



### Contents

#### บทความวิจัย

- การวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารเมื่อใช้วัสดุปิดผิวที่ต่างกันโดยใช้ระเบียบวิธีของแถว  
วารารณ พูลจันทร์ เทียนสิริ เหลืองวิไล วีระพล วิลามาศ สมภูมิ มีชานา สุภาวดี ลีลายุทธ และ สามารถ หมุดและ  
1-10
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือทดสอบความชื้นน้ำของดินสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ  
พินิศ รัตนปรมากุล และ วาริส บัวขาว  
11-18
- การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก  
โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล  
อทธิ ยุทธยานนท์ วันชัย เจียจันทร์ และ อติพันธ์ วงศ์กั้งแห  
19-31
- การคำนวณชั้นขีดผิวแบบลามินาร์บนผิวแพนอากาศ  
สุภาพ เฟิงมาก และ ไชยบูรณ์ สุขประเสริฐ  
32-46
- แบบจำลองภาพเสมือนจริงเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบส่องสว่างภายในอาคาร  
อโศก ศรีทองธรรม  
47-59
- การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์  
ชญญาวัจน์ สติภัทรสมบัติ และ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง  
60-70
- การตัดสินใจเลือกรูปแบบในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง  
นพรัตน์ นุ่มศิริ และ กมลชนก สุทธิวาหนฤพุมิ  
71-84

#### บทความวิชาการ

- การได้ไกล และไว  
พลานันท์ ปะจายะกฤตย์ อทธิ ยุทธยานนท์ และ จิรวุฒิ คล่องตรวจโรค  
85-95





วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2564

## NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

### ที่ปรึกษาเกิตติมศักดิ์

พลอากาศโท ณรงค์ อินทชาติ \_\_\_\_\_ ผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
พลอากาศตรี รัชชัย อัจฉริยาการุณ \_\_\_\_\_ รองผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
พลอากาศตรี ศ.ดร.พงศ์สันต์ ทองโต \_\_\_\_\_ รองผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
พลอากาศตรี จักรกฤษณ์ ชรรณวิชัย \_\_\_\_\_ เสนาธิการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
พลอากาศตรี ผศ.ชาติชาย คงเจริญสุข \_\_\_\_\_ ผู้อำนวยการ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
พลอากาศตรี บุญเลิศ อังคารา \_\_\_\_\_ ผู้อำนวยการ สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

### ที่ปรึกษาวิชาการ

นาวาอากาศเอก ศ.ดร.ประสงค์ ประณีตพลกั \_\_\_\_\_ รองเสนาธิการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

### บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก รศ.ดร.เจนวิทย์ คำพูล \_\_\_\_\_ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณค่าแก่ผู้ที่สนใจ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางรายงานความก้าวหน้าผลงานด้านการวิจัย
3. เพื่อแลกเปลี่ยนแนวความคิด ความรู้ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิชาการด้านอากาศยาน การบินอวกาศ คอมพิวเตอร์ ไซเบอร์ และเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และวิศวกรรมศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

### ขอบเขต

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ จัดทำขึ้นตามวัตถุประสงค์ข้างต้น โดยส่งในรูปแบบบทความทาง Online ซึ่งบทความทุกเรื่องจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Reviewer) อย่างน้อย 2 คน โดยเป็นการประเมินแบบผู้ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่ง และผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ประเมินบทความ (Double-blind) กองบรรณาธิการ ๆ จะเป็นผู้พิจารณาในกระบวนการสุดท้ายในการรับตีพิมพ์ บทความที่รับแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ บทความวิชาการ (Academic Articles) และบทความวิจัย (Research Articles) จะต้องเป็นผลงานที่ใหม่ และไม่มี การคัดลอกผลงานจากผู้อื่น มีกำหนดตีพิมพ์ 2 ฉบับต่อปี

ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 กรกฎาคม- ธันวาคม ของทุกปี

### สถานที่ติดต่อ

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
171/1 ถ.พหลโยธิน คลองถนน สายไหม กทม. 10220  
โทรศัพท์ 08 3061 9278

**E-mail** : janewit\_kamp@rtaf.mi.th

**Website**: <https://www.nkrafa.ac.th>

<https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct>

### ดูแลระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์

นาวาอากาศเอก ดร.พงศ์เทพ จันทน์เสนะ  
นาวาอากาศเอก ผศ.ดร.เกียรติกุล ไชย จิตต์เอื้อ  
นาวาอากาศเอก รศ.ชนินทร์รัฐ สิทธิเวชธนาศิริ  
เรืออากาศเอก อภิรักษ์ โกษพิพิธ  
เรืออากาศโท ดร.วิสูตร คล้ายแจ้ง  
เรืออากาศโท ณรงค์เดช พงษ์ประเทศ

ออกแบบปกและจัดรูปเล่ม พันจ่าอากาศเอก อิศรา ใต้รูป

ISSN(Print) : 2651-1134

ISSN(Online) : 2651-1002

## บทบรรณาธิการ

การระบาดของโรค COVID-19 ระลอกใหม่ ในปีนี้รุนแรงยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา ถึงแม้มีการฉีดวัคซีนในกลุ่มผู้เสี่ยงสูงก็ตาม ทำให้ทำงานกันอย่างยากลำบากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม กองบรรณาธิการ วารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ (NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) ซึ่งฉบับนี้เป็น ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2564 วารสารออนไลน์ใช้ระบบ Thaijo2.0 มีหมายเลข ISSN (Online) คือ 2651-1002 และวารสารเป็นเล่ม มี ISSN (Print) คือ 2651-1134 ก็ยังพยายามทำงานอย่างเข้มแข็งเพื่อดำรงความมีคุณค่าของงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฯ และเตรียมพร้อมจะยกระดับคุณภาพของวารสารให้พร้อมที่จะเข้าสู่การประเมินเพื่อเลื่อนขึ้นสู่ กลุ่มที่ 1 ต่อไป

กองบรรณาธิการ ฯ ขอขอบคุณผู้สนับสนุนบทความทุกท่านที่ให้ความไว้วางใจในการส่งบทความ จำนวน 8 บทความ (บทความภายนอก 5 บทความ บทความภายใน 3 บทความ) เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2564 ขอขอบพระคุณที่ปรึกษา ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่กรุณาสละเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของบทความและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง อีกทั้งกองบรรณาธิการ ฯ และทีมงานทุกคน ที่ทำให้วารสารฯ มีความสมบูรณ์ จนเกิดความสำเร็จทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณตามมาตรฐานคุณภาพของ TCI

นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ เจนวิทย์ คำพูล

บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ

# การวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารเมื่อใช้วัสดุปิดผิวที่ต่างกัน โดยใช้ระเบียบวิธีของแถว

## Investigating the Behaviour of Heat Transfer Through Building Walls with Different Covering Materials by Using Method of Lines (MOL)

<sup>1\*</sup>วารกรณ์ พูลจันทร์, <sup>2#</sup>เทียนสิริ เหลืองวิไล, <sup>3#</sup>วีระพล วิลามาศ, <sup>4#</sup>สมภูมิ มีชานน, <sup>5#</sup>สุภาวดี สีลายุทธ และ <sup>6#</sup>สามารถ หมุดและ

<sup>1,2,3,4,5</sup>กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

<sup>6</sup>คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>1\*</sup>Varagorn Puljan, <sup>2#</sup>Thiansiri Luangwilai, <sup>3#</sup>Weerapol Welamas, <sup>4#</sup>Sompoom Meechowna, <sup>5#</sup>Supavadee Leelayuth and <sup>6#</sup>Samart Moodleah

<sup>1,2,3,4,5</sup>Faculty of Academic, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

<sup>6</sup>Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-Mail: <sup>\*</sup>vp4249@hotmail.com, <sup>#</sup>Thiansiri.l@gmail.com, <sup>#</sup>Weerapol\_w@rtaf.mi.th, <sup>#</sup>Sompoom@rtaf.mi.th

<sup>#</sup>Supavadee\_k@rtaf.mi.th and <sup>#</sup>Samart@it.kmitl.ac.th

Received : August, 21 2020  
Revised : February, 07 2021  
Accepted : June, 22 2021

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่ได้รับผลกระทบจากการใช้วัสดุปิดผิวที่แตกต่างกัน โดยในการวิเคราะห์จะพิจารณาผนังที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร 4 ชนิด คือ อิฐมอญ คอนกรีตบล็อก คอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 620 กก./ลบ.ม. และ คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 700 กก./ลบ.ม. และศึกษากรณีผนังกำแพงมีวัสดุปิดผิว คือ ยิปซัม ไม้อัด และไฟเบอร์ จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์พฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน เมื่อใช้วัสดุปิดผิวภายนอกของผนังที่แตกต่างกัน สำหรับการหาค่าตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นสมการการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีของแถว งานวิจัยนี้จะทำให้มีความเข้าใจชัดเจนมากยิ่งขึ้นถึงผลลัพธ์จากการใช้วัสดุปิดผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถลดความร้อนที่ผ่านเข้ามาในผนังของอาคารได้อย่างชัดเจน สิ่งเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและการก่อสร้างอาคารต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** ผนังอาคาร, การถ่ายเทความร้อน, วัสดุปิดผิว, ระเบียบวิธีของแถว

### Abstract

This study is to investigate the effect of using different covering materials on heat diffusion through building walls. The study considers four types of brick, namely Clay brick, block brick, light-weight brick with  $\rho = 620 \text{ kg/m}^3$  and light-weight brick with  $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ . In this study, only three covering materials (Gypsum Board, Plywood, Fibreboard) are investigated. Then the behaviour of heat-transfer from outer

boundary through building wall is examined for cases with different covering materials. The partial differential equation of heat diffusion is solved by using method of lines. This investigation will give a clearer understanding of reduction of heat transfer through building wall by using covering materials. This understanding will benefit future building design and construction.

**Keywords:** Building wall, Heat transfer, Covering Materials, Method of lines

## 1. บทนำ

จากสถานการณ์โลกร้อนและอุณหภูมิที่สูงขึ้นในแต่ละปี ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำมาความเย็นให้กับอาคารที่อยู่อาศัยเพิ่มมากขึ้น [1] โดยประเทศไทยมีแนวโน้มในการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในแต่ละปีอย่างต่อเนื่อง และหนึ่งในสาเหตุหลักของการใช้พลังงานไฟฟ้า คือ ระบบทำความเย็นในอาคาร [4,5,13,18] ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัยที่หาแนวทาง เพื่อให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ในการทำความเย็นในอาคารได้ โดยหนึ่งในแนวทางนั้นคือ การหารูปแบบการก่อสร้างผนังอาคารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี หรือชะลอการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ในราคาที่เหมาะสม และกระบวนการก่อสร้างไม่ยุ่งยากจนเกินไป [2]

ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุต่าง ๆ มาคิดที่ผนังของอาคารเพื่อใช้ในการตกแต่งเพื่อความสวยงามและประโยชน์อีกด้านหนึ่ง คือ การกันความร้อนจากภายนอก [3] เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำมาความเย็นในตัวอาคาร โดยในงานวิจัยของ อมลวรรณ แสนนวล และคณะ (2559) [4] และ งานวิจัยของ พรสวรรค์ พิริยะศรัทธา (2556) [5] ได้ดำเนินการทดลองนำวัสดุกลุ่มไม้ผสมพลาสติกที่ได้รับความนิยมในการใช้ตกแต่งผนังในประเทศไทย จำนวน 3 แบบ เพื่อทดสอบความสามารถในการกันความร้อนจากภายนอก โดยในการทดลองได้นำวัสดุกลุ่มไม้ผสมพลาสติกชนิดต่าง ๆ ไปประกอบเข้ากับอิฐก่อสร้างชนิดต่าง ๆ แล้วนำไปตากแดดเพื่อวัดค่าการกันความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายใน โดยในการทดลองมีการควบคุมตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ยาก ได้แก่ ความหนาของวัสดุตกแต่งผนังที่ไม่เท่ากัน อุณหภูมิภายนอก และมุมของแสงแดด ที่ตกกระทบผนังแต่ละด้านที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ผนังด้านใน โดยมีวัสดุตกแต่งผิวของอิฐชนิดต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการกันความร้อนของฉนวนกันความร้อน และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกอาคารสู่ผนังอาคารได้อย่างดีขึ้นในกรณีที่มีวัสดุปกปิดผิวของผนังของอาคาร ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถกำหนดค่าความหนาของวัสดุปกปิดผิวให้เท่ากันได้ อีกทั้งยังสามารถกำหนดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุภายนอกสุดให้เท่ากันตลอดห้วงเวลาของการทำแบบจำลองได้ด้วย โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกวัสดุปกปิดผิวที่มีขายอยู่ในท้องตลาดและอุปกรณ์ก่อสร้างที่ใช้อย่างแพร่หลาย ประกอบเข้ากับชนิดของผนังที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ อิฐมอญ คอนกรีตบล็อก และคอนกรีตมวลเบา [4] [5] [13]

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากผนังด้านนอกเข้าสู่ผนังด้านในของอาคารซึ่งเป็นการวิเคราะห์ต่อออกจากกรณีการทดลองของ อมลวรรณ แสนนวล และคณะ (2559) [4] และงานวิจัยของ พรสวรรค์ พิริยะศรัทธา (2556) [5] โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สมการการแพร่ความร้อน หรือสมการการนำความร้อน [7] [8] [9] [10] [18] เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความร้อนในผนังหรือวัสดุต่าง ๆ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความหนาของวัสดุปกปิดผิว ความหนาของผนังอาคาร และความหนาของปูนฉาบได้อย่างชัดเจน

มากยิ่งขึ้น โดยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ (Diffusion Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเชิงพาราโบลา (Parabolic Partial Differential Equation) โดยสมการการแพร่นี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Fick. (1855) [6] จากนั้นได้มีการพัฒนาต่อออกมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของสิ่งต่าง ๆ และหนึ่งในพฤติกรรม ที่ใช้ในการอธิบายคือ พฤติกรรมการแพร่ความร้อนผ่านตัวกลาง โดยอยู่ในรูปของสมการที่ (1) [7] [8] [9] และ [10]

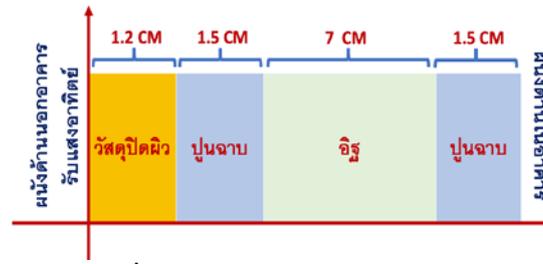
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

โดยในสมการนี้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ที่อธิบายค่าของอุณหภูมิ  $T$  ในช่วงเวลา  $t$  และตำแหน่ง  $x$  โดยมีค่าคงที่ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ), ค่าความร้อนจำเพาะ ( $c$ ) และค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์การแพร่ความร้อนในรูปแบบของหนึ่งมิติ โดยจะดำเนินการจำลองสภาพตัดขวางของผนังของอาคารซึ่งจะมีค่า  $x$  เป็นพิกัดจากระยะห่างจากภายนอกหรือจุดที่แสงอาทิตย์ตกกระทบ โดยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบหนึ่งมิติ เป็นหน้าตัดขวางของกำแพง ซึ่งแบบจำลองหน้าตัดขวางนี้เป็นที่นิยมอย่างมากในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์สำหรับรูปทรงที่มีสมมาตรในแนวแกนอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น Luangwilai et al (2010) [17] ได้ใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติวิเคราะห์ปฏิกิริยาความร้อนในกองปุ๋ยหมักในอุตสาหกรรม โดยรูปทรงของกองปุ๋ยหมักจะมีลักษณะเป็นปริซึมยาว โดยแบบจำลองในหนึ่งมิตินี้จะลดความซับซ้อนของระบบสมการและการวิเคราะห์ แต่พฤติกรรมต่าง ๆ ของระบบสมการนั้นก็ยังคงอยู่อย่างครบถ้วนเมื่อเทียบกับแบบจำลองในรูปแบบของสองมิติและสามมิติ [14] [15] ซึ่งแบบจำลองในรูปแบบหนึ่งมิตินี้เพียงพอต่อการวิเคราะห์ผลของการคิดวัสดุปิดผิวอาคารในงานวิจัยนี้

$$T(x, t_0) = T_0 \quad \text{เมื่อ } 0 < x \leq L \quad (2)$$

โดยค่าอุณหภูมิเริ่มต้นทุกจุดของผนังมีค่าเท่ากับ  $T_0 = 25$  องศาเซลเซียส และตัวแปร  $L$  คือความหนารวมของผนังทั้งหมด ซึ่งในที่นี้คือ 11.2 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 1 โดยความหนารวมของผนังทั้งหมดประกอบด้วยวัสดุปิดผิวหรือวัสดุตกแต่งผิวหนา 1.2 เซนติเมตร ความหนาถือว่าเป็นความหนามาตรฐานของแผ่นยิปซัม แผ่นไม้อัด และแผ่นไฟเบอร์ ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดเพื่อการก่อสร้าง จากนั้นจะมีปูนฉาบซึ่งอยู่ทั้งสองด้านของก้อนอิฐ โดยปูนฉาบแต่ละด้านมีความหนาอยู่ที่ 1.5 เซนติเมตร สุดท้ายจะเป็นก้อนอิฐโดยมาตรฐานในประเทศไทยก้อนอิฐจะมีความหนาประมาณ 7 เซนติเมตร จากนั้นในกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนนี้ จะกำหนดอุณหภูมิของขอบเขตภายนอกของผนังที่โดนแสงแดดเป็นขอบเขตชนิด Dirichlet boundary conditions คือจะกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาตามสมการที่ (3) โดยงานวิจัยของ พรสวรรค์ พิริยะศรัทธา (2556) พบว่า อุณหภูมิของวัสดุปิดผิวผนังที่ตากแดดอยู่สามารถมีความร้อนสูงขึ้นไปถึงประมาณ 60 องศาเซลเซียสได้ ดังนั้น เพื่อให้เห็นพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของผนังให้ชัดเจน ในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดอุณหภูมิของผนังด้านนอกที่โดนแดด มีค่า 60 องศาเซลเซียส

$$T(0, t) = T_\alpha \quad (3)$$



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงรูปหน้าตัดของผนังอาคาร  
และความกว้างของแต่ละวัสดุ

ในกระบวนการวิเคราะห์พฤติกรรมของถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุปิดผิวและผนังของอาคารในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีของแถว (Method of Lines) ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการวิเคราะห์จาก วิธีไฟไนต์ ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method) และวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ (Finite Element Method) [11] [12] ทั้งนี้ระเบียบวิธีของแถวเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น งานวิจัยของ Luangwilai, T. and Sidhu, H. (2010) ได้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ระเบียบวิธีของแถว วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และซอฟต์แวร์ FlexPDE ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันในทุกกรณี

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีของแถวเป็นการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ให้กลายเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential equations) ซึ่งในกระบวนการนี้ใช้การประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method) โดยดำเนินการประมาณค่าของพจน์ที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ขึ้นกับตำแหน่ง ทำให้ในสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยลดรูปลงเหลือแค่พจน์ที่เป็นอนุพันธ์ขึ้นกับเวลา (Ordinary Differential Equations with Time Dependent Term) ในงานวิจัยนี้ใช้การประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่ตำแหน่งจุดกลาง (Central Difference) สำหรับการประมาณค่าพจน์ที่เป็นอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและอันดับสอง ในสมการที่ (4) และ (5)

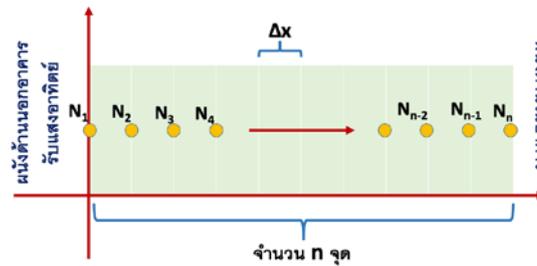
$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_i \approx \frac{(T_{i+1} - T_{i-1}))}{2\Delta x} \quad (4)$$

$$\left. \frac{d^2T}{dx^2} \right|_i \approx \frac{(T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}))}{(\Delta x)^2} \quad (5)$$

จากการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับสองที่ตำแหน่งจุดกลางด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ทำให้สมการที่ (1) ลดรูปเป็นสมการที่ (6)

$$\left. \frac{dT_i}{dt} \right|_i = \frac{k}{c\rho} \frac{(T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}))}{(\Delta x)^2} \quad (6)$$

ในขั้นตอนต่อไปผนังของอาคารจะถูกแบ่งออกเป็นจุดย่อย ๆ จำนวน  $n$  จุด โดยจุด  $N_1$  อยู่ติดผนังด้านนอกที่ถูกแสงแดด และจุด  $N_n$  อยู่ติดผนังด้านในของอาคาร ซึ่งความกว้างของแต่ละจุดมีค่าเท่ากัน คือ  $\Delta x$  ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2



รูปที่ 2 หน้าตัดของผนังอาคาร

ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในผนังตามสมการที่ (1) และ (6) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ), ค่าความร้อนจำเพาะ ( $c$ ) และค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ในงานวิจัยนี้ใช้ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงพลังงานเรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ.2552 ตามตารางที่ 1 [13]

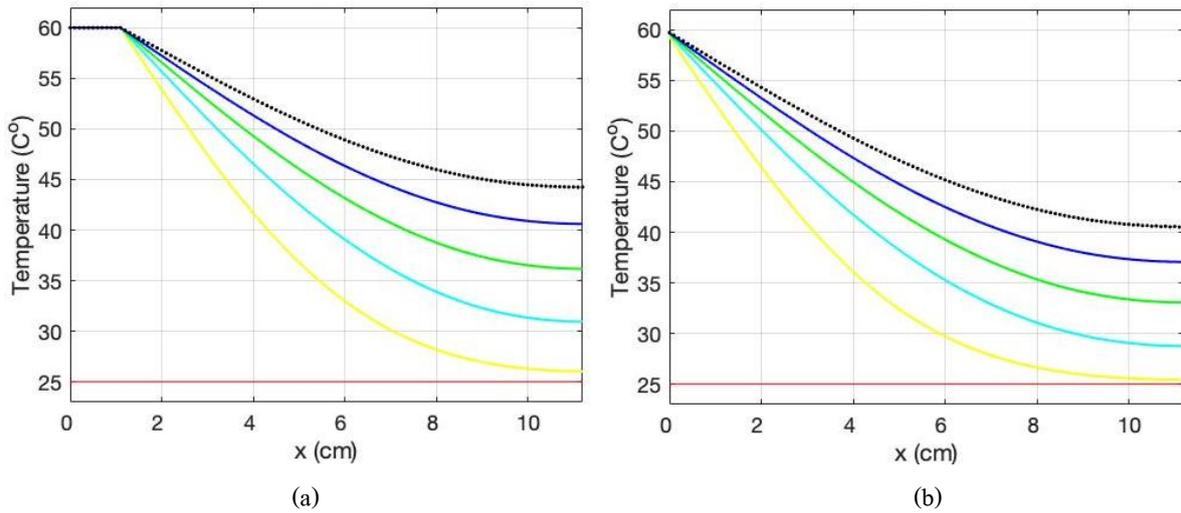
ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนในผนังของอาคาร

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k$ ( $W/(m^{\circ}C)$ )	ค่าความร้อนจำเพาะ $c$ ( $kJ/(kg^{\circ}C)$ )	ค่าความหนาแน่น $\rho$ ( $kg/m^3$ )
อิฐมอญ	0.473	0.79	1600
คอนกรีตบล็อกกลวง	0.546	0.92	2210
คอนกรีตมวลเบา แบบที่ 1	0.180	0.84	620
คอนกรีตมวลเบา แบบที่ 2	0.210	0.84	700
ปูนฉาบ (ซีเมนต์ผสมทราย)	0.72	0.84	1860
ปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบา	0.326	0.84	1200
แผ่นยิปซัม	0.282	1.09	800
ไม้อัด	0.213	1.21	900
แผ่นไฟเบอร์	0.052	1.30	246

เมื่อได้ค่าคงที่และกำหนดค่าตำแหน่งของจุดต่าง ๆ ของผนังตามระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่ตำแหน่งจุดกลางแล้ว สมการที่ (6) จะถูกดำเนินการอินทิเกรต เพื่อหาค่าของอุณหภูมิภายในผนังที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นเวลา 180 นาที คือ  $0 \leq t \leq 180$  นาที สำหรับค่าของผนัง 4 แบบคือ อิฐมอญ คอนกรีตบล็อกกลวง และ คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 620 และ 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยอิฐมอญและคอนกรีตบล็อกกลวงใช้ปูนฉาบที่เป็นซีเมนต์ผสมทรายทั้งสองด้าน ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาทั้งสองแบบใช้ปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบาสองด้าน โดยผนังทั้ง 4 แบบนี้ ถูกวิเคราะห์ความสามารถในการกั้นความร้อนเมื่อมีวัสดุปิดผิว 4 กรณี คือ 1) ไม่มีวัสดุปิดผิว 2) มีแผ่นยิปซัมปิดผิว 3) มีแผ่นไม้อัดปิดผิว และ 4) มีแผ่นไฟเบอร์ปิดผิว รวมกรณีที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ คือ 16 กรณี จากนั้นดำเนินการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผนังด้านในสุดของแต่ละกรณีว่าพฤติกรรมการกั้นความร้อนได้มากน้อยเพียงใด

### 3. ผลการวิจัย

จากการดำเนินการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์สามัญในสมการที่ (6) เป็นเวลา 10800 วินาทีหรือ 180 นาที ในกรณีของผนังทั้ง 4 ชนิด คือ อิฐมอญ คอนกรีตบล็อกกลวง และคอนกรีตมวลเบาอีก 2 แบบ ประกอบกับกรณีของการมีวัสดุปิดผิว 4 แบบ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในกรณีแรกแสดงตัวอย่างของผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในผนังที่ได้จากการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ โดยในกรณีแรกเป็นการเปรียบเทียบผลจากการมีอิฐมอญเป็นผนังโดยที่ไม่มีวัสดุปิดผิว ดังแสดงในรูปที่ 3(a) กับกรณีที่ที่มีอิฐมอญเป็นผนังและมีแผ่นฉนวนเป็นวัสดุปิดผิว แสดงดังรูปที่ 3(b) โดยในกรณีที่ไม่มีวัสดุปิดผิว ในรูปที่ 3(a) นั้น พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวนอกของผนังปูนฉาบ โดยในรูปที่ 3 ค่าของอุณหภูมิภายในผนัง จะถูกแสดงอยู่ในช่วงเวลา  $t = 0, 36, 72, 108, 144$  และ  $180$  นาที ด้วยเส้นกราฟสีแดง สีเหลือง สีฟ้า สีเขียว สีนํ้าเงิน และสีดำ ตามลำดับ



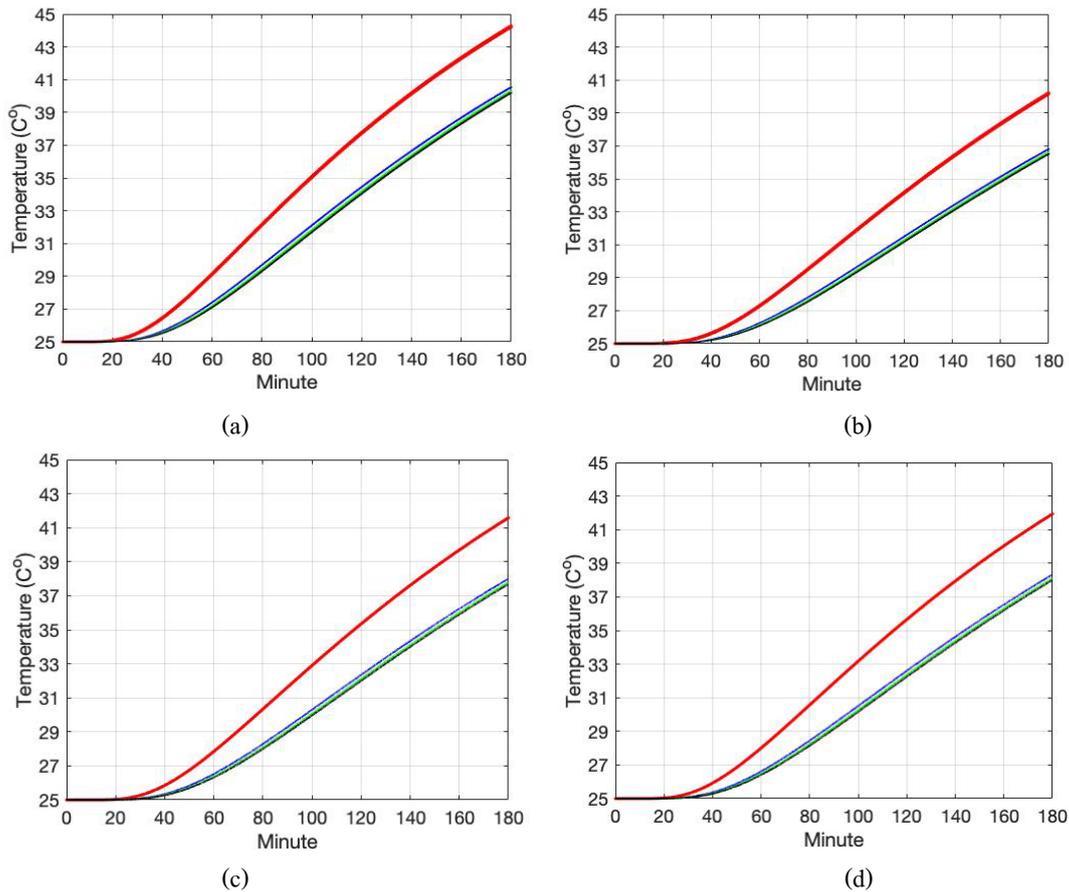
รูปที่ 3 ค่าของอุณหภูมิผนังในแต่ละช่วงเวลา กรณีผนังอิฐมอญ

โดย (a) แสดง ไม่มีวัสดุปิดผิว และ (b) แสดง มีแผ่นฉนวนปิดผิว

โดยที่:  $t = 0$  (เส้นกราฟสีแดง),  $36$  (เส้นกราฟสีเหลือง),  $72$  (เส้นกราฟสีฟ้า),  $108$  (เส้นกราฟสีเขียว),  $144$  (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) และ  $180$  (เส้นกราฟสีดำ)

จากรูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิภายในผนังมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส (เส้นกราฟสีแดงในรูปที่ 3(a) และรูปที่ 3(b) โดยผลลัพธ์จากสมการที่ (6) จากวิธีเชิงตัวเลข พบว่า ในกรณีที่กำแพงไม่มีผิวปิด อุณหภูมิของผนังที่ติดกับอาคารด้านใน ( $x = 11.2$  ซม.) มีค่าประมาณ 44.25 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผนังที่มีแผ่นฉนวนหนา 1.2 เซนติเมตร เป็นวัสดุปิดผิว อุณหภูมิของผนังที่ติดกับอาคารด้านใน ( $x = 11.2$  ซม.) มีค่าประมาณ 40.57 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากผนังภายนอกเข้าสู่ภายใน ในทุกกรณี (ในรูปที่ 4) พบว่าพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนนั้นเหมือนกับในรูปที่ 3 เพียงแต่อัตราเร็วในการถ่ายเทความร้อนนั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุและชนิดของอิฐที่ใช้ในแต่ละกรณี ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลกระทบของการใช้วัสดุปิดผิวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น จึงเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิของผนังด้านในสุด เมื่อดำเนินการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ นั่นคือ ค่าของ  $T(x = 11.2, t)$  ของแต่ละกรณี เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังด้านในสุดตามช่วงเวลา

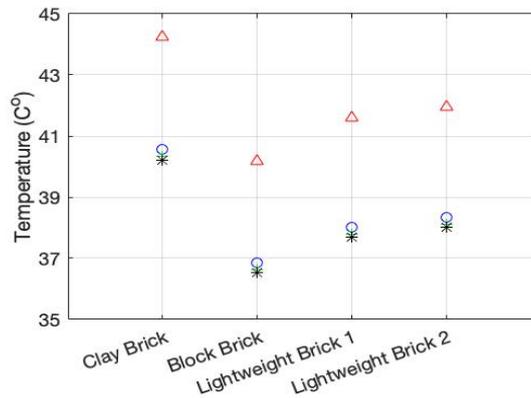
โดย (a) แสดง กรณีของอิฐมอญ, (b) แสดง กรณีคอนกรีตบล็อกกลวง, (c) แสดง กรณีคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 620 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ (d) แสดง กรณีคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- สีเส้นกราฟแสดงวัสดุปิดผิว ดังนี้
- เส้นกราฟสีแดง = ไม่มีวัสดุปิดผิว
  - เส้นกราฟสีน้ำเงิน = ยิปซัม
  - เส้นกราฟสีเขียว = ไม้อัด
  - เส้นกราฟสีดำ = ไฟเบอร์

รูปที่ 4 แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผนังด้านในสุดที่เวลา  $t = 0$  ถึง  $t = 180$  นาที โดยมีแผนภาพย่อยหรือรูปย่อยดังนี้ รูปที่ 4(a) คือ กรณีของอิฐมอญ, รูปที่ 4(b) คือ กรณีคอนกรีตบล็อกกลวง, รูปที่ 4(c) คือ กรณีคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 620 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และรูปที่ 4(d) คือ กรณีคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยในทั้ง 4 รูปย่อยนี้ เส้นกราฟสีแดงแสดงกรณีที่ไม่มีวัสดุปิดผิว เส้นกราฟสีน้ำเงินมีแผ่นยิปซัมเป็นวัสดุปิดผิว เส้นกราฟสีเขียวมีไม้อัดเป็นวัสดุปิดผิว และ เส้นกราฟสีดำมีไฟเบอร์เป็นวัสดุปิดผิว

โดยจากแผนภาพย่อยหรือรูปย่อยของอิฐทั้ง 4 แบบและกรณีมีวัสดุปิดผิวที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ ในรูปที่ 4 พบว่า พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผนังด้านในสุดจะมีพฤติกรรมที่เหมือนกันคืออุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น

เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาทีแล้ว โดยกรณีที่ไม่มีวัสดุปิดผิวนั้นอุณหภูมิจะสูงที่สุดในทุกกรณี ในขณะที่กรณีที่มีวัสดุปิดผิวทั้ง 3 ชนิดนั้นอุณหภูมิจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดเวลา โดยค่าของอุณหภูมิของทุกกรณีที่  $t = 180$  นาที แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงอุณหภูมิของผนังด้านในสุดที่  $t = 180$  นาที

สีเส้นกราฟแสดงวัสดุปิดผิว ดังนี้

- เส้นกราฟสีแดง = ไม่มีวัสดุปิดผิว
- เส้นกราฟสีน้ำเงิน = ยิปซัม
- เส้นกราฟสีเขียว = ไม้อัด
- เส้นกราฟสีดำ = ไฟเบอร์

รูปที่ 5 แสดงพฤติกรรมการณ์เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผนังด้านในสุดเมื่อ  $t = 180$  นาที โดยจุดสีแดงแสดงกรณีไม่มีวัสดุปิดผิว จุดสีน้ำเงินมีแผ่นยิปซัมเป็นวัสดุปิดผิว จุดสีเขียวมีไม้อัดเป็นวัสดุปิดผิว และ จุดสีดำมีไฟเบอร์เป็นวัสดุปิดผิว จากผลการวิเคราะห์พบว่า กรณีไม่มีวัสดุปิดผิว ผนังกำแพงสร้างจากคอนกรีตบล็อกกลวงสามารถกันความร้อนได้ดีสุด ตามมาด้วย คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 620 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนอิฐมอญจะกันความร้อนได้น้อยที่สุด

สำหรับกรณีที่วัสดุปิดผิวนั้น วัสดุปิดผิวสามารถลดอุณหภูมิจากภายนอกที่แพร่เข้ามาสูงผนังด้านในสุดได้อยู่ที่ประมาณ 3-4 องศาเซลเซียส โดยไฟเบอร์สามารถกันความร้อนได้มากที่สุด ตามมาด้วย ไม้อัด และยิปซัม ตามลำดับ แต่ความแตกต่างของค่าอุณหภูมิด้านในสุดของแต่ละวัสดุปิดผิวนั้นน้อยกว่า 0.5 องศาเซลเซียส ในทุก ๆ กรณี

#### 4. วิจารณ์ผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ พบว่า อิฐแต่ละชนิดมีขีดความสามารถในการกันความร้อนที่ถ่ายเทมาจากผนังด้านนอกที่มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในเวลา 3 ชั่วโมงได้แตกต่างกัน การศึกษาครั้งนี้ พบว่า ผนังที่มีวัสดุปิดผิวทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นยิปซัม แผ่นไม้อัด และแผ่นไฟเบอร์ สามารถลดอุณหภูมิผนังที่ติดภายใน อาคารหลังจากที่ตากแดดมาเป็นเวลานาน 3 ชั่วโมงได้ใกล้เคียงกันประมาณ 3-4 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ในการเลือกใช้วัสดุปิดผิวในการก่อสร้างจริงจึงต้องคำนึงถึงตัวแปรอื่นมาใช้ในการตัดสินใจด้วย เช่น ราคาของวัสดุ ความยากของการจัดหาวัสดุ ความยากในการก่อสร้าง และความสวยงาม

## 5. สรุปผลการวิจัย

เนื่องจากอุณหภูมิโลกที่สูงขึ้นในแต่ละปีส่งผลให้ค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบทำความเย็นในอาคารที่มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น วิธีหนึ่งในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า คือ การหาแนวทางในการสร้างผนังอาคารที่มีขีดความสามารถในการกักความร้อนได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังในการกักความร้อนและขีดความสามารถในการลดอุณหภูมิที่ผิวของผนังด้านในสุด เมื่อใช้วัสดุปิดผิวที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อลดอุปสรรคในการควบคุมตัวแปรอื่น ๆ เช่น ความหนาของอิฐ ความหนาของปูนฉาบ ความหนาของวัสดุปิดผิว ความผันผวนของอุณหภูมิและแสงแดดภายนอก

จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อผนังตากแดดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง คอนกรีตบล็อกกลวงสามารถกักความร้อนได้มากที่สุด ในกรณีผนังไม่มีวัสดุปิดผิว โดยที่เมื่อมีผนังวัสดุปิดผิว ผนังสามารถลดอุณหภูมิได้มากกว่ากรณีไม่มีวัสดุปิดผิวประมาณ 3 – 4 องศาเซลเซียส ซึ่งวัสดุที่เลือกมาในการวิเคราะห์ครั้งนี้คือ แผ่นยิปซัม แผ่นไม้อัด และแผ่นไฟเบอร์ มีความสามารถในการลดอุณหภูมิของผนังด้านในสุดได้ประมาณใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นในกระบวนการก่อสร้างจริงการเลือกใช้คอนกรีตบล็อกกลวงจะเหมาะสมกับการก่อสร้างอาคารทั่วไป เพราะนอกจากจะมีคุณสมบัติเด่นอยู่ที่มีความแข็งแรง รับแรงกดได้แล้ว ที่สำคัญยังสามารถกักความร้อนและระบายความร้อนได้อย่างดีอีกด้วย ส่วนวัสดุปิดผิวที่เลือกมาทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้ให้ผลในการลดอุณหภูมิจากภายนอกได้ใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชนิด ดังนั้นในการก่อสร้างจริง จึงควรคำนึงถึงปัจจัยอื่นด้วย เช่น ความยากในการก่อสร้าง ความสวยงาม และราคาของวัสดุปิดผิว

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Weart S. R. (2008). **The discovery of global warming**. Harvard University Press.
- [2] Santamouris M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 82: 100-113.
- [3] Kontoleon K. J. and Eumorfopoulou E. A. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and environment*, 45(5): 1287-1303.
- [4] อมลวรรณ แสนนวล, สุทธา ศรีเผด็จ และ ชรินทร์ ทิพย์ภาส. (2559). การศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารกรณีศึกษา วัสดุไม้ประกอบพลาสติก. *วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 15(1): 161-173.
- [5] พรสวรรค์ พิริยะศรีธา. (2556). ผลของมวลสารภายในต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา. *วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 12(1): 86 – 99.
- [6] Fick A. (1855). Ueber diffusion. *Annalen der Physik*, 170(1): 59-86.
- [7] Crank J. (1956). **The Mathematics of Diffusion**. London: Oxford Clarendon Press.
- [8] Carslaw H. S. and Jager J. C. (1959). **Conduction of Heat in Solids**. Oxford: Clarendon Press.
- [9] Unsworth J. and Duarte F. J. (1979). Heat diffusion in a solid sphere and Fourier theory: an elementary practical example. *American Journal of Physics*, 47(11): 981-983.
- [10] Thambynayagam R. K. M. (2011). **The Diffusion Handbook: Applied Solutions for Engineers**. McGraw-Hill.
- [11] Schiesser W. E. (1991). **The numerical methods of lines, San Diego**. CA: Academic Press.
- [12] Schiesser W. E. (2012). **The numerical method of lines: integration of partial differential equations**. Elsevier.

