่าขอบการจางหาย มีหน่วยเป็น dB,  $S.V.$  คือ ค่าของระบบ หน่วยเป็น dB และ  $A_{total}$  คือ ค่าการลดทอนรวมในอากาศ หน่วยเป็น dB

ค่าความเชื่อถือได้ของระบบ (Reliability)

$$R \approx 1 - 10^{-(M.G.+A)/10} \quad (7)$$

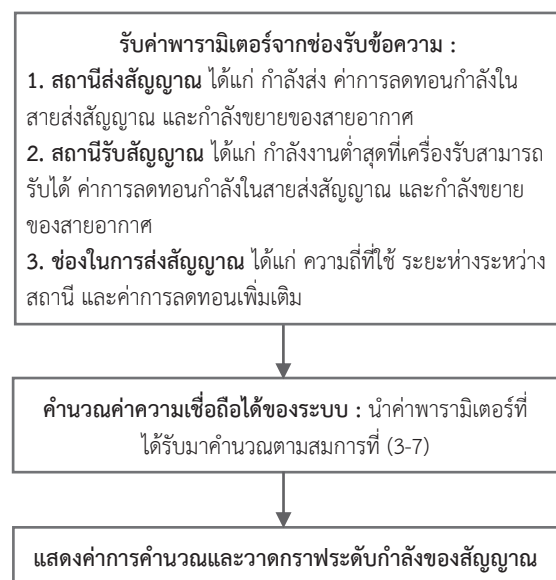
โดยที่  $A$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.001 และ  $M.G.$  คือ ค่าขอบการจางหาย มีหน่วยเป็น dB

จากสมการข้างต้น สามารถออกแบบเฟรมการรับค่าข้อมูลออกเป็น 3 เฟรม คือ (1) เฟรมค่าตัวแปรสำหรับสถานีส่งสัญญาณ (2) เฟรมค่าตัวแปรสำหรับสถานีรับสัญญาณ และ (3) เฟรมค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการลดทอนในอากาศ

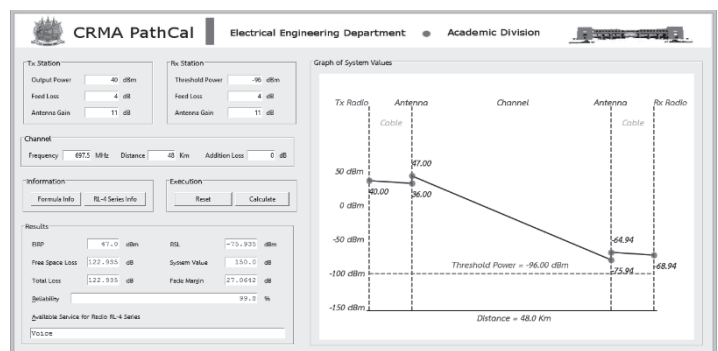
สำหรับการแสดงผล กำหนดให้มีการแสดงผลในรูปแบบข้อความและรูปภาพที่บอกระดับของกำลังสัญญาณเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ระบบ โดยมีแผนผังและหน้าต่างของโปรแกรม ดังภาพที่ 8

## 5. การทดสอบการใช้โปรแกรม

เพื่อทดสอบว่าการทำงานของโปรแกรม QGIS ในกระบวนการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบมีความคลาดเคลื่อนน้อยเพียงใด สามารถกระทำได้โดยการวัดความคลาดเคลื่อนของระยะทางและความสูงภูมิประเทศเมื่อเทียบกับการทำงานกับแผนที่กระดาษ สำหรับแผนที่ดิจิทัลที่ใช้ คือ (1) แผนที่ประเทศไทย มาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7018 ในรูปแบบของไฟล์ JPEG และแผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขแบบ DTED Level 2 สามารถทำได้ดังนี้



ภาพที่ 8 แผนผังโปรแกรม Path Profile

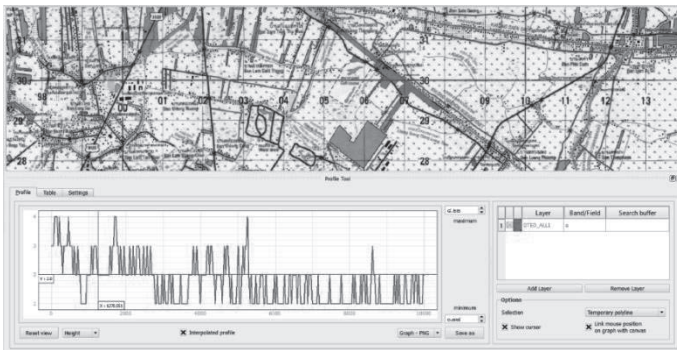


ภาพที่ 9 หน้าต่างโปรแกรม Path Calculation



### 5.1 การทดสอบความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทาง

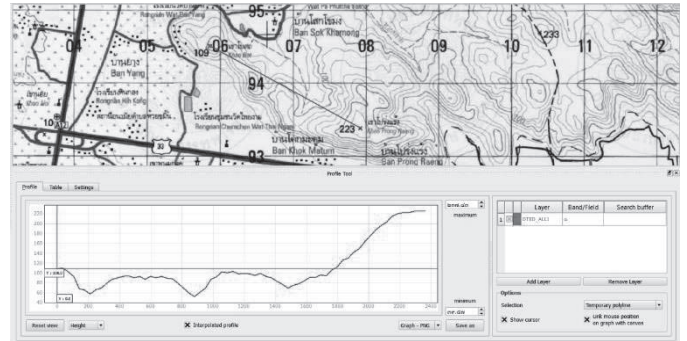
เป็นการทดสอบการอ่านค่าระยะทาง โดยการทดสอบจะทำการกำหนดการวัดระยะบนแผนที่ทหารที่ 10 กม. (10 ช่อง), 20 กม. (20 ช่อง), 30 กม. (30 ช่อง), 40 กม. (40 ช่อง) และ 50 กม. (50 ช่อง) ดังแสดงในภาพด้านล่าง



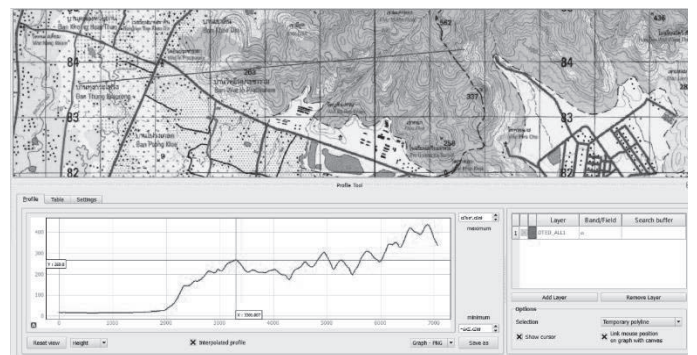
ภาพที่ 10 การวัดระยะทาง 10 กม. บนแผนที่ทหารในโปรแกรม QGIS

### 5.2 การทดสอบความคลาดเคลื่อนในการวัดความสูงภูมิประเทศ

การทดสอบการวัดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดความสูงภูมิประเทศจะทำการทดสอบ 2 แบบด้วยกัน คือ (1) การอ่านค่าความสูงจากเลเยอร์แผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขที่จุดพิกัดเดียวกันกับที่แสดงบนแผนที่ทหาร และ (2) การทำภาพสัณฐานด้านข้างจากข้อมูลบนเลเยอร์แผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขที่ผ่านจุดที่ทราบค่าความสูงบนแผนที่ทหาร ดังแสดงในภาพด้านล่าง แล้วทำการบันทึกผลและหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3



ภาพที่ 11 การวัดความสูงภูมิประเทศโดยอ่านค่าความสูงที่พิกัดเดียวกับแผนที่ทหาร



ภาพที่ 12 การวัดความสูงภูมิประเทศโดยใช้ค่าความสูงบนภาพสัณฐานด้านข้าง

## 6. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ ทำโดยการพิจารณา ค่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการรับค่าระยะทางและความสูงภูมิประเทศ โดยผลการทดสอบในข้อ 5 จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าระยะทางและความสูงบนที่ก้อยู่ในรูปแบบของตาราง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้โดยการหาค่าผลต่างของสมการให้อยู่ในรูปของตัวแปรความคลาดเคลื่อนของระยะทางเพื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองไปแทนค่าหาความคลาดเคลื่อนของค่าที่มีผลกระทบนั้น ๆ หรืออาจจะทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรที่สนใจกับค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่ทำการวัด ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

### 6.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทาง

จากการทดสอบที่ 5.1 สามารถบันทึกค่าได้ดังตารางที่ 1 โดยค่าความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าระยะทางมากที่สุดในการวัดระยะ 50 กิโลเมตร มีความคลาดเคลื่อน 53.3 เมตร หรือ 0.107 เปอร์เซ็นต์

**ตารางที่ 1** ผลการหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทางบนแผนที่ทหาร

| ระยะทาง (กม.) | ระยะทางที่อ่านได้ (กม.) | ค่าความคลาดเคลื่อน (กม.) | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| 10            | 10.0095                 | 0.0095                   | 0.095                  |
| 20            | 20.0065                 | 0.0065                   | 0.033                  |
| 30            | 29.9971                 | 0.0029                   | 0.010                  |
| 40            | 39.9864                 | 0.0136                   | 0.034                  |
| 50            | 50.0533                 | 0.0533                   | 0.107                  |

ปัจจัยเรื่องระยะทางนั้น มีผลกระทบต่อ 1. การคำนวณความสูงเส้นโค้งผิวโลก 2. การคำนวณรัศมีของ Fresnel Zone อันดับหนึ่ง และ 3. การคำนวณค่าลดทอนในอากาศว่าง ดังนั้น เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบต่อตัวแปรดังกล่าวได้อย่างชัดเจน สามารถคำนวณหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังนี้

ก. การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของกราฟเส้นโค้งผิวโลก ( $K = 3/4$ ) สามารถคำนวณได้โดยการนำสมการที่ (1) มาหาค่าผลต่าง โดยกำหนดให้  $D$  คือ ระยะทางทั้งหมด,  $e$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทาง และ  $\Delta h$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงของเส้นโค้งผิวโลก ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$\Delta h = \frac{\left(\frac{D+e}{2}\right)^2}{12.75(3/4)} - \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{12.75(3/4)}$$

หรือ

$$\Delta h = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{12.75(3/4)} - \frac{\left(\frac{D-e}{2}\right)^2}{12.75(3/4)}$$

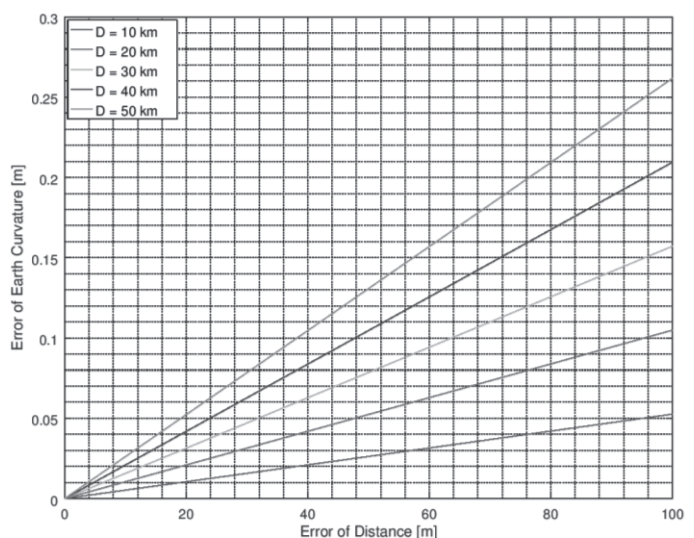
จะได้

$$\Delta h = \frac{2eD \pm e^2}{38.25}$$

จากค่า  $e$  มีหน่วยเป็น กิโลเมตร แต่ค่าที่วัดได้มีค่ามากที่สุด คือ 53.3 เมตร สามารถประมาณค่า  $e^2$  เท่ากับศูนย์ ดังนั้น จะได้สมการค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงของเส้นโค้งผิวโลก ดังนี้

$$\Delta h = \frac{2eD}{38.25} \quad (8)$$

จากสมการด้านบนเมื่อนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงเส้นโค้งผิวโลกกับค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กิโลเมตร พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางจากการทดสอบการใช้งานโปรแกรม QGIS ที่มากที่สุดที่ 53.3 เมตร นั้น ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของกราฟเส้นโค้งผิวโลกไม่เกิน 14 เซนติเมตร



**ภาพที่ 13** ค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงของเส้นโค้งผิวโลกกับค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทาง

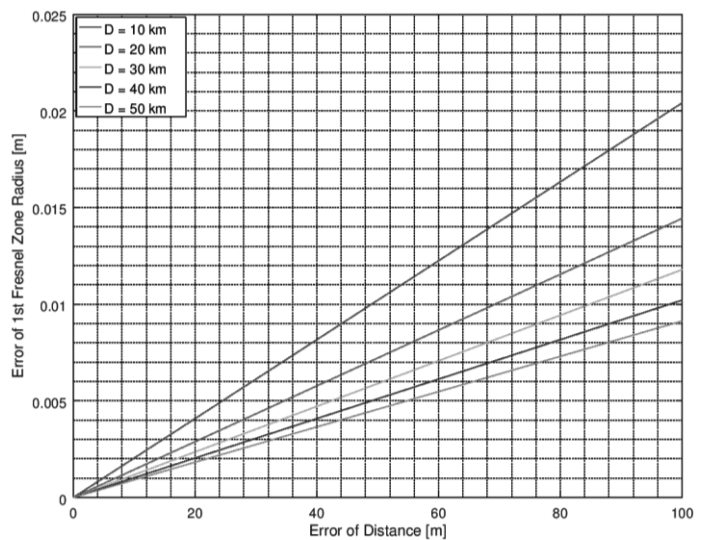
ข. การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของเส้นรัศมี Fresnel Zone อันดับที่หนึ่ง สามารถหาได้จากผลต่างของสมการที่ (2) โดยกำหนดให้ คือ ระยะทางทั้งหมด, คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทาง และ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นรัศมี Fresnel zone อันดับที่หนึ่ง ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$\Delta r = \sqrt{\frac{\lambda(D+e)^2}{D}} - \sqrt{\frac{\lambda(\frac{D}{2})^2}{D}} \text{ หรือ } \Delta r = \sqrt{\frac{\lambda(\frac{D}{2})^2}{D}} - \sqrt{\frac{\lambda(\frac{D-e}{2})^2}{D}}$$

จะได้

$$\Delta r = \frac{e}{2\sqrt{fD}} \quad (9)$$

เมื่อทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นรัศมี Fresnel Zone อันดับที่หนึ่งกับค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กิโลเมตร โดยกำหนดค่าความถี่ต่ำที่สุดของเครื่องวิทยุถ่ายทอด RL-4 Series ที่ประมาณ 600 MHz (ใช้ค่าความถี่ต่ำที่สุดเพื่อให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุด) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางจากการทดสอบการใช้งานโปรแกรม QGIS ที่มากที่สุด คือ 53.3 เมตร ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นรัศมี Fresnel zone อันดับที่หนึ่งไม่เกิน 1.1 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพด้านล่าง



ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นรัศมี Fresnel zone อันดับที่หนึ่งกับค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทาง

ค. การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของค่าการลดทอนในอากาศว่าง สามารถหาได้จากผลต่างของสมการที่ (5) โดยกำหนดให้ เมื่อ  $D$  คือ ระยะทางทั้งหมด,  $e$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทาง และ  $\Delta A_s$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการลดทอนในอากาศว่าง ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$\Delta A_s = 20 \log(D + e) - 20 \log D$$

หรือ

$$\Delta A_s = 20 \log D - 20 \log(D - e)$$

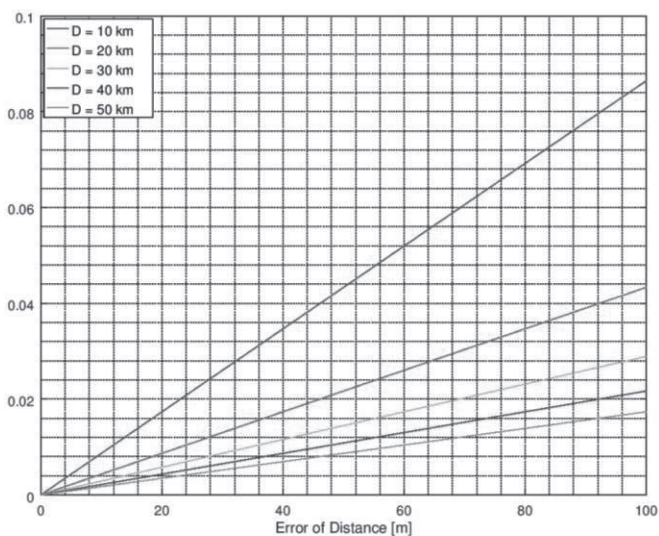
จะได้

$$\Delta A_s = 20 \log\left(1 + \frac{e}{D}\right)$$

หรือ

$$\Delta A_s = -20 \log\left(1 - \frac{e}{D}\right) \quad (10)$$

เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการลดทอนในอากาศว่างกับค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กิโลเมตร พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางจากการทดสอบการใช้งานโปรแกรม QGIS ที่มากที่สุด คือ 53.3 เมตร นั้น ให้ค่าความคลาดเคลื่อนการลดทอนในอากาศว่างไม่เกิน 0.05 dB หรือ 1.01 เท้า ดังแสดงในภาพด้านล่าง



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการลดทอนในอากาศว่างกับค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทาง

## 6.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนในการวัดความสูงภูมิประเทศ

จากการทดสอบที่ 5.2 สามารถบันทึกค่าได้ตามข้อมูลในตารางที่ 2 และ 3 โดยค่าความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าความสูงมากที่สุดที่ 19 เมตร ดังนั้น การพิจารณาภาพสัญญาณด้านข้าง จะต้องเผื่อค่าความสูง 20 เมตรเป็นอย่างน้อย

ตารางที่ 2 ผลการหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดความสูงที่อ้างอิงตำแหน่งความสูงจากแผนที่ทหารเป็นหลัก

| จุดที่ | ความสูงบนแผนที่ทหาร (ม.) | ความสูงที่อ่านได้ (ม.) | ค่าความคลาดเคลื่อน (ม.) |
|--------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1      | 109                      | 110                    | 1                       |
| 2      | 223                      | 225                    | 2                       |
| 3      | 223                      | 225                    | 2                       |
| 4      | 233                      | 233                    | 0                       |
| 5      | 236                      | 217                    | 19                      |
| 6      | 132                      | 116                    | 16                      |
| 7      | 239                      | 234                    | 5                       |
| 8      | 233                      | 227                    | 6                       |
| 9      | 299                      | 289                    | 10                      |
| 10     | 217                      | 210                    | 7                       |

ตารางที่ 3 ผลการหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดความสูงที่อ้างอิงตำแหน่งความสูงจากแผนที่ความสูงภูมิศาสตร์เชิงเลขเป็นหลัก

| จุดที่ | ความสูงบนแผนที่ทหาร (ม.) | ความสูงที่อ่านได้ (ม.) | ค่าความคลาดเคลื่อน (ม.) |
|--------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1      | 263                      | 269                    | 6                       |
| 2      | 562                      | 578                    | 16                      |
| 3      | 436                      | 438                    | 2                       |
| 4      | 724                      | 742                    | 18                      |
| 5      | 684                      | 695                    | 11                      |



สำหรับการแก้ไขปัญหานี้ เนื่องจากแผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขที่ใช้ เป็นแบบ DTED Level 2 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนทางความสูง 18 เมตร ผู้วางแผนอาจจะเลือกใช้แผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขที่มีความละเอียดสูงขึ้นเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการรับค่าจาก QGIS

## 7. สรุปผล

การใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ QGIS ร่วมกับโปรแกรม Path Profile และ Path Calculation ที่เขียนด้วยภาษา Python เพื่อใช้วางแผนการติดตั้งสถานีวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธี สามารถลดเวลาในการเก็บข้อมูลระยะทางและความสูงภูมิประเทศ สามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบข้อความและแบบกราฟระดับสัญญาณ เพื่อให้ง่ายต่อการปรับแก้ระบบเมื่อมีค่าความเชื่อถือได้น้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากกระบวนการทั้งหมดนี้สามารถประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบพกพา ทำให้ใช้พื้นที่น้อยในการวางแผนและมีความคล่องตัวในการย้ายที่ปฏิบัติการ

สำหรับความถูกต้องของการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ของระบบนั้น ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของแผนที่ที่ใช้ในโปรแกรม QGIS ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ ใช้แผนที่ทหารที่สแกนเป็นภาพดิจิทัลแล้วทำการใส่พิกัดด้วยโปรแกรม QGIS ทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดจำนวนหนึ่ง และแผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขที่มีความคลาดเคลื่อนทางความสูงที่ 18 เมตร ซึ่งแผนที่ดังกล่าว เมื่อนำมาทำการทดสอบ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของกราฟเส้นโค้งผิวโลกไม่เกิน 14 เซนติเมตร, ค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นรัศมี Fresnel Zone อันดับหนึ่งไม่เกิน 1.1 เซนติเมตร, และค่าความคลาดเคลื่อนการลดทอนในอากาศว่างไม่เกิน 0.05 dB หรือ 1.01 เทา ซึ่งถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนที่ไม่มีความสำคัญต่อการคำนวณหาค่า

ความเชื่อถือได้ของระบบ ยกเว้นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดความสูงภูมิประเทศ ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ 19 เมตร ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้แผนที่ความสูง ภูมิประเทศเชิงเลขที่มีความละเอียดสูงขึ้น

สำหรับข้อจำกัดในการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการหาความน่าเชื่อถือได้ของระบบวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธีในสถานการณ์ไม่ปกตินั้น จำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรอง เช่น เครื่องปั่นไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่สำรอง เป็นต้น หากเปรียบเทียบกับข้อดีที่ได้นั้น การใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำไปใช้งานและพัฒนาต่อยอดเพื่อเชื่อมโยงกับระบบการปฏิบัติการทางทหารอื่นๆ

ในการวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับการวางแผนการจัดตั้งสถานีวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธีในอนาคตนั้น สามารถนำโปรแกรมนี้ให้หน่วยทหารสื่อสารไปทดลองใช้งานจริงเพื่อรับข้อเสนอแนะในระดับผู้ใช้งานไปแก้ไขในจุดที่บกพร่องและพัฒนาในส่วนที่หน่วยใช้ต้องการต่อไป

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองร้อยลาดตระเวนระยะไกลที่ 2 กองพลทหารราบที่ 2 รักษาพระองค์ ที่ให้การสนับสนุนแผนที่ประเทศไทย มาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7018 ในรูปแบบของไฟล์ JPEG ขอขอบคุณชุดอำนวยการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมแผนที่ กรมแผนที่ทหาร ที่ให้การสนับสนุนแผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่สนับสนุนทุนวิจัย ทำให้ผู้วิจัยได้พัฒนาศักยภาพทางวิชาการและได้ต่อยอดความรู้และทักษะเกี่ยวกับ การออกแบบระบบการสื่อสารเพื่อนำไปถ่ายทอดให้กับนักเรียนนายร้อยและพัฒนากองทัพต่อไป



## บรรณานุกรม

- (1) สุเพชร จิระจกุล, 2555. เรียนรู้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วยโปรแกรม ArcGIS Desktop 9.3.1 (ฉบับปรับปรุง). นนทบุรี : บริษัท เอ.พี. กราฟิคดีไซน์และการพิมพ์ จำกัด.
- (2) สรรค์ใจ กลิ่นดาว, 2555. แบบฝึกปฏิบัติการเรียนรู้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ โปรแกรม ArchGIS. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- (3) Micheal Dawson. 2010. Python Programming for the Absolute Beginner. 3rd Ed. Boston : Course Technology.
- (4) ALL ABOUT CIRCUITS, "Link Budget Calculator," ค้นเมื่อ 24 กรกฎาคม 2561, ที่มา [https:// www.allaboutcircuits.com/tools/link-budget-calculator/](https://www.allaboutcircuits.com/tools/link-budget-calculator/).
- (5) Satellite Signals, "Radio link budget calculator - line of sight radio or microwave link," ค้นเมื่อ 24 กรกฎาคม 2561, ที่มา <http://www.satsig.net/link-budget.htm>.
- (6) Ligo Wave, "โปรแกรม LinkCalc ออนไลน์," ค้นเมื่อ 24 กรกฎาคม 2561, ที่มา <https://linkcalc.ligowave.com>
- (7) บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์, 2536. วิศวกรรมไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (8) แผนการสื่อสารประเภทสาย ส่วนการศึกษา โรงเรียนทหารสื่อสาร กรมการทหารสื่อสาร, 2550. การสื่อสารประเภทสาย. กรุงเทพฯ : โรงเรียนทหารสื่อสาร กรมการทหารสื่อสาร.

## An Adaptively Biased Linear MOS Transconductor for Low Power Application

Major Assistant Professor Pravitt Tongpoon

*Physics Department, Chulachomklao Royal Military Academy*

*Corresponding Author: pongjapan@hotmail.com*

*(Received: October 2, 2018, Revised: December 1, 2018, Accepted: December 14, 2018)*

**Abstract :** An adaptively biased linear MOS transconductor is known as a linear transconductor. However, if the low transconductance is needed, small operating current makes MOSFETs operate in weak inversion. In this case, the voltage-current characteristic is not expressed as a square-law characteristic but is expressed as an exponential function. Thus, the factor makes linearity of the transconductor worse. In this paper, a new design of the adaptively biased linear MOS transconductor considering the influence of MOSFETs operating in weak inversion is proposed. In the proposed technique, an adaptive biasing circuit is newly designed for improvement of the linearity deterioration. Simulation results show that the proposed technique is effective for improvement of the linearity.

**Keywords :** CMOS, Analog Integrated Circuits, Linear Circuits, Adaptively Biased MOS Transconductors

## 1. Introduction

A transconductor is a circuit to convert input signal voltages into signal currents. The voltage-current characteristic is desired to be linear. However, the linearity is deteriorated by non-ideal factors.

An adaptively biased linear MOS transconductor [1] is known as a linear transconductor. The good linearity is realized by subtraction of individual differential output currents using single-end converter. However, the transconductor has drawbacks; 1) the power supply rejection ratio (PSRR) and the common mode rejection ratio (CMRR) are low and 2) the linearity is not realized if the output currents are taken out from each of differential output terminals, namely the individual differential output currents are not linear. For improvement of the drawbacks, an adaptively biased linear MOS transconductor composed of a square current source and a differential pair [2] has been already proposed. The transconductor has good properties, such as high PSRR, high CMRR, and good linearity of the individual differential output currents. However, if the low transconductance for low power applications is needed such as biomedical devices, low operating current makes MOSFETs operate in weak inversion. In this case, the voltage-current characteristic is not expressed as a square-law characteristic but is expressed as an exponential function [5][6]. Thus, the factor makes linearity of the transconductor worse.

In this paper, a new design of adaptively biased linear MOS transconductor considering the influence of MOSFETs operating in weak inversion is proposed. In the proposed technique, an adaptive biasing circuit is newly designed for improvement of the linearity deterioration. Simulation results show that the proposed technique is effective for improvement of the linearity.

## 2. Principle of differential input/output transconductor

Fig.1(a) shows a basic configuration of the single-ended type of adaptively biased linear MOS transconductor. Assuming that MOSFETs operate in saturation region and the drain currents obey the square-law characteristic, the drain currents of M1, M2, and the tail current  $I_S$  are expressed as

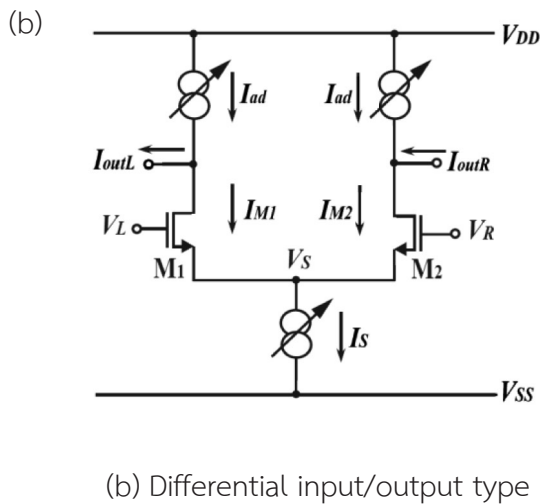
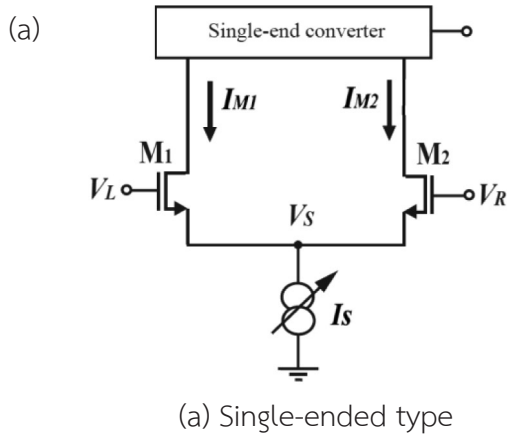
$$\begin{aligned} I_{M1} &= K_N(V_L - V_S - V_T)^2 \\ I_{M2} &= K_N(V_R - V_S - V_T)^2 \\ I_S &= I_{M1} + I_{M2} \end{aligned} \quad (1)$$

where  $K_N$  is the transconductance factor,  $V_T$  is the threshold voltage, and  $V_S$  is the common source voltage of M1 and M2. Assuming that the input voltages are fully differential signals,  $V_L$  and  $V_R$  are expressed as

$$\begin{aligned} V_L &= \frac{1}{2}V_{in} \\ V_R &= -\frac{1}{2}V_{in} \end{aligned} \quad (2)$$

From (1) and (2), the source voltage  $V_S$  is expressed as

$$V_S = \frac{\sqrt{2K_N I_S - K_N^2 V_{in}^2}}{2K_N} - V_T \quad (3)$$



**Fig.1** Basic Configuration of Adaptively Biased Linear MOS Transconductor (a) Single-ended Type, (b) Differential Input/output Type

It is seen from (3) that the source voltage  $V_S$  is a function of the input voltage  $V_{in}$ . For linearization,  $V_S$  has to be set to constant. Therefore, the tail current  $I_S$  is expressed as

$$I_S = \frac{K_N V_{in}^2}{2} + A \quad (4)$$

where  $A$  is a constant. From (1) – (4), the single-ended output current is expressed as

$$I_{out} = I_{M1} - I_{M2} = \sqrt{2K_N A} V_{in} \quad (5)$$

It is seen from (5) that linearity of the transfer characteristic with single-end conversion is achieved. The circuit design using this technique has been reported in the paper [3, 4]. However, in case of the individual differential output terminals are needed, the individual differential output currents are obtained as

$$\begin{aligned} I_{M1} &= \frac{K_N V_{in}^2}{4} - \sqrt{\frac{AK_N}{2}} V_{in} + \frac{A}{2} \\ I_{M2} &= \frac{K_N V_{in}^2}{4} + \sqrt{\frac{AK_N}{2}} V_{in} + \frac{A}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

It should be noticed from (6) that the individual differential output currents are quadratic function of the input voltage. This means that the linearity of individual differential output terminals cannot be achieved using the basic configuration shown in Fig1(a).

Fig.1(b) shows a basic configuration of the differential input/output type of adaptively biased linear MOS transconductor. In Fig.1(b), the individual differential output currents  $I_{outL}$  and  $I_{outR}$  are given by

$$\begin{aligned} I_{outL} &= I_{ad} - I_{M1} \\ &= I_{ad} - \frac{K_N V_{in}^2}{4} + \sqrt{\frac{AK_N}{2}} V_{in} - \frac{A}{2} \\ I_{outR} &= I_{M2} - I_{ad} \\ &= -I_{ad} + \frac{K_N V_{in}^2}{4} + \sqrt{\frac{AK_N}{2}} V_{in} + \frac{A}{2}, \quad (7) \end{aligned}$$

where  $I_{ad}$  is the bias current for linearization  $I_{outL}$  and  $I_{outR}$ . In order to eliminate the nonlinear term, the bias current  $I_{ad}$  is expressed as

$$I_{ad} = \frac{K_N V_{in}^2}{4} + \frac{A}{2}. \quad (8)$$

Substituting (8) into (7),  $I_{outL}$  and  $I_{outR}$  are expressed as

$$I_{outL} = I_{outR} = \sqrt{\frac{AK_N}{2}} V_{in}. \quad (9)$$

It is seen from (9) that the differential input/output linear transconductor is achieved using the basic configuration shown in Fig.1(b). A circuit design using this technique is described in the next section.

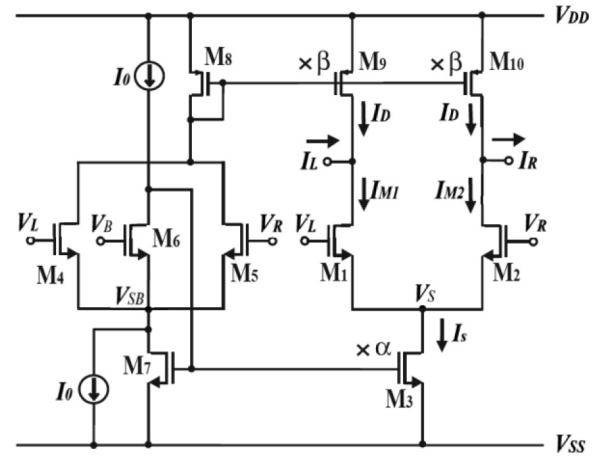


Fig.2 Conventional transconductor

### 3. Circuit design of differential input/output transconductor

Fig.2 shows the adaptively biased linear MOS transconductor [2] using the technique described in section 2. In Fig.2, M1 and M2 compose a differential pair, M4 – M6 and the operating current  $I_0$  compose a square current source. The current mirror composed of M3 and M7 supplies the tail current  $I_S$ , whose current amplification factor is set to  $\alpha = 1$ . The current mirror composed of M8 – M10 supplies the bias current  $I_D$ , whose current amplification factor is set to  $\beta = 1/2$ . The drain currents of M4 – M6 are expressed as

$$\begin{aligned} I_{M4} &= K_N (V_L - V_{SB} - V_T)^2 \\ I_{M5} &= K_N (V_R - V_{SB} - V_T)^2 \\ I_{M6} &= I_0 = K_N (V_B - V_{SB} - V_T)^2, \quad (10) \end{aligned}$$

where  $V_{SB}$  is the common source voltage of M4 – M6. The bias voltage  $V_B$  is realized by a simple active voltage divider, and is given by



$$V_B = \frac{1}{2}(V_L + V_R) = 0 . \quad (11)$$

From (10) and (11),  $V_{SB}$  is expressed as

$$V_{SB} = -\sqrt{\frac{I_0}{K_N}} - V_T . \quad (12)$$

The drain currents of M7 and M8 are given by

$$\begin{aligned} I_{M7} &= I_{M4} + I_{M5} + I_{M6} - I_0 \\ I_{M8} &= I_{M4} + I_{M5} . \end{aligned} \quad (13)$$

From (10) – (13),  $I_S$  and  $I_{ad}$  are expressed as

$$\begin{aligned} I_{M3} &= I_S = \frac{K_N V_{in}^2}{2} + 2I_0 \\ I_{M9,10} &= I_{ad} = \frac{K_N V_{in}^2}{4} + I_0 . \end{aligned} \quad (14)$$

From (7) and (14), the individual differential output currents are expressed as

$$I_{outL} = I_{outR} = \sqrt{I_0 K_N} V_{in} . \quad (15)$$

It is seen from (15) that the transfer characteristics of the transconductor are linear.

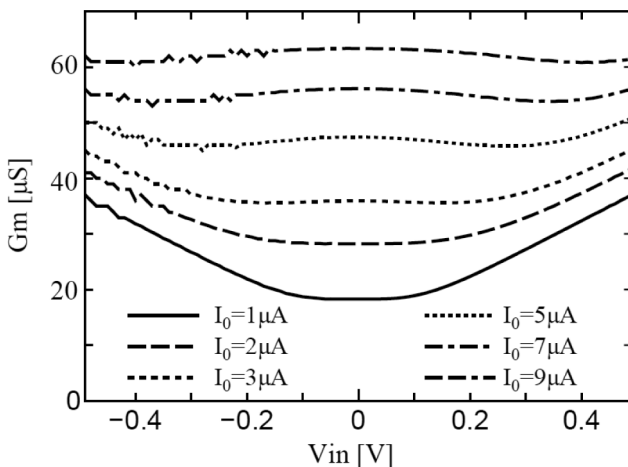


Fig.3 Transconductance Characteristics

Fig.3 illustrates simulation result of the transconductance characteristics for various operation currents of the transconductor shown in Fig.2. Fig.3 shows that if the operating current is small, e.g.  $I_0 = 1\mu A - 3\mu A$ , the transconductance characteristics are not flat. The deterioration is caused mainly by two cores of differential pairs M1 – M2 and M4 – M5 operating in weak inversion. Thus, the drain currents is not expressed as the square-law characteristic but is expressed as the exponential function [5][6]. Assuming that M1 – M2 and M4 – M5 operate in weak inversion, the drain currents are expressed as

$$\begin{aligned} I_{M1} &= I_{D0} \exp\left(\frac{V_L - V_S - V_T}{nU_T}\right) \\ I_{M2} &= I_{D0} \exp\left(\frac{V_R - V_S - V_T}{nU_T}\right) \\ I_{M4} &= I_{D0} \exp\left(\frac{V_L - V_{SB} - V_T}{nU_T}\right) \\ I_{M5} &= I_{D0} \exp\left(\frac{V_R - V_{SB} - V_T}{nU_T}\right) , \end{aligned} \quad (16)$$

where  $I_{D0}$  is the reverse saturation current,  $n$  is the subthreshold slope factor, and  $U_T = kT/q$  is the thermal voltage that  $k$  is the Boltzmann's constant,  $T$  is the absolute temperature and  $q$  is the electronic charge [5][6]. From (2), (12), and (16), the tail current  $I_S$  realized by the square current source is expressed as

$$I_S = I_{D0} \left(1 + \exp\left(\frac{V_{in}}{nU_T}\right)\right) \exp\left(\frac{-2\sqrt{I_0/K_N} + V_{in}}{2nU_T}\right). \quad (17)$$

From eqs. (2) and (16), the source voltage  $V_S$  is expressed as

$$V_S = \frac{V_{in}}{2} - V_T + nU_T \log \left( \frac{I_{D0} \left( 1 + \exp \left( \frac{-V_{in}}{2} \right) \right)}{I_S} \right). \quad (18)$$

Substituting eqs. (17), (18) is rewritten as

$$V_S = \frac{V_{in}}{2} - V_T + nU_T \log \left[ \exp \left( -\frac{2\sqrt{I_0/K_N} + V_{in}}{2nU_T} \right) \right]. \quad (19)$$

From eq. (19), IM1 and IM2 are rewritten as

$$\begin{aligned} I_{M1} &= I_{D0} \exp\left(\frac{2\sqrt{I_0/K_N} + V_{in}}{2nU_T}\right) \\ I_{M2} &= I_{D0} \exp\left(\frac{2\sqrt{I_0/K_N} - V_{in}}{2nU_T}\right). \end{aligned} \quad (20)$$

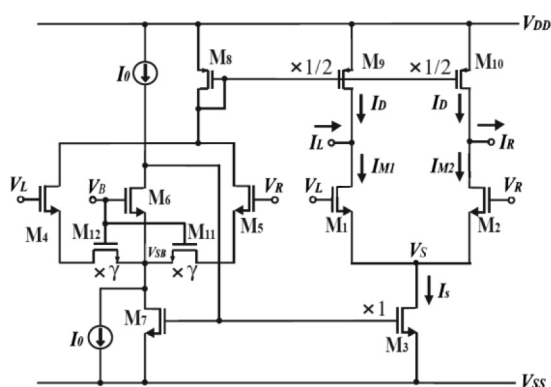
The output current is expressed as

$$I_{out} = I_{D0} \left( \exp\left(\frac{V_{in}}{2nU_T}\right) - 1 \right) \exp\left(\frac{2\sqrt{I_0/K_N} - V_{in}}{2nU_T}\right). \quad (21)$$

The transconductance is expressed as

$$G_m = \frac{I_{D0}}{2nU_T} \left( \exp\left(\frac{V_{in}}{nU_T}\right) + 1 \right) \exp\left(\frac{2\sqrt{I_0/K_N} - V_{in}}{2nU_T}\right). \quad (22)$$

It is found from eq. (22) that the transconductance is not flat due to MOSFETs operating in weak inversion, as shown in Fig.3. A technique to alleviate this problem is described in the next section.



**Fig.4** Proposed Transconductor

#### 4. Proposed transconductor

From eq. (22) and Fig.3, it should be noticed that the transconductance deviation for low operating currents increases according as amplitude of the input voltage  $V_{in}$  increases. In order to alleviate the problem, the smaller tail current  $I_S$  at high amplitude of the input voltage is needed. Therefore, a new design of the square current source to realize such a tail current  $I_S$  is proposed.

Fig.4 shows the proposed transconductor, which is realized by introducing MOS resistors M11 and M12 into the transconductor shown in Fig.2. The MOS resistors are employed to control the tail current  $I_5$  supplied to the differential pair, which is different from the source degeneration operating. The gate nodes are connected to  $V_B$ . Because M11 and M12 operate in the triode region, the drain currents are expressed as

$$I_{M(11,12)} = 2\gamma V_N \left( -V_{SB} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}, \quad (23)$$

where  $\gamma$  is the aspect ratio of M11 and M12.  $V_{DS}$  is the drain-source voltage of M11 and M12. From (23), the equivalent resistance  $R_{eq}$  is expressed as

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{dI_{M(11,12)}}{dV_{DS}}} = \frac{1}{2\gamma K_N(-V_{SB}-V_T-V_{DS})} . \quad (24)$$

The drain currents of M4 and M5 are expressed as

$$\begin{aligned} I_{M4} &= I_{D0} \exp\left(\frac{V_L - V_{SB} - R_{eq} I_{M4} - V_T}{n U_T}\right) \\ I_{M5} &= I_{D0} \exp\left(\frac{V_R - V_{SB} - R_{eq} I_{M5} - V_T}{n U_T}\right). \end{aligned} \quad (25)$$

From (12) and (25), the tail current  $I_S$  realized by the square current source is expressed as

$$I_S = \frac{nU_T}{R_{eq}} (W(B_1) - W(B_2)) , \quad (26)$$

where

$$B_1 = \frac{\exp\left(\frac{2\sqrt{I_0/K_N} - V_{in}}{2nU_T}\right) I_{D0} R_{eq}}{nU_T}$$

$$B_2 = \frac{\exp\left(\frac{2\sqrt{I_0/K_N} + V_{in}}{2nU_T}\right) I_{D0} R_{eq}}{nU_T} ,$$

and  $W(z)$  is the Lambert's  $W$  function, which is defined as

$$z = W(z) \exp(W(z)) . \quad (27)$$

Substituting (26) into (18), the source voltage  $V_S$  is rewritten as

$$V_S = \frac{V_{in}}{2} - V_T + nU_T \log \left[ \frac{I_{D0} R_{eq} (1 + \exp(\frac{-V_{in}}{nU_T}))}{nU_T (W(B_1) - W(B_2))} \right] . \quad (28)$$

From (16) and (28), the drain currents of M1 and M2 are expressed as

$$I_{M1} = nU_T \left[ \frac{W(B_1) + W(B_2)}{R_{eq} (1 + \exp(\frac{-V_{in}}{nU_T}))} \right]$$

$$I_{M2} = nU_T \left[ \frac{W(B_1) - W(B_2)}{R_{eq} (1 + \exp(\frac{V_{in}}{nU_T}))} \right] . \quad (29)$$

From (29), the output current  $I_{out}$  is expressed as

$$I_{out} = \frac{nU_T}{R_{eq}} \tanh\left(\frac{V_{in}}{2nU_T}\right) (W(B_1) + W(B_2)) . \quad (30)$$

The transconductance is expressed as

$$G_m = \frac{1}{2R_{eq}} \left( \frac{W(B_1) + W(B_2)}{\cosh\left(\frac{V_{in}}{2nU_T}\right)} \right)$$

$$+ \frac{1}{2R_{eq}} \left[ \frac{(-W(B_1) + W(B_2)) \tanh\left(\frac{V_{in}}{2nU_T}\right)}{(1 + W(B_1))(1 + W(B_2))} \right] . \quad (31)$$

An equation for optimization of  $\gamma$  using maximally flat approximation method [7] is obtained as

$$\frac{d^2 G_m}{dV_{in}^2} \big|_{(V_{in}=0)} = 0 . \quad (32)$$

Solving (32), the optimum value of  $R_{eq}$  is given by

$$R_{eq} = \frac{nU_T}{7I_{D0}} \exp\left(\frac{nU_T - 7\sqrt{I_0/K_N}}{7nU_T}\right) . \quad (33)$$

From (24) and (33), the optimum value of  $\gamma$  is obtained as

$$\gamma = \frac{7I_{D0} \exp\left(\frac{7\sqrt{I_0/K_N} - nU_T}{7nU_T}\right)}{2nU_T K_N (-V_{DS} - V_S - V_T)} . \quad (34)$$

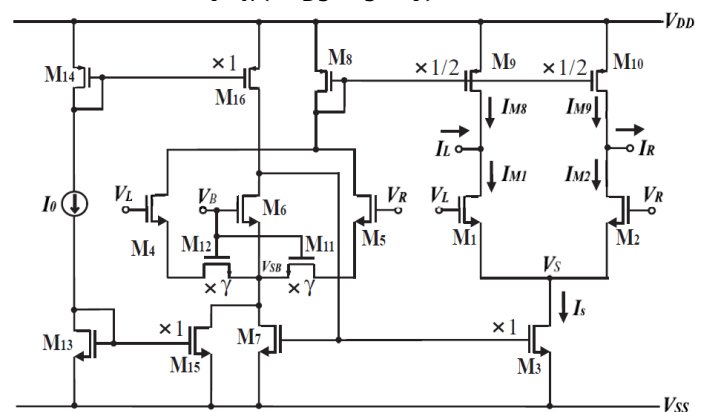


Fig.5 Circuit Configuration of Proposed Transconductor

**Table 1** Principle Parameters of Used Model

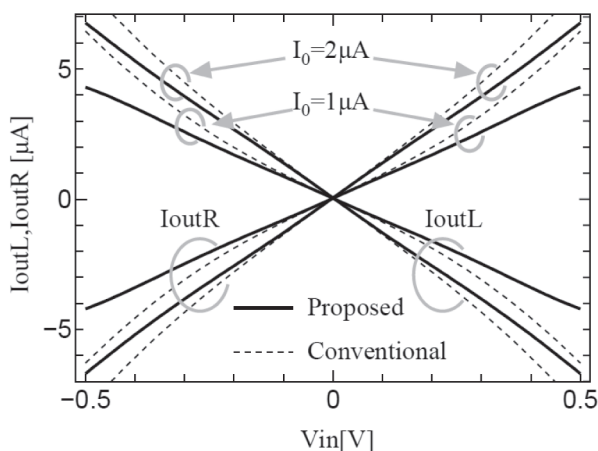
| $K_M$ [ $\mu A/V^2$ ] | $V_T$ [V] | $U_T$ [mV] | $n$  | $I_{D0}$ [ $\mu A$ ] |
|-----------------------|-----------|------------|------|----------------------|
| 121                   | 0.41      | 26.0       | 1.47 | 4.62                 |

## 5. Simulation

In order to confirm the validity of the proposed technique, simulation was carried out. The used program software is SIMetrix. In simulation, 0.18 $\mu m$  BSIM3 Model is used[8]. The principal parameters of used model are listed in Table 1. The supply voltage is  $\pm 0.9V$ . The circuit configuration of the proposed transconductor used in simulation is shown in Fig.5. The optimum aspect ratio of the MOS resistors obtained from (34) is  $\gamma = 19.08$ . In the simulation,  $\gamma$  is set to 19. The transconductance error  $G_{mer}$  [%] is defined as

$$G_{mer} = \left( \frac{G_{mmax} - G_{mmin}}{G_m(0)} \right) \times 100 \quad (35)$$

where  $G_{mmax}$  and  $G_{mmin}$  are the maximum  $G_m$  and the minimum  $G_m$  in the input range, respectively.  $G_m(0)$  is the  $G_m$  at  $V_{in} = 0$  V. The input range is  $\pm 1.0$  V.

**Fig.6** Transfer Characteristic**Table 2** Transconductance Error  $G_{mer}$ 

| $G_{mer}$ for each of $I_0$ | 1 $\mu A$<br>[%] | 3 $\mu A$<br>[%] | 5 $\mu A$<br>[%] | 9 $\mu A$<br>[%] |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Proposed                    | 9.226            | 5.802            | 7.493            | 5.755            |
| Conventional                | 102.2            | 25.17            | 7.545            | 5.258            |

Fig.6 illustrates transfer characteristics of the proposed transconductor. It is seen from Fig.6 that the linearity deterioration for low operating currents is improved using the proposed technique. Fig.7 illustrates normalized transconductance characteristics ( $G_m/G_m(0)$ ). The transconductance errors are listed in Table 2. From Fig.7 and Table 1, it should be noticed that the proposed transconductor has good linearity compared with that of the conventional transconductor. This means that the MOS resistors are effective for the low operating currents while they affect the transfer characteristics little for the high operating currents. Fig.8 illustrates normalized transconductance characteristics of the proposed transconductor for various  $\gamma$ . It is seen that element sensitivities of the MOS resistors are small. The total harmonic distortions (THDs) of the conventional transconductor and the proposed one are plotted in Fig.9 for  $I_0 = 1\mu A$ . The sinusoidal input is 10kHz and the input signal amplitude is 0.1V – 0.5V. It should be noticed from Fig.9 that the THD of the proposed transconductor is improved.

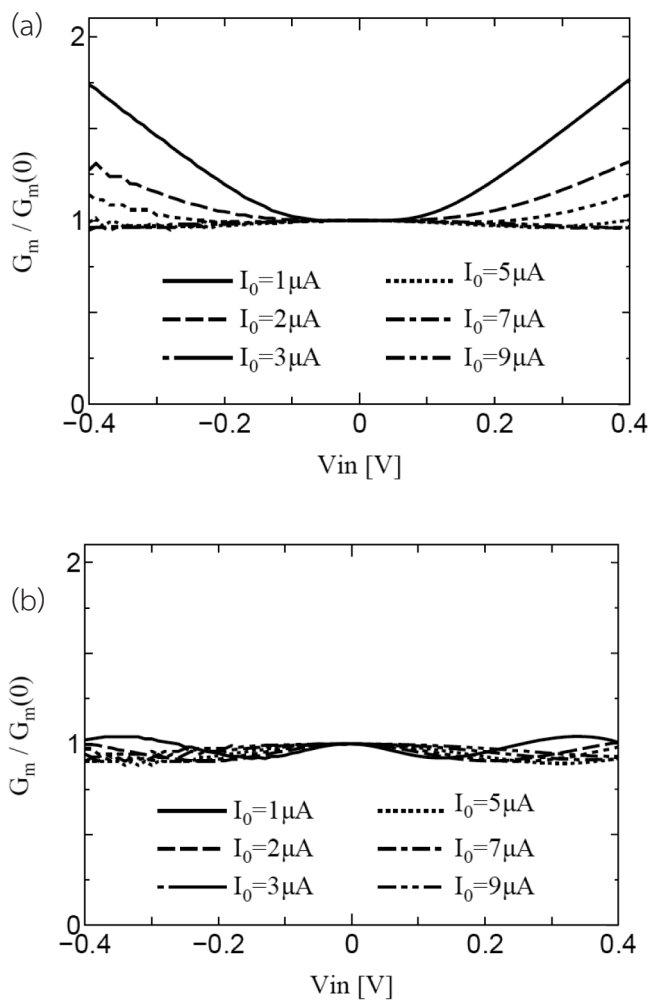


Fig.7 Normalized Transconductance Characteristics

- (a) Conventional Transconductor  
(b) Proposed Transconductor

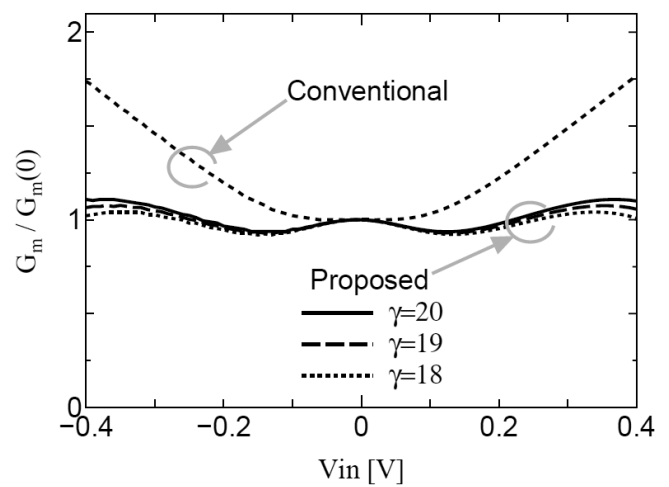


Fig.8 Normalized Gm characteristics for various  $\gamma$

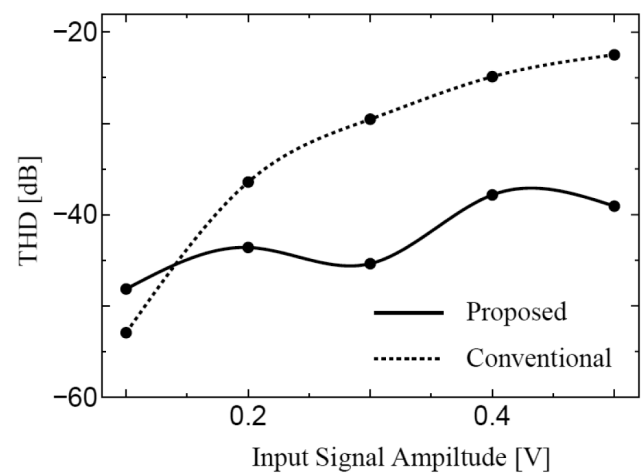


Fig.9 Total Harmonic Distortions (THDs)



## 6. Conclusion

In this paper, a new design of the adaptively biased linear MOS transconductor considering the influence of MOSFETs operating in weak inversion has been proposed. For low operating current, MOSFETs operate in weak inversion, and the voltage-current characteristic is not expressed as the square-law characteristic but is expressed as the exponential function. Thus, the factor makes linearity worse. In the proposed technique, the adaptive biasing circuit has newly designed for improvement of the linearity deterioration. Simulation results have shown that the proposed technique is effective for improvement of the linearity.

## 7. 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 Professor Fujihiko Matsumoto and Department of Applied Physics of National Defense Academy of Japan for providing opportunity, facility, grant, and supports in many aspects.

## 8. References

- (1) S.Susanta, 2005. Adaptively Biased Linear Transconductor, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.52, No.11, p.2369–2375.
- (2) T. Pravit 2010. A New Adaptively Biased Linear MOS Transconductor Composed of a Square Current Source and a Differential Pair, The 23rd Workshop on Circuit and Systems, Ba1–2–2, p.73–78.
- (3) A. Nedungadi, 1984. Design of linear CMOS transconductance elements. IEEE Transactions on Circuits and Systems, Oct. 1984, Vol. 31, No. 10, p. 891–894.
- (4) A. M. Ismail, 2000. Novel CMOS Wide Linear Range Transconductance Amplifier, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Aug. 2000, Vol. 47, No. 8 p. 1248–1253.
- (5) Y. Cheng, M.C. Jeng, Z. Liu, J. Huang, M. Chan, K. Chen, P.K. Ko, C. Hu, 1997. A physical and scalable I-V model in BSIM3v3 for analog/digital circuit simulation, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol.44, No. 2, p. 277–287.
- (6) W. Liu, X. Jin, J. Chen, M.C. Jeng, Z. Liu, Y. Cheng, K. Chen, M. Chan, K. Hui, J. Huang, R. Tu, P.K. Ko, C. Hu, 1999. BSIM3v3.2.2 MOSFET Model User's Manual, University of California, Berkeley.
- (7) H. Tanimoto, 1991. Realization of a 1-V Active Filter Using a Linearization Technique Employing Plurality of Emitter-Coupled Pairs, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Jul. 1991, Vol. 26, p. 937–945.
- (8) <https://www.mosis.com/Thenical/Testdata/tsmc-018-prm.html>.

## A Practical System for Pig Farm Wastewater Treatment

Jirayu Pairin<sup>1</sup>, Pichaya Rachdawong<sup>2\*</sup>, Chackrit Nuengchamong<sup>3</sup>

<sup>1,2\*</sup>*Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University*

<sup>3</sup>*Department of Animal Husbandry, Faculty of Veterinary Science, Chulalongkorn University*

*\*Corresponding Author: pichaya.r@chula.ac.th*

*(Received: November 28, 2018, Revised: December 7, 2018, Accepted: December 14, 2018)*

**Abstract :** High rate of pig farm growth has been observed during these recent years. In 2017, 10.19 million head count of pig was raised in Thailand. In the same year, about 57 odor and 10 wastewater complaints were filed against pig farm owners. This prompted concerns from government and the Internal Security Operations Command (ISOC) to look into this problem seriously. Piggery wastewater is known to be high in organics, solids, as well as rich nutrient content such as nitrogen and phosphorus. In this study, we investigated the performance of a system consisting of a presettling tank and a three-compartment anaerobic baffled (ABR) reactor to treat pig farm wastewater under low and high flow rate condition. An experiment was run for 80 days at a demonstration farm of the Faculty of Veterinary Science in Nakhon Pathom province. The performance for total COD removal was between 50-78 percent and majorities of organics and solids removal was by sedimentation. The efficiencies of sedimentation process, however, can be very sensitive to solids accumulation and washout. The average TKN removal was only 25 percent. The low removal efficiency was due to the fact that majority of TKN was soluble and the soluble part of TKN cannot be removed properly in anaerobic process. When considering the PCD standard for pig farm, the system still needed an improvement, with respect to total COD and TSS concentrations in the effluent. Enlargement of a presettling tank or an additional presettling unit with solids drainage ports could be a practical option for better solids and organics treatment.

**Keywords :** Pig Farm Wastewater, Anaerobic Baffle Reactor, Organic Removal, TKN Removal

## 1. Introduction

High rate of pig farm growth has been observed during these recent years due to an increase in domestic demand for pork in Thailand. In 2017, 10.19 million head count of pig was raised in Thailand [1]. Such expansion inevitably impaired surrounding environmental quality ranging from odor, flies, methane emission, and possible leakage of wastewater to nearby receiving water bodies. In 2017, there were at least formal 57 odor and 10 wastewater complaints against farm owners [2]. This prompted both government and the Internal Security Operations Command (ISOC) to look into this problem seriously. In April 2018, the Chief of the Army and the deputy Secretary of the ISOC has ordered all provincial units of ISOC to coordinate with local government to monitor and manage all forms of farm-related pollution according to the regulatory requirement. Proper pig farm wastewater treatment system would lead to lesser degree of pollutant emission to water and air resources.

## 2. Objectives

In this study, we investigated performance of a practical treatment system consisting of a presettling tank and an ABR reactor to treat pig farm wastewater under low and high flow rate condition, corresponding to high and low hydraulic retention time (HRT), respectively.

## 3. Literature review

To date, wastewater treatment system for large pig farms in Thailand is dominated by fixed

dome, channel digester, and covered lagoon that aim to produce biogas along with organic waste stabilization [1]. However, small farms with less than 50 pigs are high in number and many of them have no treatment system for their wastewater.

Pig farm wastewater is generated from a wide spectrum of activities such as flushing of farm, animal cleaning, discharges and solids from pigs, etc., and therefore often possesses high organics, high ammonia, high solids, as well as rich nutrient content such as nitrogen and phosphorus [3]. High solids in an influent stream can result in a system failure since solid accumulation could deplete useful space required for reaction. Nitrogen, if not treated or transformed within the system, can result in excessive blooming of aquatic plants [4].

Anaerobic baffle reactor (ABR) is a treatment technique that currently receives lots of attention for high strength wastewater treatment worldwide. Advantages of the ABR are such as low energy consumption, easy operation and maintenance, no moving parts, no mixing required, high resistance to clogging, and high adaptation to shock loading [5]. For an ABR system, baffles were placed vertically, in an alternate manner, to form compartment and to direct the flow of wastewater, from an inlet to an outlet point. In this respect, wastewater is forced to go through floating anaerobic sludge blankets, where major organic stabilization takes place. Significant benefit of this reactor type is an ability to separate different phases of the AD system longitudinally.

nally, allowing the reactor to behave as a 'phase separated' system, which would theoretically offer high efficiency removal rates [6, 7]. Of all the strong points, low clogging potential is very appealing when it comes to treating high solid stream like pig farm wastewater.

In this study, we investigated performance of a practical treatment system consisting of a presettling tank and an ABR reactor to treat pig farm wastewater under low and high flow rate condition, corresponding to high and low hydraulic retention time (HRT), respectively. The high flow condition can be expected during daily farm cleaning or if more pigs are added. The performance indicators used were chemical oxygen demand (COD) and TKN removal efficiencies. This system can be made in modules and is relative easy to make and should fit for most small pig farms. The knowledge gained can be applied to solve pig farms complaints throughout the countries, including military establishments.

## 4. Materials and Methods

### 4.1 Pig farm wastewater input

The system was set in a demonstration farm of the Faculty of Veterinary Science, Chulalongkorn University, in Nakhon Pathom province. There were approximately fifteen pigs in the farm at the time of study (November 2016 to March 2017). Wastewater samples were obtained from outlet of the farm and were generated from all activities inside.

### 4.2 Configuration of the system

The treatment system, consisting of a presettling tank and a three-compartment anaerobic baffled reactor (ABR), is given in Figure 1. Both were made from acrylic. A settling tank was 5 liters in volume. The effective volume of the ABR reactor was 10 liters. The first compartment of the ABR accounted for half of the volume while the last two compartments accounted for the rest. Input and output wastewater samples were obtained at the point before entering the settling tank and after exiting from the ABR reactor, respectively.

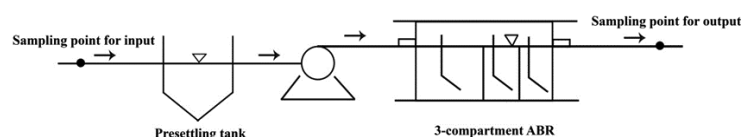


Fig.1 Presettling Tank and an ABR Reactor

### 4.3 Startup and operation

The system employed the pig farm wastewater as a seed, itself. On Day 1 of the experiment, the wastewater was fed to the system at the rate of 2 L/day (equivalent to 5-day hydraulic residence time for an ABR reactor). From Day 5, the wastewater input rate was increased to 5 L/d (equivalent to 2-day hydraulic residence time for an ABR reactor) until Day 35 where excessive solids accumulation was obviously detected in the presettling tank and in the ABR. Removal of solids was then performed. The flow rate was reduced to 2 L/day from Day 36 to Day 80, which was the last day of the experiment. The Pollution Control Department

(PCD) effluent standard for the farms with 50-500 pigs would be used for performance assessment.

#### 4.4 Analytical procedures

Important parameters under investigation included total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), soluble COD, total Kjeldahl nitrogen (TKN) and soluble TKN. The analytical procedures were outlined in Table 1.

**Table 1** Parameters and analytical procedures used

| Parameter              | Method                                             |
|------------------------|----------------------------------------------------|
| pH                     | pH meter                                           |
| ORP                    | ORP meter                                          |
| Total suspended solids | Standard Method #2540D                             |
| COD                    | Standard Method #5220C                             |
| TKN                    | Digestion Distillation and then Titrimetric Method |

## 5. Results and Discussions

### 5.1 Total and soluble COD

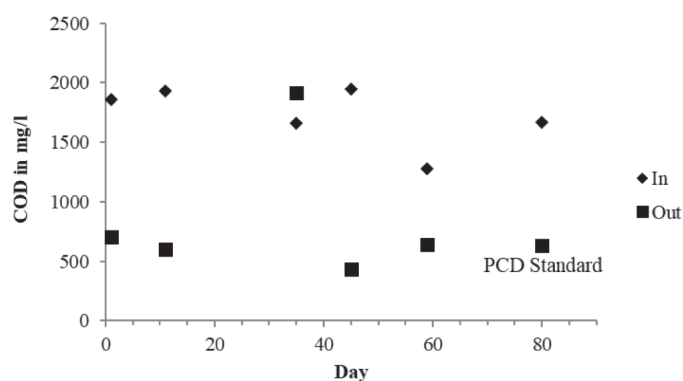


Fig.2 Influent and Effluent Total COD Concentration in mg/L

From Figure 2, initial influent total COD concentration on Day 1 was 1,860 mg/L and remained in the range of 1,670-1,930 mg/L, with an average of 1,725 mg/L, throughout the experiment. The effluent total COD was in the range of 430-1,920 mg/L with an average of 520 mg/L (excluding an outlier) which was still a little bit higher than the PCD standard for COD of 400 mg/L. During the first 20 days, average COD removal efficiency was about 67-75 percent and was directly related to the solids removal ability. Biological reaction played lesser role here since hydraulic retention time (HRT) used here was significantly shorter than ordinary ABR's (2-5 days as compared to 14-15 days) [8, 9]. As solids accumulated and started to wash out, a total COD of 1,920 mg/L was found in an effluent sampling on Day 35. After cleaning and lowering the flow rate of input wastewater to 2 L/day, the system efficiency for total COD reduction came back to the range of 50-78 percent until Day 80. These efficiencies were, however, similar to those of Boopathy and Sievers [8] at 70-80 percent.

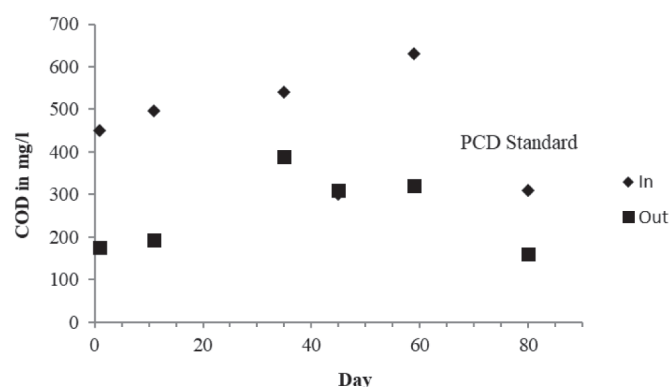


Fig.3 Influent and Effluent Soluble COD Concentration in mg/L

From Figure 3, influent and effluent soluble COD concentrations were in the range of 310-540 mg/L and 160-390 mg/L, respectively. As expected, the removal efficiencies for soluble COD were only 27-61 percent as compared to 50-78 percent for the total COD reduction. Thus, the major mechanism responsible for COD reduction was probably not a biological means, which needed longer HRT. Fortunately, soluble COD contributed approximately only 19-27% of the total COD for the influent stream from the pig farm. An effect of soluble COD increase during the washout on Day 35 was not as significant as compared to the total COD results in Figure 2.

### 5.2 Total suspended solids (TSS)

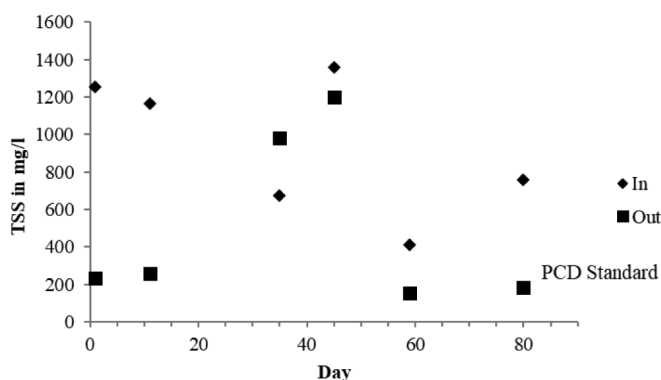


Fig.4 Influent and effluent total suspended solids concentration in mg/L

From Figure 4, influent and effluent TSS concentrations were in the range of 410-1,360 mg/L and 152-1,200 mg/L, respectively. The treatment efficiency for TSS fluctuated widely from 11-81 percent and was almost within the PCD standard for TSS at 200 mg/L, for most of the time. On Day 35, an effluent concentration was

found to be more than an influent concentration and was an obvious sign of washout. Cumulative solids in the system contributed to solids wash-out from the system. Strong correlation between total COD and TSS in Figure 5 ( $R^2 = 0.82$ ) has indicated that majority of organics in the input wastewater was in solid form. Therefore, treatment of the total COD in Figure 2 was confirmed to be from solid sedimentation with removal efficiencies of approximately 50-78 percent.

