

Vol. 1, No. 2, May-August, 2019

ISSN 2651-0669

# Defence Technology Academic Journal : DTAJ



Defence Technology Institute





# รายชื่อผู้จัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

## คณะที่ปรึกษา

พลอากาศเอก ดร.ปรีชา ประดับมุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พลอากาศตรี ดร.สุธี จันทร์พันธุ์

นาวาอากาศเอก คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์

## บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

## กองบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Professor Dr. Peter Haddawy

มหาวิทยาลัยมหิดล

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ จิรวินิจ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.ระดม พงษ์วุฒิธรรม

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.ทศพล บุญเกิน

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ธารีบุญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.นิภาพร ชุตินันต์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ ฉิมพาลี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ กฤษเจริญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ สกุลเสริมสุข

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรประภา ภูมมะกายจนะ โรแบร์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

พันเอก ดร.อรรถเดช ประทีปอุษานนท์

สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ

นาวาอากาศเอกหญิง ดร.คณินิจ อนุโรจน์

สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ

ดร.เกียรติอนันท์ ล้วนแก้ว

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

## ประจำกองบรรณาธิการ

นางสาวอินทิวรา จุลชาติ

นางสาวบุญญาภรณ์ วาณิชชาติ

นางสาวสาวิตรี ระงับพิช

นางสาวลัญญณ์รัฐ ภาตะนันท์

นางสาวสุนันทา ไทวระ

นางสาวนุศลรัตน์ ลวงลายทอง

นางสาวธนิสตา ประภาสทิ

นางสาวปิ่นกนก ชันชูลีย์

# สารบัญ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ  
ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2562

## บทความวิชาการ (Academic Articles)

- เทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดคอกซ์โพลีเมอร์จะเป็นทางเลือกใหม่หรือไม่  
รังสิมา หนีตสอน 4
- การศึกษาความต้องการข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพัฒนา Mobile4RU  
เพื่อการเผชิญเหตุสาธารณภัยและภัยพิบัติ  
สุริยะเวช บุญธรรรัตน์, นิคม โกปราชญ์ และ สมสฤษฏ์ สิ้นหนัง 20

## บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Articles)

- การวิเคราะห์ความเป็นไปได้การถ่ายทอดเทคโนโลยีป้องกันประเทศ  
ภายใต้โครงการอพเชตระหว่างไทยและยูเครน  
บดีรินทร์ สันทัด 34

## บทความวิจัย (Research Articles)

- Surrogate-assisted optimization for UAV wing  
preliminary design using evolutionary algorithm  
Kittinan Wansasueb, Natee Panagant, Nantiwat Pholdee and Sujin Bureerat 44
- อิทธิพลของสารตัวเติมผสมซิลิกาและเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกล  
และสมบัติทางความร้อนของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด  
ณัฐวัฒน์ วิญญา และ ปิยนันท์ บุญประเสริฐ 56
- การระบุพื้นที่น้ำท่วมจากข้อมูลดาวเทียมและแบบจำลอง ทางกายภาพ:  
กรณีศึกษา อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2561  
ธนัทเดช โรจนกุล, อุบล แสงโยธา และ ชีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ 62
- การวิเคราะห์โรเตอร์แอร์โดนามิกส์ของใบพัด VTOL UAV  
โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ  
ณัฐวิวัฒน์ พลดี, สุจินต์ บุรีรัตน์ และ วีระพล นวนทอง 72
- Small Arms Simulator for Military and Security Trainings-  
an Industry and Competitor Analysis  
Ranchida Khantong 82
- Comparison of manufacturing effectiveness on ablative material  
Suriyawate Boonthalarath 100
- กระบวนการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตทางเลือก  
สำหรับประยุกต์ใช้ในกิจการพลังงานทดแทน  
หัตถดาว พุทธิชาติ, นฤมล เครื่ององอาจกุล และ รังสิมา หนีตสอน 106

## บทบรรณาธิการ

สวัสดีท่านผู้อ่านทุกท่าน วารสาร DTAJ ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 ต้อนรับพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562 ซึ่งโดยความหมายของเทคโนโลยีป้องกันประเทศ หมายความว่า วิทยาการในการนำองค์ความรู้ที่มีอยู่หลากหลายแขนงมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการป้องกันประเทศและด้านการทหารอื่นๆ รวมถึงการประยุกต์ใช้ประโยชน์แก่ประเทศเป็นส่วนรวม และยังคงให้สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศมีวัตถุประสงค์สำคัญในการศึกษาค้นคว้า วิจัย และพัฒนา นวัตกรรมและเทคโนโลยีป้องกันประเทศ รวมทั้งดำเนินการอื่นที่เกี่ยวข้องหรือต่อเนื่องเพื่อนำไปสู่อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

อีกวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ การส่งเสริมและสนับสนุนการเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการ ซึ่งวารสาร DTAJ ได้กำหนดเป้าประสงค์และขอบเขตในการเผยแพร่ผลงานและองค์ความรู้ทางวิชาการจากการศึกษา ค้นคว้า วิจัย และพัฒนา นวัตกรรมและเทคโนโลยีป้องกันประเทศของภาคีเครือข่ายความร่วมมือด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยงานของรัฐและสถาบันการศึกษา เชื่อได้ว่าจะสร้างคุณภาพของต้นแบบการวิจัยและพัฒนาเพื่อเข้าสู่อุตสาหกรรมการผลิต รวมถึงเป็นศูนย์รวมองค์ความรู้และนวัตกรรม เพื่อการเป็นองค์กรสมรรถนะสูงและยั่งยืนของประเทศไทย

เนื้อหาทางวิชาการของ DTAJ ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 ยังคงประกอบไปด้วยการวิเคราะห์เทคโนโลยี โดยใช้กรณีศึกษาการถ่ายทอดเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ผลงานทางวิชาการ ซึ่งประกอบด้วยวารสารอภิปรายทางเลือกใหม่ของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ และการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์เพื่อการเผชิญเหตุสาธารณภัยและภัยพิบัติ อีกทั้งยังคงเนื้อหาหลักเป็นผลการวิจัยและพัฒนาของผู้เขียน ซึ่งครอบคลุมเนื้อหาเทคโนโลยีเป้าหมายหลักของ สทป. ประกอบด้วย ผลการออกแบบปีก UAV การวิเคราะห์โรเตอร์แอร์โรไดนามิกส์ของใบพัด VTOL UAV การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อนของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด การวิเคราะห์อุตสาหกรรมและคู่แข่งตลาดเครื่องบินช่วยฝึกเทคโนโลยีสูง และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดาวเทียมถ่ายภาพเพื่อการกิจด้านภัยพิบัติ

ทั้งนี้ ท่านผู้อ่านที่มีผลงานตามเป้าประสงค์และขอบเขตของวารสาร DTAJ สามารถศึกษาหลักเกณฑ์การเขียนบทความได้ที่ [www.dti.or.th/dtaj](http://www.dti.or.th/dtaj)

บรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

# เทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์จะเป็นทางเลือกใหม่หรือไม่

รังสิมา หนีตสอน<sup>1\*</sup>

วันที่รับ 15 กรกฎาคม 2562 วันที่แก้ไข 7 สิงหาคม 2562 วันตอบรับ 8 สิงหาคม 2562

## บทคัดย่อ

เศรษฐกิจยุคใหม่กำลังถูกขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม อุตสาหกรรมที่ขับเคลื่อนด้วยเศรษฐกิจยุคใหม่สามารถแบ่งออกเป็น อุตสาหกรรมเป้าหมายระยะสั้น-ระยะกลาง และเป้าหมายระยะยาว ทั้งนี้อุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีพลังงานทางเลือก (Alternative energy technology) เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมเป้าหมายระยะยาว องค์ประกอบสำคัญประการหนึ่งสำหรับการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีพลังงานทางเลือกคือ ทรัพยากรบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง บทความนี้จะนำเสนอข้อมูลทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (Redox flow battery) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานทางเลือก เพื่อให้เป็นความรู้พื้นฐานประกอบการพิจารณาการนำเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์มาใช้สำหรับอุตสาหกรรมในประเทศไทย ทั้งนี้ พลังงานทางเลือกหลักของประเทศไทย ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์และพลังงานจากลม แต่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทางเลือกเหล่านี้ยังขาดความเสถียร ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy storage system) มาใช้ร่วมกับพลังงานทางเลือกดังกล่าว เพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใช้ในช่วงที่ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ ระบบการกักเก็บพลังงานยังช่วยให้พลังงานที่มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพต่อการนำไปใช้งาน สมบัติที่สำคัญของแบตเตอรี่ที่นิยมนำไปใช้งาน ได้แก่ ความหนาแน่นของพลังงานที่สูง รอบการอัดและคายประจุมากกว่า 1,000 รอบ มีขนาดเล็กและบาง นอกจากนี้ ผู้ใช้ยังให้ความสำคัญกับอายุการใช้งาน การคายประจุด้วยตัวเอง การบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน บทความนี้จะนำเสนอหลักการการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้าเคมีด้วยแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ 4 ประเภท ได้แก่ วานเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (Vanadium redox flow battery) ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (Hydrogen bromine flow battery) ไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (Hydrogen iodine flow battery) และพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (Polysulfide bromine flow battery) รวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำไปใช้งานกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead acid battery) และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium ion battery) ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานและทิศทางในอนาคตของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์

**คำสำคัญ :** แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ วานเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ ไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ การกักเก็บพลังงาน

<sup>1</sup> ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้แต่ง, อีเมล: rungsima.y@sci.kmutnb.ac.th

# Will redox flow battery technology be a new choice?

Rungsima Yeetsorn<sup>1\*</sup>

## Abstract

The new economy referring to the on-going development evolves from new technologies and innovations. The industries driven by the new economy can be categorized into short-to-long term and long-term targets. An alternative energy industry emphasized on this article is one of the long-term target industries. The key element for driving the alternative energy industry is industrial personnel with knowledge and understanding of related technologies. Therefore, this article is intended to present scientific information about redox flow batteries, one of the alternative energy technologies, in order to provide a basic knowledge for considering the use of the redox flow batteries in Thailand industry such as for power generation, thermal use, and transport development.

Nowadays, wind and solar energy mainly account for Thailand energy production, however; wind and solar sources rely on uncontrolled recourses. Power generations from wind turbines and solar cells are intermittent and inconstant, thus they cannot be used to provide steady energy. The integrated energy is a synergism concept involving separate units act simultaneously and in coordination. An energy storage device can be adopted and identified as the ultimate solution to increase the stability of the energy production system. New batteries should acquire high energy densities, deliver 1000 charge/discharge cycles and be paper-thin. In addition, users also pay attention to longevity, load characteristics, maintenance requirements, self-discharge and operational costs. This article presents the principle of electrical energy storage in form of electrochemistry as a redox flow battery. Four redox flow batteries addressed on this paper are a vanadium redox flow battery, a hydrogen bromine flow battery, a hydrogen iodine flow battery, and a polysulfide bromine flow battery. The performance comparisons between redox flow battery and lead-acid battery, and between redox flow battery and lithium ion battery are stated as well as applications and future directions of the redox flow battery.

**Keywords :** Energy storage, Flow battery, Vanadium redox flow battery, Hydrogen-Bromine flow battery, Hydrogen- iodine flow battery, Polysulfide-Bromine flow battery

---

<sup>1</sup> Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

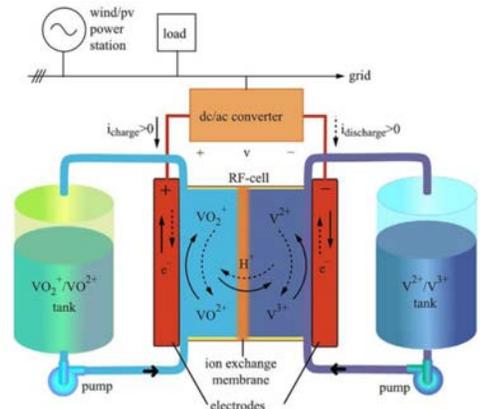
\* Corresponding author, E-mail: rungsima.y@sci.kmutnb.ac.th

# 1. เพราะเหตุใดแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยและอุตสาหกรรมในประเทศไทย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมทั่วโลกมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น แหล่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ผลิตพลังงาน ได้แก่ เชื้อเพลิงจากฟอสซิลจากการสำรวจการใช้พลังงานของโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 ถึงปี ค.ศ.2016 [1] พบว่าปริมาณการใช้ฟอสซิลลดลงจาก 78.3 เป็น 75.5% เนื่องจากเริ่มมีการผลิตพลังงานจากพลังงานทางเลือกที่เพิ่มขึ้นจาก 19.1 เป็น 24.5% พลังงานทางเลือกหลักที่ใช้กันทั่วโลก [2] คือ พลังงานจากลม (4%) พลังงานจากชีวมวล (2%) และพลังงานแสงอาทิตย์ (1.5%) รัฐบาลไทยตระหนักในประเด็นนี้ จึงกำหนดให้มีการใช้พลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้ว่ากระทรวงพลังงานได้ขับเคลื่อนนโยบายพลังงาน 4.0 ที่เร่งพัฒนาระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy storage) โดยเน้นเรื่องเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อลดความเสี่ยงและสร้างเสถียรภาพให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทน [3] นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในประเทศอีกด้วย อีกทั้งกลไกการขับเคลื่อนเศรษฐกิจเพื่ออนาคตได้ถูกผลักดันด้วย 10 อุตสาหกรรมเป้าหมาย ประกอบด้วย 5 อุตสาหกรรมเดิม (First S-curve) และ 5 อุตสาหกรรมอนาคต (New S-curve) [4] ทั้งนี้เทคโนโลยีพลังงานทดแทน หรือพลังงานทางเลือกสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ และหุ่นยนต์เพื่ออุตสาหกรรม เป็นต้น

เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่อรองรับการกักเก็บพลังงาน โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทางเลือก ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม และน้ำ แต่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทางเลือกเหล่านี้ยังขาดความเสถียร เนื่องจากความสามารถในการผลิตพลังงานเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสภาพ

อากาศและสถานที่ในการติดตั้ง เพื่อให้พลังงานทางเลือกเหล่านี้มีความเสถียรต่อการใช้งานในอนาคต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy storage system) มาใช้ร่วมกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือก (ลมและเซลล์แสงอาทิตย์) เพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในช่วงที่ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างระบบบูรณาการพลังงานทางเลือก [2]

นอกจากนี้ ระบบการกักเก็บพลังงานยังช่วยให้พลังงานที่ได้มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพต่อการนำไปใช้งาน

## ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEM

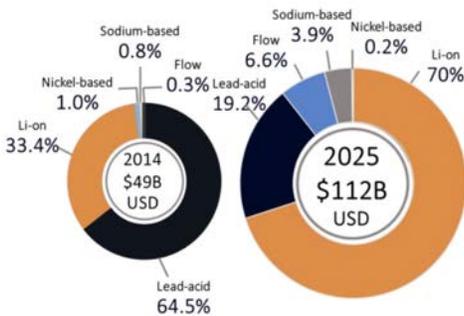
| MECHANICAL  | THERMAL   | ELECTROCHEMICAL   |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pump hydro-PHS</li> <li>- Compressed air-CAES</li> <li>- Flywheel-FES</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible heat storage molten salt/ACAES</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Secondary battery</li> <li>- Lead acid/NiCd/NiMH/Li/NaS</li> <li>- Flow battery</li> <li>- Redox Flow/Hybrid Flow</li> </ul> |
| CHEMICAL  | ELECTRICAL  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydrogen</li> <li>- Electrolyzes/Fuel cell/SNG</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Double layer capacitor- DLC</li> <li>- Superconducting magnetic coil-SMES</li> </ul> |   |

รูปที่ 2 การจำแนกชนิดการกักเก็บพลังงานรูปแบบต่างๆ

รูปแบบการกักเก็บพลังงานสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ประเภท [5] (แสดงรายละเอียดในรูปที่ 2) ได้แก่ การกักเก็บในรูปของพลังงานเชิงกล เช่น การกักเก็บในรูปแบบของปั้มน้ำแบบสูบกลับ (Pumped hydro) การกักเก็บ

ในรูปของพลังงานความร้อน เช่น การกักเก็บความร้อนจากเกลือหลอมเหลว (Sensible heat storage molten salt) การกักเก็บในรูปของพลังงานเคมีไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่และแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ การกักเก็บในรูปของพลังงานเคมี เช่น การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี ผ่านอุปกรณ์ที่ใช้กระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า หรือที่เรียกว่าอิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) และการกักเก็บในรูปของพลังงานไฟฟ้า เช่น ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Supercapacitor หรือ double layer capacitor)

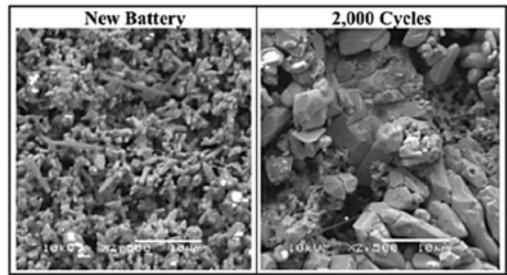
แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมสูงสุด (รูปที่ 3 [6]) ข้อมูลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าในปี 2014 มีความต้องการในการนำแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดไปใช้งานประมาณ 64.5% แต่มีการคาดการณ์ว่าความต้องการแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดลดลงเหลือ 19.2% เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งาน



รูปที่ 3 ส่วนแบ่งทางการตลาดของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ ในปี ค.ศ. 2014 และการคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2025 [6]

เมื่อมีการคายประจุ (Discharge) และอัดประจุ (Charge) ซ้ำหลายรอบจะเกิดการเสื่อมสภาพของขั้วแคโทดและแอโนด รวมทั้งการเสื่อมสภาพจากการระเหยของกรดซัลฟิวริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย การเสื่อมสภาพของขั้วแคโทด ซึ่งเป็นแผ่นตะกั่ว และขั้วแอโนด ซึ่งเป็นตะกั่วออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟชัน (Sulfation) [7] และเกิดเป็นผลึกเลดซัลเฟต (PbSO<sub>4</sub> : Lead (II) sulfate) ซึ่งผลึกดังกล่าวไม่สามารถนำไฟฟ้าได้

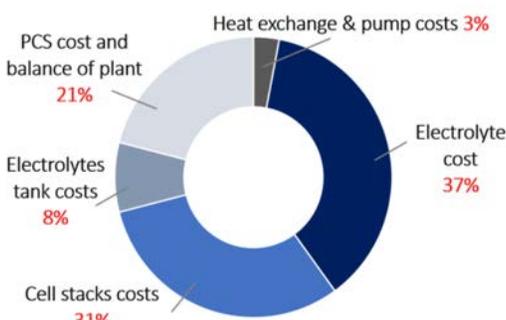
และแผ่นตะกั่วยังสูญเสียพื้นที่ผิวสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย เมื่อ PbSO<sub>4</sub> เปลี่ยนรูปไปเป็นโลหะตะกั่ว (Pb) (ดังแสดงในรูปที่ 4) เนื่องจากมีรอบการอัดประจุเป็นจำนวนมาก จะส่งผลต่อความเป็นรูพรุนและพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา (Active area) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานและรอบการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง



รูปที่ 4 การเสื่อมสภาพของขั้วแบตเตอรี่เมื่อมีการอัดประจุ 2,000 รอบ [7]

แบตเตอรี่ที่ได้รับความสนใจแทนการใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน มีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2025 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะมีส่วนแบ่งตลาดประมาณ 70% (รูปที่3) เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูง (100-200 Wh/kg) ประสิทธิภาพการทำงานสูงถึง 95% และมีจำนวนรอบการใช้งานประมาณ 4,000-8,000 รอบ [8] ขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบไปด้วย Li-Metal oxide (ขั้วแคโทด) และคาร์บอน (ขั้วแอโนด) ซึ่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อมีการอัดและคายประจุ หากต้องการนำแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนไปใช้งานที่ต้องการการกักเก็บพลังงานในปริมาณมากจะต้องเสียค่าวัสดุสูงมากสำหรับการขยายขนาดของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดด้านความทนทานต่อความร้อน [9] จึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์และการเกิดความร้อนต่อเนื่อง (Thermal runaway) เนื่องจากแบตเตอรี่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงและการเสื่อมสภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ราคาที่สูงของลิเทียมยังคงเป็น

อุปสรรคของอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณลิเทียมที่มีในตลาดโลก (ประมาณ 35,000 ตันต่อปี) ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการผลิตแบตเตอรี่สำหรับใช้งานในอุตสาหกรรม [10] จากข้อมูลดังกล่าวทำให้แบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์เป็นทางเลือกของอุตสาหกรรม ดังจะเห็นจากส่วนแบ่งตลาดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.4% เป็น 6.6% (รูปที่ 3) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้ถือว่าเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจที่สุดในแง่ของกำลังการผลิตที่ไม่จำกัด (Unlimited capacity) มีความยืดหยุ่นในการออกแบบเพื่อความปลอดภัย (Flexible security design) มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast response) [11] ในมุมมองของการเพิ่มกำลังการผลิตของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดนี้ สามารถทำได้โดยขยายขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ความสามารถในการผลิตและกักเก็บกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์มีค่าประสิทธิภาพต่อรอบการใช้งานสูงถึง 85% มีจำนวนรอบการใช้งานมากกว่า 13,000 รอบ ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่มีรอบการใช้งานเท่ากับ 3,000 และ 8,000 รอบ อีกทั้งเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์มีค่ามากกว่าของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน 10 เท่า



รูปที่ 5 ค่าลงทุนการติดตั้งของวานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์ [13]

หากพิจารณาค่าการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Capital cost) [12] พบว่าค่าการลงทุนในการติดตั้งของการกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ชนิด

รีด็อกซ์โพลีเมอร์ในหน่วยของค่าใช้จ่ายเชิงพลังงาน (Energy cost) ประมาณ 150-1,000 \$/kWh ซึ่งน้อยกว่าค่าการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยมีค่าเท่ากับ 500-2,500 \$/kWh สำหรับการพิจารณาค่าใช้จ่ายเชิงกำลังไฟฟ้า (Power cost) ของแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์จะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ 600-1,500 \$/kW ซึ่งยังมากกว่าค่าใช้จ่ายสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (175-400 \$/kW) ค่าการลงทุนในการติดตั้งของแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์ส่วนใหญ่มาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์คิดเป็น 37% และชุดเซลล์อนุกรม (Stack cell) คิดเป็น 31% ของค่าการลงทุนในการติดตั้งทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 5 กรณีการเปรียบเทียบการลงทุนในการติดตั้งของแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์ พบว่า ค่าการลงทุนดังกล่าวสูงกว่าการลงทุนของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดอยู่มาก คือระหว่าง 150-1,000 \$/kWh และ 200-400 \$/kWh ในกรณีของ Energy cost เมื่อเปรียบเทียบกับ Power cost จะแนวโน้มเดียวกันกับ Energy cost คือมีค่าเท่ากับ 600-1,500 \$/kW และ 300-600 \$/kW แต่เมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบการใช้งานระหว่างแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์ พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์มีจำนวนรอบการใช้งานมากกว่า 13,000 รอบ ส่วนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมีจำนวนรอบการใช้งานประมาณ 3,000 รอบ ทำให้ค่าการลงทุนในการติดตั้งที่คิดจากจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์มีค่าต่ำกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ซึ่งค่าการลงทุนเมื่อพิจารณาจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์เท่ากับ 5-8 และของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดเท่ากับ 20-100 \$/kWh per cycle หากพิจารณาเรื่องความสามารถของแบตเตอรี่ชนิดรีด็อกซ์โพลีเมอร์ พบว่า มีค่าที่บอกถึงความสามารถของแบตเตอรี่ในการนำเอาความจุที่มีอยู่ออกมาใช้งาน (Depth of discharge: DOD) มากกว่า 95% [13] แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถใช้งานได้ในช่วงความลึกของการคายประจุที่สูง (High depth of discharge) ส่งผลให้จำนวนรอบการใช้งานมากขึ้น ต่างจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมที่มีอายุ

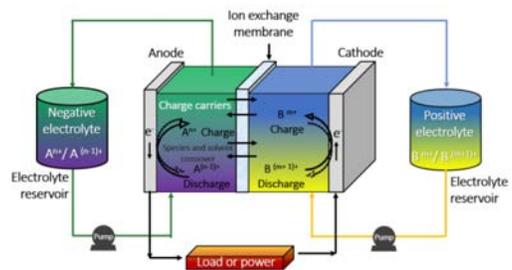
การใช้งานลดลง เมื่อถึงกระแสออกมาใช้งานในขณะที่ DOD ต่ำกว่า 50% [14]

ทั้งนี้สามารถสรุปจุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ได้ดังต่อไปนี้ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 20 ปี โดยสามารถคายและอัดประจุได้มากกว่า 10,000 รอบ สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่จัดเก็บไว้ได้มากกว่า 95% โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพ จัดเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในถังบรรจุอิเล็กโทรไลต์แทนการบรรจุไว้ในเซลล์อย่างแบตเตอรี่ชนิดอื่น อัตราการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าระหว่างจัดเก็บ (Self-discharge) ต่ำ มีโอกาสในการเกิดระเบิดเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนน้อย เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีน้อยกว่าระดับวิกฤต มีการบริหารจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์ได้ดี

## 2. หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์

แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีหลักการทำงานที่คล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เซลล์เชื้อเพลิงจัดเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกัลวานิกเซลล์ (Galvanic cell) คือ เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งชนิดกัลวานิกและอิเล็กโทรไลติกเซลล์ (Electrolytic cell) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถผันกลับได้ (Reversible reaction) กล่าวคือ หากต้องการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี (Charging) ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) หากต้องการการคายประจุ หรือการนำไปใช้งาน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ทำหน้าที่เป็นเซลล์กัลวานิก สามารถเรียกแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ว่า แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (Secondary battery) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในระบบสามารถผันกลับได้ ทำให้สามารถอัดและคายประจุได้ แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีองค์ประกอบหลักเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer electrolyte membrane) แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plates) และขั้วไฟฟ้า (Negative electrode และ Positive electrode) โดยมีบทบาทและหน้าที่เหมือนกับองค์ประกอบในเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของระบบแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ [15,16] ประกอบไปด้วยภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองฝั่งที่ติดตั้งอยู่ภายนอกเซลล์ เมื่อระบบทำงานสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์โดยผ่านปั๊ม เข้าสู่องค์ประกอบที่เรียกว่าอิเล็กโทรด ซึ่งทำหน้าที่เป็นพื้นที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Active area) เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งเป็นฉนวน ทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างฝั่งแอโนดและแคโทด เพื่อป้องกันการลัดวงจร เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นเยื่อแลกเปลี่ยนประจุที่เรียกว่า แนนฟิออน (Nafion) หรือพอลิเมอร์ ที่มีชื่อทางเคมีว่า Sulfonated tetrafluoroethylene based fluorocopolymer



รูปที่ 6 แผนภาพรีดอกซ์แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ (ปรับปรุงจาก [15])

ภายในระบบแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ ประกอบด้วย การอัดประจุและการคายประจุ (ดังรูปที่ 6) ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่วนของกระบวนการคายประจุ สารละลายแอโนไลต์ (Anolyte) จะถูกป้อนไปยังฝั่งแอโนดโดยผ่านปั๊ม จากนั้นสารละลายแอโนไลต์จะเคลื่อนที่ไปตามช่องทางการไหลบนแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plates) อิเล็กโทรไลต์จะแพร่ไปยังอิเล็กโทรด ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และได้ผลิตภัณฑ์คืออิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบจะเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรดกลับไปยังแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วออกสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกจากฝั่งแอโนดไปยังฝั่งแคโทด ประจุที่ทำหน้าที่เป็นตัวพา (Charge-carrying species) สามารถเคลื่อนที่จากแอโนดไปแคโทดได้โดยตรงผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน สารละลายแคโทไลต์ (Catholyte) ถูกป้อนเข้าสู่ระบบด้านแคโทดโดยปั๊ม สารละลายแคโทไลต์

จะผ่านไปยังช่องทางการไหลของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว และแพร่ไปยังอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายแคโทดโพตอน และอิเล็กตรอน การอัดประจุประกอบไปด้วยเกิดปฏิกิริยารีดักชันในสารละลายแอนโอด และปฏิกิริยาออกซิเดชันในแคโทด

แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของสถานะของพื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Electroactive species) [17] ซึ่งประกอบไปด้วย (1) พื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามีสถานะเป็นของเหลวทั้งสองด้านของเซลล์ ทั้งนี้ พลังงานเคมีจะถูกเก็บสะสมไว้ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (2) พื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามีสถานะเป็นของแข็งทั้งสองด้านของเซลล์ พลังงานเคมีจะถูกเก็บสะสมบนแผ่นอิเล็กโทรดที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (3) แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ชนิดผสม (Hybrid redox flow battery) ที่พื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสองด้านของเซลล์มีสถานะแตกต่างกัน

**ตารางที่ 1** ปฏิกิริยารีดอกซ์และศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์แต่ละชนิด [18]

| Cathode redox reactions   | Anode redox reactions  | OCV (V) |
|---|--|---------|
| $\text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$ | $\text{V}^{2+} \rightleftharpoons \text{V}^{3+} + \text{e}^-$  | 1.260   |
| $\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$                                       | $\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  | 1.090   |
| $\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{I}^-$   | $\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  | 0.540   |
| $2\text{NaBr} \rightleftharpoons 2\text{e}^- + \text{Br}_2 + 2\text{Na}$                          | $2\text{Na}^+ + (\text{x}-1)\text{Na}_2\text{S}_\text{x} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{xNa}_2\text{S}_\text{x-1}$ | 1.515   |

ตัวอย่างการเปรียบเทียบปฏิกิริยารีดอกซ์และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage: OCV) ของวานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ ไฮโดรเจน-

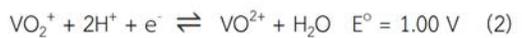
โบรมีนโพลาร์แบตเตอรี่ไฮโดรเจน-ไอโอดีนโพลาร์แบตเตอรี่ และพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์แสดงในตารางที่ 1

วานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ถือเป็นแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ที่ผู้คนทั่วโลกให้ความสนใจมากที่สุด เนื่องจากเป็นนวัตกรรมเครื่องกักเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อใช้เป็นแหล่งกักเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งชนิดติดตั้งในโรงงานและแบบเคลื่อนที่ให้กับภาคอุตสาหกรรมและภาคขนส่ง แบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้สารละลายวานาเดียมเป็นอิเล็กโทรไลต์ ทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด สารละลายวานาเดียมที่นำมาใช้ในวานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ประกอบไปด้วยวานาเดียมที่มี ออกซิเดชันสเตต 4 ชนิด ได้แก่  $\text{V}^{2+}$  [V(II)],  $\text{V}^{3+}$  [V(III)],  $\text{VO}^{2+}$  [V(IV)] และ  $\text{VO}_2^+$  [V(V)] ปฏิกิริยาการอัดประจุ (Charge) คายประจุ (Discharge) และปฏิกิริยารวม แสดงดังสมการที่ 1-3 [19] (หมายเหตุ: ปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นกระบวนการคายประจุ และปฏิกิริยาย้อนกลับเป็นปฏิกิริยาการอัดประจุ)

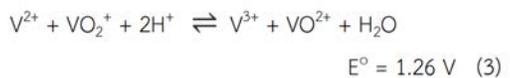
Negative (-): oxidation



Positive (+): reduction

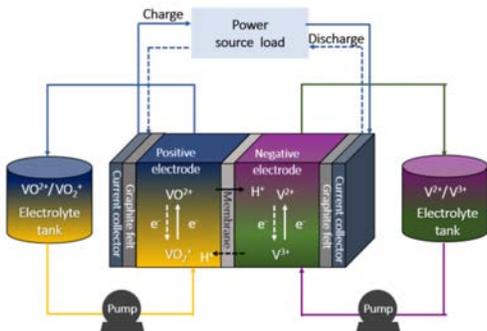


Overall:



ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์วานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์เมื่อเปิดวงจร หรือที่เรียกว่า Open-circuit voltage (OCV) มีค่าเท่ากับ 1.26 V ทั้งนี้ สารละลาย อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ วานาดีลซัลเฟต (Vanady (IV) sulfate:  $\text{VOSO}_4$ ) ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 2.0 M และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.5 M หากพิจารณาว่า OCV ที่ระดับการเก็บประจุของแบตเตอรี่ (State of charge: SOC) เท่ากับ 50% เท่ากับ 1.35 V ส่วนที่ SOC เท่ากับ 100% ค่า OCV จะเท่ากับ 1.6 V สาเหตุที่วานาเดียมแบตเตอรี่ชนิด

รีดออกซีโพล์ยังไม่ประสบความสำเร็จในการผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์เท่าที่ควรเนื่องจากความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ยังมีค่าต่ำ (10-50 Wh/kg) เมื่อเทียบกับการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (100-200 Wh/kg) หรือเซลล์เชื้อเพลิง (800-1,300 Wh/kg) ความหนาแน่นของพลังงานขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายวานาเดียมที่ใส่ ข้อจำกัดของการกำหนดความเข้มข้นของสารละลายคือ การเสื่อมสภาพขององค์ประกอบภายใน หากวานาเดียมเข้มข้นเกิน 2.0 M จะทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นวานาเดียม (V) ออกไซด์ (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) และวานาเดียมสเตรท V<sub>5</sub>+ ที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกไซด์ที่แรงเกินไป ส่งผลให้เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนและอิเล็กโทรไลต์เกิดการเสื่อมสภาพ อีกทั้งยังเป็นอุปสรรคของการนำวานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดออกซีโพล์มาใช้ในเชิงพาณิชย์คือ ราคาในการติดตั้งที่สูงถึง 500 kW/h ซึ่งค่าใช้จ่ายที่สูงนี้ส่วนใหญ่มาจากราคาของสารละลายวานาเดียมและส่วนประกอบสำคัญในเซลล์ เช่น เมมเบรนและอิเล็กโทรด



รูปที่ 7 แผนภาพการทำงานของวานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดออกซีโพล์ [20]

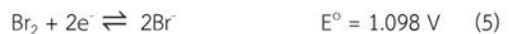
ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดออกซีโพล์ (รูปที่ 8) จัดเป็นโพล์แบตเตอรี่อีกชนิดที่น่าสนใจอีกเช่นกัน เนื่องจากไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดออกซีโพล์มีหลักการทำงานคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton-exchange membrane fuel cells: PEMFC) แต่แตกต่างกัน 2 ประการหลัก คือ เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เป็นเพียงแหล่งกำเนิดพลังงาน (Energy generator) แต่ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิด

รีดออกซีโพล์จะทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งกำเนิดพลังงานและแหล่งกักเก็บพลังงาน อีกประการหนึ่งคือ PEMFC มีสารตั้งต้นเป็นวัตถุดิบของแก๊สเท่านั้น ส่วนไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่รีดออกซีโพล์มีทั้งวัตถุดิบของแก๊สและของเหลว จุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดรีดออกซีโพล์ชนิดนี้คือ ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีราคาต่ำกว่าชนิดวานาเดียมรีดออกซีโพล์ อีกประการหนึ่งคือ พลังงานจลน์ในการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนและโบรมีนในแบตเตอรี่ชนิดนี้ส่งผลให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำและสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วกว่าวานาเดียมแบตเตอรี่รีดออกซีโพล์ [21] ในมุมมองของประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดออกซีโพล์ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูงเท่ากับ 1.4 W-cm<sup>2</sup> และมีความสามารถในการทำงานได้ยาวนานมากกว่า 10,000 h เมื่อเซลล์ที่สัมผัสพื้นที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 10-25 cm<sup>2</sup> แบตเตอรี่ชนิดนี้มีกลไกในการทำปฏิกิริยาในการอัดประจุและคายประจุแสดงดังสมการที่ 4-6 [22]

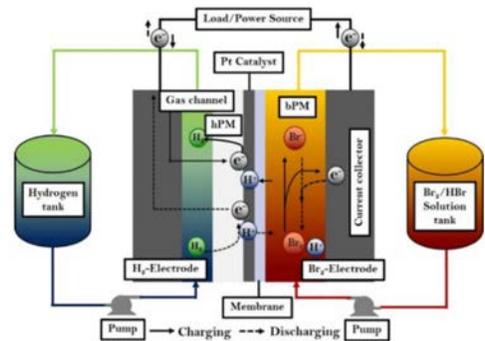
Negative (-): oxidation



Positive (+): reduction

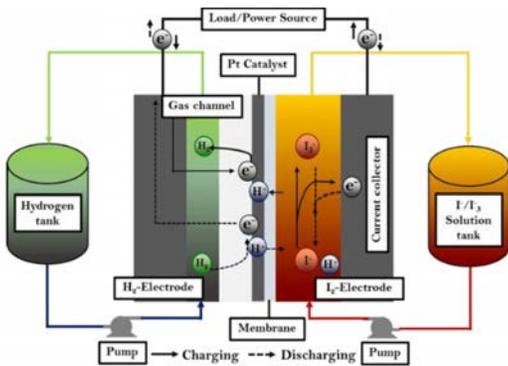


Overall:



รูปที่ 8 แผนภาพไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดออกซีโพล์ [22]

หลักการการทำงานของไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (รูปที่ 9) คือ แก๊สไฮโดรเจนถูกป้อนทางขั้วแอโนดและโบรมีนจากสารละลายกรดไฮโดรโบรมิก (Hydrobromic acid) ถูกป้อนทางขั้วแคโทด ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์มีค่าเท่ากับ 1.098 V [22] อย่างไรก็ตาม โบรมีนจัดเป็นสารเคมีที่มีพิษต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โดยโบรมีนถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) สารอันตราย และสารตั้งต้นในการทำอาวุธ (Chemical Information Management Unit: CIMU) จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้การพิจารณานำสารประกอบไฮโดรฮาโลเจนชนิดอื่นมาใช้แทนโบรมีนจึงได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาโพลาร์แบตเตอรี่ เช่น การนำไอโอดีนมาใช้แทนที่โบรมีนสำหรับสร้างไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์



รูปที่ 9 โดอะแกรมของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์

ปฏิกิริยาในการอัดประจุและคายประจุของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์แสดงในสมการที่ 7-9 [22]

Negative (-): oxidation



Positive (+): reduction

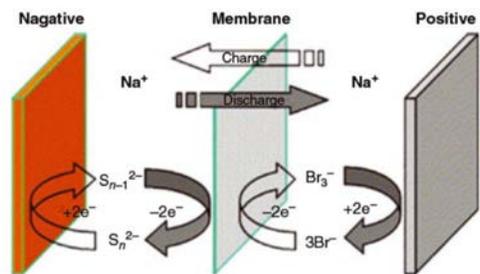


Overall:



ข้อดีของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ แบตเตอรี่ คือ ให้พลังงานสูง วัสดุมีราคาถูก และไม่เป็นพิษ รวมทั้งพลังงานจลน์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของ  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$  มากกว่า  $\text{Br}^-/\text{Br}_3^-$  (มากกว่า 8 mol/L) ศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดอกซ์ในแบตเตอรี่ชนิดนี้มีความเหมาะสมสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำภายในระบบ [23] เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์เท่ากับ 0.536 V

โซเดียมพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (Sodium polysulfide bromine flow battery) หรือ พอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ (Polysulfide bromine flow battery) เป็นโพลาร์แบตเตอรี่อีกชนิดหนึ่งที่นักวิจัยทั่วโลกกำลังทำการวิจัยและพัฒนา การทำงานของพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์มีการป้อนเข้าของสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมโบรมไนด์ (Sodium bromide) และสารละลายโซเดียมพอลิซัลไฟด์ (Sodium polysulfide)

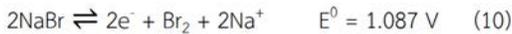


รูปที่ 7 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ [24]

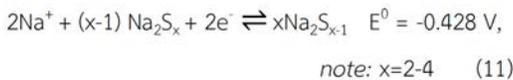
ทั้งนี้ สารละลายโซเดียมโบรมไนด์ถูกป้อนเข้าด้านแคโทดจากภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และป้อนสารละลายโซเดียมพอลิซัลไฟด์เข้าทางด้านแอโนด ไอออนที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ขั้วแอโนด คือ  $\text{S}_{x+1}^{2-}/\text{S}_x^{2-}$  และ  $\text{Br}_2/\text{Br}^-$  เป็นไอออนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด สภาวะในการทำปฏิกิริยา เช่น สนามไฟฟ้า (Electric field) และความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ส่งผลให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงของไอออนในสารละลายแคโทไลต์ เช่น เมื่อมีโบรมีน (Br<sub>2</sub>) ปริมาณมากเกินไปจนก่อให้เกิด Br<sub>3</sub><sup>-</sup> หรือ Br<sub>5</sub><sup>-</sup> ในสารละลายแคโทไลต์ Br<sub>2</sub> สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนจากด้านแคโทดไปแอโนดและทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณอิเล็กโทรด ทางด้านฝั่งสารละลายแอโนไลต์ โดยซัลเฟอร์สามารถจับกับไอออนของซัลไฟด์ โดยคั่นกลางด้วยแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange membrane) ซึ่งยอมให้ Na<sup>+</sup> สามารถแพร่ผ่านได้ รูปที่ 7 แสดงการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้านของพอลิซัลไฟด์-โบรมีน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ และกลไกของปฏิกิริยารีดอกซ์ในแบตเตอรี่ชนิดนี้แสดงในสมการที่ 10-12 [25]

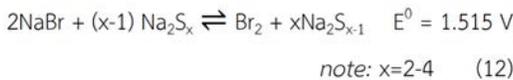
At the cathode:



At the anode:



Overall:



โดยทั่วไปแล้ว OCV ของพอลิซัลไฟด์-โบรมีน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์มีค่าอยู่ในช่วง 1.54-1.60 V ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และสถานะของการอัดและคายประจุของระบบ เนื่องจากพอลิซัลไฟด์-โบรมีน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ ใช้สารคู่ควปรีดอกซ์ (Redox couple) ที่เป็นไอออนของธาตุต่างชนิดกัน อาจส่งผลให้อาจเกิดการเจือปนของเคมีคอลสปีซี (Chemical species) ที่สามารถข้ามผ่านแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนและนำไปสู่ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง

### 3. การประยุกต์ใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์

การนำแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ไปใช้งานนั้นสัมพันธ์กับคุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดนี้ซึ่งได้กล่าวในข้างต้น เช่น อายุการใช้งานที่ยาวนาน เนื่องจากอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่ชนิดนี้เสื่อมสภาพน้อย หรือไม่เปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีในสภาวะการใช้งานปกติทำให้มีรอบการอัดและคายประจุสูง สาเหตุหลักคือแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการถ่ายเทและกระจายความร้อนที่ดี การพาความร้อนของอิเล็กโทรดโดยการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวช่วยในการกระจายและการจัดการความร้อนทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสมสูงในระหว่างการใช้งาน ประเด็นที่สองคือไม่มีการสูญเสียไฟฟ้าระหว่างโหมดสแตนด์บาย หรือการรอคอยการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากระบบประกอบด้วยภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์แยกจากกัน จึงทำให้มีโอกาสคายประจุด้วยตัวเองได้น้อยมาก การบำรุงรักษาแบตเตอรี่ชนิดนี้ต่ำ เนื่องจากสภาวะการอัดประจุเหมือนกันทุกเซลล์ทำให้ไม่เกิดการอัดประจุเกินกำลัง (Overcharging) [26] คุณสมบัติที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานอีกประการคือสามารถรีไซเคิลได้และปลอดภัย ตัวอย่างเช่น วาเนเดียมในแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ จะไม่ได้รับผลกระทบจากความต้องการพลังงานที่ผันผวน [27] ซึ่งจะส่งผลอย่างรุนแรงต่อการลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ความต้องการพลังงานที่ผันผวนเกิดจากอัตราการอัดประจุสูงสุดมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงอัตราการคายประจุสูงสุด คุณสมบัติที่สำคัญประการสุดท้ายคือ ปรับขนาดของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับความจุพลังงาน (Energy capacity) ที่ต้องการได้ โดยไม่ต้องเปลี่ยนขนาดของเซลล์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับขนาดภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์แทน [28] จากคุณสมบัติสำคัญดังกล่าวทำให้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์ถูกนำมาใช้กับงานที่ต้องการปรับระดับความต้านทาน หรือโหลด (Load leveling) [29] เนื่องจากจ่ายพลังงานได้สูงในระยะเวลานาน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลาร์สามารถตอบสนองการใช้งานน้อยกว่า 1 sec และมีการอัดประจุเกินกำลัง (Over

load capacity) ได้จำนวนครั้งมากกว่าแบตเตอรี่ทั่วไป [30] ดังนั้น แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์จึงใช้เป็นอุปกรณ์สำรองกำลังไฟฟ้าเพื่อให้มีการใช้งานอย่างมีคุณภาพและสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและการเปลี่ยนความถี่ [31] อุปกรณ์ดังกล่าวคือ เครื่องสำรองไฟฟ้าและปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Uninterruptible power supply: UPS) ใช้สำหรับจ่ายไฟเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ หรือกำลังไฟฟ้าไม่พอ เพื่อป้องกันการลดลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage sag protection) ประเด็นของการใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์เป็นเครื่องจ่ายไฟฟ้าสำรองนั้น มีข้อมูลที่น่าสนใจคือ แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์สามารถเริ่มต้นทำงานได้ภายใน 1 min [32] แม้แบตเตอรี่ไม่ได้ใช้งานมาเป็นเวลานาน รวมทั้งสามารถใช้สำหรับการสำรองพลังงานไฟฟ้าได้เป็นเวลานาน เพราะสามารถออกแบบภาชนะบรรจุอิเล็กโทรไลต์ได้ตามขนาดที่ต้องการ การนำแบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์ไปใช้งานที่ชัดเจนอีกประเภทหนึ่งคือ ช่วยในระบบพลังงานทดแทนมีความเสถียร เช่น ใช้กับระบบกังหันลม (Wind turbine system) หรือระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell) [33] เนื่องจากพลังงานทดแทนดังกล่าวไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าในบางช่วงเวลาได้ เช่น เมื่อไม่มีลม ไม่มีแดด หรือช่วงกลางคืน แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าระหว่างที่ระบบพลังงานทดแทนผลิตได้ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ระบบพลังงานทดแทนไม่สามารถทำงานได้ ทำให้ไม่เกิดภาวะการผันผวนของการจ่ายพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการนำแบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์มาใช้ร่วมกับระบบจ่ายไฟฟ้าที่ปกติ เรียกว่า Electrical grid เช่น บริษัท CellCube Energy Storage Systems and Pangea Energy ของประเทศแคนาดา ได้ติดตั้งระบบวาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์ขนาด 50 MW/200 MWh เพื่อใช้ควบคู่กับ Electrical grid ในประเทศออสเตรเลีย [34] แบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกับ Electrical grid จะเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินในช่วงเวลาที่มีการใช้งานน้อยและปล่อยพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด แต่ปัญหาที่พบบ่อยคือ แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์ที่ใช้

ในระบบนี้ยังมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะทำงานต่ำ ส่งผลให้มีค่าต้นทุนในการผลิตพลังงานสูง ดังที่กล่าวไปแล้วว่าทุกเซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์จะใช้อิเล็กโทรไลต์ร่วมกัน ทั้งนี้ สามารถออกแบบให้มีการอัดและคายประจุในจำนวนเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่างกันได้ จึงทำให้สามารถใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานชนิด DC/DC AC/DC AC/AC หรือ DC/AC ทั้งนี้ขึ้นกับการออกแบบการอัดและคายประจุ รวมทั้งการควบคุมความถี่ของพลังงานไฟฟ้า [35] เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานด้านยานยนต์ในประเภทของรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานรวดเร็วที่สุดเทียบเท่ากับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ แต่ข้อจำกัดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดนี้คือมีความหนาแน่นพลังงานต่ำ จึงทำให้อัตราการชาร์จช้า [36] แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์สามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าแบบระบบเดี่ยวได้ เช่น ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับสถานีส่งสัญญาณโทรศัพท์มือถือในแถบทะเลแคริบเบียน ทั้งนี้ได้จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบ Microgrid [37] แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์ยังสามารถใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในสมาร์ตฟาร์ม หรือนำไปใช้เป็นแหล่งกักเก็บไฟฟ้าในพื้นที่ชนบทห่างไกลความเจริญ หรือสถานที่ที่ไฟฟ้าไม่สามารถเข้าถึง ด้านการใช้งานทางการทหารนั้น แบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์เริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ปกติฐานปฏิบัติการทางการทหารใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซลแบบดั้งเดิม สำหรับให้พลังงานไฟฟ้าในการปฏิบัติการทางทหารระยะไกล การขนส่งเพื่อส่งน้ำมันดีเซลมีราคาแพงและเสี่ยงชีวิต หากผลิตกระแสไฟฟ้าทดแทนที่เสียบงอย่างแบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลาร์เพื่อทดแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ไม่เพียงแต่เป็นประโยชน์ต่อระบบนิเวศน์ แต่ยังก่อประโยชน์เชิงกลยุทธ์ในการปฏิบัติการทางการทหารอีกด้วย เมื่อกล่าวถึงระบบสาธารณูปโภคฐานทัพทหารได้มีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงการผลิตกำลังไฟฟ้าไปสู่การผลิตไฟฟ้าโดย