- [13] กระทรวงพลังงาน. (2552). ประกาศกระทรวงพลังงานเรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคาร แต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารและการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคารพ.ศ.2552, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนพิเศษ 122 ง: 21-39.
- [14] Dalglish A., Cornick S., Maref, W. and Mukhopadhyaya P. (2005). Hygrothermal performance of building envelopes: Uses for 2D and 1D simulation. In 10<sup>th</sup> Conference on Building Science and Technology, Ottawa: Canada.
- [15] Stenvall A., Mikkonen R. and Kovac P. (2010). Comparison of 1D, 2D and 3D quench onset simulations. *Physica C: Superconductivity*, 470(22): 2047-2050.
- [16] Luangwilai T. and Sidhu H. (2010). Determining critical conditions for two dimensional compost piles with air flow via numerical simulations. *ANZIAM Journal*, 52(1): 463-481.
- [17] Luangwilai T., Sidhu H. S., Nelson M. I., and Chen X. D. (2010). Modelling air flow and ambient temperature effects on the biological self-heating of compost piles. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 5(4): 609-618.
- [18] วิศรุต คล้ายแจ่ม และ นพรัตน์ โพธิ์ชัย. (2562). การจำลองแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนจากผนังภายนอกสู่ผนังภายในอาคาร โดยใช้วัสดุคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตมอยูและคอนกรีตบล็อก. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ*, 15: 9-18.

**การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดินสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช**  
**Design and Development of Soil Permeability Testing Apparatus for Use in Laboratory  
of the Department of Civil Engineering, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force  
Academy**

<sup>1\*</sup>พินิต รัตนปรมากุล, <sup>2#</sup>วาริส บัวขาว

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

<sup>1\*</sup> Pinit Ruttanaporamakul, <sup>2#</sup> Waris Buakhaw

<sup>1,2</sup>Civil Engineering Department Division of Education Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Received : March, 17 2020

Revised : April, 12 2021

Accepted : April, 18 2021

\* pinitrutt@gmail.com, # waris.kmutt@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบการซึมน้ำของดิน (Soil Permeability Test) สำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองการศึกษาโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยแบ่งระเบียบวิธีวิจัยออกเป็นขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อรวบรวมเป็นข้อมูลพื้นฐาน การออกแบบและผลิตชุดเครื่องมือทดสอบการซึมน้ำของดินแบบความดันแปรเปลี่ยน (Falling Head Test) ด้วยวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก ทำการทดสอบค่าการซึมน้ำของตัวอย่างดินด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งส่งตัวอย่างดินไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการของเอกชนที่มีมาตรฐานในระดับสากล เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในขั้นตอนการอภิปรายและสรุปผล หลังจากการทดสอบและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นแล้ว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินที่หาได้จากชุดเครื่องมือทดสอบมีค่าสอดคล้องกับช่วงค่าทั่วไปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่าง ๆ และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเอกชน ประมาณร้อยละ 12 – 14 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ชุดเครื่องมือทดสอบการซึมน้ำของดินที่พัฒนาขึ้นนี้ให้ผลการทดสอบกับดินประเภทดินทรายละเอียดผสมซิลต์ และดินทรายหยาบ ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ฯ เพื่อประโยชน์ในการศึกษา และ พัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต รวมถึงสามารถนำไปใช้งานในหน่วยงานกรมช่างโยธาทหารอากาศ ซึ่งจะเป็นการประหยัดงบประมาณและเป็นประโยชน์กับทางราชการต่อไป

**คำสำคัญ:** การซึมน้ำของดิน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน, ปฐพีกลศาสตร์

### Abstract

This research studied to design and develop the apparatus of soil permeability test for use in soil mechanics laboratory in civil engineering department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy. The research methodology involves stages of collecting the related information, designing and manufacturing the equipment set of soil permeability test with available and inexpensive materials. The soil permeability test was then performed on soil samples with the developed equipment. The obtained results were compared with the soil sample that was tested by a standardized outsourcing laboratory, and then the step of discussion and conclusion were performed. After testing and solving some defect, it was found that the coefficients of permeability of soil samples obtained from the developed equipment are corresponding with the typical values as previously proposed. Moreover, the variance of the results obtained from the test were relatively small and the discrepancy between the results and the value obtained from the test performed by outsourcing laboratory is approximately 12 - 14%. Therefore, it can be concluded that the developed soil permeability testing apparatus provides acceptable test results and also, its production costs is relatively low. The developed equipment is thus suitable for use in soil mechanics laboratory in civil engineering department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy for the benefit of future education and development to get more efficient. Moreover, the equipment can be applied to be used in Civil Engineering Department, Royal Thai Air Force, which will save the budget and give the benefit to Thai government in the future.

**Keywords:** soil permeability, permeability coefficient, soil mechanics

### 1. บทนำ

มวลดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างต่อเนื่องในระหว่างเม็ดดิน ซึ่งทำให้น้ำสามารถไหลซึมผ่านได้เมื่อมีความแตกต่างของความดันน้ำระหว่างจุดหรือตำแหน่งในมวลดิน โดยดินที่อยู่ในสภาพหลวมจะมีช่องว่างอยู่มากทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง (Pervious soils) ได้แก่ ดินจำพวก กรวด และทราย ส่วนดินที่น้ำซึมผ่านได้ยากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ (Impervious soils) ได้แก่ ดินเหนียว ดินตะกอนทราย เป็นต้น

ค่าความซึมผ่านของดิน เป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในงานด้านวิศวกรรมโยธา เช่น งานก่อสร้างเขื่อนและถนน จำเป็นจะต้องเลือกใช้ดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ เพื่อป้องกันการสูญเสียปริมาณน้ำในเขื่อน และลดปริมาณน้ำที่จะเข้าไปกัดเซาะ นำพามวลดินออกไป จนเกิดเป็นโพรงภายในโครงสร้างเขื่อนดิน ทำให้ดินสูญเสียความมั่นคงและเป็นสาเหตุของการวิบัติ [1] หรือ งานก่อสร้างกำแพงกันดิน ควรใช้ดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านสูงเป็นดินถมหลังกำแพง เพื่อให้น้ำสามารถระบายออกได้อย่างรวดเร็ว เป็นต้น [2]

การทดสอบดินเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) นั้น แบ่งเป็นการทดสอบในสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยเหตุนี้ ราชวิทยาลัยปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ จึงกำหนดให้มีการฝึกปฏิบัติทดสอบความซึมผ่านของดินในห้องปฏิบัติการ โดยมีการทดสอบ 2 วิธี คือ การทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant Head Test) ซึ่งเหมาะสำหรับ

ทดสอบกับดินเม็ดหยาบและการทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยน (Variable Head or Falling Head Test) สำหรับทดสอบกับดินเม็ดละเอียด [3]

ในปัจจุบันชุดเครื่องมือทดสอบค่าความซึมน้ำของดินในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อยู่สภาพชำรุดเสียหาย ไม่สามารถใช้งานได้ อีกทั้งกระบวนการในการจัดหาใหม่ทดแทนใช้เวลานานและงบประมาณค่อนข้างสูง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดิน ที่มีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับได้ และใช้งบประมาณในการผลิตไม่สูงมาก สำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในรายวิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ และการทำวิจัยในอนาคต

## 2. ขอบเขตงานวิจัย

- 2.1 การทดสอบความซึมน้ำของดิน ด้วยวิธีความดันแปรเปลี่ยน ตามมาตรฐาน ASTM D5084 และ D5856
- 2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย และมีราคาไม่สูงมาก
- 2.3 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ เป็นตัวอย่างดินเปลี่ยนแปลงสภาพ (Disturbed Sample) บดอัดแบบมาตรฐานด้วยก้อนขนาด 5.5 ปอนด์ ระยะเวลา 12 นิ้ว บดอัดจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง

## 3. สมมติฐานการวิจัย

ชุดเครื่องมือทดสอบค่าความซึมน้ำของดิน เป็นอุปกรณ์การทดลองที่สามารถผลิตได้โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย และมีราคาไม่สูงมากนัก เช่น ท่อ PVC และแผ่นอะคริลิกใส ประกอบขึ้นเป็นเซลล์บรรจุตัวอย่างดินและฝาประกบ พร้อมติดตั้งยก้านน้ำซึม และวาล์วข้อต่อ โดยผลการทดสอบตัวอย่างดินอาจมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากเครื่องมือในห้องปฏิบัติการเอกชนเล็กน้อย เนื่องจากในชุดเครื่องมือทดสอบมาตรฐานนั้นจะมีวาล์วไดอะกาสซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความแม่นยำของผลการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ชุดเครื่องมือที่ผลิตขึ้นจะสามารถให้ผลการทดสอบดินอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องมือในห้องปฏิบัติการเอกชน จึงเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ฯ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนและการทำวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องต่อไป

## 4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปกติแล้วในมวลดินจะประกอบด้วยส่วนของเม็ดดิน น้ำ และอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งช่องว่างนี้จะมีขนาดและความต่อเนื่องแตกต่างกันในดินแต่ละประเภท อันจะส่งผลต่อความสามารถในการซึมน้ำของดิน คือ ในดินเม็ดหยาบ เช่น กรวดและทราย จะมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย ในขณะที่ดินตะกอนทราย (Silty sand) และดินเหนียว ซึ่งเป็นดินเม็ดละเอียดจะมีช่องว่างขนาดเล็ก ทำให้น้ำซึมผ่านได้ยากและใช้เวลานานกว่า ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความซึมน้ำของดิน ประกอบด้วย

### 4.1 การไหลของน้ำในดินและกฎของดาร์ซี

การไหลของน้ำผ่านช่องว่างในดินเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) อนุภาคของน้ำมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วยความเร็วต่ำ จากการศึกษาของดาร์ซี (Henry Darcy, 1856) [4] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลของน้ำในดินกับค่าความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$v = ki \quad (1)$$

- เมื่อ  $v$  = ความเร็วของการไหล (เซนติเมตร/วินาที)  
 $k$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตร/วินาที)  
 $i$  = ความชันทางชลศาสตร์

และ ปริมาณการไหลของน้ำในระยะเวลาหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = Av \quad (2)$$

หรือ  $Q = ki A \quad (3)$

เมื่อ  $Q$  = ปริมาณการไหลในหนึ่งหน่วยเวลา (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (ตารางเซนติเมตร)

#### 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในดินแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันตามปัจจัย คือ ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ความหนืดของของเหลว และความอึดตัวของน้ำของมวลดิน ตารางที่ 1 แสดงช่วงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในดินชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน [5]

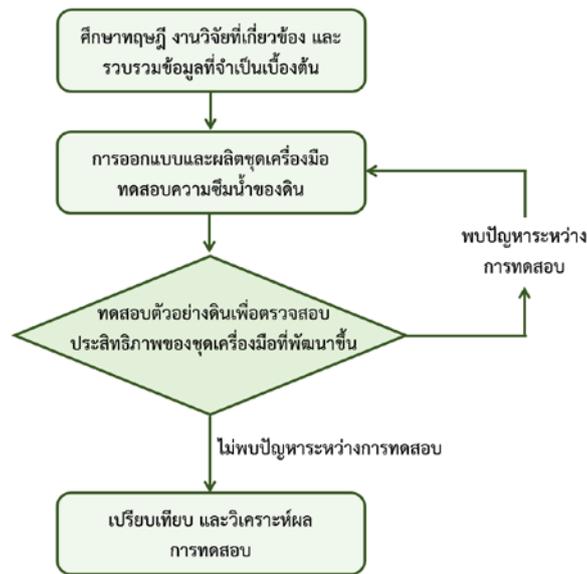
ชนิดของดิน	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k, เซนติเมตร/วินาที)
กรวดสะอาด	$1 - 10^2$
ทรายหยาบ	$10^{-3} - 1$
ทรายละเอียด และ ดินตะกอนทราย	$10^{-5} - 10^{-3}$
ดินตะกอน และดินตะกอนผสมดินเหนียว	$10^{-6} - 10^{-5}$
ดินเหนียว	$10^{-9} - 10^{-6}$

ปีติ อังสุโวทัย (2525) ทำการทดสอบความซึมน้ำของดินตะกอนทรายผสมปูนขาว ด้วยวิธีความดันแปรเปลี่ยน พบว่า การเติมปูนขาว ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในดินตะกอนทราย จะทำให้เม็ดดินมีการเรียงตัวกันแบบเกาะกลุ่ม (ไม่เป็นระเบียบ) มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ค่าความซึมน้ำของดินมีค่าเพิ่มขึ้นสูง [6]

อดิเทพ ศรีคงศรี (2556) เสนอแนวทางการพัฒนาเครื่องมือทดสอบเสถียรภาพต่อการกัดเซาะภายในโครงสร้างมวลดิน โดยดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D2434 และ D5101 ใช้วัสดุอะคริลิกทำกระบอกบรรจุตัวอย่างดินทดสอบประกอบเข้ากับแผงควบคุมและชุดหลอดแก้ววัดหัวความดันน้ำ [7]

#### 5. การดำเนินการวิจัย

กระบวนการวิจัย เพื่อพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดินนี้ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ 1) รวบรวมข้อมูลเบื้องต้น 2) การออกแบบและผลิตชุดเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดิน 3) การสอบตัวอย่างดินเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น และ 4) การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการใช้ชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ฯ โดยมีกรอบงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบงานวิจัย

### 5.1 การออกแบบชุดเครื่องทดสอบความชื้นน้ำของดิน

เครื่องทดสอบความชื้นน้ำของดินแบบความดันแปรเปลี่ยน มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ เซลล์สำหรับบรรจุตัวอย่างทดสอบ และแผงชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำพร้อมสเกล

ในการออกแบบและผลิตเซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบ ใช้วัสดุ คือ ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 13.5 มิลลิเมตร ตัดเป็น 2 ส่วน ยาว 12 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร นำไปกลึงเพื่อให้สามารถรอบติดกันได้ ในส่วนของฐานและฝาประกบ ใช้แผ่นอะคริลิกใส หนา 16 มิลลิเมตร เซาะร่องตามแนวเส้นรอบวงท่อ PVC ลึก 4 มิลลิเมตร ติดตั้ง วาล์ว และสวมขงกันน้ำซึม (โอริง) บริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ เมื่อประกอบเรียบร้อยแล้วจะได้เซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบมีลักษณะตามรูปที่ 2 โดยในการวิจัยนี้ ได้ผลิตชุดเครื่องมือทดสอบที่ประกอบด้วยเซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบ ทั้งหมดจำนวน 3 เซลล์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 เซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบ (ก) ฐานและฝาประกบพร้อมวาล์วน้ำเข้าและน้ำออก (ข) เซลล์บรรจุตัวอย่างที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว

ในขั้นตอนการออกแบบและผลิตแผงชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำ ใช้หลอดอะคริลิกใสมีพื้นที่หน้าตัด 5 ตารางเซนติเมตร ยาว 1 เมตร ติดตั้งพร้อมแถบวัดระยะบนแผ่นพลาสติกสีขาวขุ่น นำไปประกอบกับระบบบวาล์วและถังน้ำล้น ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำ

## 5.2 การทดสอบตัวอย่างดิน

ในขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างดิน ใช้ตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ และดินทรายหยาบ แบ่งตัวอย่างดินบางส่วนส่งทดสอบที่ห้องปฏิบัติการของเอกชน เพื่อเปรียบเทียบผลกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น รายละเอียดจำนวนตัวอย่างดินดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างดิน	จำนวน	ส่งทดสอบห้องปฏิบัติการเอกชน
ทรายละเอียดผสมซิลท์	9 ตัวอย่าง	ส่งทดสอบ
ทรายหยาบ	9 ตัวอย่าง	ไม่ส่งทดสอบ

กระบวนการเตรียมตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ ใช้ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ บดอัดใหม่ด้วยปริมาณความชื้น (%OMC) เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดแบบมาตรฐานด้วยค้อนขนาด 5.5 ปอนด์ ระยะยก 12 นิ้ว จำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ส่วนตัวอย่างดินทรายหยาบใช้การบรรจุดินเป็นชั้นละไม่เกิน 1.5 เซนติเมตร แล้วกระทุ้งด้วยเหล็กหรือเคาะด้วยค้อนยาง และปรับผิวหน้าให้เรียบ แล้วจึงนำไปทดสอบค่าความชื้นน้ำของดิน โดยแบ่งทดสอบด้วยชุดเครื่องมือ 3 ชุด ชุดละ 3 ตัวอย่างต่อตัวอย่างดินแต่ละประเภท

## 6. ผลการวิจัย

6.1 ผลการทดสอบความชื้นน้ำของตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์จากห้องปฏิบัติการของเอกชน ด้วยการทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยนได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เท่ากับ  $2.47 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที

6.2 ผลการทดสอบความชื้นน้ำของตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ ที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์

ชุดทดสอบ	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $\times 10^{-4}$ ซม./วินาที)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
1	2.12	2.16	2.15	2.14
2	2.18	2.15	2.17	2.16
3	2.13	2.14	2.11	2.13

6.3 ผลการทดสอบความซึมน้ำของตัวอย่างดินทรายหยาบ ที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ได้ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลทดสอบตัวอย่างดินทรายหยาบ

ชุดทดสอบ	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $\times 10^{-3}$ ซม./วินาที)			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
1	1.6	1.56	1.58	1.58
2	1.58	1.55	1.57	1.56
3	1.57	1.52	1.56	1.55

## 7. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

7.1 จากผลการทดสอบความซึมน้ำของตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่าง ดินที่ทำกรทดสอบด้วยชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นมีค่าประมาณ  $2.15 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับ ค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 และมีความแตกต่างจากผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการเอกชนเล็กน้อย ประมาณ 12 – 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่แตกต่างนี้อาจเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น ความชำนาญของผู้ทดสอบ สภาพตัวอย่างดินหรือ สภาพแวดล้อมที่ต่างกันระหว่างการทดสอบ และ มาตรฐานของเครื่องมือ ในส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ ตัวอย่างดินทรายหยาบที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้น มีค่า ประมาณ  $1.57 \times 10^{-3}$  เซนติเมตรต่อ วินาที สอดคล้องกับค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 เช่นเดียวกัน

7.2 เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลผลการทดสอบตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด พบว่า มีค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานประมาณ 0.02 เท่ากันทั้ง 2 ชุดข้อมูล แสดงว่าผลการทดสอบที่ได้จากชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นมีการ กระจายตัวน้อย ผลการทดสอบแต่ละครั้งมีความสม่ำเสมอ ไม่แตกต่างกันมาก

7.3 ต้นทุนที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบนี้ รวมทั้งสิ้น 15,000 บาท ซึ่งต่ำกว่าราคาเครื่องมือจาก การสอบถามบริษัทตัวแทนจำหน่าย ที่มีราคาสูงถึง 150,000 บาท

ดังนั้น เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าในเรื่องงบประมาณ ระยะเวลาในการจัดหา และความแม่นยำของผลการทดสอบ ดังที่ได้ กล่าวมาแล้วนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ชุดเครื่องมือทดสอบค่าความซึมน้ำของดินที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม สามารถประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนและการทำวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องในอนาคต รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาร่วมกับ กรมช่างโยธาทหารอากาศ เพื่อนำไปใช้ในงานออกแบบฐานรากขนาดเล็กของกองทัพอากาศต่อไป

## 8. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย สามารถนำไปใช้สร้างชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินที่มีต้นทุนการผลิตต่ำแต่ให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เพื่อใช้ในการศึกษาและงานวิจัย ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการผลิตควรตรวจสอบการรั่วซึมของเครื่องมืออย่างละเอียด เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ นอกจากนี้ ยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดิน และอุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำกับชุดเครื่องมือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ในสภาพความดันเฉพาะที่ต้องการได้ และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบ คือประสบการณ์ของผู้ทดสอบ จึงควรส่งผู้ปฏิบัติการทดสอบเข้าฝึกงานกับห้องปฏิบัติการเอกชนหรือสถาบันชั้นนำ เพื่อเพิ่มทักษะความชำนาญในการทดสอบ

## 9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยความอนุเคราะห์ของข้าราชการ เจ้าหน้าที่ กรมช่างโยธาทหารอากาศ ที่ได้อำนวยความสะดวกในการเข้าพื้นที่ก่อสร้างภายในกองทัพอากาศ เพื่อเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงขอขอบคุณนายประหัด ทองคำ สำหรับคำแนะนำในการผลิตและประกอบชุดเครื่องมือทดสอบ และท้ายที่สุด ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ในการสนับสนุนเงินทุนและสถานที่ รวมถึงเครื่องมือทดลองในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ทางคณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

## 10. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุวัฒน์ พายุสุวัฒน์, สุกฤษณ์ เจริญบุบผา, คมสิทธิ์ สุทธิรักษ์. (2550). การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือทดสอบความชื้นน้ำของดินในสนามสำหรับการก่อสร้างอาคารชลประทาน. ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิศวกรรม สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน. สืบค้น 15 สิงหาคม 2563, จาก <http://research.rid.go.th/rde4/doc/doc03.pdf>.
- [2] สยาม แกมขุนทด, พานิช วุฒิพฤกษ์, สันชัย อินทพิชัย และ พิทยา แจ่มสว่าง. (2558). “ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดละเอียดต่างกัน” กรุงเทพฯ: วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 25(1), ม.ค. – เม.ย. 2558: 11 – 19.
- [3] วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่. “หน่วยที่ 11 การทดลองความชื้นน้ำของดิน (Soil Permeability Test)” เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์, สืบค้น 14 สิงหาคม 2563, จาก <http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/11.pdf>.
- [4] Das, B. M. (2010). **Principles of Geotechnical Engineering**: 7<sup>th</sup> edition. USA: Cengage Learning.
- [5] ก้องเกียรติ บุญทวี และฉัตร ลอยจิว. (2545). เครื่องมือทดสอบการไหลซึมของน้ำผ่านดินแบบระดับน้ำแปรเปลี่ยน. (ปริญญาานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ).
- [6] ปิติ อังสุโวทัย. (2525). “ความชื้นผ่านได้ของดินผสมปูนขาว” ขอนแก่น: วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 9(3), ก.ค. – ก.ย. 2525.
- [7] อติเทพ ศรีคงศรี (2556). “เสถียรภาพต่อการกัดเซาะภายในโครงสร้างมวลดิน: หัวข้อแนะนำให้เพิ่มในตำราวิชาปฐพีกลศาสตร์” กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ปีที่ 3(2), ก.ค. – ธ.ค. 2556.
- [8] ASTM D2434 - 68 (reapproved 2006). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.
- [9] ASTM D5856-15. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.

# การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

## Aerodynamic Analysis of TEagle Eyes X-II Mini UAV by Using CFD

<sup>1\*</sup>อิทธิ ยูทธยานนท์, <sup>2#</sup>วันชัย เจียจันทร์ และ <sup>3#</sup>ธิติพันธ์ วงหิ่งแก

<sup>1,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอากาศยาน กองวิชาวิศวกรรมอากาศยานและเทคโนโลยีการบิน

กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

<sup>2</sup>สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

<sup>1\*</sup>Itti Yuthayanon and <sup>2#</sup>Wanchai Jiajan and <sup>3#</sup>Thitiphun Vongkunghae

<sup>1,3</sup>Aeronautical Engineering Department, Aeronautical Engineering and Aviation Technology Division,

Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

<sup>2</sup>Graduate School, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

\*itti@rtaf.mi.th, #wanchai\_j@rtaf.mi.th, #thitiphun\_v@rtaf.mi.th

Received : March, 01 2021

Revised : April, 04 2021

Accepted : June, 22 2021

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์และเสถียรภาพเบื้องต้นของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก (TEagle Eyes X-II) โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics : CFD) ในย่านเลขเรย์โนลด์ต่ำ คือ ประมาณ 500,000 – 800,000 ตามรูปแบบและภารกิจของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่ได้รับการออกแบบจากขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการให้สามารถทำการบินในย่านความเร็วต่ำกว่าเสียงแบบไร้การอึดตัวในภารกิจลาดตระเวนและเฝ้าตรวจทางอากาศ ทั้งนี้ เพื่อนำผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรม CFD ที่ได้ มาเปรียบเทียบและยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการ ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัว สามารถยืนยันขีดความสามารถในการปฏิบัติการกิจของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กตามที่กำหนดไว้ได้เป็นอย่างดี และสามารถที่จะดำเนินการสร้างและทำการบินทดสอบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กต้นแบบในขั้นตอนการวิจัยพัฒนาและสร้างอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กได้ต่อไป

**คำสำคัญ:** อากาศพลศาสตร์, เสถียรภาพ, อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก, โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

### Abstract

The objective of this paper is to analyze aerodynamic characteristics and aircraft stability of TEagle Eyes X-II mini UAV by using Computational Fluid Dynamics (CFD) in range of low Reynolds number about 500,000 - 800,000 based on the mini UAV design from conceptual design process to fly in low-speed subsonic incompressible flow in intelligence, surveillance and reconnaissance missions. This is to compare the results of the test by using

the CFD program and confirm the results obtained from the conceptual design process. The analysis results of lift coefficient, drag coefficient and longitudinal static stability can confirm the mission capabilities of TEagle Eyes X-II, which able to build and flight testing in the next process of research, development and construction of small unmanned prototype aircraft.

**Keywords:** Aerodynamics, Stability, TEagle Eyes X-II Mini UAV, Computational Fluid Dynamics, CFD

## 1. บทนำ

ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 – 2580) กำหนดเป้าหมายในการขับเคลื่อนกองทัพอากาศเพื่อมุ่งสู่วิสัยทัศน์ “กองทัพอากาศชั้นนำในภูมิภาค (One of the Best Air Forces in ASEAN)” โดยได้กำหนดประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 2 เสริมสร้างสมรรถนะและความพร้อมในการป้องกันประเทศและรักษาผลประโยชน์แห่งชาติ เป็นประเด็นยุทธศาสตร์ประเด็นหนึ่งของกองทัพอากาศในการสนับสนุนให้บรรลุวิสัยทัศน์กองทัพอากาศอย่างเป็นรูปธรรม บนพื้นฐานกรอบภารกิจของกองทัพอากาศตามรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย โดยกำหนดจุดเน้นด้านการเสริมสร้างนภาพเพื่อที่จะสร้างและพัฒนากำลังทางอากาศในยุคที่มีการพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว [1] ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการตอบสนองยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี ดังกล่าว ได้เป็นอย่างดี

การวิจัย พัฒนา และจัดหาอากาศยานไร้คนขับ เพื่อให้สามารถปฏิบัติการในระดัбыุทธการและยุทธวิธี ที่ต้องอาศัยวิทยาการและเทคโนโลยีได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมต่อการรองรับการพัฒนาของระบบตรวจจับในอนาคต เป็นไปตามแนวทางการพัฒนากองทัพอากาศ ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนาขีดความสามารถการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง (Network Centric Operations : NCO) ด้วยขีดความสามารถในการแสวงหาข้อมูลในทุกความต้องการที่มีความถูกต้อง ครบถ้วน และทันเวลา ยังผลให้ได้รับข้อมูลสำหรับใช้ประโยชน์ในการปฏิบัติการได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการศึกษาข้อมูลสมรรถนะของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก [2] [3] และทำการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics : CFD) เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับต้นแบบของกองทัพอากาศที่สามารถสนับสนุนภารกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยพัฒนา และปรับปรุงระบบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก (TEagle Eyes X-II) จากขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการ (Conceptual Design) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรม CFD และหาแนวทางการพัฒนาและเพิ่มขีดความสามารถ เพื่อให้ได้อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่สามารถทำการบินและปฏิบัติการได้จริงตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน และสามารถสร้างองค์ความรู้ด้านการแผนแบบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กได้อย่างเป็นระบบ

การหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์โดยโปรแกรม CFD เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ได้รับการสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณสมการทางอากาศพลศาสตร์ที่มีความซับซ้อนหรือที่เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตค (Navier-Stokes Equation) ซึ่งเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่จำลองการไหลของกระแสอากาศ ดังนั้น การคำนวณค่าอากาศพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม CFD จึงสามารถคำนวณได้กับกระแสอากาศที่ไหลผ่านวัตถุทรงรูปทรงและรูปแบบการไหลที่ซับซ้อนต่าง ๆ โดยที่ผลลัพธ์ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม [4]



รูปที่ 1 อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก (TEagle Eyes X-II)

## 2. ขอบเขตงานวิจัย

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรม CFD ได้กำหนดขอบเขตงานวิจัยให้ตรงกับความต้องการและการนำไปใช้ในการปฏิบัติการกิจลาดตระเวนและเฝ้าตรวจทางอากาศของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กในย่านความเร็วต่ำกว่าเสียงแบบไร้การอัดตัว โดยมีค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงระหว่าง 500,000 – 800,000

## 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โปรแกรม CFD ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ เป็นโปรแกรมรหัสคอมพิวเตอร์ (Computer Code) ที่มีโครงสร้างหลักมาจากเทคนิคการคำนวณของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เพื่อนำมาใช้ในการจำลอง (Computer-based Simulation) และวิเคราะห์แก้ปัญหาการไหลของของไหล (Fluid Flow Problem) ตามเงื่อนไขค่าขอบที่ได้รับมาจากปัญหานั้น (Boundary Condition) โดยทั่วไปโครงสร้างของโปรแกรม CFD มีความซับซ้อนและยากต่อการทำความเข้าใจ แต่ในปัจจุบันโปรแกรม CFD ได้รับการพัฒนาเพื่อให้ใช้งานได้ง่าย (Friendly Users) โดยใช้พื้นฐานของทฤษฎีพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) และทฤษฎีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (Numerical Techniques for Engineering) ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม CFD ในเบื้องต้น ประกอบด้วย องค์ประกอบหลัก 3 องค์ประกอบ [5] [6] ที่ต้องดำเนินการตามลำดับ ดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-Processor) เป็นขั้นตอนการป้อนชุดคำสั่งของปัญหาการไหลของของไหลที่ต้องการหาคำตอบ โดยการป้อนชุดคำสั่งที่ประกอบไปด้วย

3.1.1 การกำหนดรูปทรง (Definition of Geometry) ของขอบเขตที่ต้องการคำนวณหรือเรียกว่าโดเมนการคำนวณ (Computational Domain)

3.1.2 การสร้างตารางกริด (Grid or Mesh Generation) เป็นการแบ่งโดเมนการคำนวณออกเป็นส่วน ๆ เพื่อให้มีขนาดที่เล็กลงและเข้ากับรูปทรงของปัญหา

3.1.3 การเลือกคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่จำเป็นต่อรูปแบบการคำนวณ

3.1.4 การกำหนดคุณสมบัติของของไหล (Fluid Properties)

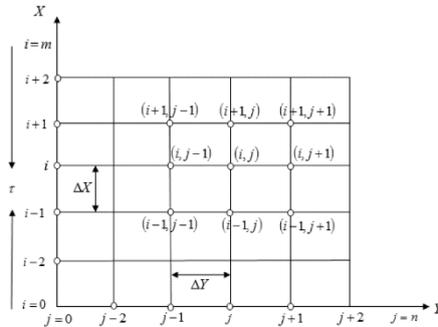
3.1.5 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการไหลอย่างเหมาะสม (Specification of Boundary)

3.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solver)

3.2.1 การจัดรูปแบบตัวแปรที่ต้องการทราบค่า (Unknown Variables) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันที่ไม่ซับซ้อน

3.2.2 การแบ่งย่อยเทอมอนุพันธ์ (Discretization) ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการพีชคณิต (Algebraic Equation System) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics Equation) และจัดระบบสมการในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Manipulation) โดยมีวิธีการพื้นฐานในการแบ่งย่อยเทอมอนุพันธ์ที่แตกต่างกัน ดังนี้

3.2.2.1 วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method) เป็นเทคนิคการแบ่งย่อยสมการโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) และนำไปแทนค่าเทอมอนุพันธ์ในสมการการไหลโดยตรง ดังแสดงตัวอย่างตารางกริดไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ตามรูปที่ 2 [7] ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 เมื่อกำหนดให้  $u$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $x$  และ  $v$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $y$  โดยที่  $i$  และ  $j$  แสดงถึงตำแหน่งในตารางกริดไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์



รูปที่ 2 ตารางกริดไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

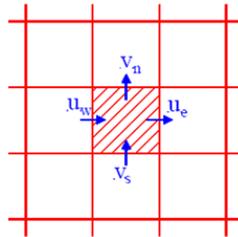
$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta y} \tag{1}$$

3.2.2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการแก้สมการโดยวิธีการถ่วงน้ำหนัก (Weighted Function) ที่มีเชปฟังก์ชัน (Shape Function)  $S_a(x)$  แทนในสมการควบคุม ดังแสดงในสมการที่ 2

$$u(x) = \sum u_a S_a(x) \tag{2}$$

3.2.2.3 วิธีสเปกตรอล (Spectral Method) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการประเมินค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการตัดเทอม (Truncation Error) โดยอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ซึ่งแตกต่างจากวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลโดยวิธีสเปกตรอลนั้น จะพิจารณาการคำนวณทั้งระบบ (Entire Computational Domain) ในขณะที่วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะที่เป็นตำแหน่งภายใน (Local Domain) ของระบบ

3.2.2.4 วิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method) เป็นอีกเทคนิคการคำนวณวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่นำข้อดีจากทั้งวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มารวมกัน และสามารถใช้ในการคำนวณในกรณีที่มีการไหลไม่มีความต่อเนื่อง ซึ่งวิธีนี้จะใช้ค่าที่คำนวณจากกริดตรงกลางโดยที่กริดโดยรอบจะได้รับการส่งผ่านข้อมูลนั้น ดังแสดงตัวอย่างของตารางกริดในรูปที่ 3 และตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลออกของมวลสุทธิ (Net Mass Outflow) ตามสมการที่ 3 เมื่อกำหนดให้  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล  $u$  และ  $v$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  ตามลำดับ และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 3 ตารางกริดไฟไนต์โวลุ่ม

$$(puA)_e - (puA)_w + (pvA)_n - (pvA)_s = 0 \quad (3)$$

3.2.3 ลำดับสุดท้ายในขั้นตอนการคำนวณจะเป็นขั้นตอนการแก้ระบบสมการพีชคณิต (Algebraic Equation System) ของโปรแกรม CFD ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้จนกระทั่งได้ผลลัพธ์

3.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-Processor) เป็นขั้นตอนที่ได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อให้ผู้ใช้งาน เช่น วิศวกร หรือนักวิจัย สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ต้องการศึกษา โดยขั้นตอนนี้จะถูกแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟิกต่าง ๆ ซึ่งถูกรวบรวมไว้ในโปรแกรมสำเร็จรูปทาง CFD ดังนี้

3.3.1 การแสดงเวกเตอร์ (Vector Plot)

3.3.2 การแสดงคอนทัวร์ระดับสี (Contour Color)

3.3.3 การแสดงภาพพลอตพื้นผิวสองและสามมิติ (Surface Plot)

3.3.4 เส้นทางอนุภาค (Particle Path)

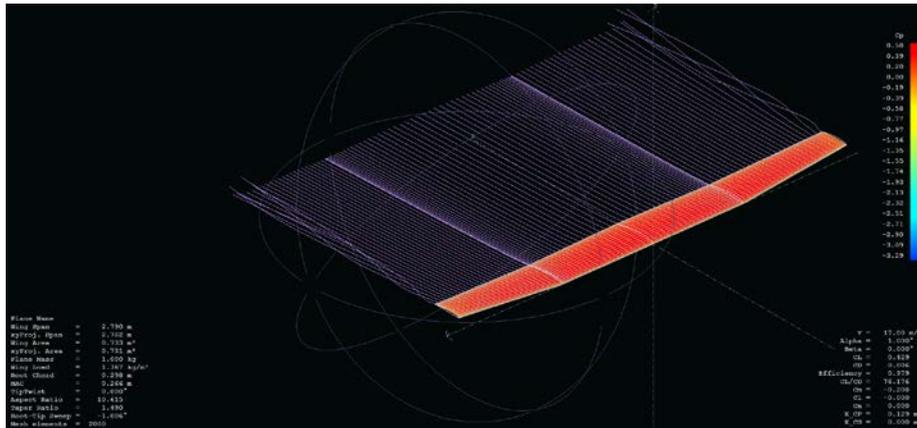
จากขั้นตอนทั้งหมดสรุปได้ว่าการคำนวณพลศาสตร์ของไหลประกอบด้วย ขั้นตอนก่อนการคำนวณเพื่อรับชุดข้อมูลของเงื่อนไขของการคำนวณ เช่น การกำหนดรูปทรง การสร้างตารางกริด เป็นต้น โดยเมื่อโปรแกรม CFD ได้รับชุดข้อมูลดังกล่าว โปรแกรมจะทำการคำนวณหาผลลัพธ์ในขั้นตอนการคำนวณ และหลังจากที่ได้รับผลการคำนวณเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนสุดท้าย คือ ขั้นตอนหลังการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ และสามารถแสดงได้หลายรูปแบบ เช่น การแสดงเวกเตอร์ หรือการแสดงคอนทัวร์ระดับสี เป็นต้น

## 4. การดำเนินการวิจัย

### 4.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ

#### 4.1.1 การกำหนดรูปทรงของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้ใช้รูปทรงของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กจากขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการตามที่ได้ออกมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้ทำการเลือกรูปแบบของแพนอากาศโดยใช้โปรแกรม XFRL5 ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อหารูปแบบแพนอากาศที่มีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีการวอร์เทคแลททิซ โดยเมื่อพิจารณาตามขอบเขตการกำหนดความต้องการและรูปแบบภารกิจของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก พบว่าแพนอากาศรูปแบบ sd7032 มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่น้อยที่สุดในช่วงของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ต้องการตามความต้องการที่กำหนดไว้ ประกอบกับแพนอากาศรูปแบบ sd7032 มีความซับซ้อนในการขึ้นรูปแพนอากาศน้อยกว่าแพนอากาศแบบอื่น ดังนั้น จึงใช้แพนอากาศรูปแบบดังกล่าวสำหรับดำเนินการสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก และทำให้ได้ค่าคุณลักษณะของปีกอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 1



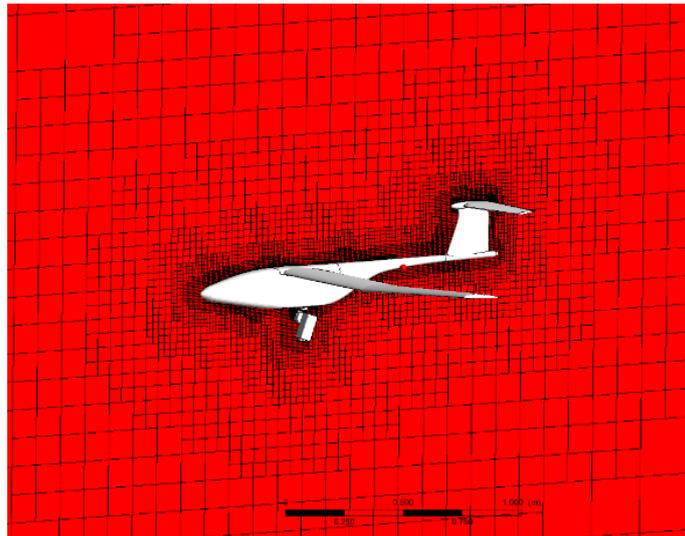
รูปที่ 4 การเลือกรูปแบบของแพนอากาศโดยใช้โปรแกรม XFLR5 ในขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการ

ตารางที่ 1 ค่าคุณลักษณะของปีกอากาศยาน ไร้คนขับขนาดเล็ก

Aircraft Components	TEagle Eyes X-II
Wing Section	sd7032
Wing Span (m)	2.840
Mean Aerodynamic Chord (m)	0.266
Wing Area (m <sup>2</sup> )	0.766
Wing Load (kg/m <sup>2</sup> )	1.367
Root Chord (m)	0.298
Tip Twist (degree)	0.000
Aspect Ratio	10.615
Taper Ratio	1.490
Root-Tip Sweep (degree)	-1.006