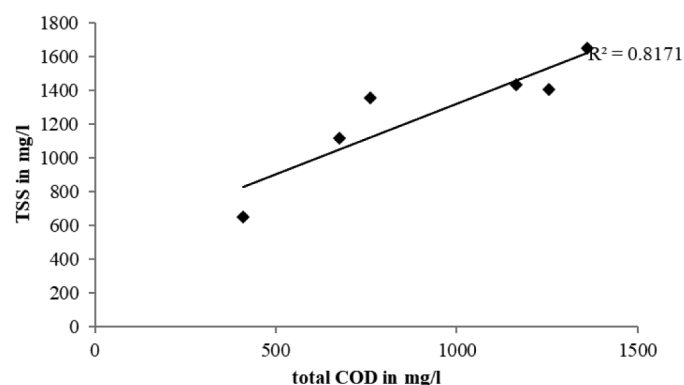


Fig.5 Correlation of TSS vs. Total COD

### 5.3 Total Kjeldahl nitrogen (TKN)

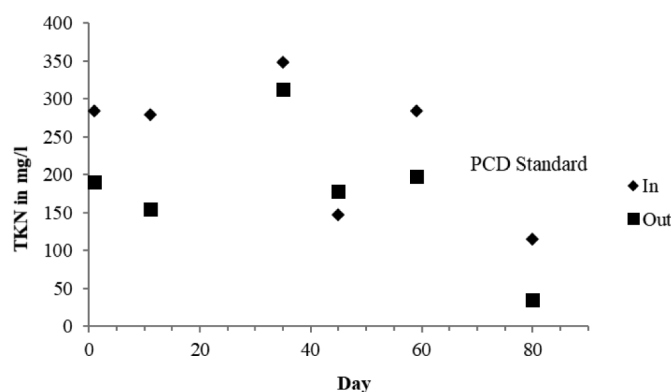


Fig.6 Influent and Effluent TKN Concentration in mg/L



From Figure 6, influent and effluent TKN concentrations were in the range of 115-348 mg/L and 35-313 mg/L, respectively. The TKN samples here included both solid and liquid portions. The treatment efficiency for TKN was found in the range of 10-70 percent with an average of 25 percent. The effluent concentrations were, for most of the time, below the PCD standard of 200 mg/L. Therefore, the TKN removal in the system was adequate as far as the influent TKN concentration was not high. From Figure 6, not much reduction between input and output of TKN was observed. Therefore, solid separation, which was expected to be the main nitrogen removal mechanism, could not reduce majority of TKN entering into the ABR system during the 80 days of experiment. This was perhaps because soluble TKN, which accounted for 45-85 percent of the total TKN, was almost unaffected by the process that was suitable for total COD and TSS removal. The findings were similar to the result from Suthinarakorn [10] and Rattanakowin [11] that majority of TKN could not be biologically transformed or removed in the three- and the five-compartment ABR regardless of the input TKN concentrations.

## 6. Conclusion

The system of a presettling tank and a three-compartment ABR can treat high solids and high organic wastewater from a pig farm to a certain extent. The performance for total COD removal was between 50-78 percent and majorities of organics and solids removal was by sedi-

mentation. This was because the HRT used here was significantly shorter than the conventional ABR (2-5 days as compared to 14-15 days). The efficiencies of sedimentation process, however, can be very sensitive to solids accumulation and washout. On the other hand, average TKN removal was only 25 percent. The low removal efficiency was due to the fact that majority of TKN was soluble and the soluble part of TKN cannot be removed properly in anaerobic process. When considering the PCD standard for pig farm, the system still needed an improvement, with respect to total COD and TSS concentrations in the effluent. Enlargement of a presettling tank or an additional presettling unit with solids drainage ports could be a practical option for better solids and organics treatment of small size pig farm wastewater.

## 7. Acknowledgement

The research was supported by the FY 2015 Chulalongkorn university strategic research fund. The authors would like to express a sincere appreciation for the funding which makes this study possible.

## 8. References

- (1) C. Nokyo, 2016. Swine waste management in Thailand, The 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Water Environment Partnership in Asia (WEPA), Workshop and field Visit in Vientiane, Lao P.D.R., January 2016.
- (2) N. Kulpredarat, 2017. *The impact of pig wastewater to water environment in Thailand*, WEPA Group Workshop on Pig Wastewater Management in Asia. Chiang Mai, Thailand, February 2017.

- (3) K. Haga 2017. Pig waste and wastewater management in Japan, WEPA Group Workshop on Pig Wastewater Management in Asia. Chiang Mai, Thailand, February 2017.
- (4) K.N. Karny, M. Rodgers, P.G. Lawlor, X. Zhan, 2011. Sustainable technology for treatment of piggery wastewaters, Proceeding of the global conference on global warming 2011. Lisbon, Portugal. July 2011.
- (5) W. P. Barber, D. C. Stuckey, 1999. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review, *Water Research*, 7, p. 1559-1578.
- (6) A. Ahamed, C.L. Chen, R. Rajagopal, D. Wu, Y. Mao, I. J. R. Ho, J. W. Lim , J. Y Wang, 2015. Multi-phased anaerobic baffled reactor treating food waste, *Biore-source Technology*, Vol. 182, p. 239-244.
- (7) F. Motteran, E.L.Pereira, C.M.M. Campos, 2013. The behavior of an anaerobic baffled reactor (ABR) as the first stage in the biological treatment of hog farming effluents, *Brazilian journal of chemical engineering*, Vol. 30, p. 299-310.
- (8) R. Boopathy, 1998. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactor, *Bioresource technology*, Vol. 64, p. 1-6.
- (9) R. Boopathy, T. M. Sievers, 1991. Performance of a modified anaerobic baffled reactor to treat swine waste, *Transaction of American society of agricultural engineers*, Vol. 34, p. 2573-2578.
- (10) Suttinarakorn, S. Effect of ammonia in synthetic wastewater on anaerobic baffled reactor performance. M.S. Thesis. Department of Environmental Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- (11) N. Rattanakowin, 2008. Start-up and operation of anaerobic baffled reactor for treatment of high strength wastewater, M.S. Thesis. Department of Environmental Engineering, Chulalongkorn University.
- (12) Information and Communication Technology Center, Department of Livestock Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives. (2018). 2017 National data of Swine. (online) Available at: [http://ict.dld.go.th/webnew/images/stories/stat\\_web/yearly/2560/T5-1.pdf](http://ict.dld.go.th/webnew/images/stories/stat_web/yearly/2560/T5-1.pdf) (Accessed 21 Oct. 2018).

## การประยุกต์ใช้สารที่มีคุณสมบัติการวาวแสงในการตรวจหาวัตถุระเบิดทีเอ็นที Fluorescence Molecule Application for TNT Detection

พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืองศักดิ์ อยู่ชา<sup>1\*</sup>

Colonel Assistant Professor Ruangsak Yucha<sup>1\*</sup>

พันโทหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมวรรณ ปานสีทา<sup>2</sup>

Lieutenant Colonel Assistant Professor Dr. Panomwan Panseeta<sup>2</sup>

พันตรีหญิง เพ็ญธนา สมานพันธ์<sup>3</sup>

Major Phenthana Samanphan<sup>3</sup>

ศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินธุ์<sup>4</sup>

Professor Dr.Mongkol Sukwattanasinitt<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ส่วนการศึกษา กองวิชาเคมี โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก 26001

<sup>1,2</sup>Assistant Professor, Department of Chemistry, Academic Division,  
Chulachomklao Royal Military Academy

Prommanee Subdistrict, Mueang District, Nakhon Nayok Province, 26001, Thailand

<sup>3</sup>อาจารย์ส่วนการศึกษา กองวิชาเคมี โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก 26001

<sup>3</sup>Instructor, Department of Chemistry, Academic Division,  
Chulachomklao Royal Military Academy

Prommanee Subdistrict, Mueang District, Nakhon Nayok Province, 26001, Thailand

<sup>4</sup>ศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

<sup>4</sup>Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University  
Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330

\*Corresponding Author: lek5820@yahoo.com

(Received: October 12, 2018, Revised: January 18, 2019, Accepted: March 27, 2019)

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการวาวแสง (Fluorescence) มาใช้ในการตรวจหาวัตถุระเบิดไตรไนโตรโทลูอีน (TNT) ด้วยตาเปล่าโดยใช้วิธีวัดการลดลงของการวาวแสง (Fluorescence Quenching) ของสารที่มีสมบัติการวาวแสง ที่สังเคราะห์ได้ภายในประเทศและผ่านการทดสอบคุณสมบัติในการลดการวาวแสงเมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT เบื้องต้นแล้ว 2 ชนิด ได้แก่ สารที่มีโครงสร้างประกอบด้วย Arylethynyl calix [4] arenes (ANC) และสารที่มีโครงสร้างประกอบด้วย Triphenylamine ต่อกับวง Polyaromatic pyrene (TAP) จากการทดสอบ

กับ TNT พบว่า ANC สามารถลดการวาวแสงได้ชัดเจนกว่า TAP จึงเลือกใช้ ANC ในการทดสอบกับ TNT ในภาคสนาม จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้สารละลาย ANC เข้มข้น 5 mM ปริมาตร 5  $\mu$ L เคลือบลงบนกระดาษทดสอบซึ่งเตรียมจากกระดาษกรองที่ทำเป็นหลุมทดสอบที่เคลือบขอบหลุมทดสอบด้วยไข (Wax) สังเกตเห็นการวาวแสงด้วยตาอย่างชัดเจน ภายใต้หลอด Black light และเมื่อนำกระดาษดังกล่าวไปหยดสารละลาย TNT ในเอทานอล เข้มข้น 5 mM ปริมาตร 5  $\mu$ L ซึ่งคิดเป็นปริมาณ TNT 5.675  $\mu$ g พบว่ากระดาษดังกล่าวเกิดการลดลงของการวาวแสงเมื่อสังเกตด้วยตาอย่างชัดเจน แต่จะไม่พบการลดลงของการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบ ANC หากเปลี่ยนจากสารละลาย TNT เป็นวัตถุระเบิดตัวอื่น ได้แก่ PETN และ Ammonium nitrate หรือ สารประกอบที่ใช้เป็นส่วนประกอบในวัตถุระเบิด เช่น Potassium nitrate และ Urea หรือสารประกอบอื่นๆ เช่น Naphthalene และ การบูร เป็นต้น อย่างไรก็ตามการลดลงของการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบ ANC จะเกิดขึ้นได้กับสารประกอบที่อยู่ในกลุ่ม Nitro aromatic ได้แก่ Picric acid, 2,6-DNT และ 4-Nitroaniline และพบว่ากระดาษที่เคลือบ ANC สามารถนำไปใช้ประยุกต์ตรวจหาไอของ TNT ได้ เมื่อนำกระดาษที่เคลือบ ANC ใส่ลงในภาชนะปิดขนาด 150 mL ที่มีเกล็ด TNT ปริมาณ 0.1 กรัม ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 วัน กระดาษที่เคลือบ ANC จะเกิดการลดลงของการวาวแสงจนสังเกตได้ด้วยตา นอกจากนี้กระดาษที่เคลือบ ANC สามารถนำไปใช้ในการตรวจหา TNT จากมือและเสื้อผ้าของบุคคลที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT ได้ งานวิจัยนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำเทคนิคการวาวแสงไปพัฒนาเป็นชุดอุปกรณ์ตรวจวัตถุระเบิด TNT แบบพกพาได้

**คำสำคัญ :** การวาวแสง การลดลงของการวาวแสง ไตรไนโตรโทลูอิน ANC

**Abstract:** This research is a feasibility study on the use of fluorescence technique for naked eye detection of trinitrotoluene (TNT) explosive based on the fluorescence quenching of the fluorescence compounds synthesized within the country and pre-evaluated for the fluorescence quenching property. Two types of fluorescence compounds used in this study were arylethynyl calix [4] arenes (ANC) and triphenylamine conjugated with pyrene rings (TAP). These fluorescence compounds were tested with TNT, and ANC was found to give a clearer fluorescence quenching results. ANC was selected for preparation of TNT test strips in further field study mimicking the situation in which TNT may be found. The ANC solution (5 mM, 5  $\mu$ L) was drop cast onto the holes generated on filter paper strips via wax printing. These test holes showed strong blue-green emission observable to naked eyes under black light. Upon contact with TNT solution the fluorescent spots were quenched with the minimal amount of 5.675  $\mu$ g of TNT (5 mM, 5  $\mu$ L TNT solution). With other explosive solutions such as PETN, ammonium nitrate or other non-explosive compounds such as naphthalene and camphor, no fluorescence quenching was observed. However, the fluorescence quenching was also observed when tested nitro aromatic compounds similar to TNT such as picric acid, 2,6-DNT and 4-nitroaniline. The fluorescence quenching was also easily observed with TNT vapor generated from 0.1 g TNT amount placed in a closed container for 3 days. In the field test, the ANC test strips were also able to detect TNT contamination on hands and clothes of personnel working directly with TNT. The test strips studied in this work are potentially useful as portable devices for convenient detection of TNT explosive.

**Keywords :** Fluorescence, Fluorescence quenching, Trinitrotoluene (TNT), ANC

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการตรวจสอบวัตถุระเบิดมีหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุระเบิดและวัตถุประสงค์ของการตรวจสอบ การพิสูจน์ทราบวัตถุระเบิดเบื้องต้นอาจใช้ปฏิกิริยาทางเคมีตรวจสอบการเกิดสี (Colorimetric Method) [1-3] หรือในปัจจุบันนิยมใช้เครื่องมือขั้นสูงที่มีลักษณะเป็นเครื่องตรวจจับไอ (Vapor Detector) เช่น Ion Mobility Spectrometer (IMS) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ของไอออนในสนามไฟฟ้า หรือเครื่อง Fido ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการการวาวแสงของเครื่องมือดังกล่าวเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพงและต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ หลักการการวาวแสงที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจหาวัตถุระเบิดของเครื่อง Fido ทำงานโดยใช้คุณสมบัติในการวาวแสงของพอลิเมอร์ที่ใช้ชื่อว่า Amplifying Fluorescent Polymer (AFP) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และความเข้มแสงของการวาวแสงของสาร AFP จะลดลง (Fluorescence Quenching) เมื่อสาร AFP จับกับสารวัตถุระเบิด TNT [4] สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการวาวแสงและการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสาร 2 ชนิด ได้แก่ ANC และ TAP หลังจากสัมผัสสาร TNT โดยสาร 2 ชนิดที่นำมาศึกษาเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นโดยนักวิจัยในภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบด้วย Arylethynyl calix[4]arenes (ANC) และที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย Triphenylamine ต่อกับวง Polyaromaticpyrene (TAP) โดยจะทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อเลือกสารที่มีคุณสมบัติในการวาวแสงที่เหมาะสมที่สุดนำไปทดสอบความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงเมื่อสารดังกล่าวสัมผัสกับ TNT และสารเคมีชนิดอื่น และนำสารที่มีคุณสมบัติในการวาวแสงที่เหมาะสมที่สุดไปทดสอบการตรวจหา TNT จากมือและเสื้อผ้าของบุคคลที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT ในภาคสนาม

## 2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาการวาวแสงของโมเลกุลที่มีคุณสมบัติในการวาวแสง 2 ชนิด ได้แก่ ANC และ TAP และการลดลงของการวาวแสงของโมเลกุลทั้ง 2 ชนิดเมื่อทำปฏิกิริยากับ TNT เพื่อเลือกโมเลกุลที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ในการตรวจหา TNT ในภาคสนาม

2.2 เพื่อศึกษาความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงของโมเลกุลที่มีคุณสมบัติในการวาวแสงที่เลือกในข้อ 2.1 เมื่อสัมผัสกับ TNT และสารเคมีชนิดอื่น

2.3 เพื่อหาปริมาณ TNT ต่ำสุด (ขีดจำกัดการตรวจวัด TNT) ที่ทำให้สามารถสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงของโมเลกุลที่มีคุณสมบัติการวาวแสงที่เลือกในข้อ 2.1 ได้ด้วยตาเปล่า)

2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำโมเลกุลที่มีคุณสมบัติในการวาวแสงที่เลือกในข้อ 2.1 ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจหาไอของ TNT

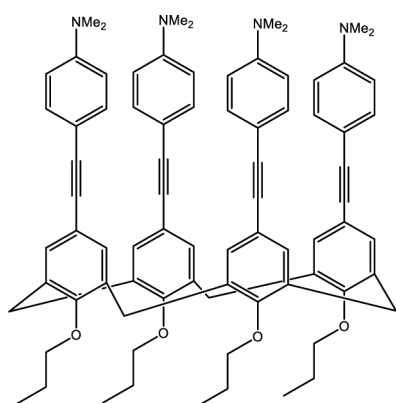
2.5 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำโมเลกุลสารวาวแสงที่เลือกในข้อ 2.1 ไปใช้ในการตรวจหาการตกค้างของ วัตถุระเบิด TNT จากมือและเสื้อผ้าของบุคคลที่เกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT ในภาคสนาม

## 3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวาวแสงของโมเลกุล (Molecular Fluorescence) เป็นการเปล่งแสงของโมเลกุลสารเคมีเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง (Photoluminescence) โดยโมเลกุลจะทำการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนแล้วเปลี่ยนจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้นซึ่งไม่เสถียรพร้อมกับปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเท่าเดิมเรียกว่า เรโซแนนซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (Resonance Fluorescence) ออกมา หรือปล่อยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนเรียกว่า นอร์มอลฟลูออเรสเซนซ์ (Normal Fluorescence) ในปัจจุบันเทคนิคการวาวแสงได้ถูกนำมาใช้สำหรับงานทางด้านปริมาณวิเคราะห์และคุณภาพวิเคราะห์สารอินทรีย์

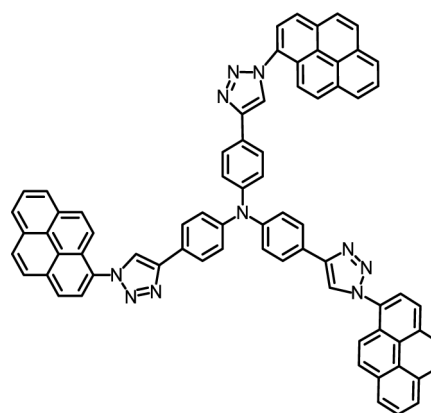
และสารอินทรีย์ได้อย่างดี โดยเฉพาะการวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อย เนื่องจากเป็นวิธีวิเคราะห์ที่จำเพาะสำหรับสารแต่ละชนิด และจัดได้ว่าเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีสภาพไวสูง มีความเที่ยงและความแม่นยำดี สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวาวแสงอาจทำได้โดยการวัดการวาวแสงโดยตรง (Direct Method) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ หรือการวัดโดยวิธีทางอ้อม (Indirect Method) โดยวิธีทางอ้อมนิยมใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่ไม่เกิดการวาวแสง แต่สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์สามารถทำอันตรกิริยากับสารที่เกิดการวาวแสงได้ จนมีผลทำให้ความเข้มของการวาวแสงลดลง ซึ่งเรียกว่าการเกิด Fluorescence Quenching ความเข้มของการวาวแสงที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่ต้องการวิเคราะห์ [5]

Kanokthorn Boonkitpatarakul และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์สารที่มีโครงสร้างประกอบด้วย Arylethynyl calix[4]arenes (ANC) ดังแสดงโครงสร้างในภาพที่ 1 ซึ่งสาร ANC วาวแสงภายใต้การกระตุ้นด้วย Black light และพบว่าสาร ANC มีความเฉพาะเจาะจง และมีความว่องไวในการเกิดอันตรกิริยากับ TNT แล้วทำให้คุณสมบัติในการวาวแสงของ ANC ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้ ANC ตรวจหา TNT ในห้องปฏิบัติการได้ในระดับนาโนกรัม [6]



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างของสาร ANC

Nakorn Niamnont และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์สารที่มีโครงสร้างประกอบด้วย Triphenylamine กับวง Polyaromatic pyrene (TAP) ดังแสดงโครงสร้างในภาพที่ 2 โดยสาร TAP วาวแสงได้ภายใต้การกระตุ้นด้วย Black light และสาร TAP มีคุณสมบัติการวาวแสงลดลงเมื่อสัมผัสกับ TNT ในห้องปฏิบัติการในระดับนาโนกรัม [7]



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างของสาร TAP

#### 4. วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการวาวแสงและการลดลงของการวาวแสงของสารเมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT ของสาร ANC และ TAP โดยจะเริ่มจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อเลือกสารที่แสดงการวาวแสงและการลดลงของการวาวแสงเมื่อสัมผัสกับ TNT ได้ชัดเจนที่สุด เพื่อนำไปทดสอบความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงกับ TNT เทียบกับสารเคมีชนิดอื่น ต่อจากนั้นจะนำสารที่เลือกไปประยุกต์ใช้ในการตรวจหาไอของ TNT และทดสอบการตรวจหา TNT จากมือและเสื้อผ้าของบุคคลที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT ในภาคสนาม โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

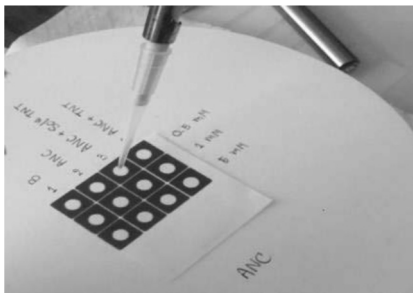
4.1 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC หรือ TAP และการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC หรือ TAP เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT ในห้องปฏิบัติการ



4.1.1 เตรียมกระดาษเคลือบสารละลาย ANC หรือ TAP โดยหยดสารละลายของสารวาวแสง ANC หรือ TAP ลงบนกระดาษที่ทำเป็นหลุมทดสอบที่เคลือบขอบหลุมด้วยไข (Wax) ด้วยเครื่องพิมพ์ไข (Wax Printer) เพื่อทำให้สารวาวแสงจำกัติดอยู่ในบริเวณทดสอบ โดยศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสารวาวแสงที่ใช้ในการเคลือบ 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 5.0 mM โดยสารวาวแสงละลายในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน และปริมาตรที่ใช้ในการเคลือบ แต่ละความเข้มข้นคือ 5  $\mu$ L ตัวอย่างการเคลือบสารละลายสารวาวแสงลงบนกระดาษทดสอบแสดงดังภาพที่ 3

4.1.2 เปรียบเทียบการวาวแสงภายใต้หลอด Black light ของกระดาษทดสอบที่เตรียมได้จากข้อ 4.1.1 เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบสารวาวแสง

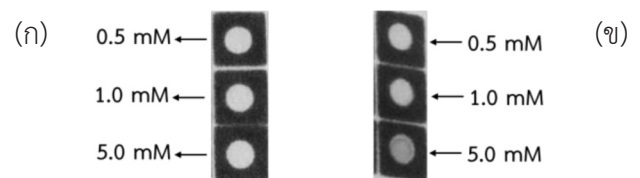
4.1.3 หยดสารละลาย TNT ในเอทานอลเข้มข้น 50 mM ลงบนกระดาษทดสอบ หลังจากนั้นนำกระดาษทดสอบไปทดสอบการวาวแสงภายใต้ Black light



ภาพที่ 3 แสดงวิธีการเคลือบสารละลายสารวาวแสง (ANC หรือ TAP) ลงบนกระดาษทดสอบ

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบสาร ANC หรือ TAP และการลดลงของการวาวแสงของกระดาษเมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT ในห้องปฏิบัติการพบว่ากระดาษที่เคลือบสารวาวแสง ANC ความเข้มข้น 5 mM จะสังเกตเห็นการวาวแสงด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจน ทำให้เมื่อกระดาษดังกล่าวสัมผัสกับ TNT

จึงสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงได้อย่างชัดเจนด้วย สำหรับกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC ที่มีความเข้มข้นลดลงจะสังเกตเห็นการวาวแสงด้วยตาชัดเจนน้อยลง ทำให้เมื่อกระดาษดังกล่าวสัมผัสกับ TNT จึงสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงได้ชัดเจนน้อยลงด้วย ในขณะที่กระดาษที่เคลือบสารวาวแสง TAP นั้นพบว่า เมื่อทิ้งกระดาษไว้นานหนึ่งกระดาษจะกลายเป็นสีน้ำตาล โดยเฉพาะกระดาษที่เคลือบสารละลาย TAP ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น สีของกระดาษทดสอบจะเข้มมากขึ้น ทำให้ยากต่อการสังเกตการเกิดการวาวแสงของกระดาษทดสอบและการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบเมื่อสัมผัสกับ TNT โดยสีของกระดาษทดสอบที่ทำการเคลือบด้วยสารละลาย ANC และ TAP ที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4 จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่ากระดาษทดสอบที่เหมาะสมในการสังเกตการวาวแสงและการลดลงของการวาวแสงเมื่อสัมผัสกับ TNT คือกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM ดังนั้นในการทดลองต่อไปในงานวิจัยนี้จะทดลองโดยใช้กระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC 5.0 mM



ภาพที่ 4 แสดงกระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลายวาวแสงความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 mM

(ก) กระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC

(ข) กระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย TAP

## 4.2 การหาความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC

การทดสอบความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC 5.0 mM จะทำการศึกษาโดยให้กระดาษทดสอบ

สัมผัส กับ TNT และสารเคมีที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้าย TNT ได้แก่ Picric Acid, 2,6-Dinitrotoluene (2,6 – DNT), 4-Nitroaniline สารวัตถุระเบิด ได้แก่ Pentaerythritol tetranitrate (PETN), Ammonium nitrate ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) สารที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในวัตถุระเบิด ได้แก่ Potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ ), Urea และสารประกอบอื่น ได้แก่ Naphthalene และการบูร โดยสารละลายทุกตัวที่ใช้ทดสอบเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 50 mM เท่ากัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.2.1 เตรียมสารละลาย ANC ที่ความเข้มข้น 5.0 mM ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรนเคลือบบนกระดาษทดสอบ

4.2.2 เตรียมสารละลายสำหรับใช้สัมผัสกับกระดาษทดสอบเพื่อศึกษาความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบ ได้แก่ สารละลาย TNT, Picric Acid, 2,6-DNT, 4-Nitroaniline, PETN, Naphthalene และการบูร โดยเตรียมในตัวทำละลายเอทานอล และสารละลาย  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$  และ Urea เตรียมในตัวทำละลายน้ำ โดยสารละลายที่ใช้สัมผัสกับกระดาษทดสอบทุกชนิดมีความเข้มข้น 50 mM

4.2.3 หยดสารละลายที่ต้องการทดสอบความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบ ANC หลังจากนั้นสังเกตการลดลงของการวาวแสงภายใต้หลอด Black light

4.3 การหาขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit) TNT ด้วยกระดาษทดสอบที่เคลือบ ANC

หยดสารละลาย TNT ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.5 และ 5.0 mM ปริมาตร 5  $\mu\text{L}$  ลงบนกระดาษหลุมทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC ที่ความเข้มข้น 5.0 mM แต่ละหลุมทดสอบ จากนั้นสังเกตการลดลงของการวาวแสงภายใต้หลอด Black light

4.4 การทดสอบการลดลงของการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบ ANC เมื่อสัมผัสกับไอของ TNT ในภาชนะปิด

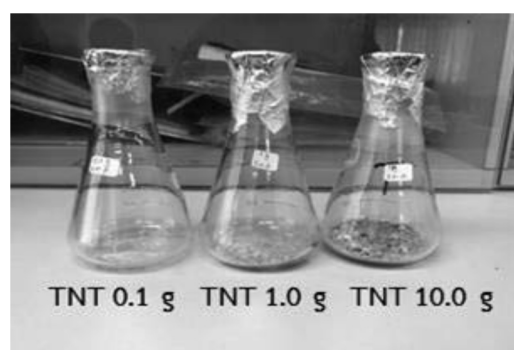
ทำการทดสอบโดยใช้กระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC ที่ความเข้มข้น 5.0 mM ติดลงบนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ปิดอยู่บนปากขวดรูปชมพู่ ปริมาตร 150 mL ที่บรรจุเกล็ด TNT น้ำหนักต่างๆ ดังนี้

ขวดใบที่ 1 เกล็ด TNT 0.1 กรัม

ขวดใบที่ 2 เกล็ด TNT 1.0 กรัม

ขวดใบที่ 3 เกล็ด TNT 10.0 กรัม

ขวดรูปชมพู่ที่บรรจุเกล็ด TNT แสดงในภาพที่ 5 หลังจากนั้นสังเกตการลดลงของการวาวแสงภายใต้หลอด Black light เมื่อเวลาผ่านไป 1, 2 และ 3 วัน

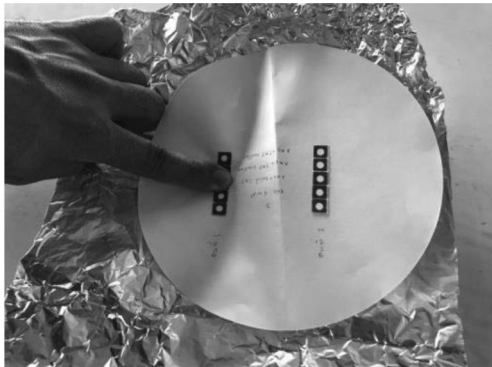


ภาพที่ 5 เกล็ด TNT ในขวดรูปชมพู่ที่มีกระดาษทดสอบเคลือบ ANC ติดบนอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ปิดอยู่

4.5 การตรวจสอบหา TNT จากมือและเสื้อผ้าของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT

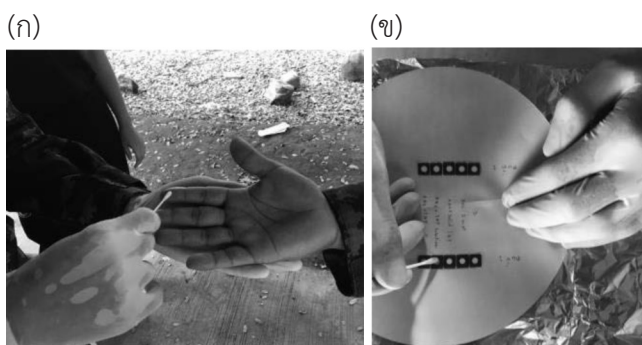
การตรวจสอบหาสาร TNT จากมือและเสื้อผ้าของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ทำการเก็บตัวอย่างจากอาจารย์ของส่วนวิชาทหาร โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่ทำการประกอบวัตถุระเบิด TNT เพื่อทำการสาธิตการจู่โจม TNT จำนวน 3 นาย ทำการทดลองซ้ำนายละ 2 ครั้ง โดยการทดสอบใช้กระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC เข้มข้น 5.0 mM ทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

4.5.1 การทดสอบวิธีที่ 1 นำนิ้วของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ป้ายลงบนกระดาษหลุมทดสอบที่เคลือบ ANC โดยตรง ดังภาพที่ 6 จากนั้นสังเกตการลดลงของการวาวแสงภายใต้หลอด Black light



ภาพที่ 6 การใช้นิ้วของผู้ที่สัมผัสวัตถุระเบิด TNT ป้ายลงบนหลุมทดสอบที่เคลือบ ANC โดยตรง

4.5.2 การทดสอบวิธีที่ 2 ทำการเช็ด (Swab) มือของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ด้วยก้านสำลี (Cotton bud) ชุบตัวทำละลายเอทานอล จากนั้นนำก้านสำลีแตะลงบนกระดาษหลุมทดสอบที่เคลือบ ANC ดังภาพที่ 7 สังเกตการลดลงของการวาวแสงภายใต้หลอด Black light



ภาพที่ 7 การตรวจหา TNT จากมือของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด

(ก) แสดงการเช็ดมือของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ด้วยก้านสำลีชุบเอทานอล สาร ANC

(ข) แสดงการป้ายก้านสำลีลงบนหลุมทดสอบที่เคลือบ

4.5.3 การทดสอบวิธีที่ 3 ทำการเช็ดเสื้อผ้าของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ด้วยก้านสำลีชุบตัวทำละลายเอทานอล จากนั้นนำก้านสำลีแตะลงบนหลุมทดสอบที่เคลือบ ANC ดังภาพที่ 8 สังเกตการลดลงของการวาวแสงภายใต้หลอด Black light

(ก)

(ข)



ภาพที่ 8 การตรวจหา TNT จากเสื้อผ้าของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด

(ก) แสดงการเช็ดเสื้อผ้าของผู้ประกอบวัตถุระเบิด TNT ด้วยก้านสำลีชุบเอทานอล

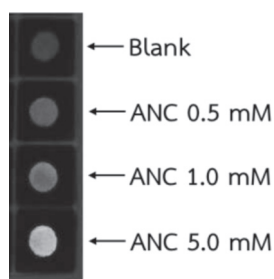
(ข) แสดงการป้ายก้านสำลีลงบนหลุมทดสอบที่เคลือบสาร ANC

## 5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC หรือ TAP และการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC หรือ TAP เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT ในห้องปฏิบัติการได้ผลดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาสมบัติการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC และการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT พบว่ากระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC เข้มข้น 5.0 mM สามารถสังเกตเห็นการวาวแสงได้ชัดเจนกว่ากระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC ที่ความเข้มข้น 1.0 และ 0.5 mM ตามลำดับ และเมื่อหยดสารละลาย TNT เข้มข้น 50.0 mM ลงบนกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC เข้มข้น 5.0 mM จะสามารถสังเกตการลดลงของการวาวแสงได้ชัดเจนกว่า

การหดยสารละลาย TNT ลงบนกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC 1.0 และ 0.5 mM ตามลำดับการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC ที่ความเข้มข้น 0.5 mM, 1.0 mM และ 5.0 mM

5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร TAP และการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร TAP เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT พบว่ากระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย TAP เข้มข้น 0.5 mM สามารถสังเกตเห็นการวาวแสงได้ชัดเจนกว่ากระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย TAP ที่ความเข้มข้น 1.0 และ 5.0 mM ตามลำดับ และเมื่อหดยสารละลาย TNT เข้มข้น 50.0 mM ลงบนกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย TAP เข้มข้น 0.5 mM จะสามารถสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงได้ชัดเจนกว่าการหดยสารละลาย TNT ลงบนกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย TAP 1.0 และ 5.0 mM ตามลำดับ สาเหตุที่กระดาษที่เคลือบ TAP ที่ความเข้มข้น 0.5 mM เกิดการวาวแสงที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่ากระดาษที่เคลือบ TAP ที่ความเข้มข้น 1.0 และ 5.0 mM เนื่องมาจาก

สารละลาย TAP ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สารละลายจะเริ่มมีสีส้มชัดเจนขึ้นทำให้เมื่อเคลือบลงบนกระดาษกรองจะทำให้กระดาษทดสอบมีสีน้ำตาลทำให้สังเกตการวาวแสงด้วยตาได้ไม่ชัดเจน ส่งผลให้เมื่อกระดาษดังกล่าวสัมผัสกับ TNT จะสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงด้วยตาได้ไม่ชัดเจนเช่นกัน

5.1.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการสังเกตการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC หรือสาร TAP และการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC หรือสาร TAP เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่ากระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM สามารถสังเกตการวาวแสง และการลดลงของการวาวแสงเมื่อกระดาษทดสอบสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT ได้ชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับกระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า สำหรับกระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสาร TAP จะสังเกตเห็นการวาวแสงได้ชัดเจนน้อยกว่ากระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC ที่ความเข้มข้นเท่ากัน เนื่องจากกระดาษที่เคลือบสารละลาย TAP จะมีสีน้ำตาล ทำให้รบกวนการสังเกตการวาวแสง และการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบ ดังนั้นในการทดลองต่อไปในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้กระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC 5.0 mM เนื่องจากเป็นกระดาษทดสอบที่มองเห็นการวาวแสงได้ชัดเจนที่สุด และเมื่อนำกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM ไปสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT สามารถสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงได้ชัดเจนที่สุดเช่นเดียวกัน ซึ่งผลการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC ความเข้มข้นต่างๆ เทียบกับการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย TAP ความเข้มข้นต่างๆ แสดงผลดังตารางที่ 1 และภาพที่ 10

**ตารางที่ 1** ผลจากการสังเกตการวาวแสงและการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC หรือ TAP ก่อนและหลังสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT

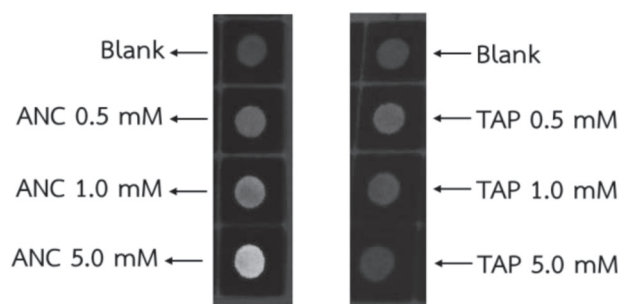
| สารที่ใช้เคลือบกระดาษทดสอบ | การเกิดการวาวแสง (Fluorescence) | การลดลงของการวาวแสง (Fluorescence Quenching) หลังสัมผัสกับ TNT |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| กระดาษไม่เคลือบสาร (Blank) | NF                              | -                                                              |
| สารละลาย ANC 0.5 mM        | F                               | Q+                                                             |
| สารละลาย ANC 1.0 mM        | F+                              | Q+                                                             |
| สารละลาย ANC 5.0 mM        | F++                             | Q++                                                            |
| สารละลาย TAP 0.5 mM        | F+                              | Q+                                                             |
| สารละลาย TAP 1.0 mM        | F                               | Q                                                              |
| สารละลาย TAP 5.0 mM        | F                               | Q                                                              |

F หมายถึง เกิดการวาวแสง

NF หมายถึง ไม่เกิดการวาวแสง

Q หมายถึง เกิดการลดลงของการวาวแสง

+ หมายถึง ความชัดเจนในการสังเกต



**ภาพที่ 10** แสดงการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC ความเข้มข้นต่างๆ เทียบกับการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย TAP ความเข้มข้นต่างๆ

## 5.2 ผลการทดสอบความเฉพาะเจาะจงในการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC

จากผลการสังเกตการลดลงของการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบสารละลาย ANC เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT และสารชนิดอื่น ดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 11 พบว่านอกจากวัตถุระเบิด TNT ที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC แล้วมีสารอีก 3 ชนิด ที่สามารถสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบได้อย่างชัดเจน ได้แก่ Picric acid, 2,6-DNT และ 4-Nitroaniline ขณะที่สารที่เป็นวัตถุระเบิดหรือสารที่เกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิดชนิดอื่นๆ ไม่สามารถทำให้เกิดการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบได้ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสารทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ TNT, Picric acid, 2,6-DNT และ 4-Nitroaniline ที่สามารถทำให้กระดาษทดสอบมีการวาวแสงลดลงเป็นสารที่โครงสร้างเป็น Nitro aromatic เท่านั้น

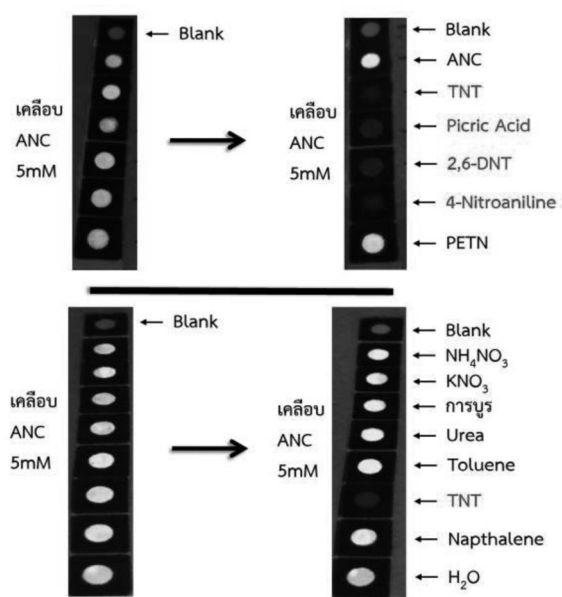
**ตารางที่ 2** ผลการสังเกตการลดลงของการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบสารละลาย ANC เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT และสารชนิดอื่น

| สารตัวอย่างที่ใช้สัมผัสกับกระดาษทดสอบเคลือบ ANC          | ผลการลดลงของการวาวแสงหลังสัมผัสกับสารตัวอย่าง |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1. สารวัตถุระเบิดและสารที่ใช้เป็นส่วนประกอบในวัตถุระเบิด |                                               |
| 1.1 TNT                                                  | Q                                             |
| 1.2 PETN                                                 | NQ                                            |
| 1.3 $\text{NH}_4\text{NO}_3$                             | NQ                                            |
| 1.4 $\text{KNO}_3$                                       | NQ                                            |
| 1.5 Urea                                                 | NQ                                            |
| 1.6 Picric acid                                          | Q                                             |
| 1.7 2,6-DNT                                              | Q                                             |
| 2. สารประกอบอื่นๆ                                        |                                               |
| 2.1 4-Nitroaniline                                       | Q                                             |
| 2.2 Naphthalene                                          | NQ                                            |
| 2.3 Camphor (การบูร)                                     | NQ                                            |

Q หมายถึง เกิดการลดลงของการวาวแสง

NQ หมายถึง ไม่เกิดการลดลงของการวาวแสง



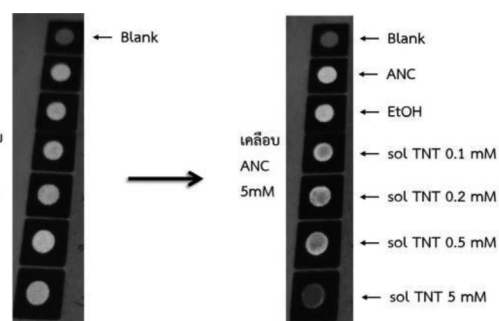


การวาวแสงของกระดาษทดสอบก่อนสัมผัส การลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบหลังสัมผัส

ภาพที่ 11 ผลการทดสอบการลดลงของการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบสารละลาย ANC เมื่อสัมผัสกับวัตถุระเบิด TNT และสารชนิดอื่น

5.3 ผลการทดสอบการหาขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit) TNT ของกระดาษทดสอบที่เคลือบ ANC โดยเมื่อนำกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC มาทำการหยดสารละลาย TNT ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.5 และ 5.0 mM ปริมาตร 5  $\mu$ L ลงบนกระดาษทดสอบ และสังเกตการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบ เทียบกับการวาวแสงของกระดาษทดสอบก่อนสัมผัสกับ TNT พบว่าเมื่อหยดสารละลาย TNT 0.1 mM ลงบนกระดาษทดสอบ จะสามารถสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงได้เพียงเล็กน้อยและไม่ชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย TNT ที่หยดลงบนกระดาษทดสอบเป็น 0.2 และ 0.5 mM จะเริ่มสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบได้ชัดเจนขึ้น และเมื่อเทียบกับผลการหยดสารละลาย TNT เข้มข้น 5.0 mM ลงบนกระดาษทดสอบ จะสามารถเห็นการลดลงของการวาว

แสงได้อย่างชัดเจนที่สุด ดังภาพที่ 12 ดังนั้นเมื่อกำหนดปริมาณ TNT น้อยที่สุด จากการหยดสารละลาย TNT เข้มข้น 5.0 mM ปริมาตร 5  $\mu$ L ลงบนกระดาษทดสอบแล้ว ทำให้สังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงด้วยตาชัดเจนที่สุด คือ ปริมาณ TNT 5.675  $\mu$ g



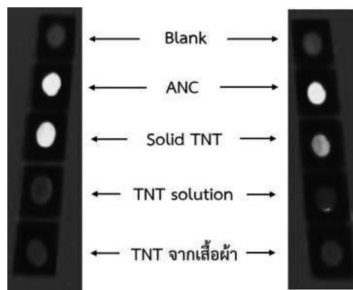
การวาวแสงของกระดาษทดสอบก่อนสัมผัสกับ TNT การลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบหลังสัมผัสกับ TNT ความเข้มข้นต่างๆ

ภาพที่ 12 ผลการทดสอบการหาขีดจำกัดการตรวจวัด TNT ด้วยกระดาษทดสอบที่เคลือบ ANC

5.4 ผลการทดสอบการลดลงของการวาวแสงของกระดาษที่เคลือบ ANC เมื่อสัมผัสกับไอของ TNT ในภาชนะปิดพบว่ากระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC ที่ติดอยู่บนกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดอยู่บนปากขวดรูปชมพู่ขนาด 150 mL ที่บรรจุเกลือ TNT น้ำหนัก 0.1, 1.0 และ 10.0 กรัม พบว่ากระดาษทดสอบที่อยู่ในขวดที่มีไอของ TNT น้ำหนัก 10.0 กรัม จะสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบได้เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน ส่วนกระดาษทดสอบที่อยู่ในขวดที่มีไอของ TNT น้ำหนัก 1.0 กรัม และ 0.1 กรัม จะสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบได้เมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองจึงสรุปกระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC สามารถลดการวาวแสงได้เมื่อกระดาษทดสอบสัมผัสกับไอของ TNT ปริมาณมากพอ



5.5 ผลการตรวจสอบหาสารตกค้างของ TNT จากมือและเสื้อผ้าของผู้ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT โดยการสังเกตการวาวแสงของกระดาศทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM ได้ผลการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 13



ผู้ประกอบ TNT คนที่ 1

ผู้ประกอบ TNT คนที่ 2

ภาพที่ 13 ผลการตรวจสอบหา TNT จากมือและเสื้อผ้าของผู้ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT

กระดาศทดสอบแถวที่ 1 เป็นกระดาศที่ไม่เคลือบสารละลาย ANC ซึ่งจะไม่เห็นการวาวแสงของกระดาศภายใต้ Black light

กระดาศทดสอบแถวที่ 2 เป็นกระดาศที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM สังเกตเห็นการวาวแสงของกระดาศด้วยตาได้อย่างชัดเจน

กระดาศทดสอบแถวที่ 3 เป็นกระดาศที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM หลังจากนั้นนำนิ้วของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ป้ายลงบนกระดาศทดสอบที่เคลือบ ANC โดยตรง จะสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงด้วยตาไม่ชัดเจน

กระดาศทดสอบแถวที่ 4 เป็นกระดาศที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM หลังจากนั้นนำก้อนสำลีชุบเอทานอลที่ผ่านการเช็ดมือของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ป้ายลงบนกระดาศทดสอบที่เคลือบ ANC โดยตรง จะสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงด้วยตาชัดเจน

กระดาศทดสอบแถวที่ 5 เป็นกระดาศที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM หลังจากนั้นนำก้อนสำลีชุบเอทานอลที่ผ่านการเช็ดเสื้อผ้าของผู้ที่ประกอบวัตถุระเบิด TNT ป้ายลงบนกระดาศทดสอบที่เคลือบ ANC โดยตรง จะสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงด้วยตาชัดเจน

## 6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 จากผลการวิจัยพบว่าสารละลายของสารวาวแสง ANC เป็นสารละลายใสไม่มีสี ทำให้เมื่อนำสารละลาย ANC ไปเคลือบบนกระดาศทดสอบ สามารถสังเกตเห็นการวาวแสงของกระดาศทดสอบ และการลดลงของการวาวแสงของกระดาศทดสอบเมื่อสัมผัสกับ TNT ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อใช้สารละลาย ANC เข้มข้น 5.0 mM ปริมาตร 5  $\mu$ L เคลือบลงบนกระดาศทดสอบจะสามารถสังเกตเห็นการวาวแสงของกระดาศทดสอบ และการลดลงของการวาวแสงเมื่อกระดาศทดสอบสัมผัสกับ TNT ได้ชัดเจนที่สุด ในขณะที่สีของสารละลายของสารวาวแสง TAP มีสีค่อนข้างไปทางสีส้ม ทำให้เมื่อนำสารละลาย TAP ไปเคลือบบนกระดาศทดสอบจึงเกิดเป็นสีน้ำตาลทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นการวาวแสงของกระดาศทดสอบ และการลดลงของการวาวแสงของกระดาศทดสอบเมื่อสัมผัสกับ TNT ได้อย่างชัดเจน จึงได้ข้อสรุปว่าสารวาวแสง ANC มีความเหมาะสมกว่าสารวาวแสง TAP ในการใช้เคลือบลงบนกระดาศทดสอบเพื่อใช้ในการตรวจหาวัตถุระเบิด TNT ในภาคสนาม โดยเฉพาะเมื่อใช้สารละลาย ANC เข้มข้น 5.0 mM เคลือบลงบนกระดาศทดสอบ

6.2 เมื่อนำสารละลาย ANC ในเตตระไฮโดรฟูแรน 5.0 mM เคลือบลงบนกระดาศกรองที่ทำเป็นกระดาศหลุมทดสอบที่เคลือบขอบหลุมทดสอบด้วยไข (Wax) สังเกตเห็นการวาวแสงของกระดาศทดสอบด้วยตาอย่างชัดเจนภายใต้หลอด Black light และเมื่อนำกระดาศทดสอบดังกล่าวไปหยดสารละลาย TNT พบว่าสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงของกระดาศทดสอบด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นการลด

ลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบหากเปลี่ยนจากสารละลาย TNT เป็นวัตถุระเบิดตัวอื่น ได้แก่ PETN และ Ammonium nitrate หรือสารประกอบชนิดอื่นที่ใช้เป็นส่วนประกอบในวัตถุระเบิด เช่น Potassium nitrate และ Urea หรือสารประกอบอื่นๆ เช่น Naphthalene และการบูร เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่านอกจาก TNT แล้วสารที่สามารถทำให้กระดาษทดสอบที่เคลือบสาร ANC ลดการวาวแสงได้ คือ Picric acid, 2,6-Dinitrotoluene (DNT) และ 4-Nitroaniline ซึ่งสารประกอบที่สามารถลดการวาวแสงของกระดาษทดสอบได้ทั้งหมดเป็นสารประกอบประเภท Nitro aromatic และจากการหาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Detection Limit) วัตถุระเบิด TNT เมื่อใช้กระดาษทดสอบที่เคลือบด้วยสารละลาย ANC เข้มข้น 5.0 mM พบว่าสารละลาย TNT ในเอทานอลเข้มข้น 5 mM ปริมาตร 5  $\mu$ L ซึ่งคิดเป็นปริมาณ TNT 5.675  $\mu$ g ทำให้กระดาษทดสอบเกิดการลดลงของการวาวแสงจนสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน

6.3 กระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC เข้มข้น 5.0 mM สามารถตรวจหาไอของ TNT ได้ โดยไม่จำเป็นต้องให้ TNT สัมผัสกับกระดาษทดสอบโดยตรง ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อนำกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC ติดด้านในกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดอยู่บนปากขวดรูปชมพู่ขนาด 150 mL ที่บรรจุเกล็ด TNT น้ำหนัก 0.1, 1.0 และ 10.0 กรัม พบว่ากระดาษทดสอบที่อยู่ในขวดที่มีไอของผง TNT น้ำหนัก 10.0 กรัม 1.0 กรัม และ 0.1 กรัมจะสังเกตเห็นการลดลงของการวาวแสงของกระดาษทดสอบได้ด้วยตาอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน 2 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ

6.4 สามารถประยุกต์ใช้กระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC 5.0 mM ตรวจหา TNT จากมือและเสื้อผ้าของบุคคลที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT ได้ ซึ่งจากการทดสอบในภาคสนามพบว่าเมื่อนำสำลีชุบเอทานอลเช็ดบริเวณมือและเสื้อผ้าของผู้ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิด TNT ป้ายลงบนกระดาษทดสอบ

กระดาษดังกล่าวเกิดการลดลงของการวาวแสงจนสามารถสังเกตได้ด้วยตาอย่างชัดเจนมากกว่าการนำมือของผู้ที่สัมผัสวัตถุระเบิด TNT มาป้ายลงบนกระดาษทดสอบที่เคลือบสารละลาย ANC โดยตรง

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหมสำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณกองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา และส่วนวิชาทหาร โรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้า ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม และขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสารวาวแสงตลอดจนเครื่องมือสำหรับใช้ในงานวิจัย

## 8. บรรณานุกรม

- (1) Choodum, A., et al., 2012. Rapid Quantitative Colourimetric Tests for Trinitrotoluene (TNT) in Soil. Forensic Science International, Vol. 222, p.340-345.
- (2) Department of the Army Technical Manual, 1984. TM 9-1300-214 Military Explosives, Washington D.C.: US Army, p.13-1-13-11.
- (3) นนร.พิเชษฐ์ เทือกภูเขียว และคณะ, 2559. การพิสูจน์ทราบชนิดของวัตถุระเบิดด้วยวิธีทางเคมี. รายงานโครงการวิจัย สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.
- (4) Fido explosive detectors technical overview. (From <http://www.x-raycenter.ir/index.php/phocadl?download=74%3A-fido-xt>).
- (5) แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์ 50 จำกัด หน้า 210-259.
- (6) Boonkitpatarakul, K., et al. , 2015. Fluorescent Phenylethylenylene Calix(4)arenes for Sensing TNT in Aqueous Media and Vapor Phase. RSC. Advances, Vol. 5, p.33306-33311.
- (7) Niamnont, N., et al., 2013. Tunable Star-shaped Triphenylamine Fluorophores for Fluorescence Quenching Detection and Identification of Nitro-Aromatic Explosives. Chem. Commun, Vol. 49, p.780-782.

## การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยของกองทัพอากาศ Development of Analytical Instrument of Subjective Tests For the Royal Thai Force

นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ อนรรักษ์ โชติติลล  
Group Captain Associate Professor Anuruk Chotedelok

อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220, ประเทศไทย

Academic Devision, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy,  
Sai Mai, Bangkok 10220, Thailand

Corresponding Author. E-mail : chotedelok@gmail.com

(Received: February 18, 2019, Revised: April 5, 2019, Accepted: April 5, 2019)

**บทคัดย่อ :** การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยของกองทัพอากาศ เป็นงานวิจัยประเภทการวิจัยและพัฒนา (R&D) มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยโดยสามารถให้ประมวลผลและดูผลได้บนโทรศัพท์มือถือ และเพื่อสำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย การพัฒนาเครื่องมือมีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอน คือ (1) วิเคราะห์ระบบงานเดิมและความต้องการของผู้ใช้งาน จากหน่วยงานเป้าหมาย ได้แก่ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โรงเรียนเสนาธิการทหารอากาศ และโรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส (2) ออกแบบระบบเพื่อรองรับการใช้งาน ทั้งในส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล และ ส่วนแสดงผล (3) พัฒนาเครื่องมือ เพื่อให้สามารถรองรับข้อมูลและแสดงผลบนโทรศัพท์มือถือได้ และ (4) ทดสอบการใช้งาน ทั้งในสถานการณ์จำลองและสถานการณ์จริง โดย สุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานตามความสมัครใจ จำนวน 7 คน จาก 3 สถาบันการศึกษาของกองทัพอากาศ การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยของกองทัพอากาศ ทำให้ครูอาจารย์และบุคลากรทางการศึกษาของกองทัพอากาศ เกิดความตระหนักในกระบวนการพัฒนาคุณภาพปัญหาสอบที่ครบถ้วน โดยเฉพาะการวิเคราะห์ปัญหาสอบภายหลังการสอบ กระบวนการดังกล่าวยังไม่เคยถูกนำมาใช้ในกองทัพอากาศ เนื่องจากบุคลากรทางการศึกษายังขาดความรู้ ความเข้าใจ และเห็นว่ายากและใช้เวลามาก โดยเฉพาะขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ผู้ใช้งานที่ถูกสุ่มเป็นตัวอย่างเห็นว่าการเข้าถึงเครื่องมือ ความง่ายในการดูผลข้อมูล ความครบถ้วนของค่าสถิติที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ และความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ อยู่ในระดับมากที่สุด ( $>4.50$ ) ส่วนความง่ายต่อการป้อนข้อมูล และความสะดวกในการนำผลการวิเคราะห์ข้อสอบพิมพ์ประกอบรายงาน เห็นว่าอยู่ในระดับมาก ( $3.50 < \leq 4.50$ )

**คำสำคัญ :** การวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย ปัญหาสอบอัตนัย

**Abstract :** Development of analytical instrument of subjective tests for the Royal Thai Air Force is categorized as Research and Development (R&D). The objective of this research is to develop analytical instrument of subjective tests for the Royal Thai Air Force to be processed and viewed on the Smart Phone, and to survey user's opinions. The steps of the development are as follows : 1) Analyze the old system and user requirements from Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Air Command and Staff College and Senior Air Officer College. 2) Design system to support the use. 3) Develop instrument to support data and display on Smart Phone and 4) Test the system both in simulation and real situations by using 7 random people from 3 institutes of the Royal Thai Air Force. The development of analytical instrument of subjective tests for the Royal Thai Air Force will make teachers and educational personnel of the Royal Thai Air Force aware of the quality improvement process for examinations. The process has not been used in the Royal Thai Air Force because educational personnel lacks knowledge and understanding. It has been considered as a difficult and time-consuming process especially the process of statistical data analysis. Users who were randomly selected have responded that the access to instruments, the ease of viewing data results, the completeness of the statistics required for analysis and the reliability of the instrument are at the highest level (  $>4.50$ ). The ease of data entry and the convenience of applying the results of the printed examination report are at a high level ( $3.50 < \leq 4.50$ ).

**Keywords :** Analysis of Subjective Exam, Subjective Exam, Subjective Test Instrument

## 1. บทนำ

การจัดการเรียนการสอนเพื่อให้เป็นไปตามหลักสูตรสถานศึกษาของกองทัพอากาศ นอกจากการจัดกิจกรรมการเรียนการสอนแล้ว ยังต้องทำการวัดและประเมินผลเพื่อจัดลำดับตามความรู้ความสามารถของผู้เรียน การวัดผลทางการศึกษาปัจจุบันมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การใช้ปัญหาสอบ การทำรายงาน การนำเสนอผลงาน การสอบสัมภาษณ์ การสอบปฏิบัติ การทำโครงการ เป็นต้น ในบทความวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะในส่วนการวัดผลโดยใช้ปัญหาสอบแบบอัตนัย (Subjective Exam) เท่านั้น ซึ่งเป็นปัญหาสอบที่มีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้สอบเรียบเรียงความคิด ความรู้ ใช้ภาษาผูกประโยค ให้เป็นข้อความที่ชัดเจน เขียนเป็นคำตอบให้สามารถตอบคำถามได้ตรงประเด็นตามความต้องการของคำถาม [6] สถาบันการศึกษาของกองทัพอากาศส่วนใหญ่ อาทิ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช วิทยาลัยพยาบาลทหารอากาศ โรงเรียนเสนาธิการทหารอากาศ โรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส วิทยาลัยการทัพอากาศ โรงเรียนนายทหารชั้นผู้บังคับฝูง เป็นต้น ยังขาดกระบวนการจัดทำปัญหาสอบอัตนัยแบบครบกระบวนการ บางสถานศึกษาผู้สอนเป็นผู้จัดทำปัญหาสอบเพียงคนเดียว บางสถานศึกษามีกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของปัญหาสอบก่อนนำไปทดสอบกับผู้เรียน โดยผ่านการตรวจสอบจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อตรวจสอบด้านความตรงตามเนื้อหา รูปแบบการพิมพ์ การใช้ภาษา ความเหมาะสมของจำนวนข้อสอบ เวลา และการให้น้ำหนักคะแนน เป็นต้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบคุณภาพของปัญหาสอบก่อนนำไปวัดผลกับผู้เรียน สิ่งที่ยังดำเนินการไม่ครบตามกระบวนการพัฒนาคุณภาพของปัญหาสอบ คือ การวิเคราะห์ปัญหาสอบหลังจากที่ผู้เรียนได้ทำการสอบแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากผู้สอนส่วนใหญ่ไม่ทราบกระบวนการที่ครบถ้วนโดยคิดว่ามีแต่เฉพาะการวิเคราะห์ข้อสอบที่เป็นแบบปรนัยเท่านั้น นอกจากนี้ยังเห็นว่ามีความยุ่งยากและใช้เวลามาก โดยเฉพาะในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทาง

สถิติ เช่น การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่ามัธยฐาน ค่าความเที่ยง ค่าความเ้ม ค่าความยากง่าย ค่าอำนาจจำแนก เป็นต้น จึงทำให้ผู้สอนละเอียดและไม่ดำเนินการให้ครบถ้วนตามกระบวนการพัฒนาคุณภาพของปัญหาสอบ อาจจะนำไปสู่ความเสี่ยงในประเด็นการตั้งคำถามของผู้เรียนและผู้ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการศึกษาว่าปัญหาสอบที่นำมาใช้วัดความรู้ความสามารถกับผู้เรียนนั้นมีคุณภาพและความเป็นมาตรฐานมากน้อยเพียงใด

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยเห็นว่าการพัฒนาเครื่องมือเพื่อช่วยวิเคราะห์ปัญหาสอบอัตนัย น่าจะเป็นประโยชน์สูงสุดสำหรับบุคลากรทางการศึกษาของกองทัพอากาศที่จะตอบคำถามให้กับผู้เรียนหรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการศึกษา เกี่ยวกับคุณภาพของปัญหาสอบได้อย่างมีหลักการ สามารถใช้ผลการวิเคราะห์ปัญหาสอบมาเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกปัญหาสอบในครั้งต่อไปได้เป็นอย่างดี สอดคล้องตามพระราชบัญญัติการศึกษาแห่งชาติ พ.ศ.2542 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2545 และ พ.ศ.2553) และยังตอบสนองการวิจัยตามนโยบาย Thailand 4.0 ของรัฐบาลที่ส่งเสริมให้เกิดงานวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ได้จริง โดยได้กำหนดเป็นวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ (1) พัฒนาเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยโดยสามารถให้ประมวลผลและดูผลได้บน โทรศัพท์มือถือ และ (2) เพื่อสำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย โดยข้อคิดเห็นต่างๆ ผู้วิจัยจะนำไปปรับแก้ไขให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน ต่อไป

## 2. เนื้อหา

เนื้อหาของบทความนี้กำหนดการนำเสนอเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ระเบียบวิธีวิจัย กระบวนการพัฒนาปัญหาสอบอัตนัย การวิเคราะห์คุณภาพของปัญหาสอบอัตนัย และการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยของกองทัพอากาศ ดังนี้

## 2.1 ระเบียบวิธีวิจัย

บทความวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

- (1) ประชากร ได้แก่ ครูอาจารย์และบุคลากรทางการศึกษาของกองทัพอากาศที่ใช้ปัญหาสอบแบบอัตนัย
- (2) กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ครูอาจารย์ และบุคลากรทางการศึกษาของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โรงเรียนเสนาธิการทหารอากาศ และโรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส ที่ใช้ปัญหาสอบแบบอัตนัยและสมัครใจใช้โปรแกรมวิเคราะห์ปัญหาสอบอัตนัย จำนวน 7 คน และ
- (3) ภาษาการเขียนโปรแกรมใช้ภาษา พีเอชพี (php) ใช้สำหรับจัดทำเว็บไซต์ และแสดงผลออกมา ในรูปแบบเอชทีเอ็มแอล (HTML) และใช้โปรแกรมระบบจัดการฐานข้อมูลมายซีเคิล (MySQL) ทำการเก็บข้อมูลและรองรับคำสั่งเอสคิวเอล (SQL) ที่เป็นเครื่องมือสำหรับเก็บข้อมูล โดยสามารถรองรับจำนวนข้อสอบได้สูงสุด 50 ข้อ การดำเนินการวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

การสำรวจความต้องการเพื่อออกแบบระบบ

ผู้วิจัยได้สำรวจความต้องการใช้งานของเครื่องมือวิเคราะห์ค่าสถิติต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย โดยการสัมภาษณ์ นาวาอากาศเอกหญิง รองศาสตราจารย์ วิภาดา คุณขุนทด ผู้อำนวยการกองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ (สัมภาษณ์, 20 มิถุนายน 2561) [1] นาวาอากาศเอกหญิง ศาสตราจารย์ รังนา เครือแก้ว (สัมภาษณ์, 21 มิถุนายน 2561) [2] และ นาวาอากาศเอกหญิง วงศ์ดา วรธงไชย หัวหน้ากองวิเคราะห์และประเมินผล โรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส กรมยุทธศึกษาทหารอากาศ (สัมภาษณ์, 25 มิถุนายน 2561) [3] โดยโรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส กรมยุทธศึกษาทหาร ได้เห็นความสำคัญของเครื่องมือดังกล่าว จึงจัดทำเป็นโครงการฝึกอบรมบุคลากรทางการศึกษาเรื่อง “โครงการบูรณาการเครื่องมือการวัดและประเมินผล ยุค 4.0” ในวันที่ 29 สิงหาคม 2561 ณ โรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส อากาศ ต่อมาเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2561 ผู้รับผิดชอบหมวดวิชาการทหาร โรงเรียน เสนาธิการทหาร

อากาศได้ขอรับคำแนะนำในการใช้เครื่องมือดังกล่าว นับเป็นก้าวสำคัญในการขับเคลื่อนผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรมตามนโยบาย Thailand 4.0

## 2.2 กระบวนการพัฒนาปัญหาสอบแบบอัตนัย

การออกปัญหาสอบอัตนัย มีกระบวนการเริ่มต้นตั้งแต่

- (1) การกำหนดความมุ่งหมายการวัดผล (2) การสร้างเครื่องมือวัด (3) การดำเนินการวัด (4) การประเมินผล และ (5) การบันทึกผล [4]

ปัญหาสอบอัตนัย มีจุดมุ่งประสงค์เพื่อให้ผู้สอบเรียบเรียงความคิดและความรู้ เรียบเรียงภาษาผูกประโยคให้เป็นข้อความที่ชัดเจน เขียนเป็นคำตอบให้ตรงตามความต้องการของคำถาม โดย Bloom's Taxonomy Revised (2001) กล่าวว่าจุดมุ่งหมายของการเรียนรู้ หรือ มิติกระบวนการทางพุทธิปัญญา (Cognitive Process) ที่ปรับปรุงใหม่ แบ่งเป็น 6 มิติ ได้แก่ รู้จำ (Remembering) เข้าใจ (Understanding) ประยุกต์ใช้ (Applying) วิเคราะห์ (Analyzing) ประเมินค่า (Evaluating) และ คิดสังเคราะห์ (Creating) ปัญหาสอบแบบอัตนัยที่ใช้วัดผลกันในปัจจุบัน จะใช้วัดตั้งแต่มิติที่ 2 เป็นต้นไป ดังนี้

มิติความเข้าใจ หมายถึง ความสามารถในการสร้างความหมายจากสิ่งที่ได้เรียนรู้ไปในแง่ของการพูด การเขียน เพื่อสื่อสารให้ผู้อื่นเข้าใจด้วยวิธีการของตนเอง ประกอบด้วย (1) การแปลความ เช่น การแปลสัญลักษณ์ แปลลักษณะอาการ แปลเนื้อความ แปลสุภาษิต คำพังเพย (2) การตีความ โดยยึดเนื้อความที่เป็นหลัก ไม่ต้องอาศัยทฤษฎีหรือเกณฑ์ใดๆ ไปใช้ประกอบการพิจารณา และ (3) การขยายความ เพื่อทำนายอนาคตโดยอาศัยข้อมูลและแนวโน้มต่าง ๆ

มิติการประยุกต์ใช้ หมายถึง การนำความรู้ของตนไปใช้ในการปฏิบัติหรือการแก้ปัญหาในสถานการณ์ที่เผชิญ หรือในชีวิตจริง เป็นการนำหลักการหรือทฤษฎีไปใช้เปรียบเทียบกับสถานการณ์ตามบ่งการซึ่งเป็นสถานการณ์ใหม่ที่แตกต่างไปจากเดิม



มิติการวิเคราะห์ หมายถึง ความสามารถในการพิจารณา แยกแยะ แจกแจง แยกส่วนประกอบ จัดระบบ การแสดงความคิดเห็น การให้เหตุผล และตรวจสอบได้ว่า ส่วนประกอบนั้น ๆ เกี่ยวข้องกันอย่างไร และแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างใหญ่อย่างไร

มิติการประเมินค่า หมายถึง การตัดสินคุณค่าสิ่งของหรือกิจกรรม โดยอาศัยเกณฑ์และมาตรฐานเป็นเครื่องมือประกอบด้วย การตรวจสอบ การตัดสินผล

มิติการคิดสร้างสรรค์ หมายถึง ความสามารถของบุคคลในการคิดค้นนวัตกรรม ประกอบด้วย การสร้าง การพัฒนา การวางแผน และการผลิต [5]

เมื่อได้ความมุ่งหมายในการวัดผลแล้ว จะเป็นขั้นตอนการสร้างเครื่องมือวัด ได้แก่ แบบทดสอบ แบบสัมภาษณ์ แบบสังเกต ฯลฯ จากนั้นนำเครื่องมือไปทำการวัดกับผู้เรียน โดยการจัดกิจกรรมต่างๆ เช่น การสอบข้อเขียน การสอบปฏิบัติ การนำเสนอผลงาน เป็นต้น เมื่อผ่านกระบวนการวัดได้ข้อมูล ผู้สอนจะทำการตรวจให้คะแนน จากนั้นนำคะแนนของผู้สอบแต่ละคนไปประเมินผลการเรียน รวมถึงการวิเคราะห์คุณภาพของปัญหาสอบ และทำการบันทึกผล

### 2.3 การวิเคราะห์คุณภาพของปัญหาสอบแบบอัตนัย

การวิเคราะห์คุณภาพของปัญหาสอบแบบอัตนัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ในภาพรวม และการวิเคราะห์รายข้อ ดังนี้

#### 2.3.1 การวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยในภาพรวม

การวิเคราะห์ปัญหาสอบในภาพรวม มี 2 ประเด็น คือ ความตรง (Validity) และความเที่ยง (Reliability) ความตรง หมายถึง ปัญหาสอบวัดได้ตรงในสิ่งที่ต้องการวัด มีความสอดคล้องของเนื้อหาสาระของปัญหาสอบกับเนื้อหาวิชาที่สอน ครอบคลุมเนื้อหาและวัตถุประสงค์ของวิชาที่สอน การตรวจสอบความตรงตามเนื้อหา ทำได้โดยใช้ทีมผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาเนื้อหาสาระ

ของปัญหาสอบ ส่วนความเที่ยง หมายถึง ความคงที่ของคะแนนที่วัดได้แต่ละครั้ง วิธีการหาค่าความเที่ยงของปัญหาสอบ สามารถทำได้หลายวิธี ในบทความนี้ใช้สูตรสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient : ) ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ของคะแนนจากการใช้ปัญหาสอบฉบับเดียว และสอบเพียงครั้งเดียว โดยมีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left( 1 - \frac{\sum s_i^2}{S_t^2} \right) \quad (1)$$

เมื่อ  $k$  แทน จำนวนข้อสอบ

แทน  $s_i^2$  ความแปรปรวนของคะแนนแต่ละข้อ

แทน  $S_t^2$  ความแปรปรวนของคะแนนทั้งฉบับ

การหาค่าความเที่ยงโดยใช้สูตรสัมประสิทธิ์ Alpha สามารถหาได้โดยใช้ผลการสอบจากแบบทดสอบชุดเดียว นำไปสอบกับผู้เข้าสอบกลุ่มเดียว ไม่จำกัดเฉพาะแบบทดสอบที่ให้คะแนนแบบ 1 กับ 0 [6]

สำหรับค่าสถิติอื่นๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Average) ค่ามัธยฐาน (Median) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Stdevp) ค่าความแปรปรวน (Varp) และค่าความเบ้ (Skew) สามารถใช้คำสั่งในฟังก์ชันของ เอ็กเซล (Excel) ได้ดังนี้

Average (number1, [number2],...)