ใช้พลังงานทดแทน สำหรับการเตรียมพลังงานไฟฟ้าสำรองเชิงกลยุทธ์ เพื่อให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการทางทหารสามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง แม้แต่ในช่วงเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้อง นอกจากนี้ยังมีการนำระบบการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มาใช้ทางทหาร เช่น ใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานของสถานีวิทยุทางทหาร หรือใช้เป็นสถานีในการอัดประจุไฟฟ้าให้กับยุทธโธปกรณ์ทางทหาร รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ โดยเป็นระบบติดตั้งอยู่กับสถานีจ่ายไฟฟ้า สำหรับการเติมพลังงานไฟฟ้าให้กับยานยนต์ที่ใช้ไฟฟ้า อาจนำแบตเตอรี่ชนิดนี้ไปใช้กับหุ่นยนต์เพื่ออุตสาหกรรมในอนาคตอีกด้วย

#### 4. อนาคตของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์

แม้ว่าการนำเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มาใช้งานจริงในด้านต่างๆ ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากอุปสรรคทางเทคนิคและเศรษฐกิจ แต่นักวิเคราะห์ชี้ว่ายังมีโอกาสทางการตลาดที่จะเติบโตเพิ่มขึ้น เพราะอุตสาหกรรมและประชากรโลกต้องการใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น โดยเฉพาะจากแหล่งพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน ซึ่งต้องการการจ่ายพลังงานที่สม่ำเสมอไม่ผันผวนเนื่องจากสภาพอากาศ พร้อมใช้งานและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ เพราะเอกลักษณ์ที่สำคัญของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ที่สำคัญ ได้แก่ การเพิ่มกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจะอิสระต่อกัน กล่าวคือ หากต้องการเพิ่มความจุของพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยเพิ่มปริมาตรของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หากต้องการเพิ่มกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยเพิ่มพื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ จุดเด่นที่สำคัญของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ คือ สามารถคายประจุได้ตั้งแต่วงเวลาในหน่วยนาทีจนถึงชั่วโมง และสามารถคายประจุได้ลึกโดยไม่ทำให้วัสดุที่เป็นองค์ประกอบเกิดการเสื่อมสภาพ รอบการคายและอัดประจุทำได้อย่างรวดเร็ว ในสหรัฐอเมริกา บริษัท Enervault and Deeya Energy เป็นตัวอย่างหนึ่งของบริษัทเอกชนที่ให้ความสนใจอย่างมากกับการลงทุนพัฒนาและสร้างนวัตกรรมด้าน

แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ การหมกมุ่นของสิทธิบัตรเกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ในปี ค.ศ. 2006 ได้จุดประกายการแข่งขันทางอุตสาหกรรมเพื่อการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ในเชิงพาณิชย์ และมีการคาดการณ์ว่าจะมีการขยายตัวของตลาดแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีมูลค่า 4.5 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ภายในปี ค.ศ. 2028 [38] ทั้งนี้ เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์สามารถแข่งขันกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นในแง่ของอายุการใช้งาน ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือสำหรับการใช้งานที่อยู่กับที่ ระบบสาธารณสุขทั่วโลกกำลังทดสอบการใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ เช่น โครงการนำร่องในประเทศจีน ซึ่งกำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้างแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก (200 MW/800 MWh) [38] หากประสบความสำเร็จโครงการนี้จะถูกจำลองแบบเพื่อนำไปใช้ทั่วประเทศและอาจนำไปใช้ในยุโรปและสหรัฐอเมริกาด้วยเช่นกัน ปัจจุบันได้มีการจัดจำหน่ายวานเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์เชิงพาณิชย์เรียบร้อยแล้ว โดยมีการประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ประมาณ 6 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ [38] หากพิจารณาด้านการตลาดของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีข้อจำกัดในเรื่องของราคา ซึ่งกระทรวงพลังงานของสหรัฐฯ ได้กำหนดว่าแบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้ในการกักเก็บพลังงานจะต้องมีราคาในการติดตั้งต่ำกว่า 250 \$/kW และประสิทธิภาพในการใช้งานต้องมากกว่า 75% แต่ถ้าหากใช้งานในระยะยาวค่าการติดตั้งต้องไม่สูงกว่า \$150 kW/h และประสิทธิภาพของระบบควรมากกว่า 80% และต้องมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 10 ปี [39] จากข้อกำหนดที่กล่าวมาข้างต้นว่า พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีข้อจำกัดในเรื่องของราคาอันเนื่องมาจากวานเดียมและวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งยังมีราคาสูง หากมีการพัฒนาและผลิตในเชิงพาณิชย์มากขึ้น ราคาของวัสดุเหล่านี้จะลดลง โดยวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ ได้แก่ วัสดุที่เป็นอิเล็กโทรดเยื่อเลือกผ่าน และแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว เป็นต้น ตัวอย่างการพัฒนา เช่น การพัฒนาโครงสร้างของอิเล็กโทรดที่

ให้มีพื้นที่ผิวมากและมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือการพัฒนาเยื่อเลือกผ่านที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง ควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านของตัวทำไอออนที่ต้องการได้ดี มีความเสถียรสูง และราคาไม่สูง ส่วนแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นที่จะนำมาใช้ในเซลล์อนุกรมที่มีการขยายขนาดจะต้องมีสมบัติที่ส่งเสริมให้เพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าได้

## 5. สรุป

เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน (Energy Storage) นับเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมเป้าหมาย (S-Curve) ของประเทศไทย รวมถึงอุตสาหกรรมด้านพลังงาน โดยเฉพาะธุรกิจการผลิตไฟฟ้า แต่ระบบกักเก็บพลังงานที่บูรณาการกับระบบพลังงานทางเลือก (Alternative energy system) หรือระบบพลังงานทดแทน (Renewable energy system) ยังไม่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ เนื่องจากข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้นทุน อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษา เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันดีคือ แบตเตอรี่ มีวิธีการทำงาน คือ การนำเอาพลังงานส่วนเกินมาเก็บกักไว้ เพื่อนำออกมาใช้ในยามที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ระบบสามารถใช้แก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอในการผลิตไฟฟ้าให้มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น การเติบโตของตลาดเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานได้ปรับตัวดีขึ้นมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา และคาดการณ์ว่าในช่วง 10 ปีข้างหน้า ตลาดนี้จะเติบโตเฉลี่ยราวปีละ 40% แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่จะมีบทบาทในอุตสาหกรรมด้านพลังงานมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเด่นคือ เป็นแบตเตอรี่ที่มีความสามารถในการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปในแบตเตอรี่ได้ใหม่หลายครั้งและอัดประจุได้รวดเร็ว ในปริมาณความจุที่ไม่จำกัดของแหล่งกักเก็บ โดยการนำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ใช้แล้วออกมาจากแบตเตอรี่ แล้วนำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่อัดประจุไฟฟ้าแล้วเข้าไปแทนที่ กระบวนการนี้สามารถทำได้ในกรณีที่ไม่มีแหล่งพลังงานสำหรับป้อนเข้าไปในระบบ ซึ่งกระบวนการทำงานดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะ

ของแบตเตอรี่ที่ดี เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บและจ่ายไฟฟ้าได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดย่อม ซึ่งใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานในการผลิตไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาแล้ว บทความนี้ได้กล่าวถึงข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่เป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับนำไปประกอบการพิจารณาเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์ สำหรับงานในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ต่อไป

หากเปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์กับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด หรือแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยการขยายขนาดของถังบรรจุอิเล็กโทรไลต์ได้ตามความต้องการ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณ หรือขนาดของเซลล์ ดังนั้น จึงสามารถนำไปใช้งานกับระบบขนาดใหญ่ได้ง่ายกว่าแบตเตอรี่อีกสองชนิดดังกล่าว อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีการคายประจุด้วยตัวเองต่ำมาก จึงส่งผลให้สามารถเก็บพลังงานได้เป็นระยะเวลายาวนาน ส่งผลให้ความต้องการในการบำรุงรักษาต่ำ [40] แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาที่ความหนาแน่นของพลังงาน พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำกว่าแบตเตอรี่ทั้งสองชนิด ตัวอย่างเช่น วานาเดียม แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีความหนาแน่นของพลังงานประมาณ 25 Wh/kg ซึ่งมีค่าความหนาแน่น พลังงานนี้ต่ำกว่าความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (30-40 Wh/kg) และของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (80-200 Wh/kg) [41]

เมื่อพิจารณาในมุมมองด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โพลีเมอร์มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ตัวอย่างเช่น เมื่อวานาเดียมรีดอกซ์โพลีเมอร์แบตเตอรี่หมดอายุการใช้งาน วานาเดียมจะถูกนำมารีไซเคิล 100 % เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่ชนิด รีดอกซ์โพลีเมอร์ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ จึงสามารถนำมาเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลได้ง่าย ทั้งนี้ สามารถทำได้โดยการสกัดวานาเดียมออกจากอิเล็กโทรไลต์ [41] เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นต่อไป

ในกรณีของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด เมื่อหมดอายุการใช้งานจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากตะกั่ว ซึ่งเป็นโลหะหนัก เป็นพิษ และนำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้ ส่วนการรีไซเคิลอิเล็กทรอนิกส์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนนั้นยังอยู่ในระดับการวิจัย ซึ่งยังไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ [42]

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Renewable energy policy network for the 21<sup>st</sup> century. (2017). Renewables 2017 global status report. Retrieved from <http://www.ren21.net/gsr-2017/>
- [2] Alotto, P., Guarnieri, M., & Moro, F. (2014). Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 325-335.
- [3] Pongpanit, J. (2017), *Sustainable Energy. Annual report 2017*, 6-151. Retrieved from [www.agecoal.com/en/ir\\_finance\\_anual.php](http://www.agecoal.com/en/ir_finance_anual.php)
- [4] Office of industrial economic. (2017), *New engine of growth*. 1, 1-40. Retrieved from [www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/publications/newengineofgrowth.pdf](http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/publications/newengineofgrowth.pdf)
- [5] Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350-377.
- [6] Desjardins, J. (2016). The Battery Series Part 3: Explaining the Surging Demand for Lithium-Ion Batteries. Retrieved from <https://www.visualcapitalist.com/explaining-surging-demand-lithium-ion-batteries/>
- [7] PVEducation. (2019). Battery voltage and capacity in non-equilibrium. Retrieved from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/battery-voltage-and-capacity-in-non-equilibrium>
- [8] Alotto, P., Guarnieri, M., Moro, F., (2014). Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 325–335.
- [9] Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3 (5), 385-418.
- [10] ภิตินันท์ อินมูล, (2019). สถานการณ์ลิเทียมในตลาดโลก. Retrieved from <http://164.115.27.97/digital/items/show/8882?type=1>
- [11] Xu, Q., & Zhao, T. S. (2015). Fundamental models for flow batteries. *Progress in Energy and Combustion Science*, 49, 40-58.
- [12] Zhang, H., Li, X., & Zhang, J. (2017). *Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications*. New York, NY: CRC Press.
- [13] Moore, M., Counce, R., Watson, J., & Zawodzinski, T. (2015). A comparison of the capital costs of a Vanadium redox-flow battery and a regenerative hydrogen-Vanadium fuel cell. *Journal of Advanced Chemical Engineering*. 5, 1-3.
- [14] Irena, (2016), Overview of Technical Characteristics for Batteries. *Energetica INDIA*, 56-58. Retrieved from <http://www.energetica-india.net/download.php?seccion=articles&archivo=FYIXqID0q8kY59sersZouimhbWalRf0a40GBBEs0oF3mxWTfw8PTj.pdf>
- [15] Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T., & Liu, Q. (2011). Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, 41 (10), 1137.
- [16] Pan, F., & Wang, Q. (2015). Redox species of redox flow batteries: A review. *Molecules*, 20 (11), 20499-20517.

- [17] Leung, P., Li, X., De León, C. P., Berlouis, L., Low, C. J., & Walsh, F. C. (2012). Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage. *Rsc Advances*, 2(27), 10125-10156.
- [18] Zhang, H., Li, X., & Zhang, J. (2017). Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. New York, NY: CRC Press.
- [19] Cunha, Á., Martins, J., Rodrigues, N., & Brito, F. P. (2015). Vanadium redox flow batteries: a technology review. *International Journal of Energy Research*, 39(7), 889-918.
- [20] Mojapelo, F., & Kikomarov, M. (2018). Energy storage & vanadium redox flow batteries 101. *Bushveld energy*. 1-65. Retrieved from <http://www.bushveldminerals.com/wp-content/uploads/2018/11/Energy-storage-101.pdf>
- [21] Lin, G., Chong, P. Y., Yarlagadda, V., Nguyen, T. V., Wycisk, R. J., Pintauro, P. N., & Weber, A. Z. (2016). Advanced hydrogen-bromine flow batteries with improved efficiency, durability and cost. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(1), A5049-A5056.
- [22] Oh, K., Kang, T. J., Park, S., Tucker, M. C., Weber, A. Z., & Ju, H. (2017). Effect of flow-field structure on discharging and charging behavior of hydrogen/bromine redox flow. *Electrochimica Acta*, 1-47.
- [23] Zhao, Y., Wang, L., & Byon, H. R. (2013). High-performance rechargeable lithium-iodine batteries using triiodide/iodide redox couples in an aqueous cathode. *Nature communications*, 4, 1896.
- [24] Zhou, H., Zhang, H., Zhao, P., & Yi, B. (2006). A comparative study of carbon felt and activated carbon-based electrodes for sodium polysulfide/bromine redox flow battery. *Electrochimica Acta*, 51(28), 6304-6312.
- [25] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science*, 19(3), 291-312.
- [26] European Association for Storage of Energy. (2019). Electrochemical energy Storage. Retrieved from [http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE\\_TD\\_Flow-Battery.pdf](http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_Flow-Battery.pdf)
- [27] Doetsch, C., & Burfeind, J. (2016). Vanadium Redox Flow Batteries. In *Storing Energy*. 227-246.
- [28] Chalamala, B. R., Soundappan, T., Fisher, G. R., Anstey, M. R., Viswanathan, V. V., & Perry, M. L. (2014). Redox flow batteries: an engineering perspective. *Proceedings of the IEEE*, 102(6), 976-999.
- [29] Negishi, A. (1999). Electrolyte of vanadium redox flow battery for load leveling. *Bulletin of the Electromechanical Laboratory*, 63, 27-34.
- [30] Emura, K. (2005). Recent progress in vanadium redox flow battery. *Proceedings of Electrical Energy Storage Applications and Technologies (EESAT)*, Osaka, Japan.
- [31] Lotspeich, C., & Van Holde, D. (2002). Flow batteries: has really large scale battery storage come of age?. *ACEEE's Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. 3. 211-224.
- [32] Shinzato, T., Emura, K., Yamanishi, K., Deguchi, H., Miyake, S., Hara, T., Suzuki, K. (2019). Vanadium Redox-flow Battery for Voltage Sag. *Sumitomo Electric Industries, Ltd.*, Osaka, Japan.

- [33] Holzman, D. C. (2007). The vanadium advantage: flow batteries put wind energy in the bank. *Environmental health perspectives*. 115, 358-316.
- [34] Kelly, G. (2019). CellCube and Pangea Energy Have Signed LOI for 50MW/200MWh in Australia. Retrieved from [https://globalrenewablenews.com/article/energy/category/energy storage/143/767894/cellcube-and-pangea-energy-have-signed-loi-for-50mw-200mwh-in-australia.html](https://globalrenewablenews.com/article/energy/category/energy%20storage/143/767894/cellcube-and-pangea-energy-have-signed-loi-for-50mw-200mwh-in-australia.html)
- [35] Devic, A., Ierides, M., Suarez, E. (2018). Battery energy storage. *Suschem*, 13.
- [36] Chen, R., Kim, S., & Chang, Z. (2017). Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. In *Redox-Principles and Advanced Applications*. *IntechOpen*. Retrieved From <https://www.intechopen.com/books/redox-principles-andadvanced-applications/redox-flow-batteries-fundamentals-and-applications>
- [37] Gildmeister energy solution, (2019). Flow battery applications for the utility world. Retrieved from <http://vsunenergy.com.au/wp-content/uploads/2016/11/Utility-Flyer.pdf>
- [38] IDTechEx, (2019). Redox Flow Batteries 2018-2028: Markets, Trends, Applications. Retrieved from <https://www.idtechex.com/de/research-report/redox-flow-batteries-2018-2028-markets-trends-applications/605>
- [39] Leung, P., Li, X., De León, C. P., Berlouis, L., Low, C. J., & Walsh, F. C. (2012). Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage. *Rsc Advances*, 2 (27), 10125-10156.
- [40] Vikram, S., Soeun, K., Jungtaek, K., and Hye, B. (2019). Aqueous organic redox flow batteries. *Nano Research*, 1-14.
- [41] นวดล เหล่าศิริพจน์, วรพล เกียรติกิตติพิงษ์, บุญรอด สัจจกุลนุกิจ, มยุรพันธ์ สัจจกุลนุกิจ และพรรณนิกา ดอกไม้งาม. (2012). โครงการศึกษาประเมินและจัดทำแผนงานวิจัยพลังงานทดแทน (Energy stroage) ตามกรอบแผนพลังงานทดแทน 15 ปี Retrieved from <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib14393.pdf>
- [42] Dassisti, M., Mastroilli, P., Rizzuti, A., Cozzolino, G., Chimienti, M., Olabi, A. G., and Carbone, A. (2016). Vanadium: a transition metal for sustainable energy storing in redox flow batteries. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1-24.

# การศึกษาความต้องการข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพัฒนา Mobile4RU เพื่อการเผชิญเหตุสาธารณภัยและภัยพิบัติ

สุริยะเวช บุญธรัตน์<sup>1\*</sup> นิคม โกปราชญ์<sup>2</sup> และ สมสฤกษ์ ลินนท์<sup>3</sup>

วันที่รับ 12 กรกฎาคม 2562 วันที่แก้ไข 12 สิงหาคม 2562 วันตอบรับ 13 สิงหาคม 2562

## บทคัดย่อ

การรับส่งข้อมูลข่าวสาร ณ สถานที่เกิดเหตุภัยพิบัติแบบทันที (real time) เป็นหนึ่งในกระบวนการหลักสำหรับดำเนินการเพื่อบรรเทาสาธารณภัยตามแผนการจัดการภัยพิบัติมาตรฐาน (Disaster Operations Management : DOM) ซึ่งการดำเนินการเพื่อบรรเทาความสูญเสียให้เหมาะสมตามสภาพพื้นที่และทันทีที่จะเกิดขึ้นได้ยาก หากไร้ข้อมูลสำหรับบริหารจัดการ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความต้องการข้อมูลขณะเกิดเหตุภัยพิบัติ และข้อมูลที่จำเป็นสำหรับเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานบรรเทาสาธารณภัยในพื้นที่ โดยการศึกษาจะเป็นการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงบวกและปัจจัยเชิงลบ จากการตอบแบบสอบถามสำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชัน Mobile4RU เพื่อตอบสนองการรายงานข้อมูลภัยพิบัติเบื้องต้น ตามระเบียบวิธีวิจัยเชิงคุณภาพ โดยการสุ่มแบบเจาะจงจากกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านการเผชิญเหตุ หน่วยพัฒนาเคลื่อนที่ 31 (นพค.31) อ.ปัว จ.น่าน จำนวน 31 ท่าน พบว่า ผู้เชี่ยวชาญด้านการเผชิญเหตุมากกว่าร้อยละ 90 ต้องการมีเครื่องมือเพื่อช่วยเหลือด้านข้อมูล ลักษณะสถานที่ และผู้ประสบเหตุ แต่ทว่าไม่ต้องการให้เครื่องมือดังกล่าวเชื่อมโยงข้อมูลของผู้เผชิญเหตุเข้ากับทะเบียนราษฎร์สูงถึงร้อยละ 30

**คำสำคัญ :** ข้อมูลเหตุภัยพิบัติ, เครื่องมือเผชิญเหตุ ชุดเผชิญเหตุ

---

<sup>1</sup> ส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน (Propulsion Systems Division – RPS), สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

<sup>2</sup> ส่วนงานวิศวกรรมการสื่อสารข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์และเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (Data Communication Division - RDC), สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

<sup>3</sup> ส่วนบัณฑิตศึกษา (Academic Cooperation Division - TAC), สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

\* ผู้ติดต่อ, อีเมลล์: suriyawate.b@dti.or.th

# The study of exigency information requirement for Mobile 4RU development in disaster relief

Suriyawate Boonthalarath <sup>1\*</sup> Nikhom Koprach <sup>2</sup> and Somsarit Sinnung <sup>3</sup>

## Abstract

A channel for real – time data communications at the incidence of natural disaster is regarded as one of crucial procedures for Disaster Operations Management or DOM. It is virtually impossible to perform disaster relief tasks along the lines with a topographic environment and punctuality if lack of disaster data and management. The research was aimed at the studies for need assessment of initial data at time of disaster eruption and for the data deemed critical to response unit team. The used methodology was the analysis factors either positively or negatively influencing the development of the mobile application for response unit or Mobile4RU as a tool to respond to basic disaster report of the response unit. Qualitative research methodology was randomized from a group of 31 experts on disaster response missions of the Mobile Development Unit 31 (MDU31) at Pua district of Nan province. The analysis revealed that more than 90% of the experts were in need of the data and information of the topographic environment and the victims. However, almost 30% of the experts was negative to have the tool that provides access to demographic data.

**Keywords :** Disaster data, Disaster response tool, Response unit

---

<sup>1</sup> Propulsion Systems Division – RPS, Defence Technology Institute

<sup>2</sup> Data Communication Division - RDC, Defence Technology Institute

<sup>3</sup> Academic Cooperation Division - TAC, Defence Technology Institute

\* Corresponding author, E-mail: suriyawate.b@dti.or.th

## 1. บทนำ

การบริหารจัดการเพื่อการบรรเทาสาธารณภัย ขณะเกิดเหตุภัยพิบัติอย่างทันที่ (Sudden-onset disasters) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการช่วยชีวิตและจำกัดความเสียหายของทรัพย์สินในวงกว้าง อย่างเช่น เหตุการณ์เก็บกู้ซากบ้านเรือน และช่วยเหลือผู้รอดชีวิต ในเหตุการณ์ดินโคลนถล่ม ที่ อ.บ่อเกลือ จ.น่าน พ.ศ. 2560 แสดงตามรูปที่ 1 เป็นต้น สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการทำไร่เลื่อนลอยอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อเข้าสู่ฤดูฝนมีฝนตกหนักถึงหนักมากอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ดินบนเขาชุ่มน้ำมาก และไหลลงมาทับพื้นที่อยู่อาศัย อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าการเผชิญเหตุเพื่อช่วยบรรเทาสาธารณภัยที่เกิดขึ้น ผู้ประสบเหตุรวมถึงเจ้าหน้าที่ผู้เผชิญเหตุยังคงทำงานช่วยเหลือในพื้นที่ด้วยความยากลำบากเนื่องจากขาดแคลนระบบสื่อสารหรือระบบสื่อสารถูกตัดขาดขณะเกิดเหตุ [3-4] ทำให้การขอรับการสนับสนุนความช่วยเหลือส่งเข้าไปไม่ตรงตามความต้องการ ประกอบกับอาจเป็นเหตุให้ความเสียหายขยายวงกว้างเพิ่มสูงขึ้น เหตุเพราะเสียเวลาในการลำเลียงความช่วยเหลือที่เกินกว่าความต้องการเพิ่มมากขึ้น [5]

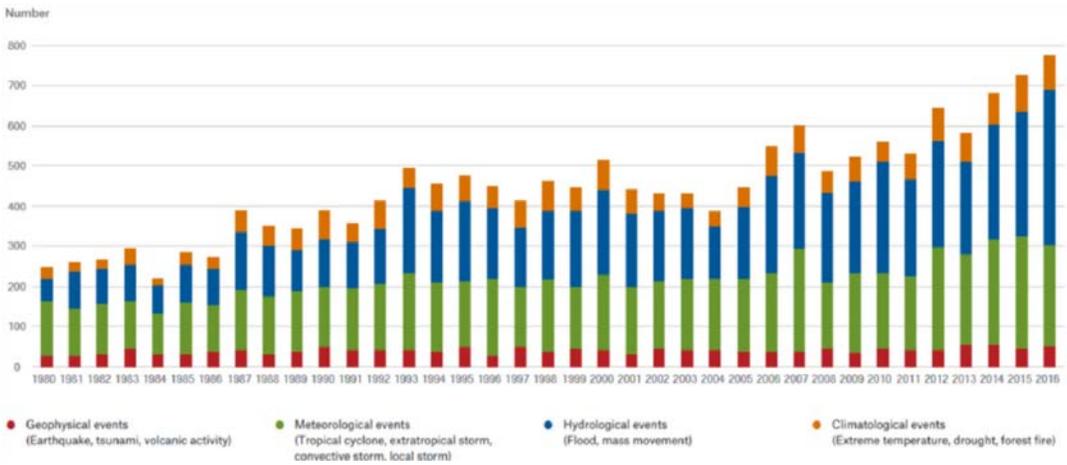
จากการรวบรวมข้อมูลด้านการประสบเหตุสาธารณภัยทั่วโลกระหว่างปี พ.ศ. 2523 ถึง พ.ศ. 2559 [6] แบ่งตามลักษณะของการเกิดเหตุเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ธรณีพิบัติภัย ภัยพิบัติ อุทกภัย และการเปลี่ยนแปลงด้านภูมิอากาศ พบว่าภัยพิบัติ ทั้งธรณีพิบัติภัยและวาตภัยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเกือบ 2 เท่า นับตั้งแต่มีการรวบรวมผลสำรวจ และอุทกภัยเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า แต่ทว่าการ

เปลี่ยนแปลงด้านภูมิอากาศ (เช่น การเกิดไฟฟ้า, อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง) กลับมีตัวสูงชันกว่า 7 เท่า ซึ่งการเกิดภัยพิบัติประเภทต่างๆ ล้วนสัมพันธ์กัน [7] แสดงตามรูปที่ 2 คือแนวโน้มการเกิดภัยพิบัติในรูปแบบต่างๆ นับได้ว่าภัยพิบัติสามารถอุบัติขึ้นได้ทุกที่ทุกเวลา ดังนั้น เพื่อช่วยบรรเทาเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น คณะนักวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) จึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบขึ้นป่าและช่วยเหลือผู้ประสบภัยในยามเกิดเหตุฉุกเฉินผ่านทางพัฒนาแอปพลิเคชันที่เรียกว่า “Mobile4RU” เพื่อบรรเทาสาธารณภัยอย่างตรงจุดและมีประสิทธิภาพ

โดยแนวคิดของการพัฒนาระบบแอปพลิเคชัน Mobile4RU [8] เริ่มต้นจากการต่อยอดแนวความคิดที่ Lisa Dethridge และ Brian Quinn [9] ได้เสนอแนวความคิดที่จะใช้ระบบการแสดงผลภาพ 3 มิติ บนฐานการติดต่อแบบออนไลน์เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการรายงานสถานการณ์ขณะเกิดภัยพิบัติ หรือเอาไว้จำลองสถานการณ์เพื่อการเตรียมความพร้อมสำหรับการรับมือ โดยแนวคิดนี้สามารถนำมาปรับใช้เป็นแนวทางรับมือกับการมีข้อมูลสถานการณ์จำนวนมาก กอปรกับมีการคัดกรองรายงานที่มีการจำเพาะ และต้องควบคุมสถานการณ์จากกองอำนาจการเพียงผู้เดียว (Single Incident Command) ขณะเดียวกัน Kurniawan Adi Saputro [10] ได้นำเสนอผลการศึกษาระบบการสื่อสารเพื่อการรายงานข้อมูลระหว่างกันของอาสาสมัครเผชิญเหตุ



รูปที่ 1 ความเสียหายที่เกิดจากดินโคลนถล่ม ที่ อ.บ่อเกลือ จ.น่าน พ.ศ. 2561 [1-2]



รูปที่ 2 เหตุการณ์การสูญเสียทางธรรมชาติทั่วโลกตั้งแต่ พ.ศ. 2523-2559 [6]

ขณะเกิดภูเขาไฟ Merapi ระเบิดที่ประเทศอินโดนีเซียในปี ค.ศ. 2010 ซึ่งสามารถบอกความต้องการและสื่อสารโดยตรงกับกองอำนาจการได้ ต่อมา Philip Pond [11] จึงได้ศึกษาทวิวิธีการสื่อสารผ่านสื่อออนไลน์ โดยเฉพาะแอปพลิเคชัน Twitter ซึ่งให้ความสำคัญต่อการส่งต่อข่าวสาร และข้อพึงระวังขณะเผชิญเหตุอย่างไ้ก็ดี ยังคงมีนักวิเคราะห์ให้แนวคิดเสริมต่อการนำสื่อออนไลน์โดยเฉพาะ Twitter มาใช้สำหรับการเผชิญเหตุว่า มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการคัดกรองข้อมูล และเสนอแนะให้เพิ่มตัวแปรจำเพาะขณะส่งรายงานความเคลื่อนไหวของสถานการณ์ อย่างเช่น เวลา ลักษณะพื้นที่ รวมถึงพิกัดพื้นที่ เป็นต้น จากนั้นการพัฒนาาระบบแอปพลิเคชัน Mobile4RU [12-13] จึงเริ่มขึ้นภายใต้แนวคิดที่ว่า ขณะเกิดภัยพิบัติระบบการสื่อสารล้มเหลว หรือขาดสัญญาณติดต่อสื่อสาร ทำให้กองอำนาจการขาดข้อมูลสำหรับสั่งการให้ความช่วยเหลือ และประเมินเหตุการณ์ด้วยความยากลำบาก ดังนั้น นักวิจัย สทป. จึงนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle) หรือ UAV เข้าร่วมเพื่อปฏิบัติการกิจ โดยติดตั้งระบบสื่อสารเข้ากับ UAV เพื่อช่วยลดข้อจำกัดด้านการสื่อสารขณะบินสำรวจเหนือพื้นที่ภัยพิบัติ อีกทั้งยังเป็นการสร้างเครือข่ายติดต่อสื่อสารกับสถานีภาคพื้นโดยอาศัยระบบแอปพลิเคชัน Mobile4RU เป็นตัวกลางในการรายงานสถานการณ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3

ระบบมีขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นดังต่อไปนี้ ผู้เผชิญเหตุจะทำหน้าที่เป็นสถานีภาคพื้น โดยทำการเข้าพื้นที่เพื่อสำรวจและพิกพาระบบสื่อสารแบบเคลื่อนที่ (Manpack) สำหรับรายงานสถานการณ์ ตลอดจนความต้องการความช่วยเหลือจำเพาะต่างๆ ในพื้นที่ภัยพิบัติในรูปแบบสัญญาณเสียง ภาพ และวิดีโอ (จากแอปพลิเคชัน Mobile4RU) ไปยังระบบเครือข่ายการสื่อสารที่สร้างขึ้นบน UAV จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะทำการเชื่อมโยงข้อมูลที่ได้รับเข้าสู่กองอำนาจการ เพื่อหาแนวทางการช่วยเหลือและปฏิบัติต่อไป เมื่อกองอำนาจการสรุปแนวทางการปฏิบัติ จึงส่งความช่วยเหลือตามความต้องการของพื้นที่ประสบเหตุ ทั้งนี้ เมื่อการทำงานมีความสอดคล้องชัดเจนตรงตามความต้องการแล้ว การช่วยเหลือผู้ประสบภัย หรือเก็บกู้ซากความเสียหายย่อมเป็นไปด้วยความราบรื่น มีระเบียบและทันต่อสถานการณ์



รูปที่ 3 แนวคิดการสร้างระบบสื่อสารในพื้นที่ภัยพิบัติเพื่อประเมินสถานการณ์ [8]

สำหรับการศึกษาความต้องการข้อมูลเบื้องต้นของผู้เผชิญเหตุในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาชนิดของข้อมูลที่ต้องการในพื้นที่ขณะเกิดเหตุภัยพิบัติของผู้เชี่ยวชาญด้านการเผชิญเหตุหน่วย นกค.31 เพื่อใช้สำหรับออกแบบระบบแอปพลิเคชัน Mobile4RU สำหรับการเผชิญเหตุเพื่อบรรเทาสาธารณภัย ในขณะเดียวกันผู้วิจัยจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review) ด้านการจัดการภัยพิบัติ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับบ่งชี้ความสำคัญของการออกแบบแบบสอบถามความต้องการข้อมูลในรูปแบบต่างๆ ขณะเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน (ad hoc) อีกทั้งใช้การทบทวนวรรณกรรมดังกล่าว ในลักษณะการทบทวนสอบความเป็นมาในการจัดการภัยพิบัติ (Disaster Management) ต่อมาผู้วิจัยจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นต่อการพัฒนาแอปพลิเคชัน Mobile4RU โดยใช้นิยาม ตัวแปร และสถานการณ์ ทั้งการจำลองและเกิดขึ้นจริงจากการศึกษาผ่านทางกรทบทวนวรรณกรรม ในส่วนที่ 1 ข้างต้น เพื่อใช้เป็นคำถามตลอดจนค้นหาความต้องการจากกลุ่มตัวอย่าง ในส่วนที่สามจะเป็นการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบสอบถาม

## 2. ความเป็นมา

### 2.1 การทบทวนวรรณกรรม

ภัยพิบัติถูกนิยามว่า เป็น “ผลกระทบร้ายแรงจากธรรมชาติ หรือจากฝีมือมนุษย์” [14] ดังนั้น ภัยพิบัติจึงเป็นปรากฏการณ์ที่คุกคามและทำความเสียหายต่อชีวิตตลอดจนทรัพย์สิน ที่อยู่อาศัย เมื่อพิจารณาจากต้นเหตุและผลลัพธ์ของภัยพิบัติที่กินความตามนิยามนี้ หนึ่งในประเด็นหลักสำหรับกรวิเคราะห์ภัยพิบัติมักเกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหา หรือการจัดการพิบัติ ซึ่งมักจะสัมพันธ์กับระบบเครือข่ายองค์กรและภาคประชาสังคม โดยการดำเนินงานด้านการจัดการภัยพิบัติสามารถจำแนกตามประเภทของกรอบกรจัดการภัยพิบัติ (Disaster Operations Management: DOM) [15-16] ออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1. การบรรเทาสาธารณภัย (mitigation) [17] ซึ่งรวมถึงกิจกรรมเพื่อป้องกันการเกิด

ภัยพิบัติ หรือลดผลกระทบ (เช่น ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง หรือการวางแผนป้องกัน) 2. การเตรียมความพร้อม (preparedness) [18] ได้แก่การเตรียมแผนการรองรับการเผชิญเหตุฉุกเฉิน (เช่น การฝึกอบรมบุคลากร การพัฒนาระบบการสื่อสาร และการจัดหาอุปกรณ์สำหรับสถานการณ์ฉุกเฉิน) 3. การเผชิญเหตุ (response) [19] เป็นกระบวนการการดำเนินงานตามแผนนโยบาย หรือกลยุทธ์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นจากขั้นตอนการเตรียมความพร้อม (เช่น การปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่เพื่อนำไปใช้กับแผนอพยพ) 4. การฟื้นฟู (recovery) [20] เกี่ยวข้องกับการดำเนินการวางแผนระยะยาว เพื่อนำสภาพชีวิตความเป็นอยู่ของชุมชนกลับสู่ภาวะปกติ (เช่น การกำจัดเศษซากทรัพย์สินที่เสียหายจากภัยพิบัติและฟื้นฟูโครงสร้างพื้นฐาน) เมื่อเกิดภัยพิบัติขึ้นนักเผชิญเหตุที่ผ่านการฝึกและดำเนินการตามแผนงานที่เตรียมไว้มักจะมองการบรรเทาสาธารณภัยด้านสถานที่พักพิง และการดำเนินการจัดเส้นทางกรอพยพเป็นอันดับแรก ซึ่งการดำเนินการเหล่านี้อาจมีขั้นตอนการปฏิบัติแตกต่างกันไปตามประเภทของภัยพิบัติ [21] จากการเผชิญเหตุในสถานการณ์ต่างๆ จึงได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูล และจัดทำลำดับขั้นตอนการปฏิบัติในสถานการณ์ฉุกเฉิน เพื่อลดการสูญเสีย ตลอดจนเพิ่มประสิทธิภาพในการช่วยเหลือ และนำไปใช้ตั้งแต่ก่อนช่วงทศวรรษ 1980 เรื่อยมา [22-23] อนึ่ง อุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นและเกี่ยวข้องกับขั้นตอน DOM ต่างล้วนถูกปรับปรุงแก้ไขผ่านเป็นรายงาน และถูกตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญตามเอกสารอ้างอิงลำดับที่ 22-28 ภายใต้บริบทกรจัดการภัยพิบัติ กรอพยพส่วนใหญ่มีมุ่งเน้นไปที่กรอพยพด้วยยานพาหนะส่วนตัว (car-based evacuation) รวมไปถึงการเดินทางด้วยตนเอง เนื่องจากมีข้อดีที่สามารถทำการอพยพได้โดยทันที แต่มีข้อเสียคืออาจเป็นต้นเหตุให้เกิดกรขยายขอบเขตความเสียหายที่เพิ่มขึ้น (เนื่องมาจากกรอพยพเองมีความเสี่ยงที่จะไม่ถึงที่ศูนย์อพยพ หรืออาจเกิดการหลงทิศทาง ทำให้เป็นสาเหตุของความเสียหายที่มากขึ้น) ในขณะเดียวกันระบบกรอพยพด้วยระบบขนส่งมวลชน (mass-transit-based (or bus-based) evacuation) หรือการส่งความ

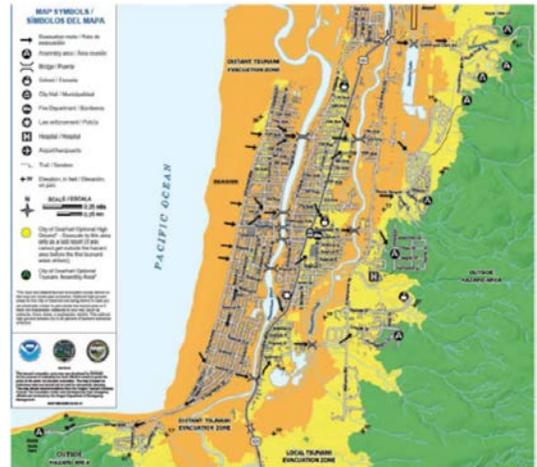
ช่วยเหลือจากส่วนกลางมีข้อดีด้านความปลอดภัยและสามารถขนส่งผู้ประสบเหตุได้จำนวนมาก แต่มีข้อเสียคือมีความล่าช้าต่อสถานการณ์ [28] ดังนั้น ในการบรรเทาสาธารณภัยจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเส้นทางและลักษณะวิธีลำเลียงผู้อพยพให้สอดคล้องกับที่พิทพิงชั่วคราว แสดงตามแนวคิดดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แนวคิดการอพยพผู้ประสบภัยจากจุดเกิดเหตุถึงศูนย์อพยพ [29]

อนึ่ง การจัดการด้านการอพยพโดยเร่งด่วนจึงมีแนวโน้มการอพยพขั้นต้นด้วยระบบขนส่งผู้ประสบภัยด้วยวิธีเดินทางด้วยตนเองเป็นหลัก ด้วยเหตุนี้เองจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ว่า ในการอพยพดังกล่าวต้องมีการวางแผนอย่างรัดกุมและมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างการศึกษาแนวทางการตัดสินใจในการอพยพ ตลอดจนถึงปัจจัยเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตจากภัยพิบัติอย่างฉับพลัน เช่น การเกิดสึนามิ (tsunami) [30] ซึ่งสามารถนำมาเป็นต้นแบบการศึกษาใกล้เคียงกับการเกิดดินถล่ม (Landslide) และน้ำท่วม (Flash Floods) ซึ่งมักเป็นภัยพิบัติที่เกิดขึ้นกับประชาชนที่อาศัยบริเวณเชิงเขาและที่ราบลุ่ม อ.ปัว จ.น่าน ตามลำดับ ได้เป็นอย่างดี โดยการเผชิญภัยพิบัติอย่างฉับพลันจำเป็นอย่างยั้งที่ต้องตระหนักรู้ถึงความเสียหายครั้งใหญ่ เนื่องจากระบบเตือนภัยสามารถแจ้งเหตุก่อนการเกิดได้เพียงไม่กี่นาทีก่อนหน้านี้ [31-32] ทำให้กระทบต่อพฤติกรรมทั้งการอพยพของผู้ประสบเหตุและ

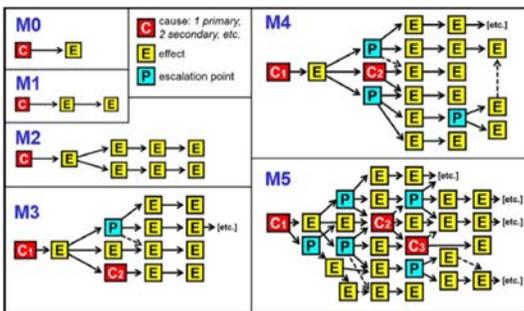
ผู้เผชิญเหตุในด้านการตัดสินใจเข้าช่วยเหลือ กอปรกับแผนการอพยพ [33-34] จากสาเหตุความเสียหายของเส้นทางคมนาคมปกติไปสู่ศูนย์อพยพ เช่น ถนน ทางเดินเท้า สะพาน เป็นต้น [31,35] ดังนั้น ตลอดระยะทางขอบเขตพื้นที่ประสบภัยดังแสดงตามตัวอย่างรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า การเข้าอพยพและการเข้าช่วยเหลือต่างล้วนมีความต้องการและอุปสรรคที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5 ตัวอย่างเส้นทางคมนาคมปกติตามแนวเขตภัยพิบัติ สึนามิ จากจุดเกิดเหตุถึงศูนย์อพยพ [36]

หลังจากเกิดภัยพิบัติสึนามิ หรือภัยพิบัติอย่างฉับพลันรูปแบบต่างๆ ระบบคมนาคมและการสื่อสารจะถูกตัดขาด เนื่องจากระบบไฟฟ้าไม่สามารถใช้งานได้ปกติ ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นการยากต่อการกู้คืนระบบสาธารณูปโภค หรือโครงข่ายโครงสร้างพื้นฐานในทันที อีกทั้งความรุนแรงในแต่ละพื้นที่ประสบเหตุจะเป็นอุปสรรคในการให้ความช่วยเหลือ ดังนั้น เมื่อประสบเหตุ ผู้ประสบเหตุจึงมักมองหาสถานที่หลบภัยที่เป็นจุดสังเกตได้ง่าย อีกทั้งสามารถสื่อสารกับคณะผู้เผชิญเหตุให้สามารถนำส่งความช่วยเหลือพร้อมแผนอพยพให้เข้าใจได้อย่างทันทีที่เมื่อได้รับการติดต่อ แต่ทว่าผู้เผชิญเหตุที่ไม่ได้เป็นคนในพื้นที่ หรือมาจากต่างถิ่น มักจะล้มเหลวกับการสื่อสารดังกล่าว ประกอบกับการสื่อสารเพื่อทำการเข้าช่วยเหลือมักจะบอกสถานที่ หรือวัตถุที่สะดุดตา และค้นพบได้ง่าย ณ ขณะนั้นในความเข้าใจของผู้ประสบเหตุ

ทำให้ไม่สามารถเข้าช่วยเหลือได้อย่างมีประสิทธิภาพและตรงจุด อย่างไรก็ตาม การระบุสถานที่ หรือสิ่งปลูกสร้างที่ไม่ถาวร ณ ขณะเกิดเหตุมักมีความคลาดเคลื่อนของแหล่งข้อมูล การแก้ปัญหาในกรณีดังกล่าวผู้เชี่ยวชาญเหตุมักเสนอให้มีการสร้างแผนอพยพแก่ผู้ประสบเหตุ โดยทำการแบ่งกลุ่มเป็นกลุ่มย่อย และแนะนำให้ขึ้นที่สูงเพื่อง่ายต่อการบริหารจัดการความเสี่ยง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสูญเสียต่อชีวิต [37] จากนั้นจึงสำรวจความต้องการและความรุนแรงจากผลกระทบภัยพิบัติ เพื่อประเมินและจำกัดวงความเสียหายต่อไป แสดงตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างเส้นทางคมนาคมปกติตามแนวเขตภัยพิบัติ สีนามิ จากจุดเกิดเหตุถึงศูนย์อพยพ [36]

จากการทบทวนวรรณกรรม หัวข้อที่สำคัญในการช่วยเหลือผู้ประสบเหตุคือ เส้นทางและแนวทางในการจัดการการอพยพ จากปัจจัยปัญหาเหล่านี้เอง จะเห็นได้ว่า สามารถนำมาเป็นหัวข้อหลักในการสอบถามความต้องการด้านการเผชิญเหตุของผู้ตอบแบบสอบถามได้อีก การออกแบบสอบถามจึงควรนำข้อมูลพื้นฐานของผู้ต้องการความช่วยเหลือเป็นหลักตั้งต้น เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการวิจัย (Methodology) ความต้องการข้อมูลของผู้เผชิญเหตุ เพื่อเสริมข้อมูลที่ต้องการ และลดทอนข้อมูลที่เกินความจำเป็นในขณะปฏิบัติหน้าที่ทั้งไปแสดงตามตารางแบบสอบถามที่ 1

## 2.2 ผลการศึกษาความต้องการข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการเผชิญเหตุเพื่อการบรรเทาสาธารณภัย

### 2.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาผ่านการทบทวนวรรณกรรม แสดงให้เห็นว่าในการเผชิญเหตุภัยพิบัติ อันดับแรกสำหรับการเผชิญเหตุต้องคำนึงถึงสถานที่ปลอดภัย (ศูนย์อพยพ หรือสถานที่อื่นๆ แล้วแต่ความเหมาะสม) พร้อมเส้นทางการอพยพ เพื่อให้สามารถให้ความช่วยเหลือได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แต่ทว่าอุปสรรคที่มักเป็นสิ่งที่ขวางกั้นนอกจากสภาพพื้นที่เกิดภัยพิบัติแล้วนั้นคือโครงสร้างพื้นฐานและระบบสื่อสารที่ชำรุดและไม่สามารถกู้คืนได้ในระยะเวลาอันใกล้ ดังนั้น หากนักวิจัยของ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันที่สามารถสนับสนุนข้อมูลดังกล่าวข้างต้นให้สามารถสนองความต้องการด้านข้อมูลของผู้ปฏิบัติ (ผู้เผชิญเหตุ) เป็นไปตามตารางที่ 1 หรือไม่

ทั้งนี้ คณะนักวิจัย สทป. ได้นำเสนอแนวคิดและแนวทางการออกแบบการพัฒนาแอปพลิเคชัน Mobile4UR เพื่อนำส่งข้อมูลสำคัญในด้านต่างๆ ประกอบกับการอธิบายหลักการคร่าวๆ ของแนวคิดพร้อมนำเสนอรายละเอียดของข้อมูล เพื่อประกอบการตัดสินใจสำหรับสนับสนุนข้อมูลต่อผู้เผชิญเหตุ ซึ่งเน้นหนักด้านการสื่อสารแบบสองทาง (สามารถรับ – ส่งข้อมูลได้ในทันที) โดยลักษณะการส่งข้อมูลเป็นการถ่ายทอดภาพและเสียงสถานการณ์ผ่านแอปพลิเคชัน Mobile4UR ซึ่งอยู่ในสถานะการไร้ซึ่งระบบสื่อสารพื้นฐานทั้งหมด ให้แก่ หน่วยพัฒนาเคลื่อนที่ 31 (นพค.31) อ.ปัว จ.น่าน ก่อนการตอบแบบสอบถาม ทั้งนี้ คณะนักวิจัย สทป. เปิดโอกาสให้เจ้าหน้าที่หน่วยพัฒนาเคลื่อนที่ 31 ชักถามข้อมูลเพิ่มเติมด้านข้อมูลที่แสดงบนแอปพลิเคชัน Mobile4UR อีกทั้งยังรับฟังข้อเสนอแนะโดยตรงจากผู้ชำนาญการด้านเผชิญเหตุโดยตรง แสดงตามรูปที่ 7

### 2.2.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

จากการศึกษาจากแบบสอบถามเฉพาะกลุ่ม ได้แก่ หน่วยพัฒนาเคลื่อนที่ 31 (นพค.31) อ.ปัว จ.น่าน จำนวน 31 ท่าน พบว่า ประสิทธิภาพของผู้เผชิญเหตุส่วนใหญ่อยู่ที่ช่วง 1 - 5 และ 5 - 10 ปี จำนวนร้อยละ 41.94 และ 35.48 ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่แบบประเมินมีความเห็น