4.1.2 การสร้างรูปแบบตาข่ายรอบอากาศยาน (Grid Generation)

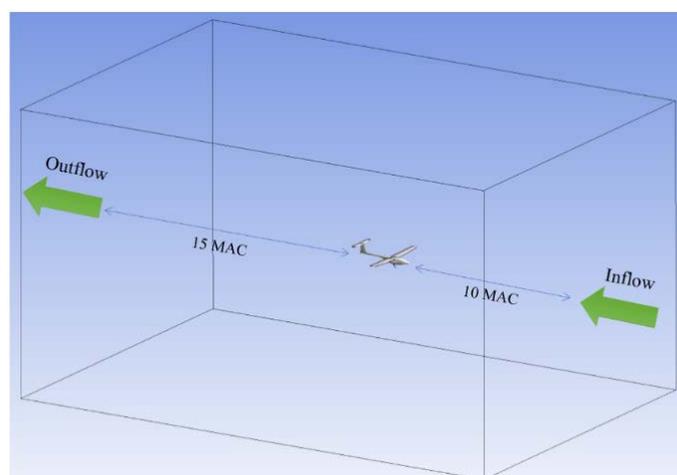
การสร้างรูปแบบตาข่ายรอบอากาศยานเพื่อแก้สมการเชิงตัวเลขของสมการ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation: RANS) โดยตารางรูปแบบตาข่ายที่เป็นระเบียบ (Structured Mesh) รอบตัวอากาศยานโดยใช้โปรแกรม Ansys Meshing ซึ่งขั้นตอนนี้จะเริ่มต้นจากการตรวจสอบรูปแบบของ CAD ของอากาศยานไร้คนขับที่สามารถทำการสร้างตารางรูปแบบตาข่ายได้หรือที่เรียกว่า Geometry Cleanup และทำการสร้างรูปแบบตาข่ายรอบอากาศยาน ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปนี้ จะเห็นว่า รายละเอียดความหนาแน่นของตารางรูปแบบตาข่ายจะอยู่บริเวณรอบลำตัวของอากาศยานและบริเวณใกล้ชั้นซิดผิว ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถคำนวณรายละเอียดของกระแสอากาศไหลวนที่ท้ายลำตัวของอากาศยาน และสามารถคำนวณรายละเอียดของชั้นซิดผิวแบบเทอร์บูเลนซ์ได้ โดยเฉพาะรายละเอียดของ Laminar Sub Layer ที่อยู่ในชั้นซิดผิว ซึ่งมีความยากและซับซ้อนที่จะคำนวณได้โดยละเอียด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ค่าความถูกต้องของชั้นซิดผิวมีความแม่นยำมากขึ้น จึงได้เลือกใช้เทอร์บูเลนซ์โมเดลแบบ k- $\omega$  (CFD SST) โดยค่า  $y^+$  ที่คำนวณได้จะต้องถูกกำหนดให้มีค่าตามเงื่อนไข  $y^+ < 2$  ดังนั้น ความห่างของรูปแบบตาข่ายหรือเซลล์ในชั้นแรกที่ติดกับผิวอากาศยานจะต้องมีค่าประมาณ  $10^{-5}$  มิลลิเมตร และสำหรับชั้นต่อไปของเซลล์จะมีอัตราส่วนการยืดออก (Stretching Ratio) ประมาณ 1.25



รูปที่ 5 การสร้างรูปแบบตาข่ายบนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก

#### 4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการไหล (Boundary Conditions)

การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการไหลอย่างเหมาะสมเป็นการกำหนดขอบเขตการไหลเข้าของอากาศ (Inflow) และขอบเขตการไหลออกของอากาศ (Outflow) โดยระยะห่างของระยะจากขอบเขตการไหลเข้าของอากาศถึงส่วนหน้าของอากาศยานมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของความยาวคอर्डเฉลี่ย และระยะห่างจากท้ายอากาศยานถึงขอบเขตการไหลออกของอากาศมีค่าเท่ากับ 15 เท่าของความยาวคอर्डเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 6 และกำหนดค่าตัวแปรของกระแสอากาศอ้างอิงตามค่ามาตรฐานของความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่ระดับความสูงของการบินที่ความสูงในระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ระดับน้ำทะเลจนถึงระดับความสูงที่ต้องการ คือ 300 – 500 เมตร ความเร็วในการบินเดินทาง คือ 15 เมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถคำนวณเป็นเลขเรย์โนลด์์ประมาณ 500,000 – 800,000 ค่า Turbulent Intensity และค่าอัตราส่วนความหนืด (Viscosity Ratio) ที่ขอบเขตการไหลเข้าของอากาศตั้งค่าเป็น 0.1% และ 10 ตามลำดับ และที่ผิวของอากาศยานได้ตั้งค่าเป็นแบบความเร็วอากาศเป็นศูนย์ (No-Slip Condition) และอุณหภูมิผิวคงที่ (Isothermal) เท่ากับ 288 เคลวิน



รูปที่ 6 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของโปรแกรม CFD

#### 4.2 ขั้นตอนการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ได้รับการคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในรูปแบบของวิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method) โดยการใช้โปรแกรม Ansys Fluent ซึ่งโปรแกรมนี้ใช้หลักการในการแก้สมการจำลองการไหลของอากาศแบบเทอร์บูเลนต์ (RANS) และการไหลในย่านความเร็วต่ำกว่าเสียงแบบไร้การอัดตัว (Subsonic Incompressible Flow) บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และการเลือกใช้เทอร์บูเลนต์โมเดลในการแก้ระบบสมการ ดังนี้

4.2.1 กฎการอนุรักษ์มวล กล่าวว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลของอนุภาคของไหลมีค่าเท่ากับอัตราการไหลสุทธิของมวลในอนุภาคของไหล ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ดังแสดงในสมการที่ 4

$$\frac{\partial(\bar{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

4.2.2 กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม มีพื้นฐานมาจากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law of Motion) กล่าวว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำบนอนุภาคของไหล ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการโมเมนตัม (Momentum Equation) ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j] \quad (5)$$

โดย  $\bar{\rho}$  คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของของไหล  $\bar{u}_i$  และ  $\bar{u}_j$  คือ ค่าความเร็วเฉลี่ย (Mean Velocity) และความเร็วแบบไร้ระเบียบ (Fluctuating Velocity) ตามลำดับ ในแต่ละระนาบ คือ แกน (x y z) และ  $\bar{\tau}_{ij}$  คือ ความเค้นเฉือน ซึ่งจากระบบสมการนี้ จะเห็นได้ว่าสมการไม่เป็นรูปแบบเชิงเส้น (Non-linear Equations) กล่าวคือมีความซับซ้อนมากและไม่สามารถแก้สมการในรูปแบบของ Exact Solution ได้ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องแก้สมการในระบบเชิงตัวเลขตามที่กล่าวไว้ในเบื้องต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ทั้งสามมิติ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยก สัมประสิทธิ์แรงดัน และสัมประสิทธิ์โมเมนต์กัมมขรอบจุดศูนย์ถ่วงของอากาศยานในมุมปะทะต่าง ๆ

4.2.3 การเลือกใช้เทอร์บูเลนต์โมเดลในการคำนวณจะต้องมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับรูปแบบการไหลของกระแสอากาศสำหรับการแก้สมการทั้งระบบ ทั้งนี้ เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการคำนวณค่าทางอากาศพลศาสตร์ โดยเฉพาะในชั้นขีดผิวแบบเทอร์บูเลนต์ (Turbulent Boundary Layer) ซึ่งมีความซับซ้อนมาก ซึ่งรูปแบบการไหลวนของอากาศที่เกิดขึ้นบนอากาศยาน (Circulation Flow) ที่ถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับทางเลือกชนิดของรูปแบบของเทอร์บูเลนต์ที่ถูกต้องด้วยเช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทอร์บูเลนต์โมเดลแบบ k- $\omega$  (CFD SST) เพื่อแก้ระบบสมการตามสมการที่ 4 และ 5 ซึ่งเหตุผลในการเลือกใช้เทอร์บูเลนต์โมเดลดังกล่าวประกอบด้วยเหตุผลสองประการ ดังนี้

4.2.3.1 เทอร์บูเลนต์โมเดลแบบ k- $\omega$  (CFD SST) ได้รับการยอมรับจากองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration) หรือ NASA ว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูง และสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายรูปแบบของการไหล โดยเฉพาะการไหลที่มีความดันย้อนกลับสูง (Strong Adverse Pressure Gradient) เกิดการไหลแยกตัวของอากาศ (Flow Separation) รวมทั้งการไหลในชั้นขีดผิว (Boundary Layer) เป็นต้น

4.2.3.2 เทอร์บูเลนต์โมเดลแบบ k- $\omega$  (CFD SST) เป็นเทอร์บูเลนต์โมเดลแบบผสม ซึ่งได้รับการออกแบบจากการนำเอาข้อดีระหว่างเทอร์บูเลนต์โมเดลแบบ standard k- $\omega$  และเทอร์บูเลนต์โมเดลแบบตระกูล k- $\epsilon$  กล่าวคือ เทอร์บูเลนต์

โมเดลแบบ standard k- $\omega$  สามารถแก้ปัญหาการไหลได้ดีในชั้นขีดผิว และเทอร์บูเลนซ์โมเดลแบบตระกูล k- $\epsilon$  สามารถแก้ปัญหาได้ดีในชั้นการไหลนอกชั้นขีดผิว จึงทำให้เทอร์บูเลนซ์โมเดลชนิดนี้ได้รับการยอมรับและใช้งานอย่างกว้างขวาง

#### 4.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ

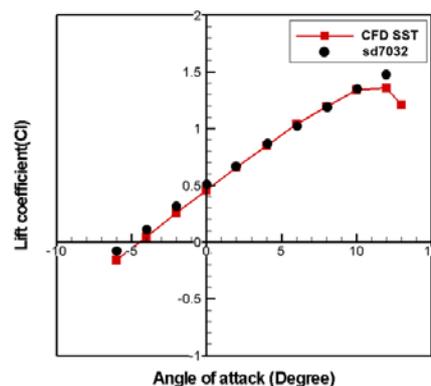
สำหรับในขั้นตอนนี้ จะเป็นการนำผลลัพธ์ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ ได้แก่ สัมประสิทธิ์แรงยก สัมประสิทธิ์แรงต้าน และสัมประสิทธิ์โมเมนต์ก้มรอบจุดศูนย์กลางของอากาศยาน มาแสดงผลในรูปแบบของกราฟหรือกราฟิกต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้การวิเคราะห์ปัญหาที่ต้องการศึกษา

### 5. ผลการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณและวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยาน ไร้คนขับขนาดเล็ก (TEagle Eyes X-II) ด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล CFD ภายหลังจากที่ได้วิเคราะห์ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศโดยใช้วิธีวอร์เทคแลททิซในขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการ เพื่อยืนยันความสอดคล้องและความถูกต้องของสมรรถนะอากาศยานในด้านต่าง ๆ โดยการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD ทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยาน ไร้คนขับขนาดเล็กค่าต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำมาดำเนินการวิเคราะห์ตามทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ได้ [8] ดังต่อไปนี้

#### 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient)

รูปที่ 7 แสดงผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่คำนวณได้จากโปรแกรม CFD ซึ่งจากรูปนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่คำนวณได้มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศโดยใช้วิธีวอร์เทคแลททิซที่ได้เลือกใช้แพนอากาศแบบ sd7032 โดยมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ตลอดทุกมุมปะทะที่ทำการศึกษา โดยที่มุมปะทะ 0 องศา สัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าประมาณ 0.45 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด เกิดขึ้นที่มุมปะทะ 12 องศา โดยมีค่าประมาณ 1.36 ซึ่งเป็นมุมปะทะที่ทำให้ปีกเริ่มมีอาการสั่นเนื่องจากการแยกตัวของกระแสอากาศบนผิวปีก

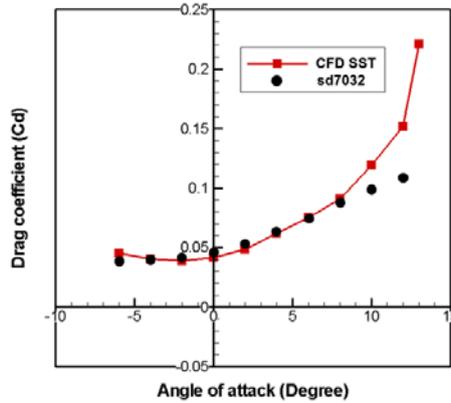


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะ

#### 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient)

รูปที่ 8 แสดงผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่คำนวณได้จากโปรแกรม CFD ซึ่งจากรูปนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่คำนวณได้มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศโดยใช้วิธีวอร์เทคแลททิซที่ได้แก้ไขข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากความหนืดของกระแสอากาศเรียบร้อยแล้ว โดยที่มุมปะทะสูงค่าผลลัพธ์ที่ได้จะมีความแตกต่างกันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกำหนดการไหลทั้งระบบเป็นแบบเทอร์บูเลนซ์ของโปรแกรม CFD โดยในความเป็นจริงแล้วการไหลของกระแสอากาศผ่านอากาศยาน

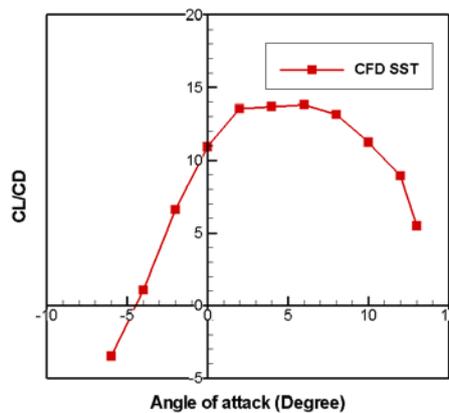
ไว้คนขับจะมีทั้งการไหลที่เป็นทั้งแบบลามินาร์ในช่วงต้นของลำตัวและส่วนชายหน้าของปีกแล้วจึงเปลี่ยนเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ และจากรูปนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมปะทะอย่างชัดเจน คุณลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำสุดเกิดที่มุมปะทะ -2 องศา โดยที่จุดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านประมาณ 0.0405 และสำหรับที่มุมปะทะ 0 องศา อากาศยานจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.0415



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะ

5.3 ค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Lift to Drag Ratio, L/D)

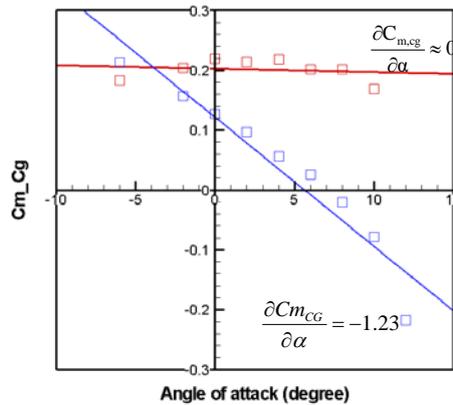
เมื่อได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านจากหัวข้อที่กล่าวมาในข้างต้น จะทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน (L/D) ซึ่งเป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของอากาศยาน เช่น พิสัยบิน ระยะเวลาในการบินเดินทาง เป็นต้น โดยเมื่อสังเกตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะ ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าสูงสุดเท่ากับ 13.83 โดยเกิดขึ้นที่มุมปะทะ 6 องศา ซึ่งค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านจะเริ่มมีค่ามากตั้งแต่ช่วงมุมปะทะ -2 ถึง 6 องศา ซึ่งเป็นมุมปะทะที่ใช้ทำการบินจริง



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะ

5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัว (Longitudinal Stability)

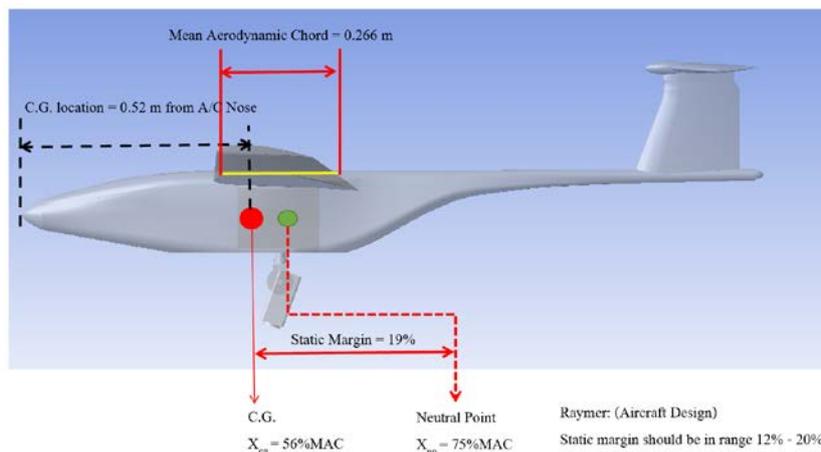
การวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัว สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์โมเมนต์ก้มเงรอบจุดศูนย์กลางของอากาศยาน ( $C_{m,cg}$ ) เทียบกับมุมปะทะ โดยอากาศยานจะมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวจะต้องอยู่ในเงื่อนไข  $\partial C_{m,cg}/\partial \alpha < 0$  และเมื่อพิจารณาค่าอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์โมเมนต์ก้มเงรอบจุดศูนย์กลางของอากาศยานไว้คนข้างขนาดเล็กน้อยว่ามีค่าติดลบเท่ากับ  $-1.23$  ต่อองศา ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นว่าอากาศยานมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวและเป็นไปตามเงื่อนไข



รูปที่ 10 กราฟแสดงผลลัพธ์ของสัมประสิทธิ์โมเมนต์ก้มเง

5.5 การวิเคราะห์ค่า Static Margin ของอากาศยาน

การวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวของอากาศยาน สามารถกระทำได้อีกวิธีหนึ่ง คือ การวิเคราะห์ค่า Static Margin ของอากาศยาน ซึ่งสามารถคำนวณได้เมื่อทราบตำแหน่งจุดศูนย์กลางของอากาศยาน โดยสามารถระบุได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของชวลเฉลี่ยทางอากาศพลศาสตร์ (Mean Aerodynamics Chord) หรือ %MAC และทราบตำแหน่งของ Neutral Point และระบุได้ในหน่วย %MAC เช่นกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก โปรแกรม CFD และสามารถคำนวณค่า Static Margin และทำการวิเคราะห์ตามเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวของอากาศยานได้ กล่าวคือ ตำแหน่งของ Neutral Point ต้องอยู่ด้านหลังของจุดศูนย์กลาง และค่าของ Static Margin ควรอยู่ในช่วง 12 – 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอากาศยานให้มีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัว ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 11 โดยค่า Static Margin ของอากาศยานไว้คนข้างขนาดเล็กน้อยที่คำนวณได้จาก โปรแกรม CFD มีค่าเท่ากับ 19 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 11 การวิเคราะห์ค่า Static Margin ของอากาศยาน

## 6. สรุป

จากการคำนวณหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กในช่วงมุมปะทะที่ต้องการศึกษา โดยการใช้โปรแกรม CFD และทำการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ที่ได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน ซึ่งจากข้อมูลผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก สามารถยืนยันขีดความสามารถในการปฏิบัติการกิจของอากาศยานไร้คนขับที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการ และสามารถที่จะดำเนินการสร้างและทำการบินทดสอบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กต้นแบบได้ต่อไป โดยผลการคำนวณหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กตามที่คำนวณมาข้างต้นสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

- 6.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด คือ 1.36 ที่มุมปะทะ 12 องศา
- 6.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่มุมปะทะเท่ากับศูนย์องศา คือ 0.45
- 6.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำสุด คือ 0.0405 ที่มุมปะทะ -2 องศา
- 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มุมปะทะเท่ากับศูนย์องศา คือ 0.0415
- 6.5 ค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงยกต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงสุด คือ 13.83 ที่มุมปะทะ 6 องศา
- 6.6 ค่าอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์โมเมนต์ก้มแยกรอบจุดศูนย์ถ่วงของอากาศยาน คือ -1.23 ต่อองศา ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวของอากาศยาน
- 6.7 ค่า Static Margin ของอากาศยานเท่ากับ 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวของอากาศยาน

## 7. ข้อเสนอแนะ

องค์ความรู้ที่ได้รับจากการวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ควบคู่กับการวิจัยในส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะด้านของอากาศยานไร้คนขับและสามารถต่อยอดได้เพิ่มเติม เช่น การออกแบบและพัฒนาระบบการวัดโครงสร้างอากาศยาน การพัฒนาและทดสอบโครงสร้างปีก การพัฒนาระบบควบคุมการบินอัตโนมัติและระบบอุปกรณ์การภาพ เป็นต้น ตามเทคโนโลยีของอากาศยานไร้คนขับที่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้ เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการทางยุทธการของกองทัพอากาศ และสามารถนำไปใช้ปฏิบัติการกิจในพื้นที่เป้าหมายได้จริง นอกจากนี้การวิจัยในครั้งนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ได้เพิ่มเติมโดยการใช้โปรแกรม CFD แบบ Transition Model ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ในย่านเลขเรย์โนลด์ต่ำที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยเฉพาะความถูกต้องในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาการวิเคราะห์หาความมีเสถียรภาพด้านข้างลำตัว (Directional Stability Analysis) และการศึกษาผลกระทบของการติดตั้ง Winglet ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะอากาศยาน รวมไปถึงการพัฒนาระบบการออกแบบลำตัวเพื่อลดแรงต้านและให้อากาศยานมีสมรรถนะที่สูงขึ้น

## 8. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยพัฒนา และปรับปรุงระบบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก (TEagle Eyes X-II) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อปรับปรุงพัฒนาสมรรถนะของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก และสร้างอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กต้นแบบที่สามารถทำการบินและปฏิบัติการกิจได้จริง จากองค์ความรู้ในด้านต่าง ๆ ซึ่งนำมาบูรณาการและพัฒนาต่อยอดเพื่อให้อากาศยานไร้คนขับต้นแบบสามารถทำการบินได้อย่างปลอดภัย และตอบสนองต่อภารกิจของกองทัพอากาศ ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้สามารถดำเนินการสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้น ต้องขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาระดับสูงของกองทัพอากาศ

ที่เห็นความสำคัญของการดำเนินการวิจัย รวมถึงอาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือและให้การสนับสนุนในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

#### 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองทัพอากาศ. (2563). **ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 - 2580)**. ฉบับปรับปรุง ปี พ.ศ.2563.
- [2] Jiajan, W., Tongsawang, K. and Sukuprakan, N. (2017). Aerodynamic Study and Analysis of Airfoils and Wings of Tailless Mini-UAV. *NKRAFA Journal of Science and Technology*, 13: 45-56.
- [3] Jiajan, W., Tongsawang, K. and Keawchay, K. (2018). Aerodynamic Investigations of Tailless Mini UAV by Using Subsonic Wind Tunnel. *NKRAFA Journal of Science and Technology*, 14: 77-85.
- [4] Coleman, H.W. and Steele, W.G. (1989). **Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers**. New York: John Wiley & Sons.
- [5] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (2007). **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Second Edition. London: Pearson Education Limited.
- [6] Jamshed, S. (2015). **Using HPC for Computational Fluid Dynamics, A Guide to High Performance Computing for CFD Engineers**. Oxford: Elsevier Inc.
- [7] Islam, S., Samsuzzoha, Ara, S., Islam, N. (2013). Unsteady Solutions of Thermal Boundary Layer Equations by using Finite Difference Method. *Annals of Pure and Applied Mathematics*. 3(2): 142-154.
- [8] Bertin, J.J. and Cummings, R.M. (2014). **Aerodynamics for Engineers**. Sixth Edition. London: Pearson Education Limited.

**การคำนวณชั้นซิดผิวแบบลามินาร์บนผิวแพนอากาศ**  
**Laminar Boundary Layer Calculation over Airfoil Surface**

<sup>1\*</sup>สุภาพ เพ็งมาก และ <sup>2#</sup>ไชยบูรณ์ สุขประเสริฐ

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอากาศยาน กองวิศวกรรมอากาศยานและการบิน  
 กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช  
 ²กรมช่างอากาศ

<sup>1\*</sup>Supap Perngmark and <sup>2#</sup>Chaiyaboon Sookprasert

<sup>1</sup>Aeronautical Engineering Department, Aeronautical Engineering and Aviation Technology Division,  
 Faculty of Academic, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

<sup>2</sup>Directorate of Aeronautical Engineering

\*Supap\_Perng@rtaf.mi.th, #Laplace1926@gmail.com

Received : March, 31 2021

Revised : May, 03 2021

Accepted : June, 22 2021

**บทคัดย่อ**

การประเมินคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศกระทำได้โดยในขั้นต้นจะใช้วิธีตัดขายแบบสองมิติแต่ทว่าผลลัพธ์ที่ได้ยังมีค่าความผิดพลาดอยู่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลที่ได้ในย่านมุมปะทะค่าสูง ทั้งนี้มีสาเหตุเพราะวิธีตัดขายแบบสองมิติจะพิจารณาให้การไหลเป็นแบบไร้ความหนืด ซึ่งต่างกับการไหลแท้จริงที่เป็นแบบหนืด ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นการประเมินคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศจึงต้องคำนึงถึงผลจากความหนืดด้วย วิธี ๆ หนึ่งที่ใช้กับงานนี้ได้คือการประยุกต์ใช้สมการชั้นซิดผิว ในบทความนี้จะประยุกต์ใช้สมการชั้นซิดผิวช่วยประมาณค่าตัวแปรภายในชั้นซิดผิวแบบลามินาร์ซึ่งเป็นชั้นซิดผิวชั้นแรกสุดของการไหลชนิดไร้การอัดตัวบนผิวแพนอากาศ ที่เริ่มต้นจากจุดขงักงันไปจนถึงจุดเปลี่ยนผ่าน ในอันดับแรก การหาผลเฉลยของสมการชั้นซิดผิวจะใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องชนิดที่ขึ้นอยู่กับสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่สอง สร้างระบบสมการกึ่งเชิงเส้นเพื่อหาค่าโปรไฟล์ความเร็วภายในชั้นซิดผิวเสร็จแล้วจึงหาค่าตัวแปรค่าต่างๆ เช่น ความหนา ระยะกระจัด ค่าปัจจัยรูปร่าง ความหนาโมเมนต์ และสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ผิวโดยกำหนดให้การไหลมีเลขเรย์โนลด์ต่ำ ไหลผ่านแพนอากาศ NACA 0012 และใช้การกระจายความเร็วที่ขอบชั้นซิดผิวที่ได้จากวิธีตัดขายสองมิติ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับค่าๆเดียวกันที่ได้จากเอกสารอ้างอิงพบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีความแตกต่างกันไม่มากนัก

**คำสำคัญ:** ชั้นซิดผิวแบบลามินาร์, วิธีตัดขายสองมิติ, วิธีผลต่างสืบเนื่อง, การไหลมีเลขเรย์โนลด์ต่ำ

### Abstract

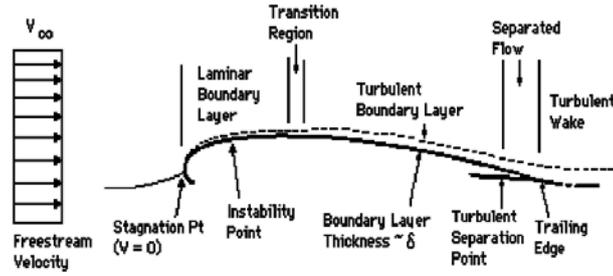
In the initial stage, the 2 dimensional panel method will be used to determine aerodynamic characteristics of an airfoil. But its results still have a lot of errors, especially the results in high angle of attack region. The significant cause of these errors is that the 2 dimensional panel method considers its incoming flow is inviscid which is different from the real viscous flow. Therefore, in order to obtain better results, the determination of aerodynamic characteristics of an airfoil must take the effects of viscosity into attention. One method can deal with this is to apply the boundary-layer equations. In this research the boundary-layer equations will be used to approximate variables within laminar boundary layer which is the first boundary layer of inviscid flow over an airfoil starting from airfoil stagnation point till its transition point. At first, solutions of boundary-layer equations are obtained by using finite different method based on second order partial differential equations to construct system of quasi-linear equations and to solve for boundary-layer velocity profiles. Then, boundary-layer variables such as displacement thickness, momentum thickness, form factor, and skin-friction coefficient will be determined with the following assumptions: the flow has low Reynolds number passing over NACA 0012 airfoil and using the velocity distributions at the edge of its boundary layer obtained from the 2 dimensional panel method. The obtained results will be compared with the results of the same types obtained from the references and find that they are consistent with each other and have low differences.

**Keywords:** Laminar boundary layer, 2D panel method, Low Reynolds-number flow

### 1. บทนำ

สถานการณ์หรือปัญหาทางอากาศพลศาสตร์ใด ๆ จะได้รับการเขียนขึ้นเป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์แต่การแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสิ่งที่ทำได้ยากมากและโดยปกติแล้วจะไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้เลยจึงจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขเข้าช่วย แต่กระนั้นสิ่งนี้ก็ยังเป็นเรื่องที่ยุ่งยากอยู่มากเช่นเคย อย่างไรก็ตามวิธีที่ง่ายกว่าคือการใช้สมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับแต่ละปัญหาทำให้เราสามารถแปลงสมการนาเวียร์-สโตกส์ให้กลายเป็นสมการที่ง่ายขึ้นได้ ในบทความนี้สมการที่แปลงแล้วคือสมการชั้นซิกซ์ผิว [1]

พิจารณาการไหลผ่านแพนอากาศพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วชั้นซิกซ์ผิวเริ่มเติบโตจากจุดขังกันและหนาขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะทางบนผิวแพนอากาศ ในช่วงต้นที่บริเวณด้านหน้าของแพนอากาศ ชั้นซิกซ์ผิวเป็นแบบลามินาร์และเป็นเช่นนี้ไปจนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนผ่าน บริเวณการเปลี่ยนผ่านจะมีระยะทางไม่มาก หลังจากนั้นชั้นซิกซ์ผิวจะกลายเป็นแบบเทอร์บูเลนต์และดำเนินต่อไปจนถึงขอบหลังของแพนอากาศ ต่อจากนั้นจะเข้าสู่ย่านการไหลแบบอลวน(wake flow region)



รูปที่ 1 การไหลผ่านผิวบนของแพนอากาศ

(ดูรูปที่ 1) ในบทความนี้จะพิจารณาแต่เฉพาะชั้นซิดผิวเป็นแบบลามินาร์และทำนายจุดเริ่มต้นการเปลี่ยนผ่านแบบธรรมชาติเพียงเท่านั้น นอกจากนี้เรายังสามารถกล่าวได้ว่าการวิเคราะห์การไหลในชั้นซิดผิวแบบลามินาร์เป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการก่อนเพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์การไหลในชั้นซิดผิวแบบเทอร์บูลენტและในย่านการไหลแบบอลวนต่อไปได้

เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าแรงยกและแรงต้านของแพนอากาศที่ซึ่งการไหลบนผิวเป็นแบบลามินาร์โดยตลอดหรือเป็นบริเวณกว้างๆจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงยกและแรงต้านของแพนอากาศที่ซึ่งการไหลบนผิวเป็นแบบลามินาร์ที่เป็นบริเวณที่แคบกว่า ด้วยเหตุนี้การค้นหาย่านหรือบริเวณการไหลแบบลามินาร์บนผิวแพนอากาศที่วัดจากจุดซังกัน ไปจนถึงจุดเปลี่ยนผ่านจึงมีทั้งความสำคัญและเป็นประโยชน์สำหรับการเปรียบเทียบค่าทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศ

ตัวอย่างของแพนอากาศที่มีการไหลบนผิวแบบลามินาร์และอยู่ในการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์ต่ำมีดังเช่นแพนอากาศของอากาศยานไร้คนบินขนาดเล็กและแพนอากาศของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เป็นต้น ด้วยสิ่งนี้ผู้วิจัยจึงกล่าวได้ว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์และใช้เป็นรากฐานต่อการวิเคราะห์และออกแบบแพนอากาศของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กและแพนอากาศของกังหันลมผลิตไฟฟ้า(wind turbine) รวมทั้งแพนอากาศของใบพัด(propeller) ได้ต่อไป

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 สมการพื้นฐาน

สำหรับการไหลสองมิติแบบไร้การอัดตัวนั้น ความเร็วในทิศทาง  $x$  และ  $y$  (คือ  $u$  และ  $v$  ตามลำดับ) ต้องทำให้สมการความต่อเนื่องเป็นจริงทั่วทั้งสนามการไหล [1,2,4] นั่นคือ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, u = u(x, y), v = v(x, y) \tag{1}$$

ภายในชั้นซิดผิวที่อยู่ใกล้ซิดกับพื้นผิวนั้นสมการโมเมนตัมในทิศทางตามพื้นผิวคือ

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

และสำหรับการไหลแบบลามินาร์จะได้ว่า

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{2}$$

โดยที่  $y$  คือระยะทางที่วัดจากพื้นผิว  $x$  คือระยะทางที่วัดตามความยาวผิว  $\mu$  คือ ความหนืดพลวัต และ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ส่วนสมการ โมเมนตัมในทิศตั้งฉากกับผิว ได้แสดงให้เห็นว่า ความดันเกือบเป็นค่าคงที่ตลอดชั้นขีดผิว สิ่งนี้ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็วที่อยู่นอกชั้นขีดผิวได้ด้วยสมการเบอร์นูลลี นั่นคือ

$$p + \frac{1}{2} \rho U_e^2 = \text{const.} \Rightarrow \frac{dp}{dx} = -\rho U_e \frac{dU_e}{dx} \quad (3)$$

แทน  $\frac{dp}{dx}$  ลงในสมการ(2) ได้ว่า

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \rho U_e \frac{dU_e}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4)$$

เนื่องจากชั้นขีดผิวจะบางมากเมื่อเทียบกับในระดับของการไหลไร้ความหนืดที่อยู่ภายนอก และเนื่องจากการไหลภายในชั้นขีดผิวเป็นการไหลที่เกือบจะขนานกับพื้นผิว ดังนั้น  $U_e(x)$  จึงเป็นค่าที่ได้มาจากผลลัพธ์ของการไหลไร้ความหนืดที่ไหลอยู่บนผิวรูปร่าง สิ่งนี้แสดงว่าก่อนการวิเคราะห์  $U_e(x)$  เป็นค่าที่ทราบก่อนแล้วและทำให้ได้เงื่อนไขที่ขอบชั้นขีดผิวว่า

$$\lim_{y \rightarrow \infty} u(x, y) = U_e(x) \quad (5)$$

นอกจากนั้น สมการ(3) และ (4) ยังต้องทำให้เงื่อนไขขอบเขตชนิดไม่ลื่นไถล (Non-Slip Boundary Condition) เป็นจริง กล่าวคือ

$$u(x, y = 0) = v(x, y = 0) = 0 \quad (6)$$

รวมทั้งยังต้องทราบเงื่อนไขเริ่มต้นอีกด้วย นั่นคือ

$$u(x = x_0, y) = u_0(y) \quad (7)$$

## 2.2 สมการชั้นขีดผิวแบบลามินาร์สำหรับกรณีเฉื่อย ความดันใด ๆ

สมการนี้จะใช้ได้สำหรับกรณีที่มีการกระจายความเร็ว  $U_e(x)$  ไม่เป็นไปตามกฎการยกกำลัง [1] และเป็นสมการที่ได้รับการแปลงโดยมีตัวแปรการแปลงคือ

$$\xi = x, \eta = y / \delta(x), u = U_e \frac{\partial f(\xi, \eta)}{\partial \eta} \quad (8)$$

ใช้ตัวแปรการแปลงกับสมการความต่อเนื่อง ได้ว่า

$$\begin{aligned} \delta \dot{U}_e \frac{\partial f}{\partial \eta} + \delta U_e \frac{\partial^2 f}{\partial \xi \partial \eta} - U_e \dot{\delta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \eta \frac{\partial f}{\partial \eta} - f \right) + \frac{\partial v}{\partial \eta} &= 0 \\ \Rightarrow v = U_e \dot{\delta} \left( \eta \frac{\partial f}{\partial \eta} - f \right) - \delta \dot{U}_e f - \delta U_e \frac{\partial f}{\partial \xi} & \quad (9) \end{aligned}$$

โดยที่  $f = 0$  ที่  $\eta = 0$  แล้วแทน  $u$  และ  $v$  จากสมการ(8) และ(9) ตามลำดับลงในสมการโมเมนตัม ทำให้ได้ว่า

$$f''' = \frac{\rho U_e \delta}{\mu} \left[ \begin{array}{l} \frac{\delta U_e}{\dot{U}_e} (f'^2 - 1 - f \times f'') \\ - \dot{\delta} \times f'' + \delta \left( \begin{array}{l} f' \frac{\partial f'}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi} f'' \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (10)$$

ให้

$$u_n = \frac{\partial f}{\partial \xi} \quad (11)$$

แล้วแทนลงในสมการ(10) จะได้ว่า

$$u_n'' = \frac{\rho U_e \delta}{\mu} \left[ \begin{array}{l} \frac{\delta U_e}{\dot{U}_e} (u_n^2 - 1 - f u_n') - \dot{\delta} f u_n' \\ + \delta \left( u_n \frac{\partial u_n}{\partial \xi} - \frac{\partial f}{\partial \xi} u_n' \right) \end{array} \right] \quad (12)$$

เมื่อนิยามให้

$$\delta = \sqrt{\frac{\xi \mu}{\rho U_e}} \Rightarrow \dot{\delta} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\rho U_e \xi}} \times \left( 1 - \frac{\xi \dot{U}_e}{U_e} \right) \quad (13)$$

จะทำให้สมการ(12) กลายเป็น

$$u_n'' = m(u_n^2 - 1) - \frac{m+1}{2} f u_n' + \xi \left( u_n \frac{\partial u_n}{\partial \xi} - \frac{\partial f}{\partial \xi} u_n' \right) \quad (14)$$

โดยที่

$$m = m(\xi) = \frac{\xi \dot{U}_e}{U_e} \quad (15)$$

รวมทั้งทำให้สมการเงื่อนไขเริ่มต้นและสมการเงื่อนไขขอบเขตกลายเป็น

$$\begin{aligned} f = u_n = 0 & \text{ ที่ } \eta = 0 \\ u_n \rightarrow 1 & \text{ เมื่อ } \eta \rightarrow \infty \\ u_n = u_{n0} & \text{ ที่ } \xi = 0 \end{aligned}$$

การประมาณค่า  $\frac{\partial u_n}{\partial \xi}$  ในสมการ(14) กระทำโดยใช้การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ของ  $u_{ni}, i = 1, 2$  รอบ  $u_n$  ซึ่งแสดงว่าค่า  $\xi_1, \xi_2, u_{n1} = u_n(\xi_1), u_{n2} = u_n(\xi_2)$  เป็นค่าที่ทราบแล้วโดยอยู่ก่อนหน้า  $\xi$  และ  $u_n(\xi)$  การกระจายที่ได้เป็นดังนี้

$$u_{n1} = u_n + (\xi_1 - \xi) \frac{\partial u_n}{\partial \xi} + \frac{(\xi_1 - \xi)^2}{2} \frac{\partial^2 u_n}{\partial \xi^2} \quad (16)$$

$$u_{n2} = u_n + (\xi_2 - \xi) \frac{\partial u_n}{\partial \xi} + \frac{(\xi_2 - \xi)^2}{2} \frac{\partial^2 u_n}{\partial \xi^2}$$

แก้สมการทั้งสองเพื่อหา  $\frac{\partial u_n}{\partial \xi}$  จะได้

$$\frac{\partial u_n}{\partial \xi} = \frac{1}{\Delta \xi} (\beta u_n(\xi, \eta) - u_{nm})$$

$$\Delta \xi = \xi_1 - \xi_2$$

$$\beta = \frac{\xi_2 - \xi}{\xi_1 - \xi} - \frac{\xi_1 - \xi}{\xi_2 - \xi} \quad (17)$$

$$u_{nm} = \frac{\xi_2 - \xi}{\xi_1 - \xi} u_{n1} - \frac{\xi_1 - \xi}{\xi_2 - \xi} u_{n2}$$

ทำการแทนผลที่ได้ลงในสมการ(14) พร้อมทั้งใช้การประมาณที่ว่า

$$u_n^2 = (u_s + (u_n - u_s))^2 \approx 2u_n u_s - u_s^2 \quad (18)$$

ร่วมกันแปลงให้สมการ(14) กลายเป็น

$$u_n'' \approx m(2u_n u_s - u_s^2 - 1) - \frac{m+1}{2} f_s u_n' + \frac{\xi}{\Delta\xi} (2\beta u_n u_s - \beta u_s^2 - u_m u_n) - \xi \frac{\partial f}{\partial \xi} u_n'$$