Median (number1, [number2],...)

Stdevp (number1, [number2],...)

Varp (number1, [number2],...)

Skew (number1, [number2],...)

ไวยากรณ์ของฟังก์ชันมีอาร์กิวเมนต์ดังนี้

Number 1 หมายถึง ตัวเลขแรก การอ้างอิงเซลล์หรือช่วงแรกที่ต้องการหาค่าเฉลี่ย

Number 2,... หมายถึง ตัวเลขเพิ่มเติม การอ้างอิงเซลล์เพิ่มเติม หรือช่วงเพิ่มเติมที่ต้องการหาค่าสถิติดังกล่าว มีได้สูงที่สุดถึง 255 ค่า [7]

สำหรับค่าความเที่ยงใช้สูตรสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค ซึ่งไม่มีค่าสิ่งในฟังก์ชันของเอ็กเซล จึงใช้ฟังก์ชันความแปรปรวน เพื่อแทนค่าลงใน สูตรที่ (1)

นอกจากนี้ยังสามารถใช้แผนภูมิแท่ง และค่าร้อยละ เพื่อดูการกระจายและลักษณะความเบ้ของข้อมูลประกอบการแบ่งกลุ่มผู้เรียนกลุ่มเก่ง – กลุ่มอ่อนได้

### 2.3.2 การวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยรายข้อ

การวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยรายข้อ หลังจากตรวจให้คะแนนการสอบด้วยปัญหาสอบแบบอัตนัยรายข้อ นำคะแนนของผู้สอบแต่ละคนมาจัดลำดับจากคะแนนมากที่สุดลงมาหาคะแนนน้อยที่สุด ทำการแบ่งกลุ่มผู้สอบเป็นนักเรียนกลุ่มเก่ง (กลุ่มสูง) และกลุ่มอ่อน (กลุ่มต่ำ) ตามตารางที่ 1 [8] ดังนี้

**ตารางที่ 1** เทคนิคการแบ่งกลุ่มนักเรียนกลุ่มเก่ง – นักเรียนกลุ่มอ่อน

| จำนวนผู้สอบ                                                       | เทคนิคการแบ่งกลุ่มเก่ง-อ่อน |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| คะแนนมีการแจกแจงโค้งปกติ หรือใกล้เคียงโค้งปกติ                    | 27 %                        |
| คะแนนมีการแจกแจงเบ้ซ้าย หรือ เบ้ขวา                               | 33%                         |
| จำนวนผู้สอบมีไม่ถึง 100 คน และคะแนนมีการแจกแจงเบ้ซ้าย หรือ เบ้ขวา | 50%                         |

หลังจากแบ่งกลุ่มผู้สอบที่เป็นนักเรียนเก่งและนักเรียนกลุ่มอ่อนแล้ว นำมาคำนวณหาค่าความยาก และค่าอำนาจจำแนกของปัญหาสอบรายข้อ โดยมีวิธีการคำนวณมี 4 วิธี ดังนี้

2.3.2.1 วิธีของวิทนีและซาเบอร์ (Whithney and Sabers) [9] ดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{S_u + S_L - 2(N)X_{\min}}{2(N)(X_{\max} - X_{\min})} \quad (2)$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = \frac{S_u - S_L}{N(X_{\max} - X_{\min})} \quad (3)$$

เมื่อ

$S_u$  แทน ผลรวมของคะแนนผู้สอบกลุ่มเก่ง

$S_L$  แทน ผลรวมของคะแนนผู้สอบกลุ่มอ่อน

$N$  แทน จำนวนผู้สอบในกลุ่มเก่งหรือกลุ่มอ่อน

$X_{\max}$  แทน คะแนนที่ผู้สอบทำได้สูงสุด

$X_{\min}$  แทน คะแนนที่ผู้สอบทำได้ต่ำสุด

#### 2.3.2.2 วิธีของบุญชม ศรีสะอาด [10]

ดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{S_u + S_L}{2NM} \quad (4)$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = \frac{S_u - S_L}{NM} \quad (5)$$

เมื่อ

$S_u$  แทน ผลรวมของคะแนนผู้สอบกลุ่มเก่ง

$S_L$  แทน ผลรวมของคะแนนผู้สอบกลุ่มอ่อน

$N$  แทน จำนวนผู้สอบในกลุ่มเก่งหรือกลุ่มอ่อน

$M$  แทน คะแนนเต็ม

#### 2.3.2.3 สูตรของเดรก (Drake) [11]

ดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{P_U + P_L}{2} \quad (6)$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = P_U - P_L \quad (7)$$

เมื่อ

$P_u$  แทน สัดส่วนของคะแนนที่ผู้สอบในกลุ่มเก่งได้

$P_L$  แทน สัดส่วนของคะแนนที่ผู้สอบในกลุ่มอ่อนได้

#### 2.3.2.3 สูตรของอุทุมพร จามรมาน [12]

ดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{\bar{X}_U + \bar{X}_L}{2M} \quad (8)$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = \frac{X_U - X_L}{M} \quad (9)$$

เมื่อ

 $\bar{X}_U$  แทน คะแนนเฉลี่ยของคะแนนผู้สอบกลุ่มเก่ง $\bar{X}_L$  แทน คะแนนเฉลี่ยของคะแนนผู้สอบกลุ่มอ่อน $M$  แทน คะแนนเต็ม

ตัวอย่างการคำนวณแบบทดสอบอัตนัยฉบับหนึ่ง  
นำไปทดสอบกับนักเรียน จำนวน 10 คน ได้คะแนนตาม  
ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนการตรวจปัญหาสอบของผู้สอบ

| คนที่ | ข้อ"1" | ข้อ"2" | ข้อ"3" | ข้อ"4" | ข้อ"5" | รวม |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| 1     | 5      | 5      | 5      | 5      | 5      | 25  |
| 2     | 5      | 4      | 4      | 4      | 4      | 21  |
| 3     | 4      | 3      | 3      | 3      | 3      | 16  |
| 4     | 4      | 5      | 4      | 5      | 4      | 22  |
| 5     | 4      | 4      | 4      | 4      | 4      | 20  |
| 6     | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      | 15  |
| 7     | 3      | 2      | 3      | 2      | 3      | 13  |
| 8     | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 10  |
| 9     | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 5   |
| 10    | 2      | 3      | 2      | 2      | 2      | 11  |

จากตารางที่ 2 นำคะแนนรวมมาเรียงลำดับจาก  
คะแนนมากที่สุดลงไปหาคะแนนน้อยที่สุด เพื่อทำการแบ่ง  
กลุ่มนักเรียนเก่ง นักเรียนอ่อน กรณีนี้นักเรียนมีจำนวน  
น้อยจึงใช้การแบ่งกลุ่มโดยใช้เทคนิค 50% ได้นักเรียนกลุ่ม  
เก่ง 5 คน และนักเรียนกลุ่มอ่อน 5 คน ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เรียงลำดับคะแนนจำแนกกลุ่มเก่งกลุ่มอ่อน

| คนที่ | ข้อ 1 | ข้อ 2 | ข้อ 3 | ข้อ 4 | ข้อ 5 | รวม | กลุ่ม |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 1     | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     | 25  | เก่ง  |
| 4     | 4     | 5     | 4     | 5     | 4     | 22  | เก่ง  |
| 2     | 5     | 4     | 4     | 4     | 4     | 21  | เก่ง  |
| 5     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 20  | เก่ง  |
| 3     | 4     | 3     | 3     | 3     | 3     | 16  | เก่ง  |
| 6     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 15  | อ่อน  |
| 7     | 3     | 2     | 3     | 2     | 3     | 13  | อ่อน  |
| 10    | 2     | 3     | 2     | 2     | 2     | 11  | อ่อน  |
| 8     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 10  | อ่อน  |
| 9     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 5   | อ่อน  |

พิจารณาปัญหาข้อที่ 1

$$S_u = 22, S_L = 11, N = 5, M = 5, X_{\max} = 5$$

$$X_{\min} = 1$$

$$P_u = \frac{22}{25} = 0.88, P_L = \frac{11}{25} = 0.44,$$

$$\bar{X}_U = 4.4, \bar{X}_L = 2.2$$

วิธีที่ 1 สูตรของวินิย์และซาเบอร์

ดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{S_U + S_L - 2(N)X_{\min}}{2(N)(X_{\max} - X_{\min})}$$

$$= \frac{22 + 11 - 2(5)1}{2(5)(5 - 1)} = \frac{23}{40} = 0.58$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = \frac{S_u - S_L}{N(X_{\max} - X_{\min})}$$

$$= \frac{22 - 11}{5(5 - 1)} = \frac{11}{20} = 0.55$$

ปัญหาข้อที่ 1 มีค่าความยากเท่ากับ 0.58  
มีค่าอำนาจจำแนก เท่ากับ 0.55

**วิธีที่ 2** สูตรของบุญชม ศรีสะอาดดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{S_U + S_L}{2NM} = \frac{22+11}{2(5)(5)} = 0.66$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = \frac{S_U - S_L}{NM} = \frac{22-11}{5(5)} = 0.44$$

ปัญหาสอบอัตนัยข้อที่ 1 มีค่าความยากเท่ากับ 0.66  
มีค่าอำนาจจำแนก เท่ากับ 0.44

**วิธีที่ 3** สูตรของเดรกดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{P_U + P_L}{2} = \frac{0.88 - 0.44}{2} = 0.66$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = P_U - P_L = 0.88 - 0.44 = 0.44$$

ปัญหาสอบอัตนัยข้อที่ 1 มีค่าความยากเท่ากับ 0.66  
มีค่าอำนาจจำแนก เท่ากับ 0.44

**วิธีที่ 4** สูตรของอุทุมพร จามรมานดัชนีค่าความยาก ( $I$ ) มีสูตร ดังนี้

$$I = \frac{\bar{X}_U + \bar{X}_L}{2M} = \frac{4.4 + 2.2}{2(5)} = 0.66$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ ) มีสูตร ดังนี้

$$r = \frac{\bar{X}_U - \bar{X}_L}{M} = \frac{4.4 - 2.2}{5} = 0.44$$

ปัญหาสอบอัตนัยข้อที่ 1 มีค่าความยากเท่ากับ 0.66  
มีค่าอำนาจจำแนก เท่ากับ 0.44

จากตัวอย่างข้างต้นการวิเคราะห์ปัญหาสอบอัตนัยพบว่าวิธีของบุญชม ศรีสะอาด วิธีของเดรก และวิธีของอุทุมพร จามรมาน ให้ผลเหมือนกันทุกประการเนื่องจากมีที่มาของสูตรเหมือนกัน

สูตรของบุญชม ศรีสะอาด สามารถแปลงเป็นสูตรของอุทุมพร จามรมาน ได้ดังนี้

ดัชนีค่าความยาก ( $I$ )

$$I = \frac{S_U + S_L}{2NM} = \frac{\frac{S_U}{N} + \frac{S_L}{N}}{2(M)} = \frac{\bar{X}_U + \bar{X}_L}{2(M)}$$

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ )

$$r = \frac{S_U - S_L}{NM} = \frac{\frac{S_U}{N} - \frac{S_L}{N}}{M} = \frac{\bar{X}_U - \bar{X}_L}{M}$$

สูตรของบุญชม ศรีสะอาด สามารถแปลงเป็นสูตรของเดรก ได้ดังนี้

ดัชนีค่าอำนาจจำแนก ( $r$ )

$$r = \frac{S_U - S_L}{NM} = \frac{S_U}{NM} - \frac{S_L}{NM} = P_U - P_L$$

เมื่อ

 $S_U$  แทน ผลรวมของคะแนนกลุ่มเก่ง $S_L$  แทน ผลรวมของคะแนนกลุ่มอ่อน $N$  แทน จำนวนผู้เข้าสอบในกลุ่มเก่งหรือกลุ่มอ่อน $M$  แทน คะแนนเต็ม $P_U$  แทน สัดส่วนของคะแนนที่ผู้สอบในกลุ่มเก่งได้ $P_L$  แทน สัดส่วนของคะแนนที่ผู้สอบในกลุ่มอ่อนได้ $\bar{X}_U$  แทน คะแนนเฉลี่ยของคะแนนกลุ่มเก่ง $\bar{X}_L$  แทน คะแนนเฉลี่ยของคะแนนกลุ่มอ่อน

ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อสอบในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะวิธีของวิทนีและซาเบอร์ และวิธีของบุญชม ศรีสะอาดเท่านั้น

ช่วงระดับความยากง่ายของปัญหาสอบ และอำนาจจำแนกแสดงได้ ตามตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ช่วงระดับความยากง่าย และอำนาจจำแนกของปัญหาสอบ

| ดัชนีความยากง่าย (P)   | แปลผล       |
|------------------------|-------------|
| 0.00 – 0.19            | ยากไป       |
| 0.20 – 0.80            | ใช้ได้      |
| 0.81 – 1.00            | ง่ายไป      |
| ดัชนีค่าอำนาจจำแนก (r) | แปลผล       |
| น้อยกว่า 2.00          | จำแนกไม่ได้ |
| 2.00 – 1.00            | จำแนกได้    |

ดังนั้น ปัญหาสอบข้อที่ 1 สูตรของวินัยและซาเบอร์ มีค่าความยากง่ายเท่ากับ 0.58 และมีค่าอำนาจจำแนกเท่ากับ 0.55 สูตรของบุญชม ศรีสะอาด ปัญหาสอบข้อที่ 1 มีค่าความยากง่ายเท่ากับ 0.66 และมีค่าอำนาจจำแนกเท่ากับ 0.44

#### 2.4 การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย

การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย เป็นขั้นตอนการพัฒนาเครื่องมือเพื่ออำนวยความสะดวกให้กับบุคลากรทางการศึกษาของกองทัพอากาศได้ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย ทั้งในภาพรวมและรายข้อตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.3 ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์รวดเร็ว ถูกต้อง และพร้อมนำข้อมูลที่ได้นำไปเขียนรายงานเพื่อบันทึกผล และใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาการออกปัญหาสอบแบบอัตนัยครั้งต่อไป

การพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่

- (1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบงานเดิมและความต้องการของผู้ใช้งาน
  - (2) ขั้นตอนการออกแบบระบบ
  - (3) ขั้นตอนการพัฒนาเครื่องมือ
  - (4) ขั้นตอนการตรวจสอบการใช้งาน
- ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบงานเดิม

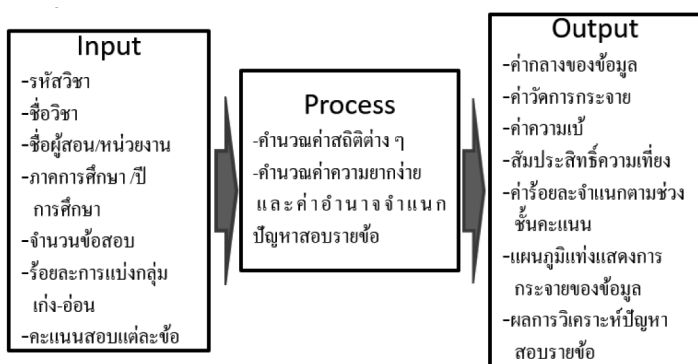
ผู้วิจัยทำการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบเดิม พบว่า ยังไม่มีหน่วยงานใดทำการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่ทราบวิธีการ มีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และใช้เวลาในการคำนวณหาค่าสถิติมาก คณะผู้วิจัยได้สำรวจความต้องการจากผู้ที่เกี่ยวข้องจำนวน 4 คนจาก 3 สถาบันการศึกษาของกองทัพอากาศ ได้แก่ โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทกษัตริยาธิราช โรงเรียน เสนาธิการทหารอากาศ และโรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบต่อไป

#### ขั้นตอนการออกแบบระบบ

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบเพื่อรองรับการใช้งานโดยเลือกบางวิชาที่มีการจัดการสอบและตรวจปัญหาสอบไปแล้วในช่วงเดือน กันยายน ถึง พฤศจิกายน 2561 โดยสุ่มเลือกปัญหาสอบบางวิชาจากโรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทกษัตริยาธิราช โรงเรียนเสนาธิการทหารอากาศ และโรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส การออกแบบระบบใช้หลักการดังนี้ (1) ใช้เวลาน้อยในการประมวลผลหลังจากที่กรอกข้อมูลทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว (2) ผู้สอนไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านสถิติมาก และไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญในการใช้โปรแกรมใด ๆ เป็นพิเศษ (3) สามารถจัดพิมพ์รายงานได้ โดยไม่ต้องนำผลการวิเคราะห์ มาจัดรูปแบบรายงานใหม่

ผู้วิจัยออกแบบระบบเพื่อรองรับการใช้งานตามความต้องการของผู้ใช้โดยเฉพาะการดูผลรายงานบนโทรศัพท์มือถือ การออกแบบแบ่งเป็น 3 ส่วน ตามภาพที่ 1 ได้แก่ (1) ส่วนรับข้อมูล (Input) เป็นการป้อนข้อมูลที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ข้อมูล ผ่านโปรแกรมเอ็กเซล ประกอบด้วย รหัสวิชา ชื่อวิชา ชื่อผู้สอน หรือ หน่วยงาน ภาคการศึกษา ปีการศึกษา จำนวนข้อสอบ ร้อยละการแบ่งกลุ่มเก่ง-อ่อน และคะแนนสอบที่ผ่านการตรวจแต่ละข้อ (2) ส่วนประมวลผล (Process) เป็นส่วนของการหาค่าสถิติต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ในภาพรวมและรายข้อ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่ามัธยฐาน ค่าฐานนิยม ค่าพิสัย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเที่ยง ตารางแจกแจงความถี่

ของคะแนนแบบช่วงชั้น แผนภูมิการกระจายของคะแนน การวิเคราะห์ข้อสอบโดยวิธีของวิทนีย์และซาเบอร์ และวิธีของบุญชม ศรีสะอาด [9][10] (3) ส่วนแสดงผล (Output) เป็นส่วนแสดงค่าสถิติต่างๆ ที่จะได้จากส่วนประมวลผล และแสดงผลเป็นรูปแบบของรายงานที่ง่ายต่อการนำไปใช้งาน



ภาพที่ 1 การออกแบบระบบการวิเคราะห์ปัญหาข้อสอบอัตโนมัติ

### ขั้นตอนการพัฒนาเครื่องมือ

การพัฒนาเครื่องมือเป็นขั้นตอนสร้างเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ปัญหาข้อสอบแบบอัตโนมัติทั้งในภาพรวมและรายข้อ และให้ค่าสถิติต่างๆ ตามที่ออกแบบไว้ โดยมีลำดับการใช้ ดังนี้

(1) พิมพ์ <http://zipgun.nkrafa.ac.th/subAnalysis/> ในช่อง URL หน้าจอจะขึ้นภาพตามภาพที่ 2 ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ปัญหาข้อสอบแบบอัตโนมัติที่แถบเครื่องมือด้านบนทางขวา มีปุ่มให้เลือก 3 ปุ่ม ได้แก่ วิเคราะห์ข้อสอบอัตโนมัติ แฟ้มสะสมงาน และทีมพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาข้อสอบแบบอัตโนมัติได้กำหนดให้หน้าแรกเป็นส่วนการรับข้อมูล ได้แก่ ชื่อ-ประเภท การสอบ รหัส-ชื่อวิชา ชื่อผู้สอน จำนวนนักเรียนกลุ่มเก่ง-อ่อน (มีคำแนะนำในการแบ่งกลุ่ม)

(2) เตรียมไฟล์เอ็กเซล เพื่อนำไฟล์ข้อมูลเข้าระบบสำหรับวิเคราะห์ปัญหาข้อสอบแบบอัตโนมัติ ตามรูปที่ 3 กดปุ่ม Choose file เลือกไฟล์ที่เตรียมไว้ จากนั้นกดปุ่ม Upload File เพื่อส่งข้อมูลทั้งหมดไปประมวลผลบนเครื่องแม่ข่าย

ของกองประกันคุณภาพการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทกษัตริยาธิราช

Subjective Analysis Program Version 1.0

โปรแกรมวิเคราะห์ข้อสอบอัตโนมัติ  
ของกองทัพบกไทย

วิเคราะห์ข้อสอบอัตโนมัติ

ข้อมูลการสอบ

ชื่อ - ประเภทการสอบ  
การสอบประจำภาคต้น ปี 61

รหัส - ชื่อวิชา  
คณิต 101 แคลคูลัส - 1

ชื่อผู้สอน  
น.อ. สอนเก่ง ขยันเตรียม

จำนวนนักเรียนกลุ่มเก่ง กลุ่มอ่อน  
50% (นักเรียนจำนวนน้อย)

ข้อแนะนำในการแบ่งกลุ่มเก่ง - อ่อน

- ค่าความเบ้ใกล้ศูนย์ ใช้ 27%
- ค่าความเบ้ห่างจากศูนย์มาก ๆ ใช้ 33%
- กรณีจำนวนผู้สอบน้อยไม่ถึง 20 คน อาจใช้ 50%

Choose File No file chosen

ตัวอย่างไฟล์ Excel download, วิธีการกรอกข้อมูลใน Excel

Upload File

ภาพที่ 2 ส่วนรับข้อมูล



|    | A         | B        | C        | D        | E        | F        | G        |
|----|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1  |           | ข้อที่ 1 | ข้อที่ 2 | ข้อที่ 3 | ข้อที่ 4 | ข้อที่ 5 | ข้อที่ 6 |
| 2  | คะแนนเต็ม | 10       | 10       | 8        | 8        | 6        | 6        |
| 3  | คนที่ 1   | 9.5      | 9.5      | 3.5      | 7.5      | 5.5      | 5.5      |
| 4  | คนที่ 2   | 9.0      | 9.0      | 3.0      | 7.0      | 5.0      | 5.0      |
| 5  | คนที่ 3   | 8.5      | 8.5      | 3.0      | 6.5      | 5.0      | 5.0      |
| 6  | คนที่ 4   | 8.0      | 8.0      | 3.0      | 6.5      | 4.5      | 4.5      |
| 7  | คนที่ 5   | 7.5      | 7.5      | 3.0      | 6.0      | 4.5      | 4.5      |
| 8  | คนที่ 6   | 7.5      | 7.5      | 2.5      | 6.0      | 4.5      | 4.5      |
| 9  | คนที่ 7   | 7.0      | 7.0      | 2.0      | 5.5      | 4.0      | 4.0      |
| 10 | คนที่ 8   | 6.5      | 6.5      | 2.0      | 5.0      | 4.0      | 4.0      |
| 11 | คนที่ 9   | 6.0      | 6.0      | 2.0      | 5.0      | 3.5      | 3.5      |
| 12 | คนที่ 10  | 5.5      | 5.5      | 2.0      | 4.5      | 3.5      | 3.5      |
| 13 | คนที่ 11  | 5.5      | 5.5      | 1.5      | 4.0      | 3.0      | 3.0      |
| 14 | คนที่ 12  | 5.0      | 5.0      | 1.5      | 4.0      | 3.0      | 3.0      |
| 15 | คนที่ 13  | 4.5      | 4.5      | 1.0      | 3.5      | 2.5      | 2.5      |
| 16 | คนที่ 14  | 4.0      | 4.0      | 1.0      | 3.0      | 2.5      | 2.5      |
| 17 | คนที่ 15  | 3.5      | 3.5      | 1.0      | 3.0      | 2.0      | 2.0      |
| 18 | คนที่ 16  | 3.5      | 3.5      | 0.5      | 2.5      | 2.0      | 2.0      |
| 19 | คนที่ 17  | 3.0      | 3.0      | 0.5      | 2.0      | 1.5      | 1.5      |
| 20 | คนที่ 18  | 2.5      | 2.5      | 0.5      | 2.0      | 1.5      | 1.5      |
| 21 | คนที่ 19  | 2.0      | 2.0      | 1.0      | 1.5      | 1.0      | 1.0      |
| 22 | คนที่ 20  | 1.5      | 1.5      | 1.0      | 1.5      | 1.0      | 1.0      |

ข้อที่ 1, 2, ...  
คะแนนเต็มแต่ละข้อ

คะแนนแต่ละคน  
ต้องเป็นจำนวนเต็ม หรือ  
ทศนิยม 1 ตำแหน่งเท่านั้น

รายชื่อ หรือเลขลำดับ

ภาพที่ 3 ตัวอย่างการเตรียมไฟล์เอ็กเซล เพื่อนำไฟล์ข้อมูล  
เข้าระบบสำหรับวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย

Subjective Analysis Program Version 1.0

โปรแกรมสำหรับสอบอัตนัย และประมวลผล

ชื่อผู้พัฒนา

PORTFOLIO

วิชา หลักการบริหารทางการทหาร

น.อ.XXX

การสอบประจำภาคต้น ปี 61 (n = 91)

2019-04-04 14:00:52

วิชา กาวงหน้า

น.อ.หญิง วรดิศา

การสอบประจำภาคต้น ปี 61 (n = 50)

2019-04-04 13:43:11

วิชา คน111 แคลคูลัส1

น.อ.หญิง วิภาดา คุณขุนทด, น.อ.สมภูมิ มีชวานา

ปัญหาสอบประจำภาคต้นปีการศึกษา 2561 (n = 83)

2019-02-18 15:57:37

วิชา คน111 แคลคูลัส1

น.อ.หญิง วิภาดา คุณขุนทด, น.อ.สมภูมิ มีชวานา

ปัญหาสอบประจำภาคต้นปีการศึกษา 2561 (n = 83)

2019-02-18 15:56:53

วิชา คน 111 วิชาแคลคูลัส-1

น.อ.หญิง วิภาดา คุณขุนทด, น.อ.สมภูมิ มีชวานา

ปัญหาสอบปลายภาคต้นปี (n = 85)

2019-02-15 10:56:33

วิชา คน112 วิชาแคลคูลัส2

น.อ.หญิง วิภาดา คุณขุนทด, น.อ.สมภูมิ มีชวานา

ปัญหาสอบปลายภาคต้นปีการศึกษา 2561 (n = 80)

2019-02-13 13:36:04

วิชา คน112 วิชาแคลคูลัส2

น.อ.หญิง วิภาดา คุณขุนทด, น.อ.สมภูมิ มีชวานา

การสอบปลายภาคประจำภาคปลายปีการศึกษา 2561 (n = 81)

2019-02-13 13:09:58

วิชา คน112

น.อ.หญิง วิภาดา คุณขุนทด, น.อ.สมภูมิ มีชวานา

การสอบกลางภาคประจำภาคปลายปีการศึกษา 2561 (n = 82)

2019-02-11 13:39:53

วิชา คน234 สกิลสำรับวิชากรมสารบรรณ

น.อ. พ.ต.สุวิทย์ ไรต์สีก, น.อ. พ.ต.สุชาติ มีลายุทธ

การสอบประจำภาคปลายปี 61 (n = 36)

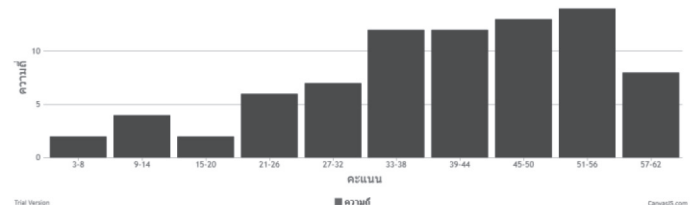
2019-01-09 09:24:33

ภาพที่ 4 ส่วนแสดงรายวิชาทั้งหมดที่ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหา  
สอบแบบอัตนัย

แถบเครื่องมือด้านบนสุดทางขวามือ เลือกแฟ้ม  
สะสมงาน (Portfolio) จะปรากฏรายวิชาที่มีการใช้งาน  
ของเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย ตามภาพ  
ที่ 4 โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกเก็บไว้บนเครื่อง แม่ข่ายของ  
กองประกันคุณภาพการศึกษาของโรงเรียนนายเรืออากาศ  
นามินทกษัตริยาธิราช

(3) ในแฟ้มสะสมงาน คลิกเลือกวิชาที่ต้องการดู  
ผลการวิเคราะห์ปัญหาสอบ จะได้หน้าจอแสดงผลการ  
วิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยทั้งในภาพรวม ตามภาพ  
ที่ 5 และผลการวิเคราะห์รายข้อ ตามภาพที่ 6 ดังนี้

การทดสอบ ปัญหาสอบประจำภาคต้นปีการศึกษา 2561  
ชื่อวิชา คน111 แคลคูลัส1  
ชื่อ อจ. น.อ.หญิง วิภาดา คุณขุนทด, น.อ.สมภูมิ มีชวานา  
จำนวนข้อ 7  
กลุ่มสูงต่ำ คิดที่ 33% = 27 คน  
คะแนนสูงสุด 50  
คะแนนต่ำสุด 0  
คะแนนเฉลี่ย 33.93  
คะแนนมัธยฐาน 37.00  
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 12.37  
ความเบ้ (Skewness) -0.88  
จำนวนนักเรียน 83



ภาพที่ 5 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ปัญหาสอบอัตนัยในภาพรวม

| ข้อที่ | คะแนนเต็ม |              |              |        |        |
|--------|-----------|--------------|--------------|--------|--------|
|        | เต็ม      | รวมกลุ่มเก่ง | รวมกลุ่มอ่อน | สูงสุด | ต่ำสุด |
| 1      | 5         | 120.00       | 47.00        | 5.00   | 0.00   |
| 2      | 7         | 114.00       | 45.00        | 7.00   | 0.00   |
| 3      | 6         | 143.00       | 68.00        | 6.00   | 0.00   |
| 4      | 5         | 114.00       | 59.00        | 5.00   | 0.00   |
| 5      | 5         | 109.00       | 96.00        | 5.00   | 0.00   |
| 6      | 12        | 166.00       | 96.00        | 10.00  | 0.00   |
| 7      | 3         | 80.00        | 46.00        | 4.00   | 0.00   |
| 8      | 6         | 104.00       | 12.00        | 7.00   | 0.00   |
| 9      | 5         | 65.00        | 9.00         | 5.00   | 0.00   |
| 10     | 6         | 114.00       | 24.00        | 6.00   | 0.00   |

| Saber |      | Boonchom |      | ความยากง่าย |         |     | จำนวนข้อถูก | คุณภาพข้อสอบ |
|-------|------|----------|------|-------------|---------|-----|-------------|--------------|
| i     | r    | i        | r    | ง่าย        | เหมาะสม | ยาก |             |              |
| 0.59  | 0.52 | 0.59     | 0.52 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.40  | 0.35 | 0.40     | 0.35 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.62  | 0.44 | 0.62     | 0.44 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.61  | 0.39 | 0.61     | 0.39 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.73  | 0.09 | 0.73     | 0.09 |             | ✓       |     | ✗           | ควรปรับปรุง  |
| 0.46  | 0.25 | 0.38     | 0.20 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.56  | 0.30 | 0.75     | 0.40 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.29  | 0.46 | 0.34     | 0.54 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.26  | 0.40 | 0.26     | 0.40 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |
| 0.41  | 0.53 | 0.41     | 0.53 |             | ✓       |     | ✓           | ใช้ได้       |

ข้อสอบมีคุณภาพ 9 ข้อ คิดเป็นร้อยละ 90.00

ภาพที่ 6 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ปัญหาสอบอัตนัยรายข้อ

## (4) ขั้นตอนการตรวจสอบการใช้งาน

เมื่อได้พัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยเสร็จเรียบร้อยแล้ว สามารถวิเคราะห์ค่าทางสถิติต่างๆ และรายงานผลได้ถูกต้องเป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้ โดยนำเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบการใช้งานในสถานการณ์จำลองและสถานการณ์จริง [13] การทดสอบการใช้งานในสถานการณ์จำลองเป็นการจำลองข้อมูลในสถานการณ์

ต่างๆ เช่น ผู้สอบได้คะแนนต่างกันมากๆ หรือได้คะแนนเท่า ๆ กัน ผู้สอบมีจำนวนมาก หรือมีจำนวนน้อยๆ เป็นต้น เพื่อตรวจสอบการนำเข้าข้อมูล ความครบถ้วน และความถูกต้องของผลลัพธ์ ในส่วนของการตรวจสอบในสถานการณ์จริง ใช้ผลคะแนนจากปัญหาสอบที่ผ่านการตรวจ ให้คะแนนเรียบร้อยแล้วจากโรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชตรียาธิราช โรงเรียนเสนาธิการทหารอากาศ และโรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส รวม 7 วิชา โดยใช้ฟังก์ชันทางสถิติในโปรแกรมเอ็กเซลตรวจสอบค่าสถิติต่างๆ

ภายหลังจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัย ผู้วิจัยได้สุ่มตัวอย่างผู้ใช้งาน จำนวน 7 คน สอบถามการใช้งานใน 6 ประเด็น ได้แก่ การเข้าถึงเครื่องมือ ความง่ายต่อการป้อนข้อมูล ความง่ายในการดูผลข้อมูล ความสะดวกในการนำผลการวิเคราะห์ข้อสอบพิมพ์ประกอบรายงาน ความครบถ้วนของค่าสถิติที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ ความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ พบว่าในภาพรวมผู้ใช้เครื่องมือเห็นว่าเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตนัยมีความสะดวกในการใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด เมื่อพิจารณาในแต่ละประเด็น พบว่าประเด็นการเข้าถึงเครื่องมือ ความง่ายในการดูผลข้อมูล ความครบถ้วนของค่าสถิติที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ และความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ ผู้ใช้เครื่องมือเห็นว่าอยู่ในระดับมากที่สุด ( $>4.50$ ) ส่วนประเด็นความง่ายต่อการป้อนข้อมูล และความสะดวกในการนำผลการวิเคราะห์ข้อสอบพิมพ์ประกอบรายงาน ผู้ใช้เครื่องมือเห็นว่าอยู่ในระดับมาก ( $3.50 < \leq 4.50$ ) ตามตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผู้ใช้ที่มีต่อเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตโนมัติ (n=7)

| ประเด็น                                                  | $\bar{X}$ | S.D. | แปลผล     |
|----------------------------------------------------------|-----------|------|-----------|
| 1. การเข้าถึงเครื่องมือ                                  | 4.80      | 0.45 | มากที่สุด |
| 2. ความง่ายต่อการป้อนข้อมูล                              | 4.40      | 0.55 | มาก       |
| 3. ความง่ายในการดูผลข้อมูล                               | 4.80      | 0.45 | มากที่สุด |
| 4. ความสะดวกในการนำผลการวิเคราะห์ข้อสอบพิมพ์ประกอบรายงาน | 4.40      | 0.55 | มาก       |
| 5. ความครบถ้วนของค่าสถิติที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์     | 4.80      | 0.45 | มากที่สุด |
| 6. ความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ                          | 4.80      | 0.45 | มากที่สุด |
| รวม (เฉลี่ย)                                             | 4.67      | 0.31 | มากที่สุด |

### 3. สรุปและข้อเสนอแนะ

เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น เป็นเครื่องมืออำนวยความสะดวกให้กับครูอาจารย์และบุคลากรทางการศึกษาของกองทัพอากาศ ได้ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ทราบระดับคุณภาพของปัญหาสอบที่นำไปใช้วัดผลการเรียนรู้ของผู้เรียนในมิติต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้าใจ การประยุกต์ใช้ การวิเคราะห์ การประเมินค่า การคิดสร้างสรรค์ เป็นต้น โดยจะให้ค่าสถิติต่างๆ ที่จำเป็นเพื่อประกอบการวิเคราะห์ ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่ามัธยฐาน ค่าความเที่ยง ค่าความแปรปรวน ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนก เป็นต้น

ในส่วนของการพัฒนาผู้วิจัยได้นำเครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น ไปใช้ใน

สถานการณ์จริง โดยสุ่มตัวอย่าง 7 วิชา จาก 3 สถาบันการศึกษาของกองทัพอากาศ ได้แก่ โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชดิยาธิราช โรงเรียนเสนาธิการทหารอากาศ และโรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส จากผลการประเมินของผู้ใช้ที่มีต่อเครื่องมือ พบว่าโดยภาพรวมมีความเหมาะสมแก่การใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด

ข้อเสนอแนะของผู้วิจัย ต้องการขับเคลื่อนให้เกิดการใช้งานอย่างต่อเนื่องและยั่งยืน โดยการประชาสัมพันธ์เชิงรุกในการให้ความรู้ ความเข้าใจ และการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปัญหาสอบแบบอัตโนมัติ ให้กับผู้บังคับบัญชาและหน่วยการศึกษาต่าง ๆ ของกองทัพอากาศให้เห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาการออกปัญหาสอบที่ได้คุณภาพถูกต้องตามหลักวิชา โดยผ่านกระบวนการวิเคราะห์ปัญหาสอบ และสามารถตอบประเด็น ข้อสงสัยต่าง ๆ เกี่ยวกับคุณภาพปัญหาสอบที่นำไปใช้วัดผลผู้เรียน

### 4. กิตติกรรมประกาศ

มูลนิธิพลอากาศเอก ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ ฤทธาณี และนาวาอากาศโท ดร.พงศ์เทพ จันทน์เสนะ

### 5. บรรณานุกรม

- (1) วิภาดา คุณขุนทด. (20 มิถุนายน 2561). ผู้อำนวยการ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชดิยาธิราช. สัมภาษณ์.
- (2) รัชนา เครือแก้ว. (21 มิถุนายน 2561). ศาสตราจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชดิยาธิราช. สัมภาษณ์.
- (3) วงศ์ดา วรธงไชย (25 มิถุนายน 2561). หัวหน้ากองวิเคราะห์และประเมินผล โรงเรียนนายทหารอากาศอาวุโส กรมยุทธศึกษาทหารอากาศ. สัมภาษณ์.
- (4) อนุรักษ์ ชาติติลล, เทวา กาญจนชม, พงศ์เทพ จันทน์เสนะ, 2560. การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ข้อสอบเพื่อประกันคุณภาพข้อสอบของโรงเรียนนายเรืออากาศ. วารสารวิชาการนายเรืออากาศ, Vol.4, p. 20-25.
- (5) Bloom, G.S., et al., 1956. Taxonomy of Educational Objectives Handbook I: Cognitive Domain. New York: Longmans, Inc.

- (6) อนุรักษ์ ไชติติก, 2560. การพัฒนาการออกข้อสอบอัตนัยของ กองทัพไทย. วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ นายเรืออากาศ, vol.6, p. 30-42.
- (7) ปริดาภรณ์ กาญจนสำราญวงศ์, 2561. Excel Statistics Analysis. กรุงเทพฯ: อินโฟเพลส.
- (8) นภา หลิมรัตน์, 2551. แหล่งข้อมูลด้านแพทย์ ศาสตร์ศึกษา, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สืบค้นจาก <http://www.teachingresources.psu.ac.th/document/2551/limrat/9Item%20Analysis.pdf>)
- (9) D.R.Whitney, D.L.Sabers, 1970. Improving Essay Examinations III, Use of Item Analysis, Technical Bulletin II, (Mimeographed). Iowa City: University Evaluation and Examination Service.
- (10) บุญชม ศรีสะอาด, 2561. การวิเคราะห์ข้อสอบแบบอื่นนอกเหนือ จากแบบเลือกตอบ, (สืบค้นจาก <http://www.watpon.in.th/boonchom/itemanalysis.pdf>)
- (11) RL.Thorndike, EP. Hagen, 1977. Measurement and Evaluation in Psychology and Education. 4th ed. NewYork: John Wiley and Sons.
- (12) อุทุมพร จามรมาน, 2530. การวัดและประเมินผลการเรียนการสอน ระดับอุดมศึกษา, พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : ฟีนีქซ์บุ๊คซิง.
- (13) อนุรักษ์ ไชติติก, เทวา กาญจนชม และ พงศ์เทพ จันทน์เสนะ, 2560. การวิจัยและพัฒนาโปรแกรมประเมินผลการศึกษาของ กองทัพอากาศ (RTAF-EEP). วารสารวิชาการนายเรืออากาศ, เล่มที่ 13 หน้า 7-18.

## การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศในเวลาจริงจากกล้องมัลติสเปกตรัมสำหรับการเกษตร A Real-Time Image Processing from Multispectral Camera for Agriculture

เรืออากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์  
Flight Lieutenant Assistant Professor Pramote Suksirisak

อาจารย์กองการศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

171/1 ถ.พหลโยธิน แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

Lecturer, Mechanical Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force

Academy 171/1 Phahonyothin Rd. Klongthanon, Saimai, Bangkok 10220

Corresponding Author: pramote\_suk@rtaf.mi.th

(Received: February 18, 2019, Revised: April 17, 2019, Accepted: April 22, 2019)

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของระบบอากาศยานไร้คนขับสำหรับการเกษตรแม่นยำ มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมและมีโปรแกรมวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetable Index, NDVI) ในเวลาจริงและกำหนดตำแหน่งพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ด้วยโปรแกรมระบุพิกัด โดยนำสัญญาณภาพที่ส่งจากอากาศยานไร้คนขับมายังภาคพื้นและประมวลผลภาพในขณะที่อากาศยานยังคงบินทำภารกิจและทำการระบุพิกัดตำแหน่งของพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ แล้วนำมาใส่ค่าตำแหน่งในโปรแกรมวางแผนการบินเพื่อทำการบินไปยังตำแหน่งนั้นและทำการฉีดพ่นปุ๋ยชนิดน้ำต่อไป จากการบินทดสอบบริเวณสวนมะนาวเนื้อที่ประมาณ 2 ไร่ โดยได้ทำการระบุพิกัดจุด 3 ตำแหน่งโดยโปรแกรมประมวลผลดัชนีพรรณพืช NDVI ในเวลาจริง และทำการบ่อนพิกัดตำแหน่งเพื่อให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งแล้วลงจอด พบว่าอากาศยานไร้คนขับสามารถลดระดับความสูงจากตำแหน่งเริ่มต้นที่ความสูง 100 เมตร บินไปยังจุดที่กำหนดด้วยความเร็ว 6 เมตรต่อวินาที มีค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง  $\pm 1$  เมตรต่อวินาที ค่าความผิดพลาดในการบินไปยังตำแหน่งที่กำหนดมีค่าระหว่าง 0 – 6 เมตร ค่าความสูงของอากาศยานมีค่าผิดพลาดระหว่างทำการบิน 0 - 2 เมตร สำหรับการลดความผิดพลาดที่เกิดจากการบินนั้น สามารถลดได้โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นในการพัฒนาต่อไป

**คำสำคัญ :** มัลติสเปกตรัม ภาพถ่ายทางอากาศ ประมวลผลภาพ

**Abstract :** This research is part of the unmanned aerial vehicle for precision agriculture. The objective is to develop an unmanned aerial system that is equipped with a multispectral imaging camera and develop software to analyze the Normalized Difference Vegetable Index (NDVI) in real time and locate the location of the stress plant. The NDVI calculated using live stream video input from the flying UAV and located the plant stress coordinate. The coordinates are input into the flight planning software for control the UAV to that coordinates for further fertilizer spraying. The flight test location are 2 rai of the lime field and can be located the 3 interested coordinates from geolocation real-time NDVI software. The flight test results show that the UAV reduced altitude for home position, 100 meters, and continue flying to the 3 coordinates using speed 6 m/s with the speed error  $\pm 1$  m/s. The flight position error between 0-6 meters and the altitude error between 0-2 meters and can be reduced by using the high performance sensor for further development.

**Keywords :** Multispectral, Aerial Photography, Image Processing

## 1. บทนำ

อากาศยานไร้คนขับโดยทั่วไปจะติดตั้งกล้องถ่ายภาพนิ่งและกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว เพื่อปฏิบัติการถ่ายภาพทางอากาศ และนำภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวที่ได้มาใช้ในการกิจการต่าง ๆ ได้หลากหลาย แต่เนื่องจากขีดความสามารถของกล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ใช้สำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยทั่วไปนั้นจะถูกจำกัดเพียงช่วงคลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ (Visible Light) จึงได้เพียงภาพที่ประสาทตาของมนุษย์มองเห็นได้เท่านั้น ในปัจจุบันมีการพัฒนากล้องถ่ายภาพทางอากาศสำหรับอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ตรวจจับช่วงคลื่นแสงที่นอกเหนือจากช่วงคลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็นเช่นย่านใกล้อินฟราเรด (Near Infrared, NIR) ย่านคลื่นรังสีความร้อน (Thermal) เป็นต้น ทำให้ภาพถ่ายทางอากาศแสดงผลได้มากกว่ากล้องถ่ายภาพทั่วไป ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพของระบบอากาศยานไร้คนขับได้เป็นอย่างดี

## 2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความอุดมสมบูรณ์ของต้นมะนาวบริเวณหลังโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยใช้กล้องมัลติสเปกตรัมถ่ายภาพทางอากาศในเวลาจริงและส่งผลมายังภาคพื้น และวิเคราะห์ผลจากค่าดัชนี NDVI เพื่อนำไปทำการแก้ไขบริเวณที่ต้นมะนาวไม่สมบูรณ์ต่อไป

2.2 เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของการระบุตำแหน่งพิกัดในสวนมะนาวที่ได้จริงกับตำแหน่งที่เขียนไว้ในโปรแกรม ArduPilot

## 3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการถ่ายภาพและการประมวลผลภาพทำให้เกิดการรวมเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลซึ่งก่อนหน้านี้ถูกจำกัดอยู่ที่ระบบถ่ายภาพด้วยดาวเทียมหรือเทคโนโลยีป้องกันประเทศ แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนากล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมที่ใช้วัด



การสะท้อนของแสงได้หลายช่วงคลื่นเพื่อใช้สำหรับติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับและนำไปใช้ในภาคพลเรือนเพื่อทำการสำรวจโดยเฉพาะด้านเกษตรกรรม [1],[2],[3] ทำให้เกิดการพัฒนามาทำการเกษตรที่เรียกว่าการเกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) ซึ่งนอกจากด้านการเกษตรแล้วยังมีการนำภาพถ่ายจากกล้องมัลติสเปกตรัมไปใช้งานด้านการสำรวจตรวจสอบความเสียหายของพืชทางวิงของอากาศยาน [4] หรือด้านการแพทย์ในการเป็นเครื่องวัดเพื่อช่วยในการวินิจฉัยทางการแพทย์ [5] เป็นต้น

ในการทำการเกษตรแบบแม่นยำนั้นจะเป็นการถ่ายภาพแล้ววิเคราะห์ดัชนีพรรณพืช โดยค่าดัชนีพรรณพืชมีการนำเสนอในครั้งแรกโดย Pearson [6] จากการนำภาพถ่ายทางอากาศมาคำนวณอัตราส่วนระหว่างค่าการสะท้อนคลื่นย่านสีแดงหารด้วยค่าการสะท้อนคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด หลังจากนั้น Rouse และคณะ [7] ได้สร้างสมการค่าดัชนีพรรณพืชในลักษณะการกระจายแบบปกติ (Normalize Difference Vegetation Index, NDVI) โดยคำนวณจากภาพถ่ายดาวเทียม ERTS-1 ซึ่งมีการนำค่าดัชนีดังกล่าวมาใช้อย่างแพร่หลาย ต่อมาในช่วงที่มีการพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับ ได้มีการนำมาใช้ทางด้านการเกษตรในการวิเคราะห์ดัชนี NDVI โดย Jose A. J. Berni และคณะ [8] ใช้อากาศยานไร้คนขับแบบเฮลิคอปเตอร์ติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบรังสีความร้อนและกล้องมัลติสเปกตรัม ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรเพื่อถ่ายภาพและนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ความสมบูรณ์โดยวิเคราะห์จากดัชนี NDVI แต่การถ่ายภาพและนำมาวิเคราะห์นั้นต้องใช้เวลาซึ่งบางเหตุการณ์อาจไม่ทันต่อสถานการณ์เช่นในกรณีที่ต้องการควบคุมการระบาดของแมลงศัตรูพืชดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบวิเคราะห์ดัชนี NDVI ในเวลาจริงโดย Bin Zhao และคณะ [9] ได้พัฒนาการวัดค่า NDVI แบบใกล้เวลาจริง โดยใช้กล้องแพนโครมาติก (Panchromatic) กับกล้องภาพสี ติดตั้งกับหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อ พัฒนาโปรแกรมเพื่อการ

กำจัดสัญญาณรบกวนเช่นเงาและดินที่เป็นภาพหลังซึ่งสามารถนำมาใช้ด้านการตรวจสอบการเจริญเติบโตของพืช โดยวัดค่าดัชนี NDVI ของพืชใบสีเขียวเปรียบเทียบกับดัชนีของใบสีเหลือง และ Sara และคณะ [10] ทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางอากาศแบบไฮเปอร์สเปกตรัมที่ติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึง โดยการใช้ประมวลผลภาพแบบในเวลาจริง เพื่อนำไปใช้ในการตรวจลาดตระเวนและค้นหาเป้าหมาย อย่างไรก็ตามยังไม่มีการพัฒนากระบวนการอากาศยานไร้คนขับที่วิเคราะห์ค่าดัชนี NDVI ในเวลาจริงและติดตั้งระบบฉีดพ่นกับโครงสร้างเดียวกันที่สามารถบินไปยังตำแหน่งที่มีค่าดัชนี NDVI ต่ำซึ่งเกิดจากการเจริญเติบโตที่ไม่สมบูรณ์เพื่อทำการฉีดพ่นยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำได้ทันที

## 4. วิธีดำเนินการศึกษา

### 4.1 กล้องถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม

การทำการเกษตรแม่นยำในปัจจุบันมีขั้นตอนทั่วไปคือการนำอากาศยานไร้คนขับติดตั้งกล้องมัลติสเปกตรัมเพื่อทำการถ่ายภาพการสะท้อนของคลื่นแสงในย่านต่างๆ เมื่อเสร็จสิ้นภารกิจการบิน ก็จะนำภาพที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำของกล้อง มาทำการวิเคราะห์และทำเป็นแผนที่การเกษตรแม่นยำ เพื่อวางแผนบริหารจัดการและพิจารณาหาตำแหน่งที่พืชเจริญเติบโตไม่สมบูรณ์เพื่อที่จะทำการให้ปุ๋ยหรือพ่นยา หลังจากนั้นก็นำอากาศยานไร้คนขับสำหรับพ่นยาหรือให้ปุ๋ยขึ้นทำการบินเพื่อไปฉีดพ่นพ่นในตำแหน่งที่ได้ทำการวางแผนไว้

จากขั้นตอนดังกล่าวจะเห็นว่าจะต้องทำการบินถ่ายภาพจากกล้องมัลติสเปกตรัมให้เสร็จสิ้นก่อน แล้วจึงนำภาพมาวิเคราะห์หลังจากทำการบิน เพื่อหาค่าดัชนี NDVI โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างเป็นแผนที่การเกษตรแม่นยำก่อน แล้วจึงทำการบินเพื่อพ่นยาหรือให้ปุ๋ย ดังนั้นหากพบว่าพื้นที่เพาะปลูกประสบปัญหาจากแมลงศัตรูพืชหรือโรคพืช การที่จะต้องมาทำการวิเคราะห์ภาพหลังจากการบิน และจะต้องวางแผนในการบินอีกครั้ง

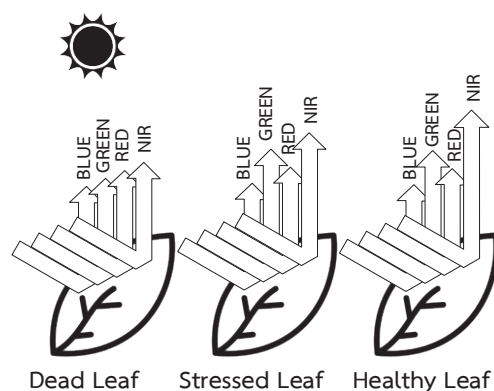
เพื่อไปพ่นยาซึ่งต้องใช้ระยะเวลานั้น อาจส่งผลเสียต่อพืชในแปลง ดังนั้นหากมีระบบอากาศยานไร้คนขับที่วิเคราะห์ค่าดัชนีพรรณพืชได้ในเวลาจริง รวมถึงสามารถฉีดพ่นยาได้ในเครื่องเดียวกัน จะทำให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการแพร่ของแมลงศัตรูพืชหรือโรคพืชได้ทันเวลาก่อนที่จะมีการลุกลามพื้นที่มากขึ้น อีกทั้งเป็นการลดระยะเวลาการทำงานและค่าใช้จ่ายในการบินลดลงจากวิธีการเดิม

อากาศยานไร้คนขับทางการเกษตรในปัจจุบันนั้นแบ่งเป็นสองชนิด คือ อากาศยานไร้คนขับสำหรับสำรวจเพื่อทำแผนที่การเกษตรแม่นยำ เป็นอากาศยานไร้คนขับที่ใช้เทคนิคการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) โดยจะทำการติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมสำหรับถ่ายภาพการสะท้อนของคลื่นแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ เช่น ย่านที่ตาสามารถมองเห็นเช่น สีแดง (Red) ที่มีความยาวของคลื่นแสงประมาณ 700 นาโนเมตร ย่านสีเขียว (Green) ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร ย่านสีน้ำเงิน (Blue) ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร รวมถึงช่วงความยาวคลื่นที่ตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นเช่น ย่านอินฟราเรดใกล้ ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร เป็นต้น โดยทั่วไปนั้นกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมจะติดตั้งในดาวเทียมสำรวจทรัพยากร เช่นดาวเทียม Landsat 7 เป็นต้น แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนากล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมที่มีขนาดเล็กสามารถนำไปติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับได้ ในการประมวลผลนั้นจะใช้ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมาทำการกระทำทางคณิตศาสตร์ เช่น ค่าดัชนีพรรณพืชที่ใช้สำหรับการติดตามการเจริญเติบโตของพืชเป็นการนำภาพถ่ายในย่านความยาวคลื่นสีแดงและย่านอินฟราเรดใกล้มาคำนวณตามสมการของ Rouse

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

และแสดงผลในรูปของความแตกต่างของสี ทำให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์หาตำแหน่งของพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ได้ง่าย เพื่อทำการให้ปุ๋ยหรือยาฆ่าแมลงในตำแหน่งดังกล่าวต่อไป

หลักการของค่าดัชนีพรรณพืช NDVI คือการใช้คุณสมบัติการสะท้อนของคลื่นแสงที่ไม่เท่ากันของคลื่นแสงย่านต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยพืชที่มีความสมบูรณ์จะดูดซับคลื่นแสงในย่านสีแดง เขียว และน้ำเงินได้ดี และจะสะท้อนคลื่นย่านอินฟราเรดใกล้ออกมามาก ในขณะที่พืชที่เป็นโรคจะสะท้อนคลื่นแสงในแต่ละย่านเท่าๆ กัน หรือใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงนำคุณสมบัตินี้ไปสร้างเป็นสมการและใช้วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของพืชได้

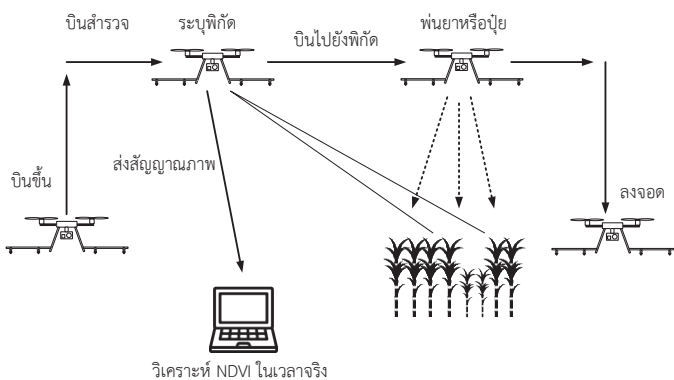


ภาพที่ 1 การสะท้อนของคลื่นแสงเมื่อตกกระทบพืช

#### 4.2 อากาศยานไร้คนขับประมวลผลภาพถ่ายในเวลาจริง

อากาศยานไร้คนขับสำหรับการเกษตรแม่นยำดังภาพที่ 2 มีโครงสร้างเป็นอากาศยานแบบหลายใบพัดติดตั้งมอเตอร์และใบพัดจำนวน 4 ใบ ติดตั้งกล้องมัลติสเปกตรัมที่สามารถถ่ายภาพแสงย่านความถี่สีแดง สีเขียว และอินฟราเรดใกล้ ดังแสดงในภาพที่ 3 บนโครงสร้างแบบกิมเบลที่สามารถบังคับทิศทางให้สามารถหมุนซ้ายขวา หรือขึ้นลงได้ และสามารถรักษาระยะทาง (Line of Sight) โดยมีระบบควบคุมการรักษาเสถียรภาพด้วยไจโรสโคป (Gyro-Stabilization) มีอุปกรณ์สำหรับ

รับส่งสัญญาณภาพที่สามารถถ่ายทอดสัญญาณภาพมายังสถานีภาคพื้นได้ในเวลาจริง โดยแสดงผลสัญญาณภาพออกทางจอภาพหรือคอมพิวเตอร์ได้ มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถประมวลผลภาพที่ได้ในขณะที่ทำการบิน โดยโปรแกรมสามารถคำนวณและแสดงผลค่าดัชนีพรรณพืช NDVI และค่าดัชนีพรรณพืชอื่นๆ ได้ในเวลาเดียวกันในขณะที่ทำการบิน ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับพ่นยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำ โดยประกอบด้วยถังเก็บน้ำยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำต่อท่อมายังปั๊มและหัวฉีดพ่นตามลำดับ สำหรับกรณีที่ตรวจพบว่าค่าดัชนีพรรณพืชแสดงตำแหน่งการเจริญเติบโตที่ไม่สมบูรณ์อันเนื่องมาจากมีศัตรูพืช หรือสภาพแวดล้อมอื่นๆ ทำให้สามารถสั่งการให้พ่นยาหรือปุ๋ยได้ทันทีในขณะที่ทำการบินในเที่ยวบินเดียวกัน ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการนำภาพถ่ายที่ได้มาวิเคราะห์และวางแผนทำการฉีดพ่นยาหรือปุ๋ยในเที่ยวบินอื่นในวันถัดไป



ภาพที่ 2 อากาศยานไร้คนขับประมวลผลภาพในเวลาจริง

กระบวนการของระบบอากาศยานไร้คนขับสำหรับการเกษตรแม่นยำในเวลาจริง มีการทำงานคือ เริ่มต้นทำการบิน ในขณะเดียวกันก็มีการส่งสัญญาณภาพมายังสถานีภาคพื้น โดยมีการคำนวณค่าดัชนีพรรณพืช เช่น ค่าดัชนี NDVI ในเวลาจริง โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภาคพื้น เมื่อผู้ใช้ตรวจพบพิกัดที่แสดงให้เห็นว่ามีการเจริญเติบโตของพืชไม่สมบูรณ์ก็จะทำการบังคับอากาศยานไร้คนขับไปยังตำแหน่งนั้นๆ และสั่งการให้หัวฉีดทำการพ่นยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำไปยังตำแหน่งของพืชดังกล่าว



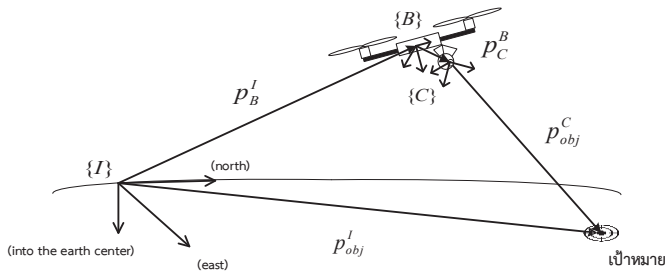
ภาพที่ 3 กล้องมัลติสเปกตรัม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัม

| รายการ                 | คุณลักษณะ                          |
|------------------------|------------------------------------|
| Image Resolution       | 12 MegaPixel                       |
| Image Format           | RAW+JPG, JPG                       |
| Sensor                 | Sony Exmor R IMX117                |
| Video Resolution       | 2160p24, 1440p30, 1080p60, 720p60  |
| Lens Optics            | 87° HFOV (19mm) f/2.8 Aperture     |
| Ground Sample Distance | 5.5 cm/px (2.17in/px) at 120 m AGL |
| Weight                 | 76g (With Battery),                |
| Dimensions             | 59 x 41.5 x 36mm                   |
| Power Draw             | 5.2V 0.4A                          |

#### 4.3 การระบุพิกัดจากกล้องติดตั้งบนอากาศยาน

ในการถ่ายภาพทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับนั้น การควบคุมการหมุนของกล้องที่ติดตั้งอยู่กับอากาศยานจำเป็นต้องศึกษาถึงระบบพิกัดอ้างอิงต่างๆ [11],[12],[13] เพื่อที่จะนำค่ามาใช้ในการคำนวณหาพิกัดของเป้าหมายได้ โดยเริ่มจากการเขียนแผนภาพของระบบพิกัดต่าง ๆ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ระบบพิกัดของการถ่ายภาพทางอากาศ

ภาพที่ 4 แสดงระบบพิกัดของอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องที่ชี้ไปยังเป้าหมาย กำหนดให้  $\{I\}$  เป็นพิกัดอ้างอิงเฉื่อย  $\{B\}$  เป็นระบบพิกัดฉากของโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้นเมทริกซ์การแปลงพิกัดโครงสร้าง อากาศยานไร้คนขับเทียบพิกัดอ้างอิงเฉื่อย  $\{I\}$  เท่ากับ  $T_B^I$  และ  $\{C\}$  เป็นระบบพิกัดฉากของกล้องและกิมเบล ที่ติดตั้งอยู่กับโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ โดยที่แกนของโครงสร้างกล้องและกิมเบลโดยมีเมทริกซ์การแปลงพิกัดคือ  $T_C^B$

กำหนดให้  $p_{obj}^C = [x_c \ y_c \ z_c]^T$  คือ ตำแหน่งของเป้าหมายเทียบกับระบบพิกัดฉาก  $\{C\}$  ดังนั้นตำแหน่งของเป้าหมายเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิงเฉื่อย  $\{I\}$  คำนวณได้จากสมการ

$$p_{obj}^I = T_B^I T_C^B p_{obj}^C \quad (2)$$

เมื่อตำแหน่งของโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับคือ

$$p_B^I = [x_B \ y_B \ z_B]^T \quad (3)$$

และแกนของพิกัดโครงสร้างอากาศยาน  $\{B\}$  หมุนเป็นมุมเทียบพิกัดอ้างอิงเฉื่อย  $\{I\}$  จากอ้างอิง [11] ดังนั้นเมทริกซ์การแปลงคำนวณได้จากสมการ

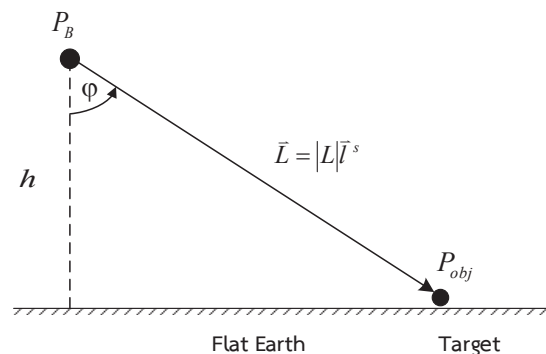
$$T_B^I = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta & x_B \\ s_\theta c_\psi - c_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi + c_\theta c_\psi & s_\theta c_\theta & y_B \\ c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\phi c_\theta & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่  $c_x = \cos x$  และ  $s_x = \sin x$

การคำนวณสมการเมทริกซ์การแปลงพิกัดของกล้องและกิมเบล  $\{C\}$  เกิดจากการหมุนของกิมเบลเป็นมุมกวาด (Azimuth) มีค่าเท่ากับ  $\alpha$  และมุมก้มเงย (Pitch) เท่ากับ  $\beta$  เทียบกับโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ  $\{B\}$  โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของกล้องและจุดศูนย์กลางมวลของอากาศยานมีขนาดเล็กมาก จึงเสมือนเป็นจุดเดียวกันได้ ดังนั้นดังนั้นเมทริกซ์การแปลงจึงมีค่าเท่ากับ

$$T_C^B = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & -s_\beta & -c_\alpha s_\beta & 0 \\ c_\beta s_\alpha & c_\alpha & -s_\alpha s_\beta & 0 \\ s_\beta & 0 & c_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากการคำนวณตำแหน่งพิกัดของวัตถุด้วยภาพใน 3 มิติหากมีการลดรูป [12] โดยทำการบินในแนวระดับและให้กล้องหมุนไปในทิศทางเดียวกับอากาศยานทำให้ระบบพิกัด  $\{B\}$  และระบบพิกัด  $\{C\}$  มีจุดกำเนิดเดียวกันและทิศทางเดียวกัน ยกเว้นปรับมุมกล้องในทิศก้มลงมายังวัตถุซึ่งทำให้แนวเล็ง (Line of Sight, LOS) และให้ตำแหน่งของวัตถุอยู่กึ่งกลางภาพ โดยสมมติให้เป็นแนวระนาบ Flat Earth จะทำให้สามารถลดรูปลงเหลือ 2 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การประมาณระยะทางด้วยสมมติฐาน Flat Earth



จากภาพที่ 5 เมื่อทราบค่าความสูง  $h$  ในขณะทำการบินและมุมก้ม  $\varphi = 90 - \beta$  ของโครงสร้างกิมเบลและกล้องที่ทำให้ตำแหน่งของวัตถุอยู่กึ่งกลางภาพ สามารถคำนวณขนาดของระยะห่างจากอากาศยานถึงเป้าหมายได้จากสมการ

$$|L| = \frac{h}{\cos \varphi} \quad (6)$$

ตำแหน่งของวัตถุเทียบกับระบบอ้างอิงเฉื่อย  $\{I\}$  จะเท่ากับ

$$p_{obj}^I = p_B^I + R_B^I \tilde{L} \quad (7)$$

เมื่อ

$p_{obj}^I$  คือ พิกัดตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการระบุเทียบกับกรอบอ้างอิงความเฉื่อย  $\{I\}$

$p_B^I$  คือ พิกัดตำแหน่งอากาศยานไร้คนขับเทียบกับกรอบอ้างอิงความเฉื่อย  $\{I\}$

$h$  คือ ความสูงของอากาศยานไร้คนขับ

$\varphi$  คือ มุมระหว่างแนวเล็งของกล้องกับแนวดิ่ง

## 5. ผลการศึกษา

### 5.1 การบินถ่ายภาพด้วยกล้องมัลติสเปกตรัม

การบินทดสอบระบบอากาศยานไร้คนขับใช้พื้นที่ด้านหลังของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งมีพื้นที่สำหรับปลูกสวนมะนาวเนื้อที่ประมาณ 2 ไร่ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 พื้นที่บริเวณทำการบินทดสอบ

ระบบของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการบินทดสอบนั้นเป็นการพัฒนาในช่วงเริ่มต้นเป็นการทดสอบระบบประมวลผลภาพและการระบุพิกัดจากภาพ NDVI ที่คำนวณในเวลาจริง โดยยังไม่ได้มีการติดตั้งระบบฉีดยาน้ำกับโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับ จากภาพที่ 7 แสดงถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย โครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมวางแผนการบิน Ardupilot และบันทึกผลการบิน และคอมพิวเตอร์ที่รับสัญญาณภาพและโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาโปรแกรมด้วย MS Visual Studio 2015 ร่วมกับชุดคำสั่ง OpenCV 3.4.2 ในการคำนวณค่าดัชนีพรรณพืช NDVI และระบุพิกัดตำแหน่งพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ แล้วจึงนำพิกัดดังกล่าวมาใส่ลงในโปรแกรมควบคุมการบิน เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ได้ทำการระบุพิกัด เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการบินต่อไป