เห็นด้วยกับการนำแอปพลิเคชัน “Mobile4RU” มาใช้งานมากกว่าร้อยละ 90 ทั้งนี้ ภายใต้แบบสอบถาม นักวิจัยได้สร้างรูปแบบคำถาม เพื่อประเมินความต้องการของผู้ใช้เพื่อการสนับสนุน 4 หัวข้อ ได้แก่

- 1) ความต้องการการสนับสนุนภาพสถานการณ์และความเสียหายเบื้องต้น
- 2) ความต้องการความช่วยเหลือเร่งด่วนของผู้ประสบภัย

- 3) พิกัดสถานที่ และสถานที่ปลอดภัย ขณะเผชิญเหตุ
- 4) ความรุนแรง และสภาพสถานการณ์ ณ ขณะนั้นๆ

ทั้งนี้สามารถสรุปความต้องการด้านการแสดงผล ในขณะที่เกิดเหตุเป็นอัตราร้อยละในแต่ละหัวข้อได้ดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 1** สรุปผลการตอบแบบสอบถาม เพื่อประเมินผลความต้องการข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการเผชิญเหตุ

| ข้อ   | หลักเกณฑ์                                       | จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม (คน) |         |         |         |     |
|---|---|---------------------------|---------|---------|---------|-----|
| <b>ส่วนที่ 1</b> ข้อมูลส่วนตัวผู้ตอบแบบสอบถาม     |   |                           |         |         |         |     |
|   | ช่วงอายุ (ปี)                                   | 20 - 35                   | 35 - 40 | 40 - 45 | 45 - 50 | 50+ |
|   | จำนวน (คน)                                      | 18                        | 10      | 2       | 1       |     |
|   | ประสบการณ์การเผชิญเหตุ (ปี)                     | 1 - 5                     | 5 - 10  | 10 - 15 | 15 - 20 | 20+ |
|   | จำนวน (คน)                                      | 13                        | 11      | 2       | 2       | 3   |
| <b>ส่วนที่ 2</b> ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบโปรแกรม |   |                           |         |         |         |     |
|   | เคยทำแบบสอบถามเพื่อสร้างเครื่องมือมาก่อนหรือไม่ | เคย                       | ไม่เคย  |         |         |     |
|   | จำนวน (คน)                                      |                           | 31      |         |         |     |
| <b>ข้อมูลด้านบุคคล</b>                            |   |                           |         |         |         |     |
|   | ระบุตัวบุคคลผู้รายงาน/ร้องขอ                    | 1                         | 3       | 5       | 17      | 5   |
|   | ลงทะเบียนบุคคลผู้รายงาน/ร้องขอกับระบบ           |                           | 4       | 5       | 16      | 6   |
|   | เชื่อมโยงผู้ลงทะเบียนไปยังข้อมูลทะเบียนราษฎร์   |                           | 5       | 4       | 18      | 3   |
|   | ให้รายละเอียดบุคคลที่ต้องการความช่วยเหลือ       |                           |         | 1       | 19      | 10  |

| ข้อ                               | หลักเกณฑ์  | จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม (คน) |             |                   |          |                       |
|-----------------------------------|--|---------------------------|-------------|-------------------|----------|-----------------------|
|                                   |  | ไม่เห็นด้วย<br>อย่างยิ่ง  | ไม่เห็นด้วย | ไม่มี<br>ความเห็น | เห็นด้วย | เห็นด้วย<br>อย่างยิ่ง |
|                                   | ระบุความช่วยเหลือ/<br>อุปกรณ์พยาบาลขั้นตอนที่ต้องการ |                           |             |                   | 15       | 15                    |
|                                   | ระบุจำนวนผู้ที่ต้องการ<br>ความช่วยเหลือ              |                           |             |                   | 15       | 16                    |
|                                   | อื่นๆ  |                           |             |                   |          |                       |
| ข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ที่รายงาน |  |                           |             |                   |          |                       |
| น้ำท่วม                           |  |                           |             |                   |          |                       |
|                                   | ส่งภาพ/วิดีโอ/เสียงสถานการณ์<br>ระดับน้ำ             |                           |             |                   | 18       | 13                    |
|                                   | แจ้งความเสียหายในเบื้องต้น                           |                           |             |                   | 13       | 18                    |
|                                   | คาดการณ์สถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้น<br>ในขั้นต่อไป       |                           |             | 2                 | 17       | 12                    |
|                                   | อื่นๆ  |                           |             |                   |          |                       |
| ดิน/โคลนถล่ม                      |  |                           |             |                   |          |                       |
|                                   | ส่งภาพ/วิดีโอ/เสียงสถานการณ์<br>ระดับน้ำ             |                           |             |                   | 16       | 15                    |
|                                   | แจ้งความเสียหายในเบื้องต้น เช่น<br>ถนน สายไฟ เป็นต้น |                           |             |                   | 11       | 20                    |
|                                   | อาณาบริเวณของพื้นที่ดินถล่ม                          |                           |             |                   | 20       | 11                    |
|                                   | อื่นๆ  |                           |             |                   |          |                       |
| ข้อมูลทางด้านเวลาและความเร่งด่วน  |  |                           |             |                   |          |                       |
|                                   | ระบุเวลาการเกิดสถานการณ์/<br>เวลาขอความช่วยเหลือ     |                           |             |                   | 14       | 17                    |
|                                   | ระบุเวลาหรือความเร่งด่วน<br>ของความช่วยเหลือ         |                           |             | 1                 | 15       | 15                    |
|                                   | อื่นๆ  |                           |             |                   |          |                       |

| ข้อ                               | หลักเกณฑ์                                       | จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม (คน) |             |                   |          |                       |
|-----------------------------------|---|---------------------------|-------------|-------------------|----------|-----------------------|
|                                   |   | ไม่เห็นด้วย<br>อย่างยิ่ง  | ไม่เห็นด้วย | ไม่มี<br>ความเห็น | เห็นด้วย | เห็นด้วย<br>อย่างยิ่ง |
| ข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่เกิดเหตุ    |   |                           |             |                   |          |                       |
|                                   | ระบุพิกัด ตำบล ที่ตั้งของสถานที่                |                           |             |                   | 8        | 23                    |
|                                   | ระบุสิ่งที่เด่นสะดุดตา/สังเกตง่าย               |                           |             |                   | 13       | 18                    |
|                                   | อื่นๆ   |                           |             |                   |          |                       |
| ข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ที่รายงาน |   |                           |             |                   |          |                       |
|                                   | ระบุความรุนแรงของสถานการณ์                      |                           |             |                   | 13       | 18                    |
|                                   | ระบุประเภทสิ่งอุปโภคบริโภค<br>ที่ต้องการ        |                           |             |                   | 14       | 17                    |
|                                   | ระบุสิ่งอุปกรณ์ที่ขาด/ต้องการใช้ใน<br>สถานการณ์ |                           |             |                   | 15       | 16                    |
|                                   | อื่นๆ   |                           |             |                   |          |                       |



รูปที่ 7 การตอบคำถามด้านความต้องการข้อมูลของหน่วยพัฒนาเคลื่อนที่ 31 (นพค.31) อ.บัว จ.น่าน

ตารางที่ 2 ตารางสรุปความต้องการเป็นร้อยละ

| ข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ที่รายงาน                 |  |  |  |      |       |       |  |
|---|--|--|--|------|-------|-------|--|
| น้ำท่วม   |  |  |  |      |       |       |  |
| ส่งภาพ/วิดีโอ/เสียงสถานการณ์ระดับน้ำ              |  |  |  |      | 18    | 13    |  |
| ร้อยละ  |  |  |  |      | 58.06 | 41.94 |  |
| แจ้งความเสียหายในเบื้องต้น                        |  |  |  |      | 13    | 18    |  |
| ร้อยละ  |  |  |  |      | 41.94 | 58.06 |  |
| คาดการณ์สถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในขั้นต่อไป        |  |  |  | 2    | 17    | 12    |  |
| ร้อยละ  |  |  |  | 6.45 | 54.84 | 38.71 |  |
| อื่นๆ   |  |  |  |      |       |       |  |
|   |  |  |  |      |       |       |  |
| ดิน/โคลนถล่ม                                      |  |  |  |      |       |       |  |
| ส่งภาพ/วิดีโอ/เสียงสถานการณ์ระดับน้ำ              |  |  |  |      | 16    | 15    |  |
| ร้อยละ  |  |  |  |      | 51.61 | 48.39 |  |
| แจ้งความเสียหายในเบื้องต้น เช่น ถนน สายไฟ เป็นต้น |  |  |  |      | 11    | 20    |  |
| ร้อยละ  |  |  |  |      | 35.48 | 64.52 |  |
| อาณาบริเวณของพื้นที่ดินถล่ม                       |  |  |  |      | 20    | 11    |  |
| ร้อยละ  |  |  |  |      | 64.52 | 35.48 |  |
| อื่นๆ   |  |  |  |      |       |       |  |

| ข้อมูลทางด้านเวลาและความเร่งด่วน             |  |  |  |      |       |       |  |
|--|--|--|--|------|-------|-------|--|
| ระบุเวลาการเกิดสถานการณ์/เวลาขอความช่วยเหลือ |  |  |  |      | 14    | 17    |  |
| ร้อยละ                                       |  |  |  |      | 45.16 | 54.84 |  |
| ระบุเวลาหรือความเร่งด่วนของความช่วยเหลือ     |  |  |  | 1    | 15    | 15    |  |
| ร้อยละ                                       |  |  |  | 3.23 | 48.39 | 48.39 |  |
| อื่นๆ  |  |  |  |      |       |       |  |

| ข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่เกิดเหตุ              |  |  |  |  |       |       |  |
|---|--|--|--|--|-------|-------|--|
| ระบุพิกัด ตำบล ที่ตั้งของสถานที่            |  |  |  |  | 8     | 23    |  |
| ร้อยละ                                      |  |  |  |  | 25.81 | 74.19 |  |
| ระบุสิ่งที่เด่นสะดุดตา/สังเกตง่าย           |  |  |  |  | 13    | 18    |  |
| ร้อยละ                                      |  |  |  |  | 41.94 | 58.06 |  |
| อื่นๆ                                       |  |  |  |  |       |       |  |
| ข้อมูลเกี่ยวกับสถานการณ์ที่รายงาน           |  |  |  |  |       |       |  |
| ระบุความรุนแรงของสถานการณ์                  |  |  |  |  | 13    | 18    |  |
| ร้อยละ                                      |  |  |  |  | 41.94 | 58.06 |  |
| ระบุประเภทสิ่งอุปโภคบริโภคที่ต้องการ        |  |  |  |  | 14    | 17    |  |
| ร้อยละ                                      |  |  |  |  | 45.16 | 54.84 |  |
| ระบุสิ่งอุปกรณ์ที่ขาด/ต้องการใช้ในสถานการณ์ |  |  |  |  | 15    | 16    |  |
| ร้อยละ                                      |  |  |  |  | 48.39 | 51.61 |  |
| อื่นๆ                                       |  |  |  |  |       |       |  |

### 3 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาความต้องการด้านข้อมูลเบื้องต้น เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับบรรเทาสาธารณภัย ด้วยวิธีการสำรวจด้วยแบบสอบถาม (ad-hoc questionnaire) ตามระเบียบวิธีวิจัยเชิงคุณภาพโดยการสุ่มแบบเจาะจงจากกลุ่มตัวอย่างได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านการเผชิญเหตุ หน่วยพัฒนาเคลื่อนที่ 31 (นพค.31) อ.ปัว จ.น่าน จำนวน 31 ท่าน ซึ่งพื้นที่จังหวัดน่านมักประสบปัญหา ดินโคลนถล่ม และปัญหาน้ำท่วมเป็นหลัก โดยช่วงอายุส่วนใหญ่ของผู้เผชิญเหตุอยู่ในช่วง 20 – 40 ปี และมีประสบการณ์ในการเผชิญเหตุระหว่าง 1 – 10 ปี มีแนวโน้มต้องการเครื่องมือในการให้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการเผชิญเหตุ อีกทั้งข้อมูลเบื้องต้นควรสามารถแสดงพิกัด ตำบล ที่ตั้งของสถานที่เกิดเหตุ (ความต้องการสูงถึงร้อยละ 74.19) ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบการแสดงผลเพื่อพัฒนา

แอปพลิเคชัน Mobile4RU รวมถึงหากเป็นไปได้ควรแสดง ภาพ/วิดีโอ/เสียงสถานการณ์ ได้ (ความต้องการสูงถึงร้อยละ 48.39) อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความต้องการที่ไม่อยากเปิดเผยข้อมูลของผู้รายงานข่าว ซึ่งเชื่อมโยงเข้ากับทะเบียนราษฎร์สูงถึงร้อยละ 30 และควรลดทอนข้อมูลด้านการทำนายสถานการณ์ตามมุมมองของผู้เผชิญเหตุสูงถึงร้อยละ 54.84

### 4. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความต้องการข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพัฒนา Mobile4RU เพื่อการเผชิญเหตุสาธารณภัยและภัยพิบัติของหน่วยพัฒนาเคลื่อนที่ 31 (นพค.31) อ.ปัว จ.น่าน ซึ่งเจ้าหน้าที่ชุดดังกล่าวฯ มักเผชิญเหตุด้านการช่วยเหลือผู้ประสบภัยจากดินโคลนถล่ม และปัญหาน้ำท่วมเป็นหลัก ทั้งนี้ เพื่อเป็นการขยายขอบเขตการพัฒนา

แอปพลิเคชันให้ครอบคลุมและเหมาะสมในสถานการณ์อื่นๆ อย่างเช่น สถานการณ์หมอกควัน หรือ ไฟป่า เป็นต้น ดังนั้น คณะผู้วิจัย สทป. จึงเห็นควรให้มีการสำรวจแนวทางการปฏิบัติและความต้องการข้อมูล เพื่อนำมาใช้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาแอปพลิเคชันในลำดับต่อไป จากหน่วยเผชิญเหตุอื่นๆ เพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลในแอปพลิเคชัน

## 5. เอกสารอ้างอิง

[1] คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ. (2018). บันทึกเหตุการณ์ดินโคลนถล่ม อ.บ่อเกลือ จ.น่าน วันที่ 28 ก.ค. 61. Retrived May 13, 2019, from [http://www.thaiwater.net/current/2018/landslideNan/nan\\_jul2018.html](http://www.thaiwater.net/current/2018/landslideNan/nan_jul2018.html).

[2] สำนักข่าวไทยโพสต์. (2018). ย้ายตั้งหมู่บ้านหนีภัยดินโคลนถล่ม อ.บ่อเกลือ จ.น่าน เตรียมสร้างหมู่บ้านถาวรรองรับ 60 ครอบครัว. Retrived May 13, 2019, from <https://www.thaipost.net/main/detail/15869>.

[3] Bealt, J., Fernández Barrera, J. C., & Mansouri, S. A. (2016). Collaborative relationships between logistics service providers and humanitarian organizations during disaster relief operations. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 6 (2), 118–144.

[4] Leiras, A., de Brito Jr, I., Queiroz Peres, E., Rejane Bertazzo, T., & Tsugunobu Yoshida Yoshizaki, H. (2014). Literature review of humanitarian logistics research: trends and challenges. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 4 (1), 95–130.

[5] Long, D. C., & Wood, D. F. (1995). The logistics of famine relief. *Journal of Business Logistics*, 16 (1), 213.

[6] MunichRe. (2017). NatCatSERVICE. Available from: <http://natcatservice.munichre.com>

[7] Barros, V. R. (2014). *Climate change 2014 –impacts, adaptation and vulnerability: Global and sectoral aspects*. Cambridge University Press .

[8] Chamnan Kumsap. (2019). Concept of Mobile C4ISR for Disaster Relief. *National Defence Studies Institute Journal*, 9 (1), 7-19.

[9] Lisa Dethridge and Brian Quinn. (2016).

Realtime emergency communication in virtual worlds. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. 7 (1), 26-39.

[10] Kurniawan Adi Saputro. (2016). Information volunteers' strategies in crisis communication: The case of Mt. Merapi eruption in Indonesia 2010. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. 7 (1), 63-72.

[11] Philip Pond. (2016). The space between us: Twitter and crisis communication. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. 7 (1), 40-48.

[12] Chamnan Kumsap, Vissanu Mungkung, Issara Amatacheewa, and Thanarat Thanasomboon. (2017). Conceptualization of Military's Common Operation Picture for the Enhancement of Disaster Preparedness and Response during Emergency and Communication Blackout, Proceedings of the 7th International Conference on Building Resilience, to be held in Bangkok Thailand from 27th to 29th November 2017.

[13] Chamnan Kumsap, Vissanu Mungkung, Issara Amatacheewa, Marut Chartpram, and Kampanart Sirirueang. (2017). Skylight Mae Tha: The Prosperous and Resilient Ways of Local Community amidst the Depriving Natural Resources and Deteriorating Environment, Proceedings of International Expert Forum on Mainstreaming Resilience and Disaster Risk Reduction in Education" on 1 - 2 December, 2017 at AIT, THAILAND.

[14] Y. Okuyama, J.R. Santos. (2014). Disaster impact and input-output analysis, *Econ. Syst. Res.* 26 (1), 1–12.

[15] Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175 (1), 475–493.

[16] Coppola, D. (2006). *Introduction to international disaster management*. Butter-worth-Heinemann.

[17] MacKenzie, C., & Zobel, C. (2016). Allocating resources to enhance resilience, with application to Superstorm Sandy and an electric utility. *Risk Analysis*, 36 (4), 847–862.

[18] Shan, X., & Zhuang, J. (2013). Cost of equity

in homeland security resource allocation in the face of a strategic attacker. *Risk Analysis*, 33 (6), 1083–1099.

[19] Chang, M.-S., Tseng, Y.-L., & Chen, J.-W. (2007). A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43 (6), 737–754.

[20] Bryson, K.-M., Millar, H., Joseph, A., & Mobolurin, A. (2002). Using formal MS/OR modeling to support disaster recovery planning. *European Journal of Operational Research*, 141 (3), 679–688.

[21] Gama, M., Santos, B. F., & Scaparra, M. P. (2016). A multi-period shelter location-allocation model with evacuation orders for flood disasters. *EURO Journal on Computational Optimization*, 4 (3–4), 299–323.

[22] Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175 (1), 475–493.

[23] Simpson, N., & Hancock, P. (2009). Fifty years of operational research and emergency response. *Journal of the Operational Research Society*, S126–S139.

[24] Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimisation models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46 (1), 4–13.

[25] Galindo, G., & Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230 (2), 201–211.

[26] Hoyos, M. C., Morales, R. S., & Akhavan-Tabatabaei, R. (2015). OR models with stochastic components in disaster operations management: A literature survey. *Computers & Industrial Engineering*, 82, 183–197.

[27] Özdamar, L., & Ertem, M. A. (2015). Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. *European Journal of Operational Research*, 244 (1), 55–65.

[28] Bayram, V. (2016). Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review. *Surveys in Operations*

*Research and Management Science*, 21 (2), 63–84.

[29] Esposito Amideo, A., Scaparra, M. P., Kotiadis, K. (2019). Optimising shelter location and evacuation routing operations: The critical issues. *European Journal of Operational Research*, Article in press.

[30] Alireza, M., Haizhong, W., Dan, C., Shangjia, D. (2019). An agent-based vertical evacuation model for a near-field tsunami: Choice behavior, logical shelter locations, and life safety. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 34, 467–479.

[31] G.R. Priest, L.L. Stimely, N.J. Wood, I.P. Madin, R.J. Watzig, (2016). Beat-the-wave evacuation mapping for tsunami hazards in seaside, Oregon, USA, *Nat. Hazards* 80 (2), 1031–1056.

[32] H.-L. Wei, M.K. Lindell, (2017). Washington households' expected responses to tsunami threat from mt. rainier. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 22, 77–94.

[33] M.K. Lindell, C.S. Prater, (2010). Tsunami preparedness on the oregon and Washington coast: recommendations for research, *Nat. Hazards Rev.* 11 (2), 69–81.

[34] M.K. Lindell, C.S. Prater, C.E. Gregg, E.J. Apatu, S.-K. Huang, H.-C. Wu, (2015). Households' immediate responses to the 2009 American samoa earthquake and tsunami. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 12, 328–340.

[35] A. Mostafizi, H. Wang, D. Cox, L.A. Cramer, S. Dong, (2017). Agent-based tsunami evacuation modeling of unplanned network disruptions for evidence-driven resource allocation and retrofitting strategies, *Nat. Hazards* 1–26.

[36] of Geology, O.D., Industries, M., 2013. Tsunami evacuation map seaside & gearhart, oregon.

[37] Benini, A., Conley, C., Dittmore, B., & Waksman, Z. (2009). Survivor needs or logistical convenience? Factors shaping decisions to deliver relief to earthquake- affected communities, *Pakistan 2005–06. Disasters*, 33 (1), 110–131. communities, *Pakistan 2005–06. Disasters*, 33 (1), 110–131.

# การวิเคราะห์ความเป็นไปได้การถ่ายทอดเทคโนโลยีป้องกันประเทศภายใต้โครงการออฟเซตระหว่างไทยและยูเครน

บดินทร์ สันทัด<sup>1\*</sup>

วันที่รับ 7 กุมภาพันธ์ 2562 วันที่แก้ไข 1 กรกฎาคม 2562 วันตอบรับ 4 กรกฎาคม 2562

## บทคัดย่อ

บทวิเคราะห์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์กรอบความร่วมมือและศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการตามนโยบายการชดเชยทางยุทธพาณิชย์ หรือนโยบายออฟเซต (offset policy) ด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศระหว่างไทยและยูเครน ในปัจจุบันไทยและยูเครนมีความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในระดับมูลฐานเท่านั้น ส่วนใหญ่เป็นการนำเข้ายุทโธปกรณ์ทางเดียวจากยูเครนมายังไทย และยังไม่มีความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมระหว่างประเทศในลักษณะโครงการออฟเซตเกิดขึ้น การศึกษาครั้งนี้ เริ่มจากการค้นคว้ารวบรวมข้อมูลอุตสาหกรรมป้องกันประเทศระหว่างไทยและยูเครน จากตำราทางวิชาการ เว็บไซต์ข่าว บทวิเคราะห์ และการสัมภาษณ์ โดยเฉพาะด้านการจัดหาระหว่างประเทศที่เป็นโครงการขนาดใหญ่ในอดีต รวมไปถึงการวิเคราะห์โอกาสและความท้าทายในอนาคตด้วย ขั้นตอนจะศึกษาตัวบทและแนวทางการออฟเซตของยูเครน ทั้งทางด้านการเป็นผู้ให้และผู้รับเทคโนโลยี ว่ามีผลต่ออุตสาหกรรมป้องกันประเทศของยูเครนอย่างไร จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการตามปัจจัยพิจารณา 4 ประการ ได้แก่ 1) ความต้องการใช้งานในอนาคต 2) การเป็นผู้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยี 3) ชีตความสามารถในการแข่งขัน 4) เป็นเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้วในไทย ผลการวิเคราะห์พบว่า โครงการยานเกราะล้ออย่าง BTR-3E1, BTR-4 และโครงการจรวดนำวิถีต่อสู้รถถัง Barrier เป็นโครงการที่มีความเป็นไปได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโครงการอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การสร้างความร่วมมือยังมีปัญหาอุปสรรคอยู่บ้างทั้งสองฝ่าย ฝ่ายยูเครนมีปัญหาด้านการส่งกำลังบำรุง จากวิกฤตทางการเมือง Crimean Crisis เพราะที่ตั้งนิคมอุตสาหกรรม และผู้ผลิตย่อยบางส่วนอยู่ในเขตที่ได้รับผลกระทบจากความขัดแย้ง จนส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม ส่วนฝ่ายไทยได้เกิดค่าเสียโอกาสที่การจัดหาในอดีตไม่มีข้อเรียกร้องแบบออฟเซตอย่างเป็นทางการและที่ไทยมีขีดความสามารถด้านเทคโนโลยีขั้นสูงที่เป็นจุดแข็งแตกต่างไปจากยูเครน ทำให้การสร้างกรอบความร่วมมือมีข้อจำกัดและอาจเกิดได้บางด้านเท่านั้น และในท้ายที่สุด บทวิเคราะห์นี้ได้ชี้ให้เห็นความสำคัญและประโยชน์ของการใช้นโยบายออฟเซตระหว่างประเทศ อันเป็นสิ่งที่รัฐบาลไทยควรพิจารณาการนำไปใช้อย่างรอบคอบในอนาคต

**คำสำคัญ :** การถ่ายทอดเทคโนโลยี, เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, ออฟเซต, นโยบายการชดเชยทางยุทธพาณิชย์

<sup>1</sup>ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

\* ผู้แต่ง, อีเมลล์: bodin.s@dti.or.th

# Defence Technology Analysis Report: Feasibility Study on Defence Technology Transfer under Thai-Ukrainian Offset Projects.

Bodin Suntud<sup>2\*</sup>

## Abstract

This report was aimed to analyze Thai- Ukrainian military industrial collaboration in the past and to conduct feasibility study for upcoming projects in the future. The analysis for this international project offset used 4 relevant factors; namely, future requirements, technology transfer capability, competitiveness, and technological familiarity. The analysis for military industrial collaboration and offset program revealed that the collaboration between them was still at a fundamental level. Most projects comprised one-way import from Ukrain to Thailand. Therefore, some concrete industrial collaboration was yet to come into existence. The method of this analysis stemmed from collecting data and facts found in academic works, books, database, news, website, analysis, interviews, especially major defense industrial procurement from the past, including analyzing opportunity and challenges in the near future. The report, then, investigated the Ukrainian offset regulation, in both provider and receiver domains, and attempted to forecast the consequences of this industrial policy. After that, the feasibility study towards each project based on previous findings was evaluated by 4 relevant factors. It also unveiled, about offset program, that BTR-3E1, BTR-4 and Barrier anti-tank missiles were the most feasible projects for future international collaboration. However, it was discernable that both parties faced some obstacles of their own. On the Ukrainian side, the enduring armed-conflict of Crimean Crisis caused sporadic suffer to its strategic defense logistics, affecting the stability and consistency of their subcontractors. On the Thai side, the defense industry lost some opportunity cost in that the previous procurement had not imposed formal offset as a legal obligation to the Ukrainian seller. Moreover, the overall strength of existing Thai infrastructure, especially in high-technology sectors such as satellites, UAVs, or other aerospace sophistications differed a great deal from that of Ukrain-. That made it extremely difficult, especially for the Thais, to establish a solid industrial military collaboration with Ukrainian counterpart. The mutual collaboration was therefore largely limited, except only in the aforementioned automotive industry. Lastly, this analysis pointed out the significance and benefits from international offset programs in which the political will of the government must consider offset as a policy tool in the near future.

**Keywords :** Technology Transfer, Defence Technology, Offset Policy

---

<sup>2</sup>Defence Technology Analyst, Defence Technology Analysis Department, Defence Technology Institute

\* Corresponding author, E-mail: bodin.s@dti.or.th

# 1. ภาพรวมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศระหว่างไทย-ยูเครน

ประเทศไทยและยูเครนมีการสร้างความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศอยู่ในระดับมูลฐาน เรียกได้ว่า เป็นเพียงการซื้อขายยุทธโปกรณ์จากยูเครนมายังไทยทางเดียว และไทยไม่เคยส่งออกยุทธโปกรณ์ไปยังยูเครนเลย [1] เนื่องด้วยเหตุผลต่าง ๆ เช่น ประเทศไทยและยูเครนอยู่ห่างไกลกัน ทำให้การสร้างอุตสาหกรรมเกิดขึ้นได้ยาก และยุทธโปกรณ์ส่วนใหญ่ของกองทัพไทยเน้นเทคโนโลยีของค่ายสหรัฐอเมริกาว่า โดยเฉพาะเทคโนโลยีอาวุธที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น เครื่องบินและเรือรบ ส่วนประเทศยูเครนก็เพิ่งจะทำการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเมื่อไม่นานมานี้ หลังจากสหภาพโซเวียตล่มสลาย

ในแง่ของภูมิทัศน์ของกิจการด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของยูเครนนั้น ยังรวมศูนย์อยู่ที่สำนักงานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของรัฐบาลหรือ Ukroboronprom [2] แตกต่างกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของสหรัฐอเมริกา หรือยุโรป คือไม่ใช่บริษัทเอกชนที่มีการบริหารงานที่คล่องตัวที่เน้นการทำการค้า และมีการแข่งขันทั้งภายในและภายนอกประเทศ รวมถึงการส่งออกไปยังต่างประเทศแบบเอกชน ส่วนใหญ่ยุทธโปกรณ์เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น เครื่องบินรบ เรดาร์ ระบบ C4ISR อยู่ในสถานะการพัฒนาให้เป็นต้นแบบ (Prototype) โดยยังไม่ปรากฏข้อมูลการส่งออกไปยังต่างประเทศ ส่วนเทคโนโลยีขั้นพื้นฐาน หรือขั้นกลาง เช่น ยานรบทางบก หรืออัมพันซ์

พื้นฐานจะถูกนำมาใช้ประจำการในประเทศเท่านั้น โดยเฉพาะกรณีความขัดแย้งในปัจจุบันกับรัสเซีย

ปัจจุบัน ความร่วมมือด้านการทหารและการป้องกันประเทศระหว่างไทยและยูเครนยังไม่มีสิ่งใดเป็นรูปธรรม เพราะยังไม่มีโครงการอพเพชต์และการถ่ายทอดเทคโนโลยีใดเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีความร่วมมือระหว่างประเทศที่นอกเหนือจากภาคการทหาร คือด้านเทคโนโลยีอวกาศ [3] เช่น การที่ยูเครนมีอุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีอวกาศที่ครบวงจร เพราะสามารถผลิตจรวดขนส่งดาวเทียม และบริการขนส่งดาวเทียมหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็นดาวเทียมสื่อสาร ดาวเทียมรบกวน สัญญาณโทรทัศน์และวิทยุ หรือสัญญาณเรดาร์ จนมีส่วนแบ่งทางการตลาดของโลกมากกว่า 13% และเคยปล่อยดาวเทียมด้วยจรวดมาแล้วกว่า 90 ครั้ง โดยในปีที่ผ่านมา สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) หรือ GISTDA ได้สร้างความร่วมมือกับยูเครนในด้านนี้ด้วย ดังนั้น ส่วนงานของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่ทำหน้าที่ในด้านของการสื่อสารข้อมูลและคอมพิวเตอร์อาจจะต้องนำประเด็นดังกล่าวไปพิจารณาติดตาม และต่อยอดเพื่อสร้างความร่วมมือกับโครงการนี้ด้วย

ตามข้อมูลของ Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) [4] จะเห็นได้ว่า ในอดีตกองทัพไทยนำเข้ายุทธโปกรณ์ที่เป็นโครงการขนาดใหญ่เพียง 3 รายการ เพื่อมาใช้ในราชการของกองทัพ ได้แก่ การนำเข้าเครื่องยนต์ Turbofan แบบ AI-25 ของบริษัท



รูปที่ 1 เครื่องยนต์ AI-25 สำหรับเครื่องบิน L-39



รูปที่ 2 ยานเกราะล้ออย่างรุ่น BTR-3E1

Ivchenko-Progress สำหรับเครื่องบินรบ L-39 ที่เป็นเครื่องบินที่ผลิตในสาธารณรัฐเช็ก จำนวน 36 เครื่องยนต์ การนำเข้ายานเกราะล้อยางแบบ BTR-3U Guardian จำนวน 217 คัน พร้อมจรวดต่อสู้รถถังที่ติดตั้งมาพร้อมยานเกราะแบบ R-2 จำนวนไม่ต่ำกว่า 2,500 ลูก และของอภินันทนาการ หรือของแถม ให้อีก 6 คัน มูลค่ารวม 290 ล้านบาท ในห้วงปี 2008 จนถึงปัจจุบัน และโครงการนำเข้ารถถังหลัก T-84 จำนวน 49 คัน ในห้วงปี ค.ศ. 2014-2017 มูลค่ารวม 240 ล้านบาท แต่การขนส่งมีความล่าช้ากว่ากำหนด เนื่องด้วยวิกฤตในยูเครนที่ต้องปะทะกับการรุกรานของรัสเซียและกลุ่มที่ต้องการแบ่งแยกดินแดน [5] นับเป็น 3 รายการ ที่มีมูลค่าสูงและส่งผลกระทบต่อแผนกำลังรบของกองทัพไทยมาก

การส่งมอบที่ล่าช้านี้ เป็นทั้งสัญญาณบวกและสัญญาณลบ สัญญาณลบ คืออาจจะเป็นการแสดงถึงการบริหารจัดการภายในที่ยังไม่รัดกุมเพียงพอ จึงเกิดปัญหาการส่งกำลังบำรุง เพราะสภาวะความขัดแย้งทางการเมืองในยูเครนทำให้การส่งกำลังบำรุงถูกรบกวน อย่างไรก็ตาม ไทยอาจได้บทเรียนว่า เราต้องพิจารณาแสวงหาแหล่งที่ตั้งของนิคมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศให้อยู่นอกพื้นที่ที่เป็นไปได้ว่าจะมีความขัดแย้ง มิฉะนั้นการสูญเสียขีดความสามารถของโรงงาน องค์กรบุคคล หรือองค์ความรู้เทคโนโลยีขั้นสูง โดยเฉพาะ รถถัง เรือรบ หรือเครื่องบิน อาจเป็นสิ่งที่ไม่อาจประเมินค่าได้ สัญญาณบวก คือ เป็นโอกาสของยูเครนและประเทศที่จะเป็นลูกค้าในอนาคต ในการที่ รถถังของยูเครนได้เคยผ่านการใช้ในสนามรบจริง จึงเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือเมื่อทำการส่งออกไปต่างประเทศ และในเมื่อสงครามกับรัสเซียยังมีอยู่ อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของยูเครนจะพัฒนาต่อไปอย่างไม่หยุดยั้ง เพราะต้องใช้จริงในราชการสงครามอย่างต่อเนื่องด้วย พร้อมทั้งผลผลิตที่มีราคาไม่สูงแบบค่ายตะวันตก นับว่ายูเครนเป็นตลาดส่งออกอาวุธใหม่ของโลกที่น่าสนใจ และกำลังเข้าสู่อุตสาหกรรมด้านนี้ทั้งในเอเชียและแอฟริกา

ในบรรดายานเกราะล้อยางหรือยานรบทหารราบทั้งหมดของโลกนี้ ยูเครนนับเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีราคา

ต่อหน่วยต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับยานรบแบบเดียวกันของประเทศตะวันตก เพราะเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานระดับ Tier-3 และมีค่าบำรุงรักษาและดำรงสภาพที่ไม่สูงนัก ทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีของลูกค้าในการจัดหามาใช้ในกองทัพประเทศต่าง ๆ เพื่อให้กองทัพสมัยใหม่เปลี่ยนหลักนิยมจากทหารราบเดินเท้ามาเป็นทหารราบยานเกราะเคลื่อนที่เร็วได้มากขึ้น โดยจากการสอบถามผู้ใช้อยานเกราะล้อยาง BTR-3E1 ในกองทัพไทย [6] พบว่าอะไหล่ที่ชำรุดเป็นประจำนั้น ส่วนใหญ่สามารถจัดหาชดเชยได้จากภาคเอกชนภายในประเทศไทย และทำการซ่อมบำรุงในหน่วยได้โดยตรง จนอาจเรียกได้ว่า ไทยมีขีดความสามารถด้านการซ่อมบำรุงและบำรุงรักษายานเกราะล้อยาง BTR ที่สามารถพึ่งพาตนเองได้ระดับหนึ่ง

หากพิจารณาคุณลักษณะขีดความสามารถถ่วงเทียบกับราคา (Price-Performance Evaluation) แล้ว ข้อสังเกตอย่างหนึ่งของการค้ารถถังหลักของยูเครนเทียบกับประเทศอื่น ๆ คือ ยูเครนได้พยายามทำการตลาดเพื่อส่งออกไปต่างประเทศอย่างแข็งขัน แต่มักจะแพ้ให้กับรถถังจากประเทศอื่นที่มีประสิทธิภาพและระดับเทคโนโลยีที่สูงกว่าและการบริหารจัดการสัญญาที่น่าเชื่อถือมากกว่า ไม่ว่าจะเป็น จีน เยอรมนี เกาหลีใต้ และรัสเซีย อยู่บ่อยครั้ง ไม่ว่าจะเป็นการพยายามส่งออกไปยังอาเซอร์ไบจาน แต่แพ้ให้กับรถถัง T-90 ของรัสเซีย [7] หรือการที่บังคลาเทศเลือกซื้อ MBT-2000 ของจีน [8] หรือความพยายามเข้าถึงตลาดของกรีซ แต่กรีซตัดสินใจเลือกรถถัง Leopard 2A6 ของเยอรมนี [9] หรือมาเลเซียที่หันไปเลือกรถถัง PT-91 ของโปแลนด์แทน [10] หรือไทยที่ปฏิเสธรถถัง Oplot แล้วไปเลือกรถถังจินแทน [11] หรือกรณีล่าสุดที่ตุรกีหันไปเลือกรถถัง Altay ของ Hyundai Rotem ของเกาหลีใต้ [12]

นับว่าการตลาดด้านการค้ารถถังในโลกสมัยใหม่มีความเข้มข้นและแข่งขันสูงมาก และยูเครนตกเป็นฝ่ายแพ้เกือบทั้งหมด หากประเทศไทยมีความพยายามในการพัฒนาและผลิตรถถังขึ้นมาเอง อาจจะต้องพิจารณากรณีศึกษาและบทเรียนในการแพ้-ชนะในวงการการค้าดังกล่าวโดยละเอียดรอบคอบ และตั้งเป้าหมายที่การ

ผลิตเพื่อใช้ในประเทศให้มั่นคงก่อน โดยเฉพาะรายการ ยูโทปรแกรมที่มีลำดับความเร่งด่วน หรือน่าจะทำการ แข่งขันใน Sector อื่น น่าจะได้ผลสัมฤทธิ์ที่ดีกว่า

## 2. การจัดทำโครงการออฟเซตระหว่างประเทศ ของยูเครน

นโยบายออฟเซตสามารถพิจารณาได้สองด้าน ได้แก่ ด้านการเป็นผู้รับเทคโนโลยีและด้านการเป็นผู้ให้ เทคโนโลยี บทวิเคราะห์จะกล่าวถึงทั้งสองด้าน ดังนี้

รัฐบาลยูเครนได้มีนโยบายออฟเซตเพื่อการ สนับสนุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ [13] โดยเมื่อ วันที่ 20 เมษายน ค.ศ. 2011 ที่ประชุมคณะรัฐมนตรี ได้ผ่านร่างกฎหมาย Decree No.432 เพื่อบังคับใช้นโยบายนี้เป็นครั้งแรก โดยให้ใช้กับการจัดหายูโทปรแกรม ที่มีมูลค่ามากกว่า 5 ล้านยูโรขึ้นไป และมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศให้แข็งแกร่ง เพื่อบรรลุเป้าหมายการจัดหาทางทหารระยะยาวตั้งแต่ ปี ค.ศ. 2016 ไปจนถึงปี ค.ศ. 2025 จากการตระหนัก ว่ามีช่องว่างการพัฒนาในประเทศอยู่ และต้องพึ่งพา ต่างชาติอยู่มาก รัฐบาลจึงจัดตั้งนโยบายนี้ตามกฎหมาย ให้มีรูปแบบของการแบ่งงานกันทำ (Workshare) และการถ่ายทอดเทคโนโลยี เพื่อสร้างความร่วมมือระหว่าง ประเทศ ทั้งนี้ ข้อตกลงแบบออฟเซตนั้นจะถูกพิจารณา ในช่วงของการยื่นข้อเสนอโครงการ และมีหน่วยงานที่ รับผิดชอบเรียกว่า Offset Committee สังกัดกระทรวง พัฒนาการเศรษฐกิจและการค้า (Ministry of Economic Development and Trade-MEDT) ที่กรุงเคียฟ และมีตัวแทนจากกระทรวงอื่น ๆ เช่น กระทรวงกลาโหม กระทรวงการคลัง กระทรวงยุติธรรม กระทรวงการ ข้าราชการแห่งชาติ เข้าร่วมเป็นคณะกรรมการด้วย โดยมี Ukroboronprom เป็นที่ปรึกษาคณะกรรมการ หาก สิ้นค้านั้นเป็นยุทธภัณฑ์ ทั้งนี้ ได้มีนโยบายออฟเซตสินค้า เทคโนโลยีพลเรือนอีกด้วย

กฎหมายได้กำหนดให้นโยบายออฟเซตของยูเครน ในฐานะเป็นผู้รับเทคโนโลยีแบ่งขั้นตอนเป็น 3 ขั้นตอนแรกดำเนินการด้านการส่งกำลังบำรุง การประกอบ

รวมและการฝึกการใช้งานยูโทปรแกรม ขั้นที่ 2 เป็นการผลิต ยูโทปรแกรมดังกล่าวในประเทศยูเครน ด้วยระบบย่อยที่ ส่งมอบมาจากบริษัทต่างชาติ ขั้นที่ 3 เป็นการผลิต ขึ้นส่วนดังกล่าวเองในประเทศ และทำการประกอบรวม เองในประเทศ ผ่านการถ่ายทอดเทคโนโลยีตามข้อตกลง โดยต้องดำเนินงานให้แล้วเสร็จภายใน 3 ปี ส่วนใหญ่ผู้ ดำเนินงานจะเป็น Ukroboronprom ที่เป็นรัฐวิสาหกิจ ของรัฐบาล ที่มีบริษัทย่อยกว่า 130 แห่งทั่วประเทศ [14]

โครงการออฟเซตมีเป้าหมายเพื่อการรักษา ตำแหน่งแห่งที่และอันดับขีดความสามารถในการแข่งขัน ในตลาดการค้าอาวุธระหว่างประเทศ ยกระดับการพึ่งพา ตนเองภายในประเทศ ลดการไหลออกของเงินตราและ การขาดดุลการค้าจากการส่งออกยูโทปรแกรมเทคโนโลยี ระดับพื้นฐานแต่ต้องนำเข้าเทคโนโลยีขั้นสูง และพัฒนา เทคโนโลยีด้านการป้องกันประเทศ โดยเฉพาะด้าน กิจกรรมอวกาศและเทคโนโลยีสารสนเทศ

ตามข้อกำหนดนั้น จะมีการกำหนดตัวคูณทาง เศรษฐกิจที่จะนำไปคิดในการชดเชยของโครงการ และ มีการกำหนดบทลงโทษ (penalty) หากไม่สามารถทำ ตามข้อตกลง และการสะสมเครดิตออฟเซต หรือ Offset banking ได้ด้วย โดยจะไม่กำหนดตายตัวเป็นนโยบาย บังคับ แต่กำหนดเป็นกรณี ๆ ไปในแต่ละโครงการ ส่วน ในด้านของกิจกรรมที่อนุญาตในโครงการออฟเซตนั้น ๆ มีการลงทุนจากต่างประเทศ โดยเฉพาะโครงการ ที่มีความสำคัญทางยุทธศาสตร์ เช่น ด้านการป้องกัน ประเทศ พลังงาน และโครงสร้างพื้นฐาน ส่วนการร่วมทุน จะเน้นด้านอากาศยาน และการป้องกันประเทศ โดย ให้สิทธิประโยชน์ด้านการยกเว้นภาษีมูลค่าเพิ่ม หากเป็น สินค้าเกี่ยวกับการวิจัยพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง กับการผลิตและการพัฒนาอากาศยาน และยกเว้น ภาษีที่ดินที่ใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการผลิตอากาศยานและ เครื่องยนต์ของอากาศยาน โดยบริษัทผลิตอากาศยาน ของรัฐที่ชื่อ Antonov เป็นผู้รับสิทธิประโยชน์โดยตรง จากกฎหมายนี้ นอกจากนี้ ยังมีการกำหนดในกฎหมาย ให้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศมาสู่ยูเครน

ด้วย โดนเน้นไปที่ภาคส่วนการพัฒนาความมั่นคงด้าน  
สารสนเทศ การข่าวกรอง กิจการอวกาศ ยุทธภัณฑ์ทั่วไป  
และการ MRO อีกด้วย [15]

โครงการออฟเซตยูเครนมีทั้งทางตรงและทางอ้อม  
แต่จะเน้นออฟเซตทางตรงมากกว่า ผ่านการถ่ายทอด  
เทคโนโลยี และการแบ่งงานกันทำระหว่างประเทศ  
ภายใต้กฎหมายดังกล่าว การที่ต่างประเทศรับซื้อสินค้า  
ยุทธภัณฑ์ของยูเครนกลับคืนในรูปแบบ Countertrade  
นับเป็นออฟเซตทางตรงเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  
ยูเครนจะเน้นหนักไปที่เทคโนโลยีด้านความมั่นคง  
ปลอดภัยสารสนเทศและไซเบอร์ รวมทั้งระบบเทคโนโลยี  
อวกาศ เพราะในสถานการณ์ความมั่นคงปัจจุบันมีความ  
เป็นไปได้สูงที่จะถูกการโจมตีทางไซเบอร์จากรัสเซีย

ปัญหาของการดำเนินโครงการออฟเซตมีอยู่บ้าง  
เนื่องจากเหตุการณ์ทางการเมืองระหว่างประเทศที่ยังคุกรุ่น  
งบประมาณการจัดทำจากต่างประเทศที่จำกัด และ  
ประเทศเจ้าของเทคโนโลยีปฏิเสธที่จะแบ่งปันเทคโนโลยี  
ที่ใช้ในการส่งทหารบุคลากรท่ามกลางความขัดแย้งทาง  
การเมือง ดังนั้น โครงการขนาดใหญ่ในฐานะที่ยูเครนเป็น  
ผู้รับเทคโนโลยีจึงยังไม่เกิดเป็นรูปธรรมชัดเจนเท่าใดนัก

ในอดีต โครงการที่ยูเครนเป็นผู้รับเทคโนโลยีที่  
ชัดเจน คือ ในปี ค.ศ. 2010 บริษัทของรัฐที่ชื่อ Chuquev  
Aircraft Repair Plant ของยูเครนลงนามบันทึกความ  
เข้าใจ (MOU) กับบริษัทผลิตเครื่องบิน Sagem ที่เป็น  
บริษัทลูกของ Safran ของประเทศฝรั่งเศส [16] ในการ  
ร่วมมือกันผลิต และสนับสนุนด้านการส่งกำลังบำรุง  
ยุทธโปกรณ์ด้านระบบอากาศยานไร้คนขับทางยุทธวิธี  
ร่วมกัน นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 2014 บริษัท Sagem ยัง  
ได้ร่วมมือกับยูเครนปรับปรุงเฮลิคอปเตอร์ Mi-24 ร่วมกัน  
ด้วย [17] และในปี ค.ศ. 2015 ยูเครนยังลงนามร่วมกับ  
ผู้ผลิตอากาศยานฝึก Hongdu-L-15 ของจีน โดยทำการ  
ประกอบอากาศยานรุ่นนี้ที่โรงงาน Odessa Aircraft  
Plant ภายในประเทศยูเครน และนำโครงการอากาศยาน  
มาประกอบเข้ากับเครื่องยนต์ AI-222-25F ที่บริษัท  
Motor Sich ของยูเครน จึงสามารถผลิตได้เองภายใน  
ประเทศ และวางแผนที่จะจัดตั้งโรงงานผลิตเครื่องยนต์

ดังกล่าวในจีนอีกด้วย [18] และในปี ค.ศ. 2016-2017  
บริษัท Aeroscraft ของประเทศสหรัฐอเมริกา ร่วมมือ  
กับ Ukroboronservice ของยูเครนจัดตั้งโครงการผลิต  
ปืนไรเฟิลจู่โจม ตามใบอนุญาตในชื่อของ WAC-47 ที่  
เป็นตราสินค้าของยูเครน และมีเป้าประสงค์จะใช้ใน  
กองกำลัง LITPOLUKRBRIG อันเป็นกองพลน้อยผสมระหว่าง  
ลิทัวเนีย โปแลนด์ และยูเครน หนว่ยรักษาสันติภาพ และ  
กองทัพยูเครนด้วย [19] นับเป็นสัญญาณที่ดีที่เกิดความ  
ร่วมมือระหว่างประเทศขึ้นกับประเทศเจ้าของเทคโนโลยี  
และเกิดการจ้างงาน และพัฒนาทักษะทางวิศวกรรม  
ภายในประเทศ โดยยูเครนเน้นไปที่การพัฒนาความร่วมมือ  
ยุทธโปกรณ์ทางบกเป็นหลัก

ส่วนโครงการออฟเซตที่ยูเครนเป็นผู้ให้เทคโนโลยี  
นั้น มีกรอบความร่วมมืออุตสาหกรรมป้องกันประเทศกับ  
ประเทศต่าง ๆ ในรูปแบบที่ใกล้เคียงกับโครงการออฟเซต  
จำนวนไม่มากเท่ากับการเป็นผู้รับเทคโนโลยี จึงมีลักษณะ  
ของการเป็นผู้ให้เทคโนโลยีขั้นพื้นฐานมากกว่า เช่น การ  
อนุญาตให้จีนและปากีสถานทำการซื้อต้นแบบเครื่องยนต์  
ของเครื่องบินและเฮลิคอปเตอร์ของบริษัท Motor Sich  
มาผลิตตามลิขสิทธิ์ [20] หรืออินโดนีเซียที่อยู่ระหว่าง  
เจรจาลงนามถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตยานเกราะล้อ  
ยาง 8x8 สะเทินน้ำสะเทินบกแบบ BTR-4 [21]