แล้วจัดให้อยู่ในรูปข้างล่างนี้

$$u_n'' + \left( \frac{m+1}{2} f_s + \xi \frac{\partial f}{\partial \xi} \right) u_n' - [2mu_s + \frac{\xi}{\Delta\xi} (2\beta u_s - u_m)] u_n = -m(u_s^2 + 1) - \frac{\xi}{\Delta\xi} \beta u_s^2 \quad (19)$$

### 2.3 สมการผลต่างสี่เหลี่ยม

การประมาณค่าอนุพันธ์ที่หนึ่งของ  $u_n$  จะใช้สูตรผลต่างกึ่งกลาง (Central Difference Formula) เข้าช่วย กล่าวคือ

$$u_n' \approx \frac{u_{n,i+1} - u_{n,i-1}}{\eta_{n,i+1} - \eta_{n,i-1}} \quad (20)$$

ส่วนการประมาณค่าอนุพันธ์ที่สองของ  $u_n$  กระทำด้วยสมการต่อไปนี้

$$u_n'' \approx \frac{2}{\eta_{n,i+1} - \eta_{n,i-1}} \times \left[ \frac{u_{n,i+1} - \eta_{n,i}}{\eta_{n,i+1} - \eta_{n,i}} - \frac{u_{n,i} - \eta_{n,i-1}}{\eta_{n,i} - \eta_{n,i-1}} \right] \quad (21)$$

โดยที่

$$u_{n,i} = u_n(\xi, \eta_i) \quad (22)$$

นำสมการอนุพันธ์ที่หนึ่งและที่สองของ  $u_n$  แทนลงในสมการ(17) แล้วจัดสมการที่ได้ให้อยู่ในรูปต่อไปนี้

$$A_j U_{n,j-1} + B_j U_j + C_j U_{j+1} = D_j \quad (23)$$

โดยที่

$$A_j = \frac{2}{(h_p + h_m)h_m} - \left( \frac{m+1}{2} F_{s,j} + \xi \frac{\partial F_{s,j}}{\partial \xi} \right) \times \frac{1}{(h_p + h_m)} \quad (24)$$

$$B_j = -\frac{2}{(h_p + h_m)} - 2mU_{sj} - \frac{\xi}{\Delta\xi} (2\beta U_{s,j} - U_{m,j}) \quad (25)$$

$$C_j = \frac{2}{(h_p + h_m)h_p} + 2 \left( \frac{m+1}{2} F_{s,j} + \frac{\xi}{\Delta\xi} \frac{\partial F_{s,j}}{\partial \xi} \right) \times \frac{1}{(h_p + h_m)} \quad (26)$$

$$D_j = -m(U_{s,j}^2 + 1) - \frac{\xi}{\Delta\xi} \beta U_{s,j}^2 \quad (27)$$

ซึ่ง

$$\begin{aligned} U_{s,j} &= u_s(\eta_j) (\approx u_n(\xi, \eta_j)) \\ F_{s,j} &= f_s(\eta_j) (\approx f(\eta_j)) \\ U_{m,j} &= u_m(\xi) \end{aligned} \quad (28)$$

การประเมินค่า  $F_{s,j}$  เป็นไปดังนี้

$$\begin{aligned} F_{s,1} &= f(\eta_1) = 0 \\ F_{s,j} &= F_{s,j-1} + \int_{\eta_{j-1}}^{\eta_j} U_{s,j} d\eta \end{aligned} \quad (29)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} F_{m,1} &= 0 \\ F_{m,j} &= F_{m,j-1} + \int_{\eta_{j-1}}^{\eta_j} U_{m,j} d\eta \end{aligned} \quad (30)$$

#### 2.4 สมการจากเงื่อนไขขอบเขต

สมการจากเงื่อนไขขอบเขตมีอยู่ 2 สมการดังนี้

1) จากเงื่อนไข  $u_n(\eta = 0) = U_{n,1} = 0$  ได้ว่า

$$B_1 U_{n,1} + C_1 U_{n,2} = D_1 \Rightarrow B_1 = 1, C_1 = D_1 = 0 \quad (31)$$

2) จากเงื่อนไข  $u_n(\eta \rightarrow \infty) = U_{n,p} = 1$  ได้ว่า

$$A_p U_{n,p-1} + B_p U_{np} = D_p \Rightarrow A_p = 0, B_p = D_p = 1 \quad (32)$$

ซึ่ง  $p$  คือจำนวนจุดหรือสถานีบนแกน  $\eta$  โดยที่  $p$  จะต้องมีค่ามากเพียงพอเพื่อให้  $u_n(\eta \rightarrow \infty) \rightarrow 1$  สิ่งนี้แสดงว่า

$$\eta_j = \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p = \eta_\infty \quad (33)$$

#### 2.5 ระบบสมการ

ในแต่ละสถานี(คือ  $\xi_i$ ) มีจำนวนสมการทั้งสิ้น  $p$  สมการ สมการแรกคือสมการ(29) สมการสุดท้ายคือสมการ (30) สมการที่ 2 ถึง  $p-1$  คือสมการ(21) ที่คิดที่  $j = 2, 3, \dots, p-1$  เขียนสมการทั้งหมดในรูปของเมตริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} B_1 & C_1 & 0 & \cdots & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & A_2 & B_3 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & C_{p-1} \\ 0 & \cdots & 0 & A_p & B_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n,1} \\ U_{n,2} \\ \vdots \\ U_{n,p-1} \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ D_{p-1} \\ D_p \end{bmatrix} \quad (34)$$

## 2.6 ค่าตัวแปรที่จุดขงกัน

ค่าตัวแปรที่สำคัญมีดังนี้

1) ความเร็ว:  $u_n(\xi = 0) = 0$

2) พารามิเตอร์เกรเดียนท์ความดัน,  $m(\xi = 0) = 1$

3) เพื่อการศึกษาการเติบโตของชั้นซิดผิวจะกำหนดว่า  $\delta(\xi = 0) = \sqrt{\frac{\mu}{\rho U_e L}}$

## 2.7 จุดเปลี่ยนผ่าน

เป็นที่ทราบกันดีว่า von Ingen and Smith เป็นผู้แนะนำให้รู้จักกับวิธีเอกซ์โพเนนที่กำลังเอ็น (e<sup>N</sup> method) ที่เป็นวิธีที่ประสบความสำเร็จโดยตั้งอยู่บนฐานของทฤษฎีเสถียรภาพเชิงเส้น วิธีเอกซ์โพเนนที่กำลังเอ็นนี้ใช้ได้เป็นอย่างดีเพื่อการทำนายการเริ่มเกิดขึ้นของการเปลี่ยนผ่านแบบธรรมชาติสำหรับชั้นซิดผิวแบบสองมิติชนิดไร้การอัดตัว [6,7]

ตัวเลข N เป็นอัตราการขยายสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่กำหนด จุดเริ่มต้นการเปลี่ยนผ่านจากการไหลแบบลามินาร์ไปสู่การไหลแบบเทอร์บูเลนต์คือจุดที่มีค่า N มากกว่าค่าวิกฤติ, N<sub>crit</sub> ในบทความนี้จะใช้วิธีของ Drela หาค่า N [5]:

$$N = \frac{dN}{d Re_\theta} (Re_\theta - Re_{\theta,crit}) \quad (35)$$

โดยที่ Re<sub>θ</sub> คือเลขเรย์โนลด์ที่ขึ้นกับความหนาโมเมนต์ θ

$$Re_\theta = \frac{\theta U_e}{\nu} \quad (36)$$

ความชัน  $\frac{dN}{d Re_\theta}$  มีสมการคือ

$$\frac{dN}{d Re_\theta} = 0.028(H-1) - 0.0345 * e^{-(3.87/(H-1)-2.52)^2} \quad (37)$$

Re<sub>θ,crit</sub> หาได้จากสมการ

$$\log_{10} Re_{\theta,crit} = 2.492 \left( \frac{1}{H-1} \right)^{0.43} + 0.7 \left( \tanh \left( \frac{14}{H-1} - 9.4 \right) + 1 \right) \quad (38)$$

$N_{crit} = 9$  เป็นค่าที่ใช้สำหรับการไหลที่ค่อนข้างเป็นแบบเทอร์บูลนต์ที่ซึ่งปกติเป็นการไหลในอุโมงค์ลม  $N_{crit} > 9$  เป็นค่าที่ควรใช้สำหรับการไหลเข้าที่เป็นแบบลามินาร์อย่างแท้จริงและสำหรับพื้นผิวเรียบและมีการสั้นน้อย[8]

## 2.8 ตัวแปรในชั้นขีดผิว

1) ความหนาของระยะกระจัด

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u(x, y)}{U_e(x)}\right) dy \quad (39)$$

2) ความหนาโมเมนต์

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{u}{U_e} \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \quad (40)$$

3) ค่าปัจจัยรูปร่าง

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (41)$$

4) สัมประสิทธิ์ความหนืดที่ผิว

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_e^2} \quad (42)$$

ซึ่ง

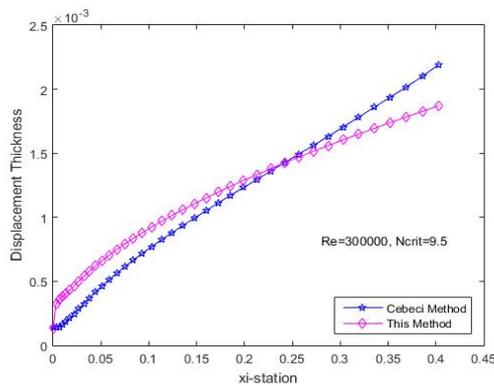
$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (43)$$

## 3. การดำเนินงานและผลงาน

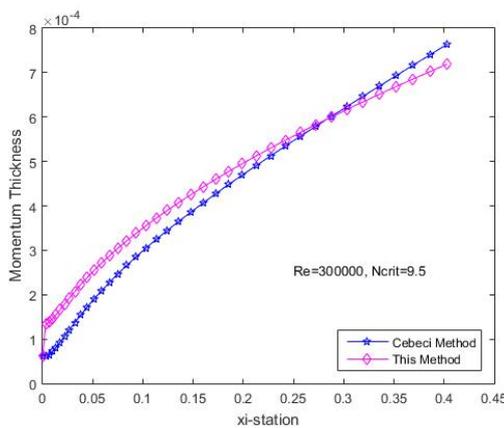
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้คำนวณประกอบด้วยส่วนสำคัญสี่ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นวิธีตาข่ายสองมิติ เพื่อการประมาณค่าความเร็วที่ขอบชั้นขีดผิวและจุดขงกั้น ส่วนที่สองเป็นส่วนคำนวณความเร็วภายในชั้นขีดผิว คัดที่แต่ละสถานี  $\xi_i$  เมื่อความเร็วที่แต่ละจุดบนแนวแกนตั้งฉาก  $u(\eta_j) = u_j$  เข้าสู่ค่าตอแล้วส่วนที่สามจะทำงาน แต่ถ้ายังไม่ลู่เข้าก็ให้ทำซ้ำไปจนครบจำนวนรอบที่กำหนดแล้วจึงยุติการทำงาน เงื่อนไขการลู่เข้าคือ  $\max(|u_{j,pre} - u_{j,cur}|) < 0.00001 \forall j, j = 1, 2, \dots, p$  ส่วนที่สามจะคำนวณหาค่าความหนาของระยะกระจัด ความหนาโมเมนต์และค่าปัจจัยรูปร่าง และส่วนที่สี่จะตรวจสอบว่าการเปลี่ยนผ่านเกิดขึ้นที่สถานี  $\xi_i$  หรือไม่ โดยใช้เงื่อนไขการตรวจสอบคือ  $N > N_{crit}$  ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงให้ยุติการทำงาน แต่ถ้าไม่จริง โปรแกรมจะย้อนกลับไปทำส่วนที่สองโดยกระทำกับ(ที่)สถานี  $\xi_i$  สถานีถัดไปจนครบทุกสถานีหรือ อาจจะยุติการทำงานก่อนก็ได้ถ้าค่า  $u_j$  ไม่ลู่เข้า หรือเกิดการเปลี่ยนผ่าน

ข้อมูลที่ต้องป้อนให้แก่โปรแกรมประกอบด้วย เลขเรย์โนลด์ ( $Re = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu}$ ) มุมปะทะ อัตราการขยายค่าวิกฤติ และ พิกัดของจุดต่างๆ บนผิวแพนอากาศที่เริ่มต้นจากผิวด้านล่างของแพนอากาศจากจุดที่ขอบท้ายไปยังจุดที่ขอบหน้า แล้วต่อ ด้วยผิวด้านบนต่อจากจุดที่ขอบหน้าไปยังจุดที่ขอบหลัง

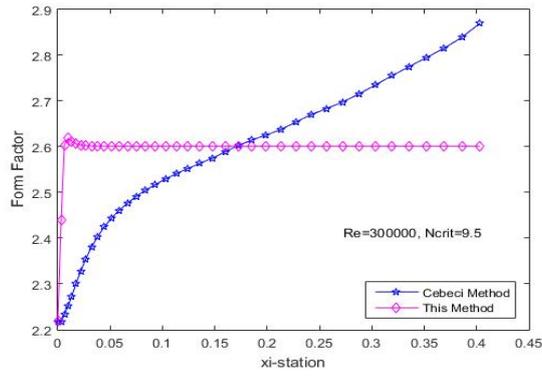
ผลการทำงานเป็นไปดังแสดงไว้ในรูป 2 ถึงรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาจากรูปกราฟทั้งหมดพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้วิธีในงานวิจัยนี้มีค่าความแตกต่างจากผลลัพธ์จากวิธีที่ใช้ในหนังสืออ้างอิง [3] ไม่มากและค่าต่าง ๆ ที่ได้จะสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีทั้งสองสำหรับกรณีของความหนาแน่นระยะกระจัดและกรณีของความหนาโมเมนต์ได้ผลมีค่าไม่เกิน 1 % และสำหรับกรณีของสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ผิวได้ผลคือ 6.0043% และ 0.5684% ตามลำดับ แต่สำหรับกรณีของค่าปัจจัยรูปร่างผลที่ได้จากวิธีทั้งสองยังมีความแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดคือ 37.12% และ 13.39% ตามลำดับ (ดูตารางที่ 1) ทั้งนี้เนื่องจากค่าปัจจัยรูปร่างเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ (ดูสมการ(36)) ที่ซึ่งทั้งตัวตั้ง (คือ  $\delta^*$ ) และตัวหาร (คือ  $\theta$ ) มีค่าไม่เท่ากันอยู่แล้ว ผลที่ได้จึงมีความแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัด และด้วยเหตุนี้จุดเปลี่ยนผ่านที่ได้จากวิธีทั้งสองจึงแตกต่างด้วยเช่นกัน เหตุผลสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีทั้งสองมีค่าแตกต่างกันคือวิธีทั้งสองกล่าวทั่วไปแล้วเป็นวิธีเชิงตัวเลขแต่ประยุกต์ใช้วิธีที่ต่างกัน โดยที่วิธีในงานวิจัยนี้ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องชนิดที่ขึ้นอยู่กับสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่สอง ในขณะที่ [3] ใช้วิธีกล่อง (Box method) ซึ่งก็คือวิธีผลต่างสืบเนื่องชนิดที่ขึ้นอยู่กับระบบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง



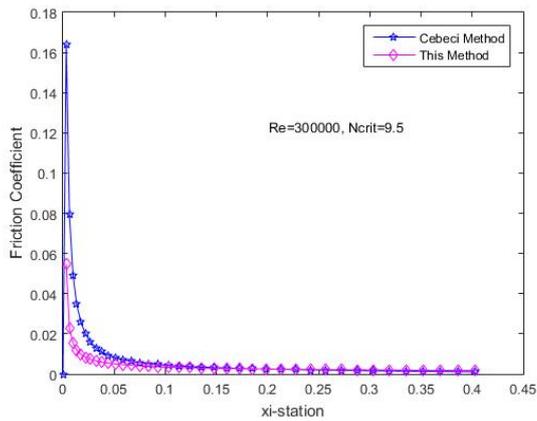
รูปที่ 2 การเติบโตของความหนาแน่นระยะกระจัดของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=3 \times 10^5$ ,  $N_{crit}=9.5$



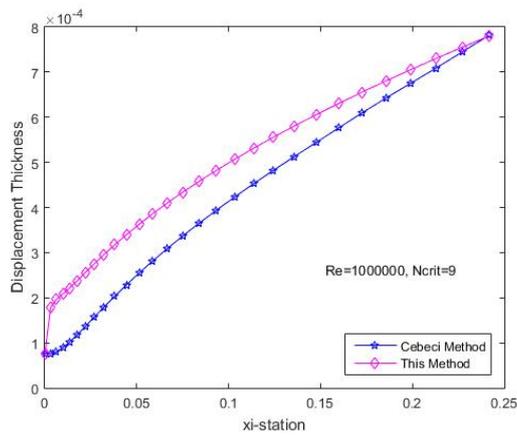
รูปที่ 3 การเติบโตของความหนาโมเมนต์ของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=3 \times 10^5$ ,  $N_{crit}=9.5$



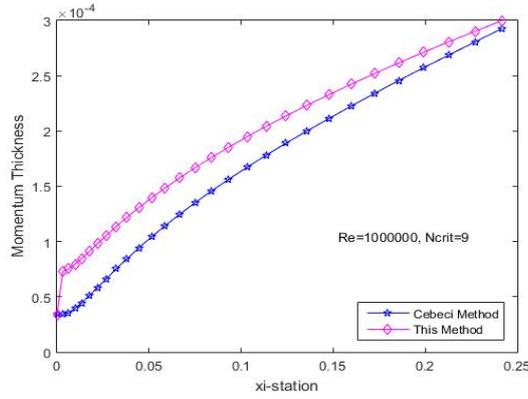
รูปที่ 4 การเติบโตของค่าปัจจัยรูปร่างของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=3 \times 10^5$ ,  $N_{crit}=9.5$



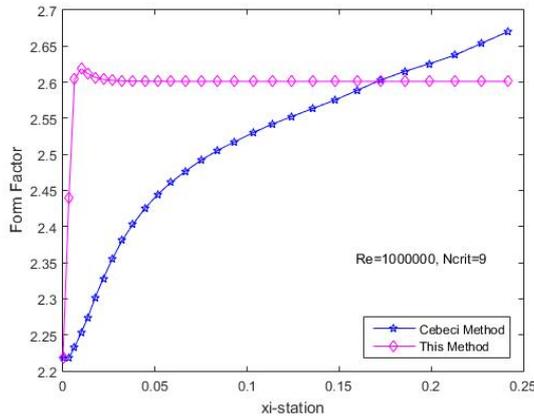
รูปที่ 5 เส้นโค้งสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ผิวของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=3 \times 10^5$ ,  $N_{crit}=9.5$



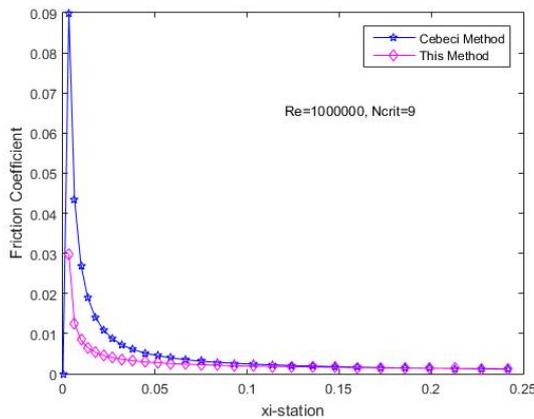
รูปที่ 6 การเติบโตของความหนาระยะกระจัดของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=1 \times 10^6$ ,  $N_{crit}=9$



รูปที่ 7 การเติบโตของความหนาโมเมนต์ของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=1 \times 10^6$ ,  $N_{crit}=9$



รูปที่ 8 การเติบโตของค่าปัจจัยรูปร่างของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=1 \times 10^6$ ,  $N_{crit}=9$



รูปที่ 9 เส้นโค้งสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ผิวของ NACA 0012 เมื่อ  $Re=1 \times 10^6$ ,  $N_{crit}=9$

ตารางที่ 1: ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีในงานวิจัยนี้ กับจากวิธีที่ใช้ในหนังสืออ้างอิง [3]

	$ \Delta\delta^* $	$ \Delta\theta $	$ \Delta H $	$ \Delta c_f $
ค่าสูงสุด [%]	0.0120	0.0040	37.12	6.0043

ค่าเฉลี่ย [%]	0.0080	0.0028	13.39	0.5684
---------------	--------	--------	-------	--------

#### 4. บทสรุป

สมการชั้นขีดผิวแบบลามินาร์สำหรับเกร็ดเดียนท์ ความดันใดๆ สมการผลต่างสืบเนื่องและระบบสมการ ใ้รับการแสดงให้เห็นที่มอย่างค่อนข้างชัดเจนเพื่อสร้าง โปรแกรมขึ้นมาช่วยคำนวณหาการกระจายความเร็วภายในชั้นขีดผิวแบบลามินาร์และทำการประเมินค่าตัวแปรในชั้นขีดผิวแบบลามินาร์รวมทั้งทำการทำนายจุดเปลี่ยนผ่านด้วย

พิจารณาจากผลลัพธ์สำคัญคือความหนาระยะกระจัดและสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ผิว ซึ่งเป็นค่าที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์หาค่าทางอากาศพลศาสตร์ของแพนอากาศที่คำนึงถึงผลของความหนืด พบว่าผลลัพธ์ของตัวแปรทั้งสองที่ได้จากวิธีในงานวิจัยนี้เป็นค่าที่ยอมรับได้เพราะความหนาระยะกระจัดมีค่าต่างจากค่าที่ได้จาก [3] สูงสุดไม่เกิน 1% ส่วนสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ผิวมีค่าต่างจากค่าที่ได้จาก [3] สูงสุดไม่เกิน 6.01% ดังนั้นกล่าวสรุปได้ว่าเราสามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมการชั้นขีดผิวแบบเทอร์นูเลนท์ต่อไปได้

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Moran, An introduction to theoretical and computational aerodynamics, John Wiley & Sons, Inc.,
- [2] Joseph A. Schetz, Boundary layer analysis, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, Virginia, 2010
- [3] Tuncer Cebeci, Jean Cousteix, Modeling and computation of boundary-layer flows, Second revised and extended edition, Horizons Publishing Inc., Long Beach, , California , 2005
- [4] A.E.P. Veldman, Boundary layers in fluid dynamics Lecture notes in applied mathematics, Academic year 2009-2010, University of Groningen, The Netherland
- [5] H. Ozdemir, A. van Garrel, H.J. Seubers, Unsteady Interacting Boundary Layer Method., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Conference Paper, January 2017
- [6] G. J. Walker, P. H. Subroto, M. F. Platzer, Transition modeling effects on viscous/inviscid interaction analysis of low Reynolds number airfoil flows involving laminar separation bubbles, THE American Society of Mechanical Engineers, 1988
- [7] Lelanie Smith, An interactive boundary layer modelling methodology for aerodynamic flows, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering , University of Pretoria, November 2011
- [8] V. Storch, On viscous-inviscid interaction for boundary layer calculation using two-equation integral method, URL: <https://stc.cvut.cz/pdf15/5520.pdf>, access on 15/11/2020
- [9] T. Cebeci, E. Besnard, H. H. Chen, An interactive boundary-layer method for multielement airfoils, Computers & Fluids Vol. 27, No 5-6, pp. 651-661, 1998

#### 6. สัญลักษณ์

- $C_f$	Skin friction coefficient	- $Re_{\theta,crit}$	Critical momentum thickness Reynolds number
- $m$	Pressure gradient parameter	- $U_e$	External velocity
- $p$	Pressure	- $\delta$	Measure of the boundary layer thickness
- $x, y$	Boundary layer coordinates	- $\delta^*$	Displacement thickness
- $u, v$	Velocity components	- $\mu$	Dynamic viscosity

- $H$	Form factor	- $\rho$	Density
- $L$	Characteristic length	- $\tau$	Shear stress
- $N$	Amplitude ratio	- $\tau_w$	Wall shear stress
- $N_{crit}$	Critical amplitude ratio	- $\theta$	Momentum thickness
- $Re$	Reynolds number	- $\xi, \eta$	Transformation variables
- $Re_\theta$	Momentum thickness Reynolds number	- $\nu$	Kinematic viscosity

# แบบจำลองภาพเสมือนจริงเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบส่องสว่างภายในอาคาร

## The Virtual Image Model for Assess the Performance of the Indoor Lighting System.

<sup>1\*</sup> อโศก ศรีทองธรรม

<sup>1</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี  
อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000

<sup>1\*</sup> Asoke Shithongtum

<sup>1</sup> Department of Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University

Ubon Ratchathani 34000

\*asoke\_ubu@hotmail.com

Received : December, 14 2020

Revised : April, 10 2021

Accepted : June, 22 2021

### บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้นำเสนอเทคนิคการจำลองภาพเสมือนจริงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Dialux 4.12 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบส่องสว่างภายในอาคาร โดยเปรียบเทียบ ค่าความสว่าง ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าส่องสว่าง และค่าความสม่ำเสมอของแสง จาก 2 พื้นที่ตัวอย่าง ซึ่งควบคุมการกระจายแสงแตกต่างกัน จากดวงโคมไฟฟ้า 2 แบบ ในเบื้องต้นได้ทำการทดสอบความเหมาะสมของตัวแปรที่ใช้ในการทำวิจัย โดยการเปรียบเทียบค่าความสว่างที่ได้จากผลการจำลองกับผลการวัดจริง พบว่า ความสว่างที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการจำลองเป็นค่าโดยประมาณ ยกตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแสงในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 2,736 ลูเมนต่อวัตต์ ในขณะที่ความเป็นจริงแหล่งกำเนิดแสงมีค่าไม่คงที่และลดลงตามอายุใช้งาน จึงทำให้ค่าความสว่างที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนจึงเลือกใช้ค่าตัวแปรดังกล่าวในการทำวิจัย พื้นที่ตัวอย่างที่ 1 ติดตั้งดวงโคมไฟฟ้าขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร จำนวน 9 ชุด พื้นที่ตัวอย่างที่ 2 ติดตั้งดวงโคมไฟฟ้าขนาดกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร จำนวน 20 ชุด จากผลการจำลองภาพเสมือนจริงใน 2 พื้นที่ตัวอย่าง พบว่า ค่าความสว่างและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าส่องสว่างมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่ค่าความสม่ำเสมอของแสง พื้นที่ตัวอย่างที่ 2 มีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานเพียงพื้นที่เดียว ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเสนอแนะแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่องสว่างจากผลการจำลองภาพเสมือนจริงเฉพาะในพื้นที่ตัวอย่างที่ 2 โดยปรับลดค่าความสว่างและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าส่องสว่างที่มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ด้วยการลดจำนวนดวงโคมไฟฟ้าลง 50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าความสม่ำเสมอของแสงไม่น้อยกว่า 0.40 ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อระบบส่องสว่างของพื้นที่ตัวอย่างลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองภาพเสมือนจริงเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบขั้นหลักการ เช่นในงานวิจัยนี้ ผลการจำลองที่ได้ทำให้ผู้ออกแบบงานระบบไฟฟ้าเลือกใช้งานดวงโคมไฟฟ้าที่ให้มุมการกระจายแสงเหมาะสมกับพื้นที่ใช้งาน อีกทั้งช่วยปรับลดขนาดของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบแสงสว่างจากเดิม 129.8 กิโลวัตต์ เป็น 64.0 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เพื่อให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และผลของค่าความสว่าง ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าส่องสว่าง และค่าความสม่ำเสมอของแสงจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อการปรับปรุงระบบส่องสว่างให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

**คำสำคัญ:** การจำลองภาพเสมือนจริง, สมรรถนะของระบบส่องสว่าง, แสงสว่างภายในอาคาร

### Abstract

This research presented the virtual simulated images for the building's interior illumination by using Dialux 4.12 as a simulation software. The research objective was to evaluate illumination system's performance inside the building by comparing of luminance, average illuminance uniformity and, light power density in 2 sample areas with different illuminance distribution from 2 types of lamp. The research variables were tested for appropriateness by compare the illumination from the simulation with the illumination from measurement. The initial test results showed the similar illumination values. However, the variable from simulation were estimation value such as the light source in this research was 2,736 lumen per watt but, in the real-world scenario, the light source had the unstable value and decrease by service life resulted in the discrepancy of illumination value. Therefore, this research chose those variables for calculation. Area number 1 installed 9 sets of lamp size 30 cm width and 120 cm length. Area number 2 installed 20 sets of lamp size 60 cm width and 120 cm length. The research result revealed that illuminance and light power density value in both areas were higher than standard criteria. However, only in the area number 2 which the average illuminance uniformity value was conformed with the standard. Therefore, researcher suggested the guideline for increasing illumination system performance from the result of the virtual simulated images in the area number 2 only. The performance improvement guideline is to decrease the exceeding value of illuminance and light power density which can be done by reducing 50% of lamp sets and maintaining the average illuminance uniformity value not less than 0.40 which result in reduction of energy consumption for illumination system 50% or from 129,800 watt per hour to 64,900 watt per hour. The result of the study can be summarized that using the virtual simulated images technique is useful for conceptual design. In this research, the simulation result helped the designer selected the lighting with proper light distribution angle and fit for the area. Moreover, the designer can reduce the size of electrical system especially in the lighting system from 129.8 kilowatts to 64 kilowatts. So, this technique is one of good alternates for increasing the energy consumption efficiency. In addition, the result of luminance, average illuminance uniformity and, light power density from this research can be used as the information for improve the efficiency of lighting systems in the future.

**Keywords:** Computer simulation, Illumination system's performance, Interior illumination

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากระบบส่องสว่างเพื่ออำนวยความสะดวกต่อการดำรงชีวิตเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น เพื่อความสะดวกสบาย เพื่อความสวยงาม และเพื่อความปลอดภัย โดยเฉพาะอยู่ที่ประมาณ 20-50 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมด [1] ซึ่งเป็นหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาวิกฤตพลังงานขึ้น ผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางการปรับปรุงสมรรถนะของระบบส่องสว่างภายในอาคารให้สูงขึ้นภายใต้สมมติฐาน 2 ข้อ ได้แก่ 1) การออกแบบระบบส่องสว่างเดิมอาจคำนึงถึงเฉพาะค่าความเข้มการส่องสว่างตามมาตรฐานการส่องสว่างที่กำหนด โดยสมาคมไฟฟ้าแสงสว่าง

แห่งประเทศไทยเพียงอย่างเดียว 2) วัสดุอุปกรณ์ในการประหยัดพลังงานด้านระบบไฟฟ้าแสงสว่างในขณะนั้นมีราคาสูง ยังไม่เป็นที่ยอมรับแพร่หลายและเป็นเรื่องใหม่ส่งผลกระทบต่องบประมาณของโครงการ

## 2. ขอบเขตงานวิจัย

- 2.1 เพื่อประเมินสมรรถนะด้านระบบไฟฟ้าแสงสว่างภายในอาคารภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
- 2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างภายในอาคารให้มีสมรรถนะด้านระบบส่องสว่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงพลังงาน
- 2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะด้านระบบส่องสว่างภายในอาคาร

## 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เพื่อแก้ปัญหาวิกฤตพลังงานดังกล่าว มาตรฐาน ข้อกำหนด และงานวิจัยด้านระบบส่องสว่างเกิดขึ้นมากมาย ยกตัวอย่าง เช่น คู่มือค่ามาตรฐานการส่งถ่ายข้อมูลของแสง [2] คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร [3] สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย (Illuminating Engineering Association of Thailand, TIEA) กฎกระทรวง [4, 5] ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และมาตรฐานของระบบส่องสว่างในแต่ละพื้นที่ ยกตัวอย่างเช่น ค่ามาตรฐานของความเข้มการส่องสว่างบริเวณพื้นที่ ห้องสมุด และห้องเรียน ต้องไม่น้อยกว่า 300 ลักซ์ กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [6] ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานการใช้พลังงานไฟฟ้าให้สอดคล้องกับสมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย เช่น สถานศึกษาและสำนักงานต้องไม่เกิน 14 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน [7] ได้กำหนดค่าความสว่างเพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานเป็น 4 ระดับ ที่ 50 ลักซ์, 100 ลักซ์, 200 ลักซ์ และ 300 ลักซ์ ตามลำดับ งานวิจัยด้านวิศวกรรมส่องสว่าง เช่น เจริญ คันธวงศ์ [8] ได้ศึกษาผลกระทบของความเข้มแสงที่ไม่เหมาะสมด้วยการตรวจวัด 2 วิธี ได้แก่ วิธีตรวจวัดแบบจุดและวิธีตรวจวัดแสงเฉลี่ยแบบพื้นที่ทั่วไป ประภาศศิลป์ อนนกสุวรรณมณี [9] ได้ศึกษาความคุ้มค่าของโครงการเปลี่ยนหลอดไฟเพื่อความมั่นคงด้านพลังงาน และพบว่าหากมีโครงการเปลี่ยนหลอดไฟจะช่วยประหยัดไฟฟ้าได้ร้อยละ 28 อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรหม [10] ได้วิจัยและพบว่า องค์ประกอบของการอนุรักษ์พลังงานขึ้นอยู่กับที่ตั้งของอาคาร ผู้ใช้อาคาร และการบริหารจัดการ ศิวาวุธ ปิ่นอ่อน [11] ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในและภายนอกอาคาร และพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการประสิทธิภาพของการออกแบบระบบไฟฟ้าได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของแสง การเลือกใช้ดวงโคม รูปแบบการติดตั้ง และการออกแบบแสงสว่างให้เหมาะสม วัลลภ ภูษา และคณะ [12] ได้ออกแบบดวงโคมไฟฟ้าด้วยระบบพลังงานระบบผสมผสานจากพลังงานธรรมชาติ 2 ชนิด ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแผงโซลาร์เซลล์และพลังงานลมด้วยกังหันผลิตแรงดัน เพื่อเสนอแนวทางการพลังงานอย่างประหยัดและหันมาใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น จากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างในเบื้องต้น พบว่าการใช้ประโยชน์จากการจำลองภาพเสมือนจริงเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบส่องสว่างภายในอาคารยังไม่แพร่หลายมากนัก การทำวิจัยลักษณะนี้จึงเป็นเรื่องที่ควรสนับสนุนเพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

#### 4. การดำเนินการวิจัย

##### 4.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่วิจัย

ทำวิจัย ณ อาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์และอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ลักษณะทั่วไปของอาคารทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ช่วงเวลาที่ 1 อยู่ระหว่างเวลา 8:00 น. ถึง 16:00 น. เพื่อศึกษาและเก็บข้อมูลลักษณะของการติดตั้ง และรูปแบบของดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งในแต่ละพื้นที่วิจัย ช่วงเวลาที่ 2 อยู่ระหว่างเวลา 19:00 น. ถึง 20:00 น.