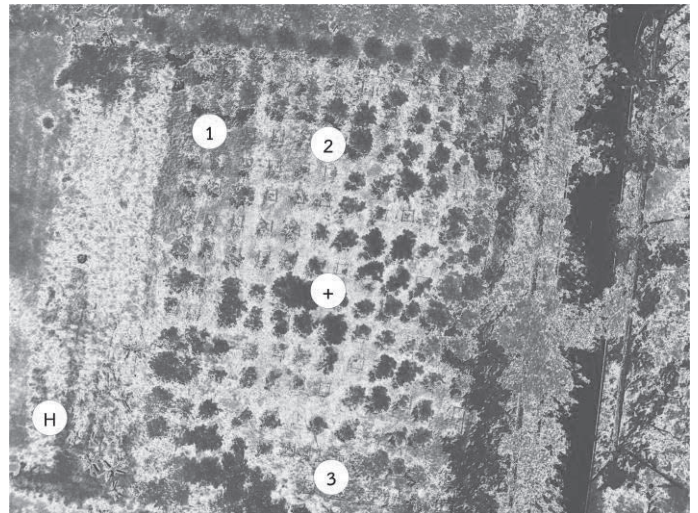
ภาพที่ 7 อุปกรณ์สำหรับการบินทดสอบ

การทำการบินทดสอบนั้นเริ่มจากนำอากาศยานไร้คนขับบินไปยังตำแหน่งที่กำหนดในที่นี้ได้กำหนดตำแหน่งกึ่งกลางแปลงของสวนมะนาวที่ความสูง 100 เมตรและทำการวิเคราะห์ประมวลผลภาพดัชนี NDVI จากสัญญาณภาพที่ส่งมาจากอากาศยานไร้คนขับโดยคอมพิวเตอร์ภาคพื้น ผลการคำนวณค่า NDVI อยู่ในช่วง  $-0.06 - 0.58$  ซึ่งกำหนดให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงผลเป็นระดับสี 5 ระดับเพื่อเป็นการบอกลักษณะของพื้นที่ในแปลงรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การแสดงผลดัชนี NDVI เป็นสี 5 ระดับบอกลักษณะภายในสวนมะนาว

| ค่าดัชนี NDVI    | สี        | ลักษณะพื้นที่       |
|------------------|-----------|---------------------|
| $-0.060 - 0.068$ | แดง       | ถนนคอนกรีต          |
| $0.069 - 0.197$  | ส้ม       | พื้นดิน             |
| $0.198 - 0.326$  | เหลือง    | พื้นดินมีหญ้าปกคลุม |
| $0.327 - 0.455$  | เขียวอ่อน | ต้นมะนาวไม่สมบูรณ์  |
| $0.456 - 0.580$  | เขียวเข้ม | ต้นมะนาวสมบูรณ์     |

จากภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าดัชนี NDVI ซึ่งแสดงด้วยระดับสีดังแสดงในภาพที่ 8 และเลือกพิจารณาตำแหน่งพิกัดของต้นมะนาวที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ ซึ่งจากเกณฑ์ที่กำหนดจากค่าดัชนี NDVI  $< 0.455$  แสดงตำแหน่งของต้นมะนาวที่ไม่สมบูรณ์ทั้งหมด 60 ต้น จากต้นมะนาวทั้งหมด 180 ต้น คิดเป็นต้นมะนาวที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์เป็นร้อยละ 33.33 และในการทดลองนี้ได้รับกลุ่มของตำแหน่งต้นมะนาวที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์เป็นพิกัดจำนวน 3 ตำแหน่ง โดยผู้ใช้ได้เลือกระบุพิกัดจากโปรแกรมประมวลผล เพื่อนำไปกำหนดเส้นทางบินของอากาศยานไร้คนขับในการที่จะบินไปตามเส้นทางการบินและทำการพ่นยาหรือให้ปุ๋ยได้ต่อไป ในการทดสอบเบื้องต้นนี้ได้ทำการระบุพิกัดเพียง 3 ตำแหน่งดังตารางที่ 3



ภาพที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่า NDVI

ตารางที่ 3 ตำแหน่งเส้นทางสำหรับอากาศยานไร้คนขับทำการบิน

| รายการ          | ละติจูด    | ลองจิจูด    | ความสูง (ม) |
|-----------------|------------|-------------|-------------|
| จุดเริ่มต้น (+) | 13.916876° | 100.629881° | 100         |
| ตำแหน่ง 1       | 13.916794° | 100.630259° | 6           |
| ตำแหน่ง 2       | 13.916700° | 100.630208° | 6           |
| ตำแหน่ง 3       | 13.917001° | 100.629532° | 6           |
| จุดลงจอด (H)    | 13.917322° | 100.629679° | 0           |

อย่างไรก็ตามการระบุพิกัดตำแหน่งของกลุ่มต้นมะนาวที่ไม่สมบูรณ์นั้นอาจจะมากกว่า 3 ตำแหน่งก็ได้ เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวเป็นเส้นทางการบินพ่นยาหรือให้ปุ๋ยของอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานที่ต้องการให้อากาศยานไร้คนขับฉีดพ่นได้ครอบคลุมพื้นที่อย่างน้อยเท่าใด แต่หากมีการระบุพิกัดหลายจุดจะทำให้สิ้นเปลืองปริมาณน้ำยาหรือปุ๋ยมากเกินไปจนความจำเป็น ดังนั้นการระบุตำแหน่งเส้นทางการบินสำหรับฉีดพ่นจึงขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ใช้งานเป็นหลัก

## 5.2 การกำหนดเส้นทางบิน

เมื่อได้ตำแหน่งที่ต้องการทั้ง 3 จุดแล้ว ก็จะมีการวางแผนการบินจากตำแหน่งดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ หรือสามารถ

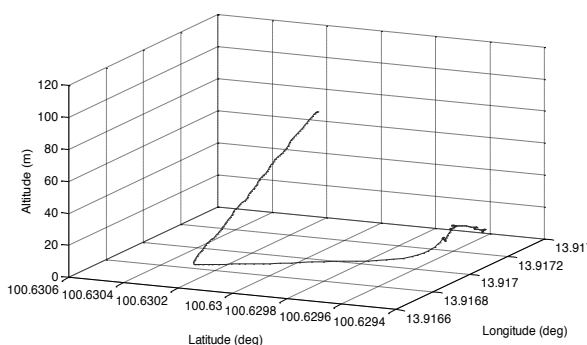


ควบคุมการเคลื่อนที่โดยระบบการเห็นภาพ [13] ได้เช่นเดียวกัน แต่การทดลองเบื้องต้นในการทดลองนี้ใช้โปรแกรม ArduPilot ดังแสดงในภาพที่ 9 และทำการสั่งการให้บินไปยังตำแหน่งต่างๆ โดยการบินแบบอัตโนมัติ โปรแกรม ArduPilot นี้จะทำการบันทึกข้อมูลการบินต่างๆ ซึ่งจะนำมาใช้วิเคราะห์ผลการบินได้ต่อไป



ภาพที่ 9 โปรแกรมวางแผนการบิน

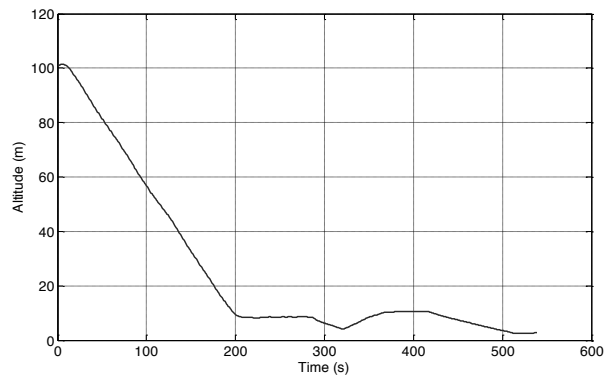
การวิเคราะห์ผลการบินนั้นในเบื้องต้นจะทำการหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการบินว่าผิดพลาดไปจากจุดที่กำหนดอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์จากภาพที่ 10-12 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 10 ผลการบินตามเส้นทางทดสอบ

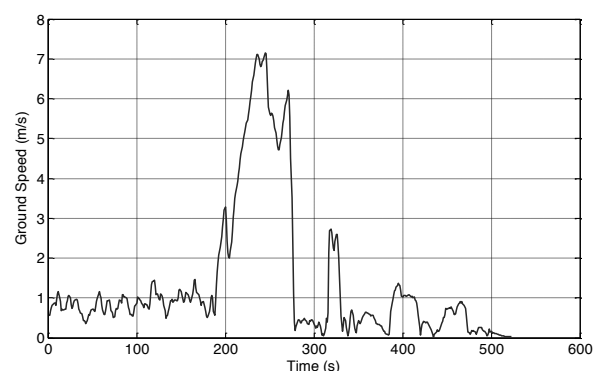
จากภาพที่ 10 แสดงตำแหน่งพิกัดของอากาศยานไร้คนขับเริ่มเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นที่ความสูง 100 เมตร ลดระดับลงมายังตำแหน่งที่ 1 และเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ตามลำดับ จากผลการบินสามารถ

คำนวณค่าความผิดพลาดของตำแหน่งต่าง ๆ ในตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0 เมตร ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความผิดพลาดเป็นระยะ 1 เมตร และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเท่ากับ 6 เมตร



ภาพที่ 11 ค่าความสูงในขณะทำการบินทดสอบ

ภาพที่ 11 แสดงค่าความสูงของอากาศยานไร้คนขับโดยที่ตำแหน่งเริ่มต้นนั้นมีความสูงเท่ากับ 100 เมตร เมื่ออากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด จะทำการลดระดับความสูงลงมายังความสูงที่ต้องการเท่ากับ 6 เมตร จากการทดสอบการบินมีค่าความผิดพลาดของความสูงอยู่ในช่วง  $\pm 2$  เมตร โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับในช่วงลดระดับความสูงลงมานั้นมีค่าเท่ากับ 0.75 เมตรต่อวินาที และในช่วงที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ นั้นได้กำหนดในโปรแกรมควบคุมการบินเท่ากับ 6 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่ามีค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง  $\pm 1$  เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 12 ความเร็วในการบินทดสอบ

## 6. สรุปและอภิปรายผล

อากาศยานไร้คนขับสำหรับการทำการเกษตรแบบแม่นยำที่ต้องติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมนั้นเป็นการวิเคราะห์ผลโดยการประมวลผลภาพโดยใช้ดัชนีพรรณพืช NDVI แล้วจึงนำมาให้เกษตรกรหรือผู้ใช้งานได้นำมาวางแผนบริหารจัดการแปลง ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการประมวลผล งานวิจัยนี้ได้สร้างอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องและประดิษฐ์โปรแกรมการประมวลผลหาค่าดัชนีพรรณพืช NDVI ในเวลาจริง เพื่อต้องการลดเวลาและขั้นตอนในส่วนที่ต้องมาการนำไปวิเคราะห์ โดยนำสัญญาณภาพที่ถ่ายทอดจากอากาศยานไร้คนขับลงมายังภาคพื้นและประมวลผลภาพในขณะที่อากาศยานยังคงบินทำการกิจอยู่ เมื่อพบเห็นตำแหน่งของพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ คำนวณหาจุดพิกัดของตำแหน่งนั้น แล้วนำมาใส่ค่าตำแหน่งในโปรแกรมวางแผนการบิน และทำการบินไปยังตำแหน่งนั้น เพื่อทำการฉีดพ่นปุ๋ยชนิดน้ำต่อไปจากการบินทดสอบบริเวณสนามมะนาวเนื้อที่ประมาณ 2 ไร่ พบว่ามีตำแหน่งที่จะต้องพิจารณา 3 ตำแหน่งซึ่งได้ทำการระบุพิกัดโดยโปรแกรมประมวลผลดัชนีพรรณพืช NDVI ในเวลาจริง หลังจากทำการบ่อนพิกัดตำแหน่งและให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งทั้ง 3 แล้วลงจอดพบว่าอากาศยานไร้คนขับสามารถบินไปยังจุดที่กำหนดด้วยความเร็ว 6 เมตรต่อวินาที มีค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง  $\pm 1$  เมตรต่อวินาที ค่าความผิดพลาดในการบินไปยังตำแหน่งที่กำหนดอยู่ระหว่าง 0 – 6 เมตร ค่าความสูงของอากาศยานมีค่าผิดพลาดระหว่างทำการบิน 0 - 2 เมตร จากการบินทดสอบเห็นได้ว่ายังมีค่าผิดพลาดในการบินอยู่บ้างซึ่งสามารถลดค่าผิดพลาดลงได้โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มเติม และเมื่อสามารถค่าผิดพลาดลดลง จะเป็นการติดตั้งระบบฉีดพ่นให้กับอากาศยานไร้คนขับและทดสอบการบินต่อไป

จากกรณีศึกษาการวิเคราะห์ดัชนี NDVI ของสวนมะนาวจากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าผู้วิจัยได้กำหนดระดับ

ของค่าดัชนี NDVI เป็นระดับและแสดงผลเป็นสี 5 สี โดยได้กำหนดว่าต้นมะนาวที่เจริญไม่สมบูรณ์นั้นคือตำแหน่งที่มีค่าดัชนี NDVI  $< 0.455$  เนื่องจากต้นมะนาวนั้นมีลักษณะเป็นพุ่มและมีใบค่อนข้างหนา จึงได้กำหนดค่าดัชนี NDVI ของต้นที่สมบูรณ์นั้นมีค่ามากกว่า 0.445 หากมีการนำไปใช้กับพืชชนิดอื่น จะต้องมีการปรับค่าดัชนี NDVI ให้สอดคล้องกับลักษณะของพืชที่จะไปวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามค่าดัชนี NDVI โดยทั่วไปที่เหมาะสมนั้นผู้วิจัยเสนอแนะว่าควรเลือกใช้ค่าดัชนี NDVI เริ่มตั้งแต่ 0.2 – 0.3 เป็นต้นไปถือว่าเป็นพืชมีการเจริญเติบโตปกติซึ่งอาจแทนด้วยสีเขียวอ่อน เพื่อให้บ่งชี้ว่ามีพืชใบเขียวอยู่ในบริเวณนั้น และทำการไล่ระดับสีเป็นสีเขียวเข้มเพื่อแสดงถึงความสมบูรณ์ ในทางตรงข้ามค่า NDVI = 0 ควรแสดงด้วยสีเหลืองและสีจะเข้มจนเป็นสีแดงเมื่อค่า NDVI = -1 เป็นต้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ ดร. ประสาทพร วงษ์คำข้าง เป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนชุดทดสอบการบินและกล้องมัลติสเปกตรัม และการให้ข้อมูลต่างๆ ซึ่งมีส่วนสำคัญทำให้บทความฉบับนี้สมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## 8. บรรณานุกรม

- (1) S. Nebiker, A. Annen, M. Scherrer, D. Oesch, 2008. A Light-Weight Multispectral Sensor for Micro UAV-Opportunities for very High Resolution Airborne Remote Sensing, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37, p. 1193-2000.
- (2) D.B. Martin et al., 2010. UAV-based environmental monitoring using multi-spectral imaging, Proc. SPIE 7668, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications, Vol. 7, p. 766811.
- (3) Y. A. Pederi and H. S. Chopniuk, 2015, "Unmanned aerial vehicles and new technological methods of monitoring and crop protection in precision agriculture," in 2015 IEEE International Conference Actual Problems

- of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), p. 298–301.
- (4) Yifan Pan, Xianfeng Zhang, Guido Cervone, Liping Yang., 2018. Detection of Asphalt Pavement Potholes and Cracks Based on the Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 11(10), p. 3701-12.
- (5) Tuan Vo-Dinh<sup>1</sup>, Brian Cullum, Paul Kasili., 2003. Development of a multi-spectral imaging system for medical applications, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36(14).
- (6) R.L. Pearson, Miller L.D., 1972, Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, *Proceedings of the eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, p. 1357–1381.
- (7) J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, p. 309-317.
- (8) J. A. J. Berni, P. J. Zarco-Tejada, L. Suarez, E. Fereres, 2009. Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47(3), p. 722-738.
- (9) Beard & McLain, 2012. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*, Princeton University Press, New Jersey
- (10) D. Blake Barber, D" Joshua Redding, Timothy W.McLain, Randal W.Beard and Clark N.Taylor., 2006. Vision-based target geo-location using a fixed-wing miniature air vehicle, *Journal of intelligent and robotic systems*, Vol. 47(4), p. 361-382.
- (11) Vladimir N.Dobrokhodov, Isaac I.Kaminer, Kevin D.Jones., 2008. Vision-Based Tracking and Motion Estimation for Moving Targets Using Small UAVs, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, Vol. 31(4), p. 907-917.
- (12) M. Jeerasak, 2017. Vision-based target geo-location using a multirotor vehicle, *The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Vol. 107, p. 238-243.
- (13) จีรศักดิ์ หมวดโพธิ์กลาง, 2559. การควบคุมตำแหน่งอากาศยาน 4 ใบพัดโดยใช้ระบบการเห็นภาพ. *วารสารนายเรืออากาศวิชาการ*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 12 หน้า 17-21.

## การประยุกต์ใช้แบบจำลองพัสดุคงคลังประเภทพัสดุใช้ สิ้นเปลือง สูญสิ้นไปหรือมีราคาต่ำ (ส.ส.ต.) Applying Inventory Model for Consumable Products

นาวาโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนินทร์รัฐ สิทธิเวชธนาศิริ  
Wing Commander Assistant Professor Thaninrat Sittiwatethanasiri

อาจารย์กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทราชูติวิทยาธราช สายไหม กรุงเทพฯ 10220  
Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force, Donmuang, Bangkok, 10220, Thailand  
Corresponding Author: amarit@rtaf.mi.th

(Received: October 12, 2018, Revised: May 16, 2019, Accepted: May 22, 2019)

**บทคัดย่อ :** พสดุใช้สิ้นเปลือง สูญสิ้นไปหรือมีราคาต่ำ (ส.ส.ต.) เป็นพัสดุที่มีข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งาน การควบคุมพัสดุประเภทนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมเป็นอย่างดีมีการใช้ห้องเย็นโดยการควบคุมอุณหภูมิเพื่อไม่ให้พัสดุดังกล่าวเสื่อมสภาพก่อนเวลาที่กำหนดและใช้งานได้ตามข้อกำหนด จุดมุ่งหมายของการศึกษาเรื่องนี้คือ การบริหารและควบคุมพัสดุ ส.ส.ต.โดยอาศัยกระบวนการใน การสั่งซื้อที่ประหยัดกรณีพัสดุมียอายุการใช้งานเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุดซึ่งสามารถช่วยให้ประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อได้เป็นอย่างมาก เริ่มต้นจากการแบ่งประเภทพัสดุโดยใช้ทฤษฎีการจัดแบ่งแบบ ABC เข้ามาช่วยดำเนินการเนื่องจากพัสดุแต่ละประเภทมีจำนวนมาก โดยการควบคุมทั้งหมดทำได้ยากเกินความจำเป็นต้องเลือกเฉพาะพัสดุที่มีมูลค่าการใช้ต่อปีสูงเท่านั้นจากนั้นใช้ทฤษฎีการพยากรณ์เพื่อพยากรณ์ความต้องการของหน่วยผู้ให้เพื่อให้ทราบแนวโน้มความต้องการและนำมาคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดกรณีพัสดุมียอายุการใช้งาน ผลจากการศึกษาพบว่าทฤษฎีการบริหารสินค้าคงคลังเข้าไปประยุกต์ใช้ทำให้สามารถทราบปริมาณการสั่งซื้อที่แน่นอนประหยัดและเพียงพอกับความต้องการของหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งยังทันกับอายุการใช้งานของพัสดุที่มีข้อจำกัดอยู่ซึ่งเอื้ออำนวยประโยชน์ต่อการบริหารงบประมาณที่ได้รับอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด

**คำสำคัญ :** พสดุใช้สิ้นเปลือง สูญสิ้นไปหรือมีราคาต่ำ (ส.ส.ต.) พสดุคงคลัง ปริมาณการสั่งซื้อประหยัด การพยากรณ์

**Abstract :** Consumable products have short shelf life. Management of such products requires a controlled temperature storage in order to prevent premature deterioration. The purpose of this study therefore is to manage and control consumable products through purchasing process that takes the product shelf life into consideration in order to find the optimal quantity. The process begins with product categorization according to ABC theory. Since the control of all products is cumbersome and unnecessary, the theory is applied only to the products with high annual consumption rate. The forecasting theory is then applied in order to identify trends in the product requirement and estimate for the optimal quantity. The result of the study finds that applying inventory theories to the problem enables us to estimate for optimal quantity of purchase which is adequate to the requirement. Finally, the management of consumable products enables a more effective budget management.

**Keywords :** Consumable Product, Inventory Model, Forecasting, ABC Theory

## 1. บทนำ

ภารกิจการถ่ายภาพทางอากาศถือเป็นภารกิจสนับสนุนทางอากาศที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการจัดทำเป้าหมายการรบเพื่อดำรงขีดความสามารถในการรบทางอากาศโดยอุปกรณ์ที่เป็นเครื่องมือพื้นฐานประกอบด้วย ฟิล์ม กระดาษอัดรูป หรือน้ำยาล้างรูป ซึ่งนับว่าเป็นพัสดุที่มีความสำคัญโดยกรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศได้รับมอบหมายให้เป็นผู้รับผิดชอบดูแล ควบคุม และเก็บรักษา ใช้ชื่อเรียกพัสดุเหล่านี้ว่าพัสดุ “ใช้สิ้นเปลือง สูญสิ้นไปหรือมีราคาต่ำ” หรืออักษรย่อ “ส.ส.ต.” เนื่องจากพัสดุเหล่านี้มีข้อจำกัดหลายประการ อาทิ อายุการใช้งาน ประเภทการใช้งาน ภาชนะบรรจุและอุณหภูมิในการเก็บรักษาซึ่งล้วนแล้วแต่มีผลต่ออายุการใช้งานทั้งสิ้น มีความจำเป็นต้องจัดเก็บรักษาดูแลอย่างเหมาะสม โดยแยกพัสดุเหล่านี้เก็บภายในห้องเฉพาะที่ควบคุมอุณหภูมิ และมีการพยากรณ์ ความต้องการใช้งานตามวงจรและวาระก่อนการสั่งซื้อสินค้าแต่ยังไม่สามารถควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ ผลที่ตามมาคือต้องเสียงบประมาณที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น และมีความยุ่งยากในระบบการเบิกจ่ายพัสดุ การวิจัยนี้เป็นการพัฒนา

ระบบพัสดุดังกล่าวประเภทพัสดุ ส.ส.ต.โดยนำหลักการควบคุมพัสดุดังกล่าวมาพัฒนาและแก้ไขปัญหา การเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและเบิกจ่ายพัสดุ ส.ส.ต.เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อพัสดุดังกล่าวที่มีข้อจำกัดด้านอายุการใช้งานและต้นทุนการเก็บรักษาที่ค่อนข้างสูง

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อนำทฤษฎีของคงคลังมาประยุกต์ และพัฒนาแก้ไขปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและการจัดสรรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและควบคุมพัสดุ ส.ส.ต.

## 3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบสินค้าคงคลัง สินค้าคงคลังหรือสินค้าคงเหลือ คือ วัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ที่หน่วยงาน องค์กร บริษัท หรือโรงงานเก็บไว้เพื่อนำมาผลิต (กรณีที่ เป็นวัตถุดิบ) หรือเพื่อจำหน่ายให้กับลูกค้า ธุรกิจแทบทุกประเภทจะต้องเกี่ยวข้องกับปัญหาสินค้าคงคลัง ถ้าความต้องการซื้อของลูกค้ามากกว่าจำนวนสินค้าคงคลังที่มีอยู่จะทำให้บริษัทขาดกำไรที่ควรจะได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันซึ่งมีตลาดแข่งขันเสรี ผลิตภัณฑ์ที่ให้ประโยชน์

เหมือนกันหรืออาจเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันแต่ผลิตโดยบริษัทต่าง ๆ กันมีจำนวนมาก ดังนั้นถ้าบริษัทใด มีสินค้าคงคลังไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าแล้วจะมีผลทำให้ลูกค้าต้องไปซื้อจากบริษัทคู่แข่งซึ่งจะทำให้เกิดผลเสียหายระยะยาวแก่บริษัทนั้นคือ ความเชื่อถือของลูกค้าที่มีต่อบริษัทจะลดลงและลูกค้าจะไม่กลับมาซื้อสินค้าของบริษัทอีกเลย ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณสินค้าคงคลังมีมากทางบริษัทจะต้องใช้เงินเป็นจำนวนมากในการซื้อวัตถุดิบเพื่อผลิตสินค้า นอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายด้านการเก็บรักษาสินค้า ค่าประกันภัย ค่าเช่าโกดัง ฯลฯ และยังถ้าความต้องการซื้อน้อยกว่าปริมาณสินค้าคงคลังยิ่งทำให้เสียโอกาสในการนำเงินทุนดังกล่าวไปลงทุนด้านอื่นๆ หรือฝากธนาคาร ดังนั้นจึงมีการศึกษาปัญหาสินค้าคงคลังเพื่อไม่ให้มีปริมาณสินค้าคงคลังมากหรือน้อยจนเกินไป นั่นคือผู้บริหารของบริษัทจะต้องตัดสินใจว่าควรจะซื้อหรือผลิตสินค้าครั้งละกี่หน่วย และเมื่อใดควรจะสั่งซื้อเพื่อทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยลงและช่วยให้มีสินค้าสนองความต้องการของลูกค้าตลอดเวลา นอกจากนั้นการมีสินค้าคงคลังจะช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ ลดต้นทุนสินค้าต่อหน่วย การสั่งซื้อสินค้าหรือวัตถุดิบเป็นปริมาณมากจะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยต่ำและยังประหยัดค่าขนส่งอีกด้วย ช่วยให้ มีสินค้าสนองความต้องการของลูกค้าตลอดเวลา สำหรับการผลิตสินค้าบางชนิดไม่สามารถจัดหาวัตถุดิบได้ตลอดปี ดังนั้นในฤดูกาลที่มีวัตถุดิบก็จะทำการผลิตเต็มที่และเก็บสินค้าไว้ขายตลอดปีช่วยรักษาระดับการผลิต ในกรณีที่ไม่สามารถจัดหาวัตถุดิบได้ตลอดเวลาก็คงจะเก็บวัตถุดิบไว้เป็นจำนวนมากในช่วงที่สามารถจัดหาได้ซึ่งจะทำให้มีการผลิตตลอดปีทำให้สามารถวางแผนการผลิตและการจัดจำหน่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้ามีสินค้าหรือวัตถุดิบมากเท่าใดก็จะ ทำให้การวางแผนทั้งด้านการผลิตทำได้ง่ายขึ้น สำหรับข้อเสียของการมีสินค้าคงคลังคือ การที่มีปริมาณสินค้าคงคลังมากทำให้เสียค่าใช้จ่ายมาก ทั้งด้านต้นทุนสินค้าหรือวัตถุดิบ ค่า

เก็บรักษา เปียประกัน ค่าเช่าโกดัง ค่าเสื่อมราคาสินค้า และค่าเสียหายของสินค้า ดังนั้นปัญหาของสินค้าคงคลังคือ ปริมาณที่สั่งซื้อแต่ละครั้งและจะสั่งซื้อเมื่อใดโดยมีเป้าหมายให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด

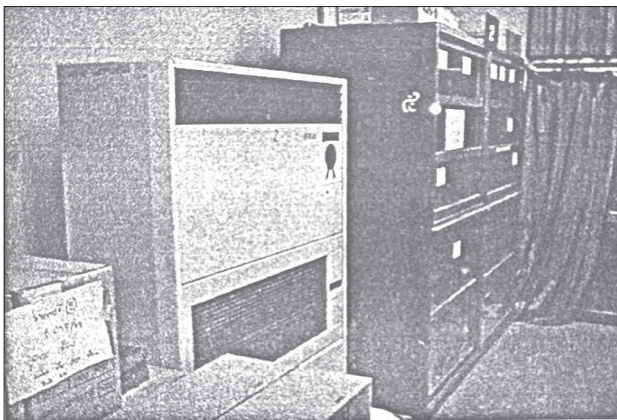
การหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด หมายถึง การคำนวณหาปริมาณสินค้าที่อาจจะสั่งผลิตแต่ละครั้งหรือการสั่งซื้อวัตถุดิบจากภายนอกบริษัท ถ้าสั่งซื้อแต่ละครั้งเป็นปริมาณมากค่าเก็บรักษาสินค้าคงคลังก็จะมากแต่ต้นทุนในการออกไปสั่งซื้อจะน้อย ในทางตรงกันข้ามหากสั่งสินค้าเป็นจำนวนน้อยต้นทุนรวมในการสั่งซื้อต่อปีสูงแต่ค่าเก็บรักษาสินค้า คงคลังต่ำ ดังนั้นการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด มีเป้าหมายเพื่อให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับสินค้าคงคลังต่ำที่สุด สินค้าบางชนิดเป็นสินค้าเสียง่าย เช่น อาหารสด (พืช ผัก ผลไม้ เนื้อสด) หรือเป็นสินค้าที่มีอายุ เช่น ยา สารเคมี ผู้สั่งซื้อจะต้องระมัดระวังไม่ให้สั่งซื้อมากจนเกินไปเพราะถ้ามีสินค้าเหลือจะเสียหรือใช้การไม่ได้ นอกจากนั้นสินค้าบางชนิดเป็นสินค้าที่ล้าสมัยง่าย เช่น เสื้อผ้า อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ฯลฯ ถ้าสั่งซื้อมาแล้วขายไม่หมดของที่เหลือจะต้องขายไปในราคาต่ำ เนื่องจากความนิยมเปลี่ยนไปหรือมีสินค้าที่ทันสมัยมาแทนที่ ส่วนสมมติฐานด้านอื่น ๆ ยังคงเดิม คือ ทราบความต้องการซื้อ ความต้องการซื้อคงที่และได้รับสินค้าทันที

การจัดการพัสดุคงคลังแบบ ABC ในการจัดสินค้าคงคลัง ถ้าสินค้าใดมีมูลค่าสูงในการคงคลังซึ่งวัดเป็นจำนวนเงินที่ใช้ไปจะต้องมีการจัดการหรือมีการควบคุมอย่างใกล้ชิดโดยปกติแล้วสินค้าจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ชั้น (class) คือ A, B, C โดยชั้น A จะมีจำนวนสินค้าอยู่ประมาณ 20% ที่มีมูลค่าสูงสุดประมาณ 80% ของเงินที่ใช้ทั้งหมดซึ่งจะแสดงถึงนัยสำคัญ ส่วนชั้น C จะมีสินค้าอยู่ประมาณ 50% ที่มีมูลค่า 5% ของเงินที่ใช้ทั้งหมดโดยสินค้าเหล่านี้จะมีส่วนให้ต่อมูลค่าคงคลังน้อยมากสำหรับชั้น B จะมีสินค้าอยู่ประมาณ 30% ที่มีมูลค่า 15% ของเงินที่ใช้ทั้งหมดหรือใช้หลักการ 80-20 พิจารณา

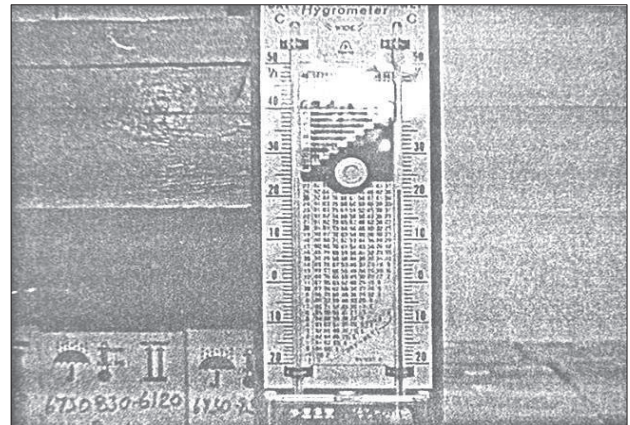


#### 4. วิธีดำเนินการศึกษา

การจัดกลุ่มพัสดุตามลำดับความสำคัญ เนื่องจากข้อมูลของพัสดุ ส.ส.ต.ที่เก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิทั้งหมดมี การเรียงลำดับมาตามตัวเลขของรหัสพัสดุ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้สะดวกจึงได้แยกพัสดุดอกเป็นกลุ่มตามลักษณะทางกายภาพของพัสดุเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของน้ำยา กลุ่มของฟิล์ม กลุ่มของกระดาษพิมพ์รูป กลุ่มของแถบบันทึกภาพ และกลุ่มของหมึกพิมพ์ ส่วนพัสดุที่เหลือเป็นพัสดุที่ไม่มีเงื่อนไขด้านอายุการใช้งานและข้อจำกัดด้านอุณหภูมิจึงไม่นำมาคำนวณหรือวิเคราะห์ในประเด็นนี้ จากนั้นนำพัสดุแต่ละกลุ่มมาจัดลำดับความสำคัญตามทฤษฎีซึ่งอาศัยเกณฑ์ ABC ดังนี้ พักสุประเภท A จะมีมูลค่าความต้องการใช้งานต่อปีงบประมาณ 85% ของมูลค่าพัสดุทั้งหมดในคลัง พักสุประเภท B จะมีมูลค่าความต้องการใช้งานต่อปีงบประมาณ 10% ของมูลค่าพัสดุทั้งหมดในคลัง พักสุประเภท C จะมีมูลค่าความต้องการใช้งานต่อปีงบประมาณ 5% ของมูลค่าพัสดุทั้งหมดในคลัง โดยลักษณะของห้องควบคุมอุณหภูมิและการควบคุมอุณหภูมิ แสดงดังภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 1 คลังพัสดุ ส.ส.ต.ที่มีการควบคุมอุณหภูมิเฉพาะ



ภาพที่ 2 การควบคุมอุณหภูมิภายในคลังพัสดุ ส.ส.ต.

การรวบรวมข้อมูลความต้องการ จากข้อมูลที่รวบรวม มาทั้งหมดหลังจากทำการแบ่งประเภทของพัสดุเรียบร้อยแล้ว เราจะเลือกพัสดุประเภท A และประเภท B มาทำการหา ค่าความต้องการการใช้พัสดุโดยอาศัยทฤษฎีการพยากรณ์ แบบปรับเรียบเอ็กโปเนนเชียล โดยมีสูตรการคำนวณ  $S_{t+1} = S_t + \alpha(X_t - S_t)$  โดยที่  $S_{t+1}$  = ค่าพยากรณ์ในช่วงถัดไป,  $S_t$  = ค่าพยากรณ์ในช่วงที่ผ่านมา,  $\alpha$  = ค่าคงที่ในการปรับเรียบ, และ  $X_t$  = ความต้องการจริงในปัจจุบัน สำหรับการใช้วิธีนี้เนื่องจากมีข้อมูลในอดีตและทำให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์แนวโน้มความต้องการในอนาคตที่เป็นไปได้ซึ่งจะช่วยให้สามารถวางแผนการควบคุมพัสดุดังคลังได้อย่างถูกต้อง

การรวบรวมค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของพัสดุดังคลัง เพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายในการคงคลังที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดต้องอาศัยข้อมูลทางด้านต้นทุนการสั่งซื้อ (Ordering Cost) และต้นทุนการเก็บรักษา (Holding Cost) ที่ใช้ในการคำนวณหาการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุดังคลังรายการประกอบด้วย ต้นทุนการสั่งซื้อซึ่งประเมินจากค่าใช้จ่ายในการทำงานธุรการเพื่อสั่งซื้อได้แก่ เงินเดือนของเจ้าหน้าที่ซึ่งคิดจากหนึ่งรอบเงินเดือนเนื่องจากสถิติการสั่งซื้อเพียงปีละหนึ่งครั้งเงินเดือนเดือนอื่นจึงถือว่าไม่เกี่ยวข้องกับการสั่งซื้อโดยตรง คำนวณขึ้นเพื่อใช้ในการขนส่งพัสดุดังคลังการเก็บรักษาประเมินจากค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการ

ดูแลรักษาและคงสภาพพัสดุประกอบไปด้วยเงินเดือนของเจ้าหน้าที่ที่ทำหน้าที่ดูแลคลังพัสดุซึ่ง คิดจากจำนวนวันทำงานของเจ้าหน้าที่ในรอบหนึ่งปี ค่าเก็บรักษาสินค้าคงคลัง ได้แก่ ค่าไฟฟ้า ค่าอุปกรณ์ทำความสะอาด ค่าสารกันความชื้นและค่าซ่อมแซมอุปกรณ์

## 5. ผลการศึกษา

จากการวิจัยได้ประมวลผลจากข้อมูลทั้งหมดของพัสดุ ส.ส.ต.ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิตามลำดับแยกพัสดุ ส.ส.ต.ออกเป็น 5 กลุ่มโดยทำการวิเคราะห์และคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) และรอบระยะเวลาในการสั่งซื้อครั้งต่อไปภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดของอายุการใช้งานของพัสดุ ประกอบด้วย

การหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุกุ่มที่ 1 จากสูตรการคำนวณ  $Q^* = \sqrt{\frac{2DA}{H}}$  โดยที่  $Q^*$  = ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด,  $D$  = ความต้องการพัสดุต่อปี,  $A$  = ต้นทุนการสั่งซื้อ = 21.8 บาท/ครั้ง, และ  $H$  = ต้นทุนการเก็บรักษา = 4.95 บาท/หน่วย/ปี ซึ่งการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อประหยัดเป็นการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อพัสดุต่อครั้งในแต่ละกลุ่ม ทั้งนี้เมื่อทราบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุแต่ละรายการในแต่ละกลุ่มแล้วจึงจะสามารถคำนวณหารอบระยะเวลาการสั่งซื้อพัสดุแต่ละรายการในแต่ละกลุ่ม ดังจะกล่าวต่อไปนี้

การคำนวณรอบระยะเวลาการสั่งซื้อ ( $T^*$ ) การหารอบระยะเวลาการสั่งซื้อกระทำเพื่อให้ทราบว่าในวงรอบหนึ่งในการสั่งซื้อจะต้องเว้นระยะเป็นเวลานานเท่าใด โดยสูตรการคำนวณคือ  $T^* = \frac{Q^*}{D}$  ข้อมูลพัสดุกุ่มที่ 1 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รอบระยะเวลาการสั่งซื้อของพัสดุกุ่มที่ 1

| ชื่อพัสดุ                  | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) |
|----------------------------|-------------------------------|
| แถบบันทึกภาพ (30 นาที)     | 0.188                         |
| แถบบันทึกภาพ ขนาด 0.5 นิ้ว | 0.281                         |
| แถบบันทึกภาพ ขนาด 0.5 นิ้ว | 0.073                         |
| แถบบันทึกภาพ (60 นาที)     | 1.254                         |
| แถบทำความสะอาดหัวเทปวิดีโอ | 0.313                         |

การเปรียบเทียบรอบระยะเวลาการสั่งซื้อกับอายุการใช้งานของพัสดุ ถ้าระยะเวลาในการสั่งซื้อ  $T^*$  (รับสินค้าและขายจนหมด) ไม่เกินอายุของสินค้าจะสั่งสินค้าครั้งละ  $Q^*$  หน่วย ถ้าระยะเวลาในการสั่งซื้อ  $T^*$  ยาวกว่าอายุของสินค้าจะต้องคำนวณปริมาณการสั่งซื้อใหม่โดยที่  $Q^{**} = D T_m$  โดยที่เมื่อ  $T_m$  = อายุของสินค้า ในกรณีนี้จะทำให้ค่า  $Q^{**}$  จะน้อยกว่าขนาดสั่งซื้อที่ประหยัดซึ่งจะได้ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุกุ่มที่ 1 ในกรณีใช้  $Q^*$  และ  $Q^{**}$  โดยข้อมูลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุกุ่มที่ 1

| ชื่อพัสดุ                  | $Q^*$<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | $T_m$<br>(ปี) | $T^* - T_m$ | $Q^{**}$<br>(หน่วย) |
|----------------------------|------------------|-------------------------------|---------------|-------------|---------------------|
| แถบบันทึกภาพ (30 นาที)     | 46.738           | 0.188                         | 1             | -0.812      |                     |
| แถบบันทึกภาพ ขนาด 0.5 นิ้ว | 31.268           | 0.281                         | 1             | -0.718      |                     |
| แถบบันทึกภาพ ขนาด 0.5 นิ้ว | 119.191          | 0.073                         | 1             | -0.926      |                     |
| แถบบันทึกภาพ (60 นาที)     | 7.023            | 1.254                         | 1             | 0.254       | 5.6                 |
| แถบทำความสะอาดหัวเทปวิดีโอ | 28.061           | 0.313                         | 1             | -0.686      |                     |

การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด ( $Q^*$ ) และรอบระยะเวลาการสั่งซื้อ ( $T^*$ ) ของพัสดุในกลุ่มอื่น ๆ (กลุ่มที่ 2,3,4, และ 5) สามารถทำได้เช่นเดียวกับการคำนวณหา  $Q^*$  และ  $T^*$  ของพัสดุก่อนหน้านี้ ซึ่งผลการคำนวณ  $Q^*$  และ  $T^*$  สำหรับพัสดุในกลุ่มอื่น ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3 – 11 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 รอบระยะเวลาการสั่งซื้อของพัสดุก่อนหน้านี้

| ชื่อพัสดุ                                | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) |
|------------------------------------------|-------------------------------|
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4 BLEACH-FIX REPL.  | 0.426                         |
| น้ำยา FIXER                              | 0.373                         |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4 DEVEL. REPL       | 0.491                         |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4 BLEACH-FIX REPL.  | 0.312                         |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA BLEACH-FIX      | 1.182                         |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี EKTACHROME E-6          | 1.265                         |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี FLEX. DEV. REPLENISH    | 2.000                         |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP 47L P2-R BLEACH-FIX | 1.012                         |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP 47L P1-R DEV.REPL.  | 0.920                         |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA STABILIZER      | 1.399                         |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA FIXER           | 0.787                         |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4 DEVELOPER REPL.   | 0.938                         |
| น้ำยาล้างกระดาษ RA-4 DEVELOPER STARTE    | 1.083                         |
| น้ำยาสำหรับทำความสะอาดหัวเทป             | 0.495                         |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP-40 BLEACH-FIX RE    | 1.915                         |
| น้ำยาทำความสะอาดเลนส์                    | 0.553                         |
| น้ำยาล้างกระดาษพิมพ์รูปสี RA-100         | 2.000                         |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4 STABILIZER REP    | 0.737                         |

ตารางที่ 4 การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุก่อนหน้านี้

| ชื่อพัสดุ                                | $Q^*$<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | $T_m$<br>(ปี) | $T^* - T_m$ | $Q^{**}$<br>(หน่วย) |
|------------------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------|-------------|---------------------|
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4                   | 20.669           | 0.426                         | 0.67          | -0.244      |                     |
| น้ำยา FIXER                              | 23.557           | 0.373                         | 0.67          | -0.296      |                     |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4                   | 17.906           | 0.491                         | 0.67          | -0.178      |                     |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4 BLEACH-FIX REPL.  | 28.155           | 0.312                         | 0.67          | -0.357      |                     |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA BLEACH-FIX      | 7.449            | 1.182                         | 0.67          | 0.512       | 4.22                |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี EKTACHROME E-6          | 6.960            | 1.265                         | 0.67          | 0.595       | 3.69                |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี FLEX. DEV.              | 4.402            | 2.000                         | 0.67          | 1.331       | 1.47                |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP 47L P2-R BLEACH-FIX | 8.703            | 1.012                         | 0.67          | 0.342       | 5.76                |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP 47L P1-R DEV.REPL.  | 9.571            | 0.920                         | 0.67          | 0.250       | 6.97                |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA STABILIZER      | 6.296            | 1.399                         | 0.67          | 0.729       | 3.01                |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA FIXER           | 11.185           | 0.787                         | 0.67          | 0.118       | 9.51                |

ตารางที่ 4 การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของ  
พัสดุกลุ่มที่ 2 (ต่อ)

| ชื่อพัสดุ                                           | Q*<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | Tm<br>(ปี) | T*-Tm  | Q**<br>(หน่วย) |
|-----------------------------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|--------|----------------|
| น้ำยาล้าง<br>กระดาษสี<br>RA-4<br>DEVELOPER<br>REPL. | 9.385         | 0.938                         | 0.67       | 0.269  | 6.7            |
| น้ำยาล้าง<br>กระดาษ<br>RA-4<br>DEVELOPER<br>STARTE  | 8.128         | 1.083                         | 0.67       | 0.414  | 5.03           |
| น้ำยาสำหรับ<br>ทำความสะอาด<br>สื่อนานาชาติ          | 17.782        | 0.495                         | 0.67       | -0.175 |                |
| น้ำยาล้าง<br>กระดาษสี<br>CP-40<br>BLEACH-<br>FIXRE  | 4.598         | 1.915                         | 0.67       | 1.246  | 1.61           |
| น้ำยาทำความสะอาด<br>สื่อนานาชาติ                    | 15.899        | 0.553                         | 0.67       | -0.116 |                |
| น้ำยาล้าง<br>กระดาษ<br>พิมพ์รูป                     | 4.402         | 2.000                         | 0.67       | 1.331  | 1.47           |
| น้ำยาล้าง<br>RA-4                                   | 11.945        | 0.737                         | 0.67       | 0.067  | 10.8           |

ตารางที่ 5 รอบระยะเวลาการสั่งซื้อของพัสดุกลุ่มที่ 3

| ชื่อพัสดุ                              | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) |
|----------------------------------------|-------------------------------|
| ฟิล์มสีเนกาตีฟ ขนาด 35 มม. เบอร์ 135   | 0.087                         |
| ฟิล์มสีเนกาตีฟ ขนาด 35 มม. เบอร์ 135   | 0.138                         |
| ฟิล์มเคลือบ ขนาด 1.04x100 เมตร         | 0.968                         |
| ฟิล์มม้วนสีเนกาตีฟ ขนาด 3" เบอร์ 120   | 0.184                         |
| ฟิล์มสี REVERSAL ขนาด 35 มม. เบอร์ 135 | 0.167                         |

ตารางที่ 6 การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของ  
พัสดุกลุ่มที่ 3

| ชื่อพัสดุ                     | Q*<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | Tm<br>(ปี) | T*-Tm  |
|-------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|--------|
| ฟิล์มสีเนกาตีฟ<br>ขนาด 35 มม. | 100.631       | 0.087                         | 1          | -0.912 |
| ฟิล์มสีเนกาตีฟ                | 63.791        | 0.138                         | 1          | -0.862 |
| ฟิล์มเคลือบ                   | 9.099         | 0.968                         | 1          | -0.032 |
| ฟิล์มม้วนสีเนกาตีฟ            | 47.680        | 0.184                         | 1          | -0.815 |
| ฟิล์มสี REVERSAL              | 52.490        | 0.167                         | 1          | -0.832 |

ตารางที่ 7 รอบระยะเวลาการสั่งซื้อของพัสดุกลุ่มที่ 4

| ชื่อพัสดุ                               | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) |
|-----------------------------------------|-------------------------------|
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC. RA    | 0.359                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 11" x 84 ม.       | 0.620                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PROC. RA-4             | 0.262                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี SUPRA 50.8 ซม. x 84 ม. | 1.129                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 11 x 14 นิ้ว      | 0.839                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC. RA-4  | 0.459                         |
| กระดาษพิมพ์ภาพ PREMIUM BOUD PAPER A-4   | 0.453                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 10" x 275 ฟุต     | 1.713                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC. RA-4  | 0.622                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PC-40 PROC. RA-4       | 1.713                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PC-40 PROC. RA-4       | 0.849                         |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 8 x 10 นิ้ว       | 0.894                         |
| กระดาษ GLOSSY PAPER 160. G              | 2.508                         |

ตารางที่ 7 รอบระยะเวลาการสั่งซื้อของพัสดุกลุ่มที่ 4 (ต่อ)

| ชื่อพัสดุ                                  | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) |
|--------------------------------------------|-------------------------------|
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 40" x 100 ฟุต        | 3.831                         |
| 4 COLOR TRANSFER ROLL REC.<br>NO.016130200 | 2.153                         |
| BLACK TRANSFER ROLL REC, NO, 016130100     | 2.967                         |
| กระดาษพิมพ์ภาพ GLOSSY ขนาด 9.6 x 13.3 นิ้ว | 9.385                         |
| กระดาษพิมพ์ภาพ GLOSSY ขนาด 8.5 x 11 นิ้ว   | 9.385                         |
| กระดาษพิมพ์รูปขนาดโปสการ์ด                 | 0.256                         |
| กระดาษสำเนาภาพ ขนาด A4                     | 0.310                         |
| กระดาษรูปขนาดโปสการ์ด                      | 1.182                         |

ตารางที่ 8 การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุกลุ่มที่ 4

| ชื่อพัสดุ                              | $Q^*$<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | $T_m$<br>(ปี) | $T^* - T_m$ | $Q^{**}$<br>(หน่วย) |
|----------------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------|-------------|---------------------|
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC.      | 24.509           | 0.359                         | 1             | -0.64       |                     |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 11"x 84 ซม.      | 14.202           | 0.620                         | 1             | -0.38       |                     |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PROC. RA-4            | 33.577           | 0.262                         | 1             | -0.74       |                     |
| กระดาษพิมพ์รูปสี SUPRA 50.8 x 84       | 7.796            | 1.129                         | 1             | 0.130       | 6.9                 |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 11 x 14 นิ้ว     | 10.493           | 0.839                         | 1             | -0.16       |                     |
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC. RA-4 | 19.188           | 0.459                         | 1             | -0.54       |                     |
| กระดาษพิมพ์ภาพ PREMIUM BOUD PAPER A-4  | 19.416           | 0.453                         | 1             | -0.55       |                     |

ตารางที่ 8 การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุกลุ่มที่ 4 (ต่อ)

| ชื่อพัสดุ                               | $Q^*$<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | $T_m$<br>(ปี) | $T^* - T_m$ | $Q^{**}$<br>(หน่วย) |
|-----------------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------|-------------|---------------------|
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 10"ป              | 5.140            | 1.713                         | 1             | 0.731       | 3                   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC. RA-4  | 14.140           | 0.622                         | 1             | -0.38       |                     |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PC-40 PROC.RA-4        | 5.140            | 1.713                         | 1             | 0.713       | 3                   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PC-40 PROC.RA-4        | 10.366           | 0.849                         | 1             | -0.15       |                     |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 8 x 10 นิ้ว       | 9.843            | 0.894                         | 1             | -0.11       |                     |
| กระดาษ GLOSSY PAPER 160. G              | 3.512            | 2.508                         | 1             | 1.508       | 1.4                 |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 40" x 100 ฟุต     | 2.299            | 3.831                         | 1             | 2.831       | 0.6                 |
| 4 COLOR TRANSFER ROLL REC. NO.016130200 | 4.091            | 2.153                         | 1             | 1.153       | 1.9                 |
| BLACK TRANSFER ROLL REC, NO, 016130100  | 2.968            | 2.967                         | 1             | 1.968       | 1                   |
| กระดาษพิมพ์ภาพ GLOSSY                   | 0.939            | 9.385                         | 1             | 8.385       | 0.1                 |
| กระดาษพิมพ์ภาพ 8.5 x 11 นิ้ว            | 0.939            | 9.385                         | 1             | 8.385       | 0.1                 |
| กระดาษพิมพ์รูปขนาดโปสการ์ด              | 34.355           | 0.256                         | 1             | -0.74       |                     |



**ตารางที่ 8** การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของ  
พัสดุก่อนที่ 4 (ต่อ)

| ชื่อพัสดุ                  | Q*<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | Tm<br>(ปี) | T*-Tm | Q**<br>(หน่วย) |
|----------------------------|---------------|-------------------------------|------------|-------|----------------|
| กระดาษสำเนา<br>ภาพ ขนาด A4 | 28.327        | 0.310                         | 1          | -0.69 |                |
| กระดาษรูปขนาด<br>โปสการ์ด  | 7.449         | 1.182                         | 1          | 0.182 | 6.3            |

**ตารางที่ 9** รอบระยะเวลาการสั่งซื้อของพัสดุก่อนที่ 5

| ชื่อพัสดุ                               | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) |
|-----------------------------------------|-------------------------------|
| หมึกพิมพ์สีด้า SO 20108/mjic 8          | 0.846                         |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644B)   | 1.465                         |
| หมึกพิมพ์สี DOLOR INK CARTRIDGE         | 1.024                         |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644M)   | 1.840                         |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644C)   | 0.839                         |
| หมึกพิมพ์สี SO 20089/mjic 8c            | 0.612                         |
| หมึกพิมพ์ ขาว-ดำ BLACK ING CARTRIDGE    | 1.354                         |
| PRINT RIBBON                            | 0.903                         |
| หมึกพิมพ์สี BLACK BCI-3BK               | 0.894                         |
| CARTRIDGE CANNON BCI-21 (COLOR)         | 2.709                         |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644Y)   | 1.956                         |
| หมึกพิมพ์สีด้า PRINT CARTRIDGE (51645A) | 1.354                         |
| หมึกพิมพ์สี PHOTO BLACK BCI-3PBK        | 0.938                         |
| หมึกพิมพ์ CYAN BCI-3C                   | 0.938                         |
| หมึกพิมพ์สี MAGENTA BCI-3M              | 0.938                         |
| หมึกพิมพ์สี YELLOW BCI-3Y               | 0.938                         |
| หมึกพิมพ์สี PHOTO MAGENTA BCI-3PM       | 1.773                         |

**ตารางที่ 10** การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของ  
พัสดุก่อนที่ 5

| ชื่อพัสดุ                                   | Q*<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | Tm<br>(ปี) | T*-Tm  | Q**<br>(หน่วย) |
|---------------------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|--------|----------------|
| หมึกพิมพ์สีด้า SO<br>20108/mjic 8           | 10.409        | 0.846                         | 1          | -0.154 |                |
| หมึกพิมพ์ PRINT<br>CARTRIDGE<br>(HP-51644B) | 6.009         | 1.465                         | 1          | 0.466  | 4.1            |
| หมึกพิมพ์สี<br>DOLOR INK<br>CARTRIDGE       | 8.602         | 1.024                         | 1          | 0.024  | 8.4            |
| หมึกพิมพ์ PRINT<br>CARTRIDGE<br>(HP-51644M) | 4.785         | 1.840                         | 1          | 0.841  | 2.6            |
| หมึกพิมพ์ PRINT<br>CARTRIDGE<br>(HP-51644C) | 10.493        | 0.839                         | 1          | -0.161 |                |
| หมึกพิมพ์สี SO<br>20089/mjic 8c             | 14.387        | 0.612                         | 1          | -0.388 |                |
| หมึกพิมพ์ ขาว-ดำ<br>BLACK ING<br>CARTRIDGE  | 6.502         | 1.354                         | 1          | 0.355  | 4.8            |
| PRINT RIBBON                                | 9.753         | 0.903                         | 1          | -0.097 |                |
| หมึกพิมพ์สี BLACK<br>BCI-3BK                | 9.843         | 0.894                         | 1          | -0.105 |                |
| CARTRIDGE<br>CANNON BCI-21<br>(COLOR)       | 3.251         | 2.709                         | 1          | 1.709  | 1.2            |
| หมึกพิมพ์ PRINT<br>CARTRIDGE<br>(HP-51644Y) | 4.501         | 1.956                         | 1          | 0.957  | 2.3            |
| หมึกพิมพ์สีด้า<br>PRINT CARTRID<br>(51645A) | 6.502         | 1.354                         | 1          | 0.355  | 4.8            |
| หมึกพิมพ์สี                                 | 9.385         | 0.938                         |            |        |                |



ตารางที่ 10 การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของ  
พัสดุกลุ่มที่ 5 (ต่อ)

| ชื่อพัสดุ                        | Q*<br>(หน่วย) | $T^* = \frac{Q^*}{D}$<br>(ปี) | Tm<br>(ปี) | T*-Tm  | Q**<br>(หน่วย) |
|----------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|--------|----------------|
| PHOTO BLACK<br>BCI-3PBK          |               |                               | 1          | -0.061 |                |
| หมึกพิมพ์ CYAN<br>BCI-3C         | 9.385         | 0.938                         | 1          | -0.061 |                |
| หมึกพิมพ์สี<br>MAGENTA<br>BCI-3M | 9.385         | 0.938                         | 1          | -0.061 |                |
| หมึกพิมพ์สี<br>YELLOW BCI-3Y     | 9.385         | 0.938                         | 1          | -0.061 |                |
| หมึกพิมพ์สี<br>MAGENTA BCI3PM    | 4.966         | 1.773                         | 1          | 0.774  | 2.8            |

## 6. สรุปและอภิปรายผล

สำหรับการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของพัสดุ  
ส.ส.ต.สามารถสรุปผลปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดแต่ละ  
กลุ่มดังต่อไปนี้

พัสดุกลุ่มที่ 1 พบว่าในการคำนวณหาปริมาณการ  
สั่งซื้อ ที่ประหยัดมีแถบบันทึกภาพความยาว 60 นาที  
เป็นรายการที่มีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อมากกว่าอายุการ  
ใช้งานของพัสดุ ดังนั้นการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่  
ประหยัดจะต้องทำการคำนวณหาค่า Q\*\* ใหม่ นอกจาก  
นั้นพัสดुरายการอื่นสามารถใช้การคำนวณค่าปริมาณการ  
สั่งซื้อที่ประหยัดแบบปกติได้แล้วสามารถเลือกใช้ค่า Q ที่  
เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การคำนวณ Q\* และ Q\*\* ของพัสดุกลุ่มที่ 1

| ชื่อพัสดุ                      | Q*      | Q** | Q ที่ใช้ |
|--------------------------------|---------|-----|----------|
| แถบบันทึกภาพ (30 นาที)         | 46.738  |     | 46.738   |
| แถบบันทึกภาพ ขนาด 0.5 นิ้ว     | 31.268  |     | 31.268   |
| แถบบันทึกภาพ ขนาด 0.5 นิ้ว     | 119.191 |     | 119.191  |
| แถบบันทึกภาพ (60 นาที)         | 7.023   | 5.6 | 5.6      |
| แถบทำความสะอาดหัวเทป<br>วิดีโอ | 28.061  |     | 28.061   |

พัสดุกลุ่มที่ 2 พบว่าในการคำนวณหาปริมาณการ  
สั่งซื้อ ที่ประหยัด พัดุดในกลุ่มนี้ประกอบด้วย น้ำยาล้าง  
กระดาษสี RA-4 BLEACH-FIX REPL, น้ำยา FIXER, น้ำยา  
ล้างกระดาษสี RA-4 DEVEL REPL, น้ำยาล้างกระดาษ  
สี RA-4 BLEACH-FIX REPL, น้ำยาสำหรับทำความสะอาด  
หัวเทปและน้ำยาทำความสะอาดเลนส์ทั้งหมด  
นี้เป็นรายการที่มีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อน้อยกว่าอายุ  
การใช้งานของพัสดุ ดังนั้นการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่  
ประหยัดไม่ต้องทำการคำนวณหาค่า Q\*\* ใหม่ สามารถใช้  
ค่า Q\* ตามทฤษฎีการสั่งซื้อที่ประหยัดกำหนดไว้ ส่วนพัสดุ  
รายการอื่นมีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อมากกว่าอายุการ  
ใช้งานของพัสดุจึงไม่สามารถใช้การคำนวณค่าปริมาณ  
การสั่งซื้อที่ประหยัดแบบปกติได้จะต้องทำการคำนวณหา  
ค่า Q\*\* ใหม่แล้วสามารถเลือกใช้ค่าปริมาณการสั่งซื้อ (Q\*)  
ที่เหมาะสมเพื่อสอดคล้องกับปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด  
ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การคำนวณ Q\* และ Q\*\* ของพัสดุกุณภูมิที่ 2

| ชื่อพัสดุ                                   | Q*     | Q**    | Q ที่ใช้ |
|---------------------------------------------|--------|--------|----------|
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4<br>BLEACH-FIX REPL.  | 20.669 |        | 20.669   |
| น้ำยา FIXER                                 | 23.557 |        | 23.557   |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4<br>DEVEL. REPL       | 17.906 |        | 17.906   |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4 BLK                  | 28.155 |        | 28.155   |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA<br>BLEACH-FIX      | 7.449  | 4.221  | 4.221    |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี<br>EKTACHROME E-6          | 6.960  | 3.685  | 3.685    |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี FLEX. DEV.<br>REPLENISH    | 4.402  | 1.474  | 1.474    |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP 47L<br>P2-R BLEACH-FIX | 8.703  | 5.762  | 5.762    |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP 47L<br>P1-R DEV.REPL.  | 9.571  | 6.968  | 6.968    |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA<br>STABILIZER      | 6.296  | 3.015  | 3.015    |
| น้ำยาล้างฟิล์มสี C-41 RA<br>FIXER           | 11.184 | 9.514  | 9.514    |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4<br>DEVELOPER REPL.   | 9.385  | 6.7    | 6.7      |
| น้ำยาล้างกระดาษ RA-4<br>DEVELOPER STARTE    | 8.128  | 5.025  | 5.025    |
| น้ำยาสำหรับทำความสะอาด<br>หัวเทป            | 17.782 |        | 17.782   |
| น้ำยาล้างกระดาษสี CP-40<br>BLEACH-FIX RE    | 4.598  | 1.608  | 1.608    |
| น้ำยาทำความสะอาดเลนส์                       | 15.899 |        | 15.899   |
| น้ำยาล้างกระดาษพิมพ์รูปสี<br>RA-100         | 4.402  | 1.474  | 1.474    |
| น้ำยาล้างกระดาษสี RA-4<br>STABILIZER REP    | 11.945 | 10.854 | 10.854   |

พัสดุกุณภูมิที่ 3 พบว่าในการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อ ที่ประหยัดทุกรายการมีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อน้อยกว่าอายุการใช้งานของพัสดุทั้งหมด ดังนั้นการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดไม่ต้องทำการคำนวณหา Q\*\* ใหม่ สามารถใช้ค่า Q\* ตามทฤษฎีการสั่งซื้อที่ประหยัดกำหนดไว้ได้ และสามารถเลือกใช้ค่า Q ที่เหมาะสม ทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากเป็นพัสดุที่มีอายุการใช้งานที่จำกัด ประกอบกับต้องมีการเก็บรักษาในอุณหภูมิที่เหมาะสม ไมเช่นนั้นอาจทำให้เสื่อมคุณภาพก่อนระยะเวลาที่กำหนดได้โดยข้อมูลแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การคำนวณ Q\* และ Q\*\* ของพัสดุกุณภูมิที่ 3

| ชื่อพัสดุ                                 | Q*      | Q** | Q ที่ใช้ |
|-------------------------------------------|---------|-----|----------|
| ฟิล์มสีเนกาตีฟ ขนาด 35 มม.<br>เบอร์ 135   | 100.631 |     | 100.631  |
| ฟิล์มสีเนกาตีฟ ขนาด 35 มม.                | 63.791  |     | 63.791   |
| ฟิล์มเคลือบ ขนาด 1.04x100 ม.              | 9.099   |     | 9.099    |
| ฟิล์มม้วนสีเนกาตีฟ ขนาด 3"                | 47.680  |     | 47.680   |
| ฟิล์มสี REVERSAL ขนาด<br>35 มม. เบอร์ 135 | 52.490  |     | 52.490   |

พัสดุกุณภูมิที่ 4 พบว่าในการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อ ที่ประหยัด ประกอบด้วย กระดาษพิมพ์รูปสี EXTACOLOR PROC, กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 11"x84 ม., กระดาษพิมพ์รูปสี PROC. RA-4, กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 11 x 14 นิ้ว กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC, กระดาษพิมพ์ภาพ PREMIUM BOUD PAPER A-4, กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA COLOR PROC. RA-4, กระดาษพิมพ์รูปสี PC-40 PROC. RA-4, กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 8 x 10 นิ้ว, กระดาษพิมพ์รูปขนาดโปสการ์ด และกระดาษสำเนาภาพ ขนาด A4 ทั้งหมดเป็นรายการที่มีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อน้อยกว่าอายุการใช้งานของพัสดุ ดังนั้นการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดตามที่กำหนดไว้ส่วนพัสดुरายการอื่นมีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อมากกว่าอายุการใช้งานของพัสดุนั้นจึงไม่สามารถใช้การคำนวณค่าปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดแบบปกติได้จะต้อง

ทำการคำนวณหาค่า Q\*\* ใหม่ และสามารถเลือกใช้ค่า Q ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การคำนวณ Q\* และ Q\*\* ของพัสดุกลุ่มที่ 4

| ชื่อพัสดุ                                           | Q*     | Q** | Q ที่ใช้ |
|-----------------------------------------------------|--------|-----|----------|
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA<br>COLOR PROC. RA-4           | 24.509 |     | 24.509   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด<br>11" x 84 ม.                | 14.202 |     | 14.202   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PROC. RA-4                         | 33.557 |     | 33.577   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี SUPRA<br>50.8 ซม. x 84 ม.          | 7.796  | 6.9 | 6.9      |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด<br>11 x 14 นิ้ว               | 10.493 |     | 10.493   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA<br>COLOR PROC. RA-4           | 19.188 |     | 19.188   |
| กระดาษพิมพ์ภาพ PREMIUM<br>BOUD PAPER A-4            | 19.416 |     | 19.416   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด 10"ป                          | 5.140  | 3   | 3        |
| กระดาษพิมพ์รูปสี EXTA<br>COLOR PROC. RA-4           | 14.140 |     | 14.140   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PC-40 PROC.<br>RA-4                | 5.140  | 3   | 3        |
| กระดาษพิมพ์รูปสี PC-40 PRO                          | 10.366 |     | 10.366   |
| กระดาษพิมพ์รูปสี<br>ขนาด 8 x 10 นิ้ว<br>ขนาดมาตรฐาน | 9.843  |     | 9.843    |
| กระดาษ GLOSSY PAPER 160.                            | 3.512  | 1.4 | 1.4      |
| กระดาษพิมพ์รูปสี ขนาด<br>40" x 100 ฟุต              | 2.299  | 0.6 | 0.6      |
| 4 COLOR TRANSFER ROLL<br>REC. NO.016130200          | 4.091  | 1.9 | 1.9      |
| BLACK TRANSFER ROLL REC,<br>NO, 016130100           | 2.968  | 1   | 1        |
| กระดาษพิมพ์ภาพ GLOSSY<br>ขนาด 9.6 x 13.3 นิ้ว       | 0.939  | 0.1 | 0.1      |
| กระดาษพิมพ์ภาพ GLOSSY<br>ขนาด 8.5 x 11 นิ้ว         | 0.939  | 0.1 | 0.1      |
| กระดาษพิมพ์รูปขนาดโปสการ์ด                          | 34.355 |     | 34.355   |
| กระดาษสำเนาภาพ ขนาด A4                              | 28.327 |     | 28.327   |
| กระดาษรูปขนาดโปสการ์ด                               | 7.449  | 6.3 | 6.3      |

พัสดุก่อนที่ 5 พบว่าในการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อ ที่ประหยัดพัสดุประเภทหมึกพิมพ์สีดำ SO 20108/mjic 8, หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644C), หมึกพิมพ์สี SO 20089/mjic 8C PRINT RIBBON, หมึกพิมพ์สี BLACK BCI-3M, หมึกพิมพ์สี PHOTO BLACK BCI-3PBK, หมึกพิมพ์สี CYAN BCI-3C, หมึกพิมพ์สี MAGENTA BCI-3M และหมึกพิมพ์สี YELLOW BCI-3Y ทั้งหมดเป็นรายการที่มีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อน้อยกว่าอายุการใช้งานของพัสดุ ดังนั้นการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดไม่ต้องทำการคำนวณหาค่า Q\*\* ใหม่ สามารถใช้ค่า Q\* ตามทฤษฎี การสั่งซื้อที่ประหยัดกำหนดไว้ส่วนพัสดुरายการอื่นมีรอบระยะเวลาการสั่งซื้อมากกว่าอายุการใช้งานของพัสดุจึงไม่สามารถใช้การคำนวณค่าปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดแบบปกติได้จะต้องทำการคำนวณหาค่า Q\*\* ใหม่ แล้วสามารถเลือกใช้ค่า Q ที่เหมาะสม พัสดุก่อนที่ 5 เป็นพัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับกลุ่มที่ 3 โดยมีทั้งประเภทที่สามารถใช้ค่าที่คำนวณได้จากปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดและค่าที่ต้องคำนวณใหม่เนื่องจากรอบระยะเวลาการสั่งซื้อมากกว่าอายุการใช้งานของพัสดุดังแสดงในตารางที่ 15

ส.ส.ต. นั้นเป็นพัสดุที่มีปริมาณการสั่งซื้อที่คงที่แน่นอนตลอดทั้งปีและไม่สามารถให้สินค้าขาดมือได้ เพราะต้องเป็นไปตามระเบียบข้อบังคับของการสำรองสินค้า คงคลังในคลังพัสดุที่เป็นคลังใหญ่เพื่อให้เกิดความเสียหายต่อการปฏิบัติงานพัสดุประเภทฟิล์มและน้ำยาล้างภาพเป็นการสนับสนุนการปฏิบัติงานถ่ายภาพทางอากาศเพื่อจัดทำเป็นข้อมูลในการแปลความภาพถ่าย ดังนั้นแบบจำลองการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในการศึกษานี้ประกอบกับพัสดุมียอายุการใช้งานต้องมีการควบคุมอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอซึ่งที่กล่าวไปแล้วข้างต้นจำเป็นต้องมีการกำหนดอายุของสินค้าตามสมมติฐานของแบบจำลองนี้ ดังนั้นต้นทุนการสั่งซื้อ (A) มีค่าเท่ากับ 21.8 บาทต่อครั้งและ

ตารางที่ 15 การคำนวณ Q\* และ Q\*\* ของพัสดุกลุ่มที่ 5

| ชื่อพัสดุ                              | Q*     | Q** | Q ที่ใช้ |
|----------------------------------------|--------|-----|----------|
| หมึกพิมพ์สีดำ SO 20108/mjic 8          | 10.409 |     | 10.409   |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644B)  | 6.009  | 4.1 | 4.1      |
| หมึกพิมพ์สี DOLOR INK CARTRIDGE        | 8.602  | 8.4 | 8.4      |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644M)  | 4.785  | 2.6 | 2.6      |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644C)  | 10.493 |     | 10.493   |
| หมึกพิมพ์สี SO 20089/mjic 8c           | 14.387 |     | 14.387   |
| หมึกพิมพ์ ขาว-ดำ BLACK ING CARTRIDGE   | 6.502  | 4.8 | 4.8      |
| PRINT RIBBON                           | 9.753  |     | 9.753    |
| หมึกพิมพ์สี BLACK BCI-3BK              | 9.843  |     | 9.843    |
| CARTRIDGE CANNON BCI-21 (COLOR)        | 3.251  | 1.2 | 1.2      |
| หมึกพิมพ์ PRINT CARTRIDGE (HP-51644Y)  | 4.501  | 2.3 | 2.3      |
| หมึกพิมพ์สีดำ PRINT CARTRIDGE (51645A) | 6.502  | 4.8 | 4.8      |
| หมึกพิมพ์สี PHOTO BLACK BCI-3PBK       | 9.385  |     | 9.385    |
| หมึกพิมพ์ CYAN BCI-3C                  | 9.385  |     | 9.385    |
| หมึกพิมพ์สี MAGENTA BCI-3M             | 9.385  |     | 9.385    |
| หมึกพิมพ์สี YELLOW BCI-3Y              | 9.385  |     | 9.385    |
| หมึกพิมพ์สี PHOTO MAGENTA BCI-3PM      | 4.966  | 2.8 | 2.8      |

ต้นทุนการเก็บรักษา (H) เท่ากับ 4.95 บาท ต่อปีและนำไปใช้เป็นค่าคงที่ในการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดสำหรับรายการพัสดุในแต่ละกลุ่ม นอกเหนือจากนี้ข้อเสนอแนะสำหรับหน่วยงานที่มีการจัดเก็บพัสดุหลายประเภทหลายชนิดไว้ในคลังพัสดุการดำเนินการควบคุมทุกรายการนั้นคงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงควรมีการแบ่งประเภทของพัสดุตามทฤษฎีการแบ่งแบบ ABC ไว้ด้วยเพื่อการควบคุมจะได้ควบคุมพัสดุที่มีมูลค่าการใช้งานมากแต่มีจำนวนน้อยในคลังและมีความเคลื่อนไหวตลอดเวลาเท่านั้น ทั้งนี้จะทำให้ผู้ควบคุมการจัดเก็บสามารถทำงานได้โดยง่าย สะดวกรวดเร็วและไม่เกิดความท้อแท้ในการทำงาน เนื่องจากข้อมูล มีจำนวนน้อยสามารถทำได้ง่าย และยังสะดวกในการจัดเก็บสำหรับเป็นข้อมูลที่จะใช้พยากรณ์ได้ต่อไป สำหรับกรณีศึกษาจึงเป็นแบบจำลองที่นำไปประยุกต์ใช้ในคลังพัสดุของหน่วยราชการซึ่งส่วนใหญ่มีการสั่งซื้อแบบคงที่อยู่แล้วประกอบกับไม่สามารถให้สินค้าเกิดการขาดมือได้จำเป็นต้องมีการสำรองเพื่อให้สามารถบรรลุนิติภารกิจได้อย่างสำเร็จเพราะฉะนั้นการนำแบบจำลองการสั่งซื้อแบบประหยัดจึงเป็นแบบจำลองพื้นฐานในการนำไปใช้ในคลังพัสดุของหน่วยงานภาครัฐเป็นสำคัญ

## 7. บรรณานุกรม

- (1) ดร.กัลยา วานิชย์บัญชา, 2541. การวิเคราะห์เชิงปริมาณทางธุรกิจ. กรุงเทพฯ : ศูนย์หนังสือฟาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (2) รศ.ชุมพล ศฤงคารศิริ, 2542. การวางแผนและควบคุมการผลิต. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- (3) รศ.พิภพ ลลิตาภรณ์, 2544. การบริหารของคลังระบบ MRP และ ROP. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- (4) P.H. Zipkin, 1976. Foundations of inventory management. McGraw-Hill Book Company.
- (5) W.J. Stevenson, 1982. Production/Operations management. IRWIN Company.
- (6) W.C. Giffin, 1971. Introduction to Operations engineering. IRWIN Company.
- (7) J.G. Joseph ECKER, 1991. Introduction to Operations research. KRIEGER Publishing Company.
- (8) J.F. Magee, 1958. Production Planning and Inventory Control. McGraw-Hill Book Company.

# การศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้ในระบบชลประทานไร่นา Research and Development of Concrete Ditch Mixed with Rubber Latex for Farm Irrigation System

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวัฒน์ ปลาเงิน<sup>1\*</sup>

Assistant Professor Dr. Pheerawat Plangoen<sup>1\*</sup>

พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวน จันทวาลย์<sup>2</sup>

Colonel Assistant Professor Dr. Chuan Chuntavan<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

38 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160

<sup>1\*</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Siam University

38 Petchkasem Road, Phasi Chareon District, Bangkok, 10160

<sup>2</sup>ผู้อำนวยการ กองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก 26001

<sup>2</sup>Director, Department of Civil Engineering, Education Section, Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhonnayok, 26001

\*Corresponding Author: pheerawat.pla@siam.edu

(Received: October 12, 2018, Revised: May 16, 2019, Accepted: May 22, 2019)

**บทคัดย่อ :** การศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้ในระบบชลประทานไร่นาได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา (พรีวลคาไนซ์) ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ โครงสร้างจุลภาค คอนกรีตผสมน้ำยางพารา ความสามารถในการเทได้ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา โดยกำหนดอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 0% 1% 3% 5% 10% และ 15% (โดยน้ำหนัก) และทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตระยะเวลา 28 วัน พบว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1% มีคุณสมบัติการรับแรงต่างๆ ดีที่สุด ได้แก่ กำลังรับแรงอัด 244 กก./ซม<sup>2</sup> กำลังรับแรงดึง 35 กก./ซม<sup>2</sup> โมดูลัสความยืดหยุ่น 46 กก./ซม<sup>2</sup> การดูดซึมน้ำร้อยละ 1.0 จากผลการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการจึงแนะนำให้ใช้อัตราส่วนผสมคอนกรีตสำหรับนำไปใช้งานในการหล่อคูล่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพารา โดยใช้เนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 1% (โดยน้ำหนัก) สำหรับปูนซีเมนต์ 50 กก. ประกอบไปด้วยวัสดุต่างๆ ดังนี้ ทราย 135 กก. หินกรวด 148 กก. น้ำ 29.67 กก. และน้ำยางพรีวลคาไนซ์ 0.83 กก. การศึกษาวิจัยภาคสนามได้พัฒนาคูล่งน้ำผสมน้ำยางพาราแบบสำเร็จรูปและแบบตาดในที่ดินที่ติดตั้งในพื้นที่แปลงนาของเกษตรกร ความกว้างของคูล่งน้ำ 0.40 ม. สูง 0.30 ม. และความหนา 0.07 ม. การติดตามประเมินผลเบื้องต้นการใช้งานคูล่งน้ำในพื้นที่แปลงนาพบว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่พื้นที่แปลงนาจะไหลได้สะดวกและเร็ว สามารถป้องกันการสูญเสียเนื่องจากน้ำรั่วซึม จึงทำให้ประสิทธิภาพการชลประทานเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ :** คูล่งน้ำชลประทาน น้ำยางพารา คอนกรีต ชลประทานไร่นา



**Abstract :** Research and development of concrete ditch mixed with rubber latex farm irrigation system. This study analyzed the physical and mechanical properties of concrete mixed with rubber latex (pre-vulcanized). The experiment was performed in a laboratory to test the properties of the mixture in terms of microstructure, workability, compressive strength, tensile strength, flexural strength and water absorption of concrete. To test the performance polymer and cement (P/C) were mixed in different proportions of 0%, 1%, 3%, 5%, 10% and 15% by weight to prepare the solution and was further added to concrete and the strength of the structure was tested after 28 days. The results indicated that the polymer cement ratio (P/C) of 1% gives the best performance with 244 ksc compressive strength, 35 ksc tensile strength, 46 ksc flexural strength and 1% water absorption of concrete. Thus, this study recommends that polymer cement ratio (P/C) of 1% by weight is most suitable for construction of concrete ditches. The material used in construction of irrigation ditch was consist of Portland cement 50 kg, sand 135 kg, gravel 148 kg, water 29.67 kg and rubber latex 0.83 kg. For field research precast concrete lining ditch having the bottom width of 0.4 m, height 0.3 m and thickness 0.07 m were constructed using the recommended mixture. The preliminary evaluation of the ditches in the field also indicates that these ditches allow water to flow quickly and easily. Reduction in the seepage loss the irrigation efficiency has improved significantly.

**Keywords :** Irrigation Ditch, Rubber Latex, Concrete, Farm Irrigation System

## 1. บทนำ

คูส่งน้ำชลประทานในพื้นที่แปลงน่านับได้ว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างยิ่งสำหรับโครงการชลประทาน เนื่องจากโครงการชลประทานทำหน้าที่จัดสรรน้ำไปให้กับเกษตรกรเพื่อการเพาะปลูก และคูส่งน้ำ ก็ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำจากคลองหลักเข้าสู่พื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกร ถ้าหากคูส่งน้ำชลประทานเป็นคูดินจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำ เนื่องจากการรั่วซึม [3] และปัจจุบันคูส่งน้ำที่ลาดด้วยคอนกรีตมักประสบกับปัญหาการแตกร้าวตามผนัง และท้องคูส่งน้ำทำให้เกิดการรั่วซึมของน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำที่ส่งเข้าไปสู่พื้นที่เพาะปลูกได้อย่างไม่ทั่วถึง แต่อย่างไรก็ตามการที่จะให้คูส่งน้ำทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์แบบนั้นไม่ใช่เป็นสิ่งที่ทำได้ง่าย เนื่องจากคูส่งน้ำชลประทานที่ดีจะต้องมีพื้นฐานมาจากการออกแบบและก่อสร้างที่ถูกต้องในด้านวิศวกรรม มีความ

เหมาะสมในด้านเศรษฐกิจรวมถึงมีการดูแลซ่อมแซมและบำรุงรักษาอย่างทั่วถึงขณะใช้งาน ในปัจจุบันคูส่งน้ำที่สร้างขึ้นมักเป็นคลองดินธรรมดาหรือคูลาดด้วยคอนกรีต แต่คูส่งน้ำทั้งคูดินและคูลาดด้วยคอนกรีตจะประสบปัญหาต่าง ๆ ดังนี้ คูดินเมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง ทำให้เกิดการทับถมของตะกอนและมีโอกาสตื้นเขินได้ง่าย นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องมาจากการรั่วซึมของน้ำ และการพังทลายของคันคูดินส่งน้ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ส่งเข้าไปในพื้นที่เพาะปลูกลดน้อยลง สำหรับคูลาดคอนกรีตเมื่อใช้งานไประยะหนึ่งมักประสบกับปัญหาการแตกร้าวตามผนัง (ภาพที่ 1) ทำให้เกิดการรั่วซึมของน้ำ และเกิดโพรงใต้ผนังคูส่งน้ำและทำให้เกิดการทับถมของตะกอนและทำให้ปริมาณน้ำที่ส่งเข้าไปสู่พื้นที่เพาะปลูกได้อย่างไม่ทั่วถึงและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของพืช



ภาพที่ 1 ลักษณะการแตกร้าวตามผนังคูส่งน้ำชลประทาน [1]

จากผลการศึกษาวิจัยประยุกต์ใช้น้ำยางพาราในงานบำรุงรักษาระบบชลประทาน พีรวัดน์ และคณะ [1,2,3] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้ซ่อมแซมรอยแตกร้าวคลองชลประทาน [1,2] การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราผสมดินซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุสร้างสระเก็บกักน้ำ [3] และการศึกษาการรั่วซึมของน้ำในแบบจำลองคลองชลประทานผสมน้ำยางพารา [4] พบว่าการใช้น้ำยางพาราในปริมาณที่เหมาะสมผสมในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ทำให้มอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น การรับแรงดึงและแรงดัดสูงกว่ามอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยางพารา และที่สำคัญพบว่าสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้ดีกว่ามอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยางพารา [5] งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Chatveera และ Wongkamjan [6] Chatveera และ Kongsub [7] ได้นำเถ้าแกลบซึ่งมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  สูงมาพัฒนาเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้ในการงานคอนกรีต โดยอยู่ในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเถ้าแกลบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมสามารถทำให้กำลังรับแรงอัดดีขึ้นและยังมีความคงทนต่อสารละลายซัลเฟตและกรดอะซิติกดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เนื่องจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบของ  $\text{SiO}_2$  ประมาณร้อยละ 81 ขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบของ  $\text{SiO}_2$  ประมาณร้อยละ 21 Homsriprasert

และ Chatveera [8] ได้ศึกษาสมบัติการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีจุดเด่นหลายประการ ได้แก่ ค่ากำลังอัดสูง ความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ ทนไฟ ทนทานต่อการสัมผัสสารละลายซัลเฟตและการกัดกร่อนของกรด Phoo-ngernkham และคณะ [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แทนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และทำให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก

ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาคอนกรีตผสมน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ เนื่องจากน้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์มีคุณสมบัติดีทนทานต่อความร้อนและสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติได้ดีกว่าน้ำยางพาราธรรมชาติ [10] การศึกษาวิจัยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้ (1) ศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา (2) พัฒนาคูส่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพาราตามในที่ใช้สำหรับใช้ในระบบชลประทานไร่นา

## 2. ระเบียบวิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุ

1) ปูนซีเมนต์ : ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2) ทราย : เป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดมาตรฐาน ASTM C33 [11] ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.55 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.92 โดยน้ำหนัก

3) หิน : เป็นหินปูนสำหรับงานก่อสร้างตามท้องตลาดมีขนาดใหญ่สุด 25 มม. ขนาดละเอียดมาตรฐาน ASTM C33 [11] ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.71 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.95 โดยน้ำหนัก

4) น้ำ : ใช้ น้ำประปามีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ

7

5) น้ำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ [12] : น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ในสภาวะของเหลวและขึ้นรูปเป็นยางวัลคาไนซ์ได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนอีก น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ยังคงสถานะเป็นของไหลและมีลักษณะทั่วไปเหมือนเดิม การพรีวัลคาไนซ์จะให้ความร้อนแก่น้ำยางคอมพาวด์ที่เหนือจุดเดือดของน้ำ ในตู้ความดันแต่ต่อมาเนื่องจากมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงเป็นพิเศษ จึงทำให้การทำน้ำยางพรีวัลคาไนซ์สามารถทำได้ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

## 2.2 สัดส่วนของคอนกรีต

การกำหนดสัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติทางกลและใช้เป็นอัตราส่วนผสมของวัสดุสำหรับบดาคูส่งน้ำแบบในและคูส่งน้ำแบบสำเร็จรูป โดยกำหนดอัตราส่วนคอนกรีต คือ 1 : 2.7 : 3 โดยปริมาตร (ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน) และอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.60 ดังนั้นสำหรับคอนกรีตไม่ผสมน้ำยางพารา สำหรับปูนซีเมนต์ 50 กก. (1 ถุง) จะใช้วัสดุต่าง ๆ ดังนี้ ทราย 135 กก. หินกรวด 148 กก. และน้ำ 30 กก.

## 2.3 การกำหนดปริมาณน้ำยางผสมในคอนกรีต

การศึกษาได้กำหนดอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (Polymer/Cement Ratio , P/C) เท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก การเตรียมปริมาณน้ำและน้ำยางพรีวัลคาไนซ์สำหรับใช้ผสมคอนกรีต แสดงในตารางที่ 1 ปริมาณน้ำยางที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) ต่างๆ ซึ่งถ้าใช้ปูนซีเมนต์ จำนวน 50 กก. และอัตราส่วน P/C เท่ากับ 1% จะได้ปริมาณเนื้อยาง 0.5 กก. น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ มีค่า D.R.C. (Dry Rubber Content % by Weight) เท่ากับ 60% ดังนั้นในน้ำยางพารา 1 กก. ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยาง 0.60 กก. และส่วนที่เป็นน้ำ 0.40 กก. ดังนั้นปริมาณน้ำยางที่จะใช้ผสมคอนกรีตสำหรับปูนซีเมนต์ 50

กก. จะใช้น้ำยางเท่ากับ 0.83 กก. และน้ำที่จะใช้ในการผสมคอนกรีต 29.66 กก.

ตารางที่ 1 กำหนดอัตราส่วนของน้ำและน้ำยางที่ใช้ผสมคอนกรีตที่ใช้

| P/C | ปริมาณเนื้อยาง (กก.) | ปริมาณน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (กก.) | ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต (กก.) |
|-----|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 0%  | 0                    | 0                              | 30                              |
| 1%  | 0.5                  | 0.83                           | 29.66                           |
| 3%  | 1.5                  | 2.5                            | 29.25                           |
| 5%  | 2.5                  | 4.16                           | 28.33                           |
| 10% | 5.0                  | 8.33                           | 26.66                           |
| 15% | 7.5                  | 12.5                           | 25                              |

## 2.4 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่ง ที่ถ่ายภาพชิ้นงานโดยอาศัยหลักการการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนชิ้นงานโดยอาศัยหลักการการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนชิ้นงานที่เป้าหมายที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด เมื่ออิเล็กตรอนกระทบกับผิวของตัวอย่างที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่างๆ จะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ โดยตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% ถูกนำไปวิเคราะห์ที่หน่วยวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

## 2.5 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

### 2.5.1 การทดสอบความสามารถในการเทได้

การทดสอบความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความแข็ง

ของคอนกรีต ตามปกติทั่วไป นิยมใช้การทดสอบการยุบตัว (Slump Test) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (ภาพที่ 2) โดยขั้นตอนทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C143 [13] เพื่อกำหนดและควบคุมความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา โดยปกติค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในมาตรฐานการใช้งานทั่วไปซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 7.5-12.5 ซม. (+/-2.5 ซม.) โดยการทดสอบความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตและคอนกรีตผสมน้ำยาง



ภาพที่ 2 การทดสอบความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตโดยวิธีการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

#### 2.5.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงอัดของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ โดยกำหนดคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ดังนี้ ปริมาณเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยางพารารูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 15 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C39 [14] และบ่มตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน จำนวนชิ้นงานตัวอย่างทดสอบกรณีละ 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 18 ตัวอย่าง หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างทดสอบให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของน้ำหนักกดจนกระทั่งชิ้นตัวอย่างทดสอบถึงจุดประลัยบันทึกราคาน้ำหนักกดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบสามารถรับได้ (ภาพที่ 3) พร้อมทั้งบันทึกสัญลักษณ์การแตกของชิ้นตัวอย่าง

ทดสอบและคำนวณหาความต้านทานแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ดังสมการที่ 1

$$f_c = P_u / A \quad (1)$$

โดยที่

$f_c$  คือ ความต้านทานแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, กก./ซม.<sup>2</sup>

$P_u$  คือ น้ำหนักกดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบรับได้, กก.

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, ซม.<sup>2</sup>



ภาพที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

#### 2.5.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

การศึกษานี้ได้ทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตด้วยวิธีผ่าซีก (Splitting Test) ได้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้ทดสอบหาลำลังดึงของคอนกรีต ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบรูปทรงกระบอกมาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. (ภาพที่ 4) ตามมาตรฐาน ASTM C496 [15] โดยกำหนดตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราส่วนปริมาณเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% จำนวนชิ้นงานตัวอย่างทดสอบกรณีละ 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 18 ตัวอย่าง นำตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มครบตามระยะเวลาที่กำหนด 28 วัน มาทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างทดสอบ วางชิ้นตัวอย่างลงบนเครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ให้ได้



ศูนย์กลางบนแท่งทดสอบ กดขึ้นตัวอย่างทดสอบอย่างช้า ๆ จนกระทั่งแตก (ภาพที่ 4) แล้วบันทึกแรงกดสูงสุดและคำนวณหาค่ากำลังดึงของคอนกรีตดังสมการที่ 2

$$T = 2P/(\pi ld) \quad (2)$$

โดย

T คือ กำลังดึงแยก, กก./ชม.<sup>2</sup>

P คือ แรงกดสูงสุด, กก.

l คือ ความยาวของชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอก, ชม.

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอก, ชม.



ภาพที่ 4 ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

#### 2.5.4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นหรือการหาค่าแรงดัดของคอนกรีตใช้วิธี Simple Beam ทำการหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยาพารา ที่อัตราส่วน P/C เท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% สำหรับใช้ทดสอบหาค่ากำลังดัดของคอนกรีต ตัวอย่างรูปคานทดสอบ ขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 50 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C78 [16] จำนวนชิ้นงานตัวอย่างทดสอบกรณีละ 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 18 ตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาการบ่มแล้ว นำแท่งทดสอบตัวอย่างรูปคาน ติดเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยความยาวของ Span length ต้องไม่ต่ำกว่า 3 เท่าของความลึกของแท่งตัวอย่าง จัดแท่งทดสอบด้านบนให้ตรงกับกึ่งกลางคาน ในกรณีที่ใช้วิธี Center Point Loading เปิดเครื่องกดเพิ่มแรงกดบนแท่ง

ตัวอย่างอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแท่งตัวอย่างแตก (ภาพที่ 5) วัดขนาดของแท่งตัวอย่างที่หน้าตัดที่แตกและคำนวณหาค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ดังสมการที่ 3

$$\sigma = 6M / bd^2 \quad (3)$$

โดย

$\sigma$  คือ กำลังรับแรงดัด, กก./ชม.<sup>2</sup>

M คือ ค่าโมเมนต์สูงสุด, กก.ชม.

b คือ ความกว้างเฉลี่ยของแท่งตัวอย่างที่หน้าตัดที่แตก, ชม.

d คือ ความลึกเฉลี่ยของแท่งตัวอย่างที่หน้าตัดที่แตก, ชม.



ภาพที่ 5 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

#### 2.5.5 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตเพื่อหาค่าแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมชนิดข้ออ้อยที่ฝังอยู่ในก้อนคอนกรีตตัวอย่าง โดยวิธีการดึง (Pull-Out Test) ทำการหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีต รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 15 ซม. (รูปที่ 6) ซึ่งฝังเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน ASTM C 234 [17] ตัวอย่างก้อนคอนกรีตทดสอบผสมน้ำยาพาราที่อัตราส่วน P/C เท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน การทดสอบทำการติดตั้งก้อนตัวอย่างเข้ากับ Bond-Test Apparatus และหัวจับของ Testing Machine เริ่มเปิดเครื่องให้แรงดึงกับเหล็กเสริมบันทึกค่าแรงดึงที่ให้และระยะเลื่อนของเหล็กเสริม ทุก ๆ 0.02 มม. จนกระทั่ง

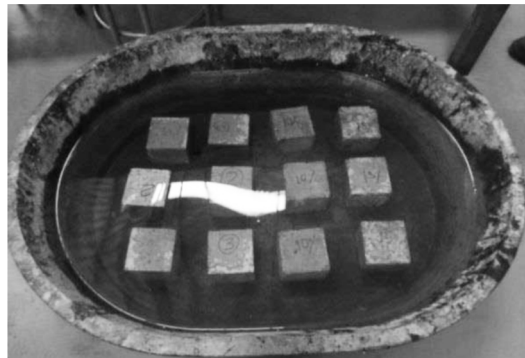
แรงดึงที่ใช้ถึงจุดสูงสุด (ภาพที่ 6) เขียนกราฟระหว่างแรงยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนโกลและคำนวณหาค่ากำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดจากการหารค่าแรงดึงสูงสุดด้วยพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับคอนกรีต



ภาพที่ 6 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมน้ำยางต่อเหล็กเสริม

2.5.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต  
การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1585 [18] เพื่อศึกษาร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตโดยการแช่น้ำ โดยทำการหล่อแบบทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต ในแบบหล่อขนาด 10 ซม. x 10 ซม. x 10 ซม. กำหนดอัตราส่วนของน้ำเนื้อยาคือปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 0%, 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน หลังจากบ่มได้ระยะเวลาที่กำหนด ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ และแช่ตัวอย่างทดสอบลงในน้ำให้ท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 7) เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการเช็ดตัวอย่างทดสอบด้วยผ้า จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบให้เสร็จสิ้นภายใน 5 นาที และทำการคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตดังสมการที่ 4 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต  $= (w' - w_s) / w_s * 100$  (4)

โดยที่  $w'$  คือ น้ำหนักคอนกรีตหลังจากแช่น้ำ (กรัม)  
 $w_s$  คือ น้ำหนักคอนกรีตที่อบแห้ง (กรัม)



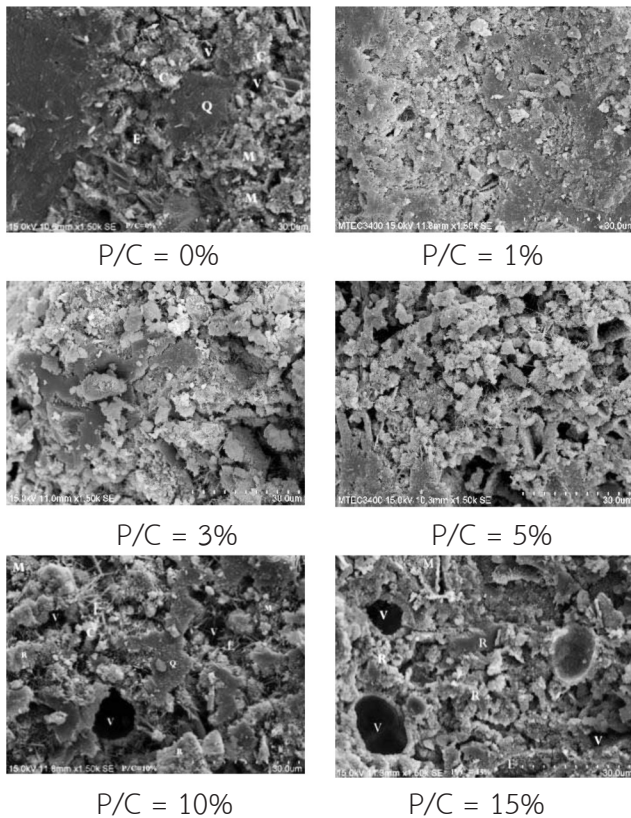
ภาพที่ 7 ทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมน้ำยาง

### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

ผลการศึกษากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงในภาพที่ 8 ซึ่งเป็นภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราดของคอนกรีตไม่ผสมน้ำยางพารา (P/C=0%) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมน้ำยางพารา มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันน้อยและพบว่ามีช่องว่างเล็กๆ จากการวิเคราะห์แร่ธาตุ โดยวิธีเอกซเรย์ สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลัง (Energy Dispersive Spectroscopy X-ray Spectroscopy, EDS) พบว่ามีแร่แคลไซต์ (C) แร่ควอตซ์ (Q) ไมโครไคลน์ (M) และโพรงช่องว่าง (V) สำหรับภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราดของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา P/C เท่ากับ 1% พบโครงสร้างจุลภาคของผิวคอนกรีตผสมน้ำยางพารามีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน จากภาพที่ 8 ลักษณะภาพถ่ายจุลทรรศน์ของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา P/C เท่ากับ 5%, 10% และ 15% จะเห็นได้ว่าเนื้อยาคือวัสดุผสมคอนกรีตเข้ากันไม่เต็มที่และมีรูโพรงช่องว่างอยู่ทั่ว (V) และมีเอทริงไทด (Ettringite) ผลึกเข็ม (E) ยังไม่รวมกันเป็นโครงสร้างแน่นมีเนื้อยาคือที่เห็นได้ชัดมากขึ้น จะเห็นได้ชัดเจนนว่าเนื้อยาคือมีอิทธิพลต่อพื้นผิวของคอนกรีต ทำให้เห็นเนื้อยาคือชัดมากขึ้น มีความไม่สม่ำเสมอและลักษณะของเนื้อยาคือเข้ากันกับวัสดุอื่นได้ไม่ดี ทำให้มีโพรงช่องว่างมากขึ้น

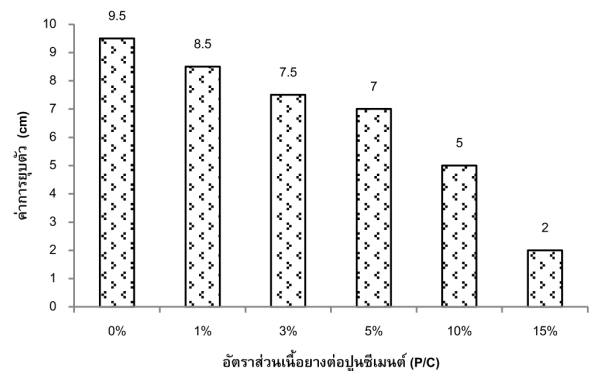




ภาพที่ 8 ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราดของคอนกรีตผสมน้ำ ยางพารา กำลังขยาย 1500 เท่า

### 3.2 ความสามารถในการเทได้

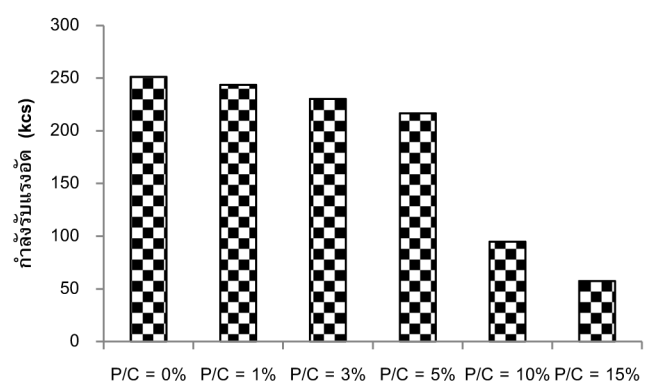
ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตแสดงใน ภาพที่ 9 ค่าการยุบตัวคอนกรีตมาตรฐานที่ไม่ผสมน้ำ ยางพารา (P/C = 0%) เท่ากับ 9.5 เซนติเมตร ในขณะที่ คอนกรีตที่ผสมน้ำยางพารามีค่าการยุบตัวลดลงตามการ เพิ่มปริมาณน้ำยางพาราที่ผสมในคอนกรีต พบว่าการ ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) 1% - 5% ค่าการยุบตัวจะอยู่ในช่วงมาตรฐานเท่ากับ 8.5, 7.5 และ 7 ซม. ที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผสมน้ำยาง ในคอนกรีต P/C มากกว่า 5% ค่าการยุบตัวคอนกรีตจะ ลดลงต่ำกว่าข้อกำหนด



ภาพที่ 9 ค่าความสามารถในการเทได้คอนกรีตโดยวิธี Slump Test

### 3.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสม น้ำยางพารา พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดของ คอนกรีตผสมน้ำยางพาราลดลงดังแสดงในภาพที่ 10 จะ เห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมน้ำยางพารา (P/C = 0%) มีค่ากำลังรับแรงอัด 250 กก./ชม.<sup>2</sup> แต่คุณสมบัติ การรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ที่อัตราส่วน เนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 1%, 3% และ 5% ได้ค่ากำลังรับแรงอัด 244 กก./ชม.<sup>2</sup>, 230 กก./ชม.<sup>2</sup> และ 217 กก./ชม.<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งลดลงประมาณ 3% - 17% และเมื่อผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนเนื้อยางต่อ ปูนซีเมนต์ 10% และ 15% พบว่าความสามารถในการ รับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเหลือเพียง 95 กก./ชม.<sup>2</sup>

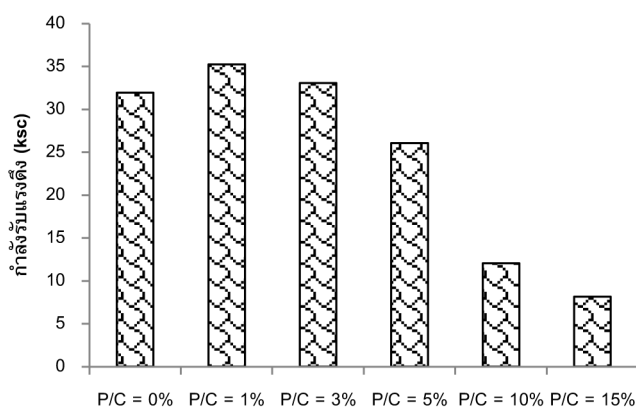


ภาพที่ 10 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางระยะการบ่ม 28 วัน

และ 58 กก./ชม.<sup>2</sup> สาเหตุที่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงมากเนื่องจากในคอนกรีตมีปริมาณเนื้อยางค่อนข้างมากและมีโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตจึงส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต

### 3.4 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ผลการทดสอบแรงดึงคอนกรีตผสมน้ำยางที่ระยะการบ่ม 28 วัน ได้แสดงในภาพที่ 11 พบว่าคอนกรีตมาตรฐาน (P/C = 0%) มีค่ากำลังรับแรงดึง 32 กก./ชม.<sup>2</sup> และคอนกรีตที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 1% และ 3% มีกำลังรับแรงดึงสูงสุด คือ 35 กก./ชม.<sup>2</sup> และ 33 กก./ชม.<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าคอนกรีตมาตรฐานที่ไม่ได้ผสมน้ำยาง ประมาณ 1-3 กก./ชม.<sup>2</sup> แต่กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วน P/C ตั้งแต่ 5% ขึ้นไป ส่งผลทำให้ค่ากำลังดึงลดลงอย่างต่อเนื่อง

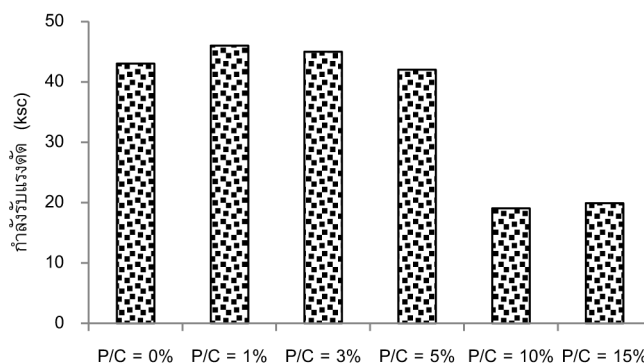


ภาพที่ 11 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมน้ำยางที่ระยะการบ่ม 28 วัน

### 3.5 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังดัดหรือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ระยะการบ่ม 28 วัน (ภาพที่ 12) พบว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 1% ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 46 กก./ชม.<sup>2</sup> แต่คอนกรีตไม่ผสมน้ำยางพารามีค่ากำลังรับแรงดัด 43 กก./ชม.<sup>2</sup> และคอนกรีตผสมน้ำ

ยางพาราที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 10% และ 15% มีค่ากำลังรับแรงดัดค่อนข้างต่ำ 19 กก./ชม.<sup>2</sup> และ 20 กก./ชม.<sup>2</sup> จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 1% และ 3% และ 5% จะมีคุณสมบัติการรับแรงดัดของคอนกรีตสูงกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตมาตรฐาน แต่คอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนมากกว่า 5% ทำให้คุณสมบัติการรับแรงดัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตมาตรฐาน เนื่องจากปริมาณเนื้อยางที่มากเกินไปทำให้เกิดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวจึงส่งผลกระทบต่อแรงดัดของคอนกรีต กำลังรับแรงดัดมีลักษณะสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตกล่าวคือเมื่อผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง แต่เป็นที่น่าสังเกตถ้าผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วน 1% – 3% ทำให้คุณสมบัติการรับแรงดัดของคอนกรีตสูงขึ้นประมาณ 5% – 7%

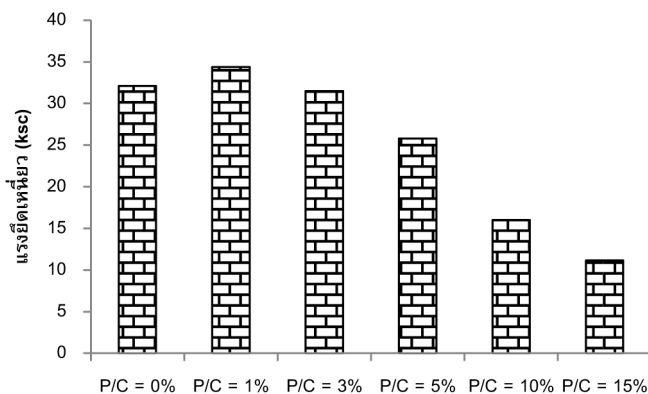


ภาพที่ 12 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมน้ำยางที่ระยะการบ่ม 28 วัน

### 3.6 แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวคอนกรีตต่อเหล็กเสริมเป็นแรงต้านทานที่เกิดจากการยึดติดกันกับซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วได้ทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราของเหล็กข้ออ้อย ผลการทดสอบพบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตไม่ผสมน้ำยางพาราคือ 32 กก./ชม.<sup>2</sup> และคอนกรีต

ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้อยอย่างต่อเนื่อง (P/C) เท่ากับ 1%, 3%, 5%, 10% และ 15% (ภาพที่ 13) ให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 34, 31, 26, 16 และ 11 กก./ชม.2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนน้อยอย่างต่อเนื่อง (P/C) เท่ากับ 1% มีค่าแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมสูงสุดซึ่งมากกว่าคอนกรีตมาตรฐานประมาณ 6% - 8% และเมื่อคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้อยอย่างต่อเนื่อง (P/C) เท่ากับ 10% และ 15% มีค่าแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมลดลงจากคอนกรีตมาตรฐานประมาณ 50% - 65%

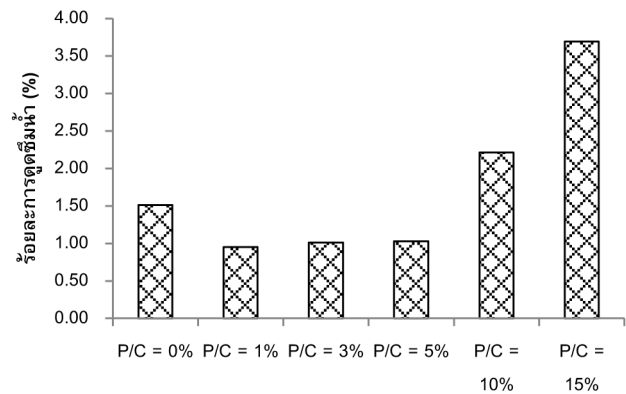


ภาพที่ 13 กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม

### 3.7 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

ผลการเปรียบเทียบการร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้อยอย่างต่อเนื่องที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในภาพที่ 14 พบว่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตไม่ผสมน้ำยางพารา 1.50% และเมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้อยอย่างต่อเนื่อง (P/C) เท่ากับ 10% และ 15% ได้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ 2.21% และ 3.69% ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมน้ำยางพารา (ภาพที่ 14) ประมาณ 0.71% - 2.18% แต่คอนกรีตผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนน้อยอย่างต่อเนื่อง (P/C) เท่ากับ 1%, 3% และ 5% มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.95%, 1.01%

และ 1.03% ซึ่งร้อยละการดูดซึมน้ำต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมน้ำยางพาราแสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนที่เหมาะสมประมาณ 1% - 5% จะทำให้



ภาพที่ 14 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

คอนกรีตมีความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ดังภาพที่ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างพื้นผิวคอนกรีตผสมน้ำยางพารา กำลังขยาย 1500 เท่า ใช้จุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ พบว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนน้อยอย่างต่อเนื่องมากกว่า 5% ลักษณะพื้นผิวคอนกรีตจะมีช่องว่างหรือรูพรุนที่มากกว่าคอนกรีตที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วน P/C เท่ากับ 1% - 5% ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมของน้ำต่ำ

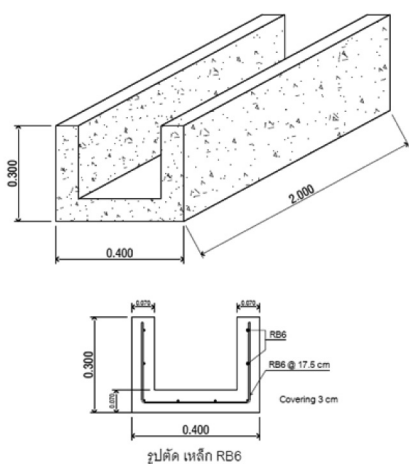
## 4. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้ทำการเลือกอัตราส่วนผสมของคอนกรีตจากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราในห้องปฏิบัติการได้ทำการเลือกอัตราส่วนของน้อยอย่างต่อเนื่อง (P/C) เท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก เนื่องจากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วน P/C เท่ากับ 1% มีคุณสมบัติทางกลและป้องกันการรั่วซึมของน้ำ

ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตไม่ผสมน้ำยาฟาราและคอนกรีตที่ผสมน้ำยาฟาราในอัตราส่วน P/C เท่ากับ 3%, 5%, 10% และ 15% [4] ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนเนื้อยาฟาราปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก ผสมในคอนกรีตสดสำหรับใช้เป็นวัสดุหล่อคูล่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยาฟาราแบบสำเร็จรูป และทำการติดตั้งคูล่งน้ำสำเร็จรูปในพื้นที่แปลงนาของเกษตรกรที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแม่ยม จังหวัดแพร่

#### 4.1 ขนาดหน้าตัดและความยาวของคูล่งน้ำสำเร็จรูป

หลักเกณฑ์การออกแบบรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดของคูล่งน้ำ ปกติกำหนดขนาดกันคูล่งน้ำ เริ่มจาก 30 ซม., 40 ซม. และ 50 ซม. [19] สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดคูล่งน้ำหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกันคูล่งน้ำ 40 ซม. ความสูง 30 ซม. ความหนาของคูล่งน้ำ 7 ซม. ความยาวของคูล่งน้ำ 2 ม. และเสริมเหล็กกลมขนาด 6 มม. ดังแสดงในภาพที่ 15 การทำแบบหล่อคูล่งน้ำ ได้กำหนดขนาด



ภาพที่ 15 รูปแปลนคูล่งน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ของคูล่งน้ำตามภาพที่ 15 ใช้ไม้อัดและไม้เนื้ออ่อนทำแบบหล่อคอนกรีต โดยแยกทำทีละด้าน ประกอบด้วยชิ้นส่วนดังต่อไปนี้ ด้านข้างของแบบหล่อทั้งสองด้านและด้านล่างของแบบหล่อ หลังจากทีเกษตรกรได้ทำแบบหล่อคอนกรีตเสร็จ ทำการผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และเทลงในแบบหล่อคูล่งน้ำที่ได้เตรียมไว้แล้ว ดังภาพที่ 16 และปล่อยให้ให้คอนกรีตผสมน้ำยาฟาราแข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบคูล่งน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 17 และหลังจากถอดแบบแล้วทำการบ่มคูล่งน้ำโดยใช้กระสอบป่านชุบน้ำให้เปียกทุกวัน บ่มเป็นเวลา 28 วัน



ภาพที่ 16 การประกอบแบบหล่อและเทคอนกรีตผสมน้ำยาฟารา





ภาพที่ 17 คู่งน้ำหลังจากที่ถอดแบบเรียบร้อยแล้วและทำการ  
บ่ม 28 วัน

#### 4.2 การปรับพื้นที่แปลงนา

การติดตั้งคู่งน้ำสำเร็จรูปในพื้นที่แปลงนา จะต้องทำการปรับระดับพื้นที่แปลงนาให้ได้ระดับก่อนที่จะมีการติดตั้งคู่งน้ำ โดยใช้รถแทรกเตอร์ไถเปิดหน้าดินตามแนวคู่งน้ำที่ได้กำหนดไว้ (ภาพที่ 18) หลังจากนั้นทำการปรับระดับหน้าดินในพื้นที่นาโดยใช้รถแทรกเตอร์ เมื่อปรับระดับแปลงนาได้ระดับแล้วทำวัดระดับความลาดชันด้วยกล้องวัดระดับ สำหรับเตรียมฐานดินเพื่อวางคู่งน้ำสำเร็จรูป หรือความลาดชันของท้องคู่งน้ำ (ภาพที่ 19) เมื่อได้ระดับความลาดชันตามที่กำหนดไว้ เกษตรกรใช้ทรายปรับระดับความลาดชันของท้องคู่งน้ำก่อนที่จะมีการวางคู่งน้ำสำเร็จรูป



ภาพที่ 18 ปรับหน้าดินในพื้นที่นาโดยใช้รถแทรกเตอร์



ภาพที่ 19 กำหนดความลาดของท้องคู่งน้ำโดยใช้กล้องวัดระดับ

#### 4.3 การติดตั้งคู่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

การติดตั้งคู่งน้ำสำเร็จรูปได้ทำการเคลื่อนย้ายคู่งน้ำด้วยรถบรรทุก (ภาพที่ 20) และนำไปวางบนฐานดินหรือทรายที่ได้ทำการบดอัดให้แน่นเรียบร้อยแล้ว โดยการนำคู่งน้ำสำเร็จรูปไปวางเรียงต่อกันเป็นแนวให้ได้ระดับและความยาวตามที่กำหนดไว้ หลังจากทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วจะได้แนวคู่งน้ำ แสดงในภาพที่ 21-22 ซึ่งเป็นคู่งน้ำที่ได้วางบนฐานทรายบดอัด แต่ยังไม่ได้ทำการยาแนวตามรอยต่อของคู่งน้ำ ดังภาพที่ 23 เกษตรกรทำการผสมวัสดุยาแนวคู่งน้ำหรือมอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา เกษตรกรใช้วัสดุยาแนวทำการยาแนวรอยต่อคู่งน้ำตลอดความยาวคู่งน้ำเพื่อให้คู่งน้ำเชื่อมติดกันและป้องกันการรั่วซึมของน้ำ และใช้รถแทรกเตอร์ไถเปิดหน้าดินสำหรับถมทำคันดินคู่งน้ำในแปลงนาตลอดความยาวคู่งน้ำ (ภาพที่ 24) และภาพที่ 25 คู่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่ได้ทำคันดินและพร้อมที่จะใช้งานในพื้นที่แปลงนา



ภาพที่ 20 เคลื่อนย้ายคูส่งน้ำสำเร็จรูปด้วยรถบรรทุก



ภาพที่ 21 การติดตั้งคูส่งน้ำสำเร็จรูปผสมน้ำยางพารา



ภาพที่ 22 ตัวอย่างคูส่งน้ำสำเร็จรูปที่ได้ทำการติดตั้งในแปลงนา



ภาพที่ 23 เกษตรกรทำการยาแนวรอยต่อคูส่งน้ำ



ภาพที่ 24 รถแทรกเตอร์ไถเปิดหน้าดินสำหรับทำคันคูส่งน้ำ

## 5. การติดตามประเมินผลคูส่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพารา

คณะนักวิจัยได้ติดตามประเมินผลการใช้งานคูส่งน้ำในพื้นที่ศึกษาวิจัยสำหรับฤดูการเพาะปลูกข้าวนาปี (กรกฎาคม – ตุลาคม 2560) จากภาพที่ 25 ภาพคูส่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่ได้ติดตั้งในพื้นที่แปลงนาในช่วงเดือน พฤษภาคม – มิถุนายน 2559 และภาพที่ 26 คูส่งน้ำส่งน้ำขณะใช้งานจริงอยู่ในช่วงฤดูการเพาะปลูกของเกษตรกร (เดือนสิงหาคม)

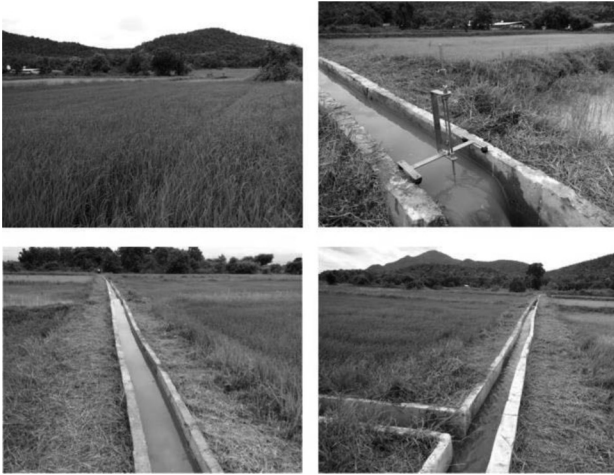


ภาพที่ 25 คูส่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพาราพร้อมใช้งานในพื้นที่แปลงนา



ภาพที่ 26 คูส่งน้ำหลังจากก่อสร้างและคูส่งน้ำขณะใช้งาน

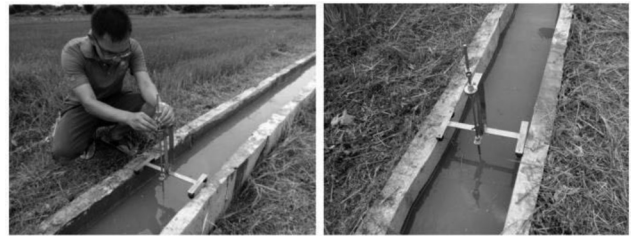




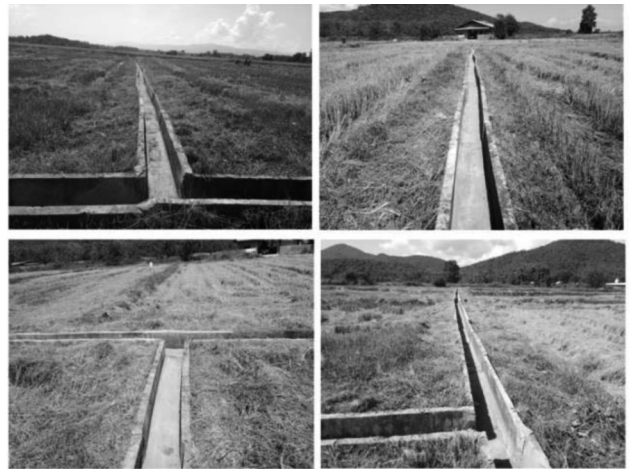
ภาพที่ 27 ภาพคูส่งน้ำขณะใช้งานและบริเวณโดยรอบ

จากการติดตามประเมินผลเบื้องต้นการใช้งานคูส่งน้ำในพื้นที่แปลงนา พบว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่พื้นที่แปลงนาจะไหลได้สะดวกและเร็วเมื่อเทียบกับคูส่งน้ำที่เป็นคูดิน และการรั่วซึมของน้ำในคูส่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยาพารา มีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับคูส่งน้ำคอนกรีตและมีการไหลของน้ำที่ค่อยสะดวกและรวดเร็วทำให้ปริมาณน้ำส่งเข้าพื้นที่แปลงนาได้อย่างเต็มที่และมีการสูญเสียน้ำขณะส่งน้อย จึงทำให้ต้นข้าวได้รับน้ำในปริมาณที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต แต่อย่างไรก็ตามขณะติดตามประเมินผลพบว่าปัญหาที่สำคัญได้แก่การเจริญเติบโตของวัชพืชตามคันคูส่งน้ำมีการขึ้นตามคันคูและปกคลุมคูส่งน้ำเป็นอุปสรรคต่อการไหลของน้ำในคูส่งน้ำและการใช้งาน ดังนั้นเกษตรกรจะต้องมีการกำจัดวัชพืชตามคันคูส่งน้ำอย่างสม่ำเสมอในช่วงฤดูการเพาะปลูก ภาพที่ 27 พื้นที่แปลงนาที่ได้ติดตั้งคูส่งน้ำต้นแบบซึ่งได้รับน้ำจากคูส่งน้ำในช่วงฤดูการเพาะปลูก และภาพที่ 28 ทำการวัดความลึกสูงสุดของน้ำในคูส่งน้ำขณะใช้งาน ซึ่งพบว่าระดับน้ำสูงสุดในคูส่งน้ำอยู่ต่ำกว่าผนังคูส่งน้ำ ประมาณ 5 - 7 ซม. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคูส่งน้ำที่ออกแบบและใช้งานสามารถรับปริมาณน้ำสูงสุดได้โดยปริมาณน้ำจะไม่ล้นผนังคูส่งน้ำ สำหรับภาพที่ 29 เป็นการติดตามประเมินผลคูส่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยาพาราในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวข้าว ช่วงเดือน

ธันวาคม 2560 จะเห็นได้ว่า สภาพของคูส่งน้ำคอนกรีตอยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานได้ปกติไม่พบการแตกร้าวตามผนังและท้องคูส่งน้ำ สภาพคูส่งน้ำพร้อมที่จะใช้งานได้ในช่วงฤดูกาลเพาะปลูกต่อไป



ภาพที่ 28 วัดระดับความลึกของน้ำในคูส่งน้ำ



ภาพที่ 29 ภาพติดตามประเมินผลการใช้งานคูส่งน้ำ ปีที่ 2 หลังฤดูการเก็บเกี่ยว (ธันวาคม 2560)

## 6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผล

การศึกษาและพัฒนาคูส่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยาพาราสำหรับใช้ในระบบชลประทานไร่นา จากผลการศึกษาคุนสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตผสมน้ำยาพารา และการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ภาคสนาม สรุปได้ดังนี้

1) ผลการศึกษาคุนสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตผสมน้ำยาพารา พบว่าคอนกรีตผสมน้ำยาพาราในอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ (P/C)

1% โดยน้ำหนัก ให้คุณสมบัติทางกลและดูดซึมน้ำดีที่สุด ประกอบด้วย กำลังรับแรงอัด 244 กก./ชม.<sup>2</sup> กำลังรับแรงดึง 35 กก./ชม.<sup>2</sup> กำลังรับแรงดัด 46 กก./ชม.<sup>2</sup> แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม 34 กก./ชม.<sup>2</sup> ความสามารถในการเทได้ ค่าการดูดซึมน้ำ 1%

2) อัตราส่วนของคอนกรีตที่ใช้หล่อคูล่งน้ำใช้คอนกรีตส่วนผสม 1 : 2.7 : 3 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนเนื้อยาคอปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1% สำหรับปูนซีเมนต์ 50 กก. (1 ถุง) จะใช้วัสดุต่างๆ ดังนี้ ทราย 135 กก. หินกรวด 148 กก. น้ำ 29.67 กก. และน้ำยางพริวัลคาไนซ์ 0.83 กก. ซึ่งได้แนะนำให้เกษตรกรใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตผสมน้ำยางพาราสำหรับหล่อคูล่งน้ำสำเร็จรูป โดยขนาดคูล่งน้ำมีความยาว 2 ม. ความสูง 30 ซม. ความกว้าง 40 ซม. และความหนาของคูล่งน้ำ 7 ซม. และเสริมเหล็กกลมขนาด 6 มม. ผลการวิเคราะห์ราคาต้นทุนค่าก่อสร้างคูล่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพารา 820 บาทต่อความยาว 1 ม. และราคาค่าก่อสร้างคูล่งน้ำคอนกรีตมาตรฐานเท่ากับ 710 บาทต่อความยาว 1 ม.

3) ได้ทำการติดตั้งคูล่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพาราสำเร็จรูป มีความยาวประมาณ 150 ม. ในแปลงนาของเกษตรกร ที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแม่ยม จังหวัดแพร่ และได้ทำการติดตามประเมินผลการใช้งานของคูล่งน้ำต้นแบบที่ได้ทำการติดตั้งในแปลงนา ระยะในช่วงฤดูการเพาะปลูกข้าวของเกษตรกร (เดือนสิงหาคม) พบว่าคูล่งน้ำที่ได้ติดตั้งในแปลงนามีความสามารถในการส่งน้ำเข้าแปลงนาได้เป็นอย่างดี และลดการรั่วซึมของน้ำได้ดีจึงทำให้ปริมาณน้ำไหลเข้าสู่แปลงนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามิวซ์พืชขึ้นตามคันคูล่งน้ำ ดังนั้นเกษตรกรควรหมั่นกำจัดวัชพืชตามคันคูล่งน้ำในฤดูฝน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ควรใช้คอนกรีตผสมน้ำยางพาราครั้งเดียวกันสำหรับหล่อชิ้นงานทดสอบ และการบ่มชิ้นงานตัวอย่างคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ไม่ควรบ่มในน้ำหรือบ่มด้วยพลาสติก ควรบ่มโดยการปล่อยทิ้งไว้ให้ครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำไปทดสอบ เนื่องจากถ้าบ่มด้วยน้ำหรือพลาสติกจะทำให้เนื้อภายในคอนกรีตมีความชื้น เวลานำไปทดสอบจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ แต่สำหรับการบ่มคูล่งน้ำสำเร็จรูปแนะนำให้ใช้กระสอบป่านชุบน้ำให้เปียกแล้วคลุมคูล่งน้ำ

2) การผสมน้ำยางในคอนกรีตจะต้องผสมน้ำและน้ำยางรวมกันก่อนเพื่อลดความเข้มข้นของน้ำยาง และการผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนเนื้อยาคอปูนซีเมนต์ (P/C) มากกว่า 5% ควรใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุในน้ำยางพาราเพื่อไม่ให้น้ำยางจับตัวกับปูนซีเมนต์และทำให้เป็นก้อนยางขึ้นเล็กๆ ในคอนกรีต

3) ควรใช้แบบหล่อคูล่งน้ำที่เป็นแบบหล่อเหล็ก หรือทำแบบหล่อสำเร็จรูปที่เป็นแบบหล่อเหล็ก จะทำให้ได้ขนาดคูล่งน้ำที่ได้มาตรฐาน

4) ควรมีการวางแผนการศึกษาวิจัยในระดับแปลงนา เช่น ช่วงเวลาที่จะทำการปรับพื้นที่แปลงนา ช่วงเวลาในการติดตั้งคูล่งน้ำในแปลงนา ควรหลีกเลี่ยงการทำการปฏิบัติงานในช่วงฤดูฝนหรือฤดูการเพาะปลูกของเกษตรกร เนื่องจากปริมาณฝนและน้ำในคลองชลประทานจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงานภาคสนามได้

5) ควรมีการติดตามประเมินผลการใช้งานคูล่งน้ำคอนกรีตผสมน้ำยางพาราในพื้นที่แปลงนาหลังจากติดตั้งใช้งาน ในระยะเวลา 2 - 3 ปี เพื่อสรุปผลการใช้งานจริงและนำไปสู่การถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ เช่น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาและกลุ่มเกษตรกรผู้สนใจ ฯลฯ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) หรือ สวก. และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มเกษตรกร โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแม่ยม จังหวัดแพร่ ที่เข้าร่วมโครงการวิจัยภาคสนาม นอกจากนี้ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม และกองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้ห้องปฏิบัติการคอนกรีต คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

## 8. บรรณานุกรม

- (1) พีรวัฒน์ ปลาเงิน 2558. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราและดินซีเมนต์พัฒนาสระน้ำด้านท้ายแล้ง. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- (2) พีรวัฒน์ ปลาเงิน, ขวน จันทวาลย์, สมพร พิบูลย์ และรุกลพัศ เจนจิวัฒน์กุล 2559. การถ่ายทอดเทคโนโลยีประยุกต์ใช้น้ำยางพาราในงานบำรุงรักษาระบบชลประทาน. วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ฉบับที่ 14, หน้า 117 - 129.
- (3) พีรวัฒน์ ปลาเงิน 2549. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ การศึกษาการรั่วซึมของน้ำในแบบจำลองคลองชลประทานผสมน้ำยางพารา. โครงการวิจัยแห่งชาติ : ยางพารา, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (สกว.).
- (4) พีรวัฒน์ ปลาเงิน และขวน จันทวาลย์ 2559. รายงานการวิจัยและการพัฒนาวิจัยการเกษตรฉบับสมบูรณ์ การพัฒนาคลองชลประทานผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้ในระบบชลประทานไร่นา สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) : สวก.
- (5) พีรวัฒน์ ปลาเงิน, ขวน จันทวาลย์, สมพร พิบูลย์ และรุกลพัศ เจนจิวัฒน์กุล 2559. รายงานกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยการถ่ายทอดเทคโนโลยีประยุกต์ใช้น้ำยางพาราในงานบำรุงรักษาระบบชลประทาน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- (6) B. Chatveera, W. Wongkamjan, 2001. Mechanical Behavior of Fine RHA Concrete, *KMUTT Research and Development Journal*, 24 (3), p. 327-342.
- (7) ณ B. Chatveera, T. Kongsu, 2002. Durability of Concrete Containing Black RHA from Rice Mill, *KMUTT Research and Development Journal*, 25 (4), p. 374-389.
- (8) W. Homsriprasert, B. Chatveera, 2016. Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks, *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (2), p. 271-286.
- (9) T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, P. Chindaprasit, 2016. Influence of Sand to Binder Ratio on Properties of Geopolymer Mortar Containing Portland Cement, *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (2), p. 127-137.
- (10) วราภรณ์ ขจรไชยกุล 2554. เอกสารประกอบการบรรยาย โครงการถ่ายทอดความรู้วิชาการพื้นฐานด้านยางพาราสำหรับนักวิจัยเพื่อพัฒนาข้อเสนอโครงการวิจัยยางพารา. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย 3 - 6 สิงหาคม 2554.
- (11) American Society for Testing and Materials, 2009. ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates, *ASTM International, Book of Standards*, Vol. 04-02, West Conshohocken, PA.
- (12) วราภรณ์ ขจรไชยกุล 2549. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน, สกว., พิมพ์ครั้งที่ 1 สิงหาคม 2554.
- (13) American Society for Testing and Materials, 2009. ASTM C143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- (14) American Society for Testing and Materials, 2009. ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.
- (15) American Society for Testing and Materials, 2009. ASTM C496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- (16) American Society for Testing and Materials, 2009. ASTM C78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- (17) American Society for Testing and Materials, 2009. ASTM C234 Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing

Steel, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

- (18) American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C1585 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

- (19) เนาวรัตน์ ป้อมเพชร 2526. หลักเกณฑ์การออกแบบระบบชลประทานในแปลงนา. เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการทำงานชลประทาน, กรมชลประทาน, กรุงเทพมหานคร.

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์  
กับปริมาณความชื้นเมล็ดข้าวเปลือก

Relationship between Color Values of Paper Coated with Cobalt Chloride  
and Paddy Moisture Content

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์<sup>1</sup>

Assistant Professor Dr. Siwalak Pathaveerat<sup>1</sup>

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรีองาม<sup>2\*</sup>

Assistant Professor Dr. Pimpan Pruengam<sup>2\*</sup>

<sup>1,2\*</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

<sup>1,2\*</sup> Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Kasetsart University -Kam-  
phaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

\*Corresponding Author: fengpppn@ku.ac.th

(Received: April 25, 2019, Revised: June 6, 2019, Accepted: June 12, 2019)

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ และศึกษาถึงระยะเวลาการวัด (During Time) ที่เหมาะสม โดยนำกระดาษ 100 ปอนด์ แช่ในสารละลายสารโคบอลต์ (II) คลอไรด์ ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) และ เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) อัตราส่วน 1 : 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำข้าวเปลือกและกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์บรรจุในโหลแก้ว โดยให้มีช่องว่างอากาศ (Head Space) ในขวด 50% ปิดฝาเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที ผลการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ในข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10-24%w.b. พบว่า กระดาษจะค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากฟ้าเป็นชมพูเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และเมื่อประเมินในระบบ CIE พบว่า เมื่อความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ค่า  $L^*$  มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน การหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของช่องว่างอากาศในโหลแก้วนั้น ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศมีเปลี่ยนแปลง จากการทดลองพบว่า ควรเก็บข้าวเปลือกในโหลแก้วนานอย่างน้อย 45 นาที จึงจะเพียงพอให้ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกกระจายตัวจนกระทั่งความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศต่าง ๆ เกิดสมดุล

**คำสำคัญ :** การหาความชื้น โคบอลต์คลอไรด์ กระดาษ ค่าสี ความชื้นสัมพัทธ์



**Abstract :** This research is a study of the relationship between moisture content of paddy and the color changing of the cobalt chloride coated paper. The optimum during time was determined by soaking 100 pounds of paper in a solution of cobalt (II) chloride ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) and methyl alcohol in ratio of 1: 4 ratio at 60 °C for 3 and 4 hours, respectively. The paddy and paper coated with cobalt chloride were carried out in glass jar with head space 50% and closed the lid for a period of either 30 45 and 60 min. The results of the experiment to measure the color changing of cobalt chloride coated paper in paddy with moisture content was 10-24%w.b. showed that the paper color was slowly changed from blue to pink with an increase in the moisture content. The evaluation using the CIE color system found that the value of  $L^*$  was slightly changed with an increase in the paddy moisture content, while the value of  $a^*$  and  $b^*$  values were changed clearly. Determination of paddy moisture content by measuring the relative humidity of the head space in the glass jar associated with the paddy moisture content was caused the relative humidity in the head space to change. From the experiment found that should keep paddy in a glass jar for at least 45 min, so it would be sufficient to allow the paddy moisture content to spread until the relative humidity in the head space was balanced.