### 3. บทวิเคราะห์

หากพิจารณาโครงการออฟเซตที่ยูเครนจะเป็นผู้  
ให้เทคโนโลยีกับไทย แม้ว่าไทยจะจัดหายุทธโปกรณ์มา  
จากยูเครนจำนวนหนึ่งตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ไทยยัง  
ไม่มีนโยบายออฟเซตที่เป็นรูปธรรม ทำให้ความร่วมมือ  
แบบออฟเซตจึงยังไม่เคยเกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นการ  
พูดคุยหารือกันขั้นต้น ทั้งนี้ การศึกษาความเป็นไปได้ที่  
จะทำให้เกิดโครงการออฟเซตระหว่างไทยกับยูเครนนั้น  
เป็นตามตารางการวิเคราะห์เพื่อหาความเหมาะสมและ  
ความเป็นไปได้ ดังต่อไปนี้

| รายการยุทธโศปกรณ์<br>ที่มีความเป็นไปได้/<br>เกณฑ์พิจารณา  | ความต้องการ<br>ใช้งานในอนาคต  | การเป็นผู้รับ<br>การถ่ายทอดเทคโนโลยี  | ความสามารถ<br>ในการแข่งขัน   | เทคโนโลยีเป็นสิ่ง<br>ที่มีอยู่แล้วในไทย   |
|---|---|---|--|---|
|  <p>ยานเกราะล้อยาง<br/>8x8 BTR3E-1</p>  <p>จรวดนำวิถีต่อสู้รถถัง<br/>Barrier R-2 ติดตั้งบน<br/>ยานเกราะล้อยาง BTR</p> | <p>มีความต้องการใช้งานที่ชัดเจน<br/>ในอนาคต เหมาะกับการ<br/>เปลี่ยนผ่านหลักนิยมการยก<br/>ระดับจากทหารราบเดินเท้าไป<br/>สู่ทหารราบยานเกราะ</p> <p>มีความต้องการใช้งานที่ชัดเจน<br/>เพราะหน่วยทหารราบของไทย<br/>ยังมีขีดความสามารถในการ<br/>ป้องกันการโจมตีจากรถถัง<br/>ข้าศึกที่จำกัด และจรวดนำวิถี<br/>ที่ติดตั้งบน BTR เป็นวัสดุที่ใช้<br/>แล้วหมดไป จึงมีความสำคัญ<br/>ยิ่งยวดที่ไทยต้องพึ่งพาตนเอง</p> | <p>ประเทศไทยมีความพร้อมในการ<br/>รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีเพราะมี<br/>ขีดความสามารถด้านอุตสาหกรรม<br/>ยานยนต์ในระดับโลก</p> <p>ไทยมีความพร้อมที่จะเป็นผู้รับ<br/>การถ่ายทอดเทคโนโลยี เนื่องจาก<br/>สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ<br/>ได้สะสมองค์ความรู้ด้านการทำ<br/>จรวดในระดับหนึ่งแล้ว</p> | <p>มีความสามารถในการ<br/>แข่งขันได้ เพราะคู่แข่งใน<br/>ภูมิภาคเอเชียมียานเกราะ<br/>ล้อยางของจีน (ยาน<br/>เกราะ VN-1 ที่ยังไม่เคย<br/>ผ่านการใช้งานในสนามรบ<br/>จริง) และเกาหลีใต้ (ที่ยัง<br/>ขายยุทธโศปกรณ์ในราคาที่สูงมาก)</p> <p>จรวดนำวิถี Barrier มีความ<br/>สามารถในการแข่งขันระดับ<br/>สูง เนื่องจากยูเครนเป็น<br/>ประเทศเดียวที่ครอบครอง<br/>องค์ความรู้อยู่ในปัจจุบัน<br/>และไทยเป็นลูกค้ารายหนึ่ง<br/>อยู่แล้ว มีความเป็นไปได้ที่<br/>ไทยสามารถเจรจาให้เกิด<br/>การวิจัยร่วมกันได้</p> | <p>เทคโนโลยีที่ต้องการ คือ<br/>ออกแบบและการจัดตั้ง<br/>โรงงานผลิต ส่วนด้านการ<br/>ซ่อมบำรุงและการบำรุง<br/>รักษาชิ้นส่วนย่อย สามารถ<br/>พึ่งพาตนเองได้</p> <p>เทคโนโลยีจรวดมีอยู่ใน<br/>ประเทศไทยอยู่บ้าง นับเป็น<br/>สิ่งที่ไทยน่าจะรับเทคโนโลยี<br/>มาศึกษาต่อยอด</p> |
|  <p>ยานเกราะล้อยาง<br/>8x8 BTR-4</p>   | <p>มีความต้องการใช้งานที่ชัดเจน<br/>ในอนาคต เหมาะกับการ<br/>เปลี่ยนผ่านหลักนิยมการยก<br/>ระดับไปสู่ทหารราบยานเกราะ<br/>อย่างไรก็ตามมีรายงานว่า การ<br/>ส่งออก BTR-4 ยังมีปัญหาเชิง<br/>เทคนิคในหลายประเทศ เช่น<br/>อิรักและอินโดนีเซีย</p>  | <p>ประเทศไทยมีความพร้อมในการ<br/>รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีเพราะมี<br/>ขีดความสามารถด้านอุตสาหกรรม<br/>ยานยนต์ระดับโลก</p>  | <p>มีความสามารถในการ<br/>แข่งขันสูง เพราะคู่แข่ง<br/>ภูมิภาคเอเชียมียานเกราะ<br/>ล้อยางของจีน (ยานเกราะ<br/>VN-1 ที่ยังไม่เคยผ่านการ<br/>ใช้งานในสนามรบจริง)<br/>และเกาหลีใต้ (ที่ยังขาย<br/>ยุทธโศปกรณ์ในราคาที่สูง<br/>มาก)</p>  | <p>เทคโนโลยีที่ไทยต้องการ<br/>คือ การออกแบบและการ<br/>จัดตั้งโรงงานผลิต ส่วนด้าน<br/>การซ่อมบำรุงและการบำรุง<br/>รักษาชิ้นส่วนย่อยสามารถ<br/>พึ่งพาตนเองได้</p>   |
|  <p>รถถังหลัก<br/>T-84 Oplot</p>  | <p>ไทยมีความต้องการใช้งานที่<br/>ชัดเจนเนื่องจากรถถังหลัก<br/>ในปัจจุบันมีอายุการใช้งาน<br/>ที่ยาวนานและต้องการการ<br/>ทดแทน แต่โอกาสการเกิด<br/>สงครามขนาดใหญ่ที่ต้องใช้รถ<br/>ถังหลักมีน้อยกว่ายานเกราะ<br/>ล้อยางและจรวดนำวิถี</p>   | <p>รถถังหลัก เป็น เทคโนโลยี<br/>อุตสาหกรรมหนักที่ต้องใช้ต้นทุน<br/>สูง และไทยเองยังไม่มีความพร้อม<br/>ในการจัดตั้งโรงงานผลิตรถถังหลัก<br/>ในประเทศ</p>  | <p>ตลาดของรถถังแข่งขันสูง<br/>มากและประเทศเจ้าของ<br/>เทคโนโลยี เช่น รัสเซีย<br/>เยอรมนี เกาหลีใต้ยังดำเนิน<br/>สายการผลิตอยู่ ผู้เข้ามา<br/>สู่ตลาดใหม่ น่าจะประสบ<br/>ความสำเร็จยาก</p>  | <p>ไทยไม่เคยมีเทคโนโลยีการ<br/>ผลิต และการซ่อมบำรุงรถ<br/>ถังหลัก มีเพียงบริษัทที่มีขีด<br/>ความสามารถผลิตสายพาน<br/>เท่านั้น</p>   |
|  <p>เครื่องยนต์ AI-25<br/>สำหรับเครื่องบิน L-39</p>   | <p>กองทัพอากาศไทยกำลังทยอย<br/>ปลดประจำการเครื่องบิน<br/>L-39 และทำการจัดหาเครื่อง<br/>บิน T-50 มาเป็น Lead-in<br/>fighters ทดแทน ซึ่งเครื่อง<br/>ยนต์เจ็ทของ T-50 คือ General<br/>Electric F404 อันเป็นของ<br/>ค่ายสหรัฐ เครื่องยนต์ AI-25 ที่<br/>เป็นค่ายโซเวียต จึงไม่มีความ<br/>จำเป็นที่ต้องจัดหาอีก</p>  | <p>ไทยไม่มีความพร้อมในการเป็นผู้รับ<br/>เทคโนโลยี เพราะในห้วง 20-30 ปี<br/>ที่ผ่านมาที่นำเข้าเครื่องยนต์<br/>รุ่นนี้ไทยไม่ได้รับการถ่ายทอด<br/>เทคโนโลยีใด ๆ หรือสะสม<br/>องค์ความรู้ใด ๆ ไว้</p>   | <p>ไทยไม่มีความสามารถใน<br/>การแข่งขันการออกแบบ<br/>หรือการผลิตเครื่องยนต์เจ็ท<br/>ในตลาดอาวุธระดับโลก</p>   | <p>เทคโนโลยีที่มีอยู่กำลังทยอย<br/>ปลดประจำการ จึงมีความ<br/>สำคัญในลำดับท้าย</p>   |

ผลการวิเคราะห์พบว่า ยานเกราะล้อยาง เป็นโครงการที่มีความเป็นไปได้สูงที่สุด เนื่องจากผู้ใช้ในประเทศมีความต้องการที่ชัดเจนในการยกระดับหน่วยทหารราบเดินเท้า มาเป็นหน่วยทหารราบยานเกราะที่จะเพิ่มอำนาจกำลังยิง ความสามารถในการเคลื่อนที่ การพิทักษ์กำลังรบ ด้านการถ่ายทอดเทคโนโลยีของโครงการทั้งสองนั้นมีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากประเทศไทยเป็นฐานการผลิตยานยนต์มีการซ่อมบำรุง การให้บริการทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง และ subcontractor ที่หลากหลาย แต่ยังคงขาดในส่วนของ Major part เช่น กระจกรถยนต์ ระบบอาวุธ และการออกแบบ ส่วนจรวดต่อสู้รถถัง สามารถต่อยอดองค์ความรู้ที่มีอยู่เดิมของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่เป็นจรวดพิสัยกลางมาสู่อิทธิพลได้ด้านขีดความสามารถในการแข่งขันนั้น ยานเกราะล้อยาง BTR ยังเป็นตัวเลือกที่มีราคาต่ำเมื่อเทียบกับจีน เกาหลีใต้ หรือรัสเซีย นอกจากนี้ เทคโนโลยียานรบยังเป็นเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้วในไทยทั้งภาครัฐและภาคเอกชน หากสามารถเจรจาให้ยูเครนมาตั้งโรงงานผลิตในไทยผ่านข้อเสนอการจัดตั้งหน่วยธุรกิจของ EEC ได้ จะทำให้ไทยสามารถเป็นฐานการผลิตยานเกราะล้อยางของภูมิภาคได้อย่างมั่นคง ส่วนโครงการอื่นๆ เช่น รถถังหลัก เครื่องยนต์อากาศยานนั้น เป็นโครงการที่มีข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีภายในประเทศไทย มีต้นทุนสูง ตลาดมีการแข่งขันที่สูง และเป็นเทคโนโลยีที่ยังอยู่ในช่วงการปลดประจำการ จึงจัดลำดับความสำคัญไว้ยู่ลำดับท้าย

## บทสรุป

จากบทวิเคราะห์ข้างต้น จะเห็นได้ว่า การสถาปนาความร่วมมือด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศระหว่างไทยและยูเครนยังอยู่ในระดับเริ่มต้น เน้นไปที่การจัดหาเป็นหลัก เช่น ยานเกราะล้อยางและจรวดต่อสู้รถถัง รถถังหลัก เครื่องยนต์อากาศยาน

ในด้านการใช้นโยบายออฟเซตยังมีความเป็นไปได้อยู่มาก หากไทยมีการจัดหาจากยูเครนเพิ่มเติม สมควรจัดให้มีข้อกำหนดการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากการจัดหา นั้นขึ้น เพื่อพัฒนาขีดความสามารถภายในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การสร้างความร่วมมือในโครงการผลิตร่วมยานเกราะล้อยาง BTR ทั้งสองรุ่น และจรวดนำวิถีต่อสู้รถถัง Barrier ถือว่าเป็นโครงการที่มีความเป็นไปได้สูงที่สุดอีกด้วย เนื่องจากมีความต้องการใช้งาน มีความพร้อมรับการถ่ายทอดเทคโนโลยี มีความสามารถในการแข่งขัน และเป็นเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้วในประเทศไทยด้วย ทั้งยังสอดคล้องกับความต้องการของยูเครน ที่ต้องการรักษาขีดความสามารถ และแสวงหาความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศกับประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก แม้จะมีภาวะความขัดแย้งระหว่างประเทศที่อาจเป็นปัจจัยฉุดรั้งการสร้างความร่วมมืออยู่บ้าง แต่ก็เป็นหลักประกันได้ว่า ยุทธูปกรณ์ของยูเครนสามารถใช้งานในราชการสนาม (Combat proven) ได้จริง

<sup>3</sup> อย่างไรก็ตาม ในห้วงเดือนมีนาคมที่ผ่านมา สำนักข่าว Irrawaddy ได้รายงานข่าวว่า Ukroboronprom ของยูเครนมีการลงนามความร่วมมือการประกอบรถถังยานเกราะล้อยาง BTR-4 และปืนใหญ่อัตโนมัติในเมียนมา แต่เมื่อนักข่าวของ Irrawaddy สอบถามเรื่องการลงนามดังกล่าวไปยัง Brigadier-General Zaw Min Tun โฆษกสำนักงานผู้บัญชาการทหารสูงสุดแล้ว ยังไม่ได้รับการยืนยันข่าวดังกล่าว อีกทั้ง Irrawaddy ยังไม่ได้อ้างอิงแหล่งข่าวที่แน่นอน แต่ใช้การอ้างอิงข้อมูลจาก Blog ที่มีผู้เขียนที่ยังไม่สามารถยืนยันความถูกต้องได้ (<https://www.irrawaddy.com/news/burma/ukrainian-firm-will-reportedly-help-tatmadaw-build-plant-military-equipment.html>) ส่วนอีกแหล่งข่าวหนึ่งจาก Amnesty International (EU arms embargoes fail to prevent German engines being incorporated into military vehicles available in Burma/Myanmar, China and Croatia, <https://www.amnesty.org/download/Documents/88000/act300162004en.pdf>) ให้รายละเอียดแนวทางเดียวกัน แต่ระบุเป็นยานเกราะล้อยางรุ่น BTR-3 จากยูเครน ที่จะทำการประกอบรวมในเมียนมาจำนวน 1,000 คัน จะเห็นได้ว่า แม้ว่าข้อมูลยังมีความไม่ชัดเจน และมีการปิดกั้นหรือลบข้อมูลในเว็บไซต์ออกไปบางส่วน แต่สามารถคาดการณ์ได้ว่า ในปัจจุบันอาจจะกำลังอยู่ในขั้นตอนการเจรจาอยู่ หรืออาจติดขัดปัญหาทางด้านงบประมาณ ทำให้ไทยอาจต้องพิจารณาความร่วมมือดังกล่าวอย่างเป็นทางการ

<sup>4</sup> ในปีงบประมาณ 2560 ผู้เขียนได้รับทุนวิจัยจากฝ่าย 1 (นโยบายชาติและความสัมพันธ์ข้ามชาติ) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ให้ศึกษาวินิจฉัยนโยบายดังกล่าว ภายใต้โครงการ “นโยบายออฟเซตเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ” โดยศึกษากรณีศึกษาจากต่างประเทศ 3 ประเทศ ได้แก่ มาเลเซีย อินโดนีเซีย และเกาหลีใต้ ผู้ที่สนใจศึกษารายละเอียด สามารถติดต่อได้ที่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

บทวิเคราะห์นี้มีข้อเสนอแนะเชิงนโยบายอยู่ 3 ข้อ ข้อแรกคือ ถึงแม้ว่าการจัดหาที่ผ่านมาจะไม่ได้ นำนโยบายออฟเซตมาใช้ นโยบายออฟเซตที่ได้นำเสนอ น่าจะเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีที่รัฐบาลไทยต้องให้ความสำคัญตระหนักถึงวิธีการและแนวโน้มการถ่ายทอดเทคโนโลยีทางทหารระหว่างประเทศต่าง ๆ ในโลกยุคปัจจุบันด้วย นโยบายออฟเซตที่รัดกุม รอบคอบ เข้าใจง่าย และปฏิบัติได้จริง จะเป็นเครื่องมือเชิงนโยบายที่สร้างประโยชน์ในการพัฒนาประเทศได้ทั้งทางเศรษฐกิจ ความมั่นคง และการพึ่งพาตนเองที่ยั่งยืนในอนาคต

ข้อที่สอง การวิเคราะห์เชิงวิชาการ การติดตามรวบรวมข้อมูลด้านอุตสาหกรรมประเทศ มีความจำเป็นมากในการตกลงใจ การคัดเลือกแบบยุทธโศปกรณ์ หรือ การสร้างพันธมิตรทางยุทธศาสตร์ของประเทศในระยะยาว แต่การศึกษาทางด้านดังกล่าว ยังไม่เกิดขึ้นในประเทศไทยทั้งในระบอบราชการและสถาบันการศึกษา การนำเสนอกรอบแนวคิด หรือเกณฑ์การพิจารณาที่มองว่าการจัดหายุทธโศปกรณ์ไม่ใช่เป็นเรื่องทางการทหารเท่านั้น แต่เป็นเรื่องการพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีด้วยนั้นสมควรได้รับการศึกษาอย่างจริงจัง ผู้เขียนเห็นว่าหากประเทศไทยจัดหายุทธโศปกรณ์ในระดับที่ป้องกันประเทศได้อย่างเข้มแข็งแล้ว การพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเพื่อการส่งออกน่าจะเป็นเป้าหมายต่อไปด้วย

ข้อที่สาม การวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ประเทศไทยเป็นเจ้าของเทคโนโลยีมีความจำเป็นมาก ตัวอย่างจากประเทศยูเครน แสดงให้เห็นว่า การวิจัยและพัฒนายุทธโศกรณ์นั้น ไม่จำเป็นต้องตั้งเป้าหมายให้ทำการพึ่งพาตนเองได้ในทุกรายการ ยุทธโศกรณ์ไม่มีประเทศใดในโลกบรรลุเป้าหมายดังกล่าว แม้กระทั่งประเทศมหาอำนาจ หากแต่ละประเทศต้องกลั่นกรอง วิเคราะห์ และคัดเลือกเฉพาะบางรายการที่มีขีดความสามารถด้านบุคคล และโครงสร้างพื้นฐานที่เพียงพอ อัตราราคาที่เหมาะสมได้มีการรับรองมาตรฐานที่เป็นทางการ ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศที่มั่นคง และบริการหลังการขายที่เป็นที่พึงพอใจของลูกค้า ปัจจัยเหล่านี้จะเป็นปัจจัยที่นำไปสู่ความสำเร็จ

ของการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศขนาดกลางอย่างประเทศไทยในอนาคต

#### 4. เอกสารอ้างอิง

[1] SIPRI Arms Transfers Database, <https://www.sipri.org/databases/armstransfers>, accessed May, 4, 2017.

[2] Ukroboronexport, <http://uoe.com.ua/main/en/>, accessed May, 4, 2017.

[3] Trade and economic relations between Ukraine and the Kingdom of Thailand, <https://thailand.mfa.gov.ua/en/ukraine-th/trade>, accessed May, 4, 2017.

[4] SIPRI Arms Transfers Database, <https://www.sipri.org/databases/armstransfers>, accessed May, 4, 2017.

[5] The Ukrainian defense industry: one foot in the USSR, another in NATO, May, 4, 2017. <https://www.grip.org/en/node/2513>, accessed 14 June 2017

[6] น.ต.อภิเชษฐ์ นุ่นสวัสดิ์, ผู้บังคับกองร้อยกองพันรถถัง กองพลนาวิกโยธิน, สัมภาษณ์, 16 เมษายน 2561.

[7] Zulfugar Agayev, 14 August 2013, Azeri-Russian Arms Trade \$4 Billion Amid Tension With Armenia, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2013-08-13/azeri-russian-arms-trade-4-billion-amid-tension-with-armenia>, accessed 13 June 2017.

[8] Hasan Jahid Tusher, Army to get 44 tanks, <https://www.thedailystar.net/news-detail-191737>, accessed 13 June 2017.

[9] Greece Signs Contracts for 183 Leopard 2s, 150 Leopard 1s, <https://www.defenseindustrydaily.com/greece-signs-contracts-for-183-leopard-2s-150-leopard-1s-0978/>, accessed

14 June 2017

[10] SIPRI Arms Transfers Database, <https://www.sipri.org/databases/armstransfers>, accessed May, 4, 2017., accessed 14 June 2017

[11] Thailand Says ‘No Thanks’ to Ukrainian Tanks, Chooses China Instead, <https://sputniknews.com/military/201701111049480707-thailand-cancels-ukraine-tank-deal/>, accessed 14 June 2017

[12] Turkey & South Korea’s Altay Tank Project, <https://www.defenseindustrydaily.com/turkey-signs-deal-with-s-korea-for-altay-tank-project-05012/>, accessed 14 June 2017

[13] Guy Anderson, Paul Burton, 2017, Offset policy overview, Offset policy analysis, IHS JANES Navigating the Emerging Markets.

[14] Ukrain, The Offset Guideline Quarterly Bulletin, Oct, 2018

[15] Ibid, IHS JANES Navigating the Emerging Markets.

[16] <http://charz.com.ua/en>, accessed 14 June 2017

[17] Aviakon and France’s Sagem to jointly modernize Ukrainian Mi-24 helicopters, <https://en.interfax.com.ua/news/economic/112002.html>, accessed 14 June 2017

[18] John C. K. Daly, China to Build Hongdu Light Attack Aircraft in Ukraine Next Year, <https://jamestown.org/program/china-to-build-hongdu-light-attack-aircraft-in-ukraine-next-year/>, accessed 14 June 2017

[19] Ukroboronservice sees Special Operations Forces as major customers of M4 assault rifles, <https://en.interfax.com.ua/news/economic/455541.html>, accessed 14 June 2017

[20] Jon Grevatt, Ukrainian/Chinese joint

venture invests in aero-engine facility in China, <http://www.janes.com/article/74242/ukrainian-chinese-joint-venture-invests-in-aero-engine-facility-in-china>, accessed 14 June 2017

[21] Asian Military Review, License sought for regional production of Ukraine’s BTR-4, December 28, 2017 <https://asianmilitaryreview.com/2017/12/license-sought-for-regional-production-of-ukraines-btr-4/>, accessed 14 June 2017

# Surrogate-assisted optimization for UAV wing preliminary design using evolutionary algorithms

Kittinan Wansasueb<sup>1</sup>, Natee Panagant<sup>1</sup>,  
Nantiwat Pholdee<sup>1</sup> and Sujin Bureerat<sup>1,\*</sup>

Received 9 November 2018, Revised 30 July 2019, Accepted 2 August 2019

## Abstract

The paper demonstrates the use of a Kriging surrogate model in combination with evolutionary algorithms for optimizing an unmanned aerial vehicle (UAV) wing. The design problem was set to minimize wing mass that is subject to aero-elastic and structural design constraints. Design variables were to determine thicknesses and positions of wing ribs, spars and skins. Numerical results show that the Kriging surrogate model can accurately predict aero-elastic characteristics but be somewhat inefficient for the prediction of stress and displacement. Nevertheless, this study paved the way for further improvement of the preliminary design process of an aircraft wing.

**Keywords :** UAV design, wing optimization, aero-elasticity, aircraft wing, evolutionary algorithms

---

<sup>1</sup>Sustainable and Infrastructure Research and Development Centre, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen City, 40002, Thailand.

\* Corresponding author: sujbur@kku.ac.th

## 1. Introduction

The current aircraft analysis and design are carried out to meet design standards such as those provided by Federal Aviation Regulations (FAR). Before the first flight test of an aircraft, the actual aeroelastic characteristics should be defined. To validate a feasible design, simulation techniques are employed in a design process to compute aeroelastic characteristics. Aeroelasticity is a study on an aircraft subject to fluid/structure interaction which can also be viewed as the mutual interaction of inertial, elastic (or restoration), and aerodynamic forces. Aeroelastic phenomena can be divided into static and dynamic aeroelasticity. Some of the important static aeroelastic phenomena are divergence speed, and lift effectiveness while dynamic aeroelasticity is usually referred to flutter speed and gust response etc. Flutter and divergence speeds are used to find an aircraft critical speed, which defines its flight envelope [1-8]. Analysis of a critical speed and lift effectiveness are required in aircraft preliminary design.

Simulation of aeroelastic phenomena usually requires considerable computing time. In this paper, a surrogate model (SuMo) technique is employed to predict objective and constrained functions of an aircraft wing optimization problem. Many design processes that employ optimization with the use of surrogate models for predicting design functions e.g. compressor shape design [9], heat exchanger design [10-12], ship structural design [13] or even aircraft design [14]. The Kriging model (KRG) is a surrogate model that is commonly used in engineering optimization problems. For example, Venturelli, G. and Benini,

E. presented a Kriging-assisted evolutionary algorithm for design of a S-shaped 2D cascade supersonic compressor [9]. Wansaseub, K. et al compared the KRG with other SuMos such as Radial Basis Function (RBF), Polynomial Response Surface (PRS) and Support Vector Regression (SVR). Those SuMo models were used with self-adaptive differential evolution with neighbourhood search (SaNSDE) for design of a U-shaped baffle square-duct heat exchanger (USBSDHX), which is found that KRG was the most accurate for predicting heat transfer characteristics [10]. Augspurger, M. et al presented the optimum design for latent storage and metal fin structures for heat spreading of thermal storage device (TSD) combined with phase change materials (PCM) [15]. It can be seen that SuMo has been widely used in various engineering design problems.

In order to solve an optimization problem, the evolutionary algorithms (EAs) were applied. The evolutionary algorithm can be separated into single-objective evolutionary algorithms (SOEAs) and multi-objective evolutionary algorithms (MOEAs). In aircraft wing optimization, the EAs were applied in many studies to find the high performance of the wing in conceptual design [16-18] and optimum mass of wing structure under failure constraints in preliminary design [19-23].

In this paper, performance of five well-known SOEAs on solving wing structural optimization of a standard vertical takeoff and landing (VTOL) fixed wing unmanned aerial vehicle (UAV) model is investigated. Optimum wing dimension with minimum total wing mass under specified constraints including critical speed, lift

effectiveness, displacement, buckling and stress. The aim of this work is to develop a simple design strategy for aeroelastic optimization of a UAV aircraft wing. Firstly, a Kriging model is constructed while sampling points are obtained from optimum Latin hypercube sampling OLHS [24]. Then, single-objective evolutionary algorithms are applied to solve the optimization problem. Details of the proposed approach and the wing optimization problem are provided in section 2 and 3 respectively while results obtained from the five SOEAs are compared and discussed in section 4. Conclusions of this study is included in section 5.

## 2. Methodology

Surrogate-assisted optimization was commonly used in a design process of complex systems where a function evaluation is time consuming. Kriging or a Gaussian process regression method is a meta-model that has been employed to predict objective and constraint functions in variety of engineering optimization problems such as compressor design [9], heat exchanger design [10-12], PCM storage device [15]. The optimization procedure with a surrogate-assisted approach can be conducted as illustrated in Figure 1.

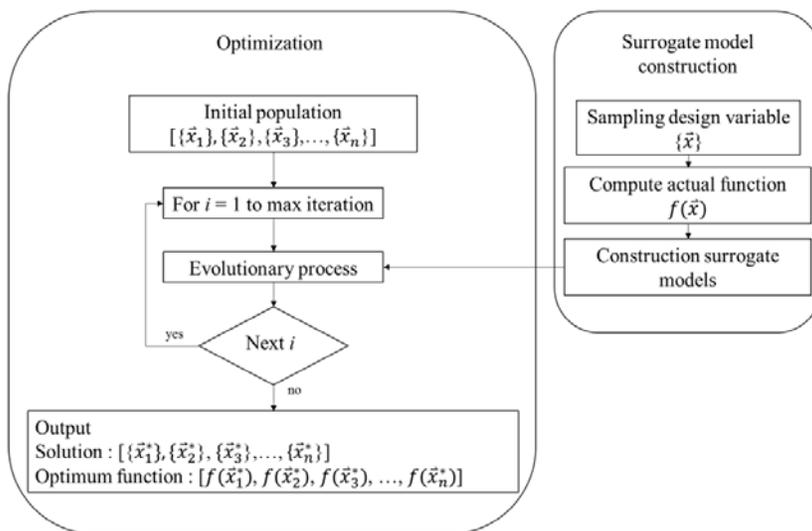


Figure 1 Conceptual framework for surrogate-assisted optimization

Figure 1 presents the relationship between an optimization procedure dealing with surrogate models. The surrogate model is created by using a sampling set of design variables while actual function values of such sampling points are evaluated. The sampling design variables are generated by using an optimum Latin hypercube sampling (OLHS) technique. Then, the surrogate

model is constructed and used for objective function approximation in the optimization procedure.

This article presents the wing design procedure of a standard VTOL Fixed Wing UAV with surrogate-assisted optimization. Kriging model is used as a surrogate model to predict aeroelastic characteristics.

### 3. Numerical Experiment

Design procedure of the standard VTOL Fixed Wing UAV model is proposed in this article. The wing is formed by Acrylonitrile Butadiene Styrene thermoplastic polymer (ABS). The material properties of ABS are given in Table 1. Half wingspan of the wing model is 1.4 m and wing flight is simulated at sea level atmospheric condition with true air speed 35 m/s.

**Table 1** Mechanical properties of ABS.

| $E$<br>(GPa.) | $\nu$ | $S_{yt}$<br>(MPa) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------|-------|-------------------|-----------------------------|
| 2.3           | 0.35  | 44.0              | 1040                        |

The wing model composed of two wing sections, inner and outer ones. It consists of two spars placed at the 25% and 75% position of the chord length, 3 uniform distributed ribs for the inner section, and 12 uniform distributed ribs for the outer section as shown in Figure 2. There are 60 design variables including positions and thicknesses of ribs, spars, and skins. Details of the design variables are described as follows:

x1-3= spanwise positions of the 3 ribs at the inner wing section

x4-13= spanwise positions of the 10 ribs at the outer wing section

x14-16= thicknesses of the 3 ribs at the inner wing section

x17= thicknesses of the ribs at the Yehudi break wing section

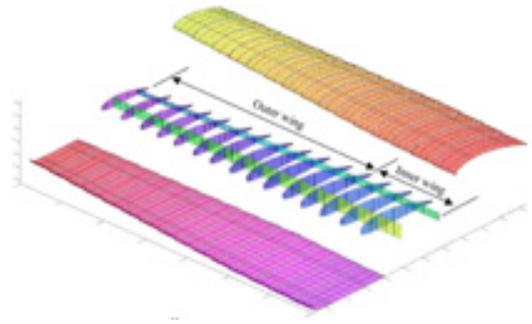
x18-27= thicknesses of the 10 ribs at the outer wing section

x28= thicknesses of the ribs at the tip chord wing section

x29-30= thicknesses of the two spars

x31-45= thicknesses distribution of the upper skin

x46-60= thicknesses distribution of the lower skin With 15 total ribs-positions, the wing can be separated into 15 sub-sections. There are 15 chords, the chord number 4 and 15 are set as a Yehudi break and wing tip position respectively. Positions of the Yehudi break and wing tip are assigned in such a way to remain unchanged during an optimization run. The lower and upper limits of the thicknesses of all parts are set as 1 mm and 5 mm respectively.



**Figure 2** Wing assembly and finite element model

In this study, the single-objective function is set as total wing mass and constraints are critical velocity, wing lift effectiveness, maximum transverse displacement, critical buckling factor, and maximum Von Mises stress. The proposed optimization problem is expressed as follows:

$$\min f_1(x) = \text{total mass} \quad (1)$$

$$\text{subject to} \quad \begin{aligned} V_{cr} &\geq 100 \\ \eta_{lift} &\geq 0.9 \\ D_{max} &\leq 0.1 \\ \lambda_{cr} &\geq 1 \\ S &\geq S_{yt} \end{aligned}$$

Were

$V_{cr}$  is a critical velocity [m/s]

$\eta_{lift}$  is wing lift effectiveness

$D_{max}$  is a maximum transverse displacement on the structure [m]

$\lambda_{cr}$  is critical buckling factor

$S$  is a maximum value of Von Mises stress on the structure [Pa.]

The Kriging model (KRG) is employed to construct a surrogate model of the objective and constrained functions. The optimum Latin hypercube sampling technique (OLHS) [24] was used to generate 100 evenly distributed training points for surrogate model construction. The hybrid grey wolf-adaptive differential evolution (GWADE) [25] and maximum likelihood approach are employed for training a Kriging model. Five well-known single objective evolutionary algorithms were selected including, Artificial Bee Colony (ABC) [26-29], Genetic Algorithms (GA) [30], and Particle Swarm Optimization (PSO) [31-32]. Those algorithms are the classical evolutionary algorithms. The optimization parameters (For example mutation rate, crossover rate etc.) are default setting by the code developers. Also, other two adaptive EAs including, Adaptive differential evolution with optional external archive (JADE) [33], and Success-History based Adaptive DE (SHADE) [34] are employed to solve the proposed wing optimization problem. The optimization parameter was calculated by using fitness values for Artificial Bee Colony (ABC). The cross over rate and mutation probability are set as 1.0 and 0.1 for Genetic Algorithms (GA). Particle Swarm Optimization (PSO) parameter include

Starting inertia weight, Ending inertia weight, cognitive learning factor and social learning factor were set as 0.5, 0.01, 0.5 and 0.5 respectively. The Adaptive differential evolution with optional external archive (JADE) was set mean crossover rate and mean scaling factor as 0.5 for both values. Finally, parameter setting for Success-History based Adaptive DE (SHADE) including crossover rate and scaling factor range for adaptable between 0 and 1 for both parameters. The number of maximum function evaluations and a population size of all optimization runs in this test are set as 50,000 and 100 respectively. 30 independent optimization runs of the optimizers are performed to ensure performance of the algorithms. Statistically comparative results of all optimizers are provided in result section.

#### 4. Results and discussion

Comparative performance of evolutionary algorithms for solving the wing optimization problem is presented in this section. The sampling points for the Kriging surrogate model are generated with OLHS. Table 2 presents the optimum objective function values based on the Kriging model found by all optimizers. Adaptive differential evolution with optional external archive (JADE) gives the best value in terms of mean, standard deviation and the best value of the objective function while Success-history based adaptive DE (SHADE) shows very competitive results. Table 3 shows prediction performance of the Kriging model found by JADE. Notice that, from the trend of prediction, the most accurate predictions are for  $\eta_{lift}$  and  $V_{cr}$  total mass with percent error are 0.4555, 1.6746 and 5.8179 percent re-

spectively, while KRG is not precise for prediction of  $D_{max}$  and stress ( $S$ ) with percent error 64.3564 and 17.4085 percent respectively. The proposed

approach is not recommended for predicting  $\lambda_{cr}$  dues to very high error, 510.4291%.

**Table 2** Comparative performance of MOEAs

| Algorithm   | Optimum Objective Function Mean (Std) {Rank} | Best Of Independent Run |
|---|--|-------------------------|
| Artificial Bee Colony (ABC)   | 2.8538 (0.028028) {4}                        | 2.7963                  |
| Genetic Algorithms (GA)   | 2.7270 (0.017411) {3}                        | 2.6918                  |
| Particle Swarm Optimization (PSO)                                     | 3.2587 (0.068988) {6}                        | 3.1104                  |
| Adaptive differential evolution with optional external archive (JADE) | 2.6561 (0.00071945) {1}                      | 2.6555                  |
| Success-History based Adaptive DE (SHADE)                             | 2.6570 (0.004051) {2}                        | 2.6556                  |

**Table 3** Comparative of best solution of JADE between Kriging and actual function.

| Predictive variable | Kriging    | Actual function | Error [%] |
|---------------------|------------|-----------------|-----------|
| $total\ mass\ [kg]$ | 2.6555     | 2.5095          | 5.8179    |
| $V_{cr}\ [m/s]$     | 100.0001   | 98.3531         | 1.6746    |
| $\eta_{lift}$       | 1.0272     | 1.0319          | 0.4555    |
| $D_{max}\ [m]$      | 0.0166     | 0.0101          | 64.3564   |
| $\lambda_{cr}$      | 75.9209    | 12.4373         | 510.4291  |
| $S\ [Pa . ]$        | 3,463.5033 | 4,193.5325      | 17.4085   |

**Table 4** Design solution of wing using JADE

| RIB NUMBER | POSITION OF RIB [% SPAN-DIRECTION] | THICKNESS [MM.] | THICKNESS SPAR NO.1 [MM.] | THICKNESS SPAR NO.2 [MM.] | THICKNESS UPPER SKIN [MM.] | THICKNESS LOWER SKIN [MM.] |
|------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1          | 8                                  | 1               | 1                         | 4.9                       | 2.7                        | 2.7                        |
| 2          | 18                                 | 1.1             | 1                         | 4.9                       | 2.1                        | 1.9                        |
| 3          | 19                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 1.5                        | 1.8                        |
| 4          | 28.571                             | 1               | 1                         | 4.9                       | 1.2                        | 2.9                        |
| 5          | 32                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 3                          | 1                          |
| 6          | 39                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 2.5                        | 1                          |
| 7          | 51                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 1.7                        | 2.5                        |
| 8          | 58                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 4.4                        | 4.3                        |
| 9          | 62                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 2.1                        | 3.4                        |
| 10         | 70                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 2.6                        | 2.2                        |
| 11         | 77                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 2.4                        | 1.9                        |
| 12         | 83                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 1                          | 1                          |
| 13         | 89                                 | 1               | 1                         | 4.9                       | 1                          | 1.7                        |
| 14         | 94.5                               | 1               | 1                         | 4.9                       | 1                          | 1                          |
| 15         | 100                                | 1               | 1                         | 4.9                       | 1                          | 1                          |

From the above solutions in Table 4, the geometry of wing is displayed in Figure 3 with actual total mass of 2.5095 kg. The actual aeroelastic characteristic  $V_{cr}$  and  $\eta_{lift}$  are 98.3531 m/s and 1.0319 respectively and actual value of failure analysis was presented in Table 3. It is

found that most actual variables of constraints were acceptable (Equation 1), except critical speed. The predicted critical speed is very close to actual value, but the actual critical speed is slightly lower than the allowable value.

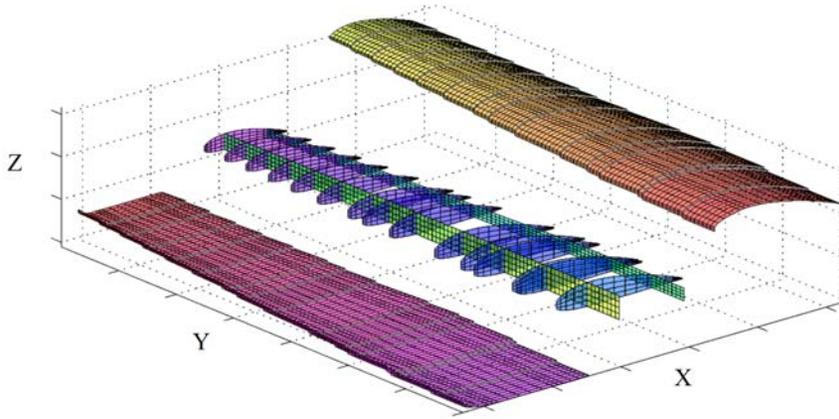


Figure 3 Optimum solution geometry of wing by using JADE

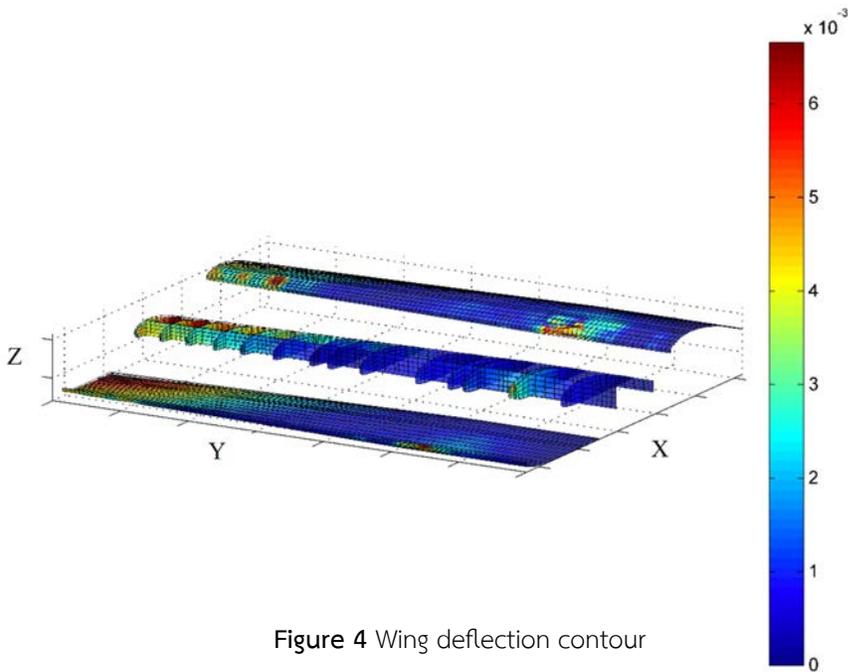


Figure 4 Wing deflection contour

The deflection of the optimum design was present in Figure 4. The maximum deflection in Z-direction is 0.0101 m. occurred at tip of wing position while the maximum stress is 4,193.5325 Pa (Figure 5). The critical buckling factor is 12.4373 while the buckling mode shape is shown in

Figure 6. Also, 10 mode shapes of free vibration are presented in Figure 7 with the natural frequency values of 10.2487, 48.1753, 52.1971, 70.9032, 107.5759, 171.5839, 183.1966, 196.1920, 201.0211 and 212.4819 Hz respectively.

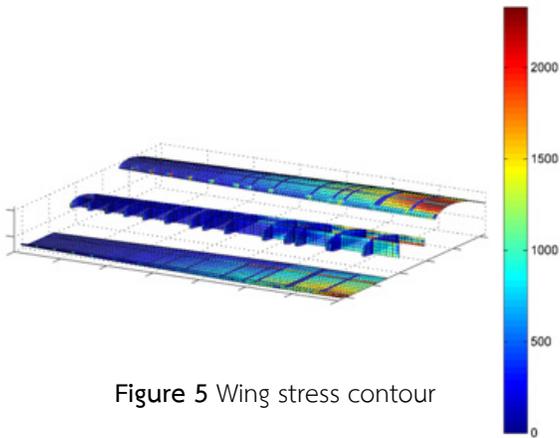


Figure 5 Wing stress contour

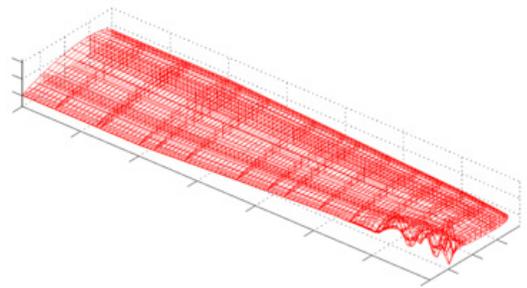


Figure 6 Critical buckling mode shape deflection

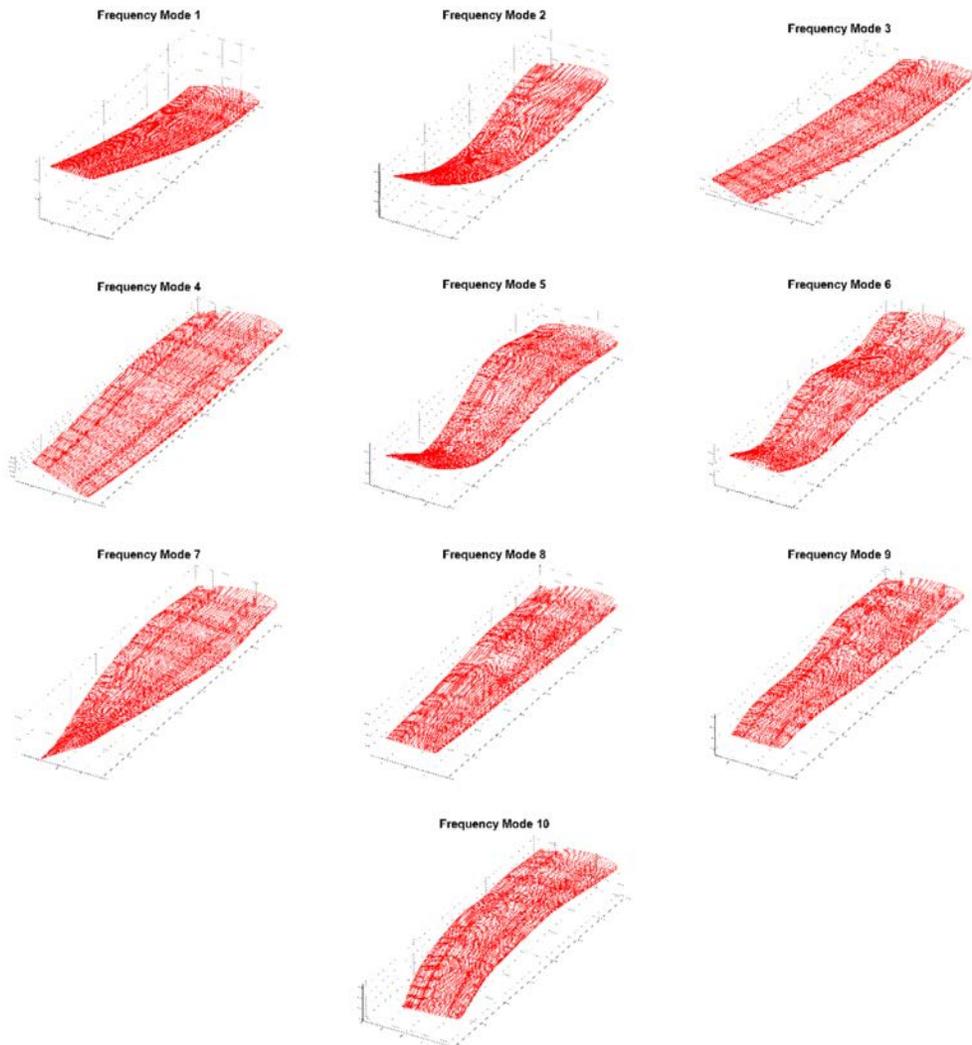


Figure 7 Modal analysis of natural frequency

## 5. Conclusions

Surrogate-assisted design optimization of the standard VTOL fixed wing UAV with structural and aeroelastic constraints has been demonstrated. The proposed approach is based on using a Kriging model for function estimation. Optimum Latin-hypercube was used for generating sampling points for constructing the Kriging model. The advantages of this approach are that it is simple to implement and can be used when function derivatives cannot be provided. Comparative study of several single-objective evolutionary algorithms are performed. The best optimizer in this study is adaptive differential evolution with optional external archive JADE while success-history based adaptive DE (SHADE) provided

close second-best results. The proposed approach shows accurate approximation for total mass, critical speed, and lift effectiveness, but not accurate for maximum deflection, critical buckling factor, and maximum Von Mises stress. The aim of this study is to develop a fundamental procedure for aeroelastic design optimization. With many recent developments of surrogate model methods and efficient adaptive evolutionary algorithms, there is room to improve speed, accuracy, and consistency of proposed approach.

## 6. Acknowledgments

The authors are grateful for the financial support provided by Defence Technology Institute (Public Organization) and The Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (RGJ-Ph.D. Program) by The Thailand Research Found (TRF). And Khon Kaen University for research facility.

## 7. Reference

1. S. Nantasenee, S. Slesongsom, S. Bureerat, "Comparing flutter analysis programs for low speed air-vehicles," in Proceeding of the 23<sup>rd</sup> conference of mechanical engineering network of Thailand, Chiang Mai, Thailand, 2009.
2. S. Slesongsom, S. Nuntasenee, J. Benjapiyaporn, S. Bureerat, "Adaptive wing by using a w-spar concept," In Proceeding of the 1st TSME-ICME, Ubon Ratchathani, Thailand, 2010.
3. S. Slesongsom and S. Bureerat, "Effect of actuating forces on aeroelastic characteristics of a morphing aircraft wing," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 52-54, 2011, pp. 308-317.
4. S. Slesongsom and S. Bureerat, "New conceptual design of aeroelastic wing structures by multi-objective optimization," *Engineering Optimization*, vol.45, no.1, 2013, pp.107-122.
5. S. Slesongsom, S. Bureerat, K. Tai, "Aircraft morphing wing design by using partial topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 48 no. 6, 2013, pp.1109-1128.
6. S. Slesongsom and S. Bureerat, "Aerodynamic reduced-order modeling without static correction requirement based on body vortices," *Journal of Engineering*, vol. 2013, Article ID 326496.
7. S. Slesongsom, and S. Bureerat, "Morphing wing structural optimization using opposite-based population-based incremental learning and multigrid ground elements," *Mathematical Problems in Engineering* vol. 2015, Article ID 730626.
8. S. Slesongsom and S. Winyangkul, "Flutter analysis of aircraft wing using an alternative

reduced-order modelling method,” in Proceeding of the International Conference on Intelligent Materials and Manufacturing Engineering, Phuket, Thailand, 2015.