รูปที่ 1 อาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์



รูปที่ 2 อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ

##### 4.2 แหล่งกำเนิดแสง ค่ามาตรฐานการส่งถ่ายข้อมูลของแสงและการจำลองค่าความสว่าง

แหล่งกำเนิดแสงที่ติดตั้งจริงในพื้นที่วิจัยทั้งสองเป็นหลอด LED T8 ผลิตภัณฑ์ Philips ขนาด 18 วัตต์ ซี Cool Daylight อุณหภูมิ 6500 เคลวิน ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอด เท่ากับ 152 ลูเมนต่อวัตต์ ค่ามาตรฐานการส่งถ่ายข้อมูลของแสง (Photometric Data, IES) เทียบจากผลิตภัณฑ์ LUSO รุ่น LRST 2/300L และรุ่น LRST 2/600L กราฟการกระจายแสง แสดงดังรูปที่ 3 จำลองค่าความสว่างด้วยโปรแกรม Dialux 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับสมการการคำนวณค่าความสว่างแบบการแบ่งส่วนของโพรงในแนวดิ่ง ดังแสดงในสมการที่ 1

$$L_t = \frac{E \times A}{CU \times LLD \times LDD \times RSDD \times LBO} \tag{1}$$

เมื่อ

$L_t$  : ค่าปริมาณจำนวนเส้นของแสงสว่างทั้งหมดที่ต้องการ

$E$  : ค่าปริมาณความส่องสว่าง (ลักซ์)

$A$  : พื้นที่ของห้องที่ทำการออกแบบ (ตารางเมตร)

$CU$  : สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ของโคม (Coefficient of Utilization)

$LLD$  : แฟกเตอร์ความเสื่อมของหลอด (Lamp Lumen Depreciation)

$LDD$  : แฟกเตอร์ความสกปรกของโคม (Luminaire Dirt Depreciation)

$RSDD$  : แฟกเตอร์ความสกปรกของห้อง (Room Surface Dirt Depreciation)

$LBO$  : แฟกเตอร์หลอดขาด (Lamp Burn Out)

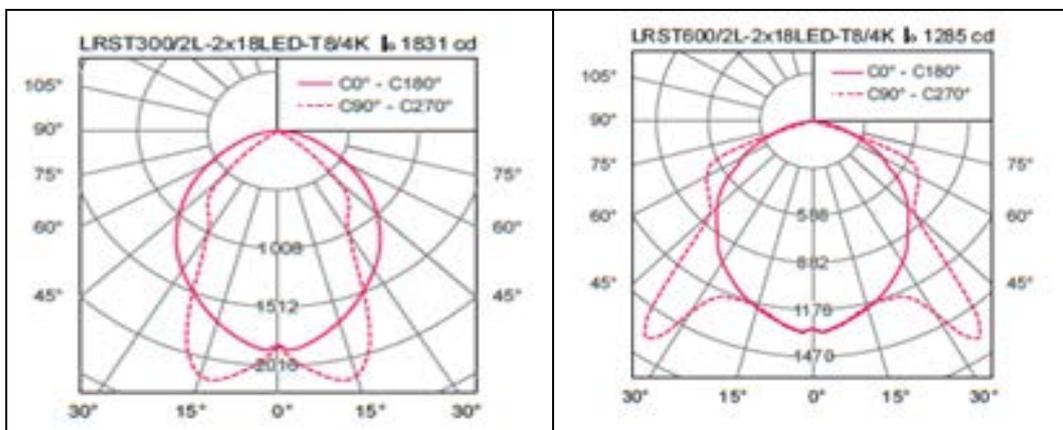
ค่าแฟกเตอร์ต่างๆ เพื่อชดเชยสภาพแวดล้อมแทนด้วย แฟกเตอร์การบำรุงรักษาทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ 2

$$M_f = CU \times LLD \times LDD \times RSDD \times LBO \tag{2}$$

เมื่อ

$M_f$  : แฟกเตอร์การบำรุงรักษาทั่วไป

ตัวแปรในการจำลองค่าความสว่าง ประกอบด้วย โพรงฝ้าเพดาน โพรงของห้อง และ โพรงของพื้น มีค่าเท่ากับ 0 เมตร, 2 เมตร และ 0.8 เมตร แฟกเตอร์การบำรุงรักษาทั่วไป เท่ากับ 0.8 ค่าการสะท้อนของพื้น เพดาน และผนังห้องมีค่าเท่ากับ 50, 70 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ความสูงของโพรงในแนวดิ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.50 ถึง 2.80 เมตร และพบว่าค่าความสว่างเพิ่มขึ้น 10 ลักซ์ เมื่อความสูงของโพรงในแนวดิ่งลดลง 10 เซนติเมตร ดังนั้น ในการทำวิจัยครั้งนี้จึงเลือกจำลองค่าความสว่างที่ระดับความสูง 2.80 เมตร ซึ่งให้ผลของการจำลองค่าความสว่างต่ำสุด



รูปที่ 3 ลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมไฟฟ้า LRST 300/2L และ LRST 600/2L

### 4.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวิจัย

#### 4.3.1 เครื่องวัดแสง

เครื่องวัดแสงผลิตภัณฑ์ DIGICON รุ่น LX-73 การเทียบเคียงค่าความเข้มการส่องสว่างอ้างอิงมาตรฐาน Cert.no.E17-0646 IDSN No.Q834150, Cal.Date. 29SEP/ 2017, Due Date. 29SEP/2018 การวัดค่าความสว่างทำได้โดยวางเครื่องวัดที่ระดับพื้นที่ใช้งานความสูง 0.80 เมตร และอยู่กึ่ง กลางระหว่างดวงโคมไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องวัดแสง ผลิตภัณฑ์ DIGICON รุ่น LX-73

#### 4.3.2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

วัดอุณหภูมิด้วยเครื่องแอลอีดีมิเตอร์ผลิตภัณฑ์ UPRtek รุ่น MK350D LED หมายเลขเครื่อง P75MK350D ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความถูกต้องของแสงผลิตภัณฑ์ UPRtek รุ่น MK350D LED

#### 4.4 การประเมินสมรรถนะของระบบส่องสว่าง

ประเมินสมรรถนะของระบบส่องสว่างประกอบ ด้วยการเปรียบเทียบค่าความสว่างและความสม่ำเสมอของแสงแบบเฉลี่ย (Average Uniformity) ระหว่างสองพื้นที่ตัวอย่าง

#### 4.5 การประเมินสมรรถนะการใช้พลังงาน

ประเมินสมรรถนะการใช้พลังงานด้วยการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นการใช้พลังงานไฟฟ้าส่องสว่างระหว่างสองพื้นที่ตัวอย่าง

### 5. ผลการวิจัย

#### 5.1 ผลการวัดค่าความสว่างด้วยเครื่องมือวัดแสง

ผลการวัดค่าความสว่างพื้นที่ตัวอย่างอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ขนาด กว้าง×ยาว 8x7.5 เมตร ติดตั้งดวงโคมไฟฟ้าจำนวน 9 ชุด รุ่น LRST 2/300L พบว่า ค่าความสว่างเท่ากับ 429 ลักซ์ ค่าอุณหภูมิสี 6500 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 6 และผลการวัดค่าความสว่างพื้นที่ตัวอย่างอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ ขนาด กว้าง×ยาว 11.5x7.5 เมตร ติดตั้งดวงโคมไฟฟ้าจำนวน 20 ชุด รุ่น LRST 600/2L พบว่า ค่าความสว่างเท่ากับ 524 ลักซ์ ค่าอุณหภูมิสี 6500 เคลวิน แสดงในรูปที่ 7



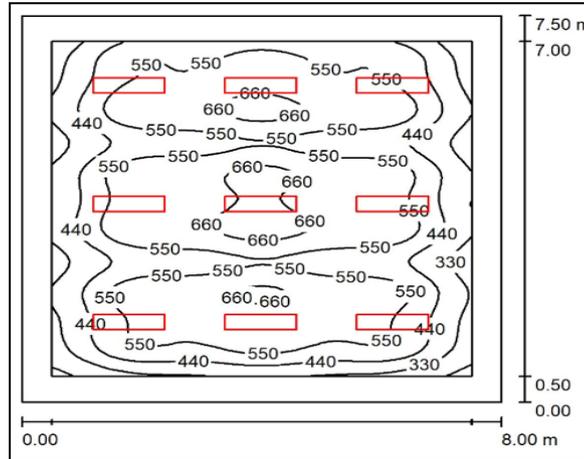
รูปที่ 6 ผลการวัดค่าความสว่างอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์



รูปที่ 7 ผลการวัดค่าสว่างความอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ

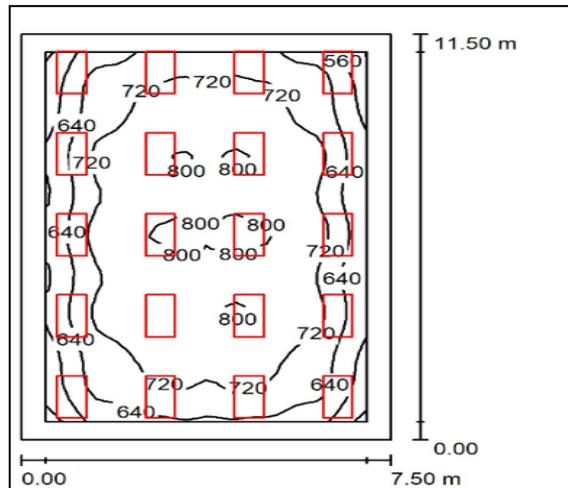
5.2 ผลการจำลองค่าความสว่าง

ผลการจำลองค่าความสว่างพื้นที่ตัวอย่างอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์แสดงดังรูปที่ 7 และพบว่าค่าความสว่างบริเวณพื้นที่ใช้งานเท่ากับ 524 ลักซ์ พื้นที่ห้อง เท่ากับ 417 ลักซ์ ฝ้าเพดาน 78 ลักซ์ และผนัง ทั้ง 4 ด้าน ด้วยวิธีการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 50 ลักซ์ ขณะที่เส้นสมมุติเสมือนมีความต่อเนื่องส่วนใหญ่ที่ค่าความสว่างเท่ากับ 550 ลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การจำลองค่าความสว่างและเส้นสมมุติเสมือนอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

เช่นเดียวกัน พื้นที่ตัวอย่างของอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ ผลการจำลองค่าความสว่าง แสดงดังในรูปที่ 9 และพบว่า ค่าความสว่างบริเวณพื้นที่ใช้งานเท่ากับ 706 ลักซ์ พื้นที่ห้องเท่ากับ 594 ลักซ์ ฝ้าเพดาน 140 ลักซ์ และผนังทั้ง 4 ด้าน ด้วยวิธีการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 334 ลักซ์ ในขณะที่เส้นสมมุติเสมือนมีความต่อเนื่องส่วนใหญ่ที่ค่าความสว่างเท่ากับ 720 ลักซ์



รูปที่ 9 การจำลองค่าความสว่างและเส้นสมมุติเสมือนอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ

### 5.3 เปรียบเทียบผลการวัดค่าความสว่าง และผลการจำลองค่าความสว่าง

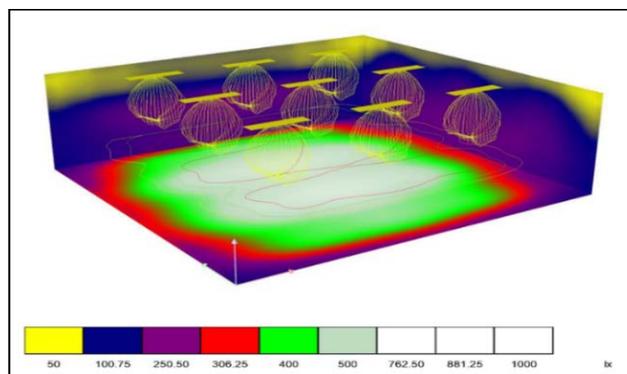
จากผลการเปรียบเทียบพบว่า อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการค่าความสว่างที่วัดจริง เท่ากับ 524 ลักซ์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง ค่าสูงสุด 824 ลักซ์ ค่าต่ำสุด 454 ลักซ์ เช่นเดียวกัน อาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ให้ผลการเปรียบเทียบที่สอดคล้องเช่นเดียวกัน โดยที่ค่าความสว่างที่วัดจริง เท่ากับ 429 ลักซ์ ซึ่งอยู่ระหว่างค่าสูงสุด 719 ลักซ์ ค่าต่ำสุด 189 ลักซ์ เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างระหว่างสองอาคาร พบว่า อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ ให้ผลการวัดและผลการจำลองค่าความสว่างสูงกว่าอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ส่วนความคลาดเคลื่อนระหว่างการวัดค่าความสว่างจากเครื่องมือวัด และการจำลองค่าความสว่าง มีค่าเท่ากับ 18.13 เปอร์เซ็นต์ และ 25.78 เปอร์เซ็นต์ ในอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ และอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการเรียนรวม ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อใช้ในการจำลองค่าความสว่าง เช่น ค่าแฟกเตอร์การบำรุงรักษาทั่วไป ค่าฟลักซ์ส่องสว่างของหลอด ค่าแสงสว่างภายนอก และค่าการสะท้อนในแต่ละโพรง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าความสว่างระหว่างการวัดด้วยเครื่องมือวัดแสงและผลการจำลองค่าความสว่าง

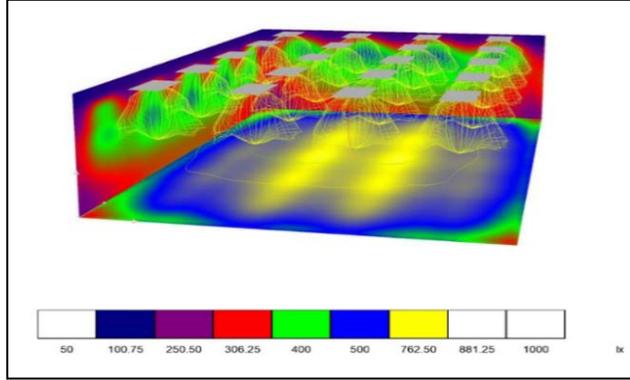
พื้นที่วิจัย	ผลการวัด	ผลการจำลองค่าความสว่าง		
	ลักซ์	ลักซ์		
		ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
อาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์	429	524	189	719
อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ	524	706	454	824

### 5.4 ผลการเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของแสงสว่าง

การจำลองค่าความสว่างเพื่อแสดงความสม่ำเสมอของแสงสว่างในอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ และอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ โดยพิจารณาจากการแสดงค่าสี False Colour Rendering หรือ FCR ดังแสดงในรูปที่ 10 และ รูปที่ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลการจำลองค่า FCR อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ



รูปที่ 11 ผลการจำลองค่า FCR อคารคณมนุขยศาสตร์และสังคศาสตร์

เพื่อให้การเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของแสงชัดเจนมากขึ้น ความสม่ำเสมอของแสงสว่างสามารถแสดงผลเชิงตัวเลขคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าความสว่างต่ำสุดต่อค่าความสว่างเฉลี่ย ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานด้านวิศวกรรมส่องสว่าง ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.4 และจากผลการคำนวณพบว่า อคารคณมนุขยศาสตร์และสังคศาสตร์ ให้ความสม่ำเสมอของแสงสว่างเท่ากับ 0.361 ในขณะที่อคารเรียนรวมและปฏิบัติการให้ความสม่ำเสมอของแสงสว่าง เท่ากับ 0.643 ดังผลที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสม่ำเสมอของแสงสว่างระหว่างอคารคณมนุขยฯ และ อคารเรียนรวมฯ

พื้นที่วิจัย	ผลการจำลองค่าความสว่าง (ลักซ์)		ความสม่ำเสมอของแสงสว่าง
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	
อคารคณมนุขยศาสตร์และสังคศาสตร์	524	189	0.36
อคารเรียนรวมและปฏิบัติการ	706	454	0.64

5.5 การเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าแสงสว่าง Light Power Density หรือ LPD คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ ตามเกณฑ์มาตรฐานค่านี้อยู่ต่ำกว่า 14 วัตต์ต่อตารางเมตร [2] จากการคำนวณจะได้ว่า อคารคณมนุขยศาสตร์และสังคศาสตร์มีค่า LPD เท่ากับ 4.50 วัตต์ต่อตารางเมตร อคารเรียนรวมและปฏิบัติการมีค่า LPD เท่ากับ 6.49 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังผลที่แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความหนาแน่นการใช้กำลังไฟฟ้าส่องสว่าง

พื้นที่วิจัย	พื้นที่ ตารางเมตร	กำลังไฟฟ้า วัตต์	การใช้พลังงานต่อพื้นที่ วัตต์ต่อตารางเมตร
อคารคณมนุขยศาสตร์และสังคศาสตร์	60	252	4.50
อคารเรียนรวมและปฏิบัติการ	86.25	560	6.49

## 6. สรุป

6.1 การเปรียบเทียบค่าความสว่างจากการวัดจริง และการจำลองค่าความสว่างต้องมีการกำหนดค่าของตัวแปรต่างๆ หลายค่าส่วนใหญ่สอดคล้องกับการคำนวณแบบการแบ่งส่วนของโพรงในแนวดิ่ง เช่น ค่าความสูงของโพรง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสูงของโพรงในส่วนของห้องที่ระดับไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสภาพการติดตั้งค่าการสะท้อนของโพรงเพื่อตรวจสอบค่าตัวแปรที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการทำวิจัยดังกล่าวว่าให้ผลใกล้เคียงกับค่าจริงหรือไม่ ทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการวัดจริง และผลการจำลองค่าความสว่าง ผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 1

6.2 ผลการจำลองค่าความสว่างพบว่า อาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ได้ผลการจำลองดังแสดงในตารางที่ 1 ความสว่างต่ำสุด สูงสุด และเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 189 ลักซ์, 719 ลักซ์ และ 524 ลักซ์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเส้นสมมุติเสมือนพบว่าส่วนใหญ่ความต่อเนื่องของเส้นสมมุติเสมือนมีค่าเท่ากับ 550 ลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 8 ใกล้เคียงกับค่าความสว่างเฉลี่ย ความแตกต่างระหว่างค่าความสว่างสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 530 ลักซ์ ส่วนอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการได้ผลการจำลองดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าความสว่างต่ำสุด สูงสุด และเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 454 ลักซ์, 824 ลักซ์ และ 706 ลักซ์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเส้นสมมุติเสมือนพบว่า ส่วนใหญ่ความต่อเนื่องของเส้นสมมุติเสมือนมีค่าเท่ากับ 720 ลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความสว่างเฉลี่ย ความแตกต่างระหว่างค่าความสว่างสูงสุดและต่ำสุด เท่ากับ 370 ลักซ์ เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองค่าความสว่างระหว่างอาคารทั้งสอง ซึ่งติดตั้งดวงโคมไฟฟ้าที่แตกต่างกันพบว่า ความสว่างเฉลี่ยอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์มีค่าความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 524 ลักซ์ สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 224 ลักซ์ คิดเป็น 74.66 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการมีค่าความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 706 ลักซ์ มากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 306 ลักซ์ คิดเป็น 102 เปอร์เซ็นต์ ในการออกแบบขั้นต้น หรือปรับปรุงในอนาคต อาจสามารถปรับลดปริมาณของแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ ได้ประมาณ 74.66 เปอร์เซ็นต์ และ 102 เปอร์เซ็นต์ ในอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์และอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ ตามลำดับ

6.3 ความสม่ำเสมอของแสงเฉลี่ยได้โดยพิจารณาจากค่า FCR ที่แสดงในรูปที่ 10 และ รูปที่ 11 และสามารถแสดงผลเชิงตัวเลขจากอัตราส่วนระหว่างค่าความสว่างต่ำสุดต่อค่าความสว่างเฉลี่ย ค่าความสม่ำเสมอของแสงตามเกณฑ์มาตรฐานควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.4 ผลการคำนวณที่ได้แสดงในตารางที่ 2 พบว่าอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ค่าความสม่ำเสมอของแสงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน จากผลการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.36 ส่วนอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ ค่าความสม่ำเสมอของแสงที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 0.64 ตามเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของแสงระหว่างอาคารทั้งสองพบว่าอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ต้องมีการปรับปรุงการติดตั้งและการกระจายแสงของดวงโคมไฟฟ้าให้มีค่าความสม่ำเสมอของแสงเป็นไปตามมาตรฐาน ยกตัวอย่างเช่น การปรับลดระยะห่างระหว่างดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งในอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ เพื่อให้ค่าความสม่ำเสมอของแสงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้จำนวนดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในอาคารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ต้องมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าผลการจำลองค่าความสว่างจะให้ค่าความสว่างเฉลี่ยมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานพอสมควรก็ตาม ในขณะที่อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ ค่าความสม่ำเสมอของแสงสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และค่าความสว่างเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานพอสมควรเช่นกัน ดังนั้นในอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการสามารถที่จะเพิ่มระยะห่างระหว่างดวงโคมไฟฟ้าให้สูงขึ้น ในขณะที่ค่าความสม่ำเสมอของแสงที่ได้รับยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจะช่วยให้โอกาสในการลดจำนวนดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในอาคารลดน้อยลงเนื่องจากดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งในอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการให้การกระจายแสงของดวงโคมไฟฟ้าที่เหมาะสมมากกว่าดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งในอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

6.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าส่องสว่างทำได้โดยการคำนวณอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่หรือ LPD โดยทั่วไปค่า LPD ที่ได้จะต้องไม่มากกว่า 14 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มีค่า LPD เท่ากับ 4.5 วัตต์ต่อตารางเมตร อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการมีค่า LPD เท่ากับ

6.49 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานซึ่งอาจเป็นผลจากในระหว่างที่ทำการวิจัย ทางมหาวิทยาลัยได้ปรับเปลี่ยนในพื้นที่วิจัยทั้งหมด เป็นชนิด LED ซึ่งประหยัดพลังงานมากพอสมควร

6.5 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบส่องสว่างภายในอาคารระหว่างอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์และอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ พบว่าอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการมีสมรรถนะของระบบส่องสว่างสูงกว่าอาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ เนื่องจากอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการ มีค่าความสว่างค่าความสม่ำเสมอของแสงสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเป็นผลให้ในการปรับปรุงหรือการออกแบบชั้นหลักการในอนาคตสามารถลดจำนวนดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าความสม่ำเสมอของแสงที่ได้รับยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อีกทั้งเมื่อจำนวนดวงโคมไฟฟ้าลดลงแล้วยังสามารถช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าแก่แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน ในขณะที่อาคารคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ซึ่งถึงแม้ว่าค่าความสว่างที่ได้รับสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานใกล้เคียงกับอาคารเรียนรวมและปฏิบัติการแต่เนื่องจากค่าความสม่ำเสมอของแสงที่ได้รับไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานจึงไม่สามารถลดจำนวนดวงโคมที่ติดตั้งในอาคารได้ เหตุผลที่ทำให้สมรรถนะของระบบส่องสว่างภายในอาคารแตกต่างกันเนื่องจากลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในอาคารทั้งสองแตกต่างกัน ดังนั้น การเลือกดวงโคมไฟฟ้าที่มีลักษณะการกระจายแสงที่เหมาะสมในการติดตั้งแต่ละพื้นที่จึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะของระบบส่องสว่างทำให้การใช้งาแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์เต็มประสิทธิภาพมากและทำให้ปริมาณการใช้พลังงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

## 7. ข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองภาพเสมือนจริงเพื่อปรับปรุงงานออกแบบด้านวิศวกรรมส่องสว่างเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้การใช้ประโยชน์จากแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์เต็มประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มสมรรถนะของระบบส่องสว่างจากผลการจำลองภาพเสมือนจริงเฉพาะในพื้นที่ตัวอย่างที่ 2 ด้วยการปรับลดค่าความสว่างและ ค่ากำลังไฟฟ้าส่อง เดิมที่มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ด้วยการลดจำนวนดวงโคมไฟฟ้าลง 50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าความสม่ำเสมอของแสงไม่น้อยกว่า 0.40 ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อระบบส่องสว่างของพื้นที่ตัวอย่างลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ จากเดิม 129,800 วัตต์ต่อชั่วโมง เป็น 64,900 วัตต์ต่อชั่วโมง เป็นต้น

## 8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. (2556). การออกแบบระบบไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: หจก. โซติอเนชั่น ครีเอชั่น.
- [2] J.E. Kaufman . (1981). **IES Lighting Handbook (1981 Reference Volume)**. New York: Illuminating Engineering Society.
- [3] สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. (2559). **คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร**. กรุงเทพฯ: สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย.
- [4] กฎกระทรวง. (2549). มาตรฐานในการบริหาร และการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับ ความร้อน แสงสว่างและเสียง. สืบค้น 20 ตุลาคม 2563, จาก: <http://www3.mol.go.th/content/63186/1505802871>

- [5] กฎกระทรวง. (2537). พระราชบัญญัติควบคุมอาคารพ.ศ. 2522 ฉบับที่ 39 (พ.ศ. 2537). สืบค้น 15 ตุลาคม 2563, จาก: <https://download.asa.or.th/03media/04law/cba/mr/mr37-39.pdf>
- [6] กฎกระทรวง. (2552). กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552. สืบค้น 10 ตุลาคม 2563, จาก: [https://www.dede.go.th/download/energysaving58/20\\_2552.pdf](https://www.dede.go.th/download/energysaving58/20_2552.pdf)
- [7] กฎกระทรวง. (2562). ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง มาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง. สืบค้น 10 ตุลาคม 2563, จาก: [http://library.rsu.ac.th/greenoffice/law/law4\\_2.pdf](http://library.rsu.ac.th/greenoffice/law/law4_2.pdf)
- [8] เจริญ คันธวงศ์. (2555). การจัดการอาคารสำนักงานเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน กรณีศึกษา อาคารเจริญ คันธวงศ์. มหาวิทยาลัยกรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยกรุงเทพฯ.
- [9] ประภาศิลป์ อนนทสุวรรณมณี. (2555). การศึกษาความคุ้มค่าของโครงการเปลี่ยนหลอดไฟฟ้าเพื่อความมั่นคงด้านพลังงาน กองดุริยางค์ทหารบก. (ปริญญาานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปทุมธานี).
- [10] อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรณ. (2552). The Assessment of Building Energy Performance: Thammasat University, Rangsit Campus. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies.*(1)6: 13-30.
- [11] ศิวาจุฑ ปิ่นอ่อน. (2553). การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ไฟฟ้าแสงสว่างพื้นที่ภายในและภายนอกอาคาร ศูนย์การค้าชุมชน : กรณีศึกษา ศูนย์การค้าลาวิลล่า. (วิทยานิพนธ์ สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์).
- [12] วัลลภ ภูผา และคณะ. (2556). การศึกษาโคมไฟฟ้าแสงสว่างด้วยระบบพลังงานแบบผสมผสาน. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5(657- 660). ประจวบคีรีขันธ์: เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.

**การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์  
ในการติดตามอากาศยานสำหรับการค้นหาและช่วยชีวิต  
Geo-Informatics and Communications via Cellular Networks  
in Aircraft Tracking for Search and Rescue: An Application**

<sup>1\*</sup> ชัญญาวัฒน์ สถิตภัทรสมบัติ และ <sup>2#</sup> ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง

<sup>1,2</sup> กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

<sup>1\*</sup> Chanyawat Sathidbhattarasombad and <sup>2#</sup> Phummipat Daungklang

<sup>1,2</sup> Faculty of Academic, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Received : April, 22 2021

Revised : June, 15 2021

Accepted : June, 22 2021

\*chanyawat\_s@rtaf.mi.th, #phummipat\_d@rtaf.mi.th

**บทคัดย่อ**

การใช้เรดาร์เพื่อการตรวจจ้ออากาศยานที่ระดับความสูงไม่มากนักมีข้อจำกัดในเรื่องการบดบังของภูมิประเทศ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถทราบพิกัดที่แน่นอน ในกรณีเกิดเหตุการณ์ที่อากาศยานขาดการติดต่อที่ระดับความสูงไม่มากหรือเกิดอุบัติเหตุอากาศยานตก จึงส่งผลให้หุดค้นหาและช่วยชีวิตต้องทำการค้นหาในพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง และทำให้การค้นหาใช้เวลานาน ค่าใช้จ่าย และไม่ทันการณ์ ดังนั้น การติดตามตำแหน่งของอากาศยานของกองทัพอากาศ จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องติดตาม ตรวจสอบ และเฝ้าระวังตลอดเวลา

จากปัญหาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศร่วมกับการรับส่งข้อมูลพิกัดของอากาศยานผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ เพื่อการติดตามอากาศยานของกองทัพอากาศ โดยใช้อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบพกพา (GPS Tracker) พร้อมติดตั้งซิมการ์ดหรือใช้โทรศัพท์สมาร์ทโฟน สำหรับการส่งข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ตั้งแต่อากาศยานเริ่มทำการบินจนเสร็จสิ้นภารกิจการบิน ซึ่งข้อมูลฯ ดังกล่าวจะถูกส่งผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์ด้วย GPRS Protocol ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่ติดตั้งระบบ Traccar เพื่อทำการประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บและแสดงผลร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และจะถูกส่งต่อไปยัง Web Server ผ่าน Web Socket API เพื่อแสดงผลให้ผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้องทราบบน Web Application ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบฯ ดังกล่าวร่วมกับอากาศยานของกองทัพอากาศจำนวน 4 แบบ ได้แก่ AU-23, DA-42, Bell-412 และ F-16 A/B จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าระบบฯ มีประสิทธิภาพในการตรวจจ้ออากาศยานที่ระดับความสูงที่ถูกบดบังจากภูมิประเทศ สามารถสนับสนุนภารกิจการค้นหาและช่วยชีวิตได้

**คำสำคัญ:** เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ, เครือข่ายเซลลูลาร์, การติดตามอากาศยาน, การค้นหาและช่วยชีวิต

**Abstract**

Obscuring terrain is indeed disadvantageous to low-altitude aircraft detection with radars, because of which the exact position of aircraft in case of lost contact at low altitude or accidents cannot be determined. Search and rescue teams must therefore unnecessarily operate in wide areas. Too much time is then unavoidably spent,

which could lead to unexpected casualties occasionally. Thus, while being deployed in mission areas, military aircraft should be tracked continuously.

For this reason, we propose an application of Geo-Informatics and communications via cellular networks for tracking RTAF's aircraft: during every flight, GPS trackers which are equipped with SIM cards or registered smartphones send information about aircraft's positions, using the GPRS protocol, to a server on which the Traccar system is installed. The server then processes the received information into a form suitable for storing and being displayed together with Geo-Informatics system. Eventually, the processed information is forwarded a Web Server to be shown to the personnel concerned on a Web application. As for the evaluation, tests were performed on 4 types of aircraft, namely AU-23, DA-42, Bell-412, and F-16 A/B. As the result, we conclude that the proposed application can track aircraft at low altitude and thus support search and rescue missions.

**Keywords:** Geo-Informatics, Cellular Network, Aircraft Tracking, Search and Rescue

## 1. บทนำ

ปัจจุบันกองทัพอากาศมีแนวทางการพัฒนาระบบงานต่าง ๆ ให้อยู่บนพื้นฐานการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลางเพื่อความสะดวกในการบูรณาการและแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารระหว่างหน่วยงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการบัญชาการและควบคุม (Command and Control) ซึ่งมีความจำเป็นต้องบูรณาการระบบการตรวจจับ (Sensor) ของกองทัพอากาศให้มีความพร้อมปฏิบัติการกิจอย่างมีประสิทธิภาพ และหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความสำคัญต่อการใช้เป็นเครื่องมือในการบูรณาการข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ คือ เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geo-Informatics) เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับบริหารจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) และภารกิจทางทหารก็มีส่วนแล้วแต่มีความเกี่ยวข้องกับข้อมูลเชิงพื้นที่ทั้งสิ้น ไม่ว่าจะเป็นการปฏิบัติการกิจการบินในด้านต่าง ๆ รวมถึงภารกิจการค้นหาและช่วยชีวิตที่ใช้การตรวจจับและติดตามอากาศยานจากรadar ร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) เป็นต้น

ในส่วนของ การตรวจจับและติดตามอากาศยานด้วยเรดาร์นั้น ยังมีข้อจำกัดในการตรวจจับอากาศยานที่ระดับความสูงที่ถูกบดบังจากภูมิประเทศ เช่น กรณีที่อากาศยานเกิดอุบัติเหตุและขาดการติดต่อในพื้นที่ที่เป็นป่าและภูเขา ทำให้ไม่สามารถทราบพิกัดที่แน่นอน ส่งผลให้ชุดค้นหาและช่วยชีวิตต้องทำการค้นหาในพื้นที่ที่เป็นบริเวณกว้าง การหาจุดที่อากาศยานตกเป็นไปด้วยความล่าช้า ไม่ทันการณ์ และอาจส่งผลถึงการช่วยชีวิตของผู้ประสบภัยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ประกอบกับการติดตามระบุดำแห่งของยานพาหนะทางยุทธการและบุคคล เมื่อเดินทางไปปฏิบัติการกิจในพื้นที่ดังกล่าว เป็นสิ่งจำเป็นที่หน่วยควบคุมและสั่งการต้องทราบเพื่อติดตามสถานการณ์ และใช้ประกอบการตัดสินใจได้อย่างทันท่วงที

จากข้อจำกัดของการใช้เรดาร์ในการตรวจจับและติดตามอากาศยานในระดับความสูงที่ถูกบดบังด้วยภูมิประเทศ ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเพื่อการติดตามอากาศยานของกองทัพอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับให้ครอบคลุมในทุกระดับชั้นความสูง โดยนำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี GPS Tracking ที่จะทำให้ทราบพิกัดที่แน่นอนของอากาศยานที่ระดับความสูงที่ไม่มากได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ รวมถึงจะเป็นการเพิ่มศักยภาพเพื่อให้ระบบบัญชาการและควบคุมสามารถทราบพิกัดของอากาศยานตลอดเวลา ส่งผลให้การปฏิบัติการกิจ เช่น การค้นหาและช่วยชีวิต สามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วมีประสิทธิภาพ

## 2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อมุ่งเน้นเพิ่มศักยภาพการตรวจจับอากาศยานในระดับความสูงที่ถูกบดบังจากภูมิประเทศ สำหรับการกิจการค้นหาและช่วยชีวิตให้สามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ รวมถึงเพิ่มศักยภาพด้านระบบบัญชาการและควบคุมในการติดตามอากาศยานของกองทัพอากาศให้มีความสามารถในการปฏิบัติการบนพื้นฐานที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง โดยผู้วิจัยพัฒนาโปรแกรมเพื่อติดต่อสื่อสารและส่งข้อมูลตำแหน่งพิกัดของอากาศยานผ่านผู้ให้บริการเครือข่ายเซลลูลาร์ และใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับการแสดงผลการติดตามอากาศยาน

## 3. ขอบเขตงานวิจัย

ผู้วิจัยพัฒนาโปรแกรมโดยการรับส่งข้อมูลพิกัดของอากาศยานผ่านผู้ให้บริการเครือข่ายเซลลูลาร์ภายในประเทศเท่านั้น ซึ่งไม่ครอบคลุมการให้บริการนอกประเทศ รวมถึงบริเวณในประเทศที่ไม่อยู่ในพื้นที่การให้บริการ

## 4. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 4.1 หลักการการค้นหาและช่วยชีวิตของกองทัพอากาศ

กองทัพอากาศจะปฏิบัติการกิจใช้กำลังทางอากาศตามขีดความสามารถที่มีอยู่ทั้งในระดับยุทธศาสตร์และยุทธวิธี เช่น การโจมตีทางยุทธศาสตร์ การต่อต้านทางอากาศและภาคพื้น การต่อต้านทางทะเล การลำเลียงทางอากาศ การลาดตระเวน และเผ่าตรวจ รวมถึงการค้นหาและช่วยชีวิต เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้สามารถบรรลุภารกิจทางทหารได้อย่างครอบคลุมทั้งภารกิจ การสงคราม และปฏิบัติการทางทหารที่มีใช้สงคราม (MOOTW) [1]

จากการปฏิบัติการทางอากาศยุทธวิธีของกองทัพอากาศที่ใช้อากาศยานในทางการรบและมีใช้การรบนั้น อาจเกิดความสูญเสียได้ทุกเมื่อ ดังนั้นการช่วยเหลือนักบินและเจ้าหน้าที่ประจำอากาศยานที่เกิดอุบัติเหตุให้ปลอดภัยจะเป็นการลดความสูญเสีย เพิ่มขวัญกำลังใจ และความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ประสบเหตุ อีกทั้งนักบินและเจ้าหน้าที่ประจำอากาศยานจะมีหลักประกันแห่งความปลอดภัยในระดับหนึ่งเมื่อต้องปฏิบัติการในอากาศ จะเห็นได้ว่าภารกิจช่วยเหลือและกู้ภัยจึงเป็นภารกิจที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการปฏิบัติการทางอากาศของกองทัพอากาศ [1]

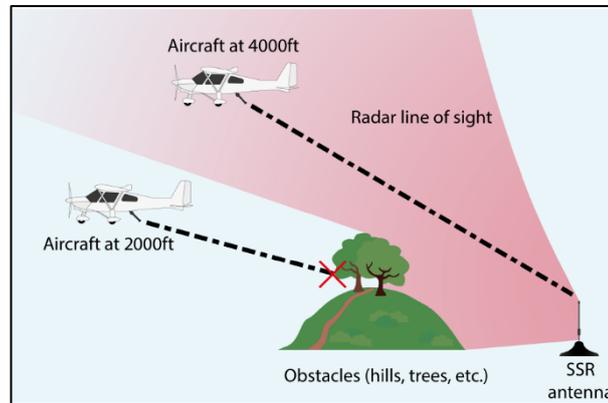
การค้นหาและช่วยชีวิตในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง เช่น พื้นที่ป่าเขา นั้น เป็นภารกิจที่ยุ่งยาก ซับซ้อน และเสี่ยงต่อการสูญเสียเป็นอย่างยิ่ง ต้องมีการพิจารณาการใช้อากาศยานร่วมกันหลายประเภท และมีหน่วยในการสนับสนุนภารกิจหลายหน่วย การที่จะปฏิบัติการค้นหาและช่วยชีวิตให้ได้รับผลสำเร็จด้วยดีจึงขึ้นอยู่กับการตัดสินใจและการวางแผนที่ดีของผู้มีหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง และผู้ปฏิบัติทุกฝ่ายจะต้องประสานงานกันเป็นอย่างดี มีวิธีการปฏิบัติที่เหมาะสม และพร้อมที่จะเผชิญกับเหตุการณ์ต่าง ๆ

จากการศึกษาการปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาและช่วยชีวิต สรุปได้ว่าการติดตามและค้นหาตำแหน่งสุดท้ายของอากาศยานที่เกิดอุบัติเหตุมีความสำคัญต่อการช่วยชีวิตของผู้ประสบภัยอย่างยิ่ง ซึ่งหากทราบข้อมูลพิกัดที่แม่นยำและรวดเร็ว จะส่งผลให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในการช่วยชีวิตสามารถส่งความช่วยเหลือไปยังผู้รอดชีวิตได้อย่างทันท่วงที และสามารถลดความสูญเสียอันเกิดจากอุบัติเหตุได้ [1] อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันการที่จะทราบตำแหน่งของอากาศยานที่แม่นยำได้นั้นเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะกรณีที่อากาศยานเกิดอุบัติเหตุในบริเวณที่เป็นป่าและภูเขา เนื่องจากข้อจำกัดของเรดาร์ที่สามารถตรวจจับอากาศยานได้ที่ระดับความสูงที่ไม่ถูกบดบังจากภูมิประเทศเท่านั้น ทำให้ทีมค้นหาต้องค้นหาผู้รอดชีวิตในพื้นที่กว้างและต้องใช้เวลา

### 4.2 เทคโนโลยีการติดตามอากาศยาน

เทคโนโลยีการติดตามอากาศยานในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่อยู่ในกลุ่ม Secondary Surveillance Radar (SSR) เช่น Automatic Dependent System-Broadcast (ADS-B), Mode-S [2] โดย SSR สามารถรับข้อมูลพิกัด ความสูงของอากาศยานจากอุปกรณ์ Transponder ที่ติดตั้งในอากาศยาน ซึ่งส่งสัญญาณคลื่นวิทยุตอบกลับมาหลังจาก

ได้รับคลื่นวิทยุจาก SSR ทั้งนี้ เทคโนโลยี SSR ได้ถูกใช้โดยหน่วยงานในประเทศไทยด้วย เช่น บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด [3] อย่างไรก็ตาม หากเสาอากาศของ SSR ตั้งอยู่บริเวณที่ Line of Sight หรือเส้นตรงที่ลากจากเสาอากาศไปยังอากาศยาน ถูกบดบังจากภูมิประเทศ (รูปที่ 1 [2]) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่อากาศยานทำการบินในระดับที่ไม่สูงมาก จะทำให้มีข้อจำกัดในการรับส่งข้อมูล กล่าวคือ การรับส่งข้อมูลมีความไม่ต่อเนื่อง [2]



รูปที่ 1 ข้อจำกัดของการติดตามอากาศยานด้วย SSR

#### 4.3 เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geo-Informatics)

เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยการบูรณาการองค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing : RS) ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) และระบบการกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System: GNSS) เข้าด้วยกัน [4] ซึ่งในปัจจุบัน เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GNSS) ได้เข้ามามีบทบาทและเกี่ยวข้องกับการใช้ชีวิตประจำวัน โดยจะเห็นได้จากจำนวนที่มากขึ้นและพัฒนาการแบบก้าวกระโดดของโปรแกรมประยุกต์ (Application) รวมถึงแพลตฟอร์ม (Platform) ที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งบนพื้นโลก เช่น การติดตามเป้าหมาย การค้นหาตำแหน่ง และการนำทางของผู้ขับขี่ยานพาหนะ เป็นต้น โดยโปรแกรมที่ได้รับความนิยมจากผู้ใช้งานทั่วไป ได้แก่ Google Maps นอกจากนี้ในส่วนของผู้ใช้งานระดับองค์กรยังมีแพลตฟอร์มที่สามารถนำมาติดตั้งใช้งานแบบไม่เสียค่าใช้จ่าย ได้แก่ ระบบ Traccar [5] ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้ระบบดังกล่าวสำหรับทดลองรับส่งข้อมูลระหว่างภาคอากาศและภาคพื้น โดยใช้อุปกรณ์ระบุและส่งข้อมูลตำแหน่งแบบพกพา (GPS Tracker) รุ่น AT6 3G Asset GPS Tracker (รูปที่ 2) [6] ในการส่งข้อมูลพิกัดมายังเครื่องแม่ข่าย (Server) ของระบบ Traccar ผ่านรูปแบบ GPRS protocol ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 [7, 8] ซึ่งก่อนการใช้งานจะต้องทำการตั้งค่าตามที่ระบุไว้ในคู่มือการใช้งานให้เรียบร้อย นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการใช้โทรศัพท์สมาร์ตโฟนแทนอุปกรณ์ GPS Tracker ผู้ใช้งานสามารถติดตั้งแอปพลิเคชัน Traccar Client ได้ ซึ่งในปัจจุบันรองรับทั้งระบบปฏิบัติการ iOS และ Android



รูปที่ 2 GPS Tracker (AT6 3G Asset GPS Tracker)

**Description of field content**

keywords	time	Cell phone number			latit ude	S / N	Lo ng it ude	E/W	Sp ee d	direction /request address
.001	.0809231929	.13554900601	F/L	A/V		S / N		E/W		360.00/1

Continued access

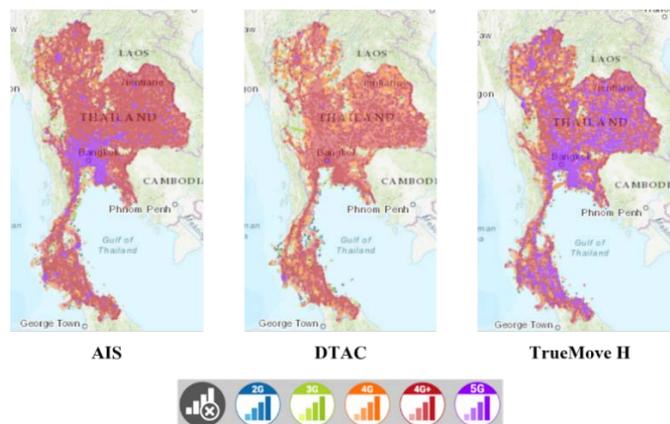
Altitude	ACC state	Door State	First fuel sensor	Second fuel sensor	Temperature	
	1	1				;

1. . acc  
**For example:**  
 imei:353451044508750,001,0809231929,13554900601,F,055403.000,A,2233.1870,N,11354.3067,E,0.00,30.1,65.43,1.0,10.5%,0.0%,28;

รูปที่ 3 รูปแบบการสื่อสารข้อมูล GPRS Protocol

4.4 การสื่อสารระหว่างภาคพื้นและภาคอากาศ

ในส่วนของการสื่อสารข้อมูลพิกัดตำแหน่งระหว่างภาคพื้นและภาคอากาศ ผู้วิจัยได้เลือกใช้บริการเครือข่ายเซลลูลาร์จากผู้ให้บริการ AIS, DTAC และ TrueMove H ซึ่งมีพื้นที่การให้บริการตามแผนที่แสดงความครอบคลุมของเครือข่าย (รูปที่ 4) [9]



รูปที่ 4 แผนที่แสดงความครอบคลุมของเครือข่าย AIS, DTAC และ TrueMove H

การประยุกต์ใช้เครือข่ายเซลลูลาร์ในการติดตามเป้าหมาย ได้แก่ บุคคล ยานพาหนะ ตลอดจนอากาศยาน ถือได้ว่าเป็นหัวข้อที่นักวิจัยได้ให้ความสำคัญอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยเรื่อง GPS/GSM Based Low Altitude Rotary Wing Aircraft Tracking System ที่นำเสนอระบบติดตามอากาศยานปีกหมุนที่ทำการบินบนระดับความสูงที่ไม่มาก เช่น เฮลิคอปเตอร์ ด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี GPS tracking และเทคโนโลยี GSM ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้เสนอให้นำ GPS module และ SIM900 GSM module มาเชื่อมต่อกับ Arduino เพื่อรับข้อมูลพิกัดภูมิศาสตร์ของเฮลิคอปเตอร์ผ่านทาง GPS module แล้วส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานโดยใช้ SIM900 GSM module ผ่านเครือข่าย GSM และข้อมูลพิกัดจะถูกนำเสนอบนแอปพลิเคชัน Google Maps [10]