**Keywords :** Moisture Determination, Cobalt Chloride, Paper, Color Value, Relative Humidity

## 1. บทนำ

ข้าวเป็นอาหารหลักที่บริโภคภายในประเทศและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย โดยปี พ.ศ. 2559 ไทยมีปริมาณส่งออก 9.88 ล้านตันข้าวสาร คิดเป็นส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 29.97 ของการส่งออกข้าวโลก [1] ข้าวที่ไทยส่งออกส่วนใหญ่เป็น ข้าวเจ้าขาว ข้าวเหนียว และข้าวหอมมะลิ ทำรายได้เข้าประเทศหลายแสนล้านบาท ในสถานะที่การค้าข้าวในตลาดโลกมีการแข่งขันสูง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวโดยยึดอายุการเก็บรักษาด้วยการลดความชื้นจากกระบวนการทางความร้อน เช่น การอบแห้ง เป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ข้าวได้

ปัจจุบันการปลูกข้าวในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) ข้าวนาปี จะเริ่มปลูกตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมและเก็บเกี่ยวสิ้นสุดไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์ (2) ข้าวนาปรัง เริ่มปลูกตั้งแต่เดือนมกราคมนิยมปลูกในท้องที่ที่มีการชลประทานดี เช่น ในภาคกลาง

[2] และเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูฝน ทำให้ข้าวที่เก็บเกี่ยวยังมีความชื้นสูง

หลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกจะมีความชื้นสูงประมาณ 24-30% w.b. อาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของข้าวขึ้น เช่น ข้าวสารเกิดสีเหลืองเนื่องจากความร้อน ซึ่งมาจากการหายใจของข้าวเปลือก และเกิดข้าวเน่าข้าวบูด ซึ่งมาจากเชื้อราที่เจริญเติบโตได้ดี ข้าวมีคุณภาพการสีต่ำ เมล็ดพันธุ์เสื่อมความงอกเร็ว [3] ดังนั้นต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ประมาณ 12-14% w.b. จึงจะปลอดภัยต่อการเก็บรักษาโดยปราศจากการทำลายของแมลงและการเจริญเติบโตของเชื้อรา นอกจากนี้กระบวนการลดความชื้นที่เหมาะสมยังส่งผลต่อคุณภาพข้าวหลังการสีซึ่งเป็นเกณฑ์คุณภาพข้าวที่สำคัญ

การลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เครื่องอบ ได้แก่ เทคนิคสเปาเต็ดเบด (Spouted Bed) และเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized Bed) ซึ่ง

เป็นการอบแห้งในระดับโรงสี และวิธีทางธรรมชาติ คือ การตากข้าวเปลือกบนลานโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นวิธีที่นิยมกันโดยแพร่หลาย ในส่วนของเกษตรกรจะใช้ผ้าพลาสติกหรือถุงปุ๋ยวางรองบนลานดิน และต้องคอยกลับข้าวเปลือกบ่อยๆ เพื่อให้ข้าวเปลือกแห้งทั่วถึงและเร็วขึ้น การลดความชื้นทำให้เกษตรกรจำหน่ายข้าวได้ราคาดีขึ้น สำหรับเกษตรกรที่ต้องการเก็บข้าวไว้นาน 2-3 เดือน ต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้เหลือประมาณ 14%w.b. และหากลดความชื้นของเมล็ดข้าวได้ต่ำกว่า 12%w.b. จะสามารถเก็บข้าวได้มากกว่า 3 เดือน [4] ระหว่างการเก็บรักษาในยุ้งฉางการประเมินค่าความชื้นของกองข้าวเปลือกจึงเป็นสิ่งสำคัญ

การหาความชื้นในเมล็ดพืชสามารถทำได้หลากหลายวิธี [5, 6] ทั้งการวัดแบบทางตรง ซึ่งให้ความแม่นยำสูงแต่ต้องเสียเวลาในการปฏิบัติงานมีขั้นตอนมาก และการวัดแบบทางอ้อมสามารถตรวจวัดค่าความชื้นในเมล็ดพืชได้รวดเร็วกว่า

1. การวัดความชื้นโดยตรง (Direct Method) คือ การหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ด โดยอาศัยหลักการอบเมล็ดด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อไล่น้ำที่มีอยู่ในเมล็ดให้ออกไป ปริมาณน้ำที่ถูกไล่ออกจากเมล็ดคือ ความชื้นของเมล็ดนั่นเอง วิธีการวัดโดยตรงเป็นการวัดที่ทำลายตัวอย่างแต่ละวิธีจะมีความถูกต้องแตกต่างกัน วิธีที่มีการยอมรับกันทั่วไปว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูง จะนิยมใช้เป็นค่าความชื้นมาตรฐานเพื่อใช้ปรับเทียบค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการอื่นๆ ก่อนนำค่าที่ได้ไปใช้ประโยชน์ การวัดทางตรงสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1.1 การใช้ตู้อบไฟฟ้า (Hot Air Oven) เป็นการไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากเมล็ดพืชตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยการนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบ แล้วจึงชั่งน้ำหนักเมล็ดพืชแห้งหลังจากที่ไล่ความชื้นออกไปจนหมด แล้วเอาไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดพืช สำหรับอุณหภูมิที่ใช้อบมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดพืชและมาตรฐานที่ใช้วัด

1.2 การกลั่น (Distillation) ใสเมล็ดพืชลงในน้ำมัน หรือใสเมล็ดพืชที่บดเป็นผงลงในตัวทำละลายโทลูอีน (Toluene) และทำให้ร้อน น้ำมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมัน จะระเหยออกมาก่อน โดยผ่านไอน้ำเข้าเครื่องควบแน่นได้หยดน้ำ ซึ่งก็คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช

1.3 การใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ (Infrared and Microwave Radiation) เป็นการใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ เพื่อระเหยน้ำในแป้งที่ได้จากการบดตัวอย่างเมล็ดพืช

2. วิธีโดยอ้อม (Indirect Method) จะเป็นการใช้คุณสมบัติอื่นของวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้าหรือคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริก (Dielectric) วิธีการนี้จะใช้เครื่องมือในการวัดโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมล็ดพืช เป็นวิธีที่รวดเร็วแต่ค่าที่ได้มีความถูกต้องต่ำเนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความชื้นจะต้องมีการตรวจสอบกับค่าวิธีพื้นฐานมี 2 วิธี

2.1 การใช้ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Electrical Resistance Method) เนื่องจากความต้านทานหรือการนำไฟฟ้าของวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นภายใน ดังนั้นเมื่อทราบความต้านทานไฟฟ้าของเมล็ดพืชก็สามารถเปรียบเทียบเป็นค่าความชื้นได้ การวัดโดยวิธีนี้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ อุณหภูมิเมล็ดพืช ความชื้น และความหนาแน่น (การอัดตัวของเมล็ด) ในการวัดค่าความต้านทานนั้น เมล็ดพืชจะถูกบดอัดอยู่ระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่น ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ค่าความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องวัด คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างเมล็ดพืช ข้อดีคือเป็นการวัดที่ง่ายและรวดเร็ว เครื่องมีขนาดเล็กกระทัดรัดพกพาสะดวก ข้อเสียคือ ความผิดพลาดจากการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ดไม่สม่ำเสมอ เช่น เมล็ดพืชที่เพิ่งผ่านการลดความชื้นค่าที่วัดได้จะต่ำ เพราะที่ผิวของเมล็ดจะแห้งกว่าภายในเมล็ด และเมล็ดพืชที่เปียกจากฝนหรือแช่น้ำ ค่าที่วัดได้จะสูงเพราะที่ผิวของเมล็ดจะชื้นกว่าภายในเมล็ด

2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของเมล็ดพืช (Dielectric Methods, Capacitance) ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุขึ้นอยู่กับค่าความชื้นและความสามารถของตัวเก็บประจุ (Condensor) หรือค่าความจุไฟฟ้าเป็นผลมาจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใส่อยู่ระหว่างแผ่นคู่ขนานของตัวเก็บประจุ โดยวัสดุที่มีความชื้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) สูง วัสดุที่แห้งจะมีค่าน้ำบริสุทธิ์คงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 ที่ 20 องศาเซลเซียส ข้อดีคือมีความผิดพลาดน้อยกว่าเพราะการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ดไม่มีผลต่อการวัดโดยวิธีนี้ ข้อเสียคือการอัดตัวของเมล็ดหรือความหนาแน่นของเมล็ด จะมีผลต่อการวัดค่าความชื้นมากกว่าแบบวัดค่าความต้านทาน

ในปี 2017 Michael Reid and Jim Thompson [7] ได้สร้าง DryCard™ จากกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เป็นเครื่องมือที่ง่ายต่อการใช้งานในการตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ เกษตรกรสามารถใช้ในการตรวจวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ช่วยลดการสูญเสียของอาหาร ป้องกันการเกิดเชื้อราและสารพิษที่เกี่ยวข้อง

การใช้ประโยชน์จากสารโคบอลต์คลอไรด์นั้น มีการประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายด้าน เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพชลประทานการใช้น้ำแก้ต้นกาแฟในประเทศเคนยา โดยให้น้ำแก้ต้นกาแฟเมื่อจำเป็นเท่านั้น ทำให้เพิ่มผลผลิตพืชต่อพื้นที่ใช้ [8] การใช้โคบอลต์คลอไรด์ต่ำกว่า 5 mM ที่ไม่เป็นพิษทำให้เซลล์ขน (Hair Cell) ของเส้นข้างลำตัวของปลาม้าลายมีความคมชัด [9] การใช้โคบอลต์คลอไรด์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์เยื่อบุฟันในมนุษย์ (hDPC) ให้ผลคล้ายกับการใช้ Hypoxia (การขาดออกซิเจน) ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสเต็มเซลล์ เนื่องจากโคบอลต์คลอไรด์เป็นสารเคมีที่เลียนแบบการขาดออกซิเจน และนอกจากนี้ยังพบว่า การใช้โคบอลต์คลอไรด์จะเพิ่มจำนวนเซลล์ต้นกำเนิด (Stem Cells) [10] ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นๆ ของโลก แต่ชาวนาส่วนใหญ่ยังคงยากจน เนื่องจาก (1) ผลผลิตต่อไร่ต่ำ (2) ต้นทุนการผลิตสูง ได้แก่ ค่าเช่านา ค่าจ้าง

ไถ หว่าน ดำ ใส่ปุ๋ย ค่ากำจัดวัชพืชและแมลงศัตรูข้าว ตลอดจนค่าเก็บเกี่ยว และ (3) เกษตรกรขายข้าวได้ต่ำกว่าราคาราคาทุน เนื่องจากการหักกำไรของพ่อค้าคนกลาง [11] สอดคล้องกับแผนพัฒนาการเกษตร ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560 – 2564) [12] ซึ่งระบุว่า คราวเรือนเกษตรไทยมีแนวโน้มเป็นหนี้สินเพิ่มขึ้น และส่วนใหญ่เป็นหนี้ที่ใช้เพื่อการลงทุนของทรัพย์สินเกษตร ซึ่งปัจจัยการผลิตซึ่งมีราคาสูงขึ้น

เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเมล็ดข้าว ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของข้าว รวมทั้งใช้เป็นข้อกำหนดในการซื้อขายด้วย ความชื้นที่สูงเกินมาตรฐานจะถูกหักลดน้ำหนักหรือราคาต่อหน่วยลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ และศึกษาถึงระยะเวลาการวัด (During Time) ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มทางเลือกในการประเมินปริมาณความชื้นข้าวเปลือก โดยไม่มีการสูญเสียตัวอย่าง กระดาษเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกและยังมีต้นทุนต่ำด้วย จึงน่าจะเหมาะแก่การใช้งานสำหรับเกษตรกรที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกล

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมล็ดพืชมีคุณสมบัติที่เรียกว่า ไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic) โดยเมล็ดพืชที่มีความดันไอน้ำแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช ทำให้เมล็ดสามารถรับ หรือถ่ายเทความชื้นให้กับบรรยากาศรอบๆ เมล็ดได้ การถ่ายเทความชื้นนี้เกิดขึ้นจนกว่าถึง จุดสมดุล ซึ่งเป็นจุดที่เมล็ดมีความชื้นคงที่ [13]

เมื่อปล่อยให้เมล็ดข้าวสัมผัสกับอากาศในภาวะปิดจนความชื้นของเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ความชื้นของเมล็ดข้าว นั่นคือ ความชื้นสมดุล ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ วัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) หรือความดัน

ไอน้ำในอากาศที่อิ่มตัว ส่งผลต่อความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ของเมล็ด เช่น ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 60% เป็น 80% ที่

อุณหภูมิเดียวกัน 35 องศาเซลเซียส พบว่า ในข้าวเมล็ด ยาวมีความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นจาก 12.2% เป็น 15.3% ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความชื้นสมดุลของข้าวเมล็ดยาว [14]

| Temp.<br>(°C) | Relative humidity (%) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|               | 25                    | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 55   | 60   | 65   | 70   | 75   | 80   | 85   | 90   |
| 1.7           | 9.2                   | 10.1 | 10.9 | 11.7 | 12.5 | 13.3 | 14.1 | 14.9 | 15.7 | 16.6 | 17.6 | 18.6 | 19.8 | 21.3 |
| 4.4           | 9.0                   | 9.9  | 10.7 | 11.5 | 12.3 | 13.0 | 13.8 | 14.6 | 15.4 | 16.3 | 17.2 | 18.2 | 19.4 | 20.9 |
| 7.2           | 8.8                   | 9.7  | 10.5 | 11.2 | 12.0 | 12.8 | 13.5 | 14.3 | 15.1 | 15.9 | 16.9 | 17.9 | 19.0 | 20.5 |
| 10.0          | 8.6                   | 9.5  | 10.3 | 11.0 | 11.8 | 12.5 | 13.3 | 14.0 | 14.8 | 15.7 | 16.5 | 17.5 | 18.7 | 20.1 |
| 12.8          | 8.5                   | 9.3  | 10.1 | 10.8 | 11.5 | 12.3 | 13.0 | 13.8 | 14.5 | 15.4 | 16.3 | 17.2 | 18.4 | 19.8 |
| 15.6          | 8.3                   | 9.1  | 9.9  | 10.6 | 11.3 | 12.1 | 12.8 | 13.5 | 14.3 | 15.1 | 16.0 | 16.9 | 18.1 | 19.5 |
| 18.3          | 8.2                   | 8.9  | 9.7  | 10.4 | 11.1 | 11.9 | 12.6 | 13.3 | 14.1 | 14.9 | 15.7 | 16.7 | 17.8 | 19.2 |
| 21.1          | 8.0                   | 8.8  | 9.5  | 10.3 | 11.0 | 11.7 | 12.4 | 13.1 | 13.8 | 14.6 | 15.5 | 16.4 | 17.5 | 18.9 |
| 23.9          | 7.9                   | 8.7  | 9.4  | 10.1 | 10.8 | 11.5 | 12.2 | 12.9 | 13.6 | 14.4 | 15.2 | 16.2 | 17.2 | 18.6 |
| 26.7          | 7.8                   | 8.5  | 9.2  | 9.9  | 10.6 | 11.3 | 12.0 | 12.7 | 13.4 | 14.2 | 15.0 | 15.9 | 17.0 | 18.3 |
| 29.4          | 7.6                   | 8.4  | 9.1  | 9.8  | 10.5 | 11.1 | 11.8 | 12.5 | 13.2 | 14.0 | 14.8 | 15.7 | 16.8 | 18.1 |
| 32.2          | 7.5                   | 8.3  | 9.0  | 9.6  | 10.3 | 11.0 | 11.6 | 12.3 | 13   | 13.8 | 14.6 | 15.5 | 16.5 | 17.8 |
| 35.0          | 7.4                   | 8.1  | 8.8  | 9.5  | 10.2 | 10.8 | 11.5 | 12.2 | 12.9 | 13.6 | 14.4 | 15.3 | 16.3 | 17.6 |
| 37.8          | 7.3                   | 8.0  | 8.7  | 9.4  | 10.0 | 10.7 | 11.3 | 12.0 | 12.7 | 13.4 | 14.2 | 15.1 | 16.1 | 17.4 |

เมล็ดพืชที่ถูกเก็บรักษาไว้ในสภาพแวดล้อมแบบปิด เช่น การบรรจุใส่ถุง หรือไซโล จะทำให้อากาศรอบเมล็ด พืชถูกจำกัด ไม่มีการแลกเปลี่ยนหมุนเวียนกับอากาศ ภายนอก ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในที่ปิดนั้น จะเข้าสู่ภาวะสมดุลกับความชื้นในเมล็ดพืช จนกระทั่ง เป็นความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium Relative Humidity) และหากเมล็ดที่อยู่ในไซโลความชื้นสูงจะทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูงตามด้วย ส่งผลให้อากาศเกิดเชื้อ

ราและการสูญเสียการออกสูงขึ้น เช่น ในไซโลที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ข้าวเปลือกจะ มีความชื้นประมาณ 12.8% ปกติต่อการเก็บรักษา แต่ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นเป็น 81% จะส่งผลให้ความชื้น ของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นเป็น 14.6% ซึ่งเป็นระดับความชื้น ที่ข้าวเปลือกมีแนวโน้มจะเสื่อมคุณภาพ ดังแสดงในตาราง ที่ 2 โดยทั่วไปแล้วความชื้นสัมพัทธ์ในไซโลหรือที่เก็บรักษา ควรมีค่าไม่เกิน 65% จึงจะปลอดภัย

## ตารางที่ 2 ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกในสภาวะต่างๆ [15]

| Range  | RH (%) | Temperature (°C) |      |      |      |      |      |      |
|--------|--------|------------------|------|------|------|------|------|------|
|        |        | 22               | 24   | 28   | 32   | 36   | 40   | 44   |
| Safe-1 | 50     | 11.2             | 10.9 | 10.7 | 10.5 | 10.2 | 10   | 9.9  |
|        | 55     | 11.7             | 11.5 | 11.2 | 11   | 10.8 | 10.6 | 10.4 |
| Safe-2 | 60     | 12.3             | 12   | 11.8 | 11.6 | 11.4 | 11.2 | 11   |
|        | 65     | 12.7             | 12.6 | 12.4 | 12.2 | 12   | 11.8 | 11.6 |
|        | 70     | 13.5             | 13.3 | 13.1 | 12.8 | 12.6 | 12.5 | 12.3 |
| Unsafe | 75     | 14.3             | 14   | 13.8 | 13.6 | 13.4 | 13.2 | 13   |
|        | 77     | 14.6             | 14.3 | 14.1 | 13.9 | 13.7 | 13.5 | 13.4 |
|        | 79     | 14.9             | 14.7 | 14.5 | 14.3 | 14.1 | 13.9 | 13.7 |
|        | 81     | 15.3             | 15.1 | 14.9 | 14.6 | 14.5 | 14.3 | 14.1 |
|        | 83     | 15.7             | 15.7 | 15.3 | 15.1 | 14.9 | 14.7 | 14.5 |
|        | 85     | 16.1             | 15.9 | 15.7 | 15.5 | 15.3 | 15.1 | 15   |
|        | 87     | 16.6             | 16.4 | 16.2 | 16   | 15.8 | 15.6 | 15.5 |
|        | 89     | 17.2             | 17   | 16.8 | 16.6 | 16.4 | 16.2 | 16.1 |
|        | 91     | 17.9             | 17.7 | 17.5 | 17.3 | 17.1 | 16.9 | 16.7 |

### หมายเหตุ

Safe-1 :ปลอดภัยสำหรับเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์

Safe-2 : ปลอดภัยสำหรับขัดสีและจำหน่าย

Unsafe : เมล็ดมีความชื้นสูงและจำเป็นต้องลดความชื้น

## 3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

### 3.1 การเตรียมกระดาษเคลือบสารโคบอลต์ (II) คลอไรด์ ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลของน้ำ (Hexahydrate) เมื่อปราศจากความชื้น สาร  $\text{CoCl}_2$  จะเป็นผงสีขาว แต่เมื่อสารได้รับความชื้นจะกลายเป็นผลึกสีชมพู คุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาความชื้นหรือการคายน้ำ และการเปลี่ยนสีของโคบอลต์คลอไรด์จากสีน้ำเงินจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพู [16]

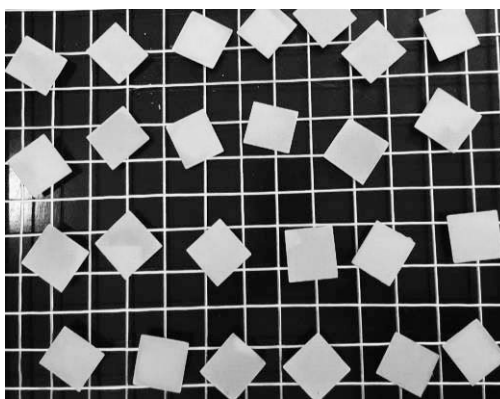
1. ผสมสารโคบอลต์ (II) คลอไรด์ และเมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) ในอัตราส่วน 1 : 4 โดยน้ำหนัก สารละลายในสถานะของเหลว ณ อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส

2. นำกระดาษ 100 ปอนด์ มาแช่ไว้ในสารละลายโคบอลต์ (II) คลอไรด์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กระดาษจะเป็นสีน้ำเงินเข้ม ดังภาพที่ 1 จากนั้นนำกระดาษมาผึ่งให้แห้งหมาด



ภาพที่ 1 กระดาษที่แช่ในสารละลาย

3. อบกระดาษด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กระดาษเคลือบสารโคบอลต์ (II) คลอไรด์ที่อบจนแห้ง

4. นำกระดาษที่ได้มาตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  (มีต้นทุนประมาณ 1.5 บาท/แผ่น) เพื่อเตรียมทดสอบความชื้นในขวดแก้ว

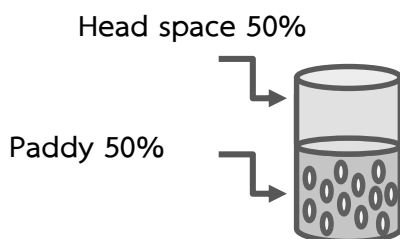


### 3.2 การเตรียมข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองคือข้าวเปลือกพันธุ์ กข 29 หรือ ชัยนาท 80 และมีความชื้นเริ่มต้นที่ประมาณ 28-30% w.b. จากนั้นแบ่งข้าวเปลือกเข้าตู้อบ 60 องศาเซลเซียส เพื่อลดความชื้นให้อยู่ในช่วง 10-24%w.b. เก็บข้าวแต่ละความชื้นแยกบรรจุถุงไว้ ก่อนทำการทดลอง นำข้าวเปลือกมาตรวจวัดความชื้นซ้ำอีกครั้ง

### 3.3 การทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ในแต่ละระดับความชื้นของข้าวเปลือก

1. นำข้าวเปลือกที่ระดับความชื้น 10%w.b. และกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ บรรจุในโหลแก้ว ขนาด 450 มล. โดยให้มีช่องว่างอากาศ (Head Space) ในขวด 50% ดังแสดงในภาพที่ 3 ปิดฝาเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที



ภาพที่ 3 ช่องว่างอากาศในขวดแก้วที่บรรจุข้าวเปลือก

2. เมื่อครบระยะเวลา (During Time) 30, 45 และ 60 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4 เก็บกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ออกจากขวดแก้ว เก็บใส่ถุงซิปล็อคแล้วปิดทันที



ภาพที่ 4 สีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ที่บรรจุในโหลแก้วกับข้าวเปลือกความชื้น 22 %w.b. เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที

3. นำข้าวเปลือกทุกระดับความชื้นมาทดลอง และทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.4 การวัดค่าสีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์

ค่าที่ได้จากเครื่องวัดสี คือ  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  การใช้เครื่องวัดสีตรวจสอบเทียบด้วยผ่านสีขาวมาตรฐาน ซึ่งมีค่า  $L^*$  เท่ากับ 96.16,  $a^*$  เท่ากับ -1.07 และ  $b^*$  เท่ากับ -0.4 วิธีการวัดค่าสี โดยรายละเอียดดังนี้

1. วัดค่าสีของกระดาศที่ผ่านการใช้ในแต่ละการทดลอง โดยใช้เครื่องมือวัดสี ยี่ห้อ Spectro-Guide (Sphere Gloss, รุ่น BYK-Gardner, USA) ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมผู้สังเกต คือ  $10^\circ$

2. ก่อนการวัดทุกครั้งจะต้องสอบเทียบอุปกรณ์กับแผ่นสีดำและแผ่นสีขาวมาตรฐาน ( $X=85.14$ ,  $Y=90.40$ ,  $Z=97.61$ )

3. นำกระดาศแต่ละชุดมาหาค่าสี วัดสีออกมาเป็น ค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  เมื่อ

$L^*$  คือ ค่าที่แสดงถึงความสว่าง (Lightness) ของวัตถุ ถ้าค่า  $L^*$  เข้าใกล้ 100 แสดงว่าวัตถุนั้นมีความสว่าง ถ้าค่า  $L^*$  เข้าใกล้ 0 แสดงว่าวัตถุนั้นมีความทึบแสง โดยค่า  $L^*$  เท่ากับ 100 แสดงว่าวัตถุนั้นสีขาว ค่า  $L^*$  เท่ากับ 0 แสดงว่าวัตถุนั้นสีดำ

$a^*$  คือ ค่าที่แสดงถึงความเป็นสีแดง (Redness) และสีเขียวของวัตถุ ถ้าค่า  $a^*$  เป็นบวก (+) แสดงว่าวัตถุเป็นสีแดงและถ้าค่า  $a^*$  เป็นลบ (-) แสดงว่าวัตถุเป็นสีเขียว มีค่าในช่วง -60 ถึง +60

$b^*$  คือ ค่าที่แสดงถึงความเป็นสีเหลือง (Yellowness) และสีน้ำเงินของวัตถุ ถ้าค่า  $b^*$  เป็นบวก (+) แสดงว่าวัตถุเป็นสีเหลือง ถ้าค่า  $b^*$  เป็นลบ (-) แสดงว่าวัตถุเป็นสีน้ำเงิน มีค่าในช่วง -60 ถึง +60

4. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย

5. วัดค่าสีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์ คลอไรด์ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบกับสีของกระดาศที่ใช้งานแล้ว

### 3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนผลของระยะเวลาที่ทดลองเก็บในขวดแก้วต่อการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศเคลือบโคบอลต์คลอไรด์ในแต่ละระดับความชื้นของข้าวเปลือก แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละวิธีโดยใช้การทดสอบแบบต้นแคน (Duncan Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

## 4. ผลการทดลอง

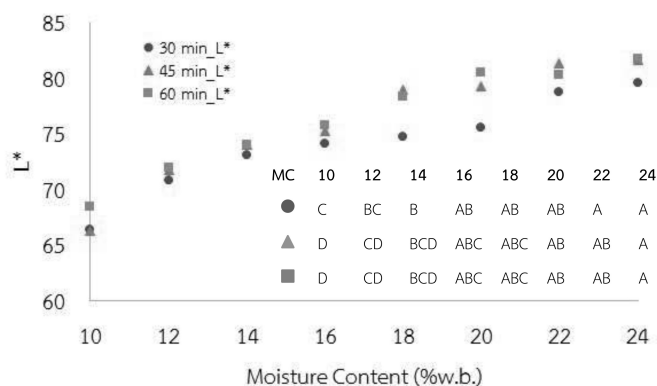
การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์ คลอไรด์ที่ได้รับผลจากอิทธิพลของระดับความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกและระยะเวลาการเก็บในโหลแก้ว กระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ก่อนใช้ทดลองจะมีสีฟ้าเข้ม ค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  คือ  $63.2 \pm 1.1$ ,  $-4.8 \pm 1.2$  และ  $-19.4 \pm 1.2$  ตามลำดับ หลังการทดลองเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที กระดาศจะมีการเปลี่ยนแปลงสีไปจากค่าเริ่มต้น ในข้าวเปลือกที่แห้งความชื้นต่ำประมาณ 10-12%w.b. สังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า กระดาศยังคงเป็นสีฟ้า และจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพูตามระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ [17,

18] สีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์ คลอไรด์ที่บรรจุในโหลแก้วกับข้าวเปลือกเป็นเวลา 45 นาที

ในส่วน of ค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ที่เป็นค่าที่นิยม ในการประเมินลักษณะปรากฏของตัวอย่างที่ทำการศึกษาพบว่า ค่า  $L^*$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก โดยเฉพาะข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงในช่วง 16-24%w.b. ส่งผลต่อค่า  $L^*$  เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่า  $L^*$  ของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์ คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นข้าวเปลือก

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ในแต่ละระดับความชื้นของข้าวเปลือก พบว่าระยะเวลาการวัด 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที ส่งผลต่อค่า  $L^*$  ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 3

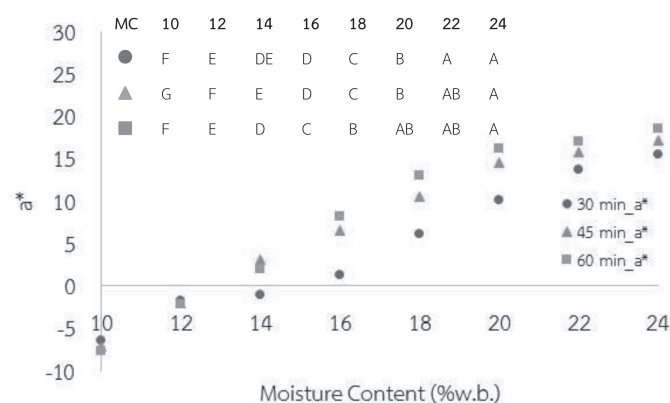
**ตารางที่ 3** การเปลี่ยนแปลงค่า  $L^*$  ของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาทดลอง

| Moisture content (%w.b.) | During time           |                       |                       |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                          | 30 min                | 45 min                | 60 min                |
| 10                       | 66.4±2.0 <sup>A</sup> | 66.2±0.4 <sup>A</sup> | 70.5±1.6 <sup>A</sup> |
| 12                       | 70.8±1.7 <sup>A</sup> | 71.7±2.4 <sup>A</sup> | 71.9±4.1 <sup>A</sup> |
| 14                       | 73.0±2.2 <sup>A</sup> | 73.9±1.5 <sup>A</sup> | 74.0±2.7 <sup>A</sup> |
| 16                       | 74.1±5.1 <sup>A</sup> | 75.2±3.9 <sup>A</sup> | 75.8±5.4 <sup>A</sup> |
| 18                       | 74.7±4.0 <sup>A</sup> | 78.9±2.8 <sup>A</sup> | 78.3±4.1 <sup>A</sup> |
| 20                       | 75.6±2.2 <sup>A</sup> | 79.2±3.5 <sup>A</sup> | 80.5±1.9 <sup>A</sup> |
| 22                       | 78.7±3.1 <sup>A</sup> | 81.3±1.0 <sup>A</sup> | 80.3±2.7 <sup>A</sup> |
| 24                       | 79.5±1.7 <sup>A</sup> | 81.6±2.4 <sup>A</sup> | 81.7±3.6 <sup>A</sup> |

**หมายเหตุ:** อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ค่า  $a^*$  ของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ที่ใช้ประเมินความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก พบว่า เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำ  $a^*$  มีค่าที่เป็นลบ แสดงถึง ความเป็นสีเขียว และเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้น  $a^*$  มีค่าที่เป็นค่าบวก แสดงถึง ความเป็นสีแดง นั่นคือ ที่ความชื้น 10%w.b. กระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์จะมีสี

ฟ้าค่อนข้างน้ำเงิน และที่ความชื้น 24%w.b. กระดาศจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในช่วง 10-24%w.b. ส่งผลต่อค่า  $a^*$  อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 7



**ภาพที่ 7** การเปลี่ยนแปลงค่า  $a^*$  ของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นข้าวเปลือก

**หมายเหตุ:** อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

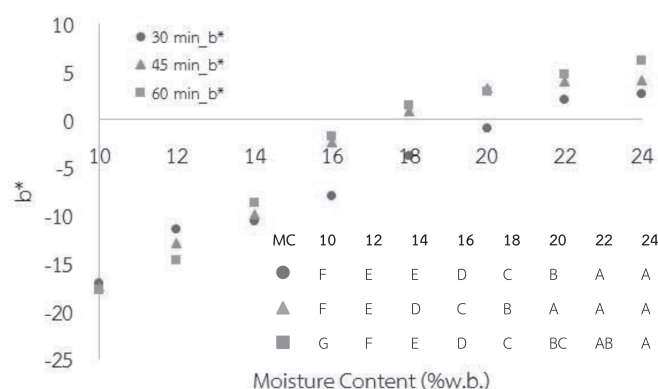
ระยะเวลาการวัด 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที ค่า  $a^*$  ที่ระดับความชื้น 10-12%w.b. ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะพบว่า มีเพียงระยะเวลาการวัด 45 นาที และ 60 นาที ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4 เป็นเพราะเมื่อความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกสูงขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่องว่างอากาศในขวดเหนือเมล็ดข้าว (Head Space) จะมีมาก ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการถ่ายเทความชื้นสู่กระดาศเพิ่มขึ้น จนถึงจุดสมดุล

**ตารางที่ 4** การเปลี่ยนแปลงค่า  $a^*$  ของกระดาษเคลือบสารโอบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาทดลอง

| Moisture content (%w.b.) | During time      |                     |                  |
|--------------------------|------------------|---------------------|------------------|
|                          | 30 min           | 45 min              | 60 min           |
| 10                       | $-6.5 \pm 0.6^A$ | $-7.2 \pm 0.9^A$    | $-7.7 \pm 0.8^A$ |
| 12                       | $-1.7 \pm 0.7^A$ | $-2.1 \pm 0.6^A$    | $-2.2 \pm 3.4^A$ |
| 14                       | $-1.0 \pm 0.2^B$ | $3.0 \pm 1.6^A$     | $1.9 \pm 1.6^A$  |
| 16                       | $1.3 \pm 2.4^B$  | $6.5 \pm 3.1^{AB}$  | $8.2 \pm 3.4^A$  |
| 18                       | $6.1 \pm 3.3^B$  | $10.6 \pm 0.6^{AB}$ | $13.0 \pm 3.4^A$ |
| 20                       | $10.1 \pm 1.7^B$ | $14.4 \pm 1.1^A$    | $16.1 \pm 0.6^A$ |
| 22                       | $13.6 \pm 0.8^B$ | $15.7 \pm 0.7^{AB}$ | $17.0 \pm 1.6^A$ |
| 24                       | $15.4 \pm 0.3^B$ | $17.2 \pm 1.5^{AB}$ | $18.5 \pm 1.0^A$ |

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ค่า  $b^*$  ของกระดาษเคลือบสารโอบอลต์คลอไรด์ ที่ใช้ประเมินความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก พบว่า เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำ  $b^*$  มีค่าที่เป็นลบ แสดงถึง ความเป็นสีน้ำเงิน และเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้น  $b^*$  มีค่าเป็นบวก แสดงถึง ความเป็นสีเหลือง การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในช่วง 10-24%w.b. ส่งผลต่อค่า  $b^*$  อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับค่า  $a^*$  ดังแสดงในภาพที่ 8



**ภาพที่ 8** การเปลี่ยนแปลงค่า  $a^*$  ของกระดาษเคลือบสารโอบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นข้าวเปลือก

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาการวัด 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความชื้น 10-12%w.b. แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะพบว่า มีเพียงระยะเวลาการวัด 45 นาที และ 60 นาที ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับค่า  $a^*$  ดังแสดงในตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** การเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ของกระดาษเคลือบสารโอบอลต์คลอไรด์เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาทดลอง

| Moisture content (%w.b.) | During time       |                     |                   |
|--------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
|                          | 30 min            | 45 min              | 60 min            |
| 10                       | $-17.1 \pm 0.6^A$ | $-17.4 \pm 0.5^A$   | $-17.8 \pm 0.3^A$ |
| 12                       | $-11.4 \pm 0.6^A$ | $-12.8 \pm 0.2^A$   | $-14.7 \pm 2.6^A$ |
| 14                       | $-10.6 \pm 0.5^B$ | $-9.9 \pm 0.2^{AB}$ | $-8.6 \pm 1.1^A$  |
| 16                       | $-8.0 \pm 0.5^B$  | $-2.4 \pm 0.8^A$    | $-1.7 \pm 1.3^A$  |
| 18                       | $-3.8 \pm 0.5^B$  | $0.9 \pm 1.3^A$     | $1.5 \pm 2.1^A$   |
| 20                       | $-0.9 \pm 2.1^B$  | $3.3 \pm 0.4^A$     | $3.0 \pm 0.8^A$   |
| 22                       | $2.1 \pm 1.3^B$   | $4.0 \pm 0.9^{AB}$  | $4.7 \pm 0.9^A$   |
| 24                       | $2.7 \pm 0.5^B$   | $4.1 \pm 1.0^B$     | $6.2 \pm 0.8^A$   |

หมายเหตุ: อักษรในแถวเดียวกันที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

การหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของช่องว่างอากาศในโหลแก้วนั้น ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศมีเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ควรเก็บข้าวเปลือกในโหลแก้วนานอย่างน้อย 45 นาที จึงจะเพียงพอให้ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกกระจายตัวจนกระทั่งความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศต่างๆ เกิดสมดุล สอดคล้องกับการวิจัย Davis, U. C. (2017) รายงานว่า โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงสีจะสังเกตได้ภายใน 20–30 นาที และสีจะไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านไป 2 ชั่วโมง

## 5. สรุปและอภิปรายผล

ผลการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกระดาศเคลือบสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ในข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10–24%w.b. เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที พบว่า กระดาศจะค่อยๆ เปลี่ยนสีจากฟ้าเป็นชมพูเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และเมื่อประเมินในระบบ CIE พบว่า เมื่อความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ค่า  $L^*$  มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน

จากการทดลอง กระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ ในขวดเก็บข้าวเปลือกที่มีช่องว่างอากาศ (Head space) 50% และปิดฝาเป็นเวลา 45 นาที มีการเปลี่ยนแปลงสีแต่ละระดับความชื้นชัดเจน ดังนั้น จึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาทำบัตรตรวจความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกที่มีต้นทุนต่ำให้แก่เกษตรกร

ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกกับการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศเคลือบสารโคบอลต์คลอไรด์ มีความสัมพันธ์กับระดับความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก ซึ่งสามารถใช้ทำนายหรือบอกปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการวัดได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

## 7. เอกสารอ้างอิง

- (1) สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2559. (Online) [www.thairiceexporters.or.th](http://www.thairiceexporters.or.th).
- (2) มูลนิธิชัยพัฒนา, ม.ป.ป., ข้าว (Online) <http://www.choipat.or.th/publication/publish-document/tips/40-3.html>.
- (3) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2555. นโยบายส่งเสริมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวข้าว : เพิ่มราคาเพิ่มคุณภาพข้าว, (Online) <http://prp.trf.or.th/trf-policy-brief/นโยบายส่งเสริมเทคโนโลยี>
- (4) จุฑามาส จงศิริ, 2556. การเก็บเกี่ยวและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวข้าว, สำนักงานวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, (Online) <http://actech.agritech.doe.go.th/techno/other/Harvest>.
- (5) สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540, การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, พิมพ์ครั้งที่ 7, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 338 หน้า.
- (6) วิบูลย์ เทเพนทร์, การวัดความชื้นเมล็ดพืช วิศวกรรมการเกษตร 8 วช. หัวหน้ากลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร, (Online) [http://www.doa.go.th/aerix/files/research/vb\\_moisture\\_measure.pdf](http://www.doa.go.th/aerix/files/research/vb_moisture_measure.pdf).
- (7) M. Reid, and J. Thompson, 2017, Inventing a Low-Cost Solution to Reduce Moldy Foods: 'DryCard' Takes the Guesswork Out of Drying, (Online) <https://news.plantsciences.ucdavis.edu/2017/04/03/inventing-a-low-cost-solution-to-reduce-moldy-foods-drycard-takes-the-guesswork-out-of-drying>.
- (8) E. M. W. Akunda, and Kumar D., 1981, A Simple Technique for Timing Irrigation in Coffee Using Cobalt Chloride Paper Disks, Irrigation Science, Vol 3(1), p. 57–62.
- (9) W. J. Stewart, J. L. Johansen and J. C. Liao, 2017, A Non-toxic Dose of Cobalt Chloride Blocks Hair Cells of The Zebrafish Lateral Line, Hearing Research, Vol 350, p. 17–21.
- (10) K. Laksana, S. Soompon, P. Pavasant and W. Sriarj, 2017, Cobalt Chloride Enhances the Stemness of Human Dental Pulp Cells, Journal of Endodontics, Vol 43(5), p. 760–765.



- (11) สมบัติ อารังธัญวงศ์, 2558. ทำไมชาวนายากจน? (Online) <https://www.posttoday.com/social /think/407222>
- (12) สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559. แผนพัฒนาการเกษตร ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560 – 2564), กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- (13) จวงจันท์ ดวงพัตรา, 2529, การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพเมล็ดพันธุ์, ภาควิชาพืชไร่ฯ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 194 หน้า.
- (14) S. Sadaka, and R. Bautista, Grain Drying Tools: Equilibrium Moisture Content Tables and Psychrometric Charts. University of Arkansas, Little Rock, Arkansas, USA., FSA1074.
- (15) Rice knowledge bank, (Online) <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest /drying/drying-basics/how-to-determine-the-emc>.
- (16) G. Korotcenkov, 2018, "Moisture Indicators", In Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement. ; CRC Press: Boca Raton, p. 203-206.
- (17) U. C. Davis, 2017, Feed the future innovation lab for horticulture, (Online) <https://horticulture.ucdavis.edu/drycard>.
- (18) M.V. Zambrano, B. Dutta, D.G. Mercer, H.L. MacLean and M.F. Touchie, 2019, Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review, Trends in Food Science & Technology, Vol 88, p. 484–496.

## กลไกการบินแบบแมลงสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก Manuscript Preparation Guideline for CRMA Journal

นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมษันท์ ธรรมวิชัย  
Squadron Leader Assistant Professor Dr. Mason Thammawichai

ผศ.กกศ.ร.ร.น.ก. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Saimai, Bangkok, 10220, Thailand  
Corresponding Author: mason@rtaf.mi.th

(Received: April 18, 2019, Revised: July 24, 2019, Accepted: July 26, 2019)

**บทคัดย่อ :** เทคโนโลยีหุ่นยนต์บินขนาดเล็ก หรือ Micro Aerial Vehicles (MAV) กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างแพร่หลายในยุทธวิธีในการรบรูปแบบใหม่และการปฏิบัติการกิจในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ อาทิ การค้นหาและช่วยชีวิตในเหตุการณ์ระเบิดหรือเหตุไฟไหม้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะออกแบบกลไกและท่าทางการกระพือปีกของหุ่นยนต์บินขนาดเล็กแบบกระพือปีกเพื่อการบินแบบลอยตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบกลไกการบินจำนวน 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 เป็นการเลียนแบบท่าทางการบินของแมลงที่มีลักษณะการบินแบบปีกคู่ตบเข้าหากัน หรือที่เรียกว่า Clap-and-Fling สำหรับรูปแบบที่ 2 เป็นกลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบตบขึ้น-ลง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของกลไกการกระพือปีกโดยการวัดค่าแรงยกและแรงขับเคลื่อนเฉลี่ยจากโพลดเซลล์ในแกน x และแกน y ข้อมูลที่ได้นำมาประมวลผลผ่านบอร์ด Arduino ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า กลไกการบินแบบที่ 2 มุมปะทะที่ 60 องศา สร้างแรงขับเคลื่อนเฉลี่ยได้มากที่สุด และสร้างแรงยกเฉลี่ยได้มากที่สุดสำหรับมุมปะทะที่ 0 องศา

**คำสำคัญ :** ไมโครยูเอวี การกระพือปีก การบินแบบตบปีกเข้าหากัน กลไกการบินแบบแมลง

**Abstract :** Micro Aerial Vehicle (MAV) Technology is becoming very popular because it can be widely applied in novel battle tactics as well as operations in the environments that are danger to humans, such as searching and rescuing life in an explosion or fire events. The researcher therefore is interested in designing a flight mechanism of a MAV for an efficiently hovering flight. For this project, two flight mechanisms are designed and fabricated. The first mechanism is a mimic of an insect flight characteristics, in which two flapping wings are clapped together at the end of the upstroke and then separated, hence, a clap-and-fling mechanism. The second mechanism is a conventional method of flapping up and down. The lift and the thrust forces are measured in real-time using two load cells in x and y axes. The data is then processed by an arduino board. The experimental results illustrate that the second designed mechanism produce the highest average thrust at the angle of attack at 60 degree and the highest average lift at the angle of attack at 0 degrees.

**Keywords :** Micro UAV, Flapping wings, Clap and fling, Insect flight mechanisms

## 1. บทนำ

การพัฒนาของกองทัพอากาศต้องคำนึงถึงความสะดวกคล่องกับธรรมชาติ คุณสมบัติและข้อจำกัดของกำลังทางอากาศ รวมทั้งทรัพยากรที่มีครอบครอง เทคโนโลยีที่ใช้กัน ซึ่งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีสมัยใหม่มีผลในการพัฒนาประเทศทั้งในด้านความมั่นคง ความผาสุก ของคนในประเทศ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้เพื่อการช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน เมื่อยามเกิดเหตุการณ์ไม่คาดฝัน เทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์บินขนาดเล็ก หรือ Micro Aerial Vehicles (MAV) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการทหาร อาทิ เหตุการณ์ความไม่สงบในจังหวัดสามชายแดนภาคใต้หรือกรณีข้อพิพาทระหว่างไทยและประเทศเพื่อนบ้าน อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กสำหรับยุทธวิธีสามารถถูกนำไปใช้เพื่อหาข้อมูลในระยะใกล้เพราะมีความคล่องตัวในการหาข่าวและหากเกิดการเสียหายก็สามารถยอมรับความสูญเสียได้เพราะใช้งบประมาณไม่มาก

ถึงแม้ว่าโดยส่วนใหญ่งานวิจัยในเรื่องนี้จะมุ่งเน้นไปที่อากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึง (Fixed Wings) หรือแบบปีกหมุน (Rotary Wings) แต่หุ่นยนต์บินแบบปีกกระพือ (Flapping Wings) สามารถเคลื่อนที่ได้คล่องแคล่วกว่า อีกทั้งการบินแบบปีกกระพือยังมีข้อดีที่เห็นชัดที่สุดคือท่าทางการบินที่เป็นแบบอิสระ สามารถเปลี่ยนทิศทางการบินได้เกือบทันทีทันใด ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ด้านการหลบหลีกสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ในที่แคบ ดังแสดงให้เห็นในสัตว์จำพวกแมลง อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีหุ่นยนต์บินแบบปีกกระพือยังคงมีการศึกษาค้นคว้าที่ค่อนข้างน้อย

Liu และคณะ [8] ออกแบบหุ่นยนต์ต้นแบบแบบปีกกระพือที่มีทั้งหมดสี่ปีกทำมุมเป็นรูปตัวอักษรตัวเอ็กซ์ มีความยาวปีกเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งคาร์บอนที่นำมาทำเป็นก้านปีกว่าต้องมีขนาดเท่าไรจึงทำให้ได้แรงขับดีที่สุด วัดโดยเครื่องวัดแรง ทำการเปลี่ยนขนาดของ

แท่งคาร์บอนเป็น 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตร ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อแท่งคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 มิลลิเมตรเกิดการบิดงอสูงทำให้แรงขับที่สร้างได้นั้นน้อยกว่าแท่งคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่กว่าและยังความถี่ในการกระพือปีกสูงขึ้นแท่งคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.3 มิลลิเมตรทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) ส่งผลค่าแรงขับลดลง

Wong และ Sawatdipon [9] ศึกษาผลของการงอปีกในหุ่นยนต์ปีกกระพือ โดยมุ่งเน้นที่ความสามารถในการงอปีกแบบนกโดยเฉพาะจังหวะที่ทำการกระพือปีกขึ้นเพื่อลดแรงต้านอากาศที่จะเกิดขึ้น วัตถุประสงค์ของวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของการงออย่างอิสระในปีกที่มีมุมระหว่างปีกในกับปีกนอกเท่ากับ  $0^\circ$  (ไม่งอ)  $15^\circ$   $25^\circ$  และ  $35^\circ$  และเปรียบเทียบว่า มุมใดให้ประสิทธิภาพในการสร้างแรงยกได้ดีที่สุด โดยใช้แท่นปรับมุมปะทะ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ปีกกระพือเพื่อทดสอบ โดยการกำหนดความยาวปีกที่ 40 เซนติเมตรทดลองในอุโมงค์ลมทั้งที่มีความเร็วลมและไม่มีความเร็วลมที่มุมปะทะต่างๆ พบว่าการที่ปีกสามารถงอได้อย่างอิสระทำให้เพิ่มประสิทธิภาพทางการบินได้และที่มุมระหว่างปีกในกับปีกนอกเป็น  $15^\circ$  ให้ผลทางอากาศพลศาสตร์โดยเฉลี่ยดีที่สุด

เมซันท์ และ วิธวินท์ [10] พบว่าแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดจากปีกแบบกระพือขึ้นอยู่กับปัจจัยทางฟิสิกส์หลายประการ เช่น รูปทรงและการเคลื่อนไหวของปีก วัสดุที่ใช้ทำปีกและสภาพอากาศของการบิน พื้นผิวของปีกที่มีความยืดหยุ่นจะปรับรูปทรงในการตอบสนองการไหลของอากาศผ่านปีก จึงส่งผลต่อแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากการกระพือปีกซึ่งมีการปรับเปลี่ยนรูปทรงตามรูปแบบการกระพือของปีกทำให้มีการหมุนหรือบิดงอของปีก การจัดโครงสร้างของปีก เช่น การจัดแกนหลักของปีกและจำนวนแกนหลักของปีก ซึ่งส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนรูปทรงของปีกขณะบิน ปีกที่มีการจัดโครงสร้างปีกที่ต่างกัน มีผลของแรงทางอากาศพลศาสตร์ต่างกัน

## 2. วัตถุประสงค์

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างกลไกการบินแบบแมลงสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่แตกต่างกัน จำนวน 2 กลไก และพัฒนาระบบการทดสอบและการวัดแรงทางอากาศพลศาสตร์ (แรงยกและแรงขับ) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกลไกการบินแบบลอยตัว ซึ่งผลลัพธ์ใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้ที่แตกต่างจากงานวิจัยอื่นดังต่อไปนี้

1. ได้กลไกการบินแบบกระพือปีกต้นแบบสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กแบบปีกกระพือที่มีความยาวปีกขนาด 15 ซม.
2. ได้ระบบการทดสอบและการวัดแรงทางอากาศพลศาสตร์แบบเรียลไทม์สำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กแบบปีกกระพือ
3. ได้ศึกษาผลของมุมปะทะปีกที่มีผลต่อแรงทางอากาศพลศาสตร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอากาศยานไร้คนขับแบบปีกกระพือในอนาคต
4. ได้ผลการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและแรงขับกับเวลาและความถี่ในการกระพือปีก

## 3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แมลงจะต้องสร้างแรงยกที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของตัวเองเพื่อที่จะสามารถทำการบินได้ แมลงกระพือปีกเพื่อที่จะผลิตความเร็วเมื่อเทียบกับอากาศ (Relative velocity to the air) รวมไปถึงแรงทางอากาศพลศาสตร์ ถึงแม้ว่าแมลงจะมีอัตราการกระพือปีกที่สูง ความเร็วที่ได้มีน้อยเนื่องด้วยแมลงมีความยาวของปีกที่สั้น ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยกสูง นั่นคือมีลำดับขนาดเท่ากับ 2 ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากแมลงมีขนาดเล็กและมีความเร็วต่ำ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ของปีกแมลงส่วนใหญ่จึงมีค่าน้อย นั่นคือน้อยกว่า 4,000 โดยปกติสำหรับการทำงานของปีกในสภาวะสมดุล ถ้าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อย จะทำให้ความสามารถในการผลิตแรงยกน้อยลงไปด้วย ตัวอย่างเช่น ที่  $Re = 104$  ค่า

สัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดของแพนอากาศแบบบางมีค่าประมาณ 0.8 และที่  $Re = 100$  ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดของโมเดลปีกของแมลงวันผลไม้ (Fruit-Fly) จะมีค่าประมาณ 0.6 ดังนั้นการที่แมลงสามารถสร้างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกได้มากในขณะที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำนั้น น่าจะเป็นผลที่เกิดจากการไหลของอากาศที่ไม่คงที่

จากการศึกษาในเรื่องของกระบวนการเกิดแรงยกที่มีค่าสูงที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำแบบไม่คงที่ของปีกแมลงพบว่า เป็นผลมาจากกระบวนการที่เรียกว่า Delayed stall ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการเกิดได้ดังนี้ [1-4] ในช่วงเวลาของการกระพือปีกนั้น ปีกของแมลงจะเคลื่อนที่ด้วยมุมปะทะที่สูง (High Angle of Attack) ประมาณ  $35^\circ$  สำหรับปีกของเครื่องบินที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ถ้าถูกเพิ่มมุมปะทะให้มีขนาดมาก กระแสอากาศที่ไหลผ่านพื้นผิวด้านบนของปีกจะแยกออก ทำให้เกิดกระแสวนหรือ Vortex ใกล้กับขอบหน้าของปีก ซึ่งสามารถผลิตแรงยกขนาดใหญ่ได้ในชั่วขณะและจะแยกตัวออกจากปีกทำให้สูญเสียแรงยกในที่สุด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการสูญเสียแรงยกของปีก (Stall) สำหรับปีกของแมลง สามารถทำให้เกิดกระแสวนที่บริเวณขอบหน้าของปีก (Leading-Edge Vortex , LEV) ได้เช่นกัน แต่แมลงนั้นสามารถรักษาให้กระแสวนอยู่ได้ตลอดเวลา เนื่องจากการสูญเสียแรงยกนั้นถูกชดเชยไปอย่างถาวรจึงเรียกกระบวนการนี้ว่า Delayed Stall

โดยทั่วไป ปีกของแมลงมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3-4 มิลลิเมตร [5] แต่การศึกษาในเรื่องนี้ส่วนใหญ่จะศึกษาแมลงที่มีขนาดใหญ่ เช่น ตั๊กแตน ผีเสื้อกลางคืน แมลงปอ ผี และแมลงวัน สำหรับแมลงขนาดเล็กนั้น Weis-Fogh [6] ได้ศึกษาแมลงจำพวกตัวต่อสายพันธ์ Encarsia Formosa พบว่าในขณะที่มันกำลังจะหมุนปีกเพื่อที่จะเปลี่ยนจังหวะการขึ้นลงของปีกนั้น ปีกของมันมีการเคลื่อนไหวแบบพิเศษ ที่เรียกว่า Clap and Fling นั่นคือในตอนท้ายของจังหวะการกระพือปีกขึ้น ปีกทั้งสองข้างเคลื่อนเข้าหากันและเมื่อสันหน้าของปีกทั้งสองเข้าใกล้

กัน ปีกทั้งสองก็จะหมุนรอบตามสันหน้าของแต่ละปีก (Clap) จากนั้น ในการเริ่มต้นของจังหวะของการกระพือ ปีกลง ปีกทั้งสองจะถูกเปิดออกโดยการหมุนรอบตามสันหลังของแต่ละปีก (Fling) นอกจากนี้ ยังมีผีเสื้อบางชนิดใช้กระบวนการนี้ในการบินขึ้นจากพื้น กระแสอากาศและแรงอากาศพลศาสตร์ที่ถูกสร้างโดยกระบวนการ Clap and Fling

จากการศึกษา [7] พบว่า แมลงส่วนใหญ่มีความถี่ในการกระพือปีก ( $n$ ) สูงและมีระยะของการกระพือปีก  $\Phi$  ที่กว้าง ตัวอย่างเช่น fruit-fly,  $n \approx 265$  Hz and  $\Phi \approx 180^\circ$  และ virilis,  $n \approx 160$  Hz and  $\Phi \approx 160^\circ$  [7] ความเร็วเทียบของปีกแมลงแปรผันตรงกับระยะของการกระพือปีก (Stroke Amplitude)  $\Phi$  ความถี่ในการกระพือปีก (Wingbeat Frequency)  $n$  และความยาวของปีก (Wing Length)  $R$  ตัวเลขเรย์โนลด์แปรผันตรงกับความเร็วเทียบและความยาวคอर्डของปีก ส่วนแรงทางอากาศพลศาสตร์ของปีกแปรผันตรงกับกำลังสองของความเร็วและพื้นที่ของปีก ให้  $r_2$  เป็นรัศมีการหมุนของปีก (Radius of Gyration)  $U$  เป็นความเร็วเฉลี่ยที่รัศมีการหมุนของปีก  $Re$  เป็นเลขเรย์โนลด์ของปีก และ  $F$  เป็นแรงทางอากาศพลศาสตร์บนปีก จะได้ว่า [7]

$$U = 2\Phi n R r_2 \quad (1)$$

$$Re = Uc/\nu = 2(\Phi n R) R r_2 / \nu AR \quad (2)$$

$$F \propto U^2 S = (2\Phi n R)^2 R^2 / AR \quad (3)$$

โดยที่  $r_2 = r_2/R$ ,  $c$  คือความยาวเฉลี่ยของคอर्ड (Mean Cord Length),  $S$  เป็นพื้นที่ของปีก ( $S = Rc$ ),  $AR$  คืออัตราส่วนลักษณะ (Aspect Ratio) ของปีก และ  $\nu$  คือค่ากลศาสตร์ความหนืดของอากาศ

จากสมการจะเห็นได้ว่า  $r_2$  และ  $AR$  ไม่แตกต่างกันมากในแมลงแต่ละชนิด โดยทั่วไป  $r_2 = 0.6$  และ  $AR \approx 3$  สำหรับแมลงที่มีความยาวปีก  $R$  ที่เล็ก จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ระยะของการกระพือ  $\Phi$  และความถี่ในการกระพือ  $n$

ที่มาก เพื่อที่จะสามารถรักษาความเร็วไม่ให้ต่ำเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้เลขเรย์โนลด์และแรงทางอากาศพลศาสตร์น้อยเกินไป สำหรับ Fruit-flies *D. Virilis* มีค่า  $R \approx 2.9$  มิลลิเมตร  $n \approx 160$  Hz และ  $\Phi \approx 160^\circ$  มี  $U$  ประมาณ  $1.53 \text{ ms}^{-1}$ ,  $Re$  มีค่าประมาณ 100 และสามารถสร้างแรงยกได้เท่าเท่ากับน้ำหนักตัว [7] สำหรับ Vegetable Leafminers (1.4 มิลลิเมตร) มีขนาดเล็กกว่า Fruit-Flies ประมาณสองเท่า ( $r_2$  และ  $AR$  มีขนาดใกล้เคียงกับ Fruit-Flies) ถ้าใช้  $n$  และ  $\Phi$  เท่ากันกับของ Fruit-Flies จะได้  $U$  เท่ากับ  $0.74 \text{ ms}^{-1}$ ,  $Re = 21$  และได้แรงยกที่มีขนาดไม่เพียงพอเนื่องจากแรงยกแปรผันตรงกับกำลังสองของ  $U$  แต่ถ้าใช้ค่า  $n$  และ  $\Phi$  ตามความเป็นจริงแล้ว จะได้  $U = 1.49 \text{ ms}^{-1}$  และ  $Re = 40$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากการใช้  $n$  และ  $\Phi$  ที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ Vegetable Leaf Miners สามารถสร้างแรงยกได้พอๆ กับ Fruit-Fly ที่มีขนาดใหญ่กว่าถึงสองเท่า นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าเลขเรย์โนลด์จะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นก็ยังถือว่าไม่มากเกินไปเมื่อเทียบกับแมลงชนิดอื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่า

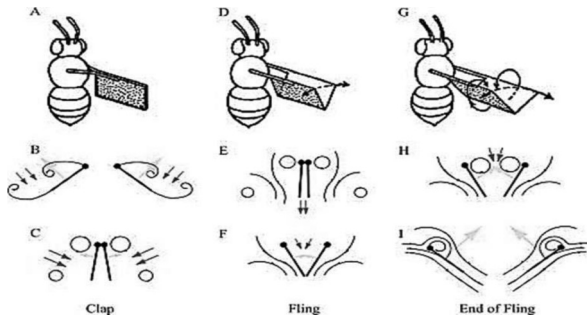
นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่าเพื่อที่จะได้ค่า  $\Phi$  ที่มีค่ามากนั้น แมลงจะต้องกระพือปีกด้วยมุมที่ต่ำสุดมีค่าใกล้เคียง  $-90^\circ$  และมุมที่สูงสุดมากกว่า  $95^\circ$  ซึ่งเมื่อกระพือปีกด้วยมุมสูงสุดเกินกว่า  $90^\circ$  นั้น ส่วนนอกของปีกจะมีลักษณะเหมือนตบเข้าหากันหรือที่เรียกว่า Clap and Fling นั่นเอง ลักษณะการ Clap และ Fling ถูกแสดงในภาพที่ 1

โดยสรุป ในการบินแบบกระพือปีกนั้น ปัจจัยที่จะช่วยเสริมแรงลอยตัวมีด้วยกัน 5 ปัจจัยหลัก ได้แก่ [7]

1. Delayed Stall เป็นการชะลอเวลาในการร่วงหล่น (Stall) ของหุ่นยนต์กระพือปีก ในจังหวะที่จะเกิดการร่วงหล่น ถ้าสามารถทำให้ชะลอเวลาในการร่วงได้ หุ่นยนต์จะสามารถลอยตัวค้างอยู่กลางอากาศได้ ในสภาวะจะเกิดลมหมุนวนบริเวณด้านหน้าปีก (Leading Edge Vortex)

2. Rapid Pitch-Up ถ้าสังเกตการบินแบบลอยอยู่นิ่งกับที่ทั้งนกฮัมมิงเบิร์ดและแมลง ปีกจะกระพือไปข้าง





ภาพที่ 1 กลไกการกระพือปีกคู่แบบ clap and fling [7]

หน้าและหลังจากที่ปีกตีจะกระพือขึ้นและลง นอกจากนี้จะต้องมีการหมุนปีกไปด้วย อัตราเร็วของการหมุนปีกต้องสัมพันธ์กับการกระพือปีก

3. Wake Capture ตามปกติแล้วในการบินของเครื่องบินหรือการเคลื่อนที่ของรถยนต์ พื้นที่ Wake หรือพื้นที่เก็บอากาศเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดแรงดูด (Drag Force) แก่เครื่องบินและรถยนต์ ทำให้แรงขับเคลื่อนลดลง แต่สำหรับการบินแบบเฮลิคอปเตอร์ นก และแมลง พื้นที่เก็บอากาศเป็นสิ่งจำเป็น การเก็บอากาศจะช่วยทำให้มีแรงกดของอากาศที่สามารถสร้างแรงลอยตัวให้แก่ปีกหรือแมลง ยังสามารถกักเก็บอากาศได้มาก แรงลอยตัวจะมีค่ามากขึ้น

4. Clap-and-fling เป็นกลไกการกระพือปีกรูปแบบหนึ่งคิดค้นโดย Weis-Fogh เป็นกลไกที่ปีกแต่ละข้างมาตบเข้าหากันแล้วแยกออก การตบเข้าหากันเพื่อที่จะสร้างแรงขับเคลื่อนให้มากขึ้นและในจังหวะที่แยกออกจะช่วยเสริมการกักเก็บอากาศให้มากขึ้นเพื่อใช้อากาศนั้นในการสร้างการแรงขับในจังหวะที่ตบปีกเข้าหากัน

5. Wing Structural Flexibility ความยืดหยุ่นของปีกมีส่วนที่ส่งผลต่อการสร้างแรงยกตัว ยิ่งปีกมีความยืดหยุ่นสูง แรงลอยตัวก็มีค่าที่สูงขึ้น

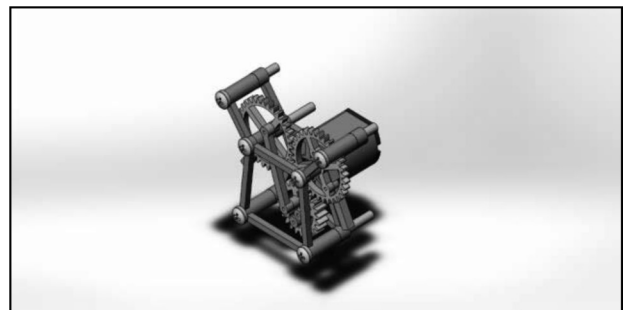
## 4. วิธีดำเนินการศึกษา

### 4.1 ออกแบบและสร้างกลไกการกระพือปีก

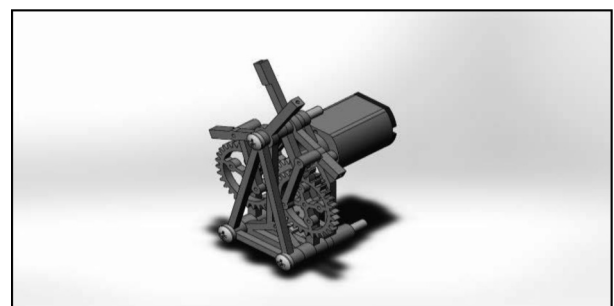
ผู้วิจัยได้ออกแบบกลไกการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กจำนวน 2 รูปแบบ ด้วยโปรแกรม Solid-works และสร้างแบบจำลองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3d printer) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1.1 กลไกการกระพือปีกคู่แบบ Clap and Fling

ภาพที่ 2 แสดงกลไกการกระพือปีกคู่แบบ Clap and Fling โดยเฟืองส่งกำลังมีระยะการส่งกำลังขนาด 4 มม. ไปยังปีกกระพือที่มีระยะการรับขนาด 8.5 มม. ด้วยแกนส่งกำลังขนาด 17.5 มม. โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านขนาด 10 วัตต์



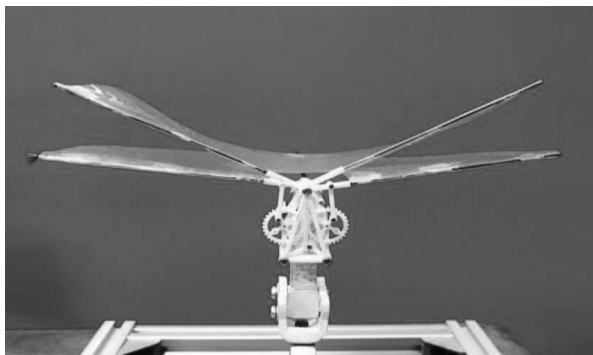
ก) แบบจำลองจากโปรแกรม Solidworks



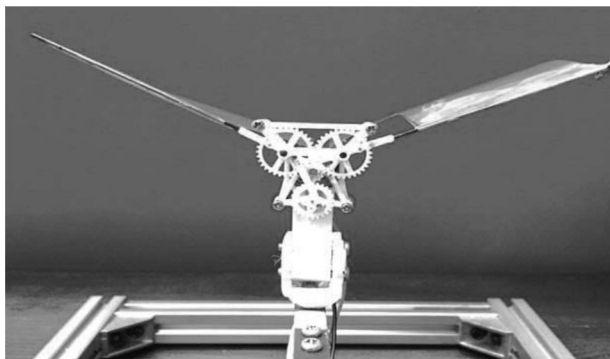
ข) แบบจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

ภาพที่ 2 กลไกการกระพือปีกคู่แบบ Clap and Fling

4.1.2 กลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง  
ภาพที่ 3 แสดงกลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง โดยเฟืองส่งกำลังมีระยะการส่งกำลังขนาด 4 มม. ไปยังเฟืองที่ติดกับปีกกระพือที่มีระยะการรับขนาด 3 มม. ด้วยแกนส่งกำลังขนาด 17.5 มม. โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านขนาด 10 วัตต์



ก) แบบจำลองจากโปรแกรม Solidworks



ข) แบบจำลองจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

ภาพที่ 3 กลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง

## 4.2 การวัดค่าแรงทางอากาศพลศาสตร์

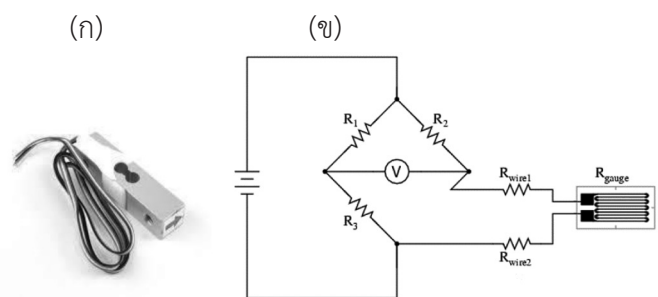
ผู้วิจัยทำการวัดค่าแรงทางอากาศพลศาสตร์ด้วยวิธีการนำเสนอในงานวิจัย [10] โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า

#### 4.2.1.1 โหลดเซลล์ (Load Cell) [11]

เป็นระบบเซนเซอร์ที่แปลงค่าน้ำหนักทางกลของสิ่งของให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยสเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นส่วนตรวจจับ ซึ่งจะค่อยๆ เปลี่ยน

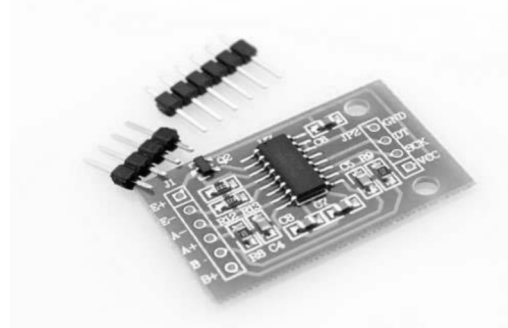
ค่าความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยการนำค่าความต้านทานที่ได้จากสเตรนเกจมาต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ และเมื่อต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงก็จะสามารถหาค่าเอาต์พุตของน้ำหนักวัตถุที่เปลี่ยนแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าได้ดังแสดงในภาพที่ 4ข) สำหรับโหลดเซลล์ที่ใช้ในการทดลองเป็นโหลดเซลล์ขนาด 100 กรัม มีความไวเท่ากับ  $0.7 \text{ A} \pm 0.1 \text{ mV/V}$



ก) โหลดเซลล์ ข) วงจรโหลดเซลล์

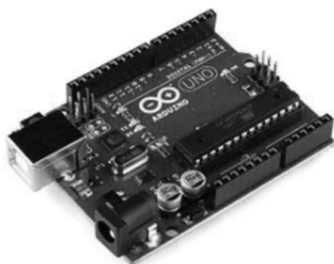
ภาพที่ 4 โหลดเซลล์ ก) โหลดเซลล์ ข) วงจรโหลดเซลล์ [11]

4.2.1.2 HX711 Weight Sensor Amplifier แสดงในภาพที่ 5 เป็นโมดูลขยายสัญญาณในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล 24 บิต โดยใช้ไฟเลี้ยง 2.6 - 5.5 โวลต์ ทำงานปกติด้วยกระแสไฟฟ้า  $< 1.5 \text{ mA}$  และทำงานในช่วงอุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+85^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 5 โมดูล HX711 [12]

4.2.1.3 บอร์ด Arduino (ภาพที่ 6) เป็นบอร์ด ไมโคร คอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ สามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกโดยเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ดหรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริมประเภทต่างๆ



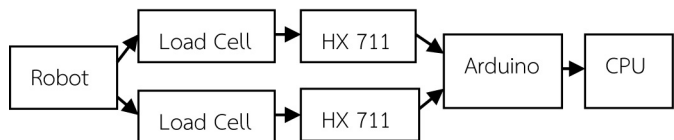
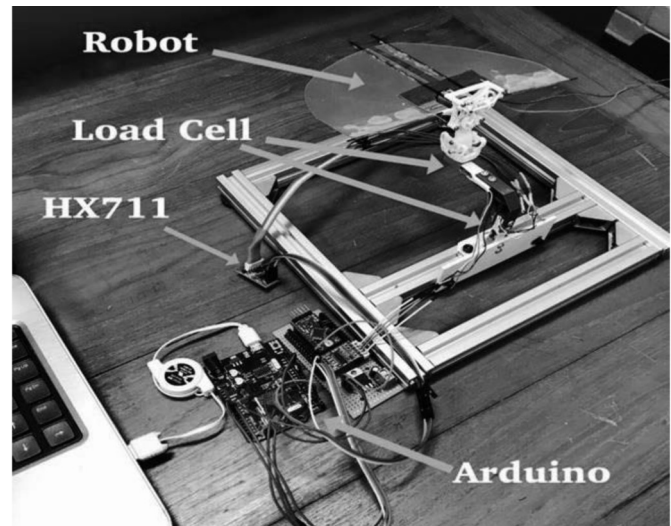
Microcontroller : ATmega328P  
Operating Voltage : 5V  
Input Voltage (recommended): 7-12V  
Input Voltage (limit): 6-20V  
Digital I/O Pins : 14 (of which 6 provide PWM output)  
PWM Digital I/O Pins : 6  
Analog Input Pins : 6  
DC Current per I/O Pin : 20 mA  
DC Current for 3.3V Pin : 50 mA  
Flash Memory : 32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader  
SRAM : 2 KB (ATmega328P)  
EEPROM : 1 KB (ATmega328P)  
Clock Speed : 16 MHz