9. G. Venturelli and E. Benini, “Kriging-assisted design optimization of S-shape supersonic compressor cascades,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 58, 2016, pp. 275–297.

10. K. Wansaseub, N. Pholdee, and S. Bureerat, “Optimal U-shaped baffle square-duct heat exchanger through surrogate-assisted self-adaptive differential evolution with neighbourhood search and weighted exploitation-exploration,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 118, 2017, pp. 455–463.

11. L. Wang, Y. Bu, D. Li, C. Tang, and D. Che, “Single and multi-objective optimizations of rotary regenerative air preheater for coal-fired power plant considering the ammonium bisulfate deposition,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 136, 2018, pp. 52–59.

12. Y. Yan, H. Yan, S. Yin, L. Zhang, and L. Li, “Single/multi-objective optimizations on hydraulic and thermal management in micro-channel heat sink with bionic Y-shaped fractal network by genetic algorithm coupled with numerical simulation,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 129, 2019, pp. 468–479.

13. P. Prebeg, V. Zanic, and B. Vazic, “Application of a surrogate modeling to the ship structural design,” *Ocean Engineering*, vol. 84, 2014, pp. 259–272.

14. C. Alba, A. Elham, B. J. German, and L. L. M. Veldhuis, “A surrogate-based multi-disciplinary design optimization framework modeling wing-propeller interaction,” *Aerospace Science*

and Technology, vol. 78, 2018, pp. 721–733.

15. M. Augspurger, K. K. Choi, and H. S. Udaykumar, “Optimizing fin design for a PCM-based thermal storage device using dynamic Kriging,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 121, 2018, pp. 290–308.

16. X. Chai, X. Yu, and Y. Wang, “Multipoint optimization on fuel efficiency in conceptual design of wide-body aircraft,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, no. 1, 2018, pp. 99–106.

17. S. Ammar, C. Legros, and J.-Y. Trépanier, “Conceptual design, performance and stability analysis of a 200 passengers Blended Wing Body aircraft,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 71, 2017, pp. 325–336.

18. P. D. Bravo-Mosquera, H. D. Cerón-Muñoz, G. Díaz-Vázquez, and F. Martini Catalano, “Conceptual design and CFD analysis of a new prototype of agricultural aircraft,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 80, 2018, pp. 156–176.

19. S. A. Andrews and R. E. Perez, “Comparison of box-wing and conventional aircraft mission performance using multidisciplinary analysis and optimization,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 79, 2018, pp. 336–351.

20. F. Afonso, J. Vale, F. Lau, and A. Suleman, “Performance based multidisciplinary design optimization of morphing aircraft,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 67, 2017, pp. 1–12.

21. P. M. Zadeh, M. Sayadi, and A. Kosari, “An efficient metamodel-based multi-objective multidisciplinary design optimization framework,” *Applied Soft Computing*, vol. 74, 2019, pp. 760–782.

22. J. E. K. Hoogervorst and A. Elham, “Wing

aerostructural optimization using the Individual Discipline Feasible Architecture,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 65, 2017, pp. 90–99.

23. Y. Tian, J. Quan, P. Liu, D. Li, and C. Kong, “Mechanism/structure/aerodynamic multidisciplinary optimization of flexible high-lift devices for transport aircraft,” *Aerospace Science and Technology*, Oct. 2018

24. N. Pholdee and S. Bureerat, “An efficient optimum latin hypercube sampling technique based on sequencing optimisation using simulated annealing,” *International Journal of Systems Science*, vol. 46, no.10, 2015, pp. 1780-1789.

25. N. Panagant, and S. Bureerat, “Truss topology, shape and sizing optimization by fully stressed design based on hybrid grey wolf optimization and adaptive differential evolution,” *Engineering Optimization*, vol. 50, no. 10, 2018, pp. 1645-1661.

26. D. Karaboga, AN IDEA BASED ON HONEY BEE SWARM FOR NUMERICAL OPTIMIZATION, TECHNICAL REPORT-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department 2005.

27. D. Karaboga, B. Basturk, A powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Journal of Global Optimization*, Volume:39, Issue:3, 2007, pp:459-171.

28. D. Karaboga, B. Basturk, On The Performance Of Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Applied Soft Computing*, Volume 8, Issue 1, 2008, Pages 687-697.

29. D. Karaboga, B. Akay, A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm, *Applied Mathematics and Computation*, 214, 2009, 108-132.

30. J.H. Holland. “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. 1975.

31. J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948 vol.4.

32. Shi, Y.; Eberhart, R.C. “A modified particle swarm optimizer”. *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation.*, 1998, pp. 69–73.

33. J. Zhang and A. C. Sanderson, “JADE: adaptive differential evolution with optional external archive,” *IEEE Trans. Evolut. Comput.*, vol. 13, no. 5, 2009, pp. 945-958.

34. Ryoji Tanabe and Alex Fukunaga: Improving the Search Performance of SHADE Using Linear Population Size Reduction, *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2014)*, Beijing, 2014.

# อิทธิพลของสารตัวเติมผสมซิลิกาและเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด

ณัฐวัฒน์ วิทยญา<sup>1,\*</sup> และ ปิยนันท์ บุญประเสริฐ<sup>1</sup>

วันที่รับ 11 เมษายน 2562 วันที่แก้ไข 25 มิถุนายน 2562 วันตอบรับ 28 มิถุนายน 2562

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมแบบผสมระหว่างซิลิกาและเขม่าดำของพอลิยูรีเทน (Polyurethane) สำหรับนำไปกำหนดสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด (Liner) ให้มีความเหมาะสมกับจรวดขนาดเล็ก โดยฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด จะเคลือบอยู่ภายในท่อมอเตอร์จรวด เมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำหน้าที่ป้องกันความร้อนจากเปลวไฟของการเผาไหม้ ดินขับ ไม่ให้ส่งผลทำให้ท่อมอเตอร์จรวดเสียหาย จากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมสารตัวเติมผสมซิลิกาและเขม่าดำใน ฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดจะส่งผลให้ค่าอัตราการทนต่อการเสียดกร่อนทางความร้อน (Ablation rate) ลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.22 mm/s ค่าแรงต้านทานการดึง (Tensile strength) เท่ากับ 6.12 MPa ดังนั้นฉนวนรอง ในท่อมอเตอร์จรวดที่พัฒนาขึ้น โดยการเติมสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกาและเขม่าดำ สามารถนำไปใช้เป็นฉนวนกัน ความร้อนท่อรองในมอเตอร์จรวดได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติตามข้อกำหนดเบื้องต้นของฉนวนกันความร้อน สำหรับจรวดเชื้อเพลิงแข็ง และฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดของจรวดดัดแปรสภาพอากาศ (Weather Modification Rocket) ที่สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้พัฒนาขึ้น

**คำสำคัญ :** อัตราการทนต่อการเสียดกร่อนทางความร้อน, สารตัวเติมผสม, มอเตอร์จรวด

<sup>1</sup> ส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

\* ผู้แต่ง, อีเมล: nattawat.w@dti.or.th

# The effect of silica/carbon black hybrid-filler on mechanical and thermal properties for solid rocket motor internal insulation

Nattawat Winya<sup>1\*</sup> and Piyanun Boonprasert<sup>1</sup>

## Abstract

The objective of this research is to study the influence of filler mixed with silica/ carbon black of polyurethane by determining if thermal and mechanical properties of liner pipe are suitable for small rockets. The inside of rocket motor was coated with an insulating liner to prevent the heat from ignition and propellant burning process the caused no damages to the rocket motor. The study found that when liner were filled with silica/carbon black mixed filler, it would result in an ablation rate decreased by an average to 1.22 mm/s and tensile strength equal to 6.12 Mpa. Therefore, the liner developed by mixed fillers between silica and carbon black can be used as an insulation on rocket motors when comparing with the prerequisite of the insulation for solid propellants rocket and the rocket motors of Weather Modification Rocket developed by Defence Technology Institute.

**Keywords :** Ablation rate, Hybrid-filler, Rocket motor

---

<sup>1</sup> Propulsion Systems Division – RPS, Defence Technology Institute

\* Corresponding author, E-mail: nattawat.w@dti.or.th

# 1. บทนำ

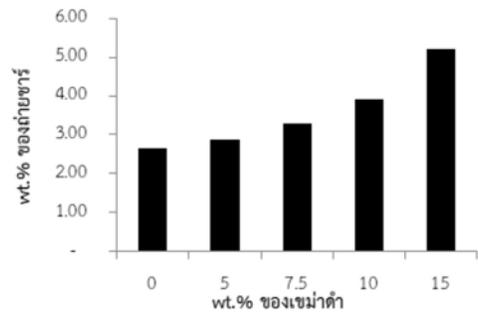
ในมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งจะมีฉนวนกันความร้อนที่มีความยืดหยุ่น เรียกว่า ฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด (Liner) ทำหน้าที่ช่วยยึดเกาะระหว่างดินขับเชื้อเพลิงแข็ง (Solid propellant) กับท่อมอเตอร์จรวดในขณะเกิดการเผาไหม้ของดินขับเชื้อเพลิงแข็ง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์จรวดประมาณ 2,000-3,000 องศาเซลเซียส [1] ดังนั้น ฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดจำเป็นต้องสามารถทนความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ดินขับในแต่ละชนิดของจรวด [2]

ฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดเป็นวัสดุประเภทพอลิเออร์ชนิดพอลิยูรีเทน (Polyurethane) นอกจากหน้าที่ในการยึดติดท่อมอเตอร์จรวดและดินขับแล้ว ฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดยังช่วยป้องกันการเคลื่อนตัวของดินขับระหว่างเกิดการเผาไหม้ และไม่ให้มีช่องว่างระหว่างเนื้อดินขับกับท่อมอเตอร์จรวด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ของดินขับผิดปกติจนส่งผลให้เกิด Over Pressure คุณสมบัติที่ดีของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดคือสามารถทนความร้อนสูงได้ดี และสามารถเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) กับดินขับได้อย่างเหนียวแน่น

ไฮดรอกซิลเทอร์มินเตดพอลิบิวตะไดอิน (Hydroxyl-terminated Polybutadiene : HTPB) ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย อาทิ กาว สารเคลือบ ตัวประสานในจรวดเชื้อเพลิงแข็ง การเชื่อมโยงของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl functional group : OH) ของ HTPB ปรืพอลิเมอร์ กับ หมู่อไอโซไซยาเนต (Isocyanates : NCO) [3,4] ทำให้เกิดพอลิเมอร์พอลิยูรีเทน ซึ่งนำมาใช้ทำฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด และมีการเพิ่มคุณสมบัติด้วยการเติมสารตัวเติม (Filler) โดยสารตัวเติมสามารถเติมได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) [5] สารตัวเติมมีหลายหน้าที่ เช่น สารหน่วงไฟ (Flame Retardant Fillers) สารทนไฟ (Refractory Filler) สารตัวเติมให้เกิดถ่านชาร์ (Melt of Char Forming Fillers) เป็นต้น [6]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาอิทธิพลของเขม่าดำ (Carbon Black: CB) ต่อความเสถียรทางความร้อนของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด พบว่า เมื่อเติมเขม่าดำมากขึ้น (เติมเขม่าดำปริมาณ 0, 5, 7.5, 10 และ 15 wt%) จะส่งผลทำให้ปริมาณชาร์ (Char yield) เพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 1 ในวัสดุทนต่อความเสียดกร่อนทางความร้อน (Ablative

material) ชั้นชาร์ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุจะช่วยติดไฟได้ช้า และไม่กระจายไฟให้กว้างออกไป เกิดความต้านทานต่อการลุกไหม้ หรือทำให้การลุกไหม้ช้าลง ขึ้นงานเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ และเกิดการเกรียมแทน ซึ่งกลไกการเกิดถ่านชาร์ที่ผิวจะทำหน้าที่ป้องกันความร้อนไม่ให้เข้าไปในเนื้อของวัสดุด้านใน ทำให้เกิดก๊าซซึ่งไหม้ไฟช้าลงอีกด้วย ดังนั้น ความร้อนที่แผ่ไปถึงด้านที่เป็นผิวโลหะของท่อมอเตอร์จรวดก็จะลดต่ำลง ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะต้องไม่สูงจนทำให้โลหะเกิดการหลอมละลาย ซึ่งจะส่งผลให้จรวดเกิดความเสียหายและระเบิดได้ [7]



รูปที่ 1 ปริมาณชาร์ของฉนวนกันความร้อนต่อรองในมอเตอร์จรวด [7]

เขม่าดำสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดได้ เนื่องจากสารตัวเติมมีหลายชนิดและมีข้อดีต่างกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดพัฒนาคุณสมบัติของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดให้ดีขึ้นด้วยการใช้สารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกาและเขม่าดำ

## 2. สารเคมีและวิธีการทดลอง

### 2.1 สารเคมี

ไฮดรอกซีเทอร์มินเตดพอลิบิวตะไดอิน (HTPB) นำเข้าโดย บริษัท ยูเนนด์วี โฮลดิ้ง (ไทยแลนด์) จำกัด โทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate, TDI 78%) จาก บริษัท Sigma Aldrich co., Ltd. เขม่าดำ เกรด N330 จาก บริษัท Shanxi Huachang Chemical co.,Ltd.

### 2.2 เครื่องมือวิเคราะห์

การทดสอบความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน JIS K6268 ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

การวิเคราะห์สสารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy) รุ่น Perkin Elmer Spectrum One FT-IR spectrometer

### 2.3 วิธีการทดลอง

#### การเตรียมพอลิเอทิลีน

นำไฮดรอกซีเทอร์มินเนตเตดพอลิบิวตะไดอิน (HTPB) ปริมาณ 60 กรัม ใส่ในถังปฏิกรณ์ กวนด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารเชื่อมขวาง 5 กรัม สารพลาสติกไซเซอร์ 1.2 กรัม กวนด้วยความเร็ว 250 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

#### การเตรียมพอลิยูรีเทน

นำพอลิเอทิลีนมาเติมซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการอบในอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง กวนด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที และเติมสารตัวเติม โดยแสดงปริมาณดังตารางที่ 1 สารตัวเติมได้ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และกวนที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate) 8.3 กรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเติม ไอออน (III) อะเซทิลอะซิโตนในสารละลายสไตรีน 50 กรัม เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด

| ส่วนผสม              | Si   | Si-CB | CB   |
|----------------------|------|-------|------|
|                      | (g)  | (g)   | (g)  |
| พอลิเอทิลีน          | 75   | 75    | 75   |
| ไอออน (III)          |      |       |      |
| อะเซทิลอะซิโตน       | 0.07 | 0.07  | 0.07 |
| โทลูอินไดไอโซไซยาเนต | 8.3  | 8.3   | 8.3  |
| เขม่าดำ              | -    | 5     | 5    |
| ซิลิกา               | 3.5  | 3.5   | -    |
| สไตรีน               | 15   | 15    | 15   |



รูปที่ 2 การทดสอบการทนต่อการเสียดคร่อนทางความร้อน

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 3.1 คุณลักษณะพอลิเอทิลีน

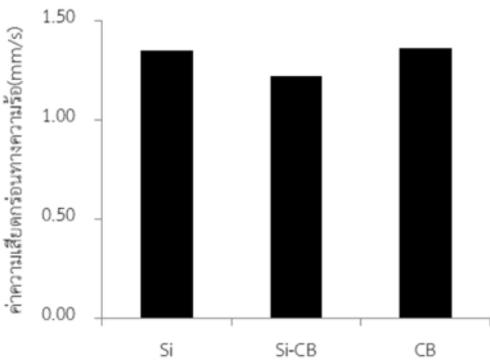
การวิเคราะห์ FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีน ดังรูปที่ 3 จะพบสเปกตรัมของพอลิบิวตะไดอิน พบว่ามีพันธะคู่แบบ cis double bonds ที่ตำแหน่ง  $725 \text{ cm}^{-1}$  และแบบ trans double bonds ที่ตำแหน่ง  $966 \text{ cm}^{-1}$  และพันธะคูไวโนล ( $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ ) ที่ตำแหน่ง  $911 \text{ cm}^{-1}$  โดยส่วนใหญ่ของ cis และ trans จะหายไป เป็นผลมาจากเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) แต่สำหรับพันธะคูไวโนลจะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเพียงเล็กน้อย จะเห็นได้จาก FT-IR สเปกตรัมตำแหน่งที่  $3569\text{-}3390 \text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียง ที่ทำให้ตำแหน่งของวงแหวนอีพอกไซด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทคาร์บอนิล หรือหมู่ไฮดรอกซิล



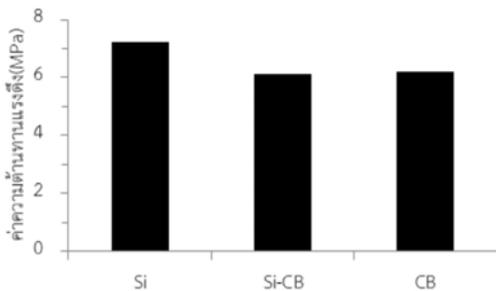
รูปที่ 3 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีน

### 3.2 คุณสมบัติการทนต่อการเสียดกร่อนทางความร้อน

จากรูปที่ 4 แสดงอัตราการเสียดกร่อนทางความร้อน (Ablation rate) พบว่า ผนวกรองในท่อมอเตอร์จรวดที่มีการเติมซิลิกา (Si) ให้ค่าอัตราการความเสียดกร่อนทางความร้อน เท่ากับ 1.35 mm/s ผนวกรองในท่อมอเตอร์จรวดที่มีการเติมเขม่าดำ (CB) ให้ค่าอัตราการความเสียดกร่อนทางความร้อน เท่ากับ 1.36 mm/s และผนวกรองในท่อมอเตอร์จรวดที่มีการเติมสารตัวเติมแบบผสมระหว่างซิลิกาและเขม่าดำ (Si-CB) จะให้อัตราการความเสียดกร่อนทางความร้อน ต่ำขึ้น คือมีค่าเท่ากับ 1.22 mm/s เนื่องจากเขม่าดำจะช่วยทำให้ปริมาณถ่านชาร์เพิ่มขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ถ่านชาร์เหล่านี้เกิดจากการสลายตัวของความร้อนของวัสดุเมื่อวัสดุเผาไหม้ ถ่านชาร์จะช่วยทำหน้าที่เป็นผนวกรองความร้อนที่ผิววัสดุไม่ให้ได้รับความเสียหายจากการเสียดกร่อนทางความร้อน ดังนั้น ผนวกรองที่เติมสารตัวเติมแบบผสมระหว่างซิลิกาและเขม่าดำสามารถนำมาใช้เป็นผนวกรองความร้อนในมอเตอร์จรวดได้



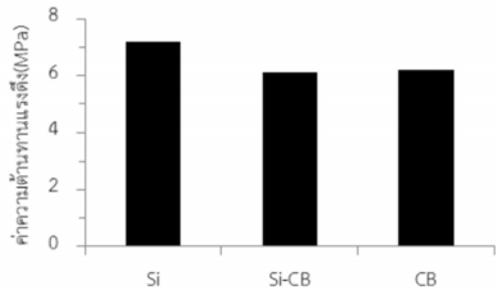
รูปที่ 4 ค่าความทนต่อการเสียดกร่อนทางความร้อน



รูปที่ 5 ค่าความต้านทานแรงดึง

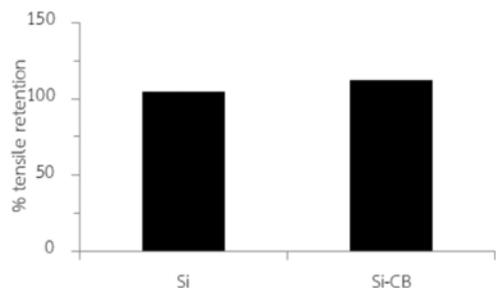
### 3.3 สมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 5 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของผนวกรองกันความร้อน พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของผนวกรองกันความร้อนที่มีการเติมซิลิกามีค่าเท่ากับ 7.21 MPa และ ผนวกรองกันความร้อนที่มีการเติมเขม่าดำมีค่าเท่ากับ 6.2 MPa และ ผนวกรองกันความร้อนที่มีการเติมสารตัวเติมแบบผสมระหว่างซิลิกาและเขม่าดำจะให้ค่าเท่ากับ 6.12 MPa เมื่อทดสอบการยึดตัว ณ จุดขาดพบว่า ผนวกรองกันความร้อนที่มีการเติมสารตัวเติมแบบผสมระหว่างซิลิกาและเขม่าดำ จะมีค่าน้อยกว่า ผนวกรองกันความร้อนที่เติมซิลิกา และผนวกรองกันความร้อนที่มีการเติมเขม่าดำอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด

การทดสอบความต้านทานแรงดึง เพื่อแสดงสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยการบ่มแรงด้วยความร้อน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าค่า Tensile strength retention ของผนวกรองกันความร้อนที่บ่มในมอเตอร์จรวดสองชนิดจะมีค่ามากกว่า 100 ซึ่งเป็นผลมาจากการบ่ม (Post curing) โดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 45 วัน หลังจากนั้นนำไปทดสอบแรงต้านทานการดึง เพื่อแสดงสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยการบ่มแรงด้วยความร้อนแสดงดังรูปที่ 7 พบว่า ค่า % Tensile retention ของผนวกรองกันความร้อนในมอเตอร์จรวดสองชนิดจะมีค่ามากกว่า 100 ซึ่งเป็นผลมาจากการบ่ม (Post curing)



รูปที่ 7 สมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยการบ่มแรงด้วยความร้อน

## ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด

| ลำดับ | รายการ                | หน่วย             | ข้อกำหนดเบื้องต้น <sup>[6]</sup> | Si     | Si-CB  | CB <sup>[5]</sup> |
|-------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|--------|--------|-------------------|
| 1     | ค่าความต้านทานแรงดึง  | MPa               | ≥0.5                             | 7.21   | 6.12   | 6.2               |
| 2     | ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด | %                 | -                                | 228.91 | 190.65 | 223               |
| 3     | ความหนาแน่น           | g/cm <sup>3</sup> | 1.05-1.5                         | 1.16   | 1.2    | 1.18              |

### 3.4 การกำหนดคุณสมบัติของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด

จากตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดกับข้อกำหนดเบื้องต้นของฉนวนกันความร้อนสำหรับจรวดเชื้อเพลิงแข็ง และฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดของจรวดดัดแปรสภาพอากาศ (Weather Modification Rocket) ที่สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศพัฒนาขึ้นร่วมกับกรมฝนหลวงและการบินเกษตร ซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อนที่มีการเติมซิลิกา (Si) พบว่า ฉนวนกันความร้อนที่มีการเติมสารตัวเติมแบบผสมระหว่างซิลิกาและเฮมาดำ (Si-CB) มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด

### 4. สรุปการทดลอง

ฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดที่พัฒนาขึ้นโดยการเติมสารตัวเติมแบบผสมระหว่างซิลิกาและเฮมาดำสามารถนำไปใช้เป็นฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของข้อกำหนดเบื้องต้นของฉนวนกันความร้อนสำหรับจรวดเชื้อเพลิงแข็งและฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวดของจรวดดัดแปรสภาพอากาศ (Weather Modification Rocket) ที่สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศพัฒนาขึ้น

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ส่วนปฏิบัติการระบบขับเคลื่อนและโรงปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา จ.นครสวรรค์ ที่สนับสนุนเจ้าหน้าที่และเครื่องมือฯ รวมทั้งส่วนคุณภาพและความปลอดภัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบและใช้ห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Rodic, V. (2007). Case Bonded System for Composite Solid Propellants. Scientific Technical Review, Vol .LVII, No.3-4, 2007.

[2] MORGAN, K. (2003) Studies on Interface Properties of Propellant Liner for case –Bonded Composite Propellants, *Journal of Energetic Materials* vol. 21 No. 2, April-Juni 2003.

[3] Kishore, K. (1978). Survey of Solid-Propellant Aging Studies. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 15 (5): 261

[4] Runumi G., Utpal K. N., Sarwar A. and Dayal S. M. (2013). Study of Effect of NCO/OH Molar Ratio and Molecular Weight of Polyol on the Physico-Mechanical Properties of Polyurethane Plaster Cast. *World Applied Sciences Journal* 21 (2): 276-283, 2013.

[5] Nagle DJ, Celina M, Llewellyn R and Fredericks PM. Infrared microspectroscopic study of the thermo-oxidative degradation of hydroxyl terminated polybutadiene/isophorone diisocyanate polyurethane rubber. *Polymer Degradation and Stability*. 2007; 92 (8): 1446-1454.

[6] Akbas A, Aksoy S and Hasirci N. Effects of thermal ageing on the properties and lifetime prediction of hydroxyl-terminated polybutadiene. *Polymer*. 1994; 35 (12): 2568-2572.

[7] ปิยนันท์ บุญประเสริฐ และ ญัฐวัฒน์ วิญญา (2560). อิทธิพลของเฮมาดำต่อความเสถียรทางความร้อนของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31. 4-7 กรกฎาคม 2560. จ.นครนายก

[8] Ahmed A.F., Hoa S.V., (2012). Thermal insulation by heat resistant polymers for solid rocket motor insulation. *Journal of Composite Materials*. Volume 46, Issue 13, June 2012, Pages 1549-1559.

# การระบุพื้นที่น้ำท่วมจากข้อมูลดาวเทียมและแบบจำลองทาง กายภาพ: กรณีศึกษา อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2561

ธนัทเดช โรจนกุล<sup>1</sup> อุบล แสงโยธา<sup>2</sup> และ อีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ<sup>3\*</sup>

วันที่รับ 4 มิถุนายน 2562 วันที่แก้ไข 30 กรกฎาคม 2562 วันที่ตอบรับ 18 กรกฎาคม 2562

## บทคัดย่อ

ภัยธรรมชาติ หรือปรากฏการณ์รุนแรงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินั้น หนึ่งในภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยคือ “อุทกภัย” ซึ่งเกิดขึ้นบ่อยครั้งในหลายๆ พื้นที่ของประเทศไทย โดยในช่วงเดือนกรกฎาคม 2561 อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี ได้รับอิทธิพลจากพายุโซนร้อนซินติญาทำให้เกิดฝนตกอย่างหนักและเกิดอุทกภัยขึ้น โดยอุทกภัยดังกล่าวส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของผู้คนในพื้นที่ตลอดจนสร้างความเสียหายต่อพื้นที่เกษตรกรรมอย่างรุนแรง การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุพื้นที่น้ำท่วมจากข้อมูลของดาวเทียมแลนดแซท 8 ร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพจำนวน 4 แบบจำลอง คือ (1) ดัชนีผลต่างความชื้น (2) การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น (3) ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเชิร์ท และ (4) ดัชนีอัตราส่วนน้ำ โดยผลจากการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียมแลนดแซท 8 ร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพดัชนีผลต่างความชื้นเป็นวิธีการที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ซึ่งปรากฏค่าความถูกต้องของการจำแนกเท่ากับ 93.33% และปรากฏค่าสถิติแคปปาเท่ากับ 0.868 นอกจากนี้ ยังระบุขอบเขตของพื้นที่ที่เป็นน้ำแยกออกจากพื้นที่ที่เป็นดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ :** ดัชนีผลต่างความชื้น, การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น, ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเชิร์ท, ดัชนีอัตราส่วนน้ำ

---

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

\* ผู้แต่ง, อีเมล: teerawong@msu.ac.th

# Identifying Flood Areas from Satellite Data and Physical Model: A Case Study of Tha Yang District, Phetchaburi Province, 2018

Tanutdech Rotjanakusol<sup>1</sup> Ubon Sangyotha and Teerawong Laoauwan<sup>2\*</sup>

## Abstract

One of natural disasters or phenomenon that often occurs in different areas of Thailand is “flooding”. In August 2018, Tha Yang district of Phetchaburi province was effected by SON-TINH tropical storm. The storm caused heavy rainfalls and flood. The flood had tremendously effected the way of life of the people in the areas as well as resulted in damages to agricultural areas. The objective of this study is to propose the method of identifying flood areas from Landsat 8 data along with four different forms of the physical model: 1) Normalized Difference Water Index (NDWI) 2) Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) 3) Desert Flood Index (DFI), and 4) Water Ratio Index (WRI). The results of the study reveal that the data analysis from satellite Landsat 8 along with NDWI physical model is the most reliable method. The overall accuracy is equivalent to 93.33 % and kappa statistics is equivalent to 0.868. In addition, it can also efficiently specify the water area from land area.

**Keywords :** Normalized Difference Water Index, Modified Normalized Difference Water Index, Desert Flood Index, Water Ratio Index

---

<sup>1,2,3</sup> Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

\* Corresponding author, E-mail: teerawong@msu.ac.th

## 1. บทนำ

ภัยธรรมชาติ หรือปรากฏการณ์รุนแรงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีผลกระทบต่อทำให้มนุษย์ไม่สามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติสุข ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ ยังส่งผลทำให้สังคมเสื่อมโทรมลง [1] หนึ่งในภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยคืออุทกภัย ซึ่งเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุดคิดเป็น 41.4% ตามมาด้วยแผ่นดินไหวและพายุ โดยทวีปเอเชียได้รับผลกระทบสูงสุด [2] สำหรับประเทศไทยพบว่าตัวเลขความเสียหายจากอุทกภัยได้เพิ่มขึ้นจาก 6,000 ล้านบาท ในปี 2533 เป็น 40,000 ล้านบาท ในปี 2543 และ 1.44 ล้านล้านบาทในปี 2554 [3] ซึ่งอุทกภัยสำหรับประเทศไทยในปี 2554 นี้ ถูกจัดให้เป็นภัยพิบัติที่สร้างความเสียหายมากที่สุดเป็นอันดับสี่ของโลกรองจากแผ่นดินไหวและสึนามิที่ญี่ปุ่นในปี 2554 แผ่นดินไหวที่ญี่ปุ่นในปี 2538 และพายุเฮอริเคนแคทเธรีนาที่เกิดในสหรัฐอเมริกาในปี 2548 ตามลำดับ [4]

ประเทศไทยมีพื้นที่ 513,115 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ใจกลางคาบสมุทรอินโดจีนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยที่ผ่านมามีประเทศไทยประสบกับปัญหาอุทกภัยเป็นประจำทุกปีและเกิดในทั่วทุกภาคของประเทศ อันเนื่องมาจากปัจจัยทางด้านภูมิศาสตร์ที่ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งทำให้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ตลอดจนมีพายุพัดผ่านตลอดปี [5] โดยสิ่งจำเป็นเร่งด่วนที่ขาดไม่ได้สำหรับการประเมินระดับความเสียหายและระดับความรุนแรงของอุทกภัยก็คือข้อมูลเชิงพื้นที่ หรือแผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่ที่ประสบภัยพิบัติ [6,7]

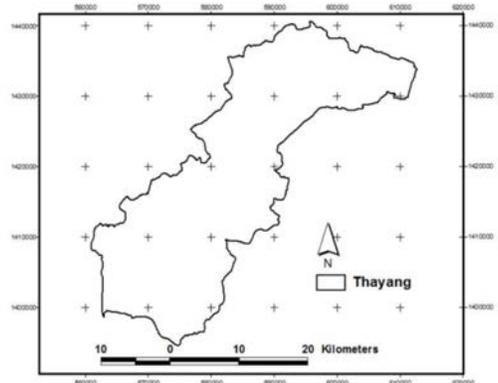
ปัจจุบันการประยุกต์ใช้การรับรู้จากระยะไกลด้วยข้อมูลจากดาวเทียมสามารถบันทึกปรากฏการณ์ต่างๆ บนพื้นผิวโลก โดยอาศัยการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ติดตั้งบนดาวเทียม [8,9] ร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพ จึงได้นำมาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินความเสียหายจากอุทกภัย [10-12] ซึ่งข้อมูลจากดาวเทียม สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ขนาดใหญ่และเข้าถึงลำบากได้

เป็นอย่างดี อีกทั้งเสียค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการสำรวจภาคสนาม [13-15]

ในช่วงเดือนปลายเดือนกรกฎาคม 2561 อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี ได้เกิดฝนตกอย่างต่อเนื่อง โดยมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของพายุโซนร้อนซินติญอนในที่สุดได้เกิดอุทกภัยครั้งใหญ่ขึ้น อุทกภัยดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของคนในพื้นที่ตลอดจนสร้างความเสียหายต่อพื้นที่เกษตรกรรมอย่างรุนแรง ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้น การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้มุ่งเน้นเพื่อนำเสนอวิธีการระบุพื้นที่น้ำท่วมจากข้อมูลจากดาวเทียมแลนดแซท 8 ร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพจำนวน 4 แบบจำลอง คือ (1) ดัชนีผลต่างความชื้น (2) การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น (3) ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเชิร์ต และ (4) ดัชนีอัตราส่วนน้ำ โดยใช้ช่วงเหตุการณ์อุทกภัยในปี พ.ศ. 2560 อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี เป็นกรณีศึกษา

## 2. พื้นที่ศึกษาและข้อมูล

2.1 พื้นที่ศึกษา ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกพื้นที่อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี (รูปที่ 1) เป็นพื้นที่ศึกษา โดยอำเภอท่ายางมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 736.7 ตารางกิโลเมตร



รูปที่ 1 อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี

2.2 ข้อมูลจากดาวเทียม แลนดแซท 8 เป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติของสหรัฐอเมริกา ได้รับการพัฒนาจากความร่วมมือ

ระหว่างองค์การ NASA และ USGS ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2556 สามารถบันทึกข้อมูลซ้ำ ณ ตำแหน่งเดิมในทุก 16 วัน อีกทั้งสามารถบันทึกข้อมูลในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ 11 ช่วงคลื่น (ตารางที่ 1) [16] สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลจากดาวเทียมแลนดแซท 8 (path 129 row 51) ข้อมูลช่วงคลื่นที่นำมาใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือช่วงคลื่นที่ 3 4 5 และ 6 ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาอำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี ที่บันทึกข้อมูลในช่วง (1) ก่อนเกิดน้ำท่วม (มกราคม 2561) (2) ช่วงเกิดน้ำท่วม (กรกฎาคม 2561) และ(3) ช่วงหลังเกิดน้ำท่วม (ธันวาคม 2561)

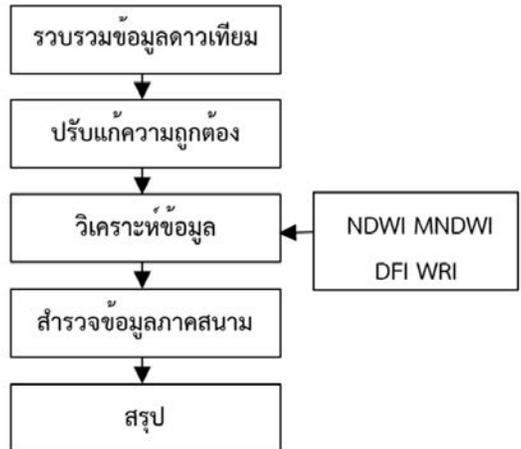
ตารางที่ 1 ช่วงคลื่นในการบันทึกข้อมูล

| Bands | Wavelength (Micrometers)     |
|-------|------------------------------|
| 1     | 0.43 -0.45 (Coastal aerosol) |
| 2     | 0.45 - 0.51 (Blue)           |
| 3     | 0.53 - 0.59 (Green)          |
| 4     | 0.64-0.67 (Red)              |
| 5     | 0.85 - 0.88 (Near IR)        |
| 6     | 1.57 - 1.65 (SWIR-1)         |
| 7     | 2.11 - 2.35 (SWIR-2)         |
| 8     | 0.50 - 0.68 (Panchromatic)   |
| 9     | 1.36 - 1.38 (Cirrus)         |
| 10    | 10.60 - 11.19 (Thermal IR 1) |
| 11    | 11.50 - 12.51 (Thermal IR 2) |

### 3. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 ทั้งนี้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงน้ำท่วม การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้ทำการ

วิเคราะห์ข้อมูลใน 3 ช่วงเวลา คือ 1) ก่อนเกิดน้ำท่วม 2) ช่วงเกิดน้ำท่วม และ 3) ช่วงหลังเกิดน้ำท่วม และได้เลือกใช้แบบจำลองทางกายภาพ จำนวน 4 รูปแบบ มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลใน 3 ช่วงเวลาดังกล่าว สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการในการดำเนินงาน

#### 3.1 ดัชนีผลต่างความชื้น

ดัชนีผลต่างความชื้นเป็นการคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างผลต่างและผลรวมค่าการสะท้อนของช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้และช่วงอินฟราเรดคลื่นสั้นของวัตถุบนพื้นผิวโลก เพื่อใช้ในจำแนกพื้นที่ที่เป็นน้ำบนผิวดิน โดยผลจากการคำนวณดัชนีผลต่างความชื้น มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์และจำแนกพื้นที่ที่เป็นน้ำได้ง่ายขึ้น โดยเมื่อบริเวณที่มีค่าดัชนีผลต่างความชื้นอยู่ในช่วง -1 ถึง 0 แสดงถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณส่วนบริเวณที่มีค่าดัชนีผลต่างความชื้นเข้าใกล้ค่า +1 แสดงถึงพื้นที่ที่เป็นน้ำ สำหรับการคำนวณดัชนีผลต่างความชื้นแสดงได้ดังสมการที่ 1 [17]

โดยที่

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

$NDWI$  = ดัชนีผลต่างความชื้น

$NIR$  = อินฟราเรดใกล้

$SWIR$  = อินฟราเรดคลื่นสั้น

### 3.2 การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น

การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นได้พัฒนาขึ้นมา เพื่อให้การจำแนกระหว่างพื้นที่ดินและพื้นที่น้ำเป็นไป ด้วยความแม่นยำมากขึ้น โดยจะเป็นการเน้นข้อมูลเชิงคลื่นของสิ่งปกคลุมที่เป็นพื้นน้ำบนผิวดินและได้ลดคลื่นรบกวนจากสิ่งปลูกสร้าง พืชพรรณ และดินอีกด้วย สำหรับการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น เป็นการคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างผลต่างและผลรวมค่าการสะท้อนของช่วงคลื่นแสงสีเขียวและช่วงคลื่นอินฟราเรดกลาง โดยผลจากการคำนวณการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 โดยน้ำจะมีค่าบวกมากกว่าดัชนีผลต่างความชื้น ส่วนพื้นดินและพืชพรรณจะมีค่าเป็นลบ สำหรับการคำนวณการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นแสดงได้ดังสมการที่ 2 [18]

$$MNDWI = \frac{GEEN - SWIR}{GEEN + SWIR} \quad (2)$$

โดยที่

$MNDWI$  = ดัชนีผลต่างความชื้น

$GEEN$  = คลื่นแสงสีเขียว

$SWIR$  = อินฟราเรดคลื่นสั้น

### 3.3 ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเซอร์ท

ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเซอร์ทเป็นดัชนีใหม่ที่ได้รับการแนะนำว่าเป็นการแก้ไขมาจากการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น ที่มีความเหมาะสมสำหรับการเกิดน้ำท่วมในลุ่มน้ำที่มีทั้งพื้นที่ทะเลทรายและพืชพรรณ จะเน้นความแม่นยำในการคำนวณสัดส่วนของน้ำที่ระดับพิกละเอียด และเพิ่มความคมชัดระหว่างคุณสมบัติของน้ำและที่ไม่ใช่ น้ำ ดัชนีมีความสำคัญต่อความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้

พิกละเอียดสัดส่วนของพื้นที่ ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำ สำหรับการคำนวณการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นแสดงได้ดังสมการที่ 3 [19, 20]

$$DFI = \frac{Green - SWIR + 0.1}{(Green + SWIR)(NDVI + 0.5)} \quad (3)$$

โดยที่

$DFI$  = ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเซอร์ท

$GEEN$  = คลื่นแสงสีเขียว

$SWIR$  = อินฟราเรดคลื่นสั้น

$NDVI$  = ดัชนีผลต่างพืชพรรณ

### 3.4 ดัชนีอัตราส่วนน้ำ [21]

เป็นการคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างผลต่างและผลรวมค่าการสะท้อนของช่วงคลื่นแสงสีแดงและช่วงคลื่นแสงสีเขียวเทียบกับช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้และช่วงคลื่นอินฟราเรดกลาง โดยที่ค่าของดัชนีอัตราส่วนน้ำตามนิยามนั้นจะมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ค่า 0 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เมื่อมีค่าเข้าใกล้ค่า 0 แสดงว่าเป็นพื้นที่ที่มีพืชพรรณปกคลุมมาก หากค่าดัชนีอัตราส่วนน้ำมีค่าเข้าใกล้ 1 และมากกว่า 1 แสดงถึงพื้นที่ที่เป็นน้ำ สำหรับการคำนวณดัชนีอัตราส่วนน้ำแสดงได้ดังสมการที่ 4

$$WRI = \frac{GREEN + RED}{NIR + SWIR} \quad (4)$$

โดยที่

$WRI$  = ดัชนีอัตราส่วนน้ำ

$GEEN$  = คลื่นแสงสีเขียว

$RED$  = คลื่นแสงสีแดง

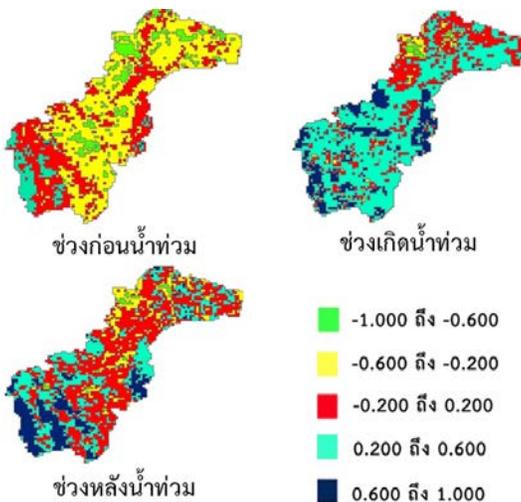
$NIR$  = อินฟราเรดใกล้

$SWIR$  = อินฟราเรดคลื่นสั้น

## 4. ผลการดำเนินงาน

### 4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดัชนีผลต่างความชื้น

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสามช่วงเวลา พบว่า ในช่วงก่อนน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.827 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.031 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.099 ในช่วงระหว่างเกิดน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.474 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.852 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.142 และในช่วงหลังน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.234 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.954 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.132 และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ จึงได้จำแนกผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยดัชนีผลต่างความชื้น ออกเป็น 5 ช่วง ซึ่งผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่สามารถแสดง ได้ดังรูปที่ 3 โดยในช่วงระหว่างน้ำท่วมจะสังเกตเห็นว่า พื้นที่ที่มีค่าในช่วง -0.200 ถึง 0.200 0.200 ถึง 0.600 และช่วง 0.600 ถึง 1.000 จะมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากเกิดเหตุการณ์น้ำท่วม



รูปที่ 3 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่จากดัชนีผลต่างความชื้น

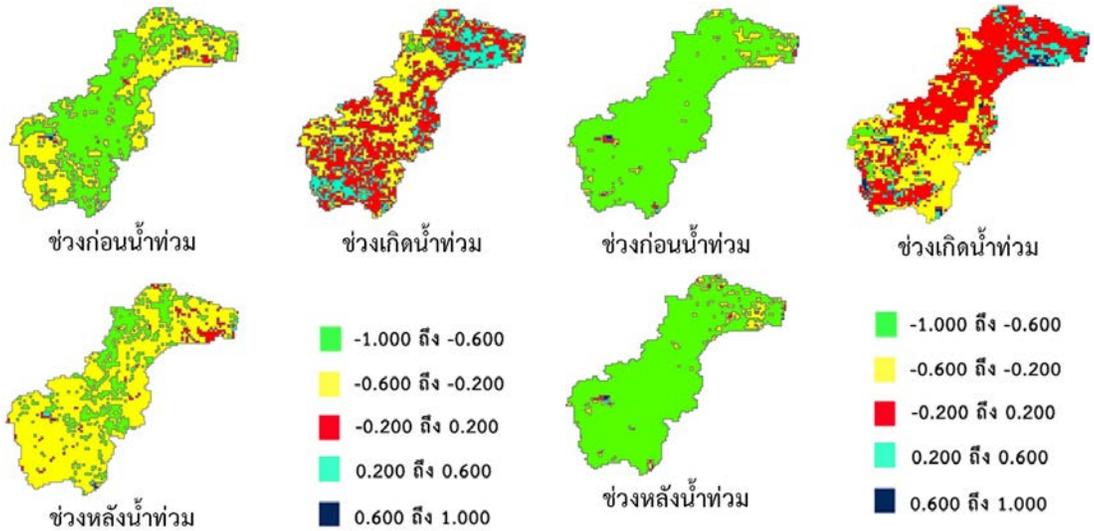
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับ ปริมาณน้ำฝน พบว่าในช่วงก่อนน้ำท่วม (มกราคม 2561) วัดปริมาณน้ำฝนได้เท่ากับ 96.100 มิลลิเมตร และ ค่าเฉลี่ยของดัชนีผลต่างความชื้นมีค่าเท่ากับ -0.522 ในช่วง

เกิดน้ำท่วม (กรกฎาคม 2561) วัดปริมาณน้ำฝนได้ เท่ากับ 210.500 มิลลิเมตร และค่าเฉลี่ยของดัชนีผล ต่างความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.495 ในช่วงหลังเกิดน้ำท่วม (ธันวาคม 2561) วัดปริมาณน้ำฝนได้เท่ากับ 131.400 มิลลิเมตร และค่าเฉลี่ยของดัชนีผลต่างความชื้นมีค่า เท่ากับ 0.130 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่ม ขึ้น ค่าของดัชนีผลต่างความชื้นก็จะเพิ่มขึ้นตาม (พื้นที่ที่ เป็นน้ำเพิ่มขึ้น) ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณน้ำฝนลดลง ค่าเฉลี่ยของดัชนีผลต่างความชื้นก็จะลดลง (พื้นที่ที่เป็น น้ำลดลง) ตามไปด้วย

### 4.2 การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสามช่วงเวลา พบว่า ในช่วงก่อนน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.827 มีค่าสูงสุด เท่ากับ 0.031 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.099 ในช่วงระหว่างเกิดน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.474 มีค่า สูงสุดเท่ากับ 0.852 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.142 และในช่วงหลังน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.234 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.954 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.132 และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ จึงได้จำแนกผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการปรับแก้ดัชนี ผลต่างความชื้นออกเป็น 5 ช่วง ซึ่งผลการวิเคราะห์ เชิงพื้นที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยในช่วงระหว่าง น้ำท่วมจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับวิธีดัชนีผลต่าง ความชื้น

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับ ปริมาณน้ำฝนพบว่าในช่วงก่อนน้ำท่วม ในช่วงเกิดน้ำท่วม และในช่วงหลังเกิดน้ำท่วมมีความสัมพันธ์กัน โดยเมื่อ ปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าของการปรับแก้ดัชนีผล ต่างความชื้นก็จะเพิ่มขึ้นตาม (พื้นที่ที่เป็นน้ำเพิ่มขึ้น) ใน ทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณน้ำฝนลดลง ค่าเฉลี่ยของการ ปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นก็จะลดลง (พื้นที่ที่เป็นน้ำ ลดลง) ตามไปด้วย



รูปที่ 4 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่จากการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น

### 4.3 ดัชนีน้ำท่วมเด็คเคิร์ท

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสามช่วงเวลา พบว่า ในช่วงก่อนน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.827 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.031 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.099 ในช่วงระหว่างเกิดน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.474 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.852 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.142 และในช่วงหลังน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.234 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.954 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.132 และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ จึงได้จำแนกผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นออกเป็น 5 ช่วง ซึ่งผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยในช่วงระหว่างน้ำท่วมจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับวิธีดัชนีผลต่างความชื้น และการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น

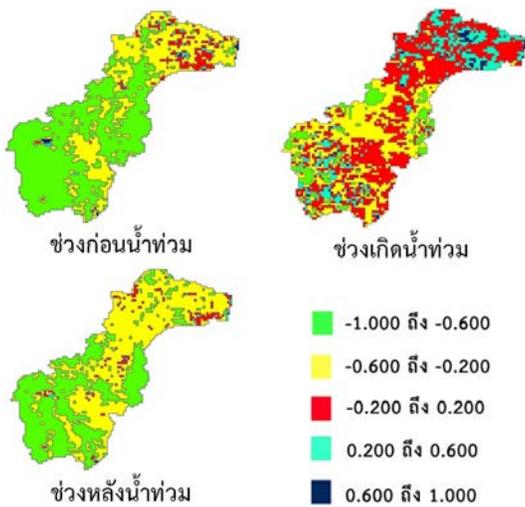
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับ ปริมาณน้ำฝนพบว่าในช่วงก่อนน้ำท่วม ในช่วงเกิดน้ำท่วม และในช่วงหลังเกิดน้ำท่วมมีความสัมพันธ์กัน โดยเมื่อปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าของการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นก็จะเพิ่มขึ้นตาม (พื้นที่ที่เป็นน้ำเพิ่มขึ้น) ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณน้ำฝนลดลง ค่าเฉลี่ยของการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นก็จะลดลง (พื้นที่ที่เป็นน้ำลดลง) ตามไปด้วย

รูปที่ 5 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ที่จากดัชนีผลต่างความชื้น

### 4.4 ดัชนีอัตราส่วนน้ำ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสามช่วงเวลา พบว่า ในช่วงก่อนน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.827 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.031 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.099 ในช่วงระหว่างเกิดน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.474 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.852 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.142 และในช่วงหลังน้ำท่วมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.234 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.954 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.132 และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ จึงได้จำแนกผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นออกเป็น 5 ช่วง ซึ่งผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยในช่วงระหว่างน้ำท่วมจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับวิธีดัชนีผลต่างความชื้น การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น และดัชนีน้ำท่วมเด็คเคิร์ท

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับ ปริมาณน้ำฝน พบว่า ในช่วงก่อนน้ำท่วม ในช่วงเกิดน้ำท่วม และในช่วงหลังเกิดน้ำท่วม มีความสัมพันธ์กัน โดยเมื่อปริมาณน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าของการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นก็จะเพิ่มขึ้นตาม (พื้นที่ที่เป็นน้ำเพิ่มขึ้น) ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณน้ำฝนลดลง ค่าเฉลี่ยของการปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้นก็จะลดลง (พื้นที่ที่เป็นน้ำลดลง) ตามไปด้วย



รูปที่ 6 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่จากดัชนีอัตราส่วนน้ำ

#### 4.5 ผลการสำรวจภาคสนามและประเมินความถูกต้อง

สำหรับผลการประเมินความถูกต้องในการศึกษานี้ จะพิจารณาผลการจำแนกเฉพาะพื้นที่ที่เป็นน้ำและพื้นที่ที่เป็นพื้นดินเท่านั้น ในการสำรวจข้อมูลภาคสนาม นั้นได้กำหนดจุดสำรวจไว้จำนวน 90 จุด ที่ครอบคลุมอำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของการจำแนกพบว่า (1) ดัชนีผลต่างความชื้น ปรากฏค่าความถูกต้องของการจำแนกร้อยละ 93.33 และปรากฏค่าสถิติแคปปาเท่ากับ 0.868 (2) การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น ปรากฏค่าความถูกต้องของการจำแนกร้อยละ 93.33 และปรากฏค่าสถิติแคปปาเท่ากับ 0.868 (3) ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเซิร์ท ปรากฏค่าความถูกต้องของการจำแนกร้อยละ 93.33 และปรากฏค่าสถิติแคปปาเท่ากับ 0.868 และ (4) ดัชนีอัตราส่วนน้ำ ปรากฏค่าความถูกต้องของการจำแนกร้อยละ 93.33 และปรากฏค่าสถิติแคปปาเท่ากับ 0.868 เมื่อพิจารณาค่าความถูกต้องของการจำแนกและค่าสถิติแคปปาของแบบจำลองทางกายภาพจำนวนทั้ง 4 รูปแบบ พบว่า ดัชนีผลต่างความชื้นนั้นมีค่าความถูกต้องของการจำแนกและค่าสถิติแคปปาสูงที่สุด และพบว่าในช่วงก่อนเกิดน้ำท่วม มีพื้นที่ดินร้อยละ 85.147 และพื้นน้ำร้อยละ 14.853 ในช่วงเกิดน้ำท่วมมีพื้นที่ดินร้อยละ 5.082 และพื้นน้ำ

ร้อยละ 94.918 และในช่วงหลังน้ำท่วมมีพื้นที่ดินร้อยละ 56.015 และพื้นน้ำร้อยละ 43.985

### 5. สรุป

ประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมสองชนิด คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จึงทำให้ประเทศไทยมีฤดูกาลที่เด่นชัด 2 ฤดู คือ ฤดูฝนกับฤดูแล้งสลับกัน สำหรับฤดูแล้งนั้นหากพิจารณาให้ละเอียดลงไปก็สามารถแยกออกได้เป็น 2 ฤดู คือ ฤดูร้อนและฤดูหนาว ดังนั้น ฤดูกาลของประเทศไทยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว สำหรับพายุโซนร้อนเขินติญเป็นพายุหมุนเขตร้อนลูกที่ 11 ประจำฤดูกาลได้ฝนแปซิฟิก พ.ศ. 2561 ทำให้เกิดฝนตกหนักและสร้างความเสียหายอย่างใหญ่หลวงให้กับทั่วทุกภาคของประเทศไทยระหว่าง 19-22 กรกฎาคม 2561 สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้มุ่งเน้นการหาวิธีการระบุพื้นที่น้ำท่วมจากข้อมูลจากดาวเทียมแลนด์แซท 8 ร่วมกับแบบจำลองทางกายภาพจำนวน 4 แบบจำลอง คือ (1) ดัชนีผลต่างความชื้น (2) การปรับแก้ดัชนีผลต่างความชื้น (3) ดัชนีน้ำท่วมเด็ดเซิร์ท และ (4) ดัชนีอัตราส่วนน้ำ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าดัชนีผลต่างความชื้นนั้นมีค่าความถูกต้องของการจำแนกและค่าสถิติแคปปาสูงที่สุดดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ สำหรับผลการศึกษาครั้งนี้จะเป็นเกณฑ์ตัดสินพื้นที่ที่เกิดอุทกภัยได้อย่างมีเหตุมีผล อีกทั้งยังสามารถทำการประเมินได้อย่างรวดเร็วและน่าเชื่อถือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำวิธีการนี้ไปใช้วิเคราะห์พื้นที่ที่เกิดอุทกภัยและนำผลที่ได้ไปใช้ประกอบการจัดทำแผนการป้องกันและบรรเทาอุทกภัยอย่างยั่งยืนต่อไป

### 6. เอกสารอ้างอิง

1. Rotjanakusol, T., Laosuwan, T. Remote Sensing Based Drought Monitoring In The Middle-Part Of Northeast Region Of Thailand. Studia Universitatis Vasile Goldis Arad, Seria Stiintele Vietii, 28 (1), 14-21, 2018.