นอกจากนี้งานวิจัยเรื่อง Tracking Light Aircraft with Smartphones at Low Altitudes ที่มีวัตถุประสงค์ในการนำโทรศัพท์มือถือมาใช้เป็น Transponder ของอากาศยานขนาดเล็ก เช่น Microlight aircraft, Ultralight aircraft หรือ Gyrocopters สำหรับพัฒนาระบบติดตามอากาศยานที่ระดับความสูงที่ไม่มาก เพื่อแก้ไขปัญหาข้อจำกัดของเรดาร์ในการติดตามอากาศยานในพื้นที่ที่มีการบดบังของภูมิประเทศ โดยได้จัดทำแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ และใช้เทคโนโลยี GPS ของโทรศัพท์มือถือ สำหรับการส่งข้อมูลพิกัดภูมิศาสตร์, ความสูง, ความเร็ว รวมถึงส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) ผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์ [2]

## 5. การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์ในการติดตามอากาศยานสำหรับการค้นหาและช่วยชีวิต โดยได้ดำเนินการตามแนวทาง System Development Life Cycle (SDLC) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 5.1 กำหนดปัญหา

ตำแหน่งพิกัดของอากาศยานสุดท้ายถือได้ว่าเป็นความสำคัญที่สุดสำหรับทีมค้นหาและช่วยชีวิต ซึ่งหากทราบตำแหน่งที่แน่นอนและแม่นยำ จะทำให้การส่งความช่วยเหลือไปยังผู้รอดชีวิตเป็นไปอย่างทันท่วงที และลดความสูญเสียได้อีกทั้งการวางแผนค้นหาและช่วยชีวิตที่เป็นระบบจะทำให้การประสานสอดคล้องระหว่างหน่วยงานเป็นไปด้วยความราบรื่น ดังนั้น หัวใจสำคัญของการพัฒนาระบบงาน คือ ระบบจะต้องอำนวยความสะดวกให้ทีมงานค้นหาและช่วยชีวิตทราบพิกัดสุดท้ายของอากาศยานได้อย่างแม่นยำที่สุด รวมถึงระบบจะต้องสนับสนุนการวางแผนและรายงานการปฏิบัติงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้การทำงานเป็นระบบมากขึ้น

### 5.2 การวิเคราะห์

จากข้อจำกัดของเรดาร์ที่กล่าวมาแล้วในข้อ 4.2 ส่งผลให้ต้องค้นหาอากาศยานที่เกิดอุบัติเหตุเป็นพื้นที่บริเวณกว้าง ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อทำการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซลลูลาร์ที่มีโครงข่ายครอบคลุมมากกว่าทดแทนเรดาร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามอากาศยานในระดับต่ำ โดยผู้ใช้งานมีความต้องการใน 2 ประเด็นหลัก ดังนี้

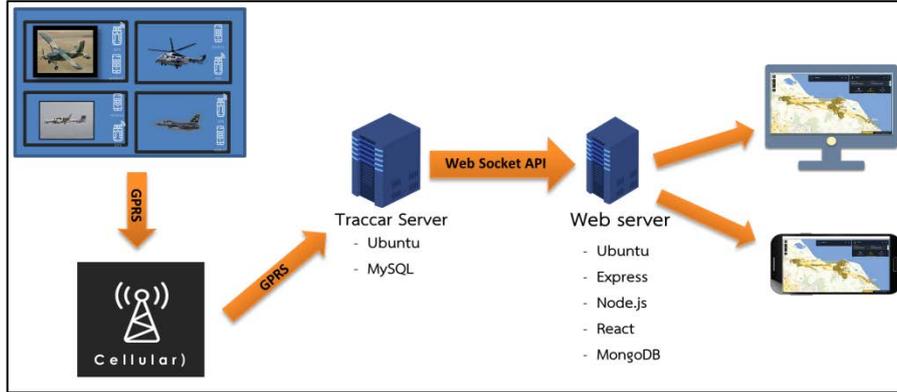
5.2.1 สถานการณ์ปกติ ผู้ใช้งานจะต้องทราบการเคลื่อนไหวของอากาศยานที่ติดตั้งอุปกรณ์ GPS Tracker และโทรศัพท์มือถือที่ลงทะเบียนใช้งาน โดยสามารถแสดงภาพรวมของอากาศยานที่อยู่ในระบบได้

5.2.2 สถานการณ์ที่อากาศยานเกิดอุบัติเหตุ ผู้ใช้งานส่วนกลาง (Administrators) จะต้องสามารถทราบถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยระบบจะทำการเปลี่ยนแปลงสัญลักษณ์ที่แสดงบนแผนที่ ทำให้เมื่ออากาศยานเกิดอุบัติเหตุ เจ้าหน้าที่จะสามารถทราบตำแหน่งสุดท้าย และแจ้งให้หน่วยที่เกี่ยวข้องรับทราบต่อไปได้อย่างรวดเร็ว

### 5.3 การออกแบบ

จากข้อมูลที่ได้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการติดตามอากาศยาน ซึ่งสามารถสรุปได้ใน 2 ประเด็นหลัก ดังนี้

5.3.1 สถาปัตยกรรมของระบบ ภาพรวมของระบบจะเป็นไปตามรูปที่ 5 อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 5 สถาปัตยกรรมของระบบ

1) อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบพกพา (GPS Tracker) พร้อมติดตั้งซิมการ์ด จะถูกตั้งค่าการรับส่งข้อมูลผ่าน GPRS Protocol (รูปที่ 3) รวมถึงต้องลงทะเบียนก่อนการนำมาใช้งานร่วมกับระบบ และเมื่อทำการลงทะเบียนใช้งานเรียบร้อย อุปกรณ์จะทำการส่งข้อมูลพิกัดผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายที่ติดตั้งระบบ Traccar ในทุก ๆ 5 วินาที (สามารถปรับวงรอบการส่งข้อมูลได้ตามความเหมาะสม) และในกรณีที่ผู้ใช้โทรศัพท์สมาร์ทโฟนผู้ใช้งานจะต้องติดตั้งแอปพลิเคชัน Traccar Client พร้อมกับตั้งค่าการรับส่งข้อมูลตามที่แอปพลิเคชันดังกล่าวกำหนด รวมถึงต้องนำโทรศัพท์สมาร์ทโฟนมาลงทะเบียนเข้าใช้งานระบบด้วย

2) เมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายของระบบ Traccar ได้รับข้อมูลพิกัดจากอุปกรณ์ GPS Tracker หรือโทรศัพท์สมาร์ทโฟน ระบบ Traccar จะทำการประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บและแสดงผลร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยการจัดเก็บข้อมูลในระบบ Traccar ผู้วิจัยได้เลือกกระบวนฐานข้อมูล MySQL สำหรับจัดเก็บข้อมูลพิกัดตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ผ่านการประมวลผลแล้ว

3) ในส่วนของระบบติดตามอากาศยาน จะทำการพัฒนาระบบในรูปแบบ Web Application ที่จะทำการเชื่อมโยงข้อมูลตำแหน่งอุปกรณ์ GPS Tracker หรือโทรศัพท์สมาร์ทโฟนผ่าน Web Socket API ของระบบ Traccar ซึ่งมีโครงสร้างข้อมูลตามตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6 พร้อมทั้งทำการแสดงผลข้อมูลพิกัดตำแหน่งไปบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้อง โดยการพัฒนาในส่วนนี้ผู้วิจัยได้เลือกออกกระบวนโดยใช้ระบบปฏิบัติการ Ubuntu เวอร์ชัน 18.04, ใช้ Express เป็น Web Server, ใช้ Node.js สำหรับการพัฒนา Back-end, ใช้ React สำหรับการพัฒนา Front-end และใช้ระบบฐานข้อมูล MongoDB สำหรับจัดเก็บข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากอุปกรณ์ GPS Tracker และโทรศัพท์สมาร์ทโฟน ตลอดจนจัดเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับทั้งระบบฯ

```
{ "id": 0, "deviceId": 0, "protocol": "string", "deviceTime": "2019-08-24T14:15:22Z",
  "fixTime": "2019-08-24T14:15:22Z", "serverTime": "2019-08-24T14:15:22Z", "outdated": true,
  "valid": true, "latitude": 0, "longitude": 0, "altitude": 0, "speed": 0, "course": 0, "address": "string",
  "accuracy": 0, "network": {}, "attributes": {} }
```

รูปที่ 6 โครงสร้างข้อมูล Application Program Interface (API)

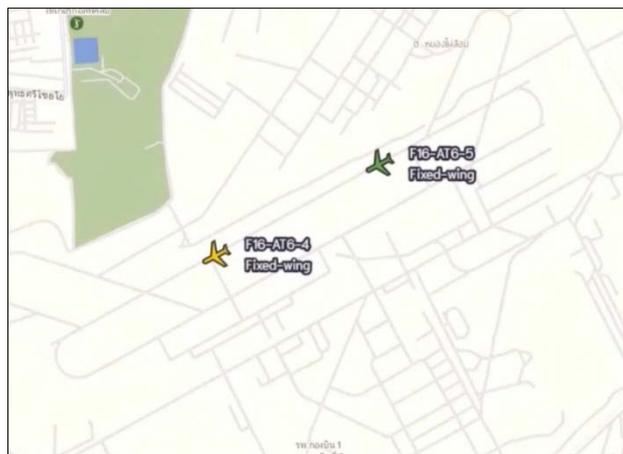
5.3.2 ส่วนโปรแกรมประยุกต์สำหรับผู้ใช้งาน เป็นส่วนที่พัฒนาสำหรับให้ผู้ใช้งานสามารถเรียกดูข้อมูล การติดตามอากาศยานผ่าน Web Application จากคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์พกพา โดยโปรแกรมฯ จะมีฟังก์ชันการใช้งาน โดยสรุป ดังนี้

1) การลงทะเบียนอุปกรณ์ เป็นฟังก์ชันที่เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานจะต้องทำการลงทะเบียนอุปกรณ์ GPS Tracker รวมถึงโทรศัพท์มือถือ

2) การติดตามอากาศยาน ผู้ใช้งานสามารถติดตามอากาศยานแบบ Near Real Time โดยอุปกรณ์ GPS Tracker หรือโทรศัพท์มือถือ (ที่ผ่านการลงทะเบียนใช้งาน) จะส่งตำแหน่งมาระบบฯ ตามวงรอบที่กำหนด (เบื้องต้นกำหนดไว้ทุก ๆ 5 วินาที) ซึ่งผู้ใช้งานสามารถทราบสถานะอากาศยานจากสีที่แสดง โดยแต่ละสีมีความหมาย ดังต่อไปนี้ (ตัวอย่างการแสดงผลตามรูปที่ 7)

- สีเขียว หมายถึง อากาศยานอยู่ในสถานะปกติ มีการส่งสัญญาณมายังภาคพื้นตลอดเวลา  
- สีส้ม หมายถึง อากาศยานอยู่ในสถานะที่ควรต้องเฝ้าระวัง อันเนื่องมาจากมีการขาดหายของสัญญาณ จากเครือข่ายเซลลูลาร์ ซึ่งเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานส่วนกลาง จำเป็นต้องทำการตรวจสอบสถานะของอากาศยานผ่านระบบเรดาร์ ควบคู่กันไปด้วย

- สีแดง หมายถึง อากาศยานประสบอุบัติเหตุหรือเกิดเหตุฉุกเฉิน เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานส่วนกลาง คอยตรวจสอบสถานะของอากาศยานที่เป็นสีส้มร่วมกับระบบเรดาร์ และในกรณีที่ตรวจพบหรือยืนยันได้ว่าอากาศยานเกิด อุบัติเหตุ เจ้าหน้าที่จะเปลี่ยนสถานะของอากาศยานจากสีส้มเป็นสีแดง พร้อมกับนำเรียนพิกัดชุดท้าย ที่ตรวจพบกับผู้บังคับบัญชาให้สั่งการหน่วยเกี่ยวข้องในการปฏิบัติการกักกันและช่วยชีวิตต่อไป



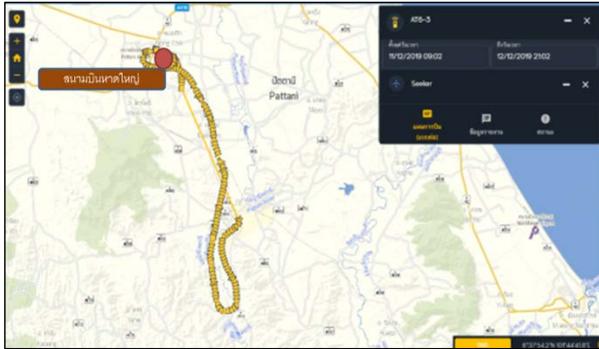
รูปที่ 7 การแสดงสถานะของอากาศยานโดยใช้สี

3) การตรวจสอบประวัติการเดินทางของอากาศยาน ผู้ใช้งานสามารถใช้ฟังก์ชันในส่วนนี้เพื่อเรียกดูประวัติ การเดินทางของอากาศยานได้

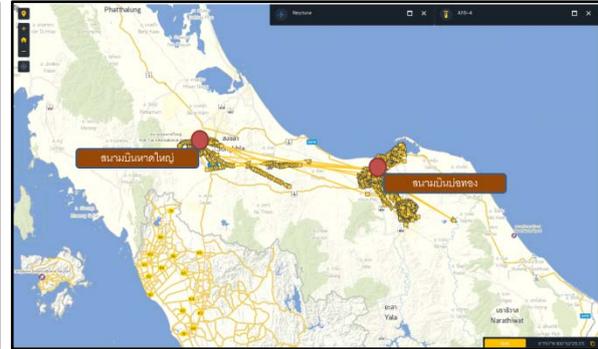
4) การวางแผนการกักกันและช่วยชีวิตผู้ประสบเหตุ ฟังก์ชันนี้จะเป็นเครื่องมือพื้นฐานการใช้งาน เกี่ยวกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ที่จะอำนวยความสะดวกให้กับเจ้าหน้าที่ในการวางแผนการปฏิบัติในการกักกันและ ช่วยชีวิต

#### 5.4 การพัฒนาและทดสอบ

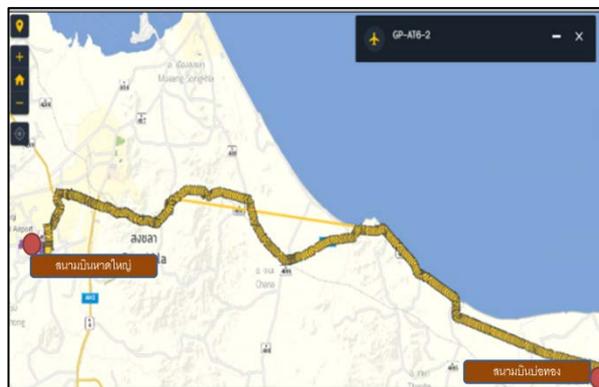
เป็นขั้นตอนการเขียน โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการติดตามอากาศยาน โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาระบบตามผลการวิเคราะห์ระบบในข้อ 5.2 และการออกแบบสถาปัตยกรรมที่ได้รับในข้อ 5.3 ซึ่งเมื่อพัฒนาระบบฯ เสร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการใช้งานร่วมกับอากาศยานของกองทัพอากาศ ได้แก่ AU-23, DA-42, Bell-412 และ F-16 A/B และได้ผลการทดสอบการใช้งานระบบฯ ร่วมกับอากาศยานทั้ง 4 แบบตามรูปที่ 8 - 11 ตามลำดับ



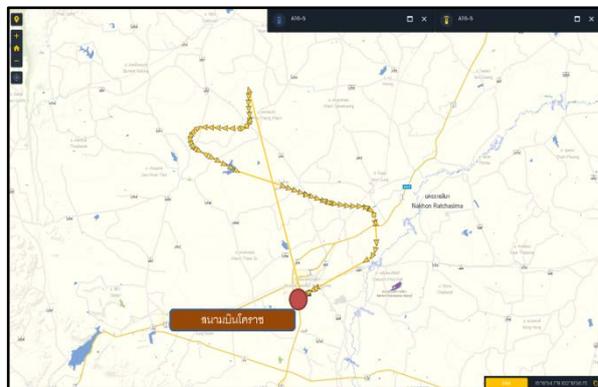
รูปที่ 8 ผลการบินทดสอบร่วมกับ AU-23



รูปที่ 9 ผลการบินทดสอบร่วมกับ DA-42



รูปที่ 10 ผลการบินทดสอบร่วมกับ Bell-412



รูปที่ 11 ผลการบินทดสอบร่วมกับ F-16 A/B

นอกจากนี้ยังได้มีการจัดเก็บข้อมูลที่คาดว่าจะจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความต่อเนื่องในการรับส่งสัญญาณระหว่างภาคอากาศและภาคพื้น โดยข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วย ระยะความสูงจากพื้นที่ทำการบินในการปฏิบัติการกิจ ความเร็วที่ใช้ในการบิน ระยะความสูงที่สัญญาณขาดหายหลังอากาศยานขึ้นบิน เวลาที่สัญญาณขาดหายหลังอากาศยานขึ้นบิน ระยะความสูงที่ตรวจจับสัญญาณ ได้ก่อนอากาศยานลงจอด และเวลาที่ตรวจจับสัญญาณ ได้ก่อนอากาศยานลงจอด โดยมีสรุปผลการทดสอบระบบตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลสรุปผลการทดสอบระบบด้วยการบินร่วมกับอากาศยาน

แบบอากาศยาน	จำนวนเที่ยวบิน	จำนวนชม.บินทดสอบ (ชม.)	ระยะความสูงเฉลี่ยที่ทำการบินจากพื้น (ฟุต)	ความเร็วโดยเฉลี่ย (น็อต)	ระยะความสูงเฉลี่ยที่สัญญาณขาดหายหลัง Take off (ฟุต)	เวลาเฉลี่ยที่สัญญาณขาดหายหลัง Take off	ระยะความสูงเฉลี่ยที่ตรวจจับได้ก่อน Landing (ฟุต)	เวลาเฉลี่ยที่ตรวจจับสัญญาณได้ก่อน Landing
F-16 A/B	9	5.25	20,000-30,000	350-420	1,500 - 2,000	20 - 40 วินาที	1,000 - 2,000	10 - 25 วินาที
DA-42	102	168.4	4,000-6,000	120-150	2,000 - 2,800	20 - 30 นาที	1,800 - 2,500	18 - 25 นาที
BELL-412	47	56.3	1,000 - 2,000	90-110	ตรวจจับได้อย่างต่อเนื่อง	ตรวจจับได้อย่างต่อเนื่อง	ตรวจจับได้อย่างต่อเนื่อง	ตรวจจับได้อย่างต่อเนื่อง
AU-23	71	140.8	1,500-7,000	90-120	2,500 - 3,000	30 - 45 นาที	2,000 - 2,500	25 - 30 นาที

### 5.5 การติดตั้งระบบ

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการติดตามอากาศยานได้ติดตั้งให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบฯ ผ่านเครือข่ายของกองทัพอากาศ โดยติดตั้งไว้ที่กรมข่าวทหารอากาศ

### 6. ผลการวิจัย

จากผลลัพธ์การทดสอบระบบฯ ร่วมกับอากาศยานของกองทัพอากาศตามตารางที่ 1 จะเห็นว่าอากาศยานที่มีความเร็วสูงอย่าง F-16 A/B ที่ปฏิบัติการกิจในชั้นความสูงมาก ๆ (รูปที่ 11) จะสามารถตรวจจับอากาศยานได้แก่ขณะที่ทำการบินขึ้นที่ระดับความสูงเพียง 1,500 - 2,000 ฟุต และก่อนลงจอดที่ระดับความสูง 1,000 - 2,000 ฟุต เท่านั้น อีกทั้งเวลาที่ตรวจจับในช่วงเวลาที่ทำการบินขึ้นก็เป็นเวลาเพียงช่วงสั้น ๆ คือ 20 - 40 วินาที และเวลาที่ตรวจจับได้ก่อนการลงจอดเพียง 10 - 25 วินาที

ในขณะที่อากาศยานที่ปฏิบัติการกิจในระดับความสูงที่ไม่มากนักและมีความเร็วต่ำอย่างเฮลิคอปเตอร์ BELL-412 (รูปที่ 10) จะสามารถตรวจจับได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้อากาศยานขนาดเล็ก คือ DA-42 และ AU-23 ที่ปฏิบัติการกิจที่ระดับความสูง 4,000 - 6,000 ฟุต และ 1,500 - 7,000 ฟุต ตามลำดับ (รูปที่ 8 และ 9) นั้น จะสามารถตรวจจับได้ก่อนขึ้นทำการบินจนถึงระดับความสูงประมาณ 2,000 - 2,800 ฟุต และ 2,500 - 3,000 ฟุต สัญญาณก็จะเริ่มขาดหายที่เวลา 20 - 30 นาที และ 30 - 45 นาที และจะกลับมาตรวจจับได้อีกรอบที่ระดับความสูง 1,800 - 2,500 ฟุต และ 2,000 - 2,500 ฟุต ที่เวลาประมาณ 18 - 25 นาที และ 25 - 30 นาที ก่อนทำการลงจอด

### 7. สรุปผล

จากข้อจำกัดที่เรดาร์สามารถตรวจจับอากาศยานได้ในระดับความสูงที่ไม่ถูกบดบังจากภูมิประเทศนั้น ผู้วิจัยจึงได้คิดแนวทางที่มุ่งเน้นการเพิ่มศักยภาพตรวจจับอากาศยานในระดับที่ไม่สูงมาก โดยการประยุกต์ใช้การส่งข้อมูลพิกัดตำแหน่งของอากาศยานผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์เนื่องจากมีโครงข่ายที่ครอบคลุมมากกว่า ซึ่งเดิมเต็มขีดความสามารถในการตรวจจับอากาศยานให้ครอบคลุมในทุกระดับชั้นความสูง เพื่อให้ภารกิจการค้นหาและช่วยชีวิตสามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยการประยุกต์ใช้การรับส่งข้อมูลตำแหน่งพิกัดของอากาศยานผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ และใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับการแสดงผลในการติดตามอากาศยาน อีกทั้งยังสามารถแสดงตำแหน่งและประวัติการเดินทางในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการตรวจจับอากาศยานและการรับส่งข้อมูลระหว่างภาคพื้นและภาคอากาศก็ขึ้นอยู่กับภารกิจของอากาศยานแต่ละแบบที่ใช้ความเร็วและความสูงที่แตกต่างกัน แต่หากพิจารณาถึงวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย

ที่ต้องการทราบข้อมูลพิกัดสุดท้ายของอากาศยานซึ่งมีความสำคัญที่สุด จะเห็นได้ว่าระบบฯ นี้สามารถใช้ได้กับอากาศยานทุกแบบ และจะทำให้เป็นการเพิ่มศักยภาพการตรวจจับสำหรับภารกิจการค้นหาและช่วยชีวิตให้กับผู้ปฏิบัติงานในห้องบัญชาการรบ (War Room) ของศูนย์ปฏิบัติการในทุกระดับ โดยจะสามารถใช้ระบบฯ นี้เป็นเครื่องมือเพื่อให้เกิดสถานการณ์ที่ยั่งยืนร่วมกัน และประกอบการตัดสินใจในการกิจที่เกี่ยวข้อง ได้รวดเร็ว และทันต่อเหตุการณ์

#### 8. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นใช้ระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ เป็นสื่อสำหรับรับส่งข้อมูลพิกัดของตำแหน่งอากาศยาน ทำให้มีความจำเป็นต้องพึ่งพาผู้ให้บริการระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ ซึ่งแต่ละผู้ให้บริการจะมีพื้นที่การให้บริการที่ไม่เท่ากัน โดยผู้ใช้งานจะต้องเลือกใช้ผู้ให้บริการที่เหมาะสมตามแต่ละพื้นที่ ผู้วิจัยจึงขอเสนอให้พัฒนาการติดต่อสื่อสารพิกัดผ่านระบบวิทยุที่มีใช้ในกองทัพอากาศ เพื่อลดค่าใช้จ่ายการใช้บริการเครือข่ายเซลลูลาร์ และเป็นการสนับสนุนการพัฒนาที่พึ่งพาตนเองของกองทัพอากาศต่อไป

#### 9. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ (สวอ.ทอ.) และพลอากาศตรี ชัยณรงค์ พันธุ์เทศ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับการพัฒนางานวิจัยมา ณ โอกาสนี้

#### 10. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ, กองค้นหาและช่วยชีวิต. (2563). คู่มือการปฏิบัติการกิจ การค้นหาและช่วยชีวิตในพื้นที่การรบ กองทัพอากาศ. กรุงเทพฯ.
- [2] Lilly, B., Cetinkaya, D., & Durak, U.. (2021). Tracking Light Aircraft with Smartphones at Low Altitudes. Information, 12(3): 105. <https://doi.org/10.3390/info12030105>
- [3] บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด. ระบบติดตามอากาศยาน. ค้นเมื่อ 26 เมษายน 2564. จาก <https://www.aerOTHai.co.th/th/services/ระบบติดตามอากาศยาน>
- [4] ศุภกานต์ แก้วเหลี่ยม และภูมิพัฒน์ ดวงกลาง. (2563). ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ประยุกต์เพื่อการติดตามอากาศยานพาหนะและบุคคล กองทัพอากาศ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ, 16(1): 42-51.
- [5] Traccar. (2020). ค้นเมื่อ 29 ตุลาคม 2563. จาก <https://www.traccar.org/>
- [6] Concox. (2020). AT6 3G Asset GPS Tracker. ค้นเมื่อ 30 ตุลาคม 2563. จาก <https://www.iconcox.com/products/at6-3g-gps-tracker.html>
- [7] Traccar. (2020). Protocols. ค้นเมื่อ 31 ตุลาคม 2563. จาก <https://www.traccar.org/protocols/>
- [8] SHENZHEN COBAN ELECTRONICS CO.LTD. (2014). GPRS PROTOCOL. (p. 4). <https://www.traccar.org/protocols/>
- [9] nPerf. (2021). แผนที่ความครอบคลุม 3G/ 4G/ 5G, Thailand. ค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2564. จาก <https://cdn.nperf.com/th/map/TH/>
- [10] Rahman, A. A. M. Mostafizur, Hossain, S., Tuku, I. J., Hossam-E-Haider, Md., Amin, Md. Syedul, & Bhuiyan, M. Arif Sobhan. (2016, November). GPS/GSM Based Low Altitude Rotary Wing Aircraft Tracking System. Paper presented at the 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES)

**การตัดสินใจเลือกรูปแบบในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง**  
**Type Selection on Solid Waste Management in the Don Mueang Royal Thai Air Force**

<sup>1\*</sup> นพรัตน์ นุ่มศิริ, <sup>2#</sup> กมลชนก สุทธิวาหนฤพุดิ

<sup>1</sup>สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>2</sup>คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>1\*</sup> Nopparat Noomsiri, <sup>2#</sup> Kamonchanok Suthiwartnarueput

<sup>1</sup>Logistics and Supply Chain Management Chulalongkorn University

<sup>2</sup>Faculty of Commerce and Accountancy Chulalongkorn University

\*nopparat.niim@gmail.com, #kamonchanok.s@chula.ac.th

Received : March, 10 2021  
 Revised : June, 08 2021  
 Accepted : June, 22 2021

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการตัดสินใจเลือกรูปแบบในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยและพิจารณาเลือกรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง เริ่มจากการรวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัย แล้วนำมาหาค่าดัชนีความสอดคล้องเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง โดยนำกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์มาช่วยหาคำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลต่อการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง รวมถึงช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการจัดการมูลฝอยจาก 3 รูปแบบคือ กองทัพอากาศดำเนินการเอง การจัดจ้างองค์กรเอกชน และการจัดจ้างองค์กรของรัฐ โดยการเก็บข้อมูลแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศจำนวน 7 ท่าน ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมืองสูงสุด 3 ลำดับแรกคือ ปัจจัยด้านการจัดการมูลฝอยเพื่อตอบสนองยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมของกองทัพอากาศ ปัจจัยด้านความปลอดภัยต่อบุคลากร และปัจจัยด้านหน่วยงานที่รับผิดชอบในการจัดการมูลฝอย สำหรับรูปแบบการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมืองที่เหมาะสมที่สุด คือ กองทัพอากาศดำเนินการเอง

**คำสำคัญ:** การจัดการมูลฝอย, การจ้างงานภายนอก, กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, กองทัพอากาศ

**Abstract**

This research is to study the decision making of the waste management model in the Don Mueang Royal Thai Air Force. The objectives of the study are to consider factors and select a suitable model for waste management in the Don Mueang Royal Thai Air Force. The first procedure of this research was accumulating factors and theories from literature reviews. Then, the Item-Objective Congruence Index (IOC) was calculated. The index was used to select the factors which had effects on the waste management of the Don Mueang Royal Thai Air Force. The

Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to prioritize the factors and select the most suitable waste management model. Three models included the operation of the Royal Thai Air Force, the outsourcing of private sectors and the outsourcing of government organizations. Data were collected via questionnaires from seven experts who work in the Air Force solid waste management. The results revealed that the waste management in compliance with the Royal Thai Air Force environmental strategy, the security for Royal Thai Air Force personnel, and the departments responsible for the waste management are the top three factors which affect the waste management in the Don Mueang Royal Thai Air Force. Additionally, the most suitable model for the waste management in the Don Mueang Royal Thai Air Force is the model operated by the Royal Thai Air Force.

**Keywords:** Solid Waste Management, Outsource, Analytic Hierarchy Process, The Royal Thai Air Force

## 1. บทนำ

ขยะหรือมูลฝอย (Refuse or Solid Waste) หมายถึงของเสียที่อยู่ในรูปของแข็งทั้งที่เน่าเปื่อยได้และไม่เน่าเปื่อยได้แก่ ขยะเปียก ขยะแห้ง ซากสัตว์ เศษวัสดุเหลือใช้พวกเศษแก้ว ไม้ โลหะ ยาง พลาสติก ฯลฯ [1] โดยมีแหล่งกำเนิดมูลฝอยที่เกิดจากที่พักอาศัย ออค์กร โรงงานอุตสาหกรรม หรือตลาดสด ซึ่งจะมีปริมาณ และลักษณะแตกต่างกันออกไป มีทั้งย่อยสลายได้ยาก และย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งจำเป็นต้องเก็บรวบรวม และนำไปกำจัดให้ถูกหลักสุขาภิบาล ซึ่งในปัจจุบันการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นในหลายประเทศในเอเชียส่งผลให้อัตราการบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างมาก เช่น พื้นที่ในเขตเมืองของเอเชียมีอัตราการเกิดขยะประมาณ 760,000 ตันต่อวัน และคาดว่าจะมีอัตราเพิ่มขึ้นเป็น 1.8 ล้านตันต่อวัน ภายในปี พ.ศ.2568 ส่งผลให้ต้องใช้เงินประมาณ 25,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในการจัดการมูลฝอยต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นอย่างน้อย 50,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี พ.ศ.2568 [2] โดย [3] กล่าวว่าปัญหาและอุปสรรคในการจัดการมูลฝอยที่สำคัญ ได้แก่ การขาดแคลนงบประมาณในการจัดการมูลฝอย การขาดแคลนแผนงานที่ชัดเจน ด้านการจัดการมูลฝอย ประชาชนไม่ให้ความร่วมมือในการจัดการมูลฝอย ขาดแคลนบุคลากรในการจัดการมูลฝอย บุคลากรที่ขาดความรู้ และความเข้าใจในการดำเนินการจัดการมูลฝอย เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดปริมาณมูลฝอยตกค้างตามสถานที่ต่าง ๆ หรือนำไปกำจัดไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาล เช่น วิกิ่งองบนพื้นซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อในด้านต่าง ๆ ต่อชุมชน และองค์กร ส่งผลให้ชุมชนหรือองค์กรตกเสี่ยงทัศนียภาพ มีปัญหาเรื่องกลิ่น ปัญหาด้านสุขอนามัย ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นแหล่งเพาะเชื้อโรค และเป็นแหล่งที่อยู่ของสัตว์พาหะนำโรค เช่น หนู และแมลงวัน เป็นต้น

กรมช่างโยธาทหารอากาศ ในส่วนของแผนกสิ่งแวดล้อม กองประปาและสุขาภิบาล มีหน้าที่ให้บริการจัดเก็บมูลฝอยในพื้นที่ของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง ซึ่งเป็นมูลฝอยทั่วไป และมีปริมาณมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 9-12 ตันต่อวัน โดยมีรถจัดเก็บมูลฝอยออกให้บริการจัดเก็บมูลฝอยทุกวันตามสถานที่ราชการ และส่วนของบ้านพักอาศัย ซึ่งรถจัดเก็บมูลฝอยที่ออกให้บริการนั้นมีทั้งหมด 3 ประเภท แบ่งเป็นรถแบบเปิดข้างเทท้าย แผนกสิ่งแวดล้อมเป็นผู้ดูแล ส่วนรถเก็บขนมูลฝอยประเภทมีเครื่องอัดมูลฝอย และรถบรรทุกเทท้าย แผนกเครื่องทุ่นแรง กองสนามบินเป็นผู้ดูแล รวมมีรถเก็บขนมูลฝอยออกให้บริการ 6 คันต่อวัน ในวันจันทร์ถึงศุกร์ และ 2 คันต่อวัน ในวันเสาร์ วันอาทิตย์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์ โดยรถแต่ละประเภทจะแยกตามพื้นที่ให้บริการ ในส่วนของผู้ปฏิบัติงานจะแบ่งเป็นพนักงานราชการของกองทัพอากาศ ปฏิบัติหน้าที่คนขับรถ และมีการจ้างในลักษณะเฉพาะกิจรายวันทำหน้าที่เจ้าหน้าที่เก็บมูลฝอยในทุก ๆ วัน พบว่าการบริหารจัดการการดำเนินงานให้บริการเก็บมูลฝอยในพื้นที่กองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมืองนั้น มีการจัดการด้านการกิจ และการสนับสนุนยานพาหนะคนละส่วนงานกัน ซึ่งส่งผลในด้านความพร้อมของอุปกรณ์ และการแก้ปัญหาในกรณีรถเก็บ

ขนมูลฝอยเสียหาย ซ่อมแซมหรือปัญหาเฉพาะหน้าอื่น ๆ รวมทั้งในด้านเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานที่มีการจ้างงานเป็นลักษณะชั่วคราวและไม่แน่นอน ทั้งนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการให้บริการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง ส่งผลให้ไม่สามารถปฏิบัติงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ดังนั้น การเลือกรูปแบบการให้บริการจัดการมูลฝอยที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมืองได้

## 2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 พิจารณาเลือกวิธีการในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมืองที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดขอบเขตการศึกษาในส่วนสถานที่ราชการและบ้านพักอาศัยที่กรมช่างโยธาทหารอากาศให้บริการอยู่ในปัจจุบัน จาก 3 รูปแบบ ได้แก่ กองทัพอากาศดำเนินการเอง การจัดจ้างองค์กรเอกชน และการจัดจ้างองค์กรของรัฐ

2.2 เก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญในกองทัพอากาศ จำนวน 7 ท่าน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

2.2.1 ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ จำนวน 5 ท่าน

2.2.2 ผู้มีประสบการณ์เกี่ยวกับงานการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ จำนวน 2 ท่าน

## 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 การจัดการมูลฝอย

การจัดการมูลฝอยเกี่ยวข้องกับหลายศาสตร์ โดยการจัดการมูลฝอยที่มีประสิทธิภาพ ต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายมิติ เช่น ลักษณะทางสังคม วัฒนธรรม วิธีการดำเนินชีวิต และพฤติกรรมของบุคคลในแต่ละพื้นที่ ลักษณะของพื้นที่ที่แตกต่างกัน ประเภทของแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน เครื่องจักรและเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในแต่ละขั้นตอนของการจัดการมูลฝอย รวมถึงการบริหารจัดการของเจ้าหน้าที่หรือองค์กรที่ปฏิบัติงานในส่วนของจัดการมูลฝอย และแนวทางในการแก้ไขผลกระทบต่าง ๆ ดังนั้น การจัดการมูลฝอยจึงต้องทำอย่างเป็นองค์รวมหรือแบบบูรณาการ [3] แบ่งแยกออกได้เป็น 6 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การก่อกองมูลฝอย
- 2) การรวบรวมมูลฝอย ณ แหล่งกำเนิด
- 3) การเก็บขน
- 4) การคัดแยก ปรับแต่ง และการแปรรูป
- 5) การขนถ่ายและขนส่งมูลฝอย
- 6) การกำจัดมูลฝอย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการทำงานของกรมช่างโยธาทหารอากาศ ซึ่งเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง โดยมีหน้าที่จัดการมูลฝอยในส่วนขั้นตอนการเก็บขนเป็นหลัก โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการจัดการมูลฝอย ทั้งการศึกษางานวิจัยในประเทศไทยและต่างประเทศ เช่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการศึกษาการบริหารงานเปรียบเทียบระดับการจัดการมูลฝอยของเทศบาลเมืองนครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม พบว่า ระดับการบริหารจัดการมูลฝอยโดยรวมและในแต่ละด้านอยู่ในระดับปานกลาง เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ด้านการวางแผน ด้านการจัดการองค์กร ด้านงบประมาณ ด้านการจัดบุคลากร และด้านเทคโนโลยี ทั้งนี้ มีข้อเสนอแนะให้ชุมชนและทุกภาคส่วนมีส่วนร่วมในการจัดทำแผนจัดการมูลฝอย ควรจัดแบ่งสายงานและปรับปรุงเส้นทางการเก็บมูลฝอยให้ชัดเจนอย่างเป็นระบบ ควรจัดบุคลากรให้เพียงพอและเหมาะสมกับงาน ควรจัดงบประมาณดำเนินการเกี่ยวกับการจัดการมูลฝอยให้เพียงพอและทั่วถึง และจัดหาวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ทันสมัย รวมทั้งอุปกรณ์เครื่องมือในการจัดเก็บมูลฝอยให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ [4] ในส่วนภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการศึกษาศึกษาภาพการจัดการ

ขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดระยอง เพื่อนำเสนอปัญหาขยะ และศักยภาพขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น พบว่าระยองเป็นจังหวัดหนึ่งที่ประสบปัญหาขยะ โดยองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นระยองมีความพร้อมต่อการจัดการด้านบุคลากร งบประมาณ และวัสดุอุปกรณ์ แต่ยังคงขาดระบบการจัดการที่มีประสิทธิภาพ [5] และภาคใต้ในจังหวัด นครศรีธรรมราช มีการศึกษาสภาพการดำเนินงานการบริหารจัดการมูลฝอยขององค์กรบริหารส่วนตำบลจังหวัด นครศรีธรรมราช พบว่ามีปริมาณมูลฝอยในพื้นที่ที่มีปริมาณ 1,588.95 ตันต่อวัน คิดเป็น 579,969 ตันต่อปี โดยปริมาณมูลฝอย ที่ได้รับการจัดการ 1,558.34 ตันต่อวัน คิดเป็น 568,793 ตันต่อปี และปริมาณมูลฝอยตกค้าง 30.62 ตันต่อวัน คิดเป็น 11,176 ตันต่อปี โดยมีปัญหาและอุปสรรคของการบริหารการจัดการมูลฝอยที่ตกค้าง เนื่องจากไม่มีนโยบายชัดเจนจากผู้บริหาร หน่วยงาน บุคลากรไม่เพียงพอ และไม่มีความรู้โดยตรง งบประมาณที่ได้รับจากการจัดสรรน้อยไม่เพียงพอ ไม่มีอุปกรณ์ สถานที่และระยะทางในการขนส่งไปยังพื้นที่ฝังกลบไกล และไม่มีการเก็บมูลฝอย ไม่มีสถานที่กำจัดมูลฝอย โดยเสนอแนะ แนวทางแก้ไขปัญหาลักษณะต่าง ๆ เพื่อให้การจัดการมูลฝอยประสบความสำเร็จ และมีความยั่งยืน [6] นอกเหนือจาก ประเทศไทยที่ประสบกับปัญหามูลฝอยที่เพิ่มมากขึ้นและปัญหาจากการจัดการมูลฝอยแล้ว ในต่างประเทศโดยเฉพาะ ประเทศที่มีอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นก็ประสบกับปัญหาเหล่านี้เช่นกัน ดังเช่นในประเทศอินโดนีเซียที่เป็นหนึ่งใน ประเทศอาเซียนที่มีจำนวนประชากรมากที่สุดประมาณ 220 ล้านคน และมีอัตราการเติบโต 1.2% ต่อปี การเติบโตของ ประชากรที่มากนำมาซึ่งปริมาณมูลฝอยที่เพิ่มขึ้นและกลายเป็นปัญหาใหญ่ของรัฐบาลในการจัดการมูลฝอย จากการศึกษา พบว่ามีปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อการจัดการมูลฝอยเช่น การขาดนโยบาย กลยุทธ์ และการสนับสนุนทางการเงิน การมีส่วนร่วมของภาคเอกชนและคนในชุมชนอยู่ในระดับที่ต่ำรวมถึงขาดประสิทธิภาพในการจัดการมูลฝอยตั้งแต่ใน ขั้นตอนการจัดเก็บและรวบรวมมูลฝอย การขนส่งมูลฝอย การจัดการและการกำจัดมูลฝอย รวมถึงมีกฎหมายด้านการจัดการ มูลฝอยที่ไม่ครอบคลุมส่งผลให้การจัดการมูลฝอยไม่มีประสิทธิภาพ [7]