ภาพที่ 6 บอร์ด Arduino UNO [13]

#### 4.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์

การติดตั้งเครื่องวัดแรงยกและแรงขับ โดยการนำโหลดเซลล์ 2 ตัวมาติดตั้งตามแนวแกน X และ Y หลังจากนั้นก็เชื่อมต่อโหลดเซลล์กับโมดูล HX711 เพื่อขยายสัญญาณอนาล็อกที่ได้จากโหลดเซลล์และแปลงรูปของสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งต่อสัญญาณดิจิทัลไปยังบอร์ด Arduino เพื่อทำการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นแรงทางกลโดยใช้โปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นบนบอร์ด Arduino จากนั้นต่อสัญญาณเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย Serial Port เพื่อบันทึก

และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Matlab ต่อไป ภาพที่ 7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ และแผนภาพไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์



ภาพที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและแผนภาพไดอะแกรมการเชื่อมต่ออุปกรณ์

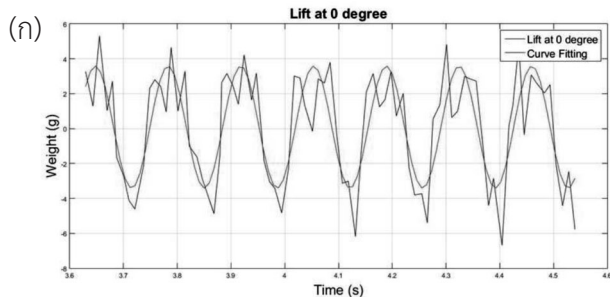
### 5. ผลการทดลอง

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยการวัดค่าแรงยกและค่าแรงขับของกลไกการบินที่ออกแบบทั้ง 2 กลไก ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้ปีกที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน (แผ่นพลาสติกใส) และเก็บค่าแรงยกและแรงขับจากปีกที่มีความยาวปีก (Wing Span) ขนาด 15 ซม. ที่มีมุมปะทะแตกต่างกัน 4 มุม ได้แก่ มุม 0° 45° 60° และ 90° ผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของค่าเฉลี่ยของแรง กล่าวคือ ถ้าแรงยกเฉลี่ยมีค่าเป็นบวกหมายความว่ากลไกการบินที่สร้างขึ้นสามารถรักษากการบินอยู่ในอากาศได้ นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์ไดนามิกของการกระพือปีกด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ด้วยสมการคลื่นรูปไซน์ทั่วไป

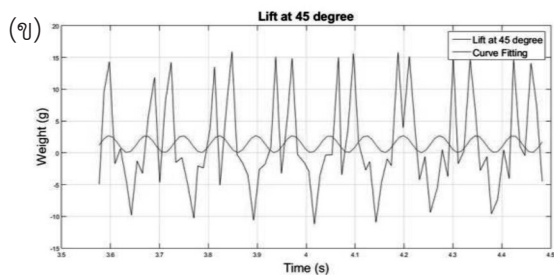
$$F(t) = A \cdot \sin(2\pi f t + \Theta) + C \quad (4)$$

โดยที่ A คือ ความสูงของกราฟ  $f$  คือ ความถี่ของกราฟ (Hz)  $\Theta$  คือ Phase shift ( $^{\circ}$ ) C คือ Vertical Shift และ  $t$  คือ เวลา (s)

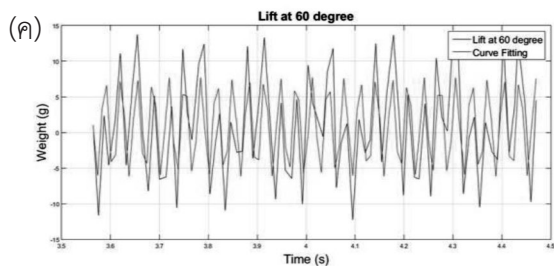
#### 4.1 กลไกการกระพือปีกแบบ Clap and Fling



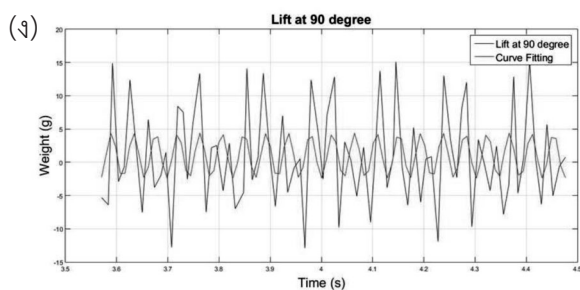
มุมปะทะ  $0^{\circ}$   $L(t) = 3.50\sin(2\pi 7.39t + 8.15) + 0.085$



มุมปะทะ  $45^{\circ}$   $L(t) = 1.39\sin(2\pi 13.32t + 8.39) + 1.37$

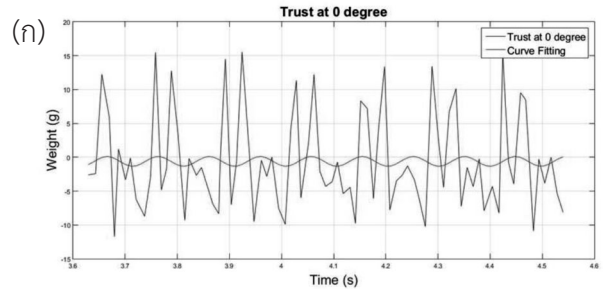


มุมปะทะ  $60^{\circ}$   $L(t) = 6.96\sin(2\pi 25.69t + 32.13) + 0.77$

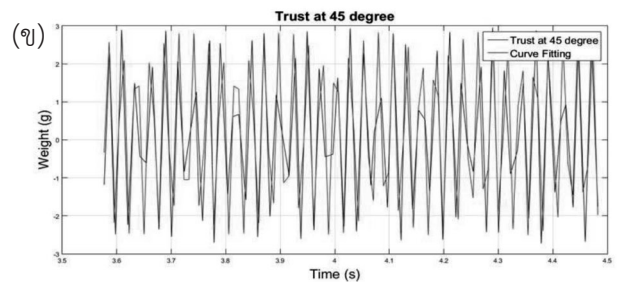


มุมปะทะ  $90^{\circ}$   $L(t) = 3.39\sin(2\pi 23.17t + 25.56) + 0.98$

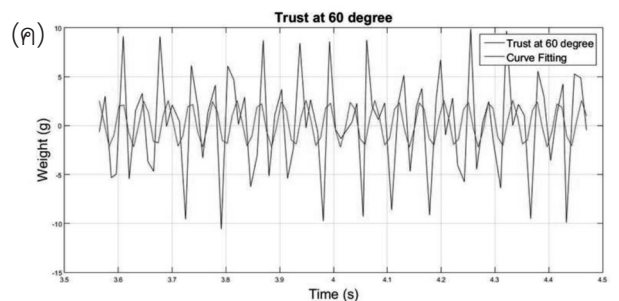
ภาพที่ 8 กราฟแรงยกกลไกกระพือปีกแบบ Clap and Fling



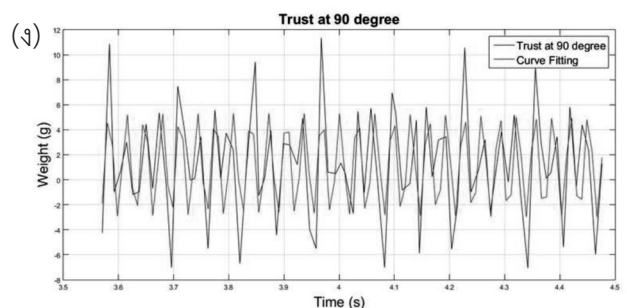
มุมปะทะ  $0^{\circ}$   $T(t) = 0.72\sin(2\pi 10.21t + 49.09) + 0.61$



มุมปะทะ  $45^{\circ}$   $T(t) = 2.67\sin(2\pi 38.29t + 37.57) + 0.16$



มุมปะทะ  $60^{\circ}$   $T(t) = 2.39\sin(2\pi 23.37t + 18.61) + 0.18$

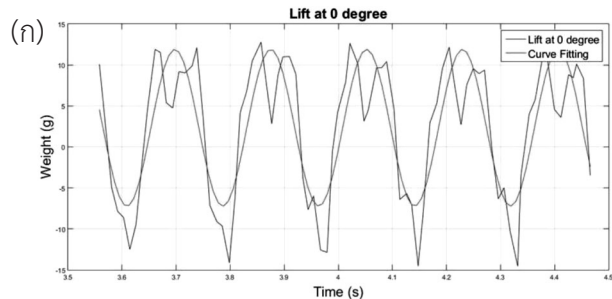


มุมปะทะ  $90^{\circ}$   $T(t) = 4.15\sin(2\pi 31.08t + 30.69) + 1.17$

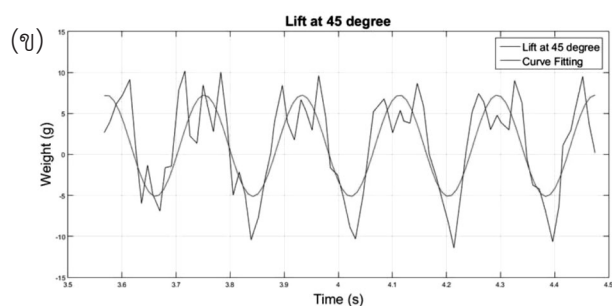
ภาพที่ 9 กราฟแรงขับเคลื่อนกลไกกระพือปีกแบบ Clap and Fling



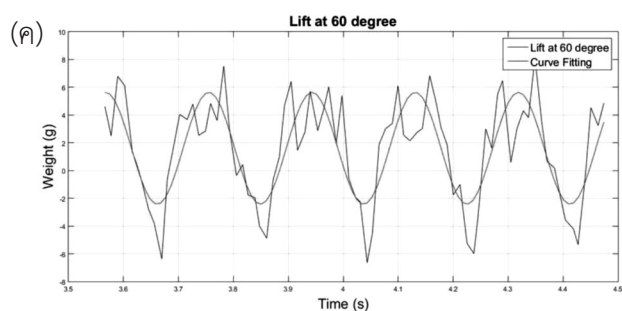
## 4.2 กลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง



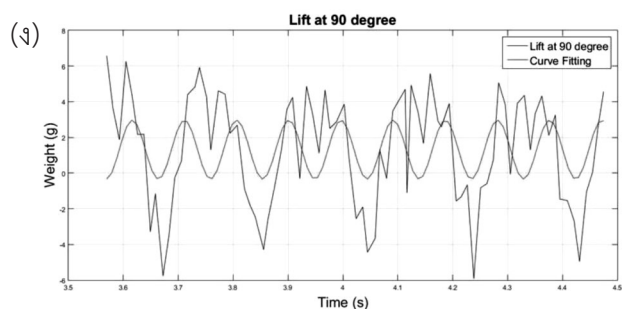
$$\text{มุมปะทะ } 0^\circ L(t) = 9.57\sin(2\pi 5.64t + 8.77) + 2.34$$



$$\text{มุมปะทะ } 45^\circ L(t) = 6.19\sin(2\pi 5.54t + 9.25) + 1.05$$

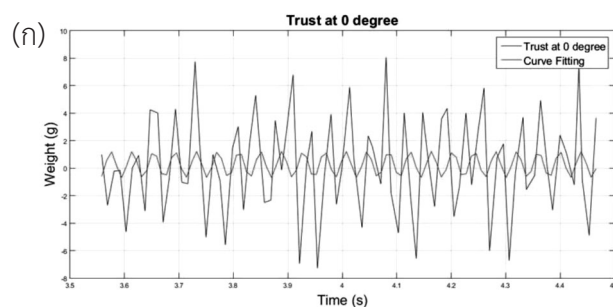


$$\text{มุมปะทะ } 60^\circ L(t) = 4.03\sin(2\pi 5.32t + 14.14) + 1.60$$

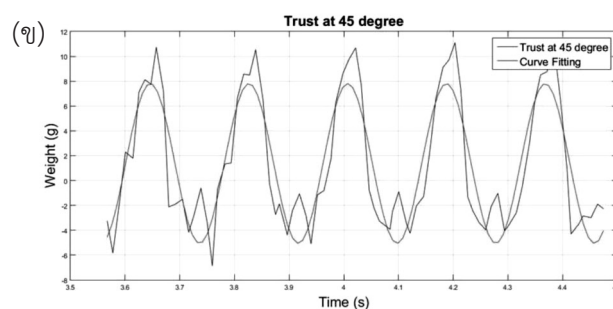


$$\text{มุมปะทะ } 90^\circ L(t) = 1.65\sin(2\pi 10.52t + 7.46) + 1.31$$

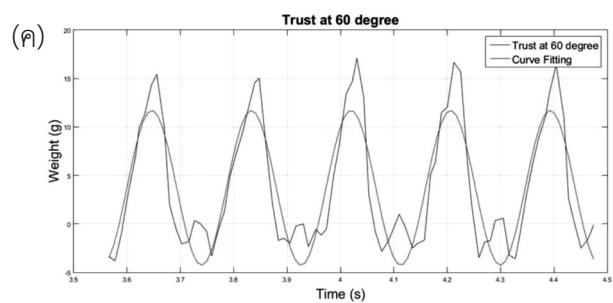
ภาพที่ 10 กราฟแรงยกกลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง



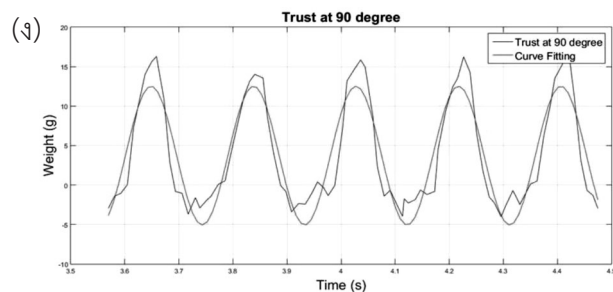
$$\text{มุมปะทะ } 0^\circ T(t) = -0.95\sin(2\pi 25.48t + 60.66) + 0.26$$



$$\text{มุมปะทะ } 45^\circ T(t) = -6.43\sin(2\pi 5.54t + 28.59) + 1.38$$



$$\text{มุมปะทะ } 60^\circ T(t) = 7.99\sin(2\pi 5.36t + 10.73) + 3.72$$



$$\text{มุมปะทะ } 90^\circ T(t) = 8.80\sin(2\pi 5.28t + 6.26) + 3.73$$

ภาพที่ 11 กราฟแรงขับเคลื่อนกลไกการกระพือปีกเดี่ยวแบบขึ้น-ลง



ผลการทดลองในภาพที่ 8 – 11 แสดงให้เห็นว่า แรงยกและแรงขับที่เกิดจากการกลไกการกระพือปีกมีลักษณะเป็นกราฟรูปไซน์ซึ่งสอดคล้องกับวงจรของการกระพือปีก นอกจากนี้ยังจะสังเกตได้ว่ามุมปะทะมีผลต่อความถี่ในการกระพือปีก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงทางอากาศพลศาสตร์ดังสมการที่ (3) กล่าวคือเมื่อความถี่ในการกระพือปีกเพิ่มขึ้น แรงทางอากาศพลศาสตร์ก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถสรุปจากผลการทดลองได้ว่ามุมปะทะใดเป็นมุมปะทะที่ทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์ได้ดีที่สุด เนื่องจากแรงทางอากาศพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายอย่างประกอบเข้าด้วยกัน อาทิ รูปร่างของปีก วัสดุที่ใช้ทำปีก รวมไปถึงกลไกในการกระพือปีก ซึ่งจะต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ไปพร้อม ๆ กัน แต่จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ทำให้ทราบว่ามุมปะทะที่ดีอยู่ในช่วงระหว่าง  $45^\circ - 60^\circ$  ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ต่อยอดในการออกแบบหุ่นยนต์บินได้ในอนาคต ได้ กล่าวคือจะต้องออกแบบให้ลำตัวของหุ่นยนต์บินทำมุมระหว่าง  $45^\circ - 60^\circ$  กับระนาบการกระพือปีกจึงจะทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการบินแบบลอยตัว

## 6. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนา หุ่นยนต์บินขนาดเล็กแบบปีกกระพือ โดยมุ่งเน้นที่การออกแบบกลไกการบิน โดยผู้วิจัยได้เลือกท่าทางการบินที่เลียนแบบการบินของแมลงและออกแบบกลไกการบินขึ้นมา 2 กลไก ทดลองวัดค่าแรงยกและแรงขับของแบบจำลองที่มีขนาดความยาวปีกเท่ากับ 15 ซม. โดยการปรับมุมปะทะทั้งหมด 4 มุม ได้แก่  $0^\circ$   $45^\circ$   $60^\circ$  และ  $90^\circ$  ผล

การทดลองสรุปได้ว่ากลไกการบินแบบที่ 2 มุมปะทะที่  $0^\circ$  สามารถสร้างแรงยกเฉลี่ยได้มากที่สุด เท่ากับ 2.34 กรัม และกลไกการบินแบบที่ 2 มุมปะทะที่  $60^\circ$  สามารถสร้างแรงขับเฉลี่ยได้มากที่สุด เท่ากับ 3.72 กรัม โดยค่าแรงยกเฉลี่ยและแรงขับเฉลี่ยที่ได้มีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่ากลไกการบินที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นสามารถรักษาการบินอยู่ในอากาศและสามารถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าได้ จากสมการแรงยกจะเห็นได้ว่ากลไกการบินแบบที่ 1 มุมปะทะที่  $60^\circ$  มีความถี่มากที่สุดเท่ากับ 25.69 เฮิรตซ์ และจากสมการแรงขับ กลไกการบินแบบที่ 1 มุมปะทะที่  $45^\circ$  มีค่าความถี่มากที่สุด เท่ากับ 38.29 เฮิรตซ์ สำหรับงานวิจัยต่อยอดควรมีการศึกษาเรื่องของวัสดุที่ใช้ในการทำปีก เพื่อที่จะได้สามารถทำปีกที่มีประสิทธิภาพในการสร้างแรงยกและแรงขับที่มากยิ่งขึ้น โดยปีกที่สร้างไม่ควรมีน้ำหนักมากหรือแข็งจนเกินไป เพราะจะส่งผลกระทบต่อกลไกการบินขนาดเล็กที่สร้างขึ้นและอาจจะทำให้เกิดการชำรุดหรือเสียหายได้ สุดท้ายนี้ เนื่องจากทางผู้วิจัยไม่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมทิศทางการบินของหุ่นยนต์บิน ถ้าหากจะนำหุ่นยนต์บินไปใช้งานจริงจะต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในเรื่องของระบบการสั่งการและการควบคุมทิศทางเพื่อให้หุ่นยนต์บินสามารถเลี้ยวและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้แบบอัตโนมัติ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมการพัฒนางานศึกษา-วิจัย โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

## 8. บรรณานุกรม

- (1) G.K. Taylor, 2003. Mechanics and aerodynamics of insect flight Acta Mech. Sin. Vol. 19, p. 458-469.
- (2) S.P. Sane, 2003. The aerodynamics of insect flight J. Exp. Biol., Vol. 206, p. 4191-4208 (2003).
- (3) Z. J. Wang, 2005. Dissecting Insect Flight Annu. Rev. Fluid. Vol. 37, p. 183-210.
- (4) W. Shyy, W. et. al., 2010. Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity. Prog. Aerospace Sci. Vol. 46, p. 284-327.
- (5) R. Dudley, 2000. In The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution. 1st edn, (Princeton University Press, 2000).
- (6) T. Weis-Fogh, 1973. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production, J. Exp. Biol. Vol. 59, p. 169-230.
- (7) X. Cheng, M. Sun, 2016. Wing-kinematics measurement and aerodynamics in a small insect in hovering flight, Scientific Reports, Nature.
- (8) H. Liu, X. Wang, T. Nakata, 2012. Aerodynamics and flight stability of a prototype flapping micro air vehicle, Proc. of International Conference on Complex Medical Engineering, Japan.
- (9) U. Wong, L. Sawatdipon, 2014. Study the effects of bending in flapping wings, Bangkok, Thailand.
- (10) L. Zhao, Q. Huang, X. Deng, 2009. Aerodynamic effects of flexibility in flapping wings' Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, USA.
- (10) เมษันท์ ธรรมวิชัย และ วิธวินท์ ศรีเพียรพล 2018 Wing Designs for a small flying robot in hovering, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอากาศยาน, Vol. 14, No. 1, p. 110-117.
- (11) วิธีการใช้งาน Load Cell กับ HX711 Amplifier Module (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก <http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/how-to-use-load-cell-and-hx711-amplifier-module.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2560).
- (12) HX711 (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก <https://www.arduitronics.com/product/694/weight-sensor-amplifier-module-hx711.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม 2560)
- (13) Arduino (ออนไลน์) เข้าถึงได้ <https://www.arduino.cc> (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม 2560).

ผลการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล  
ที่มีต่อทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์  
และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ของนักเรียนชั้นปีที่ 2  
โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก

The Effects of Context-Based Learning in the Topic of Biomolecules  
on Scientific Argumentation Skills and Learning Achievement of  
Second Year Students, at Armed Forces Academies Preparatory School,  
Nakhon Nayok Province

เรือเอกหญิง กมลวรรณ ด้อยอยู่เจริญพร  
Lieutenant Kamonwan Deyujalearnporn

นักศึกษาศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต (หลักสูตรและการสอน) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช  
Master of Education (Curriculum and Instruction) Sukhothai Thammathirat Open University  
9/9 Moo 9 Bangphud, Pak Kret, Nonthaburi 11120  
Corresponding Author: kamonwan.t@rtarf.mi.th  
(Received: June 16, 2019, Revised: July 19, 2019, Accepted: July 26, 2019)

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียน ชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ (2) เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

กลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2561 จำนวน 70 คน จำนวน 2 ห้องเรียน โดยการสุ่มแบบกลุ่ม และจับฉลากห้องเรียน เป็นกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย แผนการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล จำนวน 5 แผน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แบบวัดทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าที (T-test)

ผลการวิจัยปรากฏว่า (1) ระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล สูงกว่านักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และ (2) ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล สูงกว่านักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

**คำสำคัญ :** การจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ โรงเรียนเตรียมทหาร สารชีวโมเลกุล

**Abstract :** This research purposed to (1) compare scientific argumentation skills of second year students, at Armed Forces Academies Preparatory School, Nakhon Nayok Province under context-Based learning on the topic of Biomolecules with that of students learning under the conventional teaching method; and (2) to compare science learning achievement of second year students, at Armed Forces Academies Preparatory School Nakhon Nayok Province under context-Based learning on the topic of Biomolecules with that of students learning under the conventional teaching method.

The research sample consisted of 70 students, two classrooms, second year students at Armed Forces Academies Preparatory School, Nakhon Nayok Province during the second semester of academic year 2018, obtained by cluster random sampling, after that, each classroom was drawn into experimental groups and control groups. The employed research instruments comprised 5 learning management plans on the topic of Biomolecules. The data collecting instrument included scientific argumentation skills test and learning achievement test. Data were analyzed by using the mean, standard deviation, and t-test.

The research findings showed that (1) scientific argumentation skills of second year students, at Armed Forces Academies Preparatory School, Nakhon Nayok Province, under context-Based learning in the topic of Biomolecules was higher than students learning under the conventional teaching method at the .05 level of statistical significance; and (2) science learning achievement of second year students, at Armed Forces Academies Preparatory School, Nakhon Nayok Province, under context-Based learning in the topic of Biomolecules was higher than students learning under the conventional teaching method at the .05 level of statistical significance.

**Keywords :** Context-Based learning, Scientific argumentation skills, AFAPS school, biomolecules

## 1. บทนำ

ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์เป็นทักษะที่มีความสำคัญไม่เฉพาะกับนักวิทยาศาสตร์หรือผู้ที่ทำงานด้านวิทยาศาสตร์ แต่มีความสำคัญต่อประชาชนทั่วไป นักเรียน รวมทั้งนักเรียนเตรียมทหาร ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์เป็นทักษะที่อาศัยกระบวนการทางสติปัญญาในการพิจารณาไตร่ตรองข้อมูล ใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อรวบรวมหลักฐานสนับสนุนการอภิปรายเชิงวิทยาศาสตร์พัฒนากระบวนการคิด การตัดสินใจ การสื่อสาร และการอยู่ร่วมกันทางสังคมอย่างสร้างสรรค์ [29] จำเป็นสำหรับนักวิทยาศาสตร์ในการค้นคว้าหาข้อมูลความรู้ พัฒนา และพิสูจน์ความรู้เชิงวิทยาศาสตร์ [31] ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์เป็นทักษะเพื่อการดำรงชีวิตในศตวรรษที่ 21 [25] ซึ่งนักเรียนเตรียมทหารเป็นส่วนหนึ่งของประชากรในสังคม ที่มีความจำเป็นต้องอาศัยทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ เกี่ยวข้องกับการรับรู้ข้อมูล การตัดสินใจ และสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ

ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ที่อาศัยกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างมีเหตุผล และการพิสูจน์ความรู้เชิงวิทยาศาสตร์ ประกอบด้วย 1) ข้อกล่าวอ้าง (Claim) คือความสามารถทางการคิด การตัดสินใจ การวิเคราะห์ เพื่อลงความเห็น เป็นข้อกล่าวอ้างของตนเองโดยไม่ลอกเลียนแบบความคิดของผู้อื่น 2) เหตุผลสนับสนุนข้อกล่าวอ้าง (Warrant) คือความสามารถในการแสดงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้สอดคล้อง ตรงประเด็น 3) หลักฐานสนับสนุนข้อกล่าวอ้าง (Evidence) คือความสามารถในการแสดงหลักฐานจากการเก็บรวบรวมข้อมูล เช่น การปฏิบัติการทดลอง เอกสารประกอบการเรียน วารสาร ตำราเรียน เพื่อสนับสนุนข้อกล่าวอ้างของตนเองได้อย่างน่าเชื่อถือ 4) ข้อโต้แย้งข้อกล่าวอ้างหลักบนหลักฐานและเหตุผลที่ต่างออกไป (Counterargument) คือความสามารถในการนำเสนอมุมมองของเหตุผลและหลักฐานที่ต่างออกไป และ 5) การโต้แย้งกลับบนหลักฐานและเหตุผลน่าเชื่อถือเพื่อสนับสนุนข้อกล่าวอ้างหลัก (Sup-

portive argument) คือความสามารถในการแสดงการโต้แย้งกลับ เพื่อให้ข้อกล่าวอ้างฝ่ายตรงข้ามตกไปได้ถูกต้อง ตรงตามหลักการและทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ ทันทีทันที่ และไม่ใช้ความรู้สึกนึกคิด หรือ อารมณ์เข้ามาเกี่ยวข้อง

จากการประเมินผลการทดสอบทางการศึกษาระดับชาตินิยมพื้นฐาน หรือ O-NET (Ordinary National Educational Test) พบว่าการสอบ O-NET ไม่ได้มุ่งเน้นการวัดระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์โดยตรง แต่ระดับสมรรถนะของนักเรียนจากการประเมิน O-NET สามารถชี้ให้เห็นถึงระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนได้ด้วยองค์ประกอบด้านกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างมีเหตุผล การพิสูจน์ความรู้เชิงวิทยาศาสตร์ ความสามารถในการตัดสินใจ และการสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการประเมิน O-NET ประจำปีการศึกษา 2560 ของนักเรียนทั่วประเทศ พบว่านักเรียนเตรียมทหารมีคะแนนเฉลี่ยในกลุ่มสาระการเรียนรู้ วิชาเคมี เรื่อง สารชีวโมเลกุล เท่ากับร้อยละ 40.84 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ร้อยละ 50

เมื่อพิจารณาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนเตรียมทหารในรายวิชาเคมี เรื่องสารชีวโมเลกุล จากการวัดและประเมินผลด้านกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างมีเหตุผล การพิสูจน์ความรู้เชิงวิทยาศาสตร์ ความสามารถในการตัดสินใจ และการสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มคะแนนเฉลี่ยลดลง ดังนั้นการพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนควรได้รับการพัฒนาไปพร้อม ๆ กับระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ด้วย

รูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่สามารถส่งเสริมการพัฒนาในระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนแก่นักเรียนไปพร้อมๆ กันได้นั้น ควร มีบริบทรอบตัวนักเรียนมาเกี่ยวข้องกับการจัดการเรียนรู้ มีกิจกรรมที่ส่งเสริมให้นักเรียนลงมือปฏิบัติ เชื่อมโยงเนื้อหาบทเรียนทางวิทยาศาสตร์กับชีวิตประจำวัน สอดคล้องกับแนวคิดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน [34] การเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน (Context-Based Learning)



มีลักษณะสำคัญคือ เน้นการจัดการเรียนรู้โดยการนำสถานการณ์จริงหรือสถานการณ์จำลอง ในการดำรงชีวิตของนักเรียนมาเชื่อมโยงกับความรู้ มีการลงมือปฏิบัติกิจกรรมต่างๆ เพื่อค้นหาความรู้ด้วยตนเอง สร้างความรู้จากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างบุคคล [36] รวมทั้งส่งเสริมและพัฒนาระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนแก่นักเรียน โดยเฉพาะการพัฒนาความสามารถในการแสดงความคิดเห็นอย่างมีเหตุผล การคิดวิเคราะห์ การมีกระบวนการทางวิทยาศาสตร์สำหรับนำไปใช้ในสถานการณ์โลกความเป็นจริงได้ [40] ซึ่งการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานสามารถกระตุ้นความสนใจ ปรับทัศนคติที่มีต่อวิชาเคมี ส่งเสริมการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์แก่นักเรียนได้ [37] ช่วยเพิ่มความสนใจต่อการเรียนรู้ผ่านการจัดการเรียนรู้ในรูปแบบที่ใกล้เคียงกับการดำเนินชีวิตประจำวันของผู้เรียนที่ต้องเผชิญหน้ากับปัญหาต่างๆ ในการดำรงชีวิต [39] และช่วยพัฒนาการคิดวิเคราะห์ การใช้เหตุผลในการตัดสินใจ เพื่อตอบสนองต่อข้อมูลข่าวสารนั้น ๆ ได้ โดยครูผู้สอนอาจนำบริบทหรือเหตุการณ์เสมือนจริงในชีวิตส่วนตัวของนักเรียน การประกอบอาชีพต่าง ๆ และในการปฏิบัติทางด้านวิทยาศาสตร์ มาเป็นจุดเริ่มต้นในการเรียนรู้ของนักเรียน [28]

จากการทบทวนเอกสารและบทความทางวิชาการ พบว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานสามารถพัฒนาระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนแก่นักเรียนไปพร้อมๆ กันได้ โดยพบว่า นักเรียนมีระดับทักษะการโต้แย้งที่สูงขึ้น และมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้นสอดคล้องกัน [7] แต่ไม่พบงานวิจัยที่มีรูปแบบการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานที่สามารถพัฒนาระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนแก่นักเรียนเตรียมทหาร ในรายวิชาเคมี เมื่อทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพัฒนาการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน พบว่ายังไม่มียานวิจัยที่พัฒนาการจัดการเรียนรู้ในบทเรียนเรื่องสาร

ชีวโมเลกุล ด้วยบริบทวิชาชีววิทยา

จากการศึกษาความสำคัญ ปัญหา แนวคิด และงานวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาผลการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานในการพัฒนาระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนในรายวิชาเคมี เรื่อง สารชีวโมเลกุล

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อเปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

## 3. สมมติฐานการวิจัย

3.1 ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล สูงกว่านักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

3.2 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล สูงกว่านักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

## 4. วิธีดำเนินการวิจัย

### 4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

4.1.1 ประชากร คือ นักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ปีการศึกษา 2561

จำนวน 605 คน จาก 18 ห้องเรียน สังกัดสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ กองบัญชาการกองทัพไทย กระทรวงกลาโหม

4.1.2 กลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2561 จำนวน 70 คน จาก 2 ห้องเรียน โดยกลุ่มแบบกลุ่ม และจับฉลากห้องเรียน เป็นกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม สังกัดสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ กองบัญชาการกองทัพไทย กระทรวงกลาโหม

#### 4.2 รูปแบบการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยแบบกึ่งทดลอง (Quasi-experimental Research) แบบ Two-Group Pretest-Posttest Design คือ แบ่งนักเรียนออกเป็นกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม ทำการทดสอบก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้โดยกลุ่มทดลองใช้รูปแบบการสอนที่พัฒนาในครั้งนี่คือการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน และกลุ่มควบคุมใช้รูปแบบการสอนแบบปกติ (โดยใช้การสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ 5E)

#### 4.3 เครื่องมือการวิจัย

4.3.1 แผนการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ เรื่อง สารชีวโมเลกุล ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ประกอบด้วยแผนการจัดการเรียนรู้จำนวน 5 แผน คิดเป็น 18 คาบ คาบละ 50 นาที ดังนี้

แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 1 เรื่อง ความหมายสารชีวโมเลกุล  
แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 2 เรื่อง คาร์โบไฮเดรต  
แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 3 เรื่อง โปรตีน  
แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 4 เรื่อง ไขมัน  
แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 5 เรื่อง กรดนิวคลีอิก

4.3.2 แบบวัดทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ เป็นเครื่องมือวิจัยสำหรับเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์

ของนักเรียนก่อนและหลังการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ประกอบด้วยประเด็นการใช้ทักษะโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ทั้งหมด 5 ประเด็น แต่ละประเด็นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการให้ข้อมูลเกี่ยวกับบริบทที่ใช้ประกอบการลงความเห็นในทักษะโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ ส่วนที่ 2 เป็นคำถามมีรูปแบบการวัดด้วยคำถามปลายเปิด (Open-ended questions) ใช้วัดระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ ประกอบด้วย 5 ข้อคำถามคือ

ข้อที่ 1 ประเมินความสามารถในการสร้างข้อกล่าวอ้าง (Claim)

ข้อที่ 2 ประเมินความสามารถในการให้เหตุผลสนับสนุนข้อกล่าวอ้างของนักเรียน (Warrant)

ข้อที่ 3 ประเมินความสามารถในการหาหลักฐานที่สนับสนุนข้อกล่าวอ้าง ทำให้ข้อกล่าวอ้างน่าเชื่อถือมากขึ้น (Evidence)

ข้อที่ 4 ประเมินความสามารถในการสร้างข้อโต้แย้งของนักเรียนบนหลักฐานและเหตุผลที่ต่างออกไป (Counter Argument)

ข้อที่ 5 ประเมินความสามารถในการให้การโต้แย้งกลับบนหลักฐานและเหตุผลน่าเชื่อถือ (Supportive Argument)

4.3.3 แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องสารชีวโมเลกุล เป็นข้อสอบแบบปรนัยมี 4 ตัวเลือก สร้างขึ้นเพื่อใช้วัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่อง สารชีวโมเลกุล รวมทั้งสิ้น 30 ข้อ

#### 4.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

4.4.1 ก่อนดำเนินการสอนตามแผนการจัดการเรียนรู้ ผู้วิจัยได้ชี้แจงให้นักเรียนเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการเรียนการสอน ซึ่งผู้วิจัยนำรูปแบบการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานเพื่อพัฒนาทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน พร้อมทั้งแจ้งวัตถุประสงค์พร้อมเงื่อนไขในการเรียนให้กับนักเรียนได้รับทราบ

4.4.2 ให้นักเรียนทำแบบวัดทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียน และทำแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียน

4.4.3 ดำเนินการสอนตามแผนการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่องสารชีวโมเลกุล จำนวน 5 แผน เวลา 6 สัปดาห์หรือ 18 คาบ คาบละ 50 นาที ระหว่างเดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนธันวาคม ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2561

4.4.4 หลังจากดำเนินการสอนทุกแผนเรียบร้อยแล้ว กำหนดให้นักเรียนทำแบบวัดทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียน และทำแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียน

#### 4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

4.5.1 ใช้สถิติดำเนินการวิเคราะห์ด้วยค่าทางสถิติ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยร้อยละ (X) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และการทดสอบค่าที (T-test for Independent Sample) แบบเป็นอิสระต่อกัน ของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องสารชีวโมเลกุล เปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียนจากการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานกับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

4.5.2 ใช้สถิติ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าที (T-test for Dependent Sample) จากแบบวัดทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ เรื่องสารชีวโมเลกุล ก่อน-หลังเรียน จากการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน

4.5.3 จัดระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ตามรูบิกคือ

|                 |                |
|-----------------|----------------|
| คะแนน 37.0-45.0 | ระดับ ดีมาก    |
| คะแนน 28.0-36.5 | ระดับ ดี       |
| คะแนน 19.0-27.5 | ระดับ ปานกลาง  |
| คะแนน 10.0-18.5 | ระดับ พอใช้    |
| คะแนน 0.0-9.5   | ระดับ ปรับปรุง |

## 5. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### 5.1 ผลการวิจัย

5.1.1 ผลการเปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียน ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยค่าทางสถิติค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าทีแบบเป็นอิสระต่อกัน พบว่า ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียน ของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน และการจัดการเรียนรู้แบบปกติอยู่ในระดับปรับปรุง มีค่าเท่ากับ 4.91 และ 5.57 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน และการจัดการเรียนรู้แบบปกติมีค่าเท่ากับ 3.62 และ 5.00 ตามลำดับ และทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน แตกต่างจากนักเรียนเตรียมที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ปรากฏผลดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ผลการเปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

| กลุ่ม                               | $\bar{X}$ | S.D. | t     | Sig  |
|-------------------------------------|-----------|------|-------|------|
| การจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน | 4.91      | 3.62 | 0.630 | .265 |
| การจัดการเรียนรู้แบบปกติ            | 5.57      | 5.00 |       |      |

$p > .05$

5.1.2 ผลการเปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียนและหลังเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยค่าทางสถิติ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าที พบว่า ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานอยู่ในระดับปรับปรุง มีค่าเท่ากับ 4.91 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.62 ในขณะที่ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานอยู่ในระดับดี มีค่าเท่ากับ 35.71 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6.29 และทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียน สูงกว่า ก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ปรากฏผลดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ผลการเปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ก่อนเรียนและหลังเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน

| กลุ่ม                                   | $\bar{X}$ | S.D. | t       | Sig  |
|-----------------------------------------|-----------|------|---------|------|
| ก่อนการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน | 4.91      | 3.62 | 26.566* | .000 |
| หลังการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน | 35.71     | 6.29 |         |      |

\*p< .05

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยค่าทางสถิติค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าทีแบบเป็นอิสระต่อกัน พบว่า ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานอยู่ในระดับดี มีค่า

เท่ากับ 35.71 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6.29 ในขณะที่ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเท่ากับ 27.20 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.86 และทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน สูงกว่านักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ปรากฏผลดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ผลการเปรียบเทียบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์หลังเรียน ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

| กลุ่ม                               | $\bar{X}$ | S.D. | t      | Sig  |
|-------------------------------------|-----------|------|--------|------|
| การจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน | 35.71     | 6.29 | 5.004* | .000 |
| การจัดการเรียนรู้แบบปกติ            | 27.20     | 7.86 |        |      |

\*p< .05

5.1.4 ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยค่าทางสถิติค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าทีแบบเป็นอิสระต่อกัน พบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.40 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.51 ในขณะที่ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.80 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5.24 และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน แตกต่างจากนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้

แบบปกติอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ปรากฏผลดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

| กลุ่ม                               | $\bar{X}$ | S.D. | t     | Sig  |
|-------------------------------------|-----------|------|-------|------|
| การจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน | 8.40      | 3.51 | 0.563 | .288 |
| การจัดการเรียนรู้แบบปกติ            | 7.80      | 5.24 |       |      |

$p > .05$

5.1.5 ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยค่าทางสถิติค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าทีแบบเป็นอิสระต่อกัน พบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียน ของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.26 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.39 ในขณะที่ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนของนักเรียนเตรียมทหารที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.63 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.54 และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน สูงกว่านักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ปรากฏผลดังตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียน ของนักเรียนเตรียมทหารชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน กับนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

| กลุ่ม                               | $\bar{X}$ | S.D. | t      | Sig  |
|-------------------------------------|-----------|------|--------|------|
| การจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน | 21.26     | 3.39 | 1.701* | .047 |
| การจัดการเรียนรู้แบบปกติ            | 19.63     | 4.54 |        |      |

\* $p < .05$

## 5.2 อภิปรายผล

### 5.2.1 ทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ เรื่องสาร-ชีวโมเลกุล

ผลการวิจัยพบว่า ระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ เรื่องสารชีวโมเลกุล ของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน สูงกว่านักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 สอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้ เนื่องจากลักษณะของบริบทที่ใช้ครอบคลุมประเด็นสถานการณ์เรื่องราวชีวิตประจำวันของนักเรียน สิ่งแวดล้อมรอบตัวนักเรียน แนวทางประกอบอาชีพ และความรู้ความสามารถทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [26] ส่งเสริมให้นักเรียนเกิดความสนใจ และตระหนักถึงความสำคัญของการเรียนรู้เนื้อหาบทเรียน [2] นอกจากนี้บริบทที่ใช้สามารถส่งเสริมให้นักเรียนเกิดความสามารถทางการคิด การตัดสินใจ การวิเคราะห์บริบทที่กำหนดให้ เพื่อลงความเห็น เป็นข้อกล่าวอ้างของตนเองโดยไม่ลอกเลียนแบบความคิดของเพื่อนในห้องเรียนเดียวกัน [35] ส่งเสริมให้นักเรียนสามารถแสดงเหตุผลสนับสนุนข้อกล่าวอ้างตามหลักและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับบริบทที่ศึกษา [15] ส่งเสริมให้นักเรียนสามารถแสดงหลักฐานจากการเก็บรวบรวมข้อมูล เช่น การปฏิบัติการทดลอง เอกสารประกอบการ



เรียน วารสาร ตำราเรียน เพื่อสนับสนุนข้อกล่าวอ้างของตนเองได้อย่างน่าเชื่อถือ [11] ส่งเสริมให้นักเรียนสามารถแสดงหลักฐานและเหตุผลที่ต่างออกไปจากข้อกล่าวอ้างหลักได้ โดยนักเรียนนำเสนอมุมมองของเหตุผลที่ต่างออกไป หรือ ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลที่แตกต่างจากของตนเองแก่เพื่อนในห้องเรียนเดียวกัน [17] นอกจากนี้การจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานสามารถพัฒนาทักษะการแสดงหลักฐานและเหตุผลที่สนับสนุนการโต้แย้งกลับเพื่อให้ข้อกล่าวอ้างฝ่ายตรงข้ามตกไป ได้ถูกต้องตรงตามหลักการและทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ ทันท่วงที และไม่ใช่ความรู้สึกนึกคิด หรือ อารมณ์เข้ามาเกี่ยวข้อง [7] สอดคล้องกับทฤษฎีการเรียนรู้โดยการลงมือทำ (Learning by Doing) ที่เน้นให้ผู้เรียนเป็นผู้ลงมือปฏิบัติกิจกรรมต่างๆ จนเกิดเป็นความรู้ของตนเอง ช่วยพัฒนาความสามารถทางการเรียนรู้แก่นักเรียนตามช่วงเวลาของพัฒนาการทางปัญญา (The Zone of Proximal Development) ส่งผลให้นักเรียนบางส่วนสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง และนักเรียนบางส่วนต้องได้รับความช่วยเหลือจากสังคมจึงเกิดการเรียนรู้ได้ อีกทั้งสอดคล้องกับทฤษฎีการเรียนรู้เชิงสังคม (Social Constructivism) ที่แสดงให้เห็นว่าการเรียนรู้เกิดจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างบริบททางสังคม บริบททางวัฒนธรรมและภาษา ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้นักเรียนเกิดกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างมีเหตุผล การพิสูจน์ความรู้เชิงวิทยาศาสตร์ ความสามารถในการตัดสินใจ และการสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการต่างๆ เหล่านี้จะส่งเสริมให้นักเรียนมีทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์อยู่บนหลักฐานและเหตุผลมากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างการจัดกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานเพื่อพัฒนาทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ จาก แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 2 เรื่อง คาร์โบไฮเดรต โดยมีขั้นกำหนดสถานการณ์ ที่ครูเป็นผู้นำเสนอบริบท “หากนักเรียนเป็นนักเคมีวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ กรมเภสัชกรรมทหาร นักเรียนคิดว่ามีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบในยาพาราเซตามอลหรือไม่ หากมีโครงสร้าง

คาร์โบไฮเดรตเป็นแบบใด” นักเรียนพิจารณาบริบทที่ครูนำเสนอ พร้อมวิเคราะห์ข้อกล่าวอ้างของตนเอง จากแหล่งข้อมูล เช่น สื่อจากสอน Power Point ใบความรู้ และใบกิจกรรม ได้ว่ายาพาราเซตามอลมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหรือไม่ พร้อมให้เหตุผลตามหลักการและทฤษฎีประกอบข้อกล่าวอ้างของตนเองได้ ต่อมากำหนดให้นักเรียนทำการค้นคว้าหลักฐานเพื่อสนับสนุนข้อกล่าวอ้างของตนเองจากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือ เช่น ผลการปฏิบัติการทดลองที่มีการทดสอบคาร์โบไฮเดรตในยาพาราเซตามอล ขั้นต่อมาคือการเรียนรู้แนวคิดสำคัญร่วมกัน โดยนักเรียนแต่ละกลุ่มออกมานำเสนอข้อกล่าวอ้าง เหตุผลสนับสนุนข้อกล่าวอ้าง และหลักฐานที่รวบรวมได้มาสนับสนุนข้อกล่าวอ้าง เช่น นำเสนอวิธีการทดสอบคาร์โบไฮเดรตในยาพาราเซตามอล โครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตที่สอดคล้องกับผลการทดสอบในยาพาราเซตามอล หน้าชั้นเรียน เพื่ออภิปรายข้อมูลของกลุ่มที่ได้จากการทดสอบเมื่อยาพาราเซตามอล และในขั้นตอนนี้ครูจะเปิดโอกาสให้นักเรียนกลุ่มอื่น นำเสนอข้อโต้แย้งที่เป็นมุมมองของเหตุผลและหลักฐานที่ต่างออกไป ส่งผลให้เกิดการตรวจสอบความรู้เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ เช่น ลำดับขั้นการทดสอบคาร์โบไฮเดรตในยาพาราเซตามอล หลักการวิเคราะห์โครงสร้างคาร์โบไฮเดรตจากผลการทดลอง เป็นต้น กลุ่มที่นำเสนอสามารถโต้แย้งกลับเพื่อแสดงให้เห็นว่าเหตุผลและหลักฐานที่ต่างออกไปของฝ่ายตรงข้ามมีความน่าเชื่อถือลดลง โดยอ้างอิงตามหลักการและทฤษฎีที่น่าเชื่อถือได้ ทันท่วงที และไม่ใช่ความรู้สึกนึกคิด หรือ อารมณ์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งครูทำหน้าที่เป็นผู้สังเกตสถานการณ์ในห้องเรียนและจัดลำดับคิวในการแสดงข้อโต้แย้ง จะเห็นได้ว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานเพื่อพัฒนาทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ จำนวน 5 แผนการเรียนรู้ ต่อเนื่องกันในบทเรียน เรื่องสารชีวโมเลกุล ส่งผลให้นักเรียนมีพื้นฐานการตัดสินใจ และการให้เหตุผลที่ดีขึ้น มีการคิดวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ มีทักษะในการโต้แย้งกลับโดยอยู่บนหลักฐานและเหตุผลมากยิ่งขึ้น

ส่งเสริมให้นักเรียนมีคะแนนเฉลี่ยจากการทดสอบทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์สูงขึ้น และมีระดับทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ สูงกว่า การจัดการเรียนรู้แบบปกติ สอดคล้องกับสมมติฐานงานวิจัย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภคพร อีสระ [10] พบว่า นักเรียนกลุ่มที่เรียนเคมีด้วยรูปแบบการเรียนการสอนสืบสอบแบบมีการโต้แย้งร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้แบบร่วมมือมีคะแนนเฉลี่ยความสามารถในการให้เหตุผลเชิงวิทยาศาสตร์สูงกว่านักเรียนกลุ่มที่เรียนเคมีด้วยวิธีการสอนแบบทั่วไป อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และมีคะแนนเฉลี่ยผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเคมีสูงกว่านักเรียนกลุ่มที่เรียนเคมีด้วยวิธีการสอนแบบทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 พัทธภรณ์ บุญทรศนีย์ [7] พบว่า การจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานสามารถพัฒนาทักษะการอภิปรายโต้แย้งของนักเรียนได้ โดยนักเรียนสามารถแสดงข้อกล่าวอ้างของตนเอง กล่าวที่จะตัดสินใจ พร้อมทั้งมีการคิดวิเคราะห์ วิพากษ์วิจารณ์เพื่อแสดงหลักฐานสนับสนุน สามารถแสดงเหตุผลของฝ่ายตรงข้ามได้ และสามารถแสดงเหตุผลสนับสนุนเพื่อให้ข้อกล่าวอ้างของตนเองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น อัครวิน ธนะปะต [18] พบว่า สามารถพัฒนาทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนในระดับดีมากเพิ่มขึ้น และสามารถพัฒนาการโต้แย้งได้ทุกองค์ประกอบ ญัฐพัชร์ เสริมสุข [3] และอัครวิน ธนะปะต [18] พบว่า องค์ประกอบของทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ที่สามารถพัฒนาได้มากที่สุด คือ ข้อกล่าวอ้าง และเหตุผลสนับสนุนข้อกล่าวอ้าง อุไรวรรณ ไชยช่วย [21] พบว่า การจัดการเรียนรู้ประเด็นปัญหาทางสังคมที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิทยาศาสตร์สามารถพัฒนาทักษะการโต้แย้งของนักเรียนได้ดีกว่าวิธีปัญหาเป็นฐาน

5.2.2 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องสารชีวโมเลกุล

ผลการวิจัยพบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียน เรื่องสารชีวโมเลกุลของนักเรียนชั้นปีที่ 2 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานสูงกว่านักเรียน

ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้แบบปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 สอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้ เนื่องจากการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน มีรูปแบบการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ให้นักเรียนเข้าใจบทเรียนทางวิทยาศาสตร์ผ่านสถานการณ์รอบตัวและชีวิตประจำวันของทหาร โดยมีขั้นตอนให้นักเรียนเป็นผู้ลงมือปฏิบัติรวบรวมข้อมูล สร้างความรู้ด้วยตนเอง และส่งเสริมการเชื่อมโยงความรู้หรือประสบการณ์เดิมกับความรู้ใหม่ สอดคล้องกับทฤษฎีการเรียนรู้ทางปัญญา (Cognitive Constructivism) ส่งผลให้นักเรียนเกิดความเข้าใจในบทเรียนทางวิทยาศาสตร์ เกิดความสนใจเรียนรู้ผ่านบริบทอาชีพทหาร-ตำรวจ กิจกรรมการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานสามารถดึงดูดความสนใจของนักเรียนได้ดีกว่ากิจกรรมการจัดการเรียนรู้แบบปกติ และมีการเน้นให้นักเรียนประยุกต์ความรู้ที่มีเข้ากับสถานการณ์ใหม่ บริบทใหม่ บนพื้นฐานความรู้เดียวกัน ซึ่งสังเกตได้จากนักเรียนมีความสามารถในการยกตัวอย่างใหม่ได้ [17] นักเรียนมีความสามารถในการระดับการประยุกต์ใช้ การประเมินค่า และความคิดสร้างสรรค์ ดีกว่าการจัดการเรียนรู้แบบปกติ

## 6. ข้อเสนอแนะ

### 6.1 ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย

6.1.1 การออกแบบบริบท หรือ สถานการณ์ ในขั้นตอนแรกของกระบวนการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน ควรพิจารณาจากพื้นฐานความรู้ทางวิชาการ และความรู้ด้านทหารของนักเรียน ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยมีกลุ่มตัวอย่างเป็นนักเรียนจบหลักสูตรการศึกษาจากระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 4-6, นักเรียนนายสิบ (น.น.ส.), นักเรียนจำ (น.ร.จ.), นักเรียนจำอากาศ (น.จ.อ.) และนักเรียนตำรวจ (น.ร.จ.) ครูผู้สอนจึงต้องออกแบบบริบทให้ครอบคลุมประเด็นทั้งทางความรู้ทางวิชาการและความรู้ทางทหาร เพื่อกระตุ้นให้นักเรียนเกิดความสนใจพร้อมกัน ดีกว่าการเน้นเฉพาะด้านอย่างใดอย่างหนึ่ง

6.1.2 ขั้นตอนการลงมือปฏิบัติของการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน ครูต้องเตรียมแหล่งข้อมูลสำหรับนักเรียนเพื่อทำการสืบค้นข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับนักเรียนชั้นปีที่ 2 โรงเรียนเตรียมทหาร จังหวัดนครนายก ที่มีข้อจำกัดในการใช้เครื่องมือสืบค้นทางเทคโนโลยี เช่น มือถือ คอมพิวเตอร์ และสภาพร่างกายที่มีการดำเนินชีวิตตามวิถีทางทหารทั่วไป คือ มีการเข้าเวรยามตอนกลางคืน มีช่วงเวลาฝึก และเวลาธารงวินัย ดังนั้นนักเรียนอาจมีอาการง่วงนอนขณะเรียนได้ ครูควรแก้ไขด้วยการปลุกให้ตื่น การให้ล้างหน้า ยืนในห้องเรียน เป็นต้น เพื่อกระตุ้นให้นักเรียนลดอาการอ่อนเพลียหรือลดอาการง่วงนอน

6.1.3 ขั้นตอนการเรียนรู้แนวคิดสำคัญของการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน ครูควรมีการเสริมแรงแก่นักเรียนเมื่อนักเรียนสามารถแสดงทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ที่ดี เช่น การเป็นผู้ฟังที่ดีและการเป็นผู้พูดที่ดี ด้วยการมอบของขวัญ หรือรางวัลพิเศษ ส่งผลให้นักเรียนเกิดความกระตือรือร้น เกิดความสนใจต่อรายละเอียดของการเรียนมากยิ่งขึ้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

6.2.1 ควรมีการศึกษาตัวแปรตามอื่นเพิ่มเติม เช่น ทักษะการแก้ปัญหาอย่างสร้างสรรค์ของนักเรียนเตรียมทหาร เนื่องจาก ในขั้นตอนการเรียนรู้แนวคิดสำคัญของการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน นักเรียนต้องเผชิญกับปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ซึ่งจากการสังเกตพบว่า นักเรียนแต่ละคนมีทักษะการแก้ปัญหาอย่างสร้างสรรค์แตกต่างกัน

6.2.2 กลุ่มตัวอย่างในการทำวิจัยครั้งต่อไป ควรมีการศึกษากับนักเรียนเตรียมทหารชั้นปีที่ 2 แยกตามเหล่าทัพ หรือแยกตามหลักสูตรการจบศึกษาในระดับต่างๆ คือ มัธยมศึกษาชั้นปีที่ 4-6, นักเรียนนายสิบ (นนส.), นักเรียนจำ (นรจ.), นักเรียนจำอากาศ (นจอ.) และนักเรียนตำรวจน้ำ (ตรน.) มีผลการวิจัยเหมือนกันหรือไม่ อย่างไร

## บรรณานุกรม

- (1) กองสถิติและประเมินผล รร.ตท. 2560. ผลการวัดและประเมินความรู้ทางวิทยาศาสตร์วิชาเคมีพื้นฐาน ประจำปีการศึกษา 2560 . ข้อมูลการศึกษาการวัดและประเมินผล โรงเรียนเตรียมทหาร.
- (2) จินดา พรหมณัฐ 2553. ผลของการใช้กิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานที่มีต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5. วารสารศรีนครินทรวิโรฒวิจัยและพัฒนา (สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์) ปีที่ 2 ฉบับพิเศษที่ 1 มกราคม 2553, หน้า 32-41.
- (3) ณัฏฐพัชร์ เสริมสุข 2558. การพัฒนาทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ในหน่วยการเรียนรู้เรื่อง ระบบนิเวศ โดยการจัดการเรียนรู้โดยใช้ประเด็นทางสังคมที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์. วิทยานิพนธ์ศึกษาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา ภาควิชาการศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- (4) ทศวรรณ ภูผาแด่น และศักดิ์ศรี สุภาพร 2557. การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่อง สารชีวโมเลกุล ด้วยกิจกรรมการเรียนรู้แบบสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์ร่วมกับกิจกรรมทำนาย-สังเกต-อธิบาย. การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 6 (หน้า 1-6). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- (5) ประสาท เนื่องเฉลิม. 2558. การเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 21. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- (6) พัฒนพงษ์ พงษ์จันโอ 2560. การศึกษาการจัดกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน เรื่อง ปฏิกิริยาเคมี สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 . วิทยานิพนธ์ครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- (7) พัทธภรณ์ บุญยธรศนี 2558. การพัฒนาทักษะการอภิปรายโต้แย้ง เรื่องแรงและกฎการเคลื่อนที่ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โดยใช้บริบทเป็นฐานในการจัดการเรียนรู้. วิทยานิพนธ์ศึกษาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา ภาควิชาการศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- (8) พัทธมัย นิมลลอ 2559. ผลการใช้แนวคิดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐานที่มีต่อความเข้าใจในทัศนชีววิทยาของนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลาย. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการศึกษาวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (9) พิชญ์สินี จักรแก้ว 2559. การจัดการเรียนรู้ตามรูปแบบการเรียนรู้ที่ใช้บริบทเป็นฐานเพื่อพัฒนาสมรรถนะการ ประเมินและออกแบบกระบวนการสืบเสาะหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เรื่อง อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5. นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 12: วิจัยและนวัตกรรมกับการพัฒนาประเทศ. หน้า 943-958.
- (10) ภคพร อิศระ 2558. ผลการให้รูปแบบการเรียนการสอนสืบสอบแบบมีการโต้แย้งร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้แบบร่วมมือ ที่มีต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเคมีและความสามารถในการให้เหตุผลเชิงวิทยาศาสตร์

- ของนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวิทยาศาสตร์ภูมิภาค. วารสารอิเล็กทรอนิกส์ทางการศึกษา ปีที่ 10 ฉบับที่ 2. หน้า 249-260.
- (11) ภรณ์ภัสสรณ์ จำชัยภูมิ 2558. การพัฒนาแนวคิดของนักเรียนเรื่องปฏิกิริยาเคมี ในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ด้วยการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน. วิทยานิพนธ์ ศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
  - (12) รร.ตท. 2560. เอกสารประกอบการเรียนการสอนเคมีพื้นฐาน ว 32121 ชั้นปีที่ 2. กองวิชาวิทยาศาสตร์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนเตรียมทหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2560.
  - (13) วนิตา ผาละนัต 2561. การโต้แย้งอย่างมีเหตุผล: ทักษะเพื่อการดำรงชีวิตในศตวรรษที่ 21. วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. ฉบับที่ 2 หน้า 174-181.
  - (14) วิจารย์ พานิช 2554. การศึกษาที่มีคุณภาพสำหรับศตวรรษที่ 21. เอกสารประกอบการบรรยายในกำหนดการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 6 สมาคมเครือข่ายพัฒนาวิชาชีพอาจารย์และองค์กรระดับอุดมศึกษาแห่งประเทศไทย (ควอท.) ประจำปี 2554 เรื่อง “การศึกษา มุ่งผลลัพธ์: ก้าวสู่บัณฑิตคุณภาพในศตวรรษ 21” วันที่ 29 กรกฎาคม 2554.
  - (15) ศุภกร สุขยิ่ง 2560. การจัดการเรียนรู้แบบใช้บริบทเป็นฐานร่วมกับการใช้ข่าวเป็นสื่อ เรื่อง สภาพสมดุล เพื่อพัฒนาการรู้เรื่องวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4. วารสารวิชาการศึกษาศาสตร์: ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2560. หน้า 31-44.
  - (16) สสวท. 2554. หนังสือเรียนรายวิชาเคมีเพิ่มเติม เคมีเล่ม 5 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์: พิมพ์ครั้งที่ 1. องค์การค้ำของ สกสค.ลาดพร้าว. 2554.
  - (17) อธิฐาน บุญเป็ง 2558. การพัฒนาความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เรื่อง ปฏิกิริยาเคมีโดยการจัดการเรียนรู้โดยใช้บริบทเป็นฐาน. วารสารศึกษาศาสตร์ปริทัศน์ ปีที่ 30 ฉบับที่ 2. หน้า 162-172.
  - (18) อัศวิน ณะนัต 2558. การพัฒนาทักษะการโต้แย้งทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ผ่านการจัดการเรียนรู้โดยใช้ประเด็นทางสังคมที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ในหน่วยการเรียนรู้ทรัพยากรธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา ภาควิชาการศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
  - (19) อังคนาภรณ์ ปรีชาพวงค์มิตร 2557. ผลของการเรียนรู้แบบบริบทเป็นฐาน ต่อมนินมิติและแรงจูงใจ ใฝ่สมฤทธิในการเรียนวิชาเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย. วิทยานิพนธ์ ศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
  - (20) เอกภูมิ จันทระขันตี 2559. การจัดการเรียนการสอนเพื่อส่งเสริมทักษะการโต้แย้งในชั้นเรียนวิทยาศาสตร์. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 11(1), 217-232.
  - (21) อุไรวรรณ ไชยช่วย 2558. การเปรียบเทียบความสามารถในการโต้แย้งและการคิดเชิงวิจารณ์จากการเรียนประเด็นปัญหาทางสังคมที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิทยาศาสตร์ โดยใช้รูปแบบผสมผสานตามวิธีวิทยาศาสตร์และวิธีปัญหาเป็นฐานของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่มีการนำตนเองในการเรียนรู้ต่างกัน. วิทยานิพนธ์ศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
  - (22) Bennett, Judith; & Holman, John 2002. Context-based Approaches to the Teaching of Chemistry : What are they and What are their Effect?. in Chemical Education: Toward Research-based Practice, Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p.165-184.
  - (23) M. Chang, G.D. Chen, 2009. Learning by Playing, Game-based Education System Design and Development. Canada: Springer.
  - (24) T. Christine, 2009. Argumentation: The Language of Science. Journal of Elementary Science Education, Vol. 21, No. 1, p. 17-25.
  - (25) V.M. Dawson & G. Venville, 2010. Teaching strategies for developing students' argumentation skill about socioscientific issues in high school genetics. Research in Science Education, Vol.40, No.2, p. 133-148.
  - (26) O. De Jong, 2006. Making chemistry meaningful: Conditions for successful context-based teaching. Education Quimica, Vol.17, p. 215-221.
  - (27) O. De Jong, 2008. Context-based Chemical education: How to improve it? Chemical Education International, Vol. 8, No. 1, 1-7.
  - (28) J.K. Gibert, (2006). On the nature of “context” in chemical education. International journal of Science Education, Vol. 28, No. 9, p. 957-976.
  - (29) Gutwill-wise 2001. The Impact of Active and Context-Based Learning in Introductory Chemistry Courses: An Early Evaluation of the Modular Approach. Journal of chemical education Vol. 78, No. 5, p. 684.
  - (30) N. L. Hanegan, L. Price, J. Peterson, 2008. Disconnections between teacher expectations and student confidence in bioethics. Science & Education, Vol. 17, No. 8-9, p. 921-940.
  - (31) S. Lin, J.J. Mintzes, 2010. Learning argumentation skill through instruction in socioscientific issues: The effect of ability level. Taiwan: National Science Council.
  - (32) SHU-SHENG LIN and JOEL J. MINTZES 2010. Learning Argumentation Skills Through Instruction In Socioscientific Issues: The Effect Of Ability Level. International Journal

- of Science and Mathematics Education, Vol. 8, p. 993-1017.
- (33) U. Neslihan, C. Muammer, 2012. A Thematic Review of Studies into the Effectiveness of Context-based Chemistry Curricula. J Sci Educ technol, Vol. 21, p. 686-701.
- (34) J. Osborne, S. Erduran, S. Simon, 2004. Enhancing the quality of argumentation in school science. Journal of Research in Science Teaching, Vol. 41, No. 10, p. 994-1020.
- (35) P. Pattanapong, 2017. A Study of Context-based Learning Activity Model on Chemical Reaction Issue for Secondary Student at the 10th Level. European Journal of Education Studies, p. 629-647.
- (36) N.M. Seel, 2012. Encyclopedia of the science of learning. London: Springer Science+Business Media.
- (37) S. Simon, S. Erduran, J. Osborn, 2006. Learning to teach argumentation: Research and development in the science classroom. International Journal of Science Education, Vol. 28, No. 2-3, p. 235-260.
- (38) M. H. J. Ummels, M. J. A. Kamp, H. D. Kroon, K. T. Boersma, 2015. Promoting conceptual coherence within context-based biology education. Science Education, Vol. 99, No. 5, p. 958-985.
- (39) D.L. Zeidler, T.D. Sadler, M.L. Simmons, E.V. Howes, 2005. Beyond STS: A research-based framework for socioscientific issues education. Science Education, Vol. 89, p. 357-377.
- (40) Z. Zhiwei, F. Xiuyi, M. Chunyan, 2018. Context-based and Explainable Decision Making with Argumentation. International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. AAMAS, p. 1114-1122.



การบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน  
โดยใช้พืชร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน

The Integration of Phytoremediation and Fenton Oxidation for  
Trinitrotoluene – contaminated Water Treatment

พันเอกหญิง พนิตตา ปัญญาติก  
Colonel Panitta Panyadilog

อาจารย์ส่วนการศึกษา กองวิชาเคมี โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก 26000

*Instructor, Department of Chemistry, Chulachomklao Royal Military Academy*

*Prommanee Subdistrict, Mueang District, Nakhon-Nayok Province, 26000*

*Corresponding Author: panitta1915@gmail.com*

*(Received: May 16, 2019, Revised: June 20, 2019, Accepted: August 16, 2019)*

**บทคัดย่อ :** 2,4,6-ไตรไนโตรโทลูอิน (Trinitrotoluene) หรือทีเอ็นที (TNT) เป็นวัตถุระเบิดแรงสูง จัดเป็นวัตถุระเบิดมาตรฐานที่สำคัญในราชการทหาร มีโครงสร้างเป็นสารประกอบไนโตรอะโรมาติก ซึ่งย่อยสลายยาก ประกอบกับผลอันตรายที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการศึกษาวิจัยเพื่อบำบัดสารอันตรายชนิดนี้ งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการบำบัดโดยใช้พืชร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชันในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองขนาด 40×40×60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้หญ้าแฝกกลุ่มสายพันธุ์สุราษฎร์ธานี (*Vetiveria Zizanioides*) และดินลูกรังเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน ทำการทดลองหาอัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอิน เข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงระยะเวลา 12 วัน ผลการวิจัยพบว่า การบำบัดโดยใช้หญ้าแฝกกลุ่มสายพันธุ์สุราษฎร์ธานี ได้ผลใกล้เคียงกับการบำบัดโดยดินลูกรังจากกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน มีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอิน 91.80% และ 91.76% ตามลำดับ ขณะที่การผสมผสานการบำบัดโดยใช้หญ้าแฝกร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน มีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอิน 95.08% ในช่วงระยะเวลา 3 วันแรกของการทดลอง ดินลูกรังสามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอินลงได้ดี ขณะที่หญ้าแฝกสามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอินลงได้ดีในช่วงระยะเวลา 6 วันแรกของการทดลอง

**คำสำคัญ :** ไตรไนโตรโทลูอิน การบำบัดโดยใช้พืช กระบวนการเพนตันออกซิเดชัน หญ้าแฝก ดินลูกรัง

**Abstract :** 2,4,6-Trinitrotoluene or TNT is one of the high explosive which is defined as the standard explosive in the military. Because of its toxicity and persistence in the environment for a long time. The study of TNT degradation was investigated. The main objective was to determine the feasibility of the integration of phytoremediation and fenton oxidation for TNT- contaminated water treatment. The 40×40×60 cubic centimeter reactors with *Vetiveria zizanioides* and laterite soil were prepared. The laterite soil was used as the iron sources of the fenton oxidation. The TNT degradation efficiencies at the concentration of 40 milligrams per liter were investigated during the experimental period of 12 days. The results indicated that the TNT degradation efficiency by phytoremediation with *Vetiveria zizanioides* was similar to fenton oxidation with laterite soil, which were 91.80 % and 91.76 % respectively. Whereas the degradation efficiency by the integration of phytoremediation and fenton oxidation was 95.08 %. The TNT degradation by laterite soil was found most effective during the first 3 days of experiments, whereas the TNT degradation by *Vetiveria zizanioides* was found most effective during the first 6 days of experiments.