2. Milly, P.C., Wetherald, R.T., Dunne, K.A., Delworth, T.L. Increasing Risk of Great Floods in a Changing Climate. *Nature*. 15(6871), 514-517, 2002.
3. Department of Disaster Prevention and Mitigation. Ministry of Interior. Thailand. Report Analysis/Monitoring. 2013; <http://www.disaster.go.th/th/dwn-download-12-1/>
4. Asian Disaster Reduction Center. Natural Disaster Data Book. Asian Disaster Reduction Center (ADRC), 2012.
5. Blanc, J., Hall, J., Roche, N., Dawson, R., Cesses, Y., Burton, A., and Kilsby, C. Enhanced efficiency of pluvial flood risk estimation in urban areas using spatial-temporal rainfall simulations. *Journal of Flood Risk Management*, 5, 143-152, 2012.
6. Kim, B., Sanders, B. F., Schubert, J. E., and Famiglietti, J. S. Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver. *Advances in Water Resources*, 68, 42-61, 2014.
7. Elkhachy, I. Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18 (2), 261-278, 2015.
8. Uttaruk, Y., Laosuwan, T. Remote sensing based vegetation indices for estimating above ground carbon sequestration in orchards *Agriculture & Forestry*. 62(4), 193-201, 2016.
9. Laosuwan, T., Uttaruk, Y. Application of Geo-informatics and Vegetation Indices to Estimate Above-ground Carbon Sequestration. *Studia Universitatis Vasile Goldis Arad, Seria Stiintele Vietii*, 26 (4), 449-454, 2016.
10. Amini, J. A method for generating floodplain maps using IKONOS images and DEMs. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (9), 2441-2456, 2010.
11. Elkhachy, I. Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18 (2), 261-278, 2015.
12. Rotjanakusol T., Laosuwan T. Inundation area investigation approach using remote sensing technology on 2017 flooding in Sakon Nakhon province Thailand, *Studia Universitatis Vasile Goldis Arad, Seria Stiintele Vietii*, 28 (4), 159-166, 2018.
13. Krausmann E, Mushtaq F. A qualitative Natech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities. *Natural Hazards*. 46 (2), 179-97, 2008.
14. Kia, M. B., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A. R., Sulaiman, W. N. A., and Moradi, A. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*. 67 (1), 1-14, 2012.
15. Saini, S. S., and Kaushik, S. P. Risk and vulnerability assessment of flood hazard in part of Ghaggar Basin: A case study of Guhla block, Kaithal, Haryana, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 3 (1), 42-54, 2012.
2. USGS. Landsat 8 user guide. Available at [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lpcs\\_user\\_guide.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lpcs_user_guide.pdf).
3. Gao, B.C. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of*

Environment, 58, 257-266, 1996.

4. Xu, H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (14), 3025-3033, 2006.

5. Wang, S. The Quantitative Research on Dynamic Changes between flood and Vegetation in Tarim. PhD-Dissertation, Beijing Normal University, Beijing, 2007.

6. Henry Zimba, Banda Kawawa, Anthony Chabala, Wilson Phiri, Peter Selsam, Markus Meinhardt, Imasiku Nyambe. Assessment of trends in inundation extent in the Barotse Floodplain, upper Zambezi River Basin: A remote sensing-based approach, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 149-170, 2018.

7. Shen, L., and Li, C. Water Body Extraction from Landsat ETM Imagery using Adaboost Algorithm. pp. 1-4. In : *Proceedings 18<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics*, Beijing, China, 2010.

# การวิเคราะห์โรเตอร์แอโรไดนามิกส์ของใบพัด VTOL UAV โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ณัฐธวัฒน์ พลดี<sup>1</sup> สุจินต์ บุรีรัตน์<sup>1</sup> และ วีระพล นวนทอง<sup>2\*</sup>

วันที่รับ 2 กรกฎาคม 2562 วันที่แก้ไข 13 สิงหาคม 2562 วันตอบรับ 14 สิงหาคม 2562

## บทคัดย่อ

อากาศยานไร้คนขับขึ้นลงแนวดิ่ง หรือ VTOL UAV เป็นหนึ่งในโครงการวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ซึ่งพบปัญหาการสั่นสะเทือนที่อาจจะมีสาเหตุจากกำลังไม่เพียงพอ โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโรเตอร์แอโรไดนามิกส์ใบพัดของเครื่อง VTOL UAV เพื่อวิเคราะห์หากำลังของใบพัดที่ความเร็วรอบและที่มุมเอียงค่าต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในการวิเคราะห์โรเตอร์แอโรไดนามิกส์ของใบพัดในงานวิจัยนี้ จะวิเคราะห์ที่ความเร็วรอบ 1400 และ 2000 รอบต่อนาที ด้วยการปรับค่ามุมเอียงของใบพัดที่ 5-20 องศา ผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าค่าแรงยก แรงต้าน และแรงบิด ทั้ง 3 ค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการปรับมุมใบพัดสูงขึ้นของทั้ง 2 ค่าความเร็วรอบการหมุน และเมื่อทำการเปรียบเทียบแรงยกกับน้ำหนักของ VTOL UAV และกำลังที่ต้องใช้เทียบกับกำลังของเครื่องยนต์พบว่า เครื่อง VTOL UAV สามารถขึ้นบินได้ที่สัดส่วนความเร่งหนึ่งเท่าของแรงโน้มถ่วง (1 g) โดยประมาณ ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ที่มุมใบ 15 องศา และ ต้องใช้กำลัง 96% ของกำลังสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถทำได้ นอกเหนือจากนี้ ยังพบว่าเครื่องยนต์มีกำลังไม่เพียงพอในการหมุนใบพัดที่ความเร็ว 2000 รอบที่มุมเอียงใบพัดมากกว่า 5 องศา จึงไม่สามารถสร้างแรงยกที่เพียงพอได้ที่ความเร็วรอบดังกล่าว

**คำสำคัญ :** อากาศยานไร้คนขับ, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, โรเตอร์แอโรไดนามิกส์, แรงยก

<sup>1</sup> ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

\* ผู้แต่ง, อีเมลล์: wee.nua16@gmail.com

# Rotor aerodynamic analysis of VTOL UAV using computational fluid dynamics

Nantiwat Pholdee<sup>1</sup> Sujin Bureerat<sup>1</sup> and Weerapon Nuantong<sup>2\*</sup>

## Abstract

A vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle (VTOL UAV) has been developed by the Defence Technology Institute (DTI) which was found to have a vibration problem probably caused by insufficient engine power. In this regard, the aim of this work is to study the rotor aerodynamic characteristics of the VTOL UAV blades in order to calculate the power required at several rotor speeds where the studied parameter is the blade pitch angle by using computational fluid dynamic (CFD) analysis. The rotor speeds were set to be 1400 and 2000 rpm while the blade pitch angles were in the range of [5, 20] degrees. The numerical results revealed that the increase of the pitch angle led to the increase of lift force, drag force and torque for both rotor speeds. By comparing the lift force and torque required with VTOL UAV mass and engine power, it was found that the VTOL UAV moved vertically upward at the acceleration of 1g if the rotor speed was 1400 rpm and the pitch angle was 15 degree. The power required from the engine was 96% of the maximum engine power. In addition, the engine could not be operated at the rotor speed of 2000 rpm at the pitch angle of 5 degree or higher, meaning that the engine could not lift the VTOL UAV at this engine speed.

**Keywords :** unmanned aerial vehicle, computational fluid dynamics, rotor aerodynamics, lift force

---

<sup>1</sup> Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

<sup>2</sup> Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus.

\* Corresponding author, E-mail: wee.nua16@gmail.com

## 1. บทนำ

อากาศยานปีกหมุนหรือที่เรียกกันว่าเฮลิคอปเตอร์ เป็นอากาศยานรูปแบบหนึ่งที่สามารถขึ้นลงในแนวดิ่งได้ โดยหลักการการทำงานของอากาศยานปีกหมุนจะอาศัยการเคลื่อนที่ของใบพัดหมุนตัดอากาศเพื่อสร้างแรงยก (lift force) ซึ่งในการออกแบบใบพัดที่เหมาะสมกับสภาวะการบินของอากาศยานปีกหมุนนั้นถือเป็นเรื่องที่ยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากในระหว่างทำการบินใบพัดหลักจะหมุนในทิศทางเดียว ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของโมเมนต์ ทำให้จำเป็นต้องมีใบพัดอีกชุดสำหรับสร้างสมดุลทั้งในเรื่องของโมเมนต์และแรงที่เกิดขึ้น หากมีการออกแบบที่ไม่เหมาะสมจะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น การสั่นสะเทือน จนนำไปสู่ความเสียหายของตัวเครื่องได้ นอกจากนี้ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการสร้างแรงยกสูงๆ และเกิดแรงต้านต่ำๆ ใบพัดหลักจะถูกออกแบบให้มีความกว้าง (span) ต่อความยาวคอร์ด (chord) สูง ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณแกนหมุนใบพัด ดังนั้น ในการออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างพร้อมกัน เช่น แอร์ไดนามิก ความแข็งแรงของโครงสร้าง การสั่นสะเทือน ฯลฯ [1-5] ถึงแม้ว่าการออกแบบอากาศยานปีกหมุนจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้านพร้อมๆ กัน แต่อย่างไรก็ตาม สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบอากาศยานปีกหมุนคือการวิเคราะห์โรเตอร์แอร์ไดนามิกส์ของใบพัดหลักของตัวเครื่อง เพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์หากำลังการขับเคลื่อนและแรงยกที่สามารถทำได้

การวิเคราะห์แอร์ไดนามิกของอากาศยานปีกหมุนจำเป็นต้องรู้ลักษณะของแพนอากาศ (airfoil) ที่ใช้ในการสร้างใบและสัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) ของ airfoil ดังกล่าว ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม ปัจจุบันองค์กรนาซ่าได้ทำการทดสอบ airfoil รูปแบบต่างๆ เพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient)

เก็บเป็นฐานข้อมูลสำหรับนักวิจัย หรือผู้ออกแบบ และในการคำนวณเพื่อหากำลังของใบพัดสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีส่วนลึงของใบกังหันและทฤษฎีโมเมนตัม (Blade element momentum, BEM) [6-8] ร่วมกับข้อมูลอ้างอิงจากนาซ่า หรือการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) [9-12]

การออกแบบใบพัดของอากาศยานปีกหมุนในปัจจุบันนิยมออกแบบเพื่อหาค่าเหมาะสมสุด เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการในหลายๆ ด้านเช่น น้ำหนักน้อยที่สุด กำลังสูงสุด ภายใต้งี้อเนกประสงค์ทางด้านความแข็งแรง การสั่นสะเทือน ฯลฯ โดยตัวแปรออกแบบได้แก่ ความยาวของใบพัด (Blade Length), มุมบิดของใบพัด (Twist Angle), ความยาวของ Airfoil (Chord), มุมพิทช์ (Pitch Angle), ลักษณะ Airfoil, และความหนาของใบพัด (Thickness) เป็นต้น และมีหลายงานวิจัยที่ได้มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมสุดมาใช้ร่วมกับทฤษฎี Blade element momentum หรือ CFD ในการออกแบบหาค่าเหมาะสมสุดใบพัดของอากาศยานปีกหมุนทั้งแบบหนึ่งและหลายฟังก์ชันเป้าหมาย [13-17]

ในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกมีการวิจัยและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับ หรือ UAV (Unmanned aerial vehicle) เพื่อใช้งานในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การป้องกันประเทศ การสำรวจ การกู้ภัย การขนส่ง หรือการเกษตร ฯลฯ เนื่องจากไม่ต้องใช้นักบิน ทำให้สามารถเข้าถึงพื้นที่ที่มีความเสี่ยงและเป็นอันตรายสำหรับนักบินได้ เมื่อไม่นานมานี้ประเทศไทย โดยหน่วยงานสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศก็ได้มีการวิจัยและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับทั้งแบบปีกคงตัว (Fixed wing UAV) และแบบขึ้นลงแนวดิ่ง (Vertical take-off and landing, VTOL UAV) ซึ่งมีการทดสอบและใช้งานในภารกิจด้านต่างๆ มาแล้วมากมาย เช่น ด้านการทหาร หรือการช่วยเหลือผู้ประสบภัย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการวิจัยพัฒนาอากาศยานไร้คนขับมาอย่างต่อเนื่องในหลากหลายรูปแบบ แต่ในบางรูปแบบที่มีการพัฒนายังพบว่า มีปัญหาเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบและใช้งานจริง เช่น

อากาศยานไร้คนขับขึ้นลงแนวตั้งแบบ 3 ชุดใบพัดของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ซึ่งพบปัญหาเรื่องเครื่องยนต์ต้นกำลังทำให้ประสิทธิภาพของการบินไม่ดีพอ ดังนั้น จากปัญหาเบื้องต้นของอากาศยานไร้คนขับขึ้นลงแนวตั้งแบบ 3 ชุดใบพัด จึงนำไปสู่วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาวิเคราะห์โรเตอร์แอร์โดนามิกส์ของใบพัด VTOL UAV โดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาช่วยแก้ปัญหาการไหลบนใบพัดสำหรับการคำนวณหาแรงยกแรงต้าน และแรงบิด แล้วทำการเปรียบเทียบแรงยกกับน้ำหนักของ VTOL UAV และกำลังที่ต้องใช้เทียบกับกำลังของเครื่องยนต์

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 การคำนวณแรง

ความสัมพันธ์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยก ( $C_l$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน ( $C_d$ ) สำหรับใบพัดสามารถแสดงเป็น

$$C_l = F_l / \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad (1)$$

$$C_d = F_d / \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad (2)$$

โดยที่  $A$  คือพื้นที่ Planform ของใบพัด  $F_l$  คือแรงยก  $F_d$  คือแรงต้าน  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ และ  $v$  คือความเร็วของใบพัด

นอกจากนี้ แรงขับหรือแรงบิด ( $T$ ) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมมีความสัมพันธ์เป็น

$$T = m(c_u - c_d) \quad (3)$$

เมื่อ  $m$  คืออัตราการไหลของมวลผ่านดิสก์  $c_u$  คือความเร็วทางเข้า และ  $c_d$  คือความเร็วทางออก

### 2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษานี้จะใช้การจำลอง CFD ด้วยวิธีปริมาตรควบคุม ภายใต้โปรแกรม Ansys/Fluent โดยใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  [18] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการจำลองทางอากาศ [19] ที่สภาวะการไหลคงที่ ของไหลซึ่งเป็นอากาศบนสมมติฐานแบบไม่ยุบตัว ถูกใช้ในการจำลองการไหลของอากาศบนใบพัดเครื่อง VTOL UAV กับสมการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation) คือ

$$\text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

เมื่อ  $\mathbf{u}$  เป็นความเร็วของของไหล

โดยสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation) ในกรอบอ้างอิงเฉื่อย สามารถแสดงได้ตามสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\mathbf{u}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \bar{\mathbf{g}} + \bar{\mathbf{F}} \quad (5)$$

ซึ่ง  $p$  เป็นความดันสถิต  $\rho \mathbf{g}$  เป็นแรงโน้มถ่วงของมวล  $\mathbf{F}$  เป็นแรงภายนอก และ  $\bar{\boldsymbol{\tau}}$  คือเมตริกซ์ความเค้นหาได้จากสมการ

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \mu \left[ (\nabla \bar{\mathbf{u}} + \nabla \bar{\mathbf{u}}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} \mathbf{I} \right] \quad (6)$$

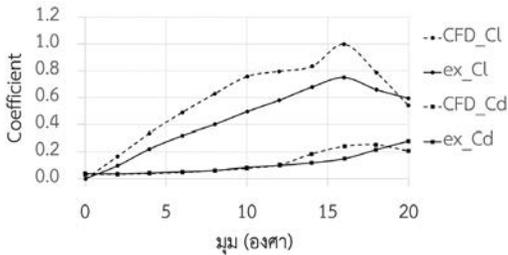
เมื่อ  $\mu$  เป็นความหนืดโมเลกุล และ  $\mathbf{I}$  คือ เมตริกซ์ 1 หน่วย

## 3. ขอบเขตเงื่อนไขการจำลอง

### 3.1 การตรวจสอบโปรแกรม

ในการตรวจสอบโปรแกรม CFD (Ansys/Fluent) กับการใช้รูปแบบความปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  สำหรับคำนวณการไหลของอากาศแบบสภาวะคงที่ (Steady state) บน air foil NACA0015 แบบ 2D เป็นการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ I. Şahin และ A. Acir [18]

ด้วยการปรับค่ามุมใบตั้งแต่ 0 ถึง 20 องศา ผลที่ได้แสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยก และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน ดังแสดงในรูปที่ 1



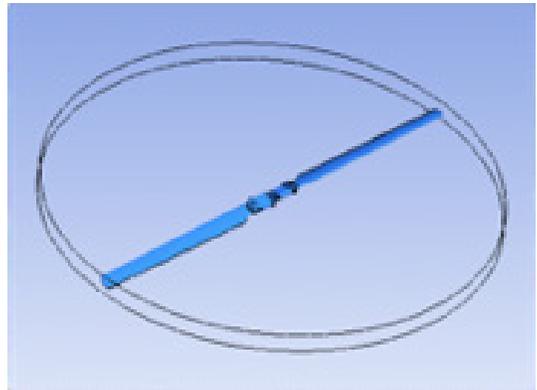
รูปที่ 1 ผลการจำลอง (CFD\_CL, CFD\_Cd) เปรียบเทียบกับการทดลอง (ex\_CL, ex\_Cd)

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นผลของการคำนวณ CFD เปรียบเทียบกับการทดลองอ้างอิง โดยผลค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านจะให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยก แต่อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณ CFD ที่ได้เมื่อพิจารณาลักษณะแนวโน้มเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยก และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง

ดังนั้น สำหรับการคำนวณ CFD ถูกตรวจสอบกับรูปแบบการไหลปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  มีประสิทธิภาพการคำนวณเชิงตัวเลขที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง จึงถูกเลือกนำมาใช้เพื่อศึกษาการไหลของอากาศบนใบพัดเครื่อง VTOL UAV สำหรับงานนี้

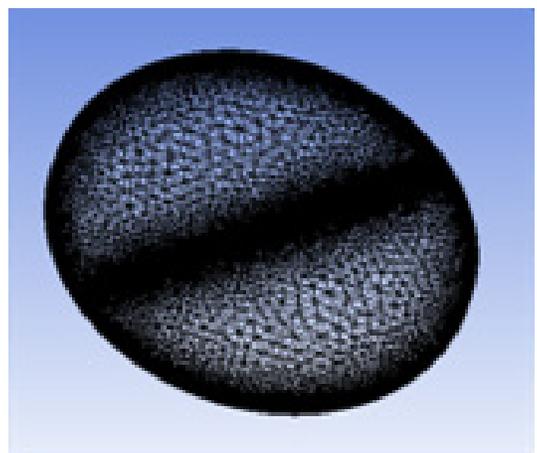
### 3.2 รูปแบบใบพัดและการกำหนดขอบเขตเงื่อนไข

ใบพัดเครื่อง VTOL UAV มีขนาดรัศมีของใบประมาณ 0.968 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นโรเตอร์แบบ 2 ใบพัด ซึ่งเป็นโมเดลที่ถูกนำมาใช้ศึกษาในการจำลอง CFD ด้วยการปรับมุมใบตั้งแต่ 5 ถึง 20 องศา ภายใต้การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข มีดังนี้



รูปที่ 2 ใบพัดของเครื่อง VTOL UAV

การไหลของของไหลเป็นอากาศมีความหนาแน่น 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนืด  $1.789 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที โรเตอร์ใบพัดเคลื่อนที่แบบเฟรมอ้างอิงการหมุนที่ 1400 และ 2000 รอบต่อนาที โดยที่ใบพัดถูกกำหนดเป็นผนังเคลื่อนที่และผนังด้านอื่นๆ เป็นความดันสถิตเท่ากับศูนย์ที่ทางออกเนื่องจากพฤติกรรมของการไหลของอากาศขึ้นอยู่กับรอบการหมุนของใบพัด การแก้ปัญหาการไหลเป็น Pressure-Based การจำลองแบบ Pressure-Velocity Coupling บนความดันมาตรฐาน โมเมนตัมแบบ Quick พลังงานจลนศาสตร์ปั่นป่วนและอัตราการกระจายเฉพาะเป็น Second Order Upwind และค่า Residual เป็นการกำหนดที่  $10^{-5}$

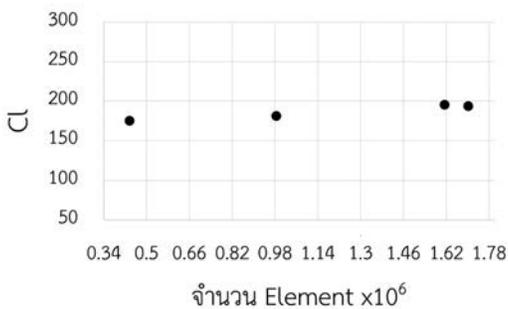


รูปที่ 3 Unstructured mesh

### 3.3 การตรวจสอบคุณภาพตาข่าย (Mesh)

การจำลอง CFD สำหรับงานนี้ เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างตาข่ายบนใบพัด Unstructured mesh ถูกสร้างขึ้นดังในรูปที่ 3 และมีการกำหนด Inflation Layer- First layer height คือ  $10^{-5}$  กับ Maximum layers เป็น 15 โดย  $Y^+$  ประมาณ 5 ซึ่งเพียงพอต่อการแสดงพฤติกรรม การไหลใกล้ผนังใบพัด และเมื่อทำการตรวจสอบคุณภาพของตาข่ายด้วยการปรับจำนวน elements ตั้งแต่ 4 แสน ถึง 1.7 ล้าน element พบว่าที่ 1.6 ล้าน element เมื่อเทียบกับ 1.7 ล้าน element ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยกต่างกันที่ 0.9% ซึ่งเป็นค่าต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4

ดังนั้น เพื่อลดความไม่แน่นอนของผลเชิงตัวเลข และเวลาการคำนวณทาง CFD จึงเลือกใช้ตาข่ายที่มีจำนวน element 1.6 ล้านขึ้นไป เป็นการสร้างตาข่ายที่เหมาะสมสำหรับการจำลอง CFD ของโดเมนการไหลบนใบพัดนี้



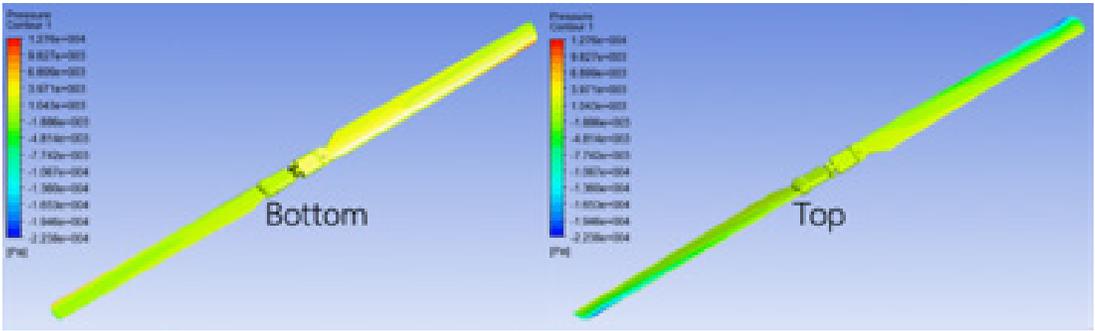
รูปที่ 4 การตรวจสอบคุณภาพตาข่าย

### 4. ผลการวิจัยและอภิปราย

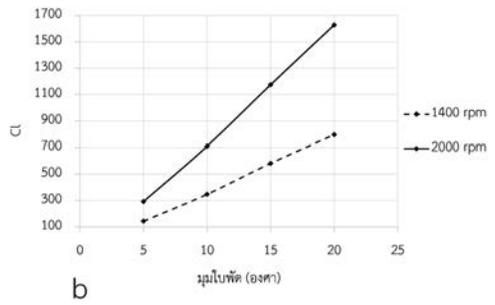
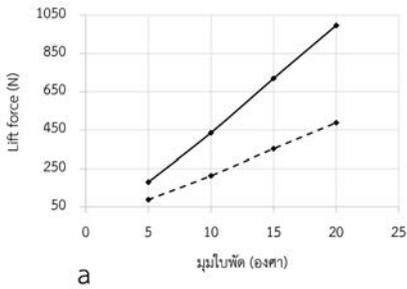
เมื่อใบพัดมีการหมุน จะทำให้เกิดความดันที่แตกต่างขึ้นระหว่างด้านล่างและด้านบนของใบ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยความดันด้านล่างใบจะให้ค่าที่สูงกว่าด้านบนของใบ เป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงยกบนใบพัด ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลของแรงยกและแรงต้านก็คือ มุมและความเร็วรอบในการหมุนของใบพัด ดังผลการคำนวณที่ได้จากการจำลอง CFD ในรูปที่ 6 และ 7

รูปที่ 6 (ก) เป็นค่าแรงยก และ รูปที่ 6 (ข) คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยกที่ได้จากผลการคำนวณ CFD บนใบพัดที่ความเร็วรอบ 1400 และ 2000 รอบต่อนาที ด้วยการปรับค่ามุม ตั้งแต่ 5 ถึง 20 องศา พบว่า เมื่อค่ามุมใบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าแรงยกและค่าสัมประสิทธิ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับค่าแรงต้านและสัมประสิทธิ์ของแรงต้านในรูปที่ 7 (ก) และ (ข) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างแรงยกและแรงต้าน หรือระหว่างสัมประสิทธิ์ของทั้ง 2 แรง จะให้ค่าที่แตกต่างกันอย่างมากเนื่องมาจากขนาดของพื้นที่ Planform ของใบพัดในการรับทิศทางของแรงดันที่ต่างกัน และยิ่งความเร็วรอบการหมุนมากขึ้นแรงดันก็จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ มีผลทำให้เกิดค่าแรงบิดบนใบพัดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 ค่าแรงบิดกับความเร็วรอบที่ได้ สามารถคำนวณกำลังที่ต้องใส่ให้กับใบพัด ดังในรูปที่ 9

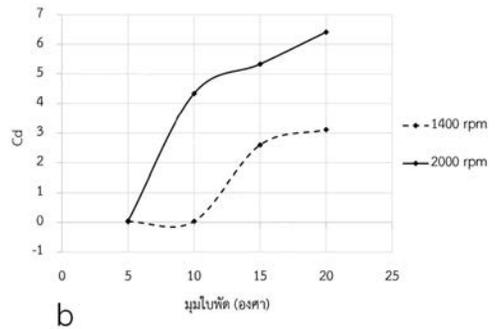
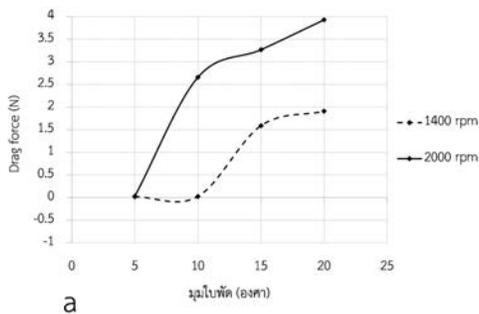
ดังนั้น เมื่อพิจารณากำลังที่คำนวณได้ในรูปที่ 9 นำมาเปรียบเทียบกับกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ VTOL UAV ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันคือเครื่องยนต์รุ่น 3W110B2/CS ซึ่งมีกำลังสูงสุด 9.41 kW จะทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ที่มุมใบ 5-15 องศาเท่านั้น และที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ที่มุมใบสูงสุด 5 องศาเท่านั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแรงยกที่ได้ในรูปที่ 6 (ก) กับน้ำหนักของตัวเครื่องซึ่งมีน้ำหนักรวมบรรทุกน้ำมันสูงสุดอยู่ที่ 34 กิโลกรัม หรือ 340 นิวตัน จะพบว่า เครื่อง VTOL UAV สามารถบินขึ้นได้ที่ความเร่ง 1 g โดยประมาณ ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ที่มุมใบ 15 องศา และต้องใช้กำลัง 96% ของกำลังสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถทำได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าเครื่องยนต์มีกำลังไม่เพียงพอที่จะสร้างแรงยกให้เครื่อง VTOL UAV ได้ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที



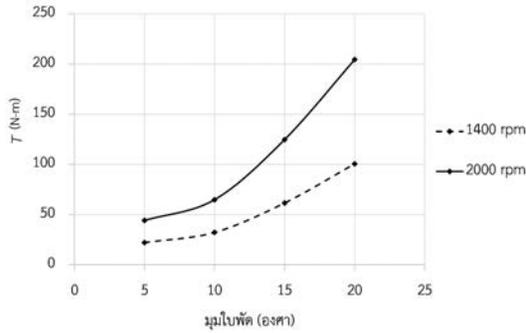
รูปที่ 5 การกระจายความดันบนใบพัด



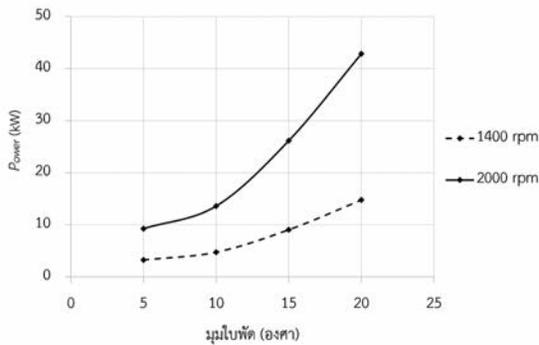
รูปที่ 6 (ก) แรงยก (ข) สัมประสิทธิ์ของแรงยก



รูปที่ 7 (ก) แรงต้าน (ข) สัมประสิทธิ์ของแรงต้าน



รูปที่ 8 แรงบิด



รูปที่ 9 กำลังที่ใบพัดต้องการ

## 5. สรุปผลการวิจัย

ในงานนี้การวิเคราะห์โรเตอร์แอร์ไดนามิกส์ของใบพัดเครื่อง VTOL UAV โดยการประยุกต์ใช้ CFD เข้ามาแก้ปัญหาการไหล เมื่อทำการวิเคราะห์โรเตอร์แอร์ไดนามิกส์ของใบพัดด้วยการจำลอง CFD ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที และความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาทีพบว่า ค่าแรงยก แรงต้าน และแรงบิด ทั้ง 3 ค่า จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีมุมใบสูงขึ้นในทั้ง 2 ของความเร็วรอบใบพัด และเมื่อเปรียบเทียบแรงยกกับน้ำหนักของตัวเครื่อง VTOL UAV และกำลังที่ต้องใช้เทียบกับกำลังของเครื่องยนต์พบว่า เครื่อง VTOL UAV สามารถบินขึ้นได้ที่ความเร่ง 1 g โดยประมาณ ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ที่มุมใบ 15 องศา และ ต้องใช้กำลัง 96% ของกำลังสูงสุดที่

เครื่องยนต์สามารถทำได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าเครื่องยนต์มีกำลังไม่เพียงพอในการหมุนใบพัดที่ความเร็ว 2000 รอบที่มุมเอียงใบพัดมากกว่า 5 องศา จึงไม่สามารถสร้างแรงยกที่เพียงพอได้ที่ความเร็วรอบดังกล่าว

## 6. Acknowledgement

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ตามสัญญาριθุนเลขที่ 610201 และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

## 7. References

- [1] M. E. Calvert and D. V. Horacek, "Study of the Army Helicopter Design Hover Criterion Using Temperature and Pressure Altitude", AMRDEC Redstone Arsenal United States, 2017.
- [2] P. Marqués, "A Review of Active Blade Twist Technology: Part II-Integral Twist Actuation", *Int. J. Unmanned Syst. Eng.*, 2 (s2), 2014, pp. 26-36.
- [3] P. Marqués, "A Review of Active Blade Twist Technology: Part I-Actuation Concepts", *Int. J. Unmanned Syst. Eng.*, 2 (s2), 2014, pp. 16-25.
- [4] A. T. Conlisk, "Modern helicopter rotor aerodynamics", *Prog. Aerosp. Sci.*, 37 (5), 2001, pp. 419-476.
- [5] J. M. Krodkiewski and J. S. Faragher, "STABILIZATION OF MOTION OF HELICOPTER ROTOR BLADES USING DELAYED FEEDBACK-MODELLING, COMPUTER SIMULATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION", *J. Sound Vib.*, 234 (4), 2000, pp. 591-610.
- [6] D.R. Abhiram, R. Ganguli, D. Harursampath, and P. P. Friedmann, "Robust Design of Small Unmanned Helicopter for Hover Performance Using Taguchi Method", *J. Airc.*, 55 (4), 2018, pp. 1746-1753.
- [7] A. Ning, G. Hayman, R. Damiani, and J. M. Jonkman, "Development and Validation of a New Blade Element Momentum Skewed-Wake Model within AeroDyn", in *33rd Wind Energy Symposium*, 2015.
- [8] G. Matič, M. Topič, and M. Jankovec, "Mathematical Model of a Monocopter Based on Unsteady Blade-Element Momentum Theory", *J. Aircr.*, 52(6), 2015, pp. 1905-1913.
- [9] I. Oruc, J. F. Horn, S. Polsky, J. Shipman, and J. Erwin, "Coupled flight dynamics and CFD simulations of helicopter/ship dynamic interface", in *Proceedings of the 71st Annual Forum of the American Helicopter Society*, Virginia Beach, VA, 2015.
- [10] M. Sugiura, Y. Tanabe, H. Sugawara, G. N. Barakos, N. Matayoshi, and H. Ishii, "Validation of CFD Codes for the Helicopter Wake in Ground Effect", 2017.
- [11] M. Elfarra, M. Kaya, and F. Kadioglu, "A Parametric CFD Study for the Effect of Spanwise Parabolic Chord Distribution on the Thrust of an Untwisted Helicopter Rotor Blade", in *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018.
- [12] Y. S. Won, B. A. Haider, C. H. Sohn, and Y. M. Koo, "Aerodynamic performance evaluation of basic airfoils for an agricultural unmanned helicopter using wind tunnel test and CFD simulation", *J. Mech. Sci. Technol.*, 31 (12), 2017, pp. 5829-5838.
- [13] X. Jiang, Q. Zhao, G. Zhao, and P. Li, "Integrated optimization analyses of aerodynamic/stealth characteristics of helicopter rotor based on surrogate model", *Chin. J. Aeronaut.*, 28 (3), 2015, pp. 737-748.
- [14] Q. Wang, Q. Zhao, and Q. Wu, "Aerodynamic shape optimization for alleviating dynamic stall characteristics of helicopter rotor airfoil", *Chin. J. Aeronaut.*, 28 (2), 2015, pp. 346-356.
- [15] D. Leusink, D. Alfano, and P. Cinnella, "Multi-fidelity optimization strategy for the industrial aerodynamic design of helicopter rotor blades", *Aerosp. Sci. Technol.*, 42, 2015, pp. 136-147.
- [16] A. Ariyarit, M. Sugiura, Y. Tanabe, and M. Kanazaki, "Hybrid surrogate-model-based multi-fidelity efficient global optimization

applied to helicopter blade design", *Eng. Optim.*, 50 (6), 2018, pp. 1016–1040.

[17] S. Darwish, M. Abdelrahman, A. M. Elmekawy, and K. Elsayed, "Aerodynamic Shape Optimization of Helicopter Rotor Blades in Hover using Genetic Algorithm and Adjoint Method", in 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.

[18] I. Şahin and A. Acir, "Numerical and Experimental Investigations of Lift and Drag Performances of NACA 0015 Wind Turbine Airfoil", *Int. J. Mater. Mech. Manuf.*, 3 (1), 2015, pp. 22–25.

[19] S. P. Yeong and S. S. Dol, "Aerodynamic Optimization of Micro Aerial Vehicle", *J. Appl. Fluid Mech.*, 9 (5), 2016, pp. 2111-2121.

# Small Arms Simulator for Military and Security Trainings an Industry and Competitor Analysis

Ranchida Khantong<sup>1\*</sup>

Received 29 March 2019, Revised 13 August 2019, Accepted 14 August 2019

## Abstract

The small arms simulator is an appealing option for shooting training because of its benefits in lowering the cost, safety issues and waste management. It is well worth to study the market opportunities for small arms simulator as it is one of the defense technologies that can lead to numerous trading opportunities. Moreover, it is likely to play an important role in the evolving military training industry.

This independent study comprises the industry summary and competitor analysis that focuses on the small arms simulator technology and its opportunity in Thailand. Exploratory research was conducted using secondary data and in-depth interview. The secondary data reported the overview about the defense industry and the small arms simulator industry, Thai military procurement process, the utilization of small arms simulator in military training, military expenditure, budget allocation structure and trend. In-depth interviews with key persons in the buying process showed the insight on the importance of the shooting training simulators and described the buying center in practice.

Some military units are using the small arms simulators alongside the traditional field training in Thailand. The systems are from both local manufacturers and importation. Still, there are demands for such systems as shooting is a fundamental training and requirements for each level of training are different. The potential users are Royal Thai Army, Royal Thai Navy, Royal Thai Air Force and Royal Thai Police along with their sub-units. The procurement of the simulators follows regulation of the Office of Prime Minister on Procurement B.E.2535 (1992). Nevertheless, a well-established connection with the right person in the procurement process is also important apart from selling the product that can serve user's needs.

**Keywords :** Small Arms Simulator, Small Arms Simulator Industry, High Technology Buying Process

---

<sup>1</sup> ส่วนงานระบบเครื่องช่วยฝึกเสมือนจริง (Virtual Simulation Division - RVS), Defence Technology Institute.

\* Corresponding author, E-mail: ranchida.k@dti.or.th

## 1. Introduction

The cost of resources, especially ammunition and time, for live firing range is high making it an uneconomical way of training (Jameson, 2016). The small arms simulator, thus, becomes more appealing because of its benefits over the traditional shooting range in lowering the cost, safety issue, and waste management (Yu-bing, 2011). Small arms simulator can provide realistic and effective training experience in the way that it allows the trainees to get used to the weapons and practice shooting with the ease in monitoring the performance by the instructors (Jameson, 2016). It can also serve both novel and professional shooters to be familiar with the weapons prior to using the real ones. Hence, the small arms simulator lessens the risk from undesirable threat of guns. Furthermore, users can be trained in the dangerous or intense situations without actually harming themselves. The system can also help to lower the cost of training as the expense on ammunition can be cut-off and the system installation is cheaper than building the actual shooting range. By the application of computer-simulated environment, the training can be set for shooters with any skill levels and the scenarios can be changed referring to users' preferences. In addition, the training can be arranged any time without having to concern about environmental factors such as weather condition. The lifelike situations, provided by the system, benefit the trainees to have realistic experiences in handling and responding to the dangerous situations. Moreover, the system can keep the record of the users' performances in the training making it possible to review the result

(Gun Simulation Facts, 2016).

In 2015, the small arms simulator held 54% share of the total global indoor shooting ranges market. It was predicted that the shooting simulator will continue to seize the market size, market share and growth from the traditional indoor shooting ranges within 5 years (Shooting Ranges Market Forecast to 2020, 2015). This growing demand on the small arms simulator pinpoints the interest in seeing the opportunity in Thailand's defense market as shooting training is one of the fundamental military practice. The military budget is continuously rising year by year even though Thai government hopes to diminish military supports from other countries (Strategy Technology Analysis Department, 2016). Thus, this gives room for the domestic defense technology to grow. The study can be the motivation for the development of small arms simulator system in the country as well as stirring the growth of R&D in defense technology in Thailand, decreasing the expense from purchasing imported system and helping to reduce the cost of training with commendable use of military budget.

### 1.1 Research Objectives

This study contains the information about the small arms training simulator in terms of the technology opportunity in Thailand. The information can supply the game developer or software developer with a better vision on the potential of the small arms simulator market in Thailand.

The objectives of this study are listed as follows:

1. To understand AEC defense industry

and the trend in defense-related budgeting and allocation

2. To determine Thailand's market opportunities for the small arms simulator

2.1. To understand the trend in defense-related budgeting and allocation in Thailand

2.2. To understand the market demand for the small arms simulator for military and security trainings

2.3. To identify the key competitors that are currently in the small arms simulator market in Thailand

3. To identify the key factors that are relevant to the procurement process of small arms simulator system for military and security trainings in Thailand

3.1 To define the procurement structure of the military and the key person(s) who are responsible for the key roles in procurement process

3.2. To identify the buying criteria such as price, compatibility with existing simulators, maintenance cost, etc.

3.3. To develop a matrix of decision makers, influencers, etc. at each stage of buying process

## 2. Literature Review

### 2.1 Organizational Buying

Organizational buying involves decision-making process where formal organizations initiate the need to buy products or services by identification, assessment and selection of brands and suppliers. The difference between organizational buying and the individual consumer's buying is that there are more transactions happen in the process. The decision-making unit in purchasing structure is called "the Buying

Center" which includes:

1) Initiators who express the needs to purchase something. They can also be the users of the product or service.

2) Users who use the product and service

3) Influencers who have the influence on buying decision i.e. technical expert

4) Deciders who determine the product specification and suppliers

5) Approvers who approve the actions of deciders or buyers

6) Buyers who are authorized to select, negotiate and construct purchase agreement with vendors

7) Gatekeepers who manage the flow of information and sellers in reaching the buying center

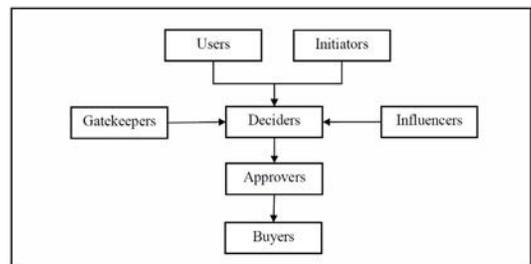


Figure 1 The Diagram of Buying Center

A person can take several roles simultaneously as each role can be held by many people. Understanding this structure is important for business-to-business marketing as it helps to define the right contact points and selling efforts.

In business buying, all costs and benefits are taken into account in terms of monetary viewpoints. Thus, the compensation between the benefit and cost is crucial to encourage the buying

decision. (Kotler & Keller, 2014). Furthermore, the complexity of the buying decisions arises as more parties, more money, more risk and more careful and well-rounded consideration are needed (Kotler & Pfoertsch, 2006).