### 3.2 Outsource

Outsource แปลโดยรวมคือ การจ้างงานภายนอก หมายถึง การที่องค์กรหรือหน่วยงานมอบหมายงานบางส่วน ให้กับองค์กรภายนอกมาดำเนินการแทน โดยองค์กรหลักจะเป็นผู้กำหนดและควบคุมกำกับทุกส่วน ตั้งแต่ต้นนโยบายไปจนถึง การปฏิบัติงานในทุกขั้นตอนของผู้รับจ้าง

[8] กล่าวว่า Outsource คือ การโอนย้ายกิจกรรมบางอย่างของบริษัทหรือองค์กร รวมทั้งอำนาจในการตัดสินใจในเรื่องที่เกี่ยวข้องให้กับองค์กรภายนอกที่รับหน้าที่นี้ โดยมีการทำสัญญาและจ่ายค่าตอบแทนสำหรับบริการนั้น

การจ้างงานภายนอกได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในธุรกิจต่าง ๆ เช่น ในธุรกิจด้านการโรงแรมเป็นธุรกิจที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย และได้มีการศึกษาโรงแรมในหมู่เกาะคานารี โดยสัมภาษณ์โรงแรมบนหมู่เกาะ คานารีจำนวน 50 โรงแรม เพื่อวิเคราะห์ข้อดีจากการจ้างงานภายนอกได้แก่ ด้านการลดค่าใช้จ่าย ด้านการปรับปรุงคุณภาพ ด้านการเพิ่มความยืดหยุ่นและการปรับปรุงด้านการบริการลูกค้า จากการศึกษาพบว่าการจ้างงานภายนอก มีอิทธิพลต่อ ด้านการปรับปรุงคุณภาพ การเพิ่มความยืดหยุ่นและการปรับปรุงด้านการบริการลูกค้า [9] ในส่วนของการผลิต ในภาคอุตสาหกรรม เช่น ในกรณีศึกษาอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องแต่งกายในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีปริมาณการสั่งซื้อ จำนวนมากเป็นบางช่วง ได้มีการจ้างงานภายนอกในการช่วยผลิต โดยใช้วิธีการแบบบูรณาการเพื่อสร้างแบบจำลองศึกษา ผลกระทบของการจ้างงานภายนอก ต่อต้นทุนการผลิต พบว่าการจ้างงานภายนอกสามารถช่วยประหยัดต้นทุนในการผลิตได้ อย่างมากเมื่อเทียบกับค่าแรงงานที่ต้องจ้างคนเพิ่มในการผลิตเพียงช่วงระยะเวลาสั้น [10] นอกจากนี้ด้านการทหาร ได้มีการศึกษาความยืดหยุ่นของแรงงาน การจัดกำลังคน การลดต้นทุน การจัดการความเสี่ยง ที่มีผลต่อการบริหาร การจ้างงานภายนอก ในการซ่อมสร้างยุทโธปกรณ์สายสรรพาวุธของกองทัพบก พบว่าความยืดหยุ่นของแรงงาน การจัดการ กำลังคน การลดต้นทุน การจัดการความเสี่ยง ส่งผลต่อการบริหารการจ้างงานภายนอกในการซ่อมสร้างยุทโธปกรณ์ สายสรรพาวุธของกองทัพบก [11]

3.3 ยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมกองทัพอากาศ พ.ศ.2561-2580

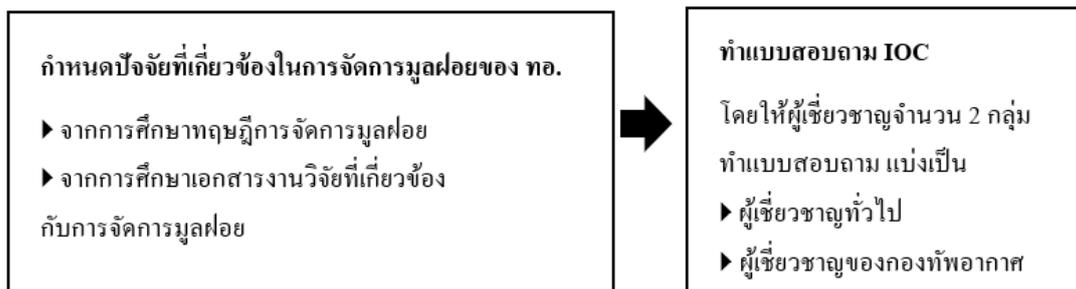
ผู้บัญชาการทหารอากาศอนุมัติให้จัดทำยุทธศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมกองทัพอากาศ มีเป้าหมายให้กองทัพอากาศเป็นกองทัพเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อยู่บนหลักความยั่งยืน สามารถจัดตั้งเป็นศูนย์การเรียนรู้ด้านสิ่งแวดล้อม และให้ข้าราชการกองทัพอากาศมีจิตสำนึก มีส่วนร่วมในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และเมื่อ 27 ตุลาคม พ.ศ.2560 ให้จัดทำยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมกองทัพอากาศ กำหนดเป้าหมาย “กองทัพอากาศสีเขียวโดยการจัดการมูลฝอยให้เหลือศูนย์ (Zero Waste) น้ำอุปโภคบริโภคเพียงพอ ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพ อากาศมีคุณภาพดี ปราศจากมลพิษ”

4. การดำเนินการวิจัย

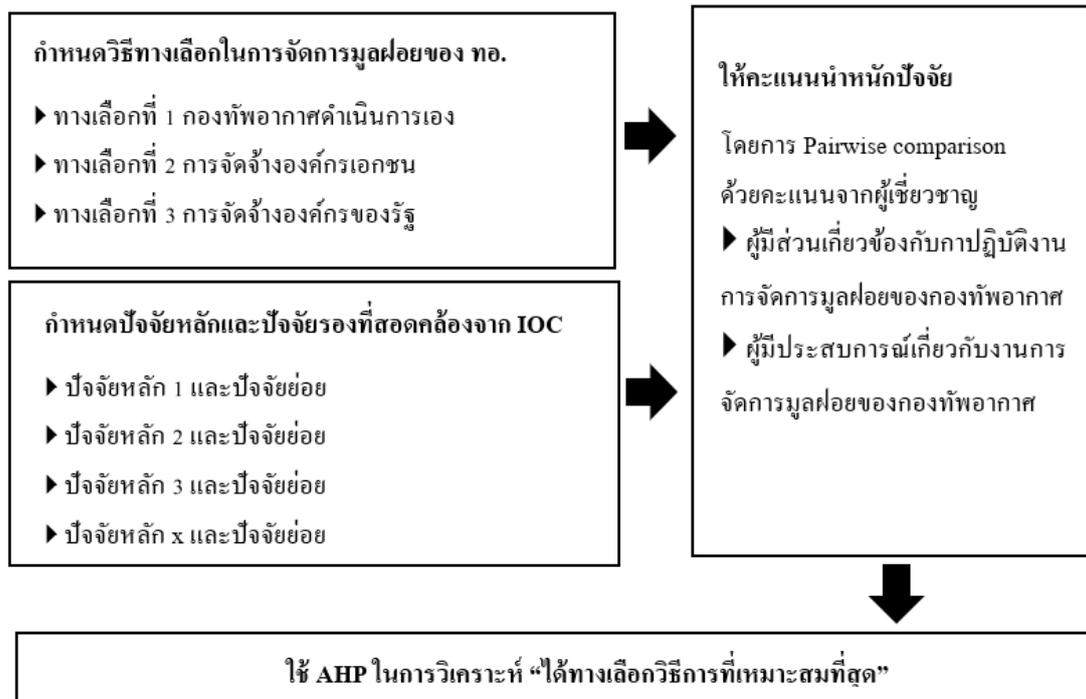
4.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

การตัดสินใจเลือกวิธีการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งคอนเมืองมีกรอบแนวคิดการวิจัย ดังรูปที่ 1

ขั้นตอนที่ 1 - IOC



ขั้นตอนที่ 2 - AHP



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

#### 4.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ใช้วิธีการหาดัชนีความสอดคล้องระหว่างปัจจัยกับวัตถุประสงค์ (Item-Objective Congruence Index : IOC) เพื่อพิจารณาปัจจัยที่สอดคล้องกับการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง จากนั้นนำปัจจัยที่ได้มาพิจารณาตัดสินใจเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมืองด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process : AHP) มีขั้นตอนดังนี้

1) ศึกษาเอกสาร ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการมูลฝอย และการจ้าง Outsource  
2) กำหนดทางเลือกวิธีการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง 3 รูปแบบ ได้แก่ กองทัพอากาศดำเนินการเอง การจ้างองค์กรเอกชน และการจ้างองค์กรของรัฐ

3) รวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องจากการจัดการมูลฝอย และการจ้าง Outsource แล้วนำมาจัดทำแบบสอบถาม IOC เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ประเมินปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญทั่วไปด้านการจัดการมูลฝอย และผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ

4) นำปัจจัยที่ผ่านการประเมิน IOC มาสร้างแผนภูมิลำดับชั้น โดยโครงสร้างชั้นบนสุดเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ลำดับรองลงมา คือเกณฑ์หรือปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเลือกวิธีการ ส่วนลำดับถัดมาคือปัจจัยย่อยอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปัจจัยหลัก และสุดท้ายเป็นทางเลือกวิธีการต่าง ๆ ของงานวิจัย จากนั้นนำข้อมูลปัจจัยดังกล่าวมาสร้างแบบสอบถามเพื่อใช้ในการตัดสินใจด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) โดยการให้คะแนนค่าลำดับความสำคัญในแต่ละปัจจัย ภายใต้หลักการเปรียบเทียบปัจจัยเป็นคู่ (Pairwise Comparison) โดยให้คะแนนค่าความสำคัญของการเปรียบเทียบระหว่างปัจจัยสองตัว แทนค่าด้วยตัวเลข 1 ถึง 9 จากนั้นนำแบบสอบถามไปให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 7 ท่าน ได้แก่ ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ และผู้มีประสบการณ์เกี่ยวกับงานการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ เพื่อทำการประเมินและให้คะแนนแบบสอบถามที่สร้างขึ้น และนำมาหาค่าเฉลี่ย (Mean) ของคะแนนน้ำหนักปัจจัยหลัก ปัจจัยย่อย แล้วพิจารณาวิธีการที่เหมาะสมต่อการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง

หลังจากนั้นวิเคราะห์ผลของคะแนนจากการประเมินแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ได้ผลคะแนนแสดงในรูปของเมทริกซ์ และคำนวณค่าน้ำหนักของปัจจัยแต่ละตัวโดยวิธีการไอเกนเวกเตอร์ (Eigenvector) ของเมทริกซ์ โดยการเปรียบเทียบทีละคู่ไปเรื่อย ๆ ตามโครงสร้างของแผนภูมิลำดับชั้น

5) นำผลจากการวิเคราะห์น้ำหนักคะแนนความสำคัญ ด้วยวิธีการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) มาจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยหลัก ปัจจัยย่อย เพื่อให้ทราบผลการพิจารณาเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง และศึกษาแนวทางการจัดการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกองทัพอากาศในอนาคตต่อไป

#### 4.3 วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

##### 4.3.1 กำหนดวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์

เลือกวิธีการที่เหมาะสมที่ใช้ในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง

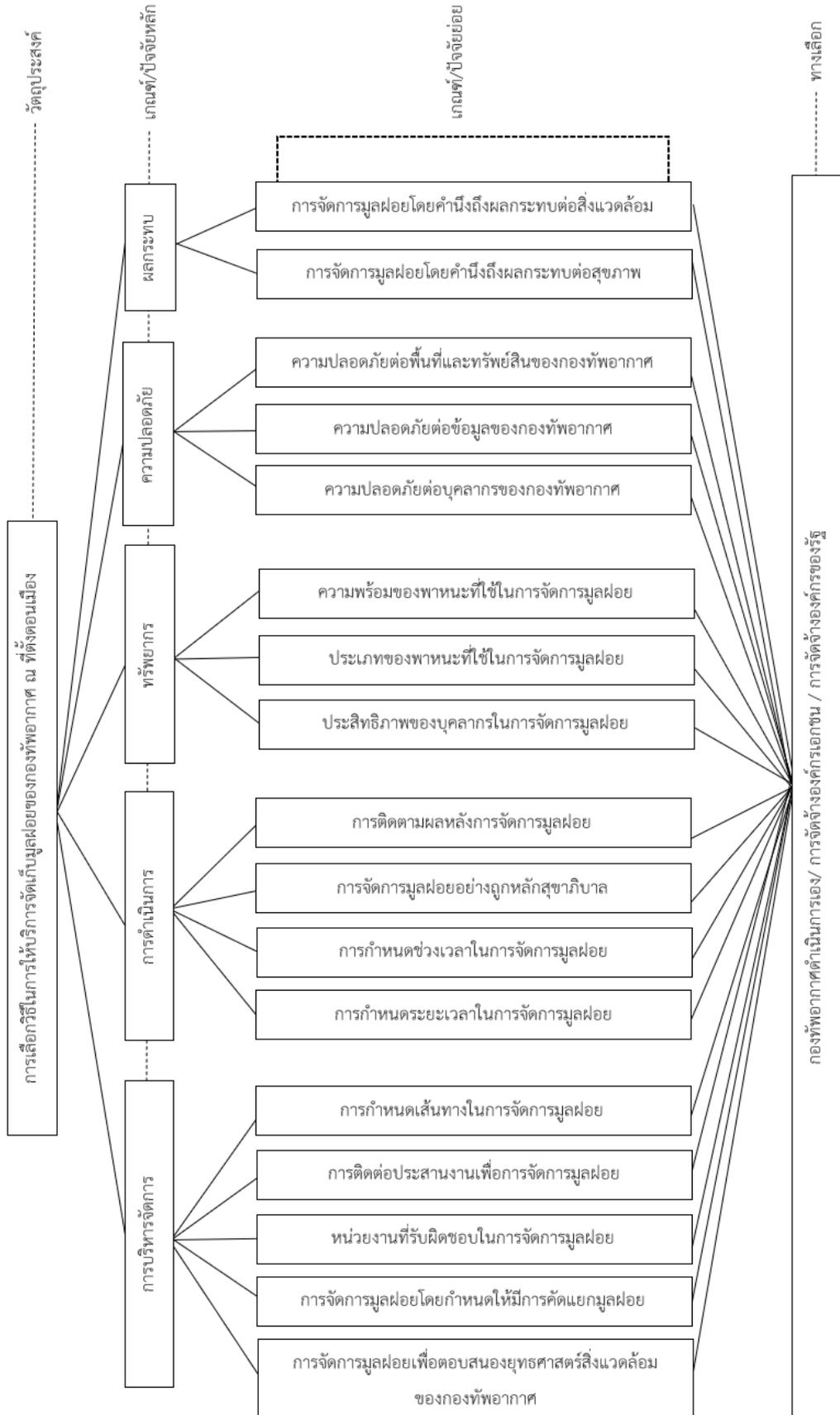
##### 4.3.2 กำหนดทางเลือกวิธีการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง ได้แก่

- 1) กองทัพอากาศดำเนินการเอง
- 2) การจ้างองค์กรเอกชน
- 3) การจ้างองค์กรของรัฐ

4.3.3 กำหนดกลุ่มปัจจัยที่ใช้พิจารณาวิธีการที่เหมาะสมที่ในการจัดการมลพิษของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง โดยพิจารณาข้อมูลปัจจัยจากการประเมินแบบสอบถาม IOC ที่ผ่านเกณฑ์ ( $IOC \geq 0.5$ ) และนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) ประกอบด้วย 5 ปัจจัยหลักได้แก่

- 1) ด้านการบริหารจัดการ โดยมีปัจจัยย่อย ดังนี้
    - 1.1) การจัดการมลพิษเพื่อตอบสนองยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมของกองทัพอากาศ
    - 1.2) การจัดการมลพิษโดยกำหนดให้มีการคัดแยกมลพิษ
    - 1.3) หน่วยงานที่รับผิดชอบในการจัดการมลพิษ
    - 1.4) การติดต่อประสานงานเพื่อการจัดการมลพิษ
    - 1.5) การกำหนดเส้นทางในการจัดการมลพิษ
  - 2) ด้านการดำเนินงาน โดยมีปัจจัยย่อย ดังนี้
    - 2.1) การกำหนดระยะเวลาในการจัดการมลพิษ
    - 2.2) การกำหนดช่วงเวลาในการจัดการมลพิษ
    - 2.3) การจัดการมลพิษอย่างถูกหลักสุขาภิบาล
    - 2.4) การติดตามผลหลังการจัดการมลพิษ
  - 3) ด้านทรัพยากร โดยมีปัจจัยย่อย ดังนี้
    - 3.1) ประสิทธิภาพของบุคลากรในการจัดการมลพิษ
    - 3.2) ประเภทของพาหนะที่ใช้ในการจัดการมลพิษ
    - 3.3) ความพร้อมของพาหนะที่ใช้ในการจัดการมลพิษ
  - 4) ด้านความปลอดภัย โดยมีปัจจัยย่อย ดังนี้
    - 4.1) ความปลอดภัยต่อบุคลากรของกองทัพอากาศ
    - 4.2) ความปลอดภัยต่อข้อมูลของกองทัพอากาศ
    - 4.3) ความปลอดภัยต่อพื้นที่และทรัพย์สินของกองทัพอากาศ
  - 5) ด้านผลกระทบ โดยมีปัจจัยย่อย ดังนี้
    - 5.1) การจัดการมลพิษโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสุขภาพ
    - 5.2) การจัดการมลพิษโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- จากองค์ประกอบปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปออกมาเป็นแผนภูมิลำดับชั้นในการวิเคราะห์

ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิลำดับชั้นแสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกวิธีการในการจัดการมลพิษของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง

## 4.3.4 การวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญของปัจจัย

ขั้นตอนที่ 1 นำคะแนนจากการทำแบบสอบถาม AHP โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบทีละคู่ปัจจัยที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 ท่าน มาสร้างตารางเมทริกซ์เพื่อคำนวณหาลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยการคำนวณค่าไอเกนเวกเตอร์เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีผู้เชี่ยวชาญ 7 ท่าน จึงใช้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักของคะแนนผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดมาคำนวณ โดยแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเลือกวิธีการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งคอนเมือง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญของ 5 ปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	การบริหารจัดการ	การดำเนินการ	ทรัพยากร	ความปลอดภัย	ผลกระทบ
การบริหารจัดการ	1.00	3.86	4.57	1.86	5.86
การดำเนินการ	0.26	1.00	1.86	0.35	2.71
ทรัพยากร	0.22	0.54	1.00	0.28	2.71
ความปลอดภัย	0.54	2.86	3.57	1.00	5.86
ผลกระทบ	0.17	0.37	0.37	0.17	1.00
ผลรวม	2.19	8.62	11.37	3.66	18.14

จากนั้นจะคำนวณหาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยหลักโดยการนำตัวเลขของผลรวมแต่ละแถวแนวตั้งในตารางที่ 1 ไปหารตัวเลขในแต่ละค่าในแถวแนวตั้งนั้น ๆ เช่น ปัจจัยหลักด้านการบริหารจัดการมีคะแนนผลรวมเท่ากับ 2.19 นำ 2.19 มาเป็นตัวหารค่าในแนวตั้งของแถวนั้น ตัวอย่างเช่น ในแถวที่ 1 หลักที่ 1 จะคำนวณได้ว่า  $1.00 / 2.19 = 0.46$  เป็นต้น จากนั้นคำนวณในทุกค่าในตารางที่ 1 จะได้ค่าน้ำหนักของปัจจัยหลัก และผลรวมคะแนนน้ำหนักในแนวตั้งจะต้องเท่ากับ 1.00 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าน้ำหนัก ของ 5 ปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	การบริหารจัดการ	การดำเนินการ	ทรัพยากร	ความปลอดภัย	ผลกระทบ
การบริหารจัดการ	0.46	0.45	0.40	0.51	0.32
การดำเนินการ	0.12	0.12	0.16	0.10	0.15
ทรัพยากร	0.10	0.06	0.09	0.08	0.15
ความปลอดภัย	0.25	0.33	0.31	0.27	0.32
ผลกระทบ	0.08	0.04	0.03	0.05	0.06
ผลรวม	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

และทำการหาค่าเฉลี่ยตัวเลขในแถวแนวนอน โดยนำผลรวมของค่าในแต่ละแถวแนวนอนในตารางที่ 2 หารด้วยจำนวนปัจจัย (5 ปัจจัย) เพื่อหาค่าลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยหลัก ตัวอย่างเช่น ค่าลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักด้านการบริหารจัดการ คำนวณได้จาก  $(0.46 + 0.45 + 0.40 + 0.51 + 0.32) / 5 = 0.46$  ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความสำคัญของ 5 ปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	การบริหารจัดการ	การดำเนินการ	ทรัพยากร	ความปลอดภัย	ผลกระทบ	ความสำคัญ
การบริหารจัดการ	0.46	0.45	0.40	0.51	0.32	0.43
การดำเนินการ	0.12	0.12	0.16	0.10	0.15	0.13
ทรัพยากร	0.10	0.06	0.09	0.08	0.15	0.09
ความปลอดภัย	0.25	0.33	0.31	0.27	0.32	0.30
ผลกระทบ	0.08	0.04	0.03	0.05	0.06	0.05
ผลรวม	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

นอกจากนี้จะต้องตรวจสอบอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) ทุกครั้ง โดยหากมีการเปรียบเทียบ 3 ปัจจัย ค่า CR ไม่ควรเกิน 0.05 ถ้ามีการเปรียบเทียบ 4 ปัจจัย ค่า CR ไม่ควรเกิน 0.09 และถ้ามีการเปรียบเทียบปัจจัยมากกว่า 5 ปัจจัยขึ้นไป ค่า CR ไม่ควรเกิน 0.1 [13] ทั้งนี้ หากค่า CR เกินกว่าเกณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้น หมายความว่า การให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญไม่มีความสอดคล้องกัน ผู้วิจัยจำเป็นต้องทบทวนการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญใหม่อีกครั้ง จนกว่าค่า CR จะผ่านเกณฑ์ดังกล่าว โดยก่อนจะทราบค่า CR จำเป็นต้องคำนวณหาค่า  $\lambda_{max}$  ก่อน โดยคำนวณได้จาก ผลรวมของการนำค่าความสำคัญของแต่ละปัจจัยหลักในตารางที่ 3 มาคูณกับค่าเฉลี่ยคะแนนในแถวแนวนอน จากตารางที่ 1 ทีละตัว ตัวอย่างเช่น ผลรวมในแถวแนวนอนบนสุด คำนวณได้จาก  $(0.43 \times 1.00) + (0.13 \times 3.86) + (0.10 \times 4.57) + (0.30 \times 1.86) + (0.05 \times 5.86) = 2.21$  ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การหาผลรวมเพื่อหาค่าความสอดคล้อง

ปัจจัยหลัก	การบริหารจัดการ	การดำเนินการ	ทรัพยากร	ความปลอดภัย	ผลกระทบ	ผลรวมในแถวแนวนอน
	0.43	0.13	0.10	0.30	0.05	
การบริหารจัดการ	1.00	3.86	4.57	1.86	5.86	2.21
การดำเนินการ	0.26	1.00	1.86	0.35	2.71	0.66
ทรัพยากร	0.22	0.54	1.00	0.28	2.71	0.48
ความปลอดภัย	0.54	2.86	3.57	1.00	5.86	1.53
ผลกระทบ	0.17	0.37	0.37	0.17	1.00	0.26

เมื่อได้ผลรวมในแถวแนวนอนแล้ว ให้นำไปหารด้วยค่าความสำคัญของแต่ละปัจจัยหลัก และนำผลลัพธ์ที่ได้มาบวกกัน จากนั้นนำมาหารด้วยจำนวนปัจจัยที่ใช้พิจารณา จะได้ค่า  $\lambda_{max}$  ออกมาดังแสดงในสมการที่ 1

$$\lambda_{max} = \frac{\left(\frac{2.21}{0.43}\right) + \left(\frac{0.66}{0.13}\right) + \left(\frac{0.48}{0.10}\right) + \left(\frac{1.53}{0.30}\right) + \left(\frac{0.26}{0.05}\right)}{5} \quad (1)$$

$$= 5.11$$

ค่า  $\lambda_{max}$  ยิ่งเข้าใกล้จำนวนปัจจัยเท่าใดแสดงว่าการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญมีความสอดคล้องกัน จากนั้นนำค่า  $\lambda_{max}$  มาใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index : CI) จากสูตรดังแสดงในสมการที่ 2

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} = \frac{(5.11 - 5)}{4} = 0.0275 \quad (2)$$

เมื่อได้ค่า CI จะนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) ได้โดยนำค่า CI ที่คำนวณได้มาหารกับค่าดัชนีความสอดคล้องแบบสุ่ม (Random Consistency Index : RI) ในกรณีนี้มี 5 ปัจจัย กำหนดให้ค่า RI = 1.12 และคำนวณหาค่า CR ได้จากสูตรดังแสดงในสมการที่ 3

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0275}{1.12} = 0.02 \quad (3)$$

ค่า CR ที่คำนวณได้เท่ากับ 0.02 น้อยกว่า 0.10 ซึ่งไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด แสดงว่าการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญมีความสอดคล้องกัน สามารถนำผลการวิเคราะห์ค่าความสำคัญจากตารางเมทริกซ์นี้ไปใช้ได้

ขั้นตอนที่ 2 นำข้อมูลคะแนนในส่วนของปัจจัยย่อยภายใต้ปัจจัยหลัก และคะแนนทั้ง 3 ทางเลือกภายใต้ปัจจัยย่อย จากการทำแบบสอบถาม AHP โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบที่ละคู่ ที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 ท่าน มาสร้างตารางเมทริกซ์เพื่อคำนวณหาลำดับความสำคัญของปัจจัย และตรวจสอบค่าความสอดคล้อง (CR) ไม่ให้เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ โดยใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้ค่าลำดับความสำคัญของทุกปัจจัยแล้ว จากนั้นวิเคราะห์หาลำดับของทางเลือกที่เหมาะสม โดยคำนวณคะแนนผลรวมที่ได้จากผลคูณระหว่างค่าความสำคัญแต่ละทางเลือก กับค่าน้ำหนักความสำคัญของทุกปัจจัย จากลำดับต่ำสุดจนถึงระดับบนสุดของโครงสร้างแผนภูมิลำดับชั้น โดยคะแนนสูงสุดที่คำนวณได้จะแสดงถึงทางเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

## 5. ผลการวิจัย

### 5.1 ผลการวิเคราะห์ค่าลำดับความสำคัญของปัจจัยหลัก

จากข้อมูลคะแนนในส่วนของปัจจัยหลักจากการทำแบบสอบถาม AHP ที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 ท่าน นำมาคำนวณหาลำดับความสำคัญของปัจจัย จะเห็นได้ว่า ปัจจัยด้านการบริหารจัดการ มีค่าความสำคัญสูงสุดเท่ากับ 43% เมื่อเทียบกับปัจจัยหลักด้านอื่น ๆ รองลงมาคือ ปัจจัยด้านความปลอดภัย 30% ปัจจัยด้านการดำเนินการ 13% ปัจจัยด้านทรัพยากร 9% และปัจจัยด้านผลกระทบ 5% ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง

ปัจจัย	ความสำคัญ
การบริหารจัดการ	0.43
ความปลอดภัย	0.30
การดำเนินการ	0.13
ทรัพยากร	0.09
ผลกระทบ	0.05

## 5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าลำดับความสำคัญของปัจจัยย่อย

จากข้อมูลคะแนนในส่วนของปัจจัยย่อยจากการทำแบบสอบถาม AHP ที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 ท่าน นำมาคำนวณหาลำดับความสำคัญของปัจจัย ผลการคำนวณพบว่าค่าลำดับความสำคัญของปัจจัยย่อยที่ส่งผลต่อการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง เรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลำดับความสำคัญของปัจจัยย่อยที่ส่งผลต่อการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง

ปัจจัย	ความสำคัญ
การจัดการมูลฝอยเพื่อตอบสนองยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมของกองทัพอากาศ	0.1563
ความปลอดภัยต่อบุคลากรของกองทัพอากาศ	0.1302
หน่วยงานที่รับผิดชอบในการจัดการมูลฝอย	0.1041
ความปลอดภัยต่อข้อมูลของกองทัพอากาศ	0.0932
การติดต่อประสานงานเพื่อการจัดการมูลฝอย	0.0858
ความปลอดภัยต่อพื้นที่และทรัพย์สินของกองทัพอากาศ	0.0742
การจัดการมูลฝอยโดยกำหนดให้มีการคัดแยกมูลฝอย	0.0521
การจัดการมูลฝอยโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสุขภาพ	0.0436
ความพร้อมของพาหนะที่ใช้ในการจัดการมูลฝอย	0.0432
การกำหนดช่วงเวลาในการจัดการมูลฝอย	0.0380
การกำหนดระยะเวลาในการจัดการมูลฝอย	0.0376
ประสิทธิภาพของบุคลากรในการจัดการมูลฝอย	0.0366
การจัดการมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล	0.0312
การกำหนดเส้นทางในการจัดการมูลฝอย	0.0292
การติดตามผลหลังการจัดการมูลฝอย	0.0219
ประเภทของพาหนะที่ใช้ในการจัดการมูลฝอย	0.0155
การจัดการมูลฝอยโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	0.0074

ปัจจัยย่อยที่ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ปัจจัยด้านการจัดการมูลฝอยเพื่อตอบสนองยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมของกองทัพอากาศ คิดเป็น 15.63% รองลงมาคือ ปัจจัยด้านความปลอดภัยต่อบุคลากรของกองทัพอากาศ 13.02% และ ปัจจัยด้านหน่วยงานที่รับผิดชอบในการจัดการมูลฝอย 10.41% เป็นลำดับที่สาม

### 5.3 ผลการวิเคราะห์ในการเลือกวิธีการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง

เมื่อทราบผลค่าลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยแล้วนำค่าน้ำหนักความสำคัญของทุกปัจจัยวิเคราะห์หาลำดับของทางเลือกที่เหมาะสม โดยคำนวณคะแนนผลรวมที่ได้จากผลคูณระหว่างค่าความสำคัญแต่ละทางเลือกกับค่าน้ำหนักความสำคัญของทุกปัจจัย จากลำดับล่างสุดจนถึงระดับบนสุดของโครงสร้างแผนภูมิลำดับชั้น ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3 พบว่าการที่กองทัพอากาศดำเนินการจัดการมูลฝอยเองนั้น เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าความสำคัญรวมมากที่สุด คิดเป็น 56% ของวิธีทางเลือกทั้งหมด

ทางเลือกวิธีการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง



รูปที่ 3 ผลลัพธ์ของการตัดสินใจเลือกทางเลือกในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง

## 6. สรุป

จากผลการศึกษาพบว่า กองทัพอากาศดำเนินการจัดการมูลฝอยเองเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งดอนเมือง เนื่องจากผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญในการตอบสนองยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมของกองทัพอากาศ พ.ศ.2561-2580 ซึ่งมีเป้าหมายที่จะจัดการมูลฝอยให้เหลือศูนย์ (Zero Waste) และมองเห็นศักยภาพของกองทัพอากาศที่สามารถดำเนินงานตามแผนงานได้ นอกจากนี้ผู้เชี่ยวชาญยังให้ความสำคัญในด้านความปลอดภัยต่อบุคลากรในกองทัพอากาศค่อนข้างสูง การที่กองทัพอากาศดำเนินการจัดการมูลฝอยเองจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเพราะสามารถดำเนินการและควบคุมกำกับดูแลโดยบุคลากรของกองทัพอากาศ ถึงแม้ว่าการดำเนินการเองนั้นจะมีปัญหาในเรื่องความพร้อมด้านทรัพยากร แต่กองทัพอากาศสามารถดำเนินการแก้ไขและพัฒนาได้

## 7. ข้อเสนอแนะ

จากการทำแบบสอบถาม IOC มีผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการมูลฝอยให้ข้อเสนอแนะในการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ นอกเหนือจากการดำเนินการจัดเก็บมูลฝอยขององค์กรแล้ว ควรจะเพิ่มการให้ความรู้ และการรณรงค์การสร้างจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อให้การจัดการมูลฝอยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกองทัพอากาศที่ให้การสนับสนุนการศึกษาในการทำวิจัยในครั้งนี้ และงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจากการชี้แนะรวมถึงการช่วยเหลือจากผู้เชี่ยวชาญในด้านการจัดการมูลฝอย ทำให้งานวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนารูปแบบการจัดการมูลฝอยของกองทัพอากาศ ณ ที่ตั้งคอนเมือง

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] จำรูญ ขาสุมุทร. (2555). *อนามัยสิ่งแวดล้อม เรื่องการจัดการขยะมูลฝอย*. พิมพ์ครั้งที่ 3 เชียงใหม่: กองทุนเผยแพร่วิชาการด้านสิ่งแวดล้อม และการสาธารณสุข.
- [2] Hoornweg, D.T.L., & Laura, T. (1999). **What a waste: Solid management in Asia**. Working Paper Series No.1. Washington, DC.: World Bank.
- [3] สุเมธ ไชยประพันธ์ และพิริยุดม วรรณพฤกษ์. (2553). *การจัดการมูลฝอยเชิงบูรณาการ หลักปฏิบัติและทฤษฎีพื้นฐาน*. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [4] วัชร มนต์คลัง และคณะ. (2556). การบริหารจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองนครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม. *วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์*. 7(1): 179-185.
- [5] ปรีวัฒน์ ช่างคิด. (2563). ศักยภาพการจัดการขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดระยอง. *วารสารการบริหารท้องถิ่น*. 13(3): 286-303.
- [6] มลิวัดย์ ปานมาตย์ และไพบุลย์ แจ่มพงษ์. (2563). การศึกษาสภาพการดำเนินงานการบริหารจัดการขยะมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนตำบลในจังหวัดนครศรีธรรมราช. ในการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ ครั้งที่ 11(1100-1111). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
- [7] Christia, M. & Thomas, G. (2010). Development of Waste Management Practices in Indonesia. *European Journal of Scientific Research*. 40(2): 199-210.
- [8] นกคณ ร่มโพธิ์. (2549). Outsourcing ทางเลือกใหม่ขององค์กร. *วารสารวิชาการบริหารธุรกิจ*. 29(112): 5-7.
- [9] Tomas, F., Espino, R. & Victor, P.R. (2004). Outsourcing and its impact on operational objectives and performance: a study of hotels in Canary Islands. *Hospitality Management*. 23: 287-306
- [10] Sameer, K. & Samad, A. (2007). Outsourcing strategies for apparel manufacture: a case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 19(1): 73-91.
- [11] นกคณ ศรีตระกูล ณรงค์, กุณินิเทศ และ สุดาวรรณ สมใจ. (2561). ความยืดหยุ่นของแรงงาน การจัดทำล้งคน การลดต้นทุนการจัดการความเสี่ยง ที่มีผลต่อการบริหารจัดการแรงงานภายนอกในการซ่อมแซมชุด โขปกรณณ์สายสรรพวฐของกองทัพบก. *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*. 10(1): 73-85.
- [12] Saaty, T.L. (1994). How to make a decision. *Interfaces*. 24(6): 18-43

# การไต่ไกลและไว

## Far and Fast Climb

<sup>1\*</sup>พลาณันท์ ปะจายะกฤตย์, <sup>2#</sup>อิทธิ ยูทธยานนท์ และ <sup>3#</sup>จิรวุฒิ คล่องตรจโรค

<sup>1</sup>นักวิชาการอิสระ

<sup>2,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอากาศยาน กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

<sup>1\*</sup>Palanunt Pajayakrit, <sup>2#</sup>Itti Yuthayanon and <sup>3#</sup>Jiravud Klongtrujrok

<sup>1</sup>Independent Scholar

<sup>2,3</sup>Aeronautical Engineering Department, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

\* palanunt@loxinfo.co.th, #itti@rtaf.mi.th, #jiravud@rtaf.mi.th

Received : November, 10 2020

Revised : March, 24 2021

Accepted : April, 08 2021

### บทคัดย่อ

การศึกษาสมรรถนะอากาศยานไม่ว่าจะเป็น พิสัย เพดานบิน น้ำหนักบรรทุก หรือความเร็วต่าง ๆ นับเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบอากาศยาน เพื่อให้อากาศยานนั้นสามารถปฏิบัติการกิจตามที่ออกแบบไว้ได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย ซึ่งการหาความเร็วของอากาศยานในระหว่างการไต่ขึ้นที่เหมาะสมและสามารถใช้งานได้จริง อีกทั้งยังทำให้นักบินและผู้โดยสารมีความสะดวกสบายในระหว่างการไต่ขึ้นของอากาศยานและส่วนหัวของอากาศยานไม่ลดทัศนวิสัยของนักบิน เกี่ยวข้องโดยตรงกับหนึ่งในสมรรถนะอากาศยานที่สำคัญ คือ ความเร็วไต่ของอากาศยาน ที่รู้จักกันดี ได้แก่ ความเร็วมุมไต่สูงสุด ( $V_x$ ) และความเร็วอัตราไต่สูงสุด ( $V_y$ ) โดยความเร็วทั้งสองมีพื้นฐานอยู่บนหลักการทางกลศาสตร์การบิน แต่เป็นความเร็วที่ต่ำเกินไป ทำให้ใช้งานไม่สะดวก ด้วยเหตุต่าง ๆ ผู้ผลิตอากาศยานจึงกำหนดความเร็วไต่เพิ่มขึ้นจากประสบการณ์ โดยการศึกษาี้เสนอให้กำหนดความเร็วไต่เพิ่มเติมเรียกว่า “ความเร็วไต่ไกลและไว” ( $V_{ff}$ ) ซึ่งตั้งอยู่บนหลักการทางกลศาสตร์การบิน ทำให้ได้ระยะทางภาคพื้นเพิ่มขึ้นในเวลาจำกัด และเป็นความเร็วที่ใกล้เคียงกับความเร็วไต่ของผู้ผลิต ที่ช่วยให้นักบินและผู้โดยสารมีความสะดวกสบายในระหว่างการไต่ขึ้นของอากาศยานและส่วนหัวของอากาศยานไม่บังหน้านักบิน

**คำสำคัญ:** สมรรถนะอากาศยาน, ความเร็วไต่, ความเร็วไต่ไกลและไว, ระยะทางภาคพื้น, กลศาสตร์การบิน

### Abstract

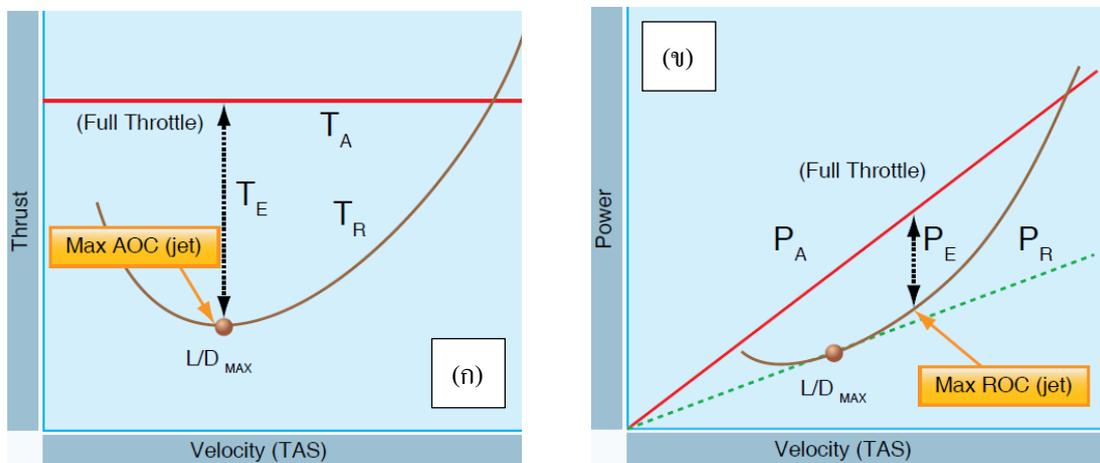
The study of aircraft performance such as range, service ceiling, payload or any type of speed is one of the fundamental factors in aircraft design for the aircraft to perform the intended mission accurately and safely. In order to determine the optimal speed of the aircraft, which is appropriate and practical during ascent and can provide the pilot and passenger with comfort during climb. Furthermore, pilot’s visibility is less obstructed, which is directly related to one of the important aircraft performances, namely, the climb speed. The well-known climb speeds are maximum angle of climb speed ( $V_x$ ) and maximum rate of climb speed ( $V_y$ ). Both speeds are based on

principles of flight mechanics but are too slow, causing inconveniences for various reasons. Therefore, the manufacturers suggest other climb speeds from experience for conveniences. This study proposes additional climb speed called “Far and Fast Climb Speed” ( $V_{FF}$ ) to be based on principles of flight mechanics. It will produce additional ground distance in limited time and be close to climb speeds from manufacturers, which can provide the pilot and passenger with comfort during climb and the nose of the aircraft does not obstruct the pilot.