**Keywords :** Trinitrotoluene, phytoremediation, fenton oxidation, *Vetiveria zizanioides*, laterite

## 1. บทนำ

ไตรโนโตรโทลูอิน (Trinitrotoluene) หรือ ทีเอ็นที (TNT) เป็นวัตถุระเบิดแรงสูงชนิดหนึ่ง จัดเป็นวัตถุระเบิดมาตรฐานที่สำคัญในราชการทหาร มีความคงทนสูง ค่อนข้างเสถียร มีความว่องไวต่ำ สามารถใช้ในการหลอมทำวัตถุระเบิดผสมได้ ไตรโนโตรโทลูอินมีวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก จึงมีใช้อย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังใช้สำหรับบรรจุลูกกระสุนปืนใหญ่ ลูกกระเบิดยิง ดินระเบิดทำลาย ใช้เป็นส่วนประกอบของดินระเบิด และส่วนประกอบของดินส่งกระสุนบางชนิด เมื่อเก็บรักษาในที่ที่มีอากาศร้อน อาจเกิดการไหลเยิ้มได้ (Exudation) เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 80 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลของ The Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR รายงานถึงความเป็นพิษของไตรโนโตรโทลูอินว่า มีผู้ได้รับอันตรายจากไตรโนโตรโทลูอิน ไม่น้อยกว่า 17,000 ราย และกว่า 475 ราย เสียชีวิตจากกระบวนการผลิตในระหว่างสงครามโลกครั้งที่

ที่ 1 ผู้หญิงที่ทำงานในโรงงานผลิตวัตถุระเบิดซึ่งสัมผัสไตรโนโตรโทลูอิน มีความผิดปกติที่สังเกตได้ชัดเจน คือ มีผิวเป็นสีเหลือง จนมีชื่อเรียกลักษณะดังกล่าวนี้ว่า Canary Girls เส้นทางสำคัญในการเข้าสู่ร่างกายได้แก่ การหายใจ การบริโภคสารปนเปื้อน และการสัมผัสผิวหนัง อันตรายที่เกิดขึ้นอาจได้แก่ ความผิดปกติของเนื้อเยื่อตับ ตับโต มะเร็งตับ โลหิตจางจากไขกระดูกฝ่อ ต้อกระจก United States Environmental Protection Agency, U.S.EPA ได้กำหนดให้ไตรโนโตรโทลูอิน เป็นสารก่อมะเร็ง คลาสซี (Possible Human Carcinogen) จากการศึกษาในสัตว์ พบว่าการได้รับไตรโนโตรโทลูอินในปริมาณสูงอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อตับ เลือด ระบบภูมิคุ้มกัน และระบบสืบพันธุ์

ในประเทศไทยการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรโนโตรโทลูอินยังมีน้อย ทั้งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหน่วยทหาร ทั้งการประกอบชิ้นรูป การทดสอบ การใช้งาน ตลอดจนการระเบิดทำลาย

ด้วยโครงสร้างทางเคมีของไตรไนโตรโทลูอินที่เป็นสารประกอบไนโตรอะโรมาติก มีโครงสร้างเป็นโซ่ปิดทำให้สลายตัวยาก เป็นปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์และตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้เป็นเวลานาน ผู้เขียนจึงสนใจทำการศึกษาการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน โดยพืชเสริมด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดระยะเวลาในการบำบัด จากการศึกษาพบว่า การใช้พืชชนิดหญ้าแฝกสามารถใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้ สำหรับกระบวนการทางเคมีโดยกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน สามารถใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดี จึงทำการศึกษาการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้หญ้าแฝกร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน

## 2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัด น้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน

2.2 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันโดยใช้เหล็กจากดินลูกรังในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน

2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน

## 3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไตรไนโตรโทลูอิน (Trinitrotoluene) ชื่อในระบบ IUPAC คือ 2-Methyl-1,3,5-Trinitrobenzene มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลืองอ่อน เรียวคล้ายเข็ม ละลายน้ำได้น้อย แต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ มีความคงทนสูง มีความว่องไวต่ำ ถ้าถูกไหม้ในที่โล่งจะเกิดควันสีดำ เมื่อเก็บรักษาในสถานที่ที่มีอากาศร้อน อาจเกิดการไหลเยิ้มได้ (Exudation) เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ ประมาณ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถหลอมไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้ความร้อนจากไอน้ำได้

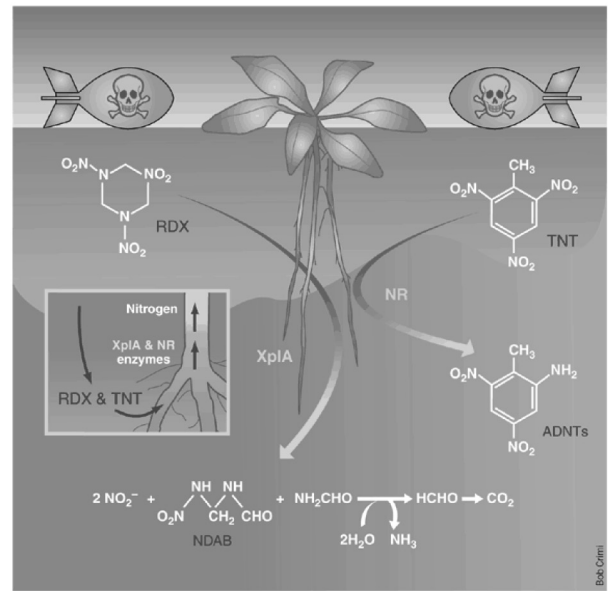
ไตรไนโตรโทลูอิน มีค่าจำกัดการสัมผัสที่ยอมรับได้ (Permissible Exposure Limit, PEL) = 1.5 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ค่าอันตรายทันทีต่อชีวิตหรือสุขภาพ (Immediately Dangerous to Life or Health, IDLH) = 500 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร และขนาดที่ทำให้ตายครึ่ง(mouse, oral) (Lethal Dose, LD50) = 660 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับในระยะสั้น คือ ระคายเคืองตา ผิว และทางเดินหายใจ อาจส่งผลกระทบต่อระบบเลือด ทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงแตก (Hemolysis) หรือมีอาการของเมตาโมโกลบิน (Methaemoglobin) การได้รับไตรไนโตรโทลูอินในระยะยาว มีผลต่อการทำงานของตับ ระบบเลือด และสายตา อาจมีภาวะตัวเหลือง ตาเหลือง โลหิตจาง ตลอดจนอาการของต่อกระดูก

Kongtip และคณะ [5] ทำการศึกษาการรับสัมผัสไตรไนโตรโทลูอินและผลกระทบต่อสุขภาพคนงานในโรงงานผลิตอาวุธปืนและกระสุน พบ 2-Amino-4,6-Dinitrotoluene และ 4-Amino-2,6-Dinitrotoluene ซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ของไตรไนโตรโทลูอินในปัสสาวะกำลังพลที่สัมผัสไตรไนโตรโทลูอิน คนงานที่รับสัมผัสมีอาการระคายเคืองตา จมูก ลำคอ อ่อนเพลีย ปวดศีรษะมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสัมผัส ข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลของ U.S. EPA ที่กล่าวถึง ผลอันตรายของไตรไนโตรโทลูอินทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม สามารถก่อให้เกิดความผิดปกติต่อร่างกาย ส่งผลต่อการทำงานของตับ ระบบภูมิคุ้มกัน และอาจเป็นสารก่อมะเร็ง ประกอบกับความคงทนในสิ่งแวดล้อม สลายตัวยาก และสามารถสะสมได้ในสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ จึงนับว่าการปนเปื้อนของไตรไนโตรโทลูอินเป็นปัญหาที่กองทัพควรให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่ง การแพร่กระจายของไตรไนโตรโทลูอิน มักเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นแหล่งผลิต แหล่งใช้ และแหล่งทำลาย ซึ่งหน่วยทหารเป็นพื้นที่สำคัญที่จะได้รับผลกระทบโดยตรงจากผลอันตรายของสารพิษชนิดนี้ การปนเปื้อนของไตรไนโตรโทลูอินเป็นไปได้ทั้งการตกค้างบนดิน ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ

ใต้ดิน ไหลชะลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน ตลอดจนอาจมีการสะสมในพืชและสัตว์ที่อาศัยในบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้ พบว่า สารอนุพันธ์ของไตรไนโตรโทลูอินบางชนิดที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน มีความเป็นพิษมากกว่าไตรไนโตรโทลูอินหลายเท่า จากผลอันตรายดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการบำบัดไตรไนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เพื่อสุขภาพอนามัยที่ดีของทหารและชุมชนโดยรอบ ทั้งนี้ เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอิน มีหลากหลาย ได้แก่ การเผา (Incineration) การฝังกลบ (Landfill) การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Granular Activation Carbon) ปฏิกริยาออกซิเดชัน (Oxidation) การบำบัดทางชีวภาพ (Bioremediation) และการใช้พืชในการบำบัด (Phytoremediation)

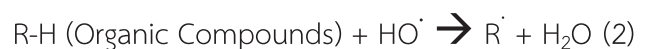
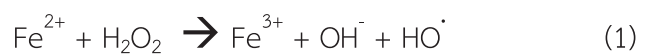
การใช้พืชในการบำบัดมลสารเป็นกระบวนการใช้พืชกำจัดความเป็นพิษของมลสารที่ปนเปื้อนและตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งกลไกของพืชในการกำจัดมลสารนี้อาจเกิดขึ้นโดยตรงหรือโดยทางอ้อม ได้แก่ การดูดซึมมลสารเข้าสู่พืชและเปลี่ยนรูปหรือย่อยสลายมลสารนั้นให้มีความเป็นพิษลดลง (Phytodegradation) การทำให้มลสารเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ (Volatilization) การสะสมในต้นพืช (Phytoaccumulation) ตลอดจนการย่อยหรือสลายมลสารด้วยจุลินทรีย์ โดยพืชมีส่วนสำคัญในการกระตุ้นหรือช่วยกระบวนการย่อยสลายดังกล่าว (Plant-assisted Bioremediation)

การกำจัดความเป็นพิษของไตรไนโตรโทลูอิน ซึ่งเป็นสารประกอบไนโตรอะโรมาติกโดยพืช เกิดขึ้นได้จากกิจกรรมของเอนไซม์ที่สำคัญ คือ เอนไซม์ไนโตรรีดักเตส (Nitroreductase Enzyme, NR) โดยจะเปลี่ยนหมู่ไนโตร (-NO<sub>2</sub>) ให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิลอะมิโน (-NHOH) และต่อไปเป็นหมู่เอมิโน (-NH<sub>2</sub>) ตามลำดับ เกิดเป็นสารใหม่คือ 2-Amino-4,6-Dinitrotoluene (ADNTs) ที่มีความเป็นพิษลดลง



ภาพที่ 1 การใช้พืชในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอิน

กระบวนการเฟนตัน (Fenton Reaction) เป็นหนึ่งในกระบวนการแอควานซ์ออกซิเดชัน (Advanced Oxidation Processes, AOPs) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับมลสารที่เป็นสารอินทรีย์ กระบวนการเฟนตันมีสารละลายเฟนตันเป็นสารตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และเฟอร์รัสไอออน (Fe<sup>2+</sup>) เกิดปฏิกิริยาที่มีลักษณะเฉพาะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, HO<sup>•</sup>) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากในน้ำเสียได้ดี เช่น ฟีนอล และสารประกอบอะโรมาติก กลไกของปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชันเป็นดังสมการ



Li Comfort และ Shea [6] ได้ทำการศึกษากำบัต 2,4,6-ไตรโนโตรโทลูอินโดยกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน พบว่าเมื่อใช้สารละลายเพนตันที่ประกอบด้วย  $H_2O_2$  เข้มข้น 1% โดยปริมาตร และ  $Fe^{2+}$  เข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร กำบัตสารละลายไตรโนโตรโทลูอินเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะไร้แสง สามารถกำจัดไตรโนโตรโทลูอินได้ 100% ภายในเวลา 24 ชั่วโมง และได้ตรวจพบอนุพันธ์ของ ไตรโนโตรโทลูอิน คือ 2,4,6 ไตรโนโตรเบนโซอิกแอซิด และ 1,3,5 ไตรโนโตรเบนซีน ภายในเวลา 15 นาที หลังทำปฏิกิริยา

Matta และ [7] ทำการศึกษา การใช้ออกซิเดนต์ชนิดต่างๆ ในการทำปฏิกิริยากับไตรโนโตรโทลูอิน พบว่าสารละลายเพนตันเท่านั้นที่สามารถใช้ในการลดความเป็นพิษของไตรโนโตรโทลูอินได้ และเมื่อทำการศึกษาระเหยที่ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเพนตัน พบว่าเหล็กออกไซด์ในรูปของแมกนีไทด์มีประสิทธิภาพดีที่สุด

มนต์ชัย จันทรศิริ [1] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วยเทคนิคแท่นลอยน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า การปลูกหญ้าแฝกด้วยเทคนิคแท่นลอยน้ำเพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน ควรใช้ระยะเวลา 7 วัน และหญ้าแฝกกลุ่ม สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีการเจริญเติบโตของรากดี เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียชุมชน

Shakya และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาศักยภาพในการใช้หญ้าแฝกกำจัดไตรโนโตรโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยทดลองปลูกหญ้าแฝกในระบบไฮโดรโปนิก (Hydroponic System) ที่มีสารละลายไตรโนโตรโทลูอินเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงระยะเวลา 8 วัน พบว่าหลังการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลายไตรโนโตรโทลูอินลดลงต่ำกว่าระดับที่ตรวจวัดได้ คือ ต่ำกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปราศจากการตรวจพบผลอันตราย

Das และคณะ [2] ได้พบ ADNTs สารอนุพันธ์ของไตรโนโตรโทลูอิน ในเนื้อเยื่อพืชที่ใช้ในการกำจัดไตรโนโตรโทลูอิน ซึ่งเป็นผลผลิตจากเอนไซม์ไนโตรรีดักเตส และได้ทำการศึกษากลไกของเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสที่มีต่อการ

กำจัดไตรโนโตรโทลูอินโดยหญ้าแฝก ได้ทำการทดลองปลูกหญ้าแฝกที่มีชีวมวล 50 กรัมต่อลิตร ในระบบไฮโดรโปนิกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในระบบที่มีสารละลายไตรโนโตรโทลูอิน ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสมีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่เนื้อเยื่อรากและหน่อของหญ้าแฝกที่ปลูกในระบบที่มีสารละลายไตรโนโตรโทลูอินเมื่อเทียบกับกลุ่มตัวอย่าง กิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายไตรโนโตรโทลูอิน และเพิ่มสูงสุดภายในระยะ 5 วันของการทดลอง

Saeed และคณะ [14] ได้รายงานข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีของดินลูกรังว่า ดินลูกรังประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ถึง 29.40% และเป็นองค์ประกอบสูงที่สุดในดินลูกรัง ซึ่ง  $Fe^{3+}$  จาก  $Fe_2O_3$  สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันไปเป็น  $Fe^{2+}$  ได้ ภายใต้สภาวะที่มีความชื้น

Hung และคณะ [3] ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับบทบาทของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับความเครียดของพืช พบว่าเมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม จะเกิดความเครียด พืชจะแปลงและส่งสัญญาณ (Signal Transduction) ให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับยีน และผลิต  $H_2O_2$  ซึ่งเป็นสัญญาณที่พืชแสดงออกถึงความเครียด

Jiamjitpanich และคณะ [4] ได้ทำการศึกษากำบัตไตรโนโตรโทลูอินปนเปื้อนในดิน โดยใช้อนุภาคเหล็กขนาดนาโน พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้อนุภาคเหล็กขนาดนาโนในการกำจัดสารไตรโนโตรโทลูอินปนเปื้อนในดิน เป็นการบำบัดขั้นที่ 1 และควรตามด้วยการบำบัดขั้นที่ 2 โดยใช้พืชหรือกระบวนการทางชีวภาพ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรโนโตรโทลูอินสามารถใช้ได้ทั้งการบำบัดโดยใช้พืช และกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี พืชที่ศึกษาคือ หญ้าแฝก เป็นพืชที่หาได้ง่ายในไทย สามารถใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น ไตรโนโตรโทลูอิน จึงนำมา



เป็นข้อพิจารณาในการทดลอง ส่วนกระบวนการเพนต์ ออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่มีเฟอร์รัส อีออนและ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารตั้งต้น การใช้ดินลูกรังที่มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อเลี่ยงการใช้สารเคมี จึงเป็นวัตถุดิบที่ผู้วิจัยนำมาศึกษา สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าพืชสามารถผลิตได้เองเมื่อมีความเครียดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารปนเปื้อน

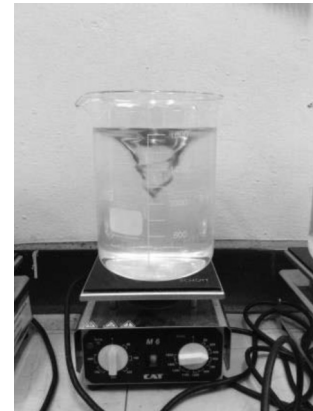
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นการแก้ปัญหา ในบริเวณหน่วยทหาร เทคโนโลยีที่เลือกใช้จึงควรเป็น เทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน ราคาในการบำบัดไม่สูง ดูแลง่าย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเลือกใช้พืชในการบำบัดโดยใช้หญ้าแฝก ซึ่งเป็นพืชที่พบเห็นได้ทั่วไป ดูแลง่าย ผสมผสานกับปฏิกิริยา เพนต์ออกซิเดชัน โดยใช้เหล็กไอออนจากดินลูกรัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเน้นถึงความปลอดภัย ประหยัด และสามารถดำเนินการได้จริง

#### 4. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัด น้ำปนเปื้อนสารไตรโนโตรโทลูอิน เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยการใช้หญ้าแฝกลุ่ม สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี เป็นพืชในการบำบัดน้ำปนเปื้อน ใช้เหล็กไอออนจากดินลูกรัง ในการทำปฏิกิริยาเพนต์ ออกซิเดชัน มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

4.1 เตรียมหญ้าแฝก โดยนำกล้าหญ้าแฝกเลี้ยงด้วย สารละลายผสมปุ๋ยอินทรีย์และยูเรีย เพื่อให้หญ้าแฝกแข็งแรงและงอกราก เป็นเวลา 30 วัน

4.2 เตรียมสารละลายไตรโนโตรโทลูอิน เข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ไตรโนโตรโทลูอิน มวล 4 กรัม ละลายในน้ำ เพิ่มความสามารถในการละลายโดยใช้เครื่อง กวนสารแม่เหล็กจน ได้สารละลายปริมาตร 100 ลิตร



ภาพที่ 2 การเตรียมสารละลายไตรโนโตรโทลูอิน

4.3 เตรียมกรวดหยาบ ขนาด  $\frac{3}{4}$  นิ้ว ล้างทำความสะอาด และบรรจุลงในภาชนะที่เตรียมเป็นชุดการทดลอง โดยบรรจุไว้ด้านล่างสุดในทุกชุดการทดลอง

4.4 เตรียมดินลูกรัง คัดขนาดโดยการร่อนผ่าน ตะแกรงร่อน เบอร์ 100 เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.15 มิลลิเมตร บรรจุในชุดการทดลองที่ 3 และ 4 โดยบรรจุลงบนชั้นของกรวดหยาบ

4.5 ทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กไอออนในดิน ลูกรัง โดยใช้เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี

4.6 เตรียมชุดการทดลอง ขนาด  $40 \times 40 \times 60$  ลูกบาศก์เซนติเมตร บรรจุกรวดหยาบ ดินลูกรัง และหญ้าแฝก ลงในชุดการทดลอง ดังนี้

4.6.1 กรวดหยาบปริมาตร  $40 \times 40 \times 30$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.6.2 กรวดหยาบปริมาตร  $40 \times 40 \times 30$  ลูกบาศก์เซนติเมตรและหญ้าแฝก 10 ต้น

4.6.3 กรวดหยาบปริมาตร  $40 \times 40 \times 30$  ลูกบาศก์เซนติเมตรและดินลูกรังปริมาตร  $40 \times 40 \times 10$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.6.4 กรวดหยาบปริมาตร  $40 \times 40 \times 30$  ลูกบาศก์เซนติเมตรดินลูกรังปริมาตร  $40 \times 40 \times 10$  ลูกบาศก์เซนติเมตร และหญ้าแฝก 10 ต้น

4.7 เติมสารละลายไนโตรโทลูอินเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 ลิตร ลงในชุดการทดลอง ทั้ง 4 ดังภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 ชุดการทดลองที่ 1 และ 2



ภาพที่ 4 ชุดการทดลองที่ 3 และ 4

4.8 เก็บตัวอย่างน้ำ ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากแต่ละชุดการทดลอง ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของ การทดลอง

4.9 วิเคราะห์ความเข้มข้นของไนโตรโทลูอิน จากน้ำปนเปื้อน โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลว สมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography) ตามวิธีการของ U.S.EPA Standard Method 8330

4.10 ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4.1-4.7 จำนวน 5 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องที่สุด

## 5. ผลการศึกษา

5.1 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กไอออนจากดินลูกรัง การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กไอออนจากดินลูกรัง ในบริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เป็นการ วิเคราะห์ตัวอย่างดินลูกรังเพื่อหาปริมาณเหล็กไอออน ในรูปของเฟอร์รัสไอออน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยา เฟอตันออกซิเดชัน ใช้ดินตัวอย่างจาก 3 จุดรอบบริเวณ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของ เฟอร์รัสไอออนในดินลูกรังรอบบริเวณ ได้แก่ ดินบนเขา ไกล้วัดพระฉาย ดินบริเวณอ่างเก็บน้ำหลังโรงพยาบาล และดินบริเวณริมบึงหลังส่วนการศึกษา จากการวิเคราะห์ พบว่าดินบนเขาไกล้วัดพระฉาย ดินบริเวณอ่างเก็บน้ำ หลังโรงพยาบาล และดินบริเวณริมบึงหลังส่วนการศึกษา มีเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 17.95%, 31.27% และ 16.32% ตามลำดับ เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าดินลูกรังในบริเวณ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่นำมาใช้ในการทดลอง มีปริมาณเฟอร์รัสไอออนเฉลี่ยเท่ากับ 21.85 %

## 5.2 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายไตรโนโตรโทลูอิน

สารละลายไตรโนโตรโทลูอิน มีลักษณะเป็นสารละลายใส สีแดง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สารละลายไตรโนโตรโทลูอิน

เมื่อนำสารละลายไตรโนโตรโทลูอิน เข้มข้น 40 ppm ที่เตรียมได้ เติมลงในชุดการทดลองทั้ง 4 จะมีลักษณะดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ชุดการทดลองเมื่อเติมสารละลายไตรโนโตรโทลูอินวันที่ 0

หมายเหตุ: ชุดการทดลองที่ 1 กรวดหยาบ

ชุดการทดลองที่ 2 กรวดหยาบ และหญ้าแฝก

ชุดการทดลองที่ 3 กรวดหยาบ และดินลูกรัง

ชุดการทดลองที่ 4 กรวดหยาบ ดินลูกรัง และหญ้าแฝก

จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายไตรโนโตรโทลูอินจากแต่ละชุดการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง ลักษณะของน้ำตัวอย่างที่เก็บได้ เป็นดังภาพที่ 7



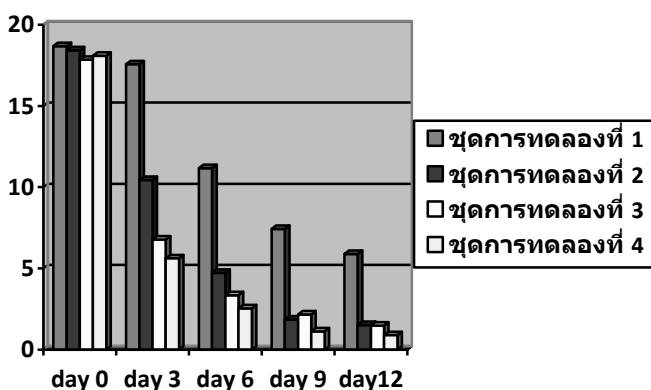
ภาพที่ 7 สารละลายไตรโนโตรโทลูอินในวันที่ 9

จากภาพที่ 5 สีของสารละลายสารละลายไตรโนโตรโทลูอินในวันที่ 0 ก่อนการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 7 แสดงสีของสารละลายไตรโนโตรโทลูอินในวัน

ที่ 9 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายไตรโนโตรโทลูอินลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายไตรโนโตรโทลูอินในวันที่ 9 ตามภาพที่ 7 พบว่าความเข้มข้นในแต่ละชุดการทดลองลดลงตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ 1 มีสีค่อนข้างเข้ม และเจือจางลงในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 สำหรับชุดการทดลองที่ 4 พบว่า สารละลายที่ได้เป็นสารละลายใส ไม่มีสี แสดงให้เห็นว่าหญ้าแฝกและดินลูกรัง สามารถลดความเข้มข้นของ ไตรโนโตรโทลูอินได้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของ ไตรโนโตรโทลูอินจากหญ้าแฝกภายใต้ภาวะที่มีดินลูกรังมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 5.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรโนโตรโทลูอิน

จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง และวิเคราะห์โดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอิน (ส่วนในล้านส่วน, ppm) ที่ลดลงในระยะเวลา 12 วัน จากชุดการทดลองทั้ง 4 เป็นดังภาพที่ 8

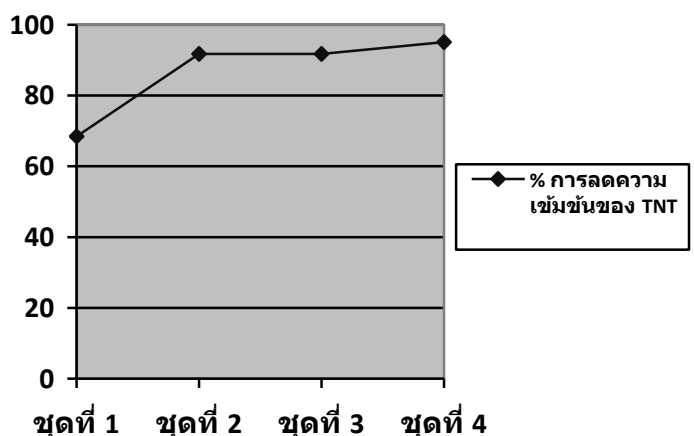


ภาพที่ 8 ปริมาณความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอิน (ppm) ในระยะเวลา 12 วัน

จากภาพที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอิน โดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง พบว่าในวันที่ 0 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอิน ในทุกชุดการทดลองลดลงจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm เป็น 18.69, 18.43, 17.85 และ 18.10 ppm

ตามลำดับ เนื่องจากไตรโนโตรโทลูอินมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ประกอบกับในแต่ละชุดการทดลองประกอบด้วยวัสดุบรรจุต่าง ๆ ได้แก่ กรวดหยาบ ดินลูกรัง และหญ้าแฝก ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สามารถดูดซับไตรโนโตรโทลูอินได้ดี ในวันที่ 3 ของการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 1.12 ppm ขณะที่ ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 7.98, 11.07 และ 12.48 ppm ตามลำดับ ในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 6.39 ppm ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 5.73, 3.43 และ 3.09 ppm ตามลำดับ ในวันที่ 9 ของการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 พบว่าความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 3.75 ppm ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 2.88, 1.19 และ 1.42 ppm ตามลำดับ สำหรับวันที่ 12 ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 1.54 ppm ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอินลดลง 0.33, 0.69 และ 0.22 ppm ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์อัตราการลดความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอิน (%) ในระยะเวลา 12 วัน จากชุดการทดลองทั้ง 4 เมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 0 สามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 อัตราการลดความเข้มข้นของไตรโนโตรโทลูอิน (%) ในระยะเวลา 12 วัน เมื่อเทียบกับวันที่ 0



ชุดการทดลองที่ 1 มีอัตราการลดความเข้มข้นของ ไตรไนโตรโทลูอินต่ำสุด โดยลดลง 85.28% เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 พบว่าลดลงเพียง 68.49% เนื่องจากชุดการทดลองที่ 1 เป็นการบำบัดโดยใช้แสง (Photolysis) เท่านั้น ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 มีอัตราการลดความเข้มข้นของ ไตรไนโตรโทลูอินจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm เป็น 96.23%, 96.32% และ 97.78% ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 พบว่ามีอัตราการลดความเข้มข้นของ ไตรไนโตรโทลูอินเป็น 91.80%, 91.76% และ 95.08% ตามลำดับ สอดคล้องกับผลจากการสังเกตความเข้มข้นของ สารละลายไตรไนโตรโทลูอินที่พบว่าชุดการทดลองที่ 1 สีค่อนข้างเข้มชัดเจน และสีเจือจางลงในชุดการทดลองที่ 2, 3 และในชุดการทดลองที่ 4 พบว่า สารละลายที่ได้เป็น สารละลายใส ไม่มีสี

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองระหว่าง 0-12 วัน พบว่าชุดการทดลองที่ 2 การบำบัดโดยหญ้าแฝก มีอัตราการลดลงอย่างต่อเนื่องภายในระยะเวลา 6 วันของการทดลอง อัตราการลดลง 13.71 ppm ภายใน 6 วัน คิดเป็น 74.39% ขณะที่ชุดการทดลองที่ 1 มีอัตราการลดลง 7.5 ppm คิดเป็น 40.18% สอดคล้องกับงานวิจัยของ Das และคณะ [2] ซึ่งพบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรรีดักเตส ในพืชจะเพิ่มสูงสุดภายในระยะ 5 วันของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้หญ้าแฝก มีความเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสเป็นหลัก จากการทดลองหญ้าแฝกจึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอิน ได้ดีในช่วงเวลา 6 วันของการทดลอง

ในช่วงระยะเวลา 3 วันแรกของการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 และ 4 ซึ่งมีดินลูกรังเป็นองค์ประกอบ ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอินลดลงจากวันที่ 0 ถึง 11.07 ppm และ 12.48 ppm คิดเป็น 62.02% และ 68.95% ขณะที่ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งไม่มีดินลูกรังเป็นองค์ประกอบ ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอินลดลง 1.12

ppm และ 7.98 ppm คิดเป็น 5.99% และ 43.30% แสดงให้เห็นว่าดินลูกรังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยา เฟนตันออกซิเดชัน ช่วยในการบำบัดน้ำปนเปื้อน ไตรไนโตรโทลูอินในช่วงระยะเวลาสั้น สอดคล้องกับ Li, Comfort and Shea (1997) ที่พบว่า กระบวนการ เฟนตันออกซิเดชัน สามารถบำบัดสารละลายไตรไนโตรโทลูอิน ในระยะเวลาสั้นได้ดี

สำหรับชุดการทดลองที่ 4 ที่ประกอบไปด้วย หญ้าแฝกและดินลูกรัง ในช่วงวันที่ 0 – 3 มีอัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอินสูงสุดจาก 18.10 ppm เป็น 5.62 ppm โดยลดลงถึง 12.48% จากนั้นอัตราการลดของความเข้มข้นไตรไนโตรโทลูอินน้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นต่ำมาก ทำให้อัตราการลดไม่สูงเท่าช่วงแรก อย่างไรก็ตามชุดการทดลองที่ 4 มีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอินสูงที่สุด เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 12 วัน มีอัตราการลด 97.78% และเมื่อเทียบกับความเข้มข้นวันที่ 0-12 พบว่ามีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอิน 95.08% แสดงให้เห็นว่า หญ้าแฝกและดินลูกรังสามารถใช้ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินได้ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินโดยการผสมผสานหญ้าแฝกและกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันโดยใช้เหล็กจากดินลูกรังมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 6. สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชันในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน พืชที่ใช้ศึกษา คือ หญ้าแฝกกลุ่มสายพันธุ์ สุราษฎร์ธานี ปฏิกิริยาที่ใช้ร่วมคือเฟนตันออกซิเดชัน โดยใช้เหล็กจากดินลูกรังที่เก็บในบริเวณรอบโรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้าเป็นสารตั้งต้น ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอิน ซึ่งเป็นสารละลายที่เตรียมขึ้น มีความเข้มข้น 40 ppm ทำการศึกษาในระยะ



เวลา 12 วัน จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

### 6.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน

หญ้าแฝกกลุ่ม สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี ความหนาแน่น 10 ต้นต่อ 1,600 ตารางเซนติเมตร สามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอิน จาก 40 ppm ลงจนเหลือค่าเฉลี่ย 1.51 ppm ในระยะเวลา 12 วัน อัตราการลดลงของ ไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้หญ้าแฝกในการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 96.23% และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 91.80% สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน และมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วง 6 วันแรกของการทดลอง

### 6.2 ศึกษาผลของกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน โดยใช้หลักจากดินลูกรังบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน

ดินลูกรังในบริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีปริมาณเหล็กไอออนเฉลี่ยเท่ากับ 21.85% สามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอิน จาก 40 ppm ลงจนเหลือค่าเฉลี่ย 1.47 ppm ในระยะเวลา 12 วัน อัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้ดินลูกรังในการบำบัดเทียบกับ ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppm มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 96.32% และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 91.76% สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้ดินลูกรังเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันเพื่อบำบัดน้ำปนเปื้อน ไตรไนโตรโทลูอิน โดยเฉพาะในช่วงระยะเวลา 3 วันแรกของการทดลอง

### 6.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน

การใช้หญ้าแฝกร่วมกับดินลูกรังสามารถลด ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอิน จาก 40 ppm ลงจนเหลือค่าเฉลี่ย 0.89 ppm ในระยะเวลา 12 วัน อัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้หญ้าแฝกและดินลูกรังใน

การบำบัดมีค่าเฉลี่ยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppm เท่ากับ 97.78% และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 พบว่า อัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอินเท่ากับ 95.08% สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกร่วมกับดินลูกรังบำบัดน้ำปนเปื้อน ไตรไนโตรโทลูอิน ดินลูกรังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินได้ดี โดยเฉพาะในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการทดลอง

ผลการทดลองสนับสนุนสมมติฐานงานวิจัย ที่ว่าการบำบัดสารปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้พืชกลุ่มหญ้าแฝก ร่วมกับการใช้กระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน ภายใต้ภาวะที่มีหลักจากดินลูกรัง สามารถลดปริมาณไตรไนโตรโทลูอินจากน้ำปนเปื้อน อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าการบำบัดด้วยการใช้หญ้าแฝกหรือกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตามการใช้หลักจากดินลูกรังในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอิน อาจให้ผลแตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณหลักในดินลูกรังจากแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอินให้มีผลแตกต่างกันได้ จากขอบเขตการวิจัย การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองเพื่อวัดความเข้มข้นที่ลดลงของไตรไนโตรโทลูอินจากสารละลายแต่ละชุดการทดลอง ในช่วงระยะเวลา 12 วัน เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาประสิทธิภาพในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับปฏิกิริยาเฟ้นต้นออกซิเดชันในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ควรดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในด้านต่างๆ เช่น ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณไตรไนโตรโทลูอินที่ตกค้างในวัสดุปลูก กรวด ดินลูกรัง ตลอดจนรากและลำต้นหญ้าแฝก ศึกษาวิเคราะห์ชนิดและปริมาณอนุพันธ์ของไตรไนโตรโทลูอินจากน้ำปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดแล้วในดินลูกรัง รากและลำต้นหญ้าแฝก โดยเฉพาะอนุพันธ์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันผลการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ควรทำการทดลองบำบัดฟื้นฟู ในสถานที่จริงที่มีการ

ปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอินโดยใช้วิธีการใช้พืชกลุ่มหญ้า  
แผ่ร่วมกับกระบวนการฟentonออกซิเดชัน

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุน  
ทุนวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนา โรงเรียนนายร้อย  
พระจุลจอมเกล้า และผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์  
ดร. จงรักษ์ ผลประเสริฐ ที่ปรึกษางานวิจัย พันเอก  
รองศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ เลิศล้ำ ในการกรุณาตรวจ  
สอบและให้คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขให้ผลงานวิจัยฉบับนี้  
มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่กองวิชาเคมี ส่วน  
การศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทุกท่านที่  
อำนวยความสะดวก อนุเคราะห์การใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ  
ตลอดจนสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ จนทำให้งานวิจัย  
ลุล่วงไปได้ด้วยดี

## บรรณานุกรม

- (1) มนต์ชัย จันทรศิริ, 2549. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วย  
เทคนิคแทนลอน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ สาขา  
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:  
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (2) P. Das R. Datta, D. Sarkar, 2012. Nitroreductase Enzyme  
Mediated Phytodegradation of 2,4,6 Trinitrotoluene by  
Vetiver Grass, ASA, CSSA, and SSSA International Annual  
Meetings, p. 21-24.
- (3) S.H. Hung, C.W. Yu, C.H. Lin, 2005. Hydrogen Peroxide  
Function as a Stress Signal in Plants, Bot. Bull. Acad.,  
Vol. 46, p. 1-10.

- (4) W. Jiamjitpanich et al., 2012. Enhanced Phytoremediation  
Efficiency of TNT-Contaminated Soil by Nanoscale Zero  
Valent Iron, IPCBEE 2012, Vol. 35, No. 82-86.
- (5) P. Kongtip et al., 2012. Exposure to Trinitrotoluene  
and Health Effects among Workers in an Artillery and  
Ammunition Plant Journal Medicine Association Thai,  
Vol.95, No. 6, p. 154-160.
- (6) Z.M. Li, S.D. Comfort, P.J. Shea, 1997. Destruction of  
2,4,6-Trinitrotoluene by Fenton Oxidation. Journal of  
Environmental Quality Abstract, Vol.26, No. 2, p. 480-487.
- (7) R. Matta K. Hanna, S. Chiron, 2007. Fenton-Like Oxidation  
of 2,4,6-trinitrotoluene using Different Iron Minerals  
Science of the Total Environment, Vol. 385, p. 242-251.
- (8) R.B. Meagher, 2006. Plants Tackle Explosive Contamination,  
Nature Biotechnology, Vol. 24, p. 161 – 163.
- (9) K.A. Saeed et al., 2014. Strength of Lime-Cement  
Stabilized Tropical Lateritic Clay Contaminated by Heavy  
Metals, KSCE Journal of Civil Engineering, p. 1-6.
- (10) Shakya et al., 2006. High uptake of 2,4,6-trinitrotoluene  
by Vetiver Grass - Potential for Phytoremediation,  
Ecotoxicol. Environ, Vol. 64, p. 136-138.
- (11) U.S. EPA. Integrated Risk Information System (IRIS), 1991.  
Risk Estimate for Carcinogenicity and Reference Dose for  
Oral Exposure for 2,4,6-Trinitrotoluene, Office of Health  
and Environmental Assessment, Cincinnati: OH

## Synthesis, Structure and Solvatochromic Properties of Novel Diacetylene Rhodamine-Based Solvatochromic Dye

Prangtip Chansri, Banchob Wanno, Chatthai Kaewtong\*

*Nanotechnology Research Unit and Supramolecular Chemistry Research Unit, Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, 44150, Thailand.*

*\*Corresponding Author: kchatthai@gmail.com*

*(Received: August 15, 2019, Revised: September 3, 2019, Accepted: September 4, 2019)*

**Abstract :** A novel diacetylene rhodamine-based solvatochromic dye (DA-Rhoen) have been synthesized by amidation reaction between Rhoen and DA. Chemical structures and purity were characterizations by  $^1\text{H}$  NMR and ATR-FTIR. The photophysical studies in different solvents, such as  $\text{H}_2\text{O}$ , methanol (MeOH), ethanol (EtOH), dimethylformamide (DMF), acetonitrile (ACN), dimethyl sulfoxide (DMSO), tetrahydrofuran (THF), dichloromethane ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) and chloroform ( $\text{CHCl}_3$ ) were studied. It was found that the largest color and fluorescence changed were visualized after dissolved in  $\text{CHCl}_3$  solution. In addition, UV-visible and fluorescence spectra also showed a new significant enhancement of absorbance intensity (at 550 nm) and emission intensity (at 570 nm). The solvatochromic mechanism is caused by solvent-induced equilibrium shift to ring-opening of spirolactam form (Z-form).

**Keywords :** Solvatochromic Dye, Rhodamine, Diacetylene, Color, Fluorescence

## 1. Introduction

Solvatochromism is the occurrence observed while the color due to a solute is different when that solute is dissolved in different solvents [1-2] and change shape, absorption spectra,  $\lambda_{\text{max}}$ , and intensity [3] depending on the nature of the solvent [4]) of a chromophore in solvents of different polarity [5]. A called positive and negative solvatochromism due to bathochromic (red) shift and hypsochromic (blue) shift with increasing solvent polarity, respectively. A convert bathochromic to hypsochromic, or vice versa, by the increase in solvent polarity, is called reverse solvatochromism [2]. Solvatochromic compounds are those solutes that induce a change in the color of the solution with a change in solvent polarity. Normally, solvatochromic compounds have two extreme resonance contributing structures: one form is quinoidal, nonpolarized, and formally nonaromatic; the other is zwitterionic, polarized, and fully aromatic. The change in the absorption band with solvent occurs from variation in the contribution of these canonical forms to the overall resonance hybrid [6]. Solvatochromism is crucial in determining the properties of molecular solids, including solubility, physical and chemical stability [7-8]. Therefore, solvatochromism has a central role in a number of fields including pharmaceuticals, pigment chemistry and materials science [9].

## 2. Objectives

This research was aimed (1) to synthesize a novel diacetylene rhodamine-based solvatochromic dye and (2) to study a relationship between a novel solvatochromic dye and solvents.

## 3. Literature reviews

Rhodamines are highly fluorescent dyes [10]. In general, rhodamine derivative displays a red color change and strong fluorescence in acidic solutions by activation of a carbonyl group in a spirolactone or spirolactam moiety [11]. Nowadays, there is much previous research investigation their properties because of their displays interesting equilibria which depend on concentration of solvent such as Ramette' and Sandell [12] were investigation of rhodamine B (R) equilibria included a benzene extraction study, measurement of solubility of R salts and a spectrophotometric study in aqueous solution. Hinckley et al [13] had been studying electronic absorption spectra of rhodamine B which depend on solvatochromism and thermochromics. Zakerhamidi et al [14] had been studying a solvent effect on absorption and emission spectra of rhodamine dyes that depend on the nature of solvents and the attached substituents on xanthene skeleton. Benchea et al [15] reported a solvatochromic study establishes the contribution of each type of intermolecular interactions to the spectral shift of the absorption band of Rh 6G and Rh B in a given solvent. And rhodamines are widely used with numerous

chemical applications such as sensing materials. Among of sensing materials, polydiacetylenes (PDAs) are one of the most capable due to their unique chromism properties and becoming interesting materials. The blue PDAs undergo a color shift to a red phase upon various factors such as solvent [16]. For example, Wang and Han [17] had been preparing of a rhodamine B-functionalized bis-polydiacetylene (RB/bis-PDA) film sensor for  $Al^{3+}$ . The interesting solvatochromism property of PDAs induce to extensively used with the chemical application such as Park et al [18] had been reported optical solvent sensor based on solvatochromic polydiacetylene for tetrahydrofuran (THF). Dei et al [19] had been studying an aggregation of PDAs according to the decrease in the solubility in a poor solvent and at a lower temperature that helps to occur solvatochromism.

## 4. Materials and methods

### 4.1 Chemical

All reagents were analytical reagent grade. Rhodamine B, and 10,12-pentacosadiynoic acid (DA) were purchased from Aldrich. N, N'-dicyclohexylcarbodiimide (DCC), 4-dimethylaminopyridine (DMAP), ethylenediamine and MeOH were purchased from Merck used without further purification. Dimethylformamide (DMF) was purchased from Merck dried over  $CaH_2$  (purchased from Fluka) and freshly distilled under nitrogen prior to use. Dichloromethane ( $CH_2Cl_2$ ) was purchased from Merck distilled before use.

### 4.2 Instrumentals

$^1H$  NMR was measured with a Varian 400 MHz spectrometer in  $CDCl_3$  with TMS as the internal reference. Fluorescence spectra in solution were measured with a Perkin Elmer LS 50B. Absorbance spectra were recorded with a Perkin Elmer Lambda 25 UV/VIS spectrometer. ATR-FTIR spectra were recorded with a Bruker Tensor 27 ATR-FTIR. Column chromatography was carried out using silica gel (Kieselgel 60, 0.063–0.200 mm, Merck).

### 4.3 Synthesis

*Synthesis of rhodamine ethylenediamine (Rhoen)* [20]

Rhodamine B (0.20 g, 1.67 mmol) was dissolved in 30 mL of methanol, and ethylenediamine (0.22 mL, excess) was added dropwise to a solution and refluxed overnight (24 h) until the solution lost its red color. The solvent was removed by evaporation. Then the residue was dissolved by dichloromethane and extracted with sodium bicarbonate 2 times, water 2 times, bicarbonate 2 times, respectively. The combined organic phase was dried over with anhydrous sodium sulfate and a solvent was removed by evaporation. After that, the product purified by column chromatography (dichloromethane: methanol: triethylamine 10:90:1 v/v). The yield was 74%.  $^1H$  NMR (400 MHz,  $CDCl_3$ )  $\delta$  (ppm) 7.86–7.81 (m,  $^1H$ , ArH), 7.45–7.32 (m, 2H, ArH), 7.08–7.03 (m,  $^1H$ , ArH), 6.42 (s,  $^1H$ , ArH), 6.39 (s,  $^1H$ , ArH), 6.37 (s, 2H, ArH), 6.38–6.21 (m, 2H, ArH), 3.32 (q,  $J$  = 6.8 Hz, 8H,  $NCH_2CH_3$ ), 3.12 (t,



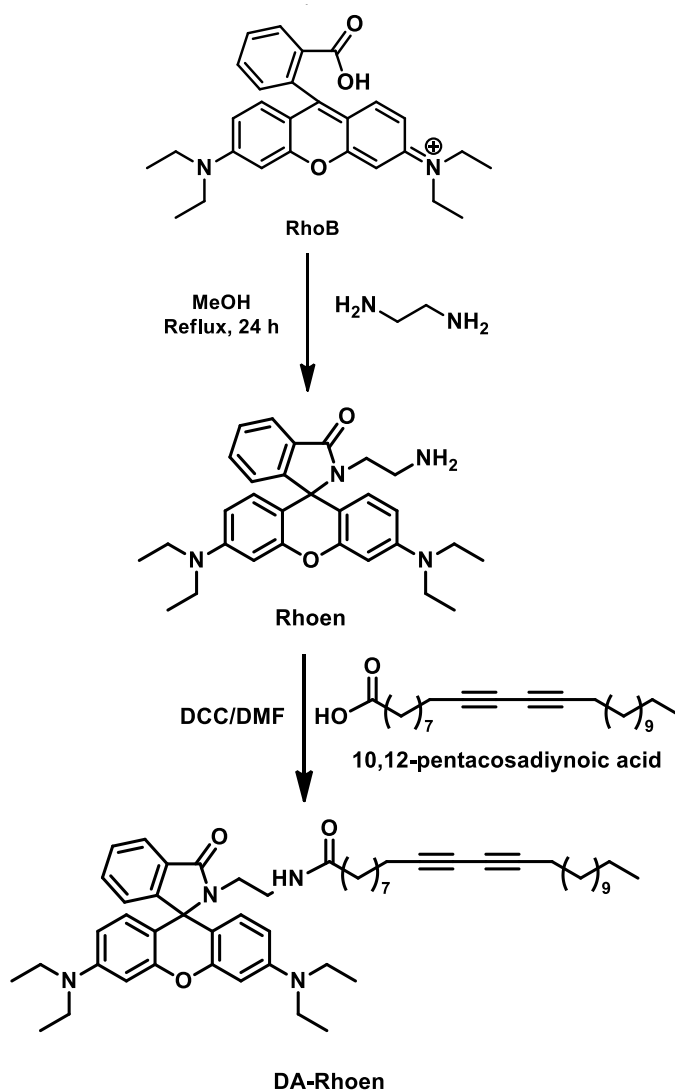
$J = 6.8$  Hz, 2H,  $\text{NCH}_2\text{CH}_2$ ), 2.23 (t,  $J = 6.8$  Hz, 2H,  $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$ ), 2.05 (s, 2H,  $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$ ) and 1.16 (t,  $J = 7.2$  Hz, 12H,  $\text{NCH}_2\text{CH}_3$ ).

#### *Synthesis of Diacetylene-Rhodamine ethylenediamine (DA-Rhoen)*

*N,N'*-Dicyclohexylcarbodiimide (DCC) (65.3 mg, 0.316 mmol) in methylene chloride (3 mL) was added dropwise into a solution of 10,12-pentacosadiynoic acid (DA) (129 mg, 0.344 mmol) in methylene chloride (9 mL). Then, dimethylformamide was added dropwise in solution. The mixture was stirred at 0 °C for 1 h. *Rhoen* (200 mg, 0.419 mmol) in methylene chloride (7 mL) was added dropwise into the reaction mixture at room temperature. The reaction mixture was stirred at room temperature overnight. The mixture was extracted with methylene chloride (25 mL, 3 times). The organic phase was dried with anhydrous sodium sulfate and evaporated to yield the crude product as a white powder. The crude product was purified by column chromatography on silica gel eluted with a mixture of ethyl acetate and hexane (50:50 v/v). The yield was 50 %.  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  (ppm) 0.86 (t,  $J = 6.8$  Hz, 3H;  $\text{CH}_3$ ), 1.09 (t,  $J = 7.1$  Hz, 3H;  $\text{CH}_3$ ), 1.33 (m, 16H, 32H;  $\text{CH}_2$ ), 2.15 (t,  $J = 7.6$  Hz, 2H;  $\text{CH}_2$ ), 2.21 (t,  $J = 6.9$  Hz, 4H;  $\text{CH}_2$ ), 2.64 (q,  $J = 7.2$  Hz, 2H;  $\text{CH}_2$ ), 2.74 (t,  $J = 7.6$  Hz, 2H;  $\text{CH}_2$ ), 3.33 (q,  $J = 5.7$  Hz, 2H;  $\text{CH}_2$ ), 6.45, (brs, 1H; NH), 7.11–8.0 (m, 1H, ArH), 6.89 (s, 1H, ArH). IR:  $\nu = 3328$   $\text{cm}^{-1}$  (NH), 1622  $\text{cm}^{-1}$  and 1520  $\text{cm}^{-1}$  (spirolactam amide-keto), 1620  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{O}$ ).

#### *Computational studies*

The stable electronic structure and the HOMO, LUMO energies of the DA-Rhoen was calculated using the density functional theory (DFT) method at the B3LYP/6-31(d) theoretical level under the Gaussian 09 program.



Scheme. 1 Synthetic pathways of DA-Rhoen

## 5. Results and discussions

### 5.1 Characterization of DA-Rhoen

DA-Rhoen was synthesized by amidation reaction with rhodamine B-ethylenediamine or

Rhoen and 10,12-pentacosadiynoic acid (DA) in the presence of DCC as coupling reagent under N<sub>2</sub> at reflux for overnight in DMF (Scheme. 1). The chemical structure was confirmed by <sup>1</sup>H NMR and ATR-FTIR techniques.

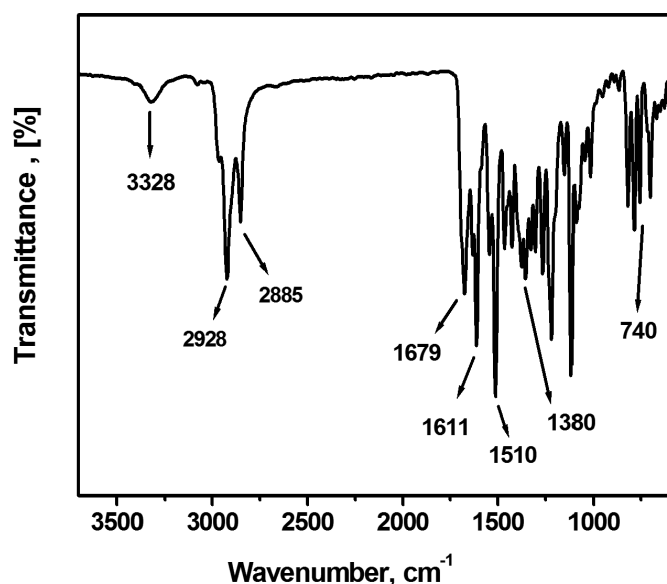


Fig. 1 ATR-FTIR spectra of DA-Rhoen

The characteristic ATR-FTIR spectrum of DA-Rhoen (Fig. 1.) showed the prominent C=O stretch of rhodamine peak at 1679 cm<sup>-1</sup>, aromatic rhodamine peaks at 2885, 1611 and 1510 cm<sup>-1</sup>, CH stretching vibrations of the diacetylene side chain at 2928 cm<sup>-1</sup>, CH<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub> bending vibrations 1380 and 740 cm<sup>-1</sup> and the amide (N-H stretch) peak at 3328 cm<sup>-1</sup> [21].

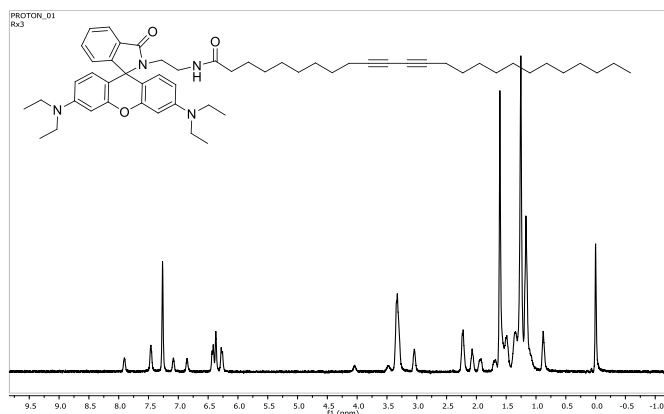
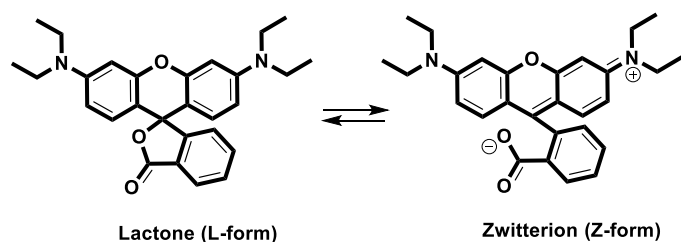


Fig. 2 <sup>1</sup>H NMR spectra of DA-Rhoen

The <sup>1</sup>H NMR experiment of DA-Rhoen was carried out in CDCl<sub>3</sub>, and the spectrum is depicted in Fig. 2. The <sup>1</sup>H-NMR spectra of DA-Rhoen showed the characteristic signals of diacetylene protons in the region of 1.0 - 2.0 ppm and aromatic protons of rhodamine at 7.0 - 8.0 ppm. The chemical shifts of amine NH of DA-Rho around 6.8 ppm [22]. This observation confirmed that the rhodamine ethylenediamine was successfully connected with DA.

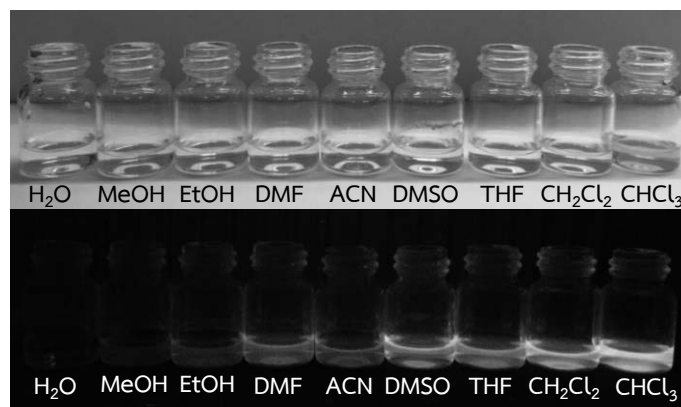
### 5.2 Thermochromic Effect of DA-Rhoen

Normally, the xanthene dye rhodamine B showed two forms in an equilibrium mixture: (1) a colorless lactone (L-form) and (2) a colored zwitterion (Z-form) [23].



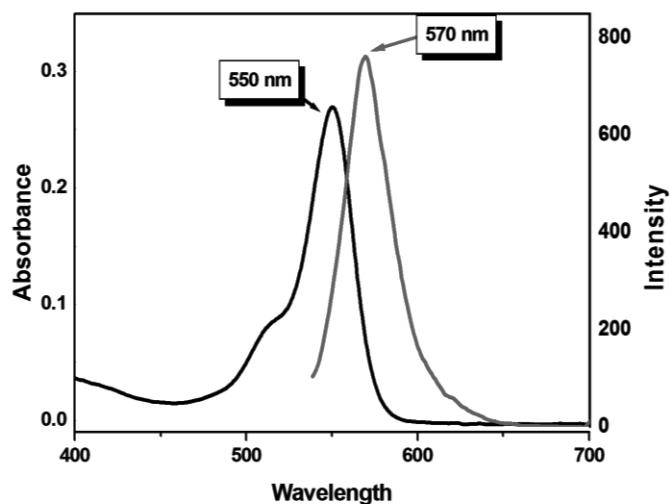
**Scheme. 2** The equilibrium of xanthene dye rhodamine B

In order to establish the novel solvatochromic dye, the DA-Rhoen (L-form) was dissolved in a number of solvents ( $\text{H}_2\text{O}$ , MeOH, EtOH, DMF, ACN, DMSO, THF,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , and  $\text{CHCl}_3$ ). The color and fluorescence images were employed to monitor the position of the lactone-zwitterion equilibrium of the DA-Rhoen base isomers. As displayed in Fig. 3, the colorless of DA-Rhoen turned immediately from colorless to orange after exposure to  $\text{CHCl}_3$  solution at room temperature and the emission color of DA-Rhoen also changed after dissolving in  $\text{CHCl}_3$ . Because in the case of chlorinated solvents, the dimer Z-form species were predominated instant of L-form. This may be due to the increase in interactions between molecules in the part of DA moiety to produce the aggregation of DA-Rhoen [24]. The results were consistent with previous work which strongly indicated that the equilibrium shifted toward the zwitterion form [12-13, 25].



**Fig. 3** Digital images of DA-Rhoen in different solvents at 10  $\mu\text{M}$  taken under normal illumination (above) and demonstrating skeletal fluorescence under 365 nm illumination (below).

In addition, UV-visible and fluorescence spectroscopy techniques were employed to observe the equilibrium shifted toward the zwitterion form of DA-Rhoen. After dissolved DA-Rhoen in  $\text{CHCl}_3$ , a new significant enhancement of absorbance intensity (at 550 nm) and emission intensity (at 570 nm) were distinguished as a result of solvent induced ring-opening of spirolactam form (Z-form) (Fig. 4).



**Fig. 4** Absorption and fluorescence spectra of DA-Rhoen after dissolved in  $\text{CHCl}_3$ .

## 6. Conclusion

In summary, we have successfully synthesized a novel diacetylene rhodamine-based colorimetric dye (DA-Rhoen) by amidation reaction between Rhoen and DA, and the photophysical studies in different solvents, such as  $\text{H}_2\text{O}$ , MeOH, EtOH, DMF, ACN, DMSO, THF,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , and  $\text{CHCl}_3$ . The colorless of DA-Rhoen turned immediately from colorless to orange after exposure to  $\text{CHCl}_3$  solution at room temperature and the emission color of DA-Rhoen also changed after dissolving in  $\text{CHCl}_3$ . This solvatochromic dye has been found to act as a good indicator molecule for chlorinated solvents and can be further study as solvatochromic sensor.

## 7. Acknowledgement

Financial support from the Center of Excellence for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC), Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation and Mahasarakham University 2019 Copyright of Mahasarakham University and the Thailand Research Fund (RSA5980072) are gratefully acknowledged.

## 8. References

- (1) A. Marini, A. Muñoz-Losa, A. Biancardi, B. Mennucci, 2010. What is solvatochromism?, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 114, p. 17128–17135.
- (2) C. Reichardt, 1994. Solvatochromic dyes as solvent polarity Indicators, *Chemical Reviews*, Vol. 94, p. 2319-2358.
- (3) E. Buncel, S. Rajagop, 1990. Solvatochromism and solvent polarity scales, *Accounts of Chemical Research* Vol. 23, p. 226-231.
- (4) S. Nigam, S. Ratan, 2001. Principles and applications of solvatochromism, *Applied Spectroscopy*, Vol. 55, p. 362A-370A.
- (5) S.H. Jang, K.Y. Jen, 2011. Structured organic non-linear optics. *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology*. Oxford University Press: Elsevier.
- (6) M.A. Rauf, S. Hisaindee, 2013. Studies on solvatochromic behavior of dyes using spectral techniques, *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1042, p. 45–56.
- (7) E.H. Lee, 2014. A practical guide to pharmaceutical polymorph screening & selection, *Asian journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 9, p. 163-175.
- (8) H.G. Brittain, 2010. Polymorphism and solvatomorphism 2009, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 100, p. 1260-1279.
- (9) G. Kumar, R. Gupta, 2013. Molecularly designed architectures – the metalloligand way, *Chemical Society Reviews* Vol. 42, p. 9403-9453.
- (10) J. Arden, G. Deltau, V. Huth, U. Kringel, D. Peros, K.H. Drexhage, 1991. Fluorescence and lasing properties of rhodamine dyes, *Journal of Luminescence*, Vol. 48-49, p. 352- 358.
- (11) H.M. Kim, M.H. Lee, H.J. Kim, J.S. Kim, J. Yoon, 2008. A new trend in rhodamine-based chemosensors: application of spirolactam ring-opening to sensing ions, *Chemical Society Reviews*, Vol. 37, p. 1465–1472.
- (12) R.W. Ramette, E.B. Sande, 1956. Rhodamine B Equilibria, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 78, p. 4872-4878.
- (13) D.A. Hinckley, P.G. Seybold, D.P. Borris, 1986. Solvatochromism and thermochromism of rhodamine solutions, *Spectrochimica Acta*, Vol. 42A, p.747-754.
- (14) MS, Zakerhamidi M, Moghadam A, Ghanadzadeh Hosseini S, 2012 Anisotropic and isotropic solvent effects on the dipole moment and photophysical properties of rhodamine dyes. *Journal of Luminescence* Vol. 132, p. 931-937.
- (15) A.C. Benchea, D. Babusca, D.G. Dimitriu, D.O. Dorohoi, 2017. Quantum-mechanical study and spectral analysis on some derivatives of Rhodamine in solutions, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol.172, p. 91-99.
- (16) H.N. Kim, Z. Guo, W. Zhu, J. Yoon, H. Tian, 2011. Recent progress on polymer-based fluorescent and colorimet-

- ric chemosensors, *Chemical Society Reviews*, Vol. 40, p. 79-93.
- (17) H. Wang, S.H. Han, Bis-ratiometric absorbance detection of Al(III) in the rhodamine B-functionalized bis polydiacetylene film, *Chemical Papers*, Vol. 71, p. 2129-2137.
- (18) D.H. Park, B. Kim, J.M. Kim, 2016. A Tetrahydrofuran selective optical solvent sensor based on solvatochromic polydiacetylene, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, Vol. 37, p. 793-794.
- (19) S. Dei, A. Matsumoto, A. Matsumoto, 2008. Thermo – chromism of polydiacetylenes in the solid state and in solution by the self-organization of polymer chains containing no polar group, *Macromolecules*, Vol. 41, p. 2467-2473.
- (20) N. Niamsa, C. Kaewtong, W. Srinonmuang, B. Wanno, B. Pulpoka, T. Tuntulani, 2013. Hybrid organic–inorganic nanomaterial sensors for selective detection of Au<sup>3+</sup> using rhodamine-based modified polyacrylic acid (PAA)-coated FeNPs, *Polymer Chemistry*, Vol. 4, p. 3039-3046.
- (21) A. Patlolla, J. Zunino, A. I. Frenkel, Z. Iqbal, 2012. Thermochromism in polydiacetylene-metal oxide nanocomposites, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 22, p. 7028-7035.
- (22) T. Eaidkong, R. Mungkarndee, C. Phollookin, G. Tumcharern, M. Sukwattanasinitt, S. Wacharasindhu, 2012. Polydiacetylene paper-based colorimetric sensor array for vapor phase detection and identification of volatile organic compounds, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 22, p. 5970-5977.
- (23) C. Kaewtong, S. Kampaengsri, B. Pulpoka, T. Tuntulani, 2018. Solvatochromic-based sensor for chromium (III) in real systems, *New Journal of Chemistry*, Vol. 42, p. 9930-9934.
- (24) J. Zhu, Y. Han, R. Kumar, Y. He, K. Hong, P.V. Bonnesen, B.G. Sumpter, S.C. Smith, G.S. Smith, I.N. Ivanov, C. Do, 2015. Controlling Molecular Ordering in Solution-State Conjugated Polymers, *Nanoscale*, Vol. 7, p. 15134-15141.
- (25) (a) Kuhn VR. Heteropolare ringe im gefüge organischer farbstoffe. *Naturwissenschaften* 1932; 20: 618-624.; (b) Rosenthal I, Peretz P, Muszkat KA. Thermochromic and hyperchromic effects in rhodamine B solutions. *The Journal of Physical Chemistry* 1979; 83: 350-353.; (c) Hinckley DA and Seybold PG. A spectroscopic/thermodynamic study of the rhodamine B zwitterion equilibrium. *Spectrochimica Acta* 1988; 44A: 1053-1059.; (d) Chibisov AK and Slavnova TD. The study of the photophysics and primary photochemistry of rhodamine 6G aggregates. *Journal of Photochemistry* 1978; 8: 285-297.; (e) Levshin LV and Lonskaya IS. Association of Rhodamines in relation to their molecular structure and nature of solvent. *Optika i Spektroskopiya* 1961; 11: 278.; (f) Levshin LV and Lonskaya I. Dependence of the Association of Rhodamines on the Structure of Their Molecules and the Nature of the Solvent, *Optics and Spectroscopy* 1961; 11: p. 148.



## 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](mailto:crmajournal@crma.ac.th)
2. จัดส่งบทความผ่านเว็บไซต์ <http://veel.crma.ac.th/Journal>

## การดำเนินงานของกองบรรณาธิการวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ จะจัดให้มีการกลั่นกรองเพื่อคัดเลือกเฉพาะบทความที่อยู่ในขอบข่ายของการตีพิมพ์ของวารสารฯ และมีระดับคุณภาพที่ยอมรับได้ โดยบทความที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ ต้องผ่านเกณฑ์การประเมินจากผู้กลั่นกรองและประเมินบทความอย่างน้อย 2 คน จากผู้กลั่นกรองและประเมินบทความจำนวน 3 คน และ/หรือ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นรายกรณี สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับอย่างมีเงื่อนไข ผู้นิพนธ์ของบทความนั้นต้องดำเนินการแก้ไขให้เสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่กองบรรณาธิการระบุ เมื่อบทความได้ถูกตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารฯ แล้ว บทความดังกล่าวจะถูกนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ของวารสารฯ ด้วย ผู้นิพนธ์แต่ละคนจะได้รับเล่มวารสารที่มีบทความของตนอยู่ คนละ 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 โดยให้ผู้นิพนธ์หาหลักฐานมาพิสูจน์ข้อสงสัยนั้น ๆ ก่อน
6. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ ผู้ประเมิน และทีมผู้บริหาร
7. บรรณาธิการต้องมีการตรวจสอบบทความในด้านการคัดลอกผลงานผู้อื่น (Plagiarism) อย่างจริงจัง เพื่อให้แน่ใจว่าบทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ไม่มีการคัดลอกผลงานของผู้อื่น หากตรวจพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่นในกระบวนการประเมินบทความ บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการประเมิน และติดต่อผู้ประพันธ์หลักทันที เพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ “ตอบรับ” หรือ “ปฏิเสธ” การตีพิมพ์บทความนั้น ๆ

### บทบาทและหน้าที่ของผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

1. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องรักษาความลับ และไม่เปิดเผยข้อมูลบางส่วนหรือทุกส่วนของบทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ (Confidentially)
2. หลังจากได้รับบทความจากบรรณาธิการ และผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ ตระหนักว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ เช่น เป็นผู้ร่วมโครงการ หรือรู้จักผู้นิพนธ์ยื่นการส่วนตัว หรือเหตุผลอื่นๆ ที่ทำให้ไม่สามารถให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอย่างอิสระได้ ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความควรแจ้งให้บรรณาธิการทราบ และปฏิเสธการประเมินบทความนั้น ๆ
3. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความชำนาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้นๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับในการตัดสินบทความ
4. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องระบุผลงานวิจัยที่สำคัญ ๆ และสอดคล้องกับบทความที่กำลังประเมิน แต่ผู้นิพนธ์ไม่ได้อ้างถึงเข้าไปในการประเมินบทความด้วย นอกจากนี้หากมีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานอื่น ๆ 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.....

(.....)





ยุทธภูมิสืบสานวีรชน  
กวาดลเหนือเกล้าเป็นศักดิ์ศรี  
ประชาชาติร่วมโลหิตมิตรไมตรี  
วิชาการส่องวิถีพัฒนา