The business buying-decision process can be described in 8 stages called “Buyphases” (Kotler & Keller, 2014) as follows:

1) Problem Recognition: The beginning of the buying process when the needs or problems are reckoned and addressed by an acquisition of a product or service by either internal or external incentive

2) General Need Description: The outline of the preferred quantity and timeframe to obtain the products or services (Kotler & Pfoertsch, 2006)

3) Product Specification: The establishment of the desired product or service specification in detail including technical term, commercial term and other relevant agreements

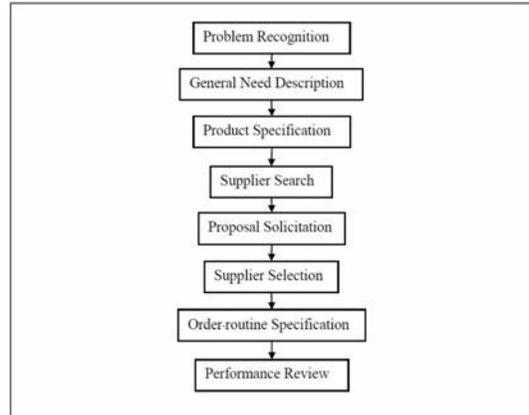
4) Supplier Search: The attempt to find the suitable vendors through both online and offline media

5) Proposal Solicitation: The submission of proposal from the qualified potential suppliers for evaluation and selection

6) Supplier Selection: The identification of the supplier by ranking the desired attributes of the candidate companies from evaluation criteria

7) Order-routine Specification: The agreement on finalized order specifications, quantities, warranties and other relevant deals

8) Performance review: The evaluation of the chosen supplier’s performance (Kotler & Keller, 2014)



**Figure 2** Buyphases of the Industrial Buying Process

### 3. Research Methodology

Secondary data sources and qualitative research approaches were used to investigate the research problem. The detailed research design is explained as follows:

#### 3.1 Secondary Data Collection and Observation

The desk research was implemented to gather secondary data from various credible sources such as books, magazines, websites, government publications, conference interviews, related market research reports, etc. These sources of information were able to provide the information on the following:

- The comparison of military budgeting between Thailand and other countries in AEC region
- The procurement regulations for government organizations in Thailand
- The market trend of the small arms simulator both in Thailand and worldwide
- The policy to support the growth in self-help defense technology in Thailand

#### 3.2 Interviews with Military Officers

The primary data were acquired only through in-depth interviews as the target respondents

were quite limited and specific. These interviews were the main source of data to get the insights about the military and security trainings. They were conducted with the officers who were the influencers or the decision makers in buying the small arms simulators of military units and other defense-related organizations. The result of the interview delivered the information on the current methodology of trainings, the interest in looking for the substitution or addition of the training media, the criteria which they consider when they make a purchase, etc.

### 3.2.1 Target Population

Nonprobability sampling method was used to recruit the respondents for this study. The respondents were selected based on their roles in the decision-making unit. For the purchase of small arms simulators, the population includes:

1) Military Officers who partook in the military procurement process, especially for the Small Arms Simulator mainly from Royal Thai Army and Royal Thai Air Force

2) An expert from Defense Technology Institute who is working on a small arms simulator project called Virtual Shooting Range

| Unit   | Appointment Date  |
|--|-------------------|
| Defence Technology Institute   | October 27, 2016  |
| Security Force Training Center, Royal Thai Air Force                                 | December 21, 2016 |
| Technical Affairs Division, Directorate of Joint Communication, Royal Thai Air Force | January 23, 2017  |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 31 <sup>th</sup> Infantry Regiment<br>King's Guard (Rapid Deployment Force),<br>Royal Thai Army | February 15, 2017 |
|---|-------------------|

### 3.2.2 Data Collection Plan

In-depth interview

|                        |   |
|------------------------|---|
| Method of recruitment  | Personal connection                     |
| Duration per interview | No more than 60 minutes                 |
| Method of interview    | Face-to-face and telephone              |
| Location               | On-site as appointed by the respondents |

### 3.3 Analysis of Qualitative Data

The information from each in-depth interview was simplified, analyzed and summarized by using content analysis to draw the conclusion for the research objective 2.2, 2.3, 3.1 and 3.2. The interview response was extracted based on the following frameworks:

- Noteworthy actual quotes from the officers
- Summary of the comments on the current training methodology or system used in trainings
- Summary of the perception toward the use of small arms simulator as an aid of trainings
- Summary of the current suppliers of the small arms simulator in Thailand
- Summary of the influential persons who take the key roles in procurement process of the training system

## 4. Result and Discussion

### 4.1 Main Findings from In-depth Interview

- The training centers, which are currently owning the shooting training simulators, use both field training and simulator in marksmanship training.

- Small arms simulator can help to reduce the cost of training and provide more efficient utilization of resources.

- By practicing with shooting simulator, the trainees are able to be familiarized with the weapon with minimal risk of getting injured from the unacquainted use of the firearm.

- Various training situations can be implemented and adjusted to serve training objectives in order to offer “we train as we fight” experience to the trainees.

- The trainees are able to maintain or enhance their marksmanship skill through training in the simulated shooting environment.

- The Ministry of Defence is expecting for the simulator that is produced by the local manufacturers in order to decrease cost as well as to support the Research and Development of defense technology within the country.

- “The market in Thailand alone is quite big because shooting is a fundamental skill that needs to be trained. Every unit that requires the use of guns are our potential customers. However, the extent of advancement of the simulator, such as fidelity, functionality, etc. varies according to the level of the users.” said the interviewee who is a project manager on Virtual Shooting Range project at Defence Technology Institute.

### 4.2 AEC Defense Industry

The ASEAN Economic Community (AEC) comprises 10 countries in Southeast Asia region: Brunei Darussalam, Cambodia, Indonesia, Lao PDR, Malaysia, Myanmar, Singapore, Vietnam and Thailand. It was established with the aim to accelerate the regional economic growth and encourage cooperation between the member states in developing and assisting on the matters of mutual interest (About ASEAN, n.d.). ASEAN is on the rise to become more influential in the global defense industry (Smith, 2016). Southeast Asia’s Military expenditures steadily grew during 2010 to 2014 and accounted for USD 38.2 billion in 2014 (Thai Military and Asian Region, 2016). During 2009 to 2016, the defense imports of the region went up by 71%. Furthermore, Indonesia and Vietnam are considered to be in the top 5 of defense import countries over the next ten years. (IHS Global Defence Trade Report, 2016).

Indonesia – the country has long been having an upward trend for the investment in defense. With its strong growth in economic, its defense expenditure increased nearly 40% from USD 5.36 billion to USD 7.39 billion since 2012 to 2017. It is expected to reach USD 9.32 billion by 2021. Indonesia Armed Forces (TNI) is modernized based on the “Minimum Essential Force” (MEF) strategy that determines the minimum capabilities of the nature of Indonesian military to response to both internal and external threats. With this strategy, the defense procurement is predicted to go up by 42% from USD 1.57 billion in 2017 to USD 2.24 billion in 2021 from the major procurement plan for purchasing weapons and armaments. The competition in

the defense market of Indonesia is strong as there are many military suppliers presented (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Indonesia, 2017).

Vietnam – the increase in defense investment stemmed from the continuous and fast-growing economy of the country as of 2017 and its inclination to open up its defense market. The country's defense budget is predicted to increase by 26% from USD 4.85 billion in 2017 to approximately USD 6.12 billion by 2021. Within the same period, the procurement expenditure is forecasted to rise sharply from USD 922 million to USD 1.22 billion. Vietnam is seen as a high potential defense market. With the offshore challenge, the country pursues the strategy on developing the military competence in air and naval domains (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Vietnam, 2017).

Malaysia – the slowdown in economic growth of Malaysia restricted the expansion of Malaysia defense market. However, it is forecasted that the economic growth will be resumed between 2016 to 2020 causing a slight increase in the core defense budget around 11% from USD 4.13 billion in 2017 to USD 4.60 billion in 2021. The procurement spending is also expected to rise from USD 0.98 billion to USD 1.14 billion during 2017 to 2021. Numerous security concerns and the desire to keep up with military modernization are the drivers for Malaysia in military procurement (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Malaysia, 2016).

The Republic of Philippines – the transferring of military pensions to a different part of national expenditure program during 2011 to

2014 caused the defense budget to remain stable. It is expected to rise from USD 3.9 billion to 4.6 billion or increase by 17% during the period between 2017 and 2021 after the reorganization.

The procurement expenditure also opts the same trend with the projected increase of 29% starting from USD 767 million in 2017 and rising up to USD 990 million in 2021. The drivers of the growth in procurement spending are internal insurgent issues and tension in offshore territory incursions (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Philippines, 2016).

Singapore – the defense investment of Singapore is determined by the mature foreign policy. The country intends to balance between developing military capability to conquest regional rivals without accelerating tensions, at the same time, stirring a regional arms race through inflammatory purchases of materiel. The defense budget increased by 6.4% from 2015 to 2016 which brought it up to USD 10.2 billion. The budget is forecasted to rise 9% from USD 9.8 billion in 2017 to USD 10.7 billion in 2021. The projected growth in procurement spending is about 14% from USD 1.7 billion in 2017 to USD 1.9 billion in 2021. The country's defense market is influenced by its strong national economy, stable political system and potential regional disturbance (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Singapore, 2016).

Brunei Darussalam – an overall increase of 3% is projected for the defense budget during 2017 to 2021 (from USD 387 million to about USD 400 million). The procurement expenditure is predicted to climb from USD 64 million to USD 72 million or approximately 13% throughout the

same period. The country is committed to the advancement of military technology and the borders and maritime territory security. Therefore, a large proportion in the defense budget is allocated to the procurement (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Brunei, 2016).

Cambodia—the country owns one of the lowest defense budget in Asia. However, the military budget will go up around 20% from USD 435 million in 2017 to USD 522 million by 2021. The procurement budget is expected to have 28% growth from USD 45 million in 2017 to USD 58 million in 2021. Cambodia does not encounter any apparent external threat. No primary threats toward the national sovereignty despite the risk related to land borders, transnational crime and civil unrest. The expenditure budget will mainly be used to improve salaries and conditions for soldier with limited procurement allocation (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Cambodia, 2017).

Myanmar – the country has high economic potential with 14% forecasted rise in defense expenditure between 2017 and 2021 from USD 2 billion to USD 2.32 billion. Similar rate is also applied to the growth in procurement spending which is estimated to reach USD 594 million by 2021. This figure is accounted for 13% increase from USD 518 million in 2017. The country's reformation in 2011 leads to the needs of military modernization to improve its strategic position in the region as well as defend offshore assets and attain military balance with regional rivals (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Myanmar, 2017).

#### 4.2.1 Thailand's Defense Industry

The former military government is the key driver to the domestic defense industry in Thailand. Thai military budget rises continuously every year (Thailand-Defense and Security, 2016). In 2014, Thailand had 15% of ASEAN total military expenditure which ranked the third place for budget in the region (Thai Military and Asian Region, 2016). It is reported that the 2017 defense budget of THB 210.7 billion or USD 6 billion was approved by Thailand's National Assembly. This figure represents 7% of total government expenditure during the year and is 2% higher than expenditure in 2016 (Grevatt, 2016): more than 49% is allocated to Royal Thai Army, 19% to Royal Thai Navy and 18% to Royal Thai Air Force (Thailand-Defense and Security, 2016). The military budget is predicted to keep rising by 6% during 2017 to 2021. It is also forecasted that the procurement budget will portray overall growth of 20% from USD 743 million in 2016 to USD 842 million by 2021. The purpose of increasing the military budget is to sustain combat readiness, equalize the competition in ASEAN in growing the number of powerful armaments and elevate the arm forces capabilities of the country (Anderson & Burton, Navigating the Emerging Markets - Thailand, 2016).

In 2015, Thailand earned high rank on the Institute for Economic & Peace Terrorism Index (ranked 10th), which signified high number of terrorist activities comparing to other countries worldwide (Global Terrorism Index 2015, 2015). Consequently, it shows the promise for the surge in demand of defense and security equipment with the US as a major source of defense equipment

(Thailand-Defense and Security, 2016).

The local defense industry in Thailand is dominated by the Ministry of Defence who also possesses defense-related factories as well as cooperates and supports the development of facilities with private firms. Furthermore, Thai government plans to advance the industry to lessen the dependency on imports, encourage technology transfer and reinforce national security. More defense technology development and defense intelligent systems are to be invested and procured in order to strengthen military capabilities (Thailand-Defense and Security, 2016).

The offset policy is pushed forward in response to this determination. This offset policy, in terms of defense industry, is a kind of purchase contract that is not only relevant to monetary matter of trading products or services but also on other profitable aspects such as transfer of technologies, localized production, etc. The term of the agreement usually focuses on increasing the competitive advantage of the buyer country through knowledge and technology transfer from the seller country. This contributes the self-help concept in defense technology in the long run. The offset policy is able to lessen the time required for Research and Development (R&D), reduce the cost of technology transfer and production in defense industry. Consequently, it can lead to the development in economical competency of the country with earnest investment, R&D promotion, employment, diminished trading deficit and advance the production for export (Strategy Technology Analysis Department, 2016).

According to the result from the in-depth

interview, Thai military uses both local and international manufactured small arms simulators. The simulators are purchased through authorized distributors in Thailand for each system. Furthermore, Defense Technology Institute, a public organization under the Ministry of Defence, has an ongoing project to develop the system in order to serve the demand from user units with lower cost.

### 4.3 Small Arms Simulator Industry

#### 4.3.1 Industry Structure

The small arms simulator is included in the indoor shooting ranges market which is accounted for about 40% of the total shooting ranges worldwide market in 2015 with the projected CAGR of 10.39%. The small arms simulator, itself, owned 54% share in the total global indoor shooting ranges market in 2015 and was predicted with CAGR of 12.49% from the market size of USD 156.83 million in 2015 to USD 282.54 million in 2020. In terms of volume, the market size for the small arms simulator in 2015 was around 496 units and expected to reach 513 units by 2020. It is also forecasted that the shooting simulator will grasp the market size, share and growth from the traditional indoor targets during 2015 to 2020 (Shooting Ranges Market Forecast to 2020, 2015).

Nowadays, there are many small arms simulator systems existing in the market. Meggitt Training Systems' FAT M100 is widely used in many countries including the UK, Canada, Italy, Australia and the US. Cubic's systems, Engagement Skills Trainer 2000 and EST 3000 are widely used especially in the Middle East

although they were initially developed for the US Army. Thales's Sagittarius Evolution is used in Netherlands, Japan, Botswana, Denmark, Portugal and India. RUAG's SITTAL small arms trainer is exploited by the French Army. Saab's SAVIT serves their customers in Saudi Arabia and Japan (Jameson, 2016). The latter system is also used in the Malaysian Armed Forces and is claimed to enhance the training for their defense personnel (Saab Has Solution for Realistic Training of Malaysia's Defence Personnel, 2016).

In Thailand, there are 3 major suppliers for small arms simulator systems: Amornmas Co., Ltd., Astra Technology Co., Ltd. and Global Technology and Ex-Im Co., Ltd. These companies are the importers of military training equipment and technology (DOTTS-10, n.d.; Astra Technology, n.d.).

#### 4.3.2 Current Suppliers

Amornmas Co., Ltd. has been serving Thai armed force for more than 25 years with the competency in military training technology. They locally develop DOTTS-10, a laser shooting system for training infantry shooting skill that can be used from basic to advanced trainings. The system, built by their in-house technology, also includes the modified weapons which can simulate realistic force and input various parameters used in training such as number of bullets, trigger pressure, etc. Furthermore, they offer custom-built scenarios and shooting programs (DOTTS-10, n.d.).

Astra Technology Co., Ltd., founded by experienced executives in defense related business activities is a supplier for military products and

services from USA, Europe and Israel to Royal Thai Armed Forces (Astra Technology, n.d.). This company is the distributor for Milo Range, the world leading simulation manufacturer which standardizes interactive use-of-force, tactical judgement training and firearms training system globally. They offer wide range of shooting simulation training systems from compact scale to multi-room for team training with their cutting-edge technology and solutions. The simulations are also equipped with advanced training features, such as weapons, knowledgebase, trainee action capture as well as customizable and ready-to-train scenarios to meet their customers' training objectives (Milo Range Products, n.d.).

Global Technology and Ex-Im Co., Ltd., is the distributor for Meggitt Training Systems' FATS M100. With high fidelity in visuals and target presentation, the simulator can be used in joint training up to 24 weapons and multiple-hit detected channels for scalable training abilities. It also supports mixed weapons for Lanes and Collective sessions. The simulation can be built upon the users' requirement (FATS M100 Simulation Training System, n.d.).

These companies are competing at the B2G level in which similar marketing strategies are adopted to push their products to the key persons in the buying decision-making process. They have their product showcase at defense-related tradeshows or directly approach the senior officers whose responsibility to elevate the military units' competencies in order to build the awareness to the company. It was found from the in-depth interview that the well-established connection is one of the keys to the successful

buying agreement besides the product specifications and features offered that can serve the user's requirement and appropriate price.

There are no contracts signed to commit the users with the particular suppliers once they buy the product. However, the suppliers normally offer limited-time warranty, training session for instructors who need to be familiarize with the system, maintenance and technical service and regular on-site visit. These approaches help to maintain the relationship between the buyers and the suppliers.

#### **4.4 The Structure of Military Procurement Decision Making**

Thailand's military procurement process follows the regulations of the Office of Prime Minister on Procurement B.E.2535 (1992) (Regulations of the Office of the Prime Minister on Procurement B.E.2535 (1992), 1992). This regulation is also applied to other government organizations and across different military services. The overall structure of the parties relevant to the procurement process is the same among military and security units which include Royal Thai Army, Royal Thai Air Force, Royal Thai Navy, Royal Thai Armed Force and Royal Thai Police.

The military procurement is generally conducted in a bottom-up manner. The process can be divided into 3 levels on the basis of the amount of budget to be approved. The summary of the overall procedure can be summarized as shown in Figure 3.

Starting from preparing the Term of Reference (TOR), the User Units state the need recognition,

general need description and specification of the desired product and submit the request to the Procurement Division. The Procurement Division considers the availability of the resources to create a procurement plan as well as setup a procurement committee to assess the plan with the preliminary approval from the Commander-in-Chief. The procurement plan is sent to the Directorate of Operations before it is evaluated and forwarded to the Commander-in-Chief. The approval of the procurement can be done at this position if the requested budget is within the authorized budget limit which is no more than THB 50,000,000. For higher budget limit authorization, the procurement plan must be approved by the Supreme Commander. At this level, the proposal is scrutinized based on the military service regulation and 5-year defense plan. The Joint Chiefs of Staff examines the proposed needs and prioritizes the budget allocation based on the type of equipment, the operation unit that requests for the product and the security requirement (Wattanayagorn, 1998).

The approval of the procurement plan is made by the Supreme Commander in accordance with the Joint Chiefs of Staff's consideration. Then, it is passed to the Directorate of Joint Operations for recommendations before sending it to the Permanent Secretary. The joint committee is constituted by the representatives from the military services. At this point, the proposal is checked against the policies and regulation of the ministry before it is submitted to the Ministry of Defence for approval. However, only the plan limited to no more than THB 100,000,000 can be approved by this level. The

procurement proposal above this limit is sent further to the Cabinet with the confirmation on the availability of fund from the Bureau of the Budget. If it is approved by the Cabinet, the procurement plan will be included in the Ministry of Defence expenditure and proposed to the Parliament for the next government budget preparation. The Budget Scrutiny Panel of the House of Representatives assesses the proposed budget with the consultancy from the Military Affairs Committee of the House of Representatives on any particular issues related to military procurement proposals. Finally, the approved budget plan is submitted to the Parliament to be included in the blueprint of the annual budget bill. The normal routine of military procurement can be executed by the Ministry of Defence in the following fiscal year after the bill is accepted (Wattanayagorn, 1998).

#### **4.4.1 The Buying Center in Practice for Small Arms Simulator Procurement**

Additional information of the procurement process for Small Arms Simulator was investigated through the in-depth interviews with senior officers from the current User Units. Similar patterns in the buying process are described as below;

The need recognition comes either from the User Units' initiation, the product presentation from suppliers or the suggestion from the Technical Affairs Division, Directorate of Operations. The User Units, then, draw up the Term of Reference (TOR) stating their general need description as well as product specification. Although the User Units are responsible for searching the information

about their desired system, they are not authorized to specify the suppliers of the simulation. Instead, the approval committee, consisting of Directorate of Operations and Chief of Staff from Technology-related sector, is responsible to find the best suitable provider respectfully to meet the need required from the users. The Directorate of Operations is also accountable to evaluate, negotiate and adjust the submitted proposal together with the suppliers in order to generate the best trading agreement. This also includes order-routine specification. The approval of the procurement depends solely on the authorized money limit as mentioned earlier.

With this practice, the matrix of buying center can be developed as in Table 5. It can be seen that one personnel can be responsible for multiple roles in the buying center. The influencers can be the Directorate of Operations who seek for appropriate suppliers to serve the users' requirement, the commander-in-chief who is approached by the suppliers and sees the benefits of the simulator in enhancing the units' competencies or even the suppliers themselves who can attract the personnel in the buying center with their sales strategy. As mentioned earlier, good connection can bring about a successful trading agreement. Therefore, approaching gatekeepers can be considered as an important part in this nature of business dealing. User Units act as the gatekeepers even though they cannot choose a specific supplier because they can express their interest in the product through their outlined product specification when writing TOR. The Directorate of Operations is the gatekeeper in the way that they can

choose or not choose a particular supplier and propose to the approval committee while the Commander-in-Chief and higher level personnel

can decide whether to recommend the product to User Units or Directorate of Operation after they have been approached by the suppliers.

**Table 1** Summary of Defense Budget and Procurement Expenditure

| Country                     | Defense Expenditure 2017 (USD) | Predicted growth in Defense Expenditure (2017-2021) | Defense Procurement Expenditure 2017 (USD) | Predicted growth in Defense Procurement Expenditure (2017-2021) |
|-----------------------------|--------------------------------|---|--|---|
| Indonesia                   | 7.39 billion                   | +26%  | 1.57 billion                               | +42%  |
| Vietnam                     | 4.85 billion                   | +26%  | 922 million                                | +33%  |
| Malaysia                    | 4.13 billion                   | +11%  | 0.98 billion                               | +16%  |
| The Republic of Philippines | 3.9 billion                    | +17%  | 767 million                                | +29%  |
| Singapore                   | 9.8 billion                    | +9%   | 1.7 billion                                | +14%  |
| Brunei Darussalam           | 387 million                    | +3%   | 64 million                                 | +13%  |
| Cambodia                    | 435 million                    | +20%  | 45 million                                 | +28%  |
| Myanmar                     | 2 billion                      | +14%  | 518 million                                | +13%  |
| Thailand                    | 6 billion                      | +6%   | 743 million                                | +11%  |

**Table 2** Major Small Arms Simulator Systems

| Company | System                                   | Users   |
|---------|--|---|
| Meggitt | FAT M100                                 | UK, Canada, Italy, Australia, USA                         |
| Cubic   | Engagement Skills Trainer 2000, EST 3000 | Middle East   |
| Thales  | Sagittarius Evolution                    | Netherlands, Japan, Botswana, Denmark, Portugal and India |
| RUAG    | SITTAL                                   | France  |
| Saab    | SAVIT                                    | Saudi Arabia, Japan, Malaysia                             |

**Table 3** Small Arms Simulators Suppliers in Thailand

| Company                               | System     | Users   |
|---------------------------------------|------------|---|
| Amornmas Co., Ltd.                    | DOTTS-10   | Royal Thai Army   |
| Astra Technology Co., Ltd.            | Milo Range | The 31st Infantry Regiment King's Guard Rapid Deployment Force, Royal Thai Army |
| Global Technology and Ex-Im Co., Ltd. | FATS M100  | Security Force Training Center, Royal Thai Air Force                            |

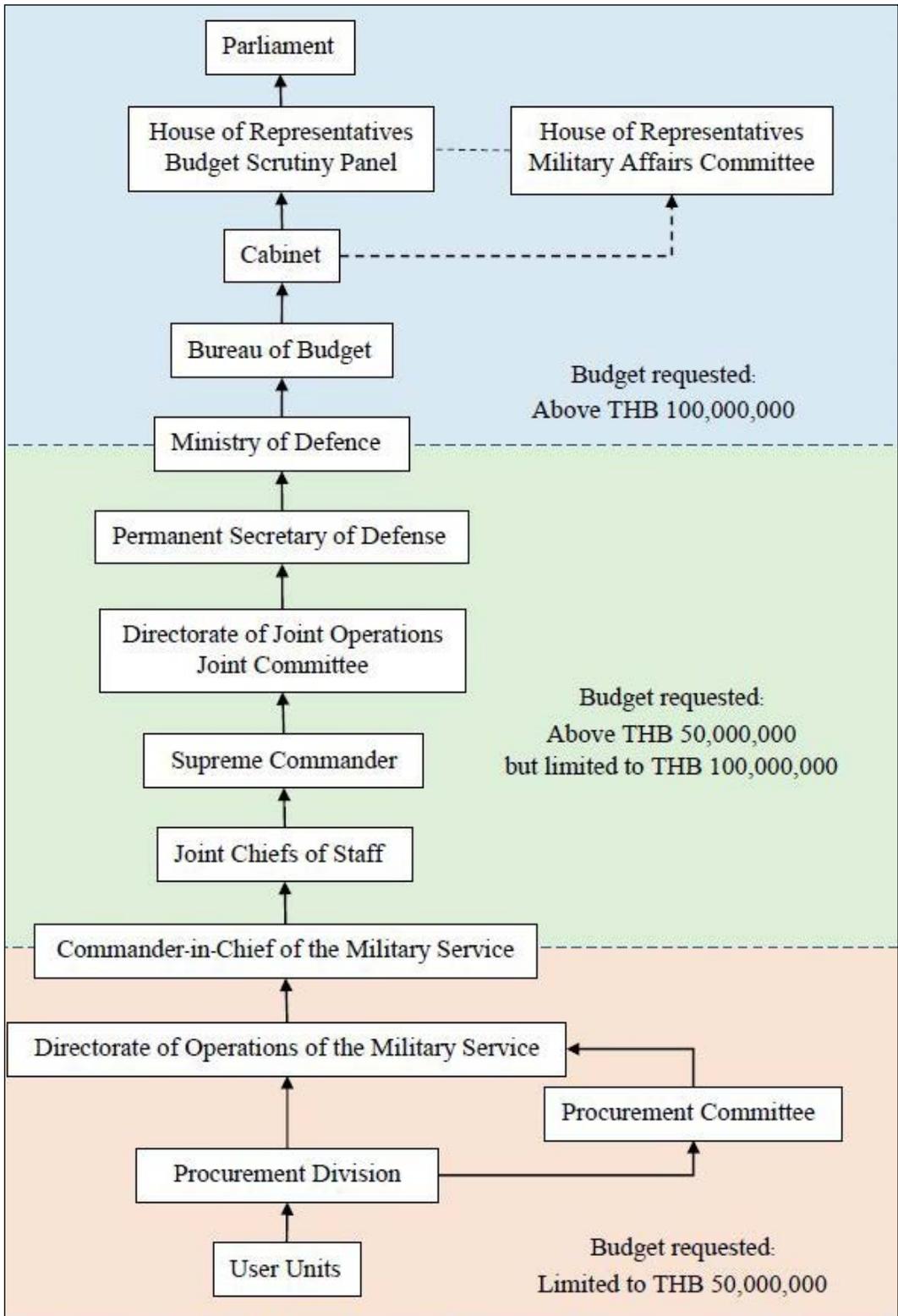


Figure 3 The Diagram of Military Procurement Structure

**Table 4** The “Buyphases” Matrix from the Existing Case of the Small Arms Simulator Procurement

| Buying Stage                | User Units | Suppliers | Directorate of Operations |
|-----------------------------|------------|-----------|---------------------------|
| Problem recognition         | ●          | ●         | ●                         |
| General need description    | ●          |           |                           |
| Product specification       | ●          |           |                           |
| Supplier search             |            | ●         |                           |
| Proposal Solicitation       |            | ●         | ●                         |
| Supplier Selection          |            | ●         |                           |
| Order-routine specification |            | ●         | ●                         |
| Performance review          | ●          |           |                           |

**Table 5** The Matrix of the Buying Center for Small Arms Simulator Procurement

| Buying Center   | User Units | Directorate of Operations | Commander-in-Chief or higher | Suppliers |
|-----------------|------------|---------------------------|------------------------------|-----------|
| Users           | ●          |                           |                              |           |
| Decision-makers |            | ●                         |                              |           |
| Influencers     |            | ●                         | ●                            | ●         |
| Gatekeepers     | ●          | ●                         | ●                            |           |
| Approver        |            |                           | ●                            |           |
| Buyer           |            | ●                         |                              |           |

## 5. Conclusions

Small arms simulator is a tool that can help to enhance military officers in marksmanship. It offers comparable training experience in gun shooting practice with several benefits over the traditional shooting range. First, it provides better utilization of training resources especially the expenses on ammunition and time. The virtual shooting

range does not require the use of real bullets. Hence, it is also good for waste management. Furthermore, the training set-up can be done easily in no time. Second, the use of small arms simulator can address the safety issues in shooting training. It is able to diminish the risk of damages caused by the unfamiliarity of using weapons. In addition, dangerous situations can be implemented as the training scenario without

causing any physical harm to trainees. Third, the simulators can track the performance of the trainees unlike the traditional firearm training.

Small arms simulator has become more popular over time. It is reported that it captured 54% share of the total indoor shooting ranges market in 2015 globally and is forecasted to win over the traditional indoor shooting ranges in market size, market share and growth in five-year time. The expansion of this technology is also portrayed through the number of competitors in the global market. Thai military solely uses firearm simulators from 3 major suppliers: Amornmas Co., Ltd., Astra Technology Co., Ltd. and Global Technology and Ex-Im Co., Ltd. Each of them is the distributor of different simulator companies. In addition, Defense Technology Institute, a public organization under Ministry of Defence, is currently conducting a research and development of such system to lessen the cost in purchasing the simulators to better cope with the demand from user units.

AEC defense industry is becoming more prominent in the global defense market. Most of the countries in the region experience the growth in military budget and expenditure including procurement spending. Each country aims to elevate their military competence with respect to the foreseeable threat from both inside and outside of the country. Moreover, the military modernization signifies the supremacy position of the country within the region. This is reflected through the undergoing regional arm race. This can be seen as the opportunity for the small arms simulator to grow in the AEC region.

Thailand, itself, also adopts the military

modernization. Large amount of budget is allocated to procure the materiel to keep up with other ASEAN nations with the military government as the key driver of the domestic defense industry of the country. The plan is to advance the industry to lessen the dependency on imports, encourage technology transfer and reinforce national security.

The small arms simulators in the military units in Thailand are either imported or manufactured locally by the aforementioned suppliers. It is also one of the ongoing project at the Defence Technology Institute with the attempt to supply the military training units with the simulator at lower price. Shooting skill is a fundamental capability that the defense personnel needs to be trained. Thus, there are the demand gaps to be filled as the potential users are the sub-units of the military service and the training requirements are different among the levels of trainees.

The buying process of a small arms simulator follows the step assigned by the Office of Prime Minister on Procurement B.E.2535 (1992). The bottom-up buying conduct starts from the procurement proposal from User Units and forwards up to the level with the authority in budget approval. The User Units are responsible to seek information about their preferred system specification and state their needs in the procurement proposal. However, they are not obliged to specify a particular supplier. Instead, the supplier is chosen by the Directorate of Operations with credibility as one of the significant criteria besides the product attributes and appropriate price. Therefore, it is important for the suppliers to approach the right person in order to be in the

consideration set. After the procurement plan is done and the supplier is selected, the document is forwarded to the authorized approval body based on the requested budget.

## 6. References

- (n.d.). Retrieved December 24, 2016, from DOTTS-10: <http://www.amornmas.com/dotts.htm>
- (n.d.). Retrieved December 24, 2016, from Astra Technology: <http://astratech.co.th/>
- (n.d.). Retrieved December 24, 2016, from Milo Range Products: <http://www.milorange.com/products/products.php>
- (n.d.). Retrieved December 24, 2016, from FATS M100 Simulation Training System: <https://www.meggittrainingsystems.com/Military/Simulation-training/FATS-M100->
- (2015). Retrieved from Shooting Ranges Market Forecast to 2020: <http://www.marketsandmarkets.com>
- (2015). Retrieved December 12, 2016, from Global Terrorism Index 2015: <http://economicsandpeace.org/wp-content/uploads/2015/11/Global-Terrorism-Index-2015.pdf>
- (2016, June 16). Retrieved from Gun Simulation Facts: <http://virtualsafeshot.com/gun-simulation-facts/>
- (2016). Retrieved November 28, 2016, from Thai Military and Asian Region: <https://thaimilitaryandasianregion.wordpress.com/2016/02/23/indonesia-to-increase-defense-budget-to-18-7-billion-thailand-needs-to-follow-suit/>
- (2016, July 26). Retrieved December 11, 2016, from Thailand-Defense and Security: <https://www.export.gov/article?id=Thailand-defense-and-security>
- (2016, April 11). Retrieved from Saab Has Solution for Realistic Training of Malaysia's Defence Personnel: <http://saab.com/de/about-saab/sites/2016/dsa/media-dsa/news--stories/news--stories/2016/saab-has-solution-for-realistic-training-of-malysias-defence-personnel/>
- About ASEAN. (n.d.). Retrieved April 1, 2017, from Association of Southeast Asia Nations: <http://asean.org/asean/about-asean/overview/>
- Anderson , G., & Burton, P. (2016). Navigating the Emerging Markets - Thailand. IHS Janes.
- Anderson , G., & Burton, P. (2017). Navigating the Emerging Markets - Cambodia. IHS Janes.
- Anderson, G., & Burton, P. (2016). Navigating the Emerging Markets - Brunei. IHS Janes.
- Anderson, G., & Burton, P. (2016). Navigating the Emerging Markets - Malaysia. IHS Janes.
- Anderson, G., & Burton, P. (2016). Navigating the Emerging Markets - Philippines. IHS Janes.
- Anderson, G., & Burton, P. (2016). Navigating the Emerging Markets - Singapore. IHS Janes.
- Anderson, G., & Burton, P. (2017). Navigating the Emerging Markets - Indonesia. IHS Janes.
- Anderson, G., & Burton, P. (2017). Navigating the Emerging Markets - Myanmar. IHS Janes.
- Anderson, G., & Burton, P. (2017). Navigating the Emerging Markets - Vietnam. IHS Janes.
- Grevatt, J. (2016, September 9). Retrieved December 11, 2016, from Thailand Approves 2017 Defence Budget of USD6 Billion: <http://www.janes.com/article/63572/thailand-approves-2017-defence-budget-of-usd6-billion>
- IHS Global Defence Trade Report. (2016, June 13). Record-breaking \$65 Billion Global Defence Trade in 2015 Fueled by Middle East and Southeast Asia, IHS Jane's Says. Retrieved April 1, 2017, from Business Wire: <http://www.businesswire.com/news/home/20160613005501/en/Record-breaking-65-Billion-Global-Defence-Trade-2015%20>
- Jameson, H. (2016, October). Training Support for the 21st Century Soldier. *Military Technology*, XL(10), pp. 72-73.
- Kotler, P., & Keller, K. L. (2014). *Marketing Management*. Pearson.
- Kotler, P., & Pfoertsch, W. (2006). *B2B Brand Management*. Springer Science & Business Media.
- Regulations of the Office of the Prime Minister on Procurement B.E.2535 (1992). (1992).
- Smith, G. (2016, October 27). Indo Defence 2016: ASEAN defence spending on the rise. Retrieved April 1, 2017, from Shephard: <https://www.shephardmedia.com/news/defence-notes/indo-defence-2016-ASEAN-defence-spending/>
- Strategy Technology Analysis Department. (2016). *Offset Policy of Defense Trade*. Nonthaburi: Defense Technology Institute.
- Wattanayagorn, P. (1998). *Arms Procurement Decision Making Volume I: China, India, Israel, Japan, South Korea and Thailand*. (R. P. Singh, Ed.) Oxford: Oxford University Press. Retrieved from <https://www.sipri.org/sites/default/files/files/books/SIPRI98Singh/SIPRI98Singh.pdf>
- Yu-bing, Y. (2011). Study on Small Arms Fire Training Platform. *Journal of PLA Institute of Physical Education*, 25.

# Comparison of manufacturing effectiveness on ablative material

Suriyawate Boonthalarath <sup>1\*</sup>

Received 1 April 2019, Revised 15 August 2019, Accepted 15 August 2019

## Abstract

Fiber - reinforced ablative composite material was developed to protect the hyper thermal surrounding with hypersonic mobility. To improve the performance of mechanical properties and the ablation resistance of these composites, much research was dedicated to developing ablation behaviors such as the selection of nanoparticles for increased carbonaceous-forming ability. Nevertheless, the effect of manufacturing ablative materials processes were neglected. The comparison of preferable manufacturing process including compression molding and vacuum bag molding was investigated. Ablation results showed that compression molding had properties for manufacturing complicated shape ablative composite materials.

**Keywords :** Ablative composite material, Compression molding, Hyper thermal protection

---

<sup>1</sup> Propulsion Systems Division – RPS, Defence Technology Institute.

\* Corresponding author, E-mail: suriyawate.b@dti.or.th

## 1. Introduction

More than four decades many researches dedicated in developing on thermal protection systems field especially fiber-reinforced composites ablators were protecting various apparatus from severe heat during hypersonic vehicle mobility for aerospace and military applications [1-3]. Several kinds of fiber-reinforced composites ablators employ organic thermosetting resins or thermoplastic polymers as matrices of materials such as polybenzimidazole, polyimides or phenolic resins [2] whereas conducting application is mainly considered carbonaceous-forming ability of matrices. The extent research of increasing efficiency this parameter would be investigated various physico-chemical phenomena matrix activities of ablator such as organic matrix decomposition, the release gas species rate and formation of carbonaceous solid on top thermal protection systems surface [2, 4-9] that illustrated in Figure 1



**Figure 1** Model of physico-chemical phenomena matrix investigation [10-11]

Therefore low thermal conductivity additives were investigated based on concept of decreasing erosion rate when thermal protection systems contact the heat flux [12]. Hussain [13] discusses the effect of functional fillers in matrix nanocomposites that presents crucial part for improved performance of organic thermosetting characteristic as well as Wang and et al. [14] propose zirconia nanofiller dispersion in the matrix that effect for the thermal stability through quantitative optimization. From the

previous research, Kango and et al. [15] and Wu and et al. [16] shown the synthesized modern composites ablators by surface modification with different liquid solvents cause enhanced nanoparticle dispersion in the matrix part. Furthermore, other groups of thermal protection systems research reveal the relation between matrices and reinforce material parts that the main role against excellent mechanical properties including desired flexible to withstand enormous shear stresses of reinforce ablator [17]. Peterson [11] evaluated several kinds of different orientations fiber in ablator as a result to reduce erosion rate on hyperthermal condition. In addition, this study was also focused on selected the long length reinforce fiber optimization while Schmidt [18] point out pro and cons of use silica/phenolic reinforced materials as ablator comparing with carbon/phenolic composites found that carbon/phenolic reinforced materials had distinguished anti-oxidizing behavior in severe condition so silica/phenolic ablators are used absolutely widespread. However, the numerous studies continue developmental approach to improved mechanical properties and the thermal stability of the composites ablator wherewith neglect the manufacturing process that one of the major problems of re-entry heat related to surface recession of ablator in severe condition. Vacuum bag molding and Compression molding were significant manufacturing process for manufactured complex shape ablator in anywhere military apparatus while vacuum bag molding was favor because this process was easier and faster than compression molding. Nevertheless, the compression molding process was using in some parts therefore the aim of this work focus on the simulated manufactured process and characterization of thermal protection systems for point out the possibility of improving the thermal stability in any military parts.

## 2. Experimental section

### 2.1 Raw Materials

On this study, fiberglass felt No.600 are used to reinforce for insulating material and the commercial resole phenolic resin was selected in this present investigation act as matrix material because exposed to severe temperature on the surface area it can be produced high char yield layer (approximated 55 - 60 %) and stable for oxidation resistance when these material degradation begins [2,4]. The solid resole phenolic resin dissolved by mixing with isopropanol in 1:1 weight ratio at ambient temperature. The properties of dissolved resole phenolic resin shown in the Table 1.

**Table 1** Properties of dissolved resole phenolic resin

| Phenolic resin       | Chemical composition |
|----------------------|----------------------|
| Solids               | 60–64%               |
| Solvent              | Isopropanol          |
| Free formaldehyde    | 0.6–0.2%             |
| Free phenol          | 11–18%               |
| pH (T = 25°C)        | 7.0–8.5              |
| Gel time (T = 135°C) | 11–18 min            |
| Color                | Golden yellow        |

### 2.2 Specimen Preparation

We study the difference of insulating material manufacture between compression molding and vacuum bag process for focus on insulation system effectiveness. At first activities were cutting the fiber glass felt to size 11 x 11 cm<sup>2</sup> and fully impregnated in resole phenolic resin container after that obviated the phenolic resin excess totally embedded matrix material assume 60% by weight. In the second step, we use thermal treatment by increased temperature up to 90°C at 2 hours in circulation

oven for eliminated amount of solvent in the infiltrated resin of insulation system. After the cure process there were divided the fabricated insulation system into two protocol namely, 1) Composite insulation system sample were prepare by create a stacking fiber glass felt sample around 14 layer according to ASTM E285-80 [5] and compression stack sample with compression molding which shown in the Table 2) Similar prior Compression stack sample were compress with vacuum bag molding that gradually increase temperature to 175°C around 3 hours at minus pressure 5 Bar. when complete manufacture both kind of stack insulation system sample there were carry out with material density test, X-ray radiography and an oxyacetylene flame test respectively.

**Table 2** Protocol of compression molding

| Program                  | Time       |
|--------------------------|------------|
| Pre heat (at 175°C)      | 10 minutes |
| De gassing (4 time)      | 10 seconds |
| Full pressing (at 175°C) | 30 minutes |
| Direct cooling           | 2 minutes  |

### 2.3 Characterization Testing

After complete the sample preparation each kind of ablative material process sample have been established with dimensions of 10 x 10 x 6 mm according to the standard ASTM E285-08 shown in Figure 2



**Figure 2** Sample of ablative materials specimen

Density Analyzer were performed with a Mettler Toledo XP 105 testing machine. The four cubic sample in each process was measured using a cantilever system compare with paraffin oil density at room temperature  $25 \pm 5^{\circ}\text{c}$  and relative humidity at  $\leq 50\%$  RH. The evaluation of density ablative material showing the indissolubility of their materials. To confirm from previous testing the coverage of matrices in each reinforced stack felt.

**Table 3** Condition setup for X-ray radiography

| Program            | Condition |
|--------------------|-----------|
| Voltage            | 120 kV    |
| Ampere             | 1.2 mA    |
| Exposure times     | 1 sec     |
| Focal spot         | 2.5 mm    |
| Source to specimen | 1500 mm   |

X-ray radiography was employed to investigate both density of sample and defect characteristics factors that elucidated demerit on manufacture process and the experimental setup condition presented by Table 3. Ablation test was carried out to appraise mass ablative rate of ablative materials with an oxy acetylene flame system [19-21] in current study by following the experimental setup according to the standard ASTM E285/08 wherewith this standard suggested the testing of flat specimen bed in condition of steady flow hot stream by oxyacetylene burner. In the ablative specimen test bed was placed perpendicular to hot stream and kept distance from the specimen to torch nozzle at 20 mm [20]. During ablative specimen testing it was measured by K-type thermocouple which fitted on the central back surface of ablative specimen. The linear ablation rate (ARL) was calculated using the following formulas [22],

$$ARL = (d1 - d2)/t$$

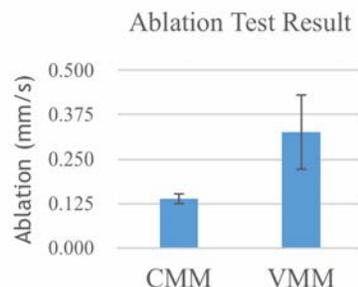
Where linear ablation rate are ARL and d1 and d2 are thickness of specimens before and after ablation test (mm), and t is ablation time (s).



**Figure 3** Oxy-acetylene flame test apparatus

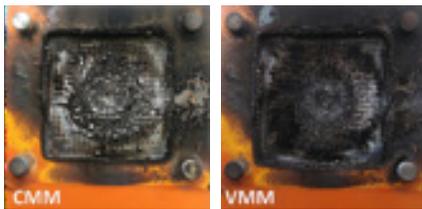
### 3. Results and Discussions

Oxyacetylene flame exposure tests was employed to investigate performance of each ablative materials by measuring the period of surface recession time. The thickness of specimen and the penetrated heat flux duration from torch nozzle are reported in Figure 4. The representative of difference manufacturing ablative material in this study divided into two categories that consist of ablative compression molding material (CMM) and ablative vacuum bag molding material (VMM). From the data are reported in Figure 4 found that trend of materials degradation on VMM specimen was clearly higher than CMM specimen. Nevertheless, CMM specimen show the best results in terms of linear ablation rate that unable to concluded the compression molding implement was better than vacuum bag molding method.



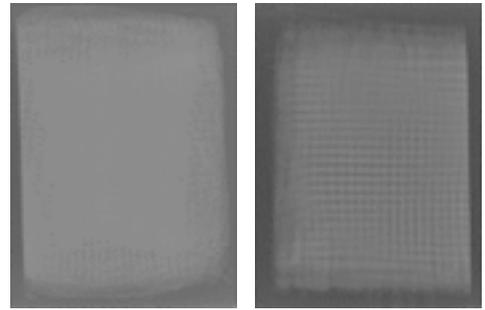
**Figure 4** Oxy-acetylene exposure tests

When we considered the burned surface of the top in each specimen that reports in Figure 5. CMM specimen have highly viscous melt layer which covers on the top much more than VMM surface specimen. These highly viscous melt layer working as an anti-oxidizing protective barrier without inhibiting radiative cooling [2-3] so the CMM specimen have lower erosion that improved the ablative performance. This result can be explained considering the major role of these layer were widely discussed the effect of formation of a uniform char layer at the surface [3]. Which the uniform packed regions of CMM specimen reveal performance of endothermic absorber in boundary layer [23] that influenced form manufacturing process.



**Figure 5** Burned surface of CMM and VMM

To understanding deeply the effect of manufacturing process, X-ray radiography is referred to support their reasons. All tested samples were evaluated in order to observe the interrelation between matrices and reinforce ablative materials or defect on manufacturing process and explained the understanding of difference uniform char layer in CMM specimen and VMM specimen that occur. Infiltration process of matrices in difference methods was measured by X-ray radiography that shown in Figure 6



**Figure 6** X ray micrograph show defect of CMM and VMM specimen from left to right respectively.

The interpretation to comparing density in each specimen observed by pixel value of image when the pixel value of CMM specimen (11,800 – 11,900) was lower than VMM specimen (12,500 – 13,000) reported in Table 4.

**Table 4** Pixel value of specimen

| Sample | Pixel value     |
|--------|-----------------|
| CMM    | 11,800 – 11,900 |
| VMM    | 12,500 – 13,000 |

This value indicated penetration power beam of X-ray resist with dense of CMM specimen better than porous VMM specimen. On the other hand, The VMM specimen have many internal void regions that corresponding to the previous data of Oxyacetylene flame test. The void regions in VMM specimen are present non-uniform erosion rates which lead to rough surfaces that are more susceptible to mechanical erosion [3, 25] and internal rough surfaces inhibit phenolic resin pyrolysis to produced carbonaceous residue or char layer consequently, VMM specimen shown inferior ablative performance. From the discussion above the Oxyacetylene flame tests previous result their interpolate with x-ray support result concluding that diffusion surrounding pressure of vacuum bag molding method unable

reduce the void volume inside ablative materials. Although the density of difference manufacturing ablative materials have similarly that reported in Table 5. Finally, this work research point out the key factor for increased the thermal stability in ablative manufacturing process is diffusion surrounding pressure.

**Table 5** density of ablative materials

| Sample | Density value |
|--------|---------------|
| CMM    | 2.2009        |
| VMM    | 1.9332        |

#### 4. Conclusions

In this study, the effect of manufacturing ablative materials process were analyzed. Thermal stability and defect of ablative materials were evaluated from Oxy-acetylene exposure tests, X-ray radiography and density test. From these results, the thermal stability was increased with increasing diffusion surrounding pressure that ease selected to compression molding for fabricated the ablative materials.

#### 5. Acknowledgments

First of all, we wish to thank Defence Technology Institute (Public Organization) Ministry of Defence for helping us to assemble all data and financial support. We wish to express our gratitude Dr. J. Koo (University of Texas at Austin) for sharing with us some experience thus enabling the preparation of this contribution.