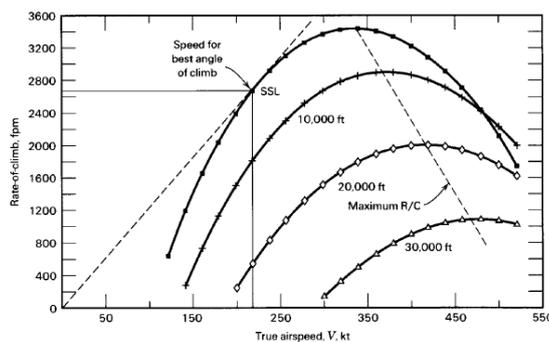
**Keywords:** Aircraft performance, Climb speed, Far and fast climb speed, Ground distance, Flight mechanics

1. บทนำ

อัตราการไต่ของอากาศยานขึ้นอยู่กับแรงและกำลังที่เกิดขึ้น รูปที่ 1 [1] แสดงแรงและกำลังที่เกิดขึ้นกับอากาศยาน แบ่งเป็นแรงที่ต้องการ ( $T_R$ ) กำลังที่ต้องการ ( $P_R$ ) แรงที่มีใช้ ( $T_A$ ) และกำลังที่มีใช้ ( $P_A$ ) โดยแรงและกำลังที่ต้องการเกิดขึ้นจากกระแสน้ำที่ไหลผ่านอากาศยาน ส่วนแรงและกำลังที่มีใช้เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์และใบพัด ผลต่างของแรงให้ผลเป็นมุมไต่ และผลต่างของกำลังให้ผลเป็นอัตราไต่ รูปที่ 2 [2] แสดงความเร็วที่ทำให้เกิดผลต่างของแรงสูงสุด คือ ความเร็วมุมไต่สูงสุด ( $V_x$ ) และความเร็วที่ทำให้เกิดผลต่างของกำลังสูงสุด คือ ความเร็วอัตราไต่สูงสุด ( $V_y$ )



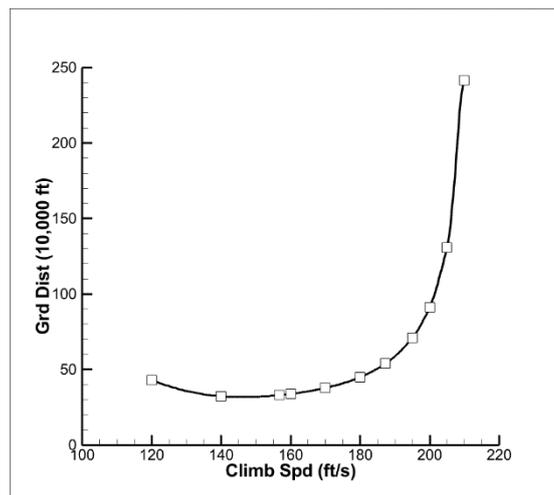
รูปที่ 1 แรง (ก) และกำลัง (ข) ที่เกิดขึ้นกับอากาศยานประเภทไอพ่น ไม่รวมประเภทใบพัด (เอกสารอ้างอิง [1])



รูปที่ 2 ความเร็วมุมไต่สูงสุดและความเร็วอัตราไต่สูงสุดของ Boeing 767-300ER (เอกสารอ้างอิง [2])

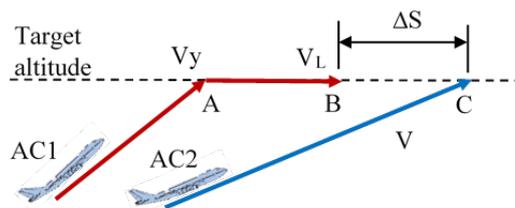
$V_x$  และ  $V_y$  เป็นความเร็วที่ค่อนข้างต่ำ เช่น Boeing 767-300ER ที่ระดับน้ำทะเล  $V_x = 215$  kts (0.32 M) และ  $V_y = 345$  kts (0.52 M) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วบินเดินทางมาก ส่วนเครื่องบินขนาดเล็ก เช่น Cessna 172N ที่ระดับน้ำทะเล  $V_x = 59$  kts และ  $V_y = 73$  kts [3] ซึ่งใกล้เคียงกับความเร็วร่วงหล่น ( $V_s = 42$  kts) โดยในทั้งสองกรณีผู้ผลิตแนะนำให้ไต่ด้วยความเร็วสูงกว่า  $V_y$  (ซึ่งสูงกว่า  $V_x$ ) ในกรณีเครื่องบินโดยสาร Boeing 737 และ Airbus 320 แนะนำให้ไต่ด้วยความเร็ว 0.78 M [4] [5] ส่วน Cessna 172N แนะนำให้ไต่ด้วยความเร็ว 5 – 10 kts สูงกว่า  $V_y$  [3]

เหตุผลที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ความเร็วไต่สูงกว่า  $V_y$  คาดว่าเนื่องจากความสบายของผู้โดยสารในระหว่างการไต่ขึ้นของอากาศยาน ระบบต่าง ๆ ทำงานสะดวกขึ้น และส่วนหัวเครื่องบินไม่บังหน้านักบิน [6] แต่ไม่ได้อ้างถึงหลักการทางกลศาสตร์การบิน ดังนั้น ความเร็วไต่ที่ตรงความต้องการคือความเร็วที่สูงกว่า  $V_y$  และผลของความเร็วไต่ที่สูงขึ้นคือระยะทางภาคพื้นเพิ่มขึ้น แต่คาดว่าสิ่งที่ทำให้ไม่มีใครเสนอให้ค้นหาความเร็วไต่ที่สูงขึ้นเนื่องจากระยะทางภาคพื้นในช่วงไต่มีค่าไม่จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3



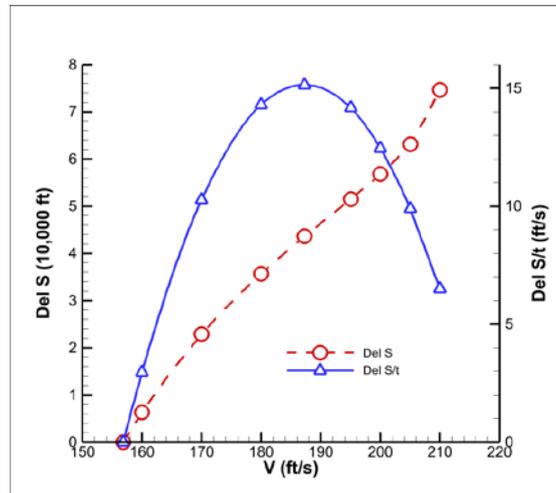
รูปที่ 3 ระยะทางภาคพื้นในช่วงไต่มีค่าไม่จำกัด

จากการที่ระยะทางภาคพื้นมีค่าไม่จำกัด จึงไม่ปรากฏผลการศึกษาเกี่ยวกับการไต่ต่อระยะภาคพื้น ทั้งจากตำรา จากบทความทาง Internet และจากการสอบถามผู้เชี่ยวชาญ เช่น นักวิชาการ และนักบิน ดังนั้น การเลือกความเร็วไต่ที่มีระยะภาคพื้นดีที่สุดจึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบ ซึ่งความเร็วไต่ที่ขึ้นไปถึงระยะสูงเป้าหมายก่อนความเร็วอื่นคือ  $V_y$  เพราะอัตราไต่สูงสุด เมื่อถึงระยะสูงเป้าหมายแล้วก็บินระดับต่อไปด้วยความเร็ว  $V_L$  เรียกอากาศยานเครื่องนี้ว่า AC1 ความเร็วไต่อื่น ๆ เมื่อไต่ถึงระยะสูงเป้าหมายแล้วก็ควรเปรียบเทียบระยะภาคพื้นกับ AC1 เรียกอากาศยานเครื่องที่ 2 ว่า AC2 ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เปรียบเทียบ AC1 และ AC2 ไต่ขึ้นหาระยะสูงเดียวกัน

ขณะที่ AC2 ได้ถึงระยะสูงเป้าหมาย ถ้าอยู่ด้านหน้า AC1 ก็แสดงว่า AC2 นำ AC1 และผลต่างของระยะภาคพื้นระหว่าง AC2 และ AC1 เรียกว่า “ระยะนำ” ( $\Delta S$ ) ในรูปที่ 4 ระยะนำ คือ ระยะจากจุด B ถึง C โดยจุด C คือ จุดที่ AC2 ได้ถึงระยะสูงเป้าหมาย และจุด B คือ จุดที่ AC1 บินระดับมาถึงเมื่อ AC2 ได้มาถึงจุด C ซึ่งระยะนำ ( $\Delta S$ ) จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วโดยไม่มีค่าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 5 ทำนองเดียวกับระยะภาคพื้นตามรูปที่ 3 แต่ความเร็วที่สูงกว่า  $V_y$  ได้ถึงระยะสูงเป้าหมายใช้เวลาเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อหารระยะนำด้วยเวลาไต่ของ AC2 เราจะได้ “ระยะนำต่อหน่วยเวลา” ( $\Delta S/t$ ) ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ความเร็วหนึ่ง (รูปที่ 5) และเหมาะสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบหาความเร็วไต่ที่ดีที่สุดด้านระยะภาคพื้น



รูปที่ 5 ระยะนำ ( $\Delta S$ ) และระยะนำต่อหน่วยเวลา ( $\Delta S/t$ ) ระหว่าง AC1 และ AC2 ในรูปที่ 4

**2. จุดมุ่งหมาย**

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อค้นหาความเร็วไต่ที่ให้ค่าระยะนำต่อหน่วยเวลาสูงสุด เรียกว่า “ความเร็วไต่ไกลและไว” (Far and Fast Climb Speed,  $V_{ff}$ ) ซึ่งตามรูปที่ 4 อากาศยานเครื่องแรก (AC1) ที่ใช้เปรียบเทียบเพื่อวัดระยะนำ คือ อากาศยานที่ไต่ด้วยความเร็วอัตราไต่สูงสุด ( $V_y$ ) เมื่อไต่ถึงระยะสูงเป้าหมายแล้ว บินระดับต่อไปด้วยความเร็วตามกำหนด ( $V_L$ ) ในขณะที่อากาศยานเครื่องที่สอง (AC2) ไต่ด้วยความเร็ว  $V_{ff}$  และเมื่อไต่ถึงระยะสูงเป้าหมายแล้ว ระยะนำ คือ ระยะทางภาคพื้นระหว่างอากาศยานทั้งสองเครื่อง ซึ่งเมื่อหารระยะนำด้วยเวลาไต่ของ AC2 จะได้ “ระยะนำต่อหน่วยเวลา” ( $\Delta S/t$ )

ค่า  $\Delta S/t$  สูงแสดงว่า AC2 ถึงระยะสูงเป้าหมายไกลกว่า และก่อนหน้า AC1 ที่ไต่ด้วยความเร็ว  $V_y$  และยังได้ประโยชน์รองคือ  $V_{ff}$  ใกล้เคียงกับความเร็วไต่ที่นิยมใช้งานจริงในปัจจุบันและให้ผลตามต้องการ เช่น ความสะดวกของผู้โดยสาร ระบบของอากาศยานทำงานได้ดี และนักบินมองตรงหน้าได้ดีโดยหัวเครื่องไม่ขวาง

**3. หลักการทางกลศาสตร์การบิน**

อัตราไต่ (ROC) หรือความเร็วแนวตั้ง ( $v$ ) ของความเร็วใด ๆ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 โดยมีผลต่างของอัตราไต่ ( $\Delta v$ ) ระหว่าง AC1 ( $v_y$ ) และ AC2 ( $v$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$ROC = v = \left( \frac{T-D}{W} \right) V \tag{1}$$

$$\Delta v = v - v_y \tag{2}$$

ระยะเวลา  $\Delta t$  เป็นระยะเวลาที่ AC1 บินจากจุด A ถึง B (รูปที่ 4) เริ่มจากเวลาที่ AC1 ได้ถึงระยะสูงเป้าหมายที่จุด A และดำเนินต่อไปจนถึงเวลาที่ AC2 ได้มาถึงจุด C ซึ่ง  $\Delta t$  คำนวณจากอัตราส่วนของผลต่างความเร็วแนวตั้งระหว่าง AC1 และ AC2 ( $\Delta v$ ) ต่อความเร็วแนวตั้งของ AC1 ( $v_y$ ) ตามสมการที่ 3

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{v_y} \quad (3)$$

ระยะทางภาคพื้นของ AC1 สามารถแบ่งการคำนวณออกได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเริ่มต้นจากจุดเริ่มไต่ถึงจุด A และช่วงที่สองเริ่มต้นจากจุด A ถึง B ซึ่งช่วงแรกนั้น AC1 บินด้วยความเร็วภาคพื้น  $u_y$  เป็นระยะเวลา  $1-\Delta t$  และช่วงที่สอง AC1 บินด้วยความเร็ว  $V_L$  เป็นระยะเวลา  $\Delta t$  โดย  $V_L$  เป็นความเร็วบินระดับที่กำหนดขึ้นตามสะดวก ซึ่งสามารถคำนวณระยะทางภาคพื้น  $(S/t)_y$  ของ AC1 ได้ตามสมการที่ 4 โดยระยะทางภาคพื้น  $(S/t)_y$  ของ AC1 เป็นระยะทางต่อหน่วยเวลาเพราะคำนวณจากความเร็ว และสามารถคำนวณหาระยะทางภาคพื้นต่อหน่วยเวลาของ AC2  $(S/t)$  ได้จากความเร็วภาคพื้นของ AC2 ตามสมการที่ 5

$$(S/t)_y = u_y(1-\Delta t) + V_L(\Delta t) \quad (4)$$

$$(S/t) = u \quad (5)$$

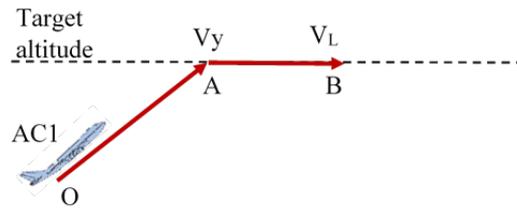
ระยะทางภาคพื้นทั้ง  $(S/t)_y$  ของ AC1 และ  $(S/t)$  ของ AC2 เป็นระยะทางต่อหน่วยเวลา ดังนั้น ผลต่างจึงเป็นระยะนำต่อหน่วยเวลา ( $\Delta S/t$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6

$$\Delta S/t = (S/t) - (S/t)_y \quad (6)$$

$\Delta S/t$  คือ วิธีเปรียบเทียบสมรรถนะการไต่ด้านระยะทางภาคพื้น โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณเป็นเวลาไต่ทั้งหมดของ AC1 และ AC2 กล่าวคือเป็นเวลา AC1 เดินทางถึงจุด B และ AC2 เดินทางถึงจุด C ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทั้ง AC1 และ AC2 ถึงเวลาเดียวกัน โดยความเร็วที่ทำให้  $\Delta S/t$  มีค่าสูงสุดคือความเร็วที่เป็น  $V_H$  ของระยะสูงนั้น ซึ่งแต่ละระยะสูงอาจมีค่า  $V_H$  แตกต่างกันได้ เพราะสมการที่ 1 - 6 ให้ผลที่แต่ละระยะสูงไม่เท่ากัน ไม่มีผลตลอดย่านระยะสูง เช่น อัตราไต่ตามสมการที่ 1 มีผลที่ระยะสูงแต่ละแห่งไม่เท่ากัน ถ้าต้องการผลตลอดย่านระยะสูง ต้องรวบรวมข้อมูลของแต่ละระยะสูง เช่น แรงขับของเครื่องยนต์ แล้วนำมาประมวลผลรวมกัน

นอกจากการเปรียบเทียบตามหน่วยเวลา เราควรเปรียบเทียบตามหน่วยเชื้อเพลิง เพื่อประเมินผลกระทบต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงว่ามีผลต่อการเลือกความเร็วไต่  $V_H$  หรือไม่

การคำนวณระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิง ต้องทำการหาระยะทางต่อหน่วยเวลาด้วยปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไป (Fuel Used, FU) ซึ่งการคำนวณ FU ต้องคำนวณในแต่ละช่วงการบินที่ใช้ความเร็วเดียวกัน เช่น AC1 จากจุดเริ่มไต่จนถึงระยะสูงเป้าหมาย (OA ตามรูปที่ 6) บินด้วยความเร็ว  $V_y$  และช่วงที่บินระดับ (AB ตามรูปที่ 6) บินด้วยความเร็ว  $V_L$



รูปที่ 6 AC1 ทำการบิน 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงไต่ และช่วงบินระดับ

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไป (FU) ในช่วง OA ( $S_y$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 7 ( $FF = \text{Fuel Flow}$ ) และปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไป (FU) ในช่วง AB ( $S_L$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 8 โดยผลรวมของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมดของอากาศยาน AC1 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 9

$$(FU)_{S_y} = (1 - \Delta t)(FF)_{V_y} \quad (7)$$

$$(FU)_{S_L} = \Delta t(FF)_{V_L} \quad (8)$$

$$(FU)_y = (1 - \Delta t)(FF)_{V_y} + \Delta t(FF)_{V_L} \quad (9)$$

ระยะทางต่อหน่วยเชื้อเพลิงของ AC1 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 10 ซึ่งคำนวณจากระยะทางภาคพื้นตามสมการที่ 4 และปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมดของ AC1 ตามสมการที่ 9 ในทำนองเดียวกันระยะทางต่อหน่วยเชื้อเพลิงของ AC2 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 11 โดยมีผลต่างของระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิงซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 12

$$(S/FU)_y = \frac{(S/t)_y}{(FU)_y} \quad (10)$$

$$(S/FU) = \frac{(S/t)}{(FU)} = \frac{V}{(FF)_V} \quad (11)$$

$$\Delta(S/FU) = (S/FU) - (S/FU)_y \quad (12)$$

ระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิงที่คำนวณตามสมการที่ 12 ใช้คัดเลือก  $V_H$  ว่าแตกต่างจากการคัดเลือกตาม  $\Delta S/t$  ตามสมการที่ 6 หรือไม่เท่านั้น ซึ่งการเปรียบเทียบ  $\Delta(S/FU)$  ไม่มีประโยชน์ต่อการเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงระหว่าง AC1 และ AC2 เพราะลักษณะการไต่ของ AC1 ใช้เพื่อการเปรียบเทียบผลของความเร็วไต่เท่านั้น ไม่ใช่เพื่อนำไปใช้บินจริง

#### 4. ตัวอย่างอากาศยานใบพัด

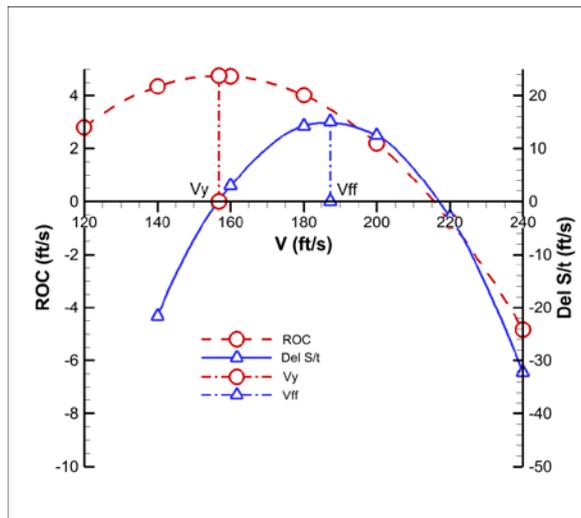
ตัวอย่างอากาศยานใบพัดที่ทำการศึกษา คือ อากาศยานใบพัดขนาดเล็ก Piper Cherokee Arrow PA-28R ดังแสดงในรูปที่ 7 ที่ระยะสูง 10,000 ft (3,048 m) โดยการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้  $V_L = 214 \text{ ft/s}$  (65.2 m/s) ซึ่งเป็นความเร็วบินระดับสูงสุดเมื่อใช้กำลังไต่สูงสุด [7]



รูปที่ 7 อากาศยานใบพัดขนาดเล็ก Piper Cherokee Arrow PA-28R

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะนำต่อหน่วยเวลา ( $\Delta S/t$ ) และความเร็วไต่ค่าต่าง ๆ ของตัวอย่างอากาศยานใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 8 สามารถสรุปได้ ดังนี้

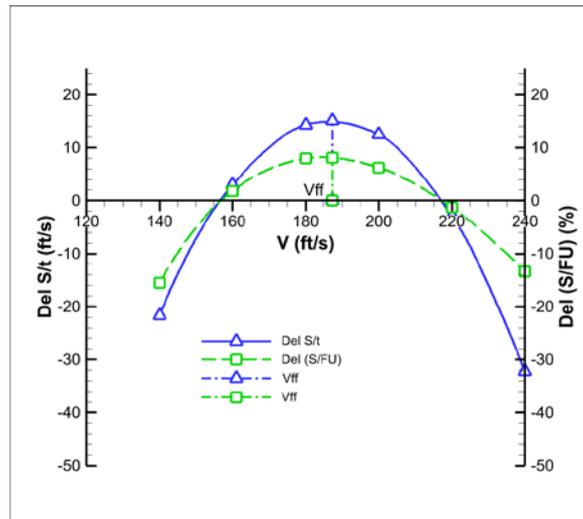
- $V_H$  ซึ่งเป็นความเร็วไต่ที่ให้ค่า  $\Delta S/t$  สูงกว่าความเร็วอื่น ๆ คือ 187 ft/s (57 m/s)
- $\Delta S/t$  เป็นบวกตลอดย่าน  $V_y$  (157 ft/s, 47.8 m/s) ถึง  $V_L$  (214 ft/s, 65.2 m/s) แสดงว่าทุกความเร็วที่สูงกว่า  $V_y$  เมื่อไต่ถึงระยะสูงเดียวกัน จะนำหน้าอากาศยานที่ไต่ด้วยความเร็ว  $V_y$
- $\Delta S/t$  สูงสุดมีค่า 15.1 ft/s (4.60 m/s) ซึ่งคิดเป็น 8.1% ของระยะทางรวมภาคพื้นของการไต่จนถึงระยะสูงเป้าหมาย ดังนั้นระยะนำถือว่าไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางทั้งหมดของการไต่ด้วย  $V_H$
- $\Delta S/t$  คิดเป็น 4.4 เท่าของอัตราไต่ หรือ  $(\Delta S/t)/v = 4.4$  ดังนั้น ถ้าไต่เป็นระยะสูง 1,000 ft (305 m) จะไต่ระยะนำ 4,400 ft (1,341 m) แสดงว่าการไต่ด้วยความเร็ว  $V_H$  จะไต่ระยะทางภาคพื้นไกลกว่าการไต่ด้วยความเร็ว  $V_y$  มากพอสมควร
- รูปที่ 8 แสดงอัตราไต่ที่ความเร็วต่าง ๆ ด้วย เพื่อแสดงว่า  $V_H$  ให้อัตราไต่ 3.5 ft/s (1.07 m/s) หรือ 73% ของอัตราไต่สูงสุด



รูปที่ 8 อัตราไต่ (ROC) และระยะนำต่อหน่วยเวลา ( $\Delta S/t$ ) ของ PA-28R ที่ 10,000 ft

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิง,  $\Delta(S/FU)$  และความเร็วไต่ค่าต่าง ๆ ของตัวอย่างอากาศยานใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าความเร็วไต่ที่ให้ค่าระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิง,  $\Delta(S/FU)$  สูงสุด ยังคงเป็น  $V_H = 187$  ft/s

(57 m/s) และเนื่องจากอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของ PA-28R ไม่แปรผันตามความเร็ว ดังนั้น ข้อสรุปต่อหน่วยเชื้อเพลิง จึงไม่แตกต่างจากข้อสรุปต่อหน่วยเวลา



รูปที่ 9  $V_{ff}$  ของ PA-28R ที่ 10,000 ft ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อคำนวณจากระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิง,  $\Delta(S/FU)$

### 5. ตัวอย่างอากาศยานไอพ่น

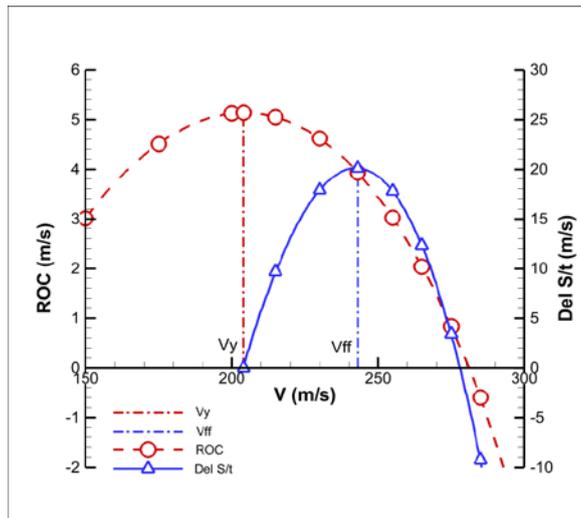
ตัวอย่างอากาศยานไอพ่นที่ทำการศึกษาคือ เครื่องบินโดยสารไอพ่นขนาดใหญ่ Boeing 747-100 ดังแสดงในรูปที่ 10 ที่ระยะสูง 6,000 m (20,000 ft) โดยการศึกษาในครั้งนี้เลือกใช้  $V_L = 285$  m/s (0.9 M) [7] ซึ่งโดยทั่วไปเป็นความเร็วบินระดับสูงสุดของเครื่องบินโดยสาร เนื่องจากแรงต้านเพิ่มขึ้นจากคลื่นเสียง (Drag Divergence) นอกจากนี้ ยังเป็นความเร็วที่ใกล้เคียงกับความเร็วสูงสุดที่บินระดับได้ด้วยกำลังไต่ต่อเนื่อง



รูปที่ 10 เครื่องบินโดยสารไอพ่นขนาดใหญ่ Boeing 747-100

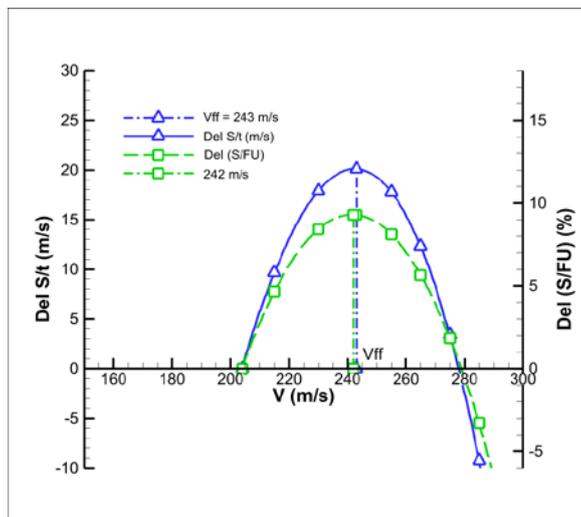
ความสัมพันธ์ระหว่างระยะนำต่อหน่วยเวลา ( $\Delta S/t$ ) และความเร็วไต่ค่าต่าง ๆ ของตัวอย่างอากาศยานไอพ่น ดังแสดงในรูปที่ 11 สามารถสรุปได้ ดังนี้

- $V_{ff}$  ซึ่งเป็นความเร็วไต่ที่ให้ค่า  $\Delta S/t$  สูงกว่าความเร็วอื่น ๆ คือ 243 m/s (0.77 M)
- $\Delta S/t$  สูงสุดมีค่า 20.1 m/s คิดเป็น 8.27% ของระยะทางรวมภาคพื้นของการไต่จนถึงระยะสูงเป้าหมาย ดังนั้น ระยะนำถือว่าไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางทั้งหมดของการไต่ด้วย  $V_{ff}$
- $\Delta S/t$  คิดเป็น 5.1 เท่าของอัตราไต่ หรือ  $(\Delta S/t)/v = 5.1$  ดังนั้น ถ้าไต่เป็นระยะสูง 1,000 ft จะไต่ระยะนำ 5,100 ft แสดงว่าการไต่ด้วยความเร็ว  $V_{ff}$  จะไต่ระยะทางภาคพื้นไกลกว่าการไต่ด้วยความเร็ว  $V_y$  มากพอสมควร
- รูปที่ 11 แสดงอัตราไต่ที่ความเร็วต่าง ๆ ด้วย เพื่อแสดงว่า  $V_{ff}$  ให้อัตราไต่ 3.9 m/s หรือ 77% ของอัตราไต่สูงสุด



รูปที่ 11 อัตราไต่ (ROC) และระยะนำต่อหน่วยเวลา ( $\Delta S/t$ ) ของ Boeing 747-100 ที่ 6,000 m

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิง,  $\Delta(S/FU)$  ของความเร็วไต่ค่าต่าง ๆ ของตัวอย่างอากาศยานไอพ่น ดังแสดงในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าความเร็วไต่ที่ให้ค่าระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิง,  $\Delta(S/FU)$  สูงสุด คือ 242 m/s ซึ่งมีค่าน้อยกว่า  $V_{ff}$  ที่ให้ระยะนำต่อหน่วยเวลา ( $\Delta S/t$ ) สูงสุดเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของ Boeing 747-100 เพิ่มขึ้นตามความเร็ว แต่เพิ่มขึ้นน้อยมาก



รูปที่ 12  $V_{ff}$  ของ Boeing 747-100 ที่ 6,000 m เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อคำนวณจากระยะนำต่อหน่วยเชื้อเพลิง,  $\Delta(S/FU)$

## 6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะอากาศยาน มีการเผยแพร่และตีพิมพ์อย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งส่วนมากจะเน้นในด้านสมรรถนะอากาศยานในการไต่ขึ้นและลงสนามที่สัมพันธ์กับความปลอดภัยในการบิน [8] และสัมพันธ์กับระยะทางภาคพื้น [9] รวมถึงปัจจัยสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะอากาศยาน [10] ซึ่งต่างล้วนต้องพิจารณาและทำการศึกษาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความเร็วไต่ของอากาศยานทั้งสิ้น ทั้งนี้ เพราะความเร็วไต่ของอากาศยาน นับเป็นสมรรถนะอากาศยานที่สำคัญ ที่ต้องพิจารณาให้เกิดความปลอดภัยในการทำการบิน และจำเป็นต้องทำการศึกษาตั้งแต่การออกแบบอากาศยาน [11] การทำการบินทดสอบ [12] รวมถึงเมื่อนำอากาศยานไปใช้งานจริงแล้ว

ไม่ว่าจะเป็นอากาศยานขนาดเล็ก อากาศยานขนาดใหญ่ หรืออากาศยานไร้คนขับก็ตาม ดังตัวอย่างอากาศยานใบพัดและอากาศยานไอพ่นที่แสดง สำหรับเครื่องบินโดยสารของสายการบิน นักบินจะได้รับคู่มือการบินให้ได้ด้วยความเร็วประมาณ 0.8 Mach ตั้งแต่ความสูง 10,000 ฟุต ขึ้นไป จนถึงระยะสูงเดินทาง (30,000 ฟุต ขึ้นไป) ซึ่งความเร็วไต่ที่สายการบินเลือกใช้ไม่ชัดเจนว่าตั้งอยู่บนทฤษฎีใด ตามตัวอย่างเครื่องบิน Boeing 747-100 ในหัวข้อที่ 5 ความเร็วไต่  $V_H = 0.77$  Mach ที่ระยะสูง 20,000 ฟุต นับว่าใกล้เคียงกับความเร็วไต่ที่สายการบินเลือกใช้ทำงาน โดยที่  $V_H$  ตั้งอยู่บนทฤษฎีกลศาสตร์การบินอย่างชัดเจน

## 7. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

- การไต่ไกลและไต่ด้วยความเร็ว  $V_H$  ให้ผลตามเป้าหมาย คือ ได้ระยะทางภาคพื้นเพิ่มขึ้นจากการไต่ด้วยความเร็วอัตราไต่สูงสุด ( $V_y$ ) และได้ผลลัพธ์ที่ต้องการเช่นกัน คือ มุมปะทะของเครื่องบินลดลงเพราะความเร็ว  $V_H$  สูงกว่า  $V_y$
- การไต่ด้วยความเร็ว  $V_H$  จะได้ระยะนการไต่ด้วยความเร็ว  $V_y$  คิดเป็นระยะประมาณ 4 เท่าของระยะไต่ (ไต่ 1,000 ft ได้ระยะนำ 4,000 ft)
- การเปรียบเทียบสมรรถนะการไต่ตามปริมาณเชื้อเพลิงแตกต่างจากการเปรียบเทียบตามปริมาณเวลาเล็กน้อย
- การคำนวณความเร็วไต่ไกลและไต่ ( $V_H$ ) ใช้หลักการทางกลศาสตร์การบิน เป็นเทคนิคสากลที่ใช้ได้กับอากาศยานทุกแบบและทุกรุ่น เหมือนความเร็วมุมไต่สูงสุด ( $V_x$ ) และความเร็วอัตราไต่สูงสุด ( $V_y$ ) สามารถนำไปปรับปรุงแก้ไขได้ตามสภาวะการบิน
- ความเร็ว  $V_H$  ของเครื่องบินโดยสารที่คำนวณไต่ตามตัวอย่าง (0.77 M) ใกล้เคียงกับความเร็วไต่ที่ผู้ผลิตแนะนำ (0.78 M สำหรับ B737 และ A319) จึงสามารถนำไปใช้งานได้ตามปกติ
- ความเร็ว  $V_H$  ของเครื่องบินใบพัดขนาดเล็กที่คำนวณไต่ตามตัวอย่าง (187 ft/s, 57 m/s) สูงกว่าความเร็วไต่ที่ผู้ผลิตแนะนำ แต่ผู้ผลิตก็แนะนำให้ไต่ด้วยความเร็วสูงกว่า  $V_y$  เล็กน้อยอยู่แล้ว ซึ่งการไต่ด้วยความเร็ว  $V_H$  คาดว่าจะเป็นความเร็วที่ผู้ใช้พอใจมากขึ้น
- กฎการจราจรทางอากาศควบคุมให้ความเร็วอากาศยานไม่เกิน 250 kts เมื่อระดับความสูงต่ำกว่า 10,000 ft (ICAO Annex 11 Appendix 4) ซึ่งอาจจะเป็นปัญหาเกี่ยวกับความเร็วไต่  $V_H$  โดยเฉพาะสำหรับเครื่องบินโดยสาร (ตามตัวอย่าง Boeing 747-100 ความเร็ว  $V_H = 243$  kts ที่ความสูง 20,000 ft ซึ่งคาดว่าจะต่ำกว่า  $V_H$  ที่ความสูงต่ำกว่า 10,000 ft) ในทางปฏิบัติจะต้องรักษาความเร็วไต่ต่ำกว่า 250 kts จนไต่พ้นความสูง 10,000 ft จึงจะสามารถเร่งความเร็วไต่ให้เป็น  $V_H$  ที่ถูกต้องได้ สำหรับเครื่องบินใบพัดขนาดเล็ก  $V_H$  ส่วนใหญ่จะต่ำกว่า 250 kts (ตามตัวอย่าง PA-28R ความเร็ว  $V_H = 111$  kts หรือ 187 ft/s ที่ความสูง 10,000 ft) จึงคาดว่าจะไม่มีปัญหาเรื่องความเร็วเมื่อต่ำกว่า 10,000 ft
- การคำนวณหา  $V_H$  ขึ้นกับความเร็วบินเดินทางต่อเนื่อง ( $V_L$ ) สำหรับการศึกษารุ่นนี้ใช้  $V_L$  ใกล้เคียงกับความเร็วสูงสุดที่บินระดับไต่ด้วยกำลังไต่ต่อเนื่อง ซึ่งในการใช้งานจริงควรใช้  $V_L$  ที่เหมาะสมในการบินระดับด้วยกำลังบินเดินทางต่อเนื่องที่ระยะสูงนั้น
- ผลของระยะสูง กำลังเครื่องยนต์ และสภาวะการบินอื่น ๆ ต้องศึกษาต่อไปว่ามีผลอย่างไรต่อการไต่ไกลและไต่

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Federal Aviation Administration. (2016). **FAA-H-8083-25B, Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge**. Oklahoma City: United States Department of Transportation.
- [2] B.W. McCormick. (1995). **Aerodynamics Aeronautics and Flight Mechanics**. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Cessna Aircraft Company. (1978). **Pilot's Operating Handbook Skyhawk 1978 Model 172N**. Wichita: Cessna Aircraft Company.

- [4] The Boeing Company. (2005). **737-800W Flight Planning and Performance Manual**. Revision Number 3. Seattle: Commercial Aviation Services, Boeing Commercial Airplanes.
- [5] Airbus SE. (2017). **A318/A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual**. Issue Date 17 Oct 2017. Toulouse: Airbus SE.
- [6] Study Flight. (2020). Climbing. Retrieved on October 5, 2020, from <https://www.studyflight.com>
- [7] B.W. McCormick. (1979). **Aerodynamics Aeronautics and Flight Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [8] A. O' Connor and D. Kearney. (2018). Evaluating the Effect of Turbulence on Aircraft During Landing and Take-Off Phases. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 5(4): 1-15.
- [9] T.A. Sukhairi. (2012). Analysis Take-off and Landing Performance for Boeing 747. *Journal Contribution*. Online Published.
- [10] Y. Zhou, N. Zhang, C. Li, Y. Liu and P. Huang. (2018). Decreased Takeoff Performance of Aircraft due to Climate Change. *Climatic Change*. 151: 463-472.
- [11] F. Gallard, M. Meaux, M. Montagnac, B. Mohammadi. (2013). Aerodynamic Aircraft Design for Mission Performance by Multipoint Optimization. 21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, San Diego. Online Published.
- [12] J.N. Ostler, W.J. Bowman, D.O. Snyder, T.W. McLain. (2009). Performance Flight Testing of Small, Electric Powered Unmanned Aerial Vehicles. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 1(3): 155-171.

### 9. สัญลักษณ์

T	= Thrust	$\Delta S$	= Leading distance
D	= Drag	$\Delta S/t$	= Leading distance per unit time
W	= Weight	FF	= Fuel flow rate
$V_L$	= Level speed	FU	= Fuel used
$V_x$	= Maximum angle climb speed	$(S/FU)_y$	= Ground distance of $V_y$ per unit fuel
$V_y$	= Maximum rate climb speed	$(S/FU)$	= Ground distance of V per unit fuel
$V_s$	= Stall speed	$(S/FU)_L$	= Ground distance of $V_L$ per unit fuel
V	= Arbitrary climb speed	$\Delta(S/FU)$	= Leading distance per unit fuel
$V_{ff}$	= Far and fast climb speed		
v	= Vertical speed		
u	= Horizontal (ground) speed		
$v_y$	= Vertical component of $V_y$		
$u_y$	= Horizontal component (ground) of $V_y$		
$\Delta v$	= Difference of vertical speed component		
$\Delta u$	= Difference of horizontal speed component		
$\Delta t$	= Time difference		
$(S/t)_y$	= Ground distance of $V_y$ per unit time		
$(S/t)$	= Ground distance of V per unit time		
$(S/t)_L$	= Ground distance of $V_L$ per unit time		