#### 6. References

[1] B. Laub, E. Venkatathy: Thermal Protection System Technology and Facility Needs for Demanding Future Planetary Missions. In: Proceedings of international workshop on planetary probe atmospheric entry and descent trajectory analysis and science, Lisbon, Portugal; 2003.  
 [2] G. Pulci, J. Tirillò, F. Marra, et al.: *Compos Part A Appl Sci Manuf* Vol. 1483–90 (2010), p. 41  
 [3] N. Maurizio, M. Marco, M. José, T. Luigi: *Compos Part A Appl Sci Manuf* Vol. 1197–1204 (2011), p.42

[4] E. Venkatapathy, B. Laub, G. Hartman, et al.: *Adv Sp Res* Vol. 138–50 (2009), p.44  
 [5] Y. Chen, F. Milos: *J Spacecr Rockets* Vol. 475–83 (1999), p.36  
 [6] M. Natali, M. Monti, D. Puglia, et al.: *Compos Part A Appl Sci Manuf* Vol. 174–82 (2012), p.43  
 [7] R. Palaninathan, S. Bindu: *J Spacecr Rockets* Vol. 971–9 (2005), p.42  
 [8] K. Trick, T. Saliba: *Carbon NY* Vol. 1509–15 (1995), p.33  
 [9] D. Peterson, J. Winter and A. Jr. Shinn: Rocket engine evaluation of erosion and char as functions of fabric orientation for silica-reinforced nozzle materials. (NASA TM X-1721, 1969).  
 [10] R. Balaji, M. Sasikumar: *Polymer* Vol. 6634-39 (2014), p.55  
 [11] Information on [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2013/t\\_5.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2013/t_5.html)  
 [12] D. Cho, B.Yoon: *Compos Sci Technol* Vol. 271–80 (2001), p.61  
 [13] ASTM E285-08(2015), Standard Test Method for Oxyacetylene Ablation Testing of Thermal Insulation Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.  
 [14] G. Pulci, L. Paglia, V. Genova, et al.: *Compos Part A Appl Sci Manuf* Vol. 330–337 (2018), p.109  
 [15] F. Hussain: *J Compos Mater* Vol. 1511–75 (2006), p.40  
 [16] S. Wang, J. Liu, C. Pai, et al.: *J Colloid Interface Sci* Vol. 140–7 (2013), p.407  
 [17] S. Kango, S. Katia, A. Celli, et al.: *Prog Polym Sci* Vol. 1232–61 (2013), p.38  
 [18] J. Wu, J. Xie, L. Ling, et al.: *J Coatings Technol Res* Vol. 849–57 (2013), p.10  
 [19] K. Parmenter, K. Shuman, F. Milstein, et al.: *J Spacecr Rockets* Vol. 231–6 (2001), p.38  
 [20] D. Schmidt, in: Chemical propulsion exhaust, edited by D. Rosato, R. Schwartz, Environmental effects on polymeric materials. Environments, vol. 1. Publishers: Interscience (1968) p. 413–86  
 [21] M. Natali, M. Monti, D. Puglia, et al.: *Compos Part A* Vol. 174-82 (2012), p.43  
 [22] Y. Wang, X. Xiong, G. Li, et al.: *Corros Sci* Vol. 549-55 (2012), p.65  
 [23] E. K. Allcorn, M. Natali, J. H. Koo: *Compos Part A* Vol. 109-18 (2013), p.45  
 [24] C. Sun, H. Li, Q. Fu and J. Zhang: *Corros Sci* Vol. 100-7 (2014), p.79  
 [25] R. Vaia, G. Price, P. Ruth, et al.: *Appl Clay Sci* Vol. 67–92 (1999), p.15

# กระบวนการสังเคราะห์วัสดุคอมพอลิตทางเลือกสำหรับประยุกต์ใช้ในกิจการพลังงานทดแทน

ทัตดาว พุทธชาติ<sup>1\*</sup> นฤมล เครือทอง<sup>2</sup> และ รังสิมา หนีตสอน<sup>2</sup>

วันที่รับ 15 กรกฎาคม 2562 วันที่แก้ไข 18 สิงหาคม 2562 วันตอบรับ 19 สิงหาคม 2562

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจากพอลิเมอร์เชิงประกอบเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนเมทานอล โดยตรงให้มีความคงทนต่อแรงอัดและการคืบสูง เนื่องจากการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในอุปกรณ์พกพาอิเล็กทรอนิกส์หรือรถยนต์และพาหนะอื่น ๆ ต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวมาเรียงต่อกันเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแถว เพื่อให้มีกำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อการใช้งาน เซลล์เชื้อเพลิงจึงต้องอยู่ภายใต้แรงอัดสูง เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสภายใน และลดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้า รวมถึงป้องกันการรั่วไหลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์เชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลต/พอลิยูรีเทน/คาร์บอนแบล็ก ใช้เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วผ่านกระบวนการพอลิเมอร์โรเซชันแบบบัลคไปพร้อมกับเกิดการเชื่อมโยงแบบโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ และขึ้นรูปขึ้นงานด้วยการหล่อ โดยศึกษาอัตราการเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ พบว่า มีค่าร้อยละอยู่ในช่วง 96.71-99.27 และผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านการทนแรงดัดงอและแรงอัดมีค่าอยู่ในช่วง 31- 40 MPa และ 48-64 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่จำหน่ายในท้องตลาด ทั้งนี้ การเติมคาร์บอนแบล็กเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าพบว่าค่าการนำไฟฟ้าเชิงพื้นผิวและค่าการนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงจากวัสดุฉนวนไฟฟ้าเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า พอลิเมอร์เชิงประกอบนี้จึงมีสมบัติเชิงกลเพียงพอต่อการใช้งานเป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว อย่างไรก็ตาม ยังคงต้องพัฒนาสมบัติการนำไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ :** แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว, พอลิเมทิลเมทาคริเลต/พอลิยูรีเทน/คาร์บอนแบล็ก, การทนแรงอัด, การคืบ

<sup>1</sup> กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

<sup>2</sup> ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้แต่ง, อีเมลล์: ornme@gmail.com

# Synthesis process of alternative composite materials for renewable energy applications

Taddao Phuthachart<sup>1\*</sup>, Narumol Kreua-ongarjnukool<sup>2</sup> and Rungsima Yeetsorn<sup>2</sup>

## Abstract

This research successfully developed bipolar plates from polymer composite of direct methanol fuel cells to improve their compressive strength and creep behavior. Since fuel cell applications such as portable electronic devices or transportation, single fuel cells must be assembled as a fuel cell stack to achieve adequate voltages. The fuel cell stacks must be under high clamping force to reduce an interfacial contact resistance in the stacks and also to prevent the leakage of reactant gases. This research fabricated the bipolar plates using polymer composites comprising poly (methyl methacrylate) (PMMA), polyurethane (PU) and carbon black (CB) via bulk polymerization with interpenetrating polymer networks in casting process. The percentage of interpenetrating polymer networks in the composites was in the range of 96.71 to 99.27. Results from flexural strength and compressive strength tests were in the range of 31 to 40 MPa and 48 to 64 MPa, respectively. Those were higher commercial composite bipolar plates. The long term creep behavior test of the PMMA/PU/CB composite had the total creep less than 0.4 % in a fuel cell condition. Incorporation of CB into the polymer improved the electrical conductivity of the composites, the surface and volume electrical conductivities improved from insulating material to semiconducting material. The PMMA/PU/CB composite was promising to be the bipolar plate material in terms of mechanical properties. However, its electrical conductivity must be improved.

**Keywords :** Bipolar Plates, PMMA/PU/CB, Compressive Strength, Creep

---

<sup>1</sup> Defence Industry Department, Defence Industry and Energy Center

<sup>2</sup> Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Monkut's University of Technology North Bangkok.

\* Corresponding author, E-mail: ornmef@gmail.com

## 1. บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนแอลกอฮอล์โดยตรง (Direct Alcohol Fuel Cells : DAFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC) ชนิดหนึ่ง แต่ใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซไฮโดรเจน (Barbir, 2006) ซึ่งแอลกอฮอล์มีความปลอดภัยในการบรรจุและขนย้ายมากกว่าก๊าซไฮโดรเจน DAFC จึงจัดเป็นแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียม และสามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ห่างไกลได้ เช่น นำไปใช้ในชนบท สถานีตรวจอากาศ ใช้สำหรับระบบสื่อสารในพื้นที่ที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในอุปกรณ์พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป เป็นต้น

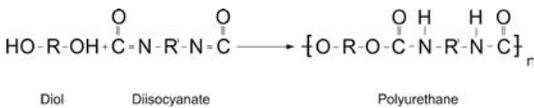
เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวในการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้งานจริงจะต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเดี่ยว (Single Cell) ต่อเรียงกันแบบอนุกรมเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแถว (Fuel Cell Stacks) ข้อมูลจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า หนึ่งในองค์ประกอบหลักที่มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cells : DMFC) คือ แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar Plates) ทั้งนี้ เนื่องจากแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงต้องใช้ Bipolar Plates จำนวน 2 ชิ้น ซึ่งมีน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 55 ของน้ำหนักเซลล์เชื้อเพลิง และมีต้นทุนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 37 ของราคาเซลล์เชื้อเพลิง (Tsuchiya & Kobayashi, 2004) โดยทั่วไป Bipolar Plates ผลิตจากกราไฟท์ เพราะกราไฟท์สามารถนำไฟฟ้า ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี และความหนาแน่นน้อยกว่า Bipolar Plates ที่ผลิตจากโลหะ แต่มีข้อเสียคือยากต่อการขึ้นรูปในการสร้างช่องทางการไหลบนแผ่น Bipolar Plates เนื่องจากมีความแข็งและเปราะ ส่งผลให้แผ่น Bipolar Plates ที่จะนำมาใช้งานมีความหนา น้ำหนักมาก ขนาดใหญ่ และต้นทุนการผลิตสูง (Wu & Shaw, 2005) สำหรับ Bipolar Plates ที่ผลิตจากโลหะมีค่าการนำไฟฟ้า ค่าการนำความร้อน และสมบัติเชิงกลสูง รวมถึงการซึมผ่านก๊าซได้น้อย แต่

มีข้อเสียคือกัดกร่อนได้ง่าย ทำให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์เคลือบบนพื้นผิว ส่งผลให้ความต้านทานที่ผิวสัมผัสสูงและไอออนของโลหะที่กัดกร่อนยังเป็นการเพิ่มความต้านทานให้กับเมมเบรน ส่งผลเสียต่อตัวเร่งปฏิกิริยาอิเล็กโทรด (Electrode Catalyst) ด้วย ดังนั้น จึงมีการพัฒนาปรับปรุงพื้นผิวด้วยวัสดุที่นำไฟฟ้าได้และต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ซึ่งวิธีนี้ยากต่อการพัฒนาและน้ำหนักของแผ่นโลหะยังเป็นอุปสรรคต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน (Huang et al., 2005) สำหรับวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติก หรือเทอร์โมเซตผสมกับคาร์บอน เช่น คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black) หรือกราไฟท์ นิยมนำมาผลิต Bipolar Plates (Dweiri & Sahari, 2007, Liao et al., 2008, Kakati et al., 2010) เนื่องจากง่ายต่อการผลิต น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับกราไฟท์ หรือแผ่นโลหะ แต่ต้องใช้คาร์บอนในปริมาณสูง เพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าได้ตามเป้าหมาย ซึ่งส่งผลต่อวัสดุทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

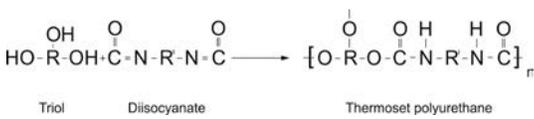
จากมูลเหตุข้างต้นทำให้นักวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะผลิต Bipolar Plates ที่มีสมบัติความคงทนต่อแรงอัดและการคืบสูงจากวัสดุพอลิเมอร์เชิงประกอบระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตผสมกับพอลิยูรีเทน (Polyurethane : PU) (Kreua-ongarjnkool, 2012) โดยเทคนิคที่ทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงกันแบบโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ชนิดกึ่ง (Semi-Interpenetrating Polymer Networks : Semi-IPNs) ไปพร้อมกับการสังเคราะห์ เทคนิคนี้เป็นการผสมพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดที่มีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์และความหนืดที่แตกต่างกันให้เข้ากันโดยการเกี่ยวพันกันของสายโซ่เป็นโครงร่างตาข่ายที่สอดไขว้กันทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการทนต่อสารเคมีสูงขึ้น (Dhoke et al., 2006) ดังนั้น การเตรียมโดยเทคนิคนี้จะเป็นการเพิ่มสมบัติการทนแรงอัดและการคืบ (Creep) ให้กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ผลิตขึ้นได้ และอาจนำวิธีการดังกล่าวไปใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้ผลิตเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการประยุกต์ใช้ในกิจการพลังงานทดแทน หรือในกิจการด้านพลังงานทหารที่เกี่ยวข้อง



การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation Polymerization) ระหว่างสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ ไดไอโซไซยานาต (Diisocyanate) และไดออล (Diol) แสดงดังรูปที่ 3 ในการเตรียมพอลิยูรีเทนจากไดไอโซไซยานาต ทำปฏิกิริยากับไดออลจะทำให้ได้พอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก ส่วนการเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดเทอร์โมเซตจะสามารถเตรียมได้โดยการเติมสารที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่ฟังก์ชัน เช่น การใช้ไตรออล (Triol) แทนไดออล แสดงดังรูปที่ 4



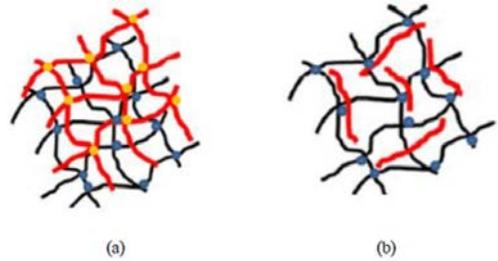
รูปที่ 3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทน

## 2.2 โครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ (Interpenetrating Polymer Networks) (Campbell, 2000)

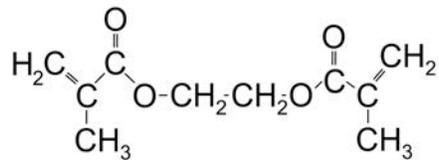
โครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ (Interpenetrating Polymer Networks : IPNs) เป็นการรวมตัวของพอลิเมอร์ผสมสองชนิดขึ้นไปที่มีโครงสร้างแบบโครงร่างตาข่าย (Networks) โดยไม่เปลี่ยนโครงร่างเดิมของแต่ละพอลิเมอร์ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดแรกจะเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายโดยมีพอลิเมอร์ตัวถัดไปแทรกในโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ชนิดแรก โดยรูปแบบโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ โครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้แบบสมบูรณ์ (Full-Interpenetrating Polymer Networks : Full-IPNs) และโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้แบบกึ่ง (Semi-Interpenetrating Polymer Networks : Semi-IPNs) แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างของโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ (Hoare & Kohane, 2008) (a) Full-IPNs (b) Semi-IPNs

### 2.2.1 เอทิลลีน ไกลคอล ไดเมทาคริเลต (Ethylene Glycol Dimethacrylate : EGDM)

เอทิลลีน ไกลคอล ไดเมทาคริเลต (Ethylene Glycol Dimethacrylate : EGDM) ใช้เป็นสารเชื่อมขวางสำหรับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบลูกโซ่ฟรีแรดดิคัลในโมเลกุลพอลิเมทิลเมทาคริเลต มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 0°C และมีจุดเดือดอยู่ที่ 85°C เป็นโคเอเจนต์ (Coagent) สำหรับเปอร์ออกไซด์เพื่อเกิดการเชื่อมขวางขึ้น มีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างของเอทิลลีน ไกลคอล ไดเมทาคริเลต

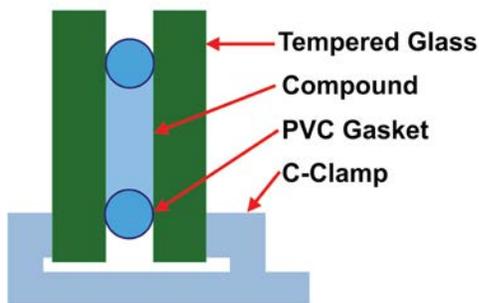
### 2.2.2 คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black)

คาร์บอนแบล็ก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติ สำหรับคาร์บอนแบล็ก ที่ได้จากกาเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซอะเซทิลีน เรียกว่า อะเซทิลีนแบล็ก (Acetylene Black) อะเซทิลีนแบล็กเป็นคาร์บอนแบล็กที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าคาร์บอนแบล็กกลุ่มอื่นๆ มักนำไปใช้ในการผลิตยางนำไฟฟ้า เพราะเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างสูงมากด้วยคุณสมบัติที่นำไฟฟ้าและนำความร้อนสูง การดูดซับ

ความชื้นได้ต่ำและดูดซึมของเหลวได้สูง จึงนำไปใช้เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับผลิตเซลล์แห้ง เช่นเดียวกับสารเติมแต่งยาง เพื่อป้องกันไฟฟ้าสถิตและยางนำไฟฟ้า หรือวัสดุพลาสติกต่างๆ ที่ใช้ในการอุตสาหกรรม

### 2.2.3 กระบวนการหล่อแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB

การสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ เนื่องจากแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ที่เตรียมได้จากกระบวนการหล่อจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยกระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Casting Process) นิยมเรียกว่ากระบวนการหล่อแบบเซลล์ (Cell Casting Process) เป็นเทคนิคที่ขึ้นรูปในเบ้าที่เป็นแผ่นแก้ว ผิวเรียบหน้ากว้างประกบกันสองชิ้นทำให้มีเนื้อที่ของการหล่อจำกัด ซึ่งแตกต่างกับกรณีการหล่อแบบต่อเนื่องจะมีข้อจำกัดเฉพาะความกว้างเท่านั้น แต่มีความยาวไม่จำกัด ความหนาของการหล่อโดยเทคนิคนี้จะหนากว่าการหล่อด้วยเทคนิคการหล่อแบบต่อเนื่อง การหล่อพลาสติกด้วยเทคนิคแบบเซลล์ แสดงดังรูปที่ 7 โดยเบ้าที่ใช้ในเทคนิคนี้จะเป็นแผ่นแก้วเรียบและสะอาดประกบกันด้วยตัวหนีบบนสปริง เพื่อให้เกิดการบีบตัวของแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ และขจัดเซียงการหดตัวของพอลิเมอร์เชิงประกอบ



รูปที่ 7 การหล่อพลาสติกแบบเซลล์ (Batch Casting Process)

### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 3.1 ผลการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการสั่นสะเทือน (Sonicate) เพื่อกระจายอนุภาคคาร์บอนแบล็กในสารละลายมอนอเมอร์

เมื่อพิจารณาปัจจัยของเวลาที่มีผลต่อการกระจายอนุภาคคาร์บอนแบล็กในสารละลายมอนอเมอร์ระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ขนาด 35 kHz โดยใช้เวลา 15 30 45 และ 60 นาที เพื่อศึกษาเวลาที่เหมาะสมแสดงผลดังตารางที่ 3-1 พบว่า เมื่อทำการสั่นสะเทือนสารละลายมอนอเมอร์ด้วยเครื่องเสียงความถี่สูงอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีพฤติกรรมรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Aggregate) อันเนื่องจากมีขนาดอนุภาคระดับนาโนจึงทำให้มีแรง Van Der Waals ระหว่างอนุภาคสูง (Yao et al., 2013) จะเริ่มกระจายตัวออกจากกันเพราะได้รับพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่สูงเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ลักษณะของสารละลายมอนอเมอร์กระจายตัวได้ดีขึ้น แต่คาร์บอนแบล็กยังคงมีลักษณะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ เวลา 30 นาที กลุ่มก้อนของคาร์บอนแบล็กเริ่มกระจายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายมอนอเมอร์ เวลา 45 นาที คาร์บอนแบล็กกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายมอนอเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการสั่นสะเทือนเป็น 60 นาที สารละลายมอนอเมอร์เริ่มมีความหนืดเพิ่มขึ้นจนเกิดการแข็งตัว

จากผลของการทดลองในตารางที่ 3-1 พบว่า เวลาที่เหมาะสมของการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องเสียงความถี่สูงของคาร์บอนแบล็ก ในสารละลายมอนอเมอร์คือ น้อยกว่า 60 นาที เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของสารละลายมอนอเมอร์เมื่อใช้เวลามากกว่า 45 นาที จะมีลักษณะหนืดขึ้นเกินไปจนไม่สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยการหล่อลงแบบได้ เนื่องจากเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันของ MMA มอนอเมอร์เป็น PMMA ทั้งนี้ เกิดจากการถูกกระตุ้นจากการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องเสียงความถี่สูงและอุณหภูมิ จึงส่งผลให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเอโซบิส-2,4-ไดเมทิลวาเลโรไนไตรล์ (Azobiz-2,4-dimethyl Valeronitrile : ABVN) แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระและกระตุ้นให้ MMA มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเป็น PMMA

### 3.2 ผลการศึกษาหาอัตราส่วนของ PMMA/PU ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเป็นแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB

ผลของการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง PMMA/PU โดยการเติม PU เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้สามารถนำไปสร้างช่องทางการไหล (Flow Channel) บนแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบได้ โดยศึกษาอัตราส่วนของ PU ต่อการขึ้นรูปเป็นแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB และส่งผลต่อสมบัติเชิงกล เมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 5 phr และเวลาในการสั่นสะเทือน (Sonicate) เพื่อกระจายอนุภาคคาร์บอนแบล็กด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในสารละลายมอนอเมอร์ 45 นาที พบว่า เมื่อเติม PU ร้อยละ 10 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ เนื่องจากอัตราส่วนปริมาณ PU น้อยเกินไปในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ของ PU เพื่อให้สอดไขว้ ในโครงร่างตาข่าย PMMA จึงไม่สมบูรณ์ ลักษณะของแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 8-1 (a) และเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วน PU ถึงร้อยละ 30 ทำให้สารละลายมอนอเมอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ประกอบกับเมื่อเติมคาร์บอนแบล็ก 5 phr ยิ่งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้น เมื่อนำไปเทลงแม่พิมพ์กระจกเพื่อขึ้นรูปจึงเกิดจุดบกพร่องบนแผ่น (Deflect) เพราะการไหล (Flow) ที่ไม่ดีทำให้เกิดฟองอากาศในแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB แสดงดังรูปที่ 8-2 (b) ดังนั้น อัตราส่วน PMMA/PU ที่สามารถเตรียมได้เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็ก 5 phr คือ 85/15 80/20 และ 75/25 (Phuttachart et al., 2014)

### 3.3 ผลของปริมาณคาร์บอนแบล็กต่อการเตรียมแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB

เพื่อให้พอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ที่เตรียมได้มีสมบัติการนำไฟฟ้า จึงศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็กต่อการเตรียมแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB โดยใช้เวลาในการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในสารละลายมอนอเมอร์ 45 นาที ผลที่ได้มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เติมได้สูงสุดคือ 5 phr เนื่องจากเมื่อทำการเติมคาร์บอน

แบล็กสูงกว่า 5 phr (6 phr) ความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็กที่สูงขึ้นจะเป็นการเพิ่มความหนืดของสารละลายมอนอเมอร์ ส่งผลให้เกิดการกีดขวางการเกิดสายโซ่พอลิเมอร์ของ PMMA และ PU (Xu et al., 2012) ทำให้ไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นได้

### 3.4 ผลของ IPNs ต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของ PMMA blend PU

ลักษณะสัญญาณวิทยาของ PMMA blend PU ที่ผสมโดยไม่ใช้เทคนิคทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ จะปรากฏการแยกเฟสที่ชัดเจนระหว่าง PMMA และ PU โดยเฟสของ PU จะปรากฏเป็นสีเข้มกระจายอยู่ในเฟส PMMA ที่เป็นสีอ่อน แสดงดังรูปที่ 9 (c) แต่การผสมโดยใช้เทคนิคที่ทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ระหว่าง PMMA กับ PU จะไม่ปรากฏการแยกเฟสแสดงดังรูปที่ 9 (d) เพราะเกิดการเกาะเกี่ยวพันกันของสายโซ่ PMMA กับ PU (Kumar et al., 2006)

### 3.5 ผลของ IPNs ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB

การเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB มีผลให้การเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลระหว่าง PMMA กับ PU ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบเพิ่มขึ้นด้วย จากผลการวิเคราะห์ร้อยละการเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB อัตราส่วน 75/25\_5 phr 80/20\_5 phr 85/15\_5 phr มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.27 97.77 และ 76.71 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลทดสอบการทนแรงดัดงอของพอลิเมอร์เชิงประกอบ แสดงดังรูปที่ 10 ถึงแม้ว่าอัตราส่วน 75/25\_5 phr จะมีสัดส่วนปริมาณ PU สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เชิงประกอบมีสมบัติยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้การคงทนต่อแรงดัดงอลดลง แต่เมื่ออัตราส่วนปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นเป็น 5 phr ค่าการทนแรงดัดงอกลับมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราส่วนอื่น ทั้งนี้ เนื่องจากผลของการเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้

อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ทุกอัตราส่วนที่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 5 phr มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงกว่า Bipolar Plates ที่ผลิตจากพอลิเมอร์เชิงประกอบที่กำหนดโดยกระทรวงพลังงานสหรัฐฯ (The US Department of Energy : DOE) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC) มากกว่า 25 MPa และผลของการเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ของพอลิเมอร์เชิงประกอบอัตราส่วน 75/25\_5 ที่มีค่าสูงนี้มีผลให้ค่าแรงเค้นสูงสุดที่พอลิเมอร์เชิงประกอบนี้มีการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น (Engineering Yield Strength ที่ 2% Offset) และความต้านทานการเสียรูปหรือค่ามอดูลัสแบบซีแคนท์ (Secant Modulus) มีค่าสูงขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 10 (Phuttachart et al., 2014)

### 3.6 ผลของปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กต่อการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB

จากภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB อัตราส่วน 80/20\_3 phr และ 80/20\_5 phr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM) กำลังขยาย 20,000 เท่า ศักย์เร่ง 5 kV แสดงดังรูปที่ 11 จากนั้นวัดขนาดของอนุภาคคาร์บอนแบล็กจากภาพถ่ายจำนวน 50 อนุภาค/ภาพถ่ายจำนวน 3 ภาพ ด้วยโปรแกรม SemAfore แล้ววิเคราะห์หาขนาดอนุภาค (Particle Size) และหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ก แสดงเป็นกราฟการกระจายตัวขนาดอนุภาค (Size Distribution) ของคาร์บอนแบล็ก แสดงดังรูปที่ 11 จากผลการวิเคราะห์พบว่า อนุภาคของคาร์บอนแบล็ก มีขนาดอยู่ในช่วง 40-90 nm การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นกราฟรูประฆังคว่ำ ขนาดของอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่วัดได้ในพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB อัตราส่วน 80/20\_3 phr และ 80/20\_5 phr ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 65 nm และ 62 nm ตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนของการวัดขนาดอนุภาคอาจเกิดขึ้น

จากพฤติกรรมของคาร์บอนแบล็กที่ไม่อยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวแต่จะอยู่เป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) จึงทำให้การกำหนดขอบเขตของอนุภาคในการวัดขนาดอาจเกิดการผิดพลาด และจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นอนุภาคคาร์บอนแบล็กจะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มขึ้น สามารถวิเคราะห์การกระจายตัว (Dispersion) ของอนุภาคคาร์บอนแบล็กใน PMMA/PU เมทริกซ์ได้ โดย 1 ภาพแบ่งเป็น 9 ส่วน และนับจำนวนอนุภาคต่อพื้นที่ขนาด 2.75 ตารางไมโครเมตร จำนวน 3 ภาพได้เป็นความหนาแน่นดังแสดงด้วยกราฟการกระจายตัว (Dispersion) ของอนุภาคคาร์บอนแบล็กต่อพื้นที่ 2.75 ตารางไมโครเมตร จากภาพที่ 4-17 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กใน PMMA/PU เมทริกซ์ต่อพื้นที่ขนาด 2.75 ตารางไมโครเมตร อัตราส่วน 80/20\_3 phr มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 64 อนุภาค คิดเป็น 23 อนุภาค/ตารางไมโครเมตร และอัตราส่วน 80/20\_5 phr ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 76 อนุภาค คิดเป็น 28 อนุภาค/ตารางไมโครเมตร ถึงแม้ว่าปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอนุภาคคาร์บอนแบล็กต่อพื้นที่จะเพิ่มขึ้น แต่จะอยู่รวมกันในลักษณะเป็นกลุ่มก้อน

### 3.7 ผลของปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กต่อการทนต่อแรงดึง (Flexural Strength)

การเติมคาร์บอนแบล็กมีผลให้พอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB มีค่าการทนต่อแรงดึง (Flexural Strength) และค่าการต้านทานต่อแรงดึง (Flexural Modulus) เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 13-1 ถึง 13-3 ซึ่งแสดงพอลิเมอร์เชิงประกอบของ PMMA/PU อัตราส่วน 75/25 80/20 และ 85/15 ที่สามารถเตรียมและขึ้นรูปเป็นแผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนแบล็กทำหน้าที่เสริมแรง (Reinforce Effect) ให้กับพอลิเมอร์เพราะเมื่อให้แรงที่สูงเกินกว่าค่าแรงที่ทำให้เกิดการเสียสภาพแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation Stress) คาร์บอนแบล็กจะทำหน้าที่ส่งถ่ายแรง (Load Transfer Effect) ทำให้พอลิเมอร์เชิงประกอบมีความคงทนได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์บอน

แบล็กเกิดเป็นโครงข่ายอยู่ใน PMMA/PU เมทริกซ์ จึงทำให้พอลิเมอร์เชิงประกอบสามารถดูดซับแรงที่ได้รับได้เพิ่มขึ้น (Varela-Rizo et al., 2010, Tang et al., 2012, Srivastava, 2012) แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) เนื่องจากอนุภาคของคาร์บอนแบล็กมีขนาดเล็กกระตบนาโน การรวมกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้สมบัติการเสริมแรง (Reinforce Effect) ลดลง เพราะกลุ่มก้อนของคาร์บอนแบล็กจะเป็นจุดรวมแรง ทำให้เกิดการแตกหักที่บริเวณจุดนี้ ที่ปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็ก 5 phr PMMA/PU/CB ทุกอัตราส่วนยังคงมีค่าการทนต่อแรงดัดงออยู่ในช่วง 31-40 MPa ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานของ DOE (มากกว่า 25 MPa)

### 3.8 ผลของปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กต่อการคืบ (Creep)

การคืบเป็นการเสียสภาพของวัสดุอันเนื่องจากเวลา เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงเค้นคงที่อย่างต่อเนื่องพิจารณาได้จากค่าความเครียด (Strain) วัสดุที่ต้านทานต่อการคืบ (Creep Resistance) ได้ดี ทำให้วัสดุนั้นมีค่าความเครียดต่ำในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงด้วยแรงอัดสูง (High Compression Force) จะเป็นการลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสภายในของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น จึงได้ทดสอบพฤติกรรมการคืบต่อการเพิ่มแรง (Stress) 1 2 และ 3 kPa เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 120 นาที พบว่า การคืบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ Stress สูงขึ้นทั้งพอลิเมอร์ผสม PMMA/PU และพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB โดยพอลิเมอร์เชิงประกอบอัตราส่วน 75/25\_5 phr มีค่าการคืบร้อยละ 0.23 0.40 และ 0.49 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 14 จากผลการวิเคราะห์ Creep Curve ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับเวลา พบว่า คาร์บอนแบล็กนอกจากเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์ผสมแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงด้วย เพราะสามารถต้านทานการคืบได้ดีขึ้น เห็นได้จากความเครียดลดลง โดยคาดว่าอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่มีขนาดเล็ก

ประมาณ 40-90  $\mu\text{m}$  กระจายตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ (IPNs) ของ PMMA และ PU แล้วทำหน้าที่ส่งถ่ายแรง (Load Transfer) จากสายโซ่ของพอลิเมอร์อันเนื่องมาจากแรง Van Der Waals ระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กกับ PMMA และ PU (Tang et al., 2012) เมื่อพิจารณาที่แรงเค้น 1 kPa ความเครียดสูงสุดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.3 สามารถใช้พอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB เป็น Bipolar Plates ในเซลล์เชื้อเพลิงได้ (Yeetsorn, 2010) แรงเค้นกับค่าความคืบไม่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง เพราะการตอบสนองของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ของพอลิเมอร์ไม่เป็นเส้นตรง จาก Creep Curve ที่ได้ ปรากฏเพียงการคืบระยะแรก (Primary Creep) ที่อัตราการคืบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะต้น เพราะแรงเค้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการยืดดึงออกและการคืบระยะที่สอง (Secondary Creep) เป็นช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดคงที่ โดยไม่ปรากฏการแตกหักจากการคืบในระยะที่สาม (Tertiary Creep)

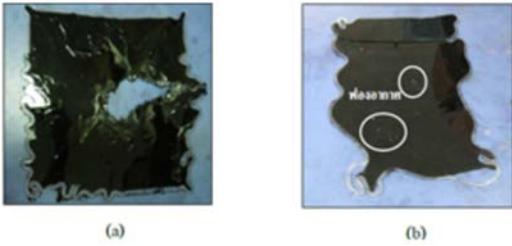
### 3.9 ผลของปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กต่อการนำไฟฟ้า

สมบัติที่สำคัญของ Bipolar Plates อีกประการหนึ่งนอกเหนือจากสมบัติเชิงกลคือสมบัติการนำไฟฟ้า เพราะ Bipolar Plates จะต้องทำหน้าที่นำอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจากขั้วแอโนดผ่านวงจรรภายนอกสู่ขั้วคาโทด การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB เกิดได้จากอนุภาคของคาร์บอนแบล็กเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้า (Conductive Network) ตามทฤษฎี Percolation ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB สามารถหาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนแบล็กได้จาก Percolation S-Curve แสดงดังรูปที่ 15 จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ขึ้นอยู่กับการเชื่อมต่อกันของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก โดยขึ้นอยู่กับการเชื่อมต่อกันของอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่เติมและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กใน PMMA/PU เมทริกซ์

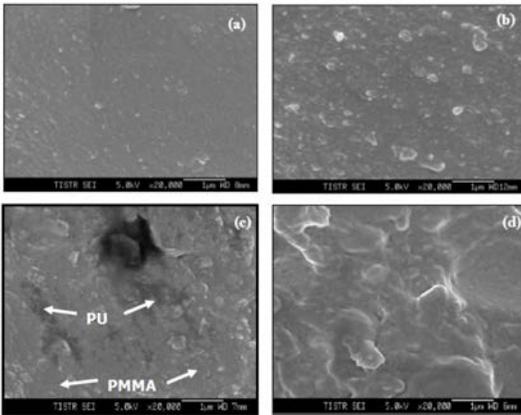
โดยปริมาณของคาร์บอนแบล็กที่เติมลงใน PMMA/PU เมทริกซ์ในระดับที่น้อยที่สุดที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคได้เป็นเครือข่ายนำไฟฟ้าเรียกว่า Percolation Threshold Percolation Threshold ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB มีค่าแตกต่างกันเป็นผลมาจากความหนืดของสารละลายมอนอเมอร์ของ PMMA/PU อัตราส่วน 75/25 มีค่าสูงเกินกว่าพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่สูงของเครื่อง Ultrasonic จะสามารถแยกอนุภาคระดับนาโนเมตรที่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนของคาร์บอนแบล็กแตกและแยกออกจากกันได้ (Ma et al., 2010) และการเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กพอลิเมอร์เชิงประกอบที่มีค่าร้อยละการเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้สูงการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์เชิงประกอบเกิดขึ้นได้ยากกว่าพอลิเมอร์เชิงประกอบที่มีร้อยละการเกิดโครงร่างตาข่ายแบบสอดไขว้ต่ำ เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงจะมีแรงวนเดออร์วาล์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลสูงการกระจายตัวของสารตัวเติมนำไฟฟ้าเกิดขึ้นได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่ำ (Liao et al., 2008) การกระจายตัวเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กในพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ดีจะทำให้เกิดเป็นเส้นทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงด้วย เห็นได้ว่า Percolation Threshold ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB 75/25 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วน 80/20 และ 85/15 คือปริมาณคาร์บอนแบล็กเท่ากับ 3 phr 2 phr 2 phr ตามลำดับ ค่าการนำไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ทุกอัตราส่วนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5 phr ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ไม่ได้เพิ่มโครงข่ายนำไฟฟ้า (Conductive Network) ให้เพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้นจะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งนอกจากไม่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแล้วการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของคาร์บอนแบล็กนี้ยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงด้วยดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

**ตารางที่ 3-1** แสดงลักษณะของสารละลายมอนอเมอร์กับเวลาการสันสะเทือนด้วยเครื่องเสียงความถี่สูง (Ultrasonic)

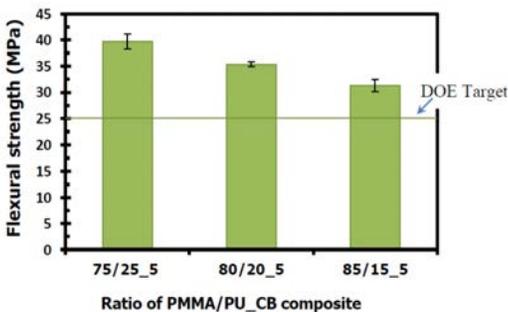
| เวลาการสันสะเทือนด้วยเครื่องเสียงความถี่สูง | ลักษณะของสารละลายมอนอเมอร์   |
|---|--|
| 15 นาที                                     |    |
| 30 นาที                                     |   |
| 45 นาที                                     |  |
| 60 นาที                                     |  |



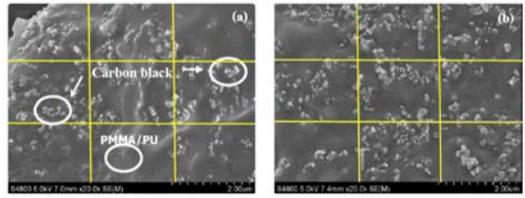
รูปที่ 8 แผ่นพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB  
(a) 90/10\_5 phr (b) 70/30\_5 phr



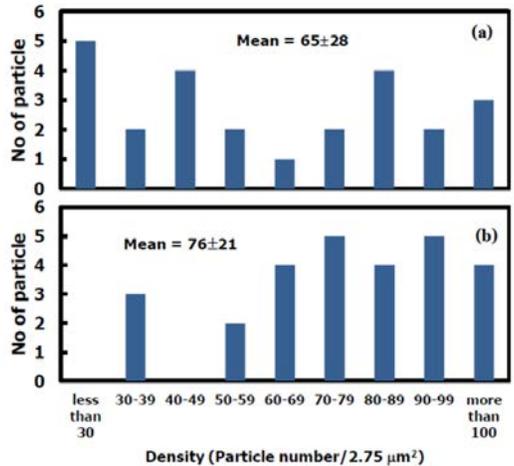
รูปที่ 9 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาพื้นผิวแตกหักของแผ่น PMMA blend PU (กำลังขยาย 20,000 เท่า)  
(a) PMMA (b) PU (c) PMMA blend PU อัตราส่วน 75/25 ไม่ใช้เทคนิค IPNs (d) PMMA blend PU อัตราส่วน 75/25 ใช้เทคนิค IPNs



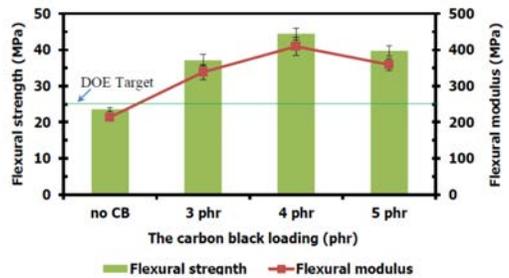
รูปที่ 10 Flexural Strength ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU\_CB



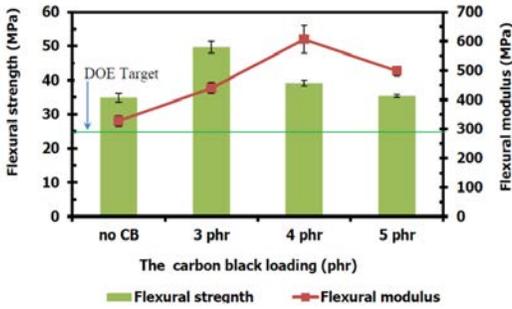
รูปที่ 11 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB กำลังขยาย 20,000 เท่า  
(a) อัตราส่วน 80/20\_3 phr  
(b) อัตราส่วน 80/20\_5 phr



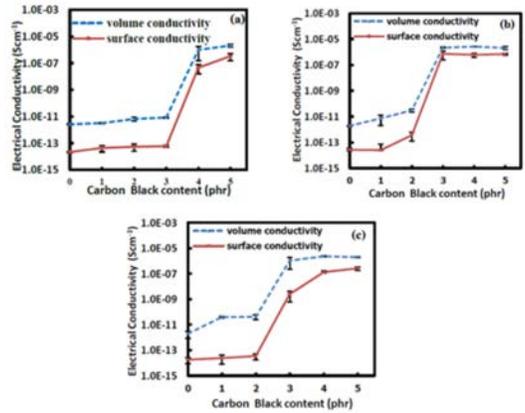
รูปที่ 12 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กในพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB  
(a) อัตราส่วน 80/20\_3 phr  
(b) อัตราส่วน 80/20\_5 phr



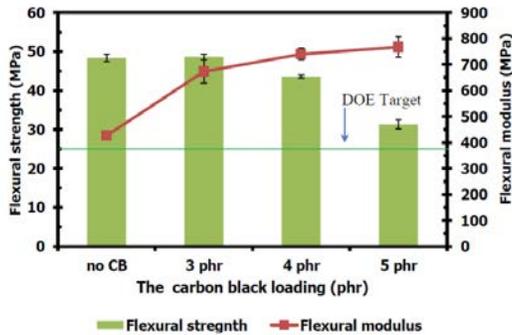
รูปที่ 13-1 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กกับค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus ของ PMMA/PU อัตราส่วน 75/25



รูปที่ 13-2 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กกับค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus ของ PMMA/PU อัตราส่วน 80/20



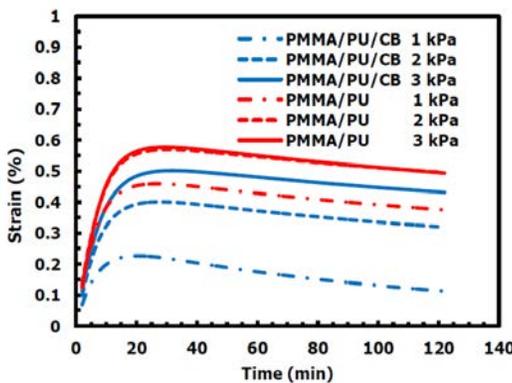
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กต่อค่าการนำไฟฟ้าของ PMMA/PU อัตราส่วน (a) 75/25 % IPNs  $99.27 \pm 0.31$  (b) 80/20 % IPNs  $97.77 \pm 0.60$  (c) 85/15 % IPNs  $96.71 \pm 0.24$



รูปที่ 13-3 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กกับค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus ของ PMMA/PU อัตราส่วน 85/15

#### 4. สรุปผลการทดลอง

สามารถเตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นจากพอลิเมอร์ประกอบของพอลิเมทิลเมทาคริลิตผสมกับพอลิยูรีเทนและคาร์บอนแบล็ก (PMMA/PU/CB Composite) ผ่านขบวนการพอลิเมอร์เซชันแบบบัลด์ ด้วยเทคนิคทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายแบบสอดไขว้แบบกิ่ง และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อ การเติม PU เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พอลิเมอร์เชิงประกอบให้สามารถเสาะร่องเพื่อสร้างช่องทางการไหลของเมทานอลและอากาศได้ เพราะ PMMA มีลักษณะเปราะจึงยากต่อการเสาะร่อง ผลการวิเคราะห์ที่ร้อยละการเกิดโครงสร้างตาข่ายแบบสอดไขว้ ของ PMMA/PU/CB อัตราส่วน 75/25\_5 phr 80/20\_5 phr และ 85/15\_5 phr มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.27 97.77 และ 96.71 ตามลำดับ เทคนิคที่ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายแบบสอดไขว้เป็นการเพิ่มความแข็งแกร่งได้ของการผสมพอลิเมอร์สองชนิดที่มีลักษณะแตกต่างกันระหว่าง PMMA เป็นเฟสแก้ว (Glassy Phase) กับ PU เป็นเฟสยาง (Rubbery Phase) การเติม PU ที่มีสมบัติความยืดหยุ่นสูงเป็นสมบัติที่เด่นเหนือกว่าความแข็งแรงที่เกิดจากโครงสร้างตาข่ายแบบสอดไขว้ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของ PMMA ผสม PU อัตราส่วน 85/15 80/20



รูปที่ 14 Creep Curve ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB อัตราส่วน 75/25 ไม่เติม และเติมคาร์บอนแบล็ก 5 phr อุณหภูมิ 80°C เวลา 120 นาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงเค้น

และ 75/25 ในด้านของการทนแรงดัดงอมีค่าลดลงจาก PMMA คิดเป็นร้อยละ 41 57 และ 70 สำหรับการทนแรงกดมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 30 46 และ 56 ตามลำดับ แต่สมบัติด้านความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น การเติมคาร์บอนแบล็กนอกจากเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าแล้วยังทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์เชิงประกอบ สำหรับ PMMA ผสม PU อัตราส่วน 80/20 ค่าการทนแรงดัดงอมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 43 และ 10 เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเท่ากับ 3 และ 4 phr ตามลำดับแต่เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นเป็น 5 phr ปรากฏว่ามีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่าการทนแรงดัดงอมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 43 28 และ 22 เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเท่ากับ 3 4 และ 5 phr ตามลำดับ ซึ่งสมบัติการเสริมแรงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีขนาดระดับนาโน และมีพฤติกรรมชอบรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเนื่องจากแรง Van Der Waals ระหว่างปฏิสัมพันธ์ระดับนาโนมีค่าสูง จึงทำให้ไม่สามารถกระจายอนุภาคคาร์บอนแบล็กในขั้นตอนการผสมสารเริ่มต้นมอนอเมอร์ของการพอลิเมอร์ไรเซชันได้ที่ปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กสูงสุด 5 phr พอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB ทุกอัตราส่วน ถึงแม้จะมีค่าสมบัติเชิงกลลดลงเมื่ออัตราส่วน PU เพิ่มขึ้น และร้อยละการเกิดโครงสร้างตาข่ายจะลดลงเมื่อปริมาณ PMMA เพิ่มขึ้น แต่มีค่าการทนแรงดัดงออยู่ในช่วง 31 - 40 MPa และค่าการทนแรงกดอยู่ในช่วง 48 - 64 MPa ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานเป็น Bipolar Plates เพราะมีค่าสูงกว่า Composite Bipolar Plates ที่กำหนดตามมาตรฐานของกระทรวงพลังงานสหรัฐ (The US Department of Energy : DOE) มากกว่า 25 MPa และ 50 MPa ตามลำดับ พอลิเมอร์เชิงประกอบ PMMA/PU/CB อัตราส่วน 75/25\_5phr มีค่าร้อยละ IPNs สูงทำให้มีความคงทนต่อแรงดัดงอและต้านทานต่อแรงอัดได้เพิ่มขึ้น แต่การมีร้อยละ IPNs สูงทำให้ขัดขวางต่อการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก และผลการทดสอบสมบัติเชิงกลระยะยาวในด้านการใช้งานเป็น Bipolar Plates ในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ การคืบ เพราะแผ่น Bipolar Plates ต้อง

ถูกประกอบด้วยแรงอัดคงที่และอยู่ในภาวะที่มีอุณหภูมิ 50–80 องศา ตลอดอายุการใช้งาน

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Barbir, F. PEM Fuel Cells in Fuel Cell Technology Reaching Towards Commercialization. Sammes, N. Editor. London: Springer, c2006.
- [2] Tsuchiya, H. and Kobayashi, O. "Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve." International Journal of Hydrogen Energy. 29 (2004) : 985-990.
- [3] Wu, M. and Shaw, L. L. "A novel concept of carbon-filled polymer blends for applications in PEM fuel cell bipolar plates." International Journal of Hydrogen Energy." 30 (2005) : 373-380.
- [4] Huang, J., Baird, D. G. and McGrath, J. E. "Development of fuel cell bipolar plates from graphite filled wet-lay thermoplastic composite materials." Journal of Power Sources. 150 (2005) : 110-119.
- [5] Dweiri, R. and Sahari, J. "Electrical properties of carbon-based polypropylene composites for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)." Journal of Power Sources. 171 (2007) : 424-432.
- [6] Liao, S.-H., Yen, C.-Y., Weng, C.-C., Lin, Y.-F., Ma, C.-C. M., Yang, C.-H., Tsai, M.-C., Yen, M.-Y., Hsiao, M.-C., Lee, S.-J., Xie, X.-F. and Hsiao, Y.-H. "Preparation and properties of carbon nanotube/ polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells." Journal of Power Sources. 185 (2008) : 1225-1232.
- [7] Kakati, B. K., Sathiyamoorthy, D. and Verma, A. "Electrochemical and mechanical behavior of carbon composite bipolar plate for fuel cell." International Journal of Hydrogen

Energy. 35 (2010) : 4185-4194.

[8] Kreua-ongarjnukool, N., Karnpakdee, K., Rattanasupa, P. "Environmentally Degradation of r-PMMA/PMMA-blend- PU/Ecoflex sheet." Journal of Environmental Science and Engineering. 1 (2012) : 1036-1042.

[9] Dhoke, S. K., Maruthan, K., Palraj, S. and Selvaraj, M. "Performance of black pigments incorporated in interpenetrating polymer network (IPN)." Progress in Organic Coatings. 56 (2006) : 53-58.

[10] Campbell, M. L. Introduction to Synthetic Polymer. Oxford University . c2000.

[11] Xu, K., Erricolo, D., Dutta, M. and Strosco, M. A. "Electrical conductivity and dielectric properties of PMMA/graphite nanoplatelet ensembles." Superlattices and Microstructures. 51 (2012) : 606-612.

[12] Kumar, H., Kumar, A. A. and Siddaramaiah. "Physico-mechanical, thermal and morphological behaviour of polyurethane/poly(methyl methacrylate) semi-interpenetrating polymer networks." Polymer Degradation and Stability. 91 (2006 ) : 1097-1104.

[13] Varela-Rizo, H., Weisenberger, M., Bortz, D. R. and Martin-Gullon, I. "Fracture toughness and creep performance of PMMA composites containing micro and nanosized carbon filaments." Composites Science and Technology. 70 (2010) : 1189-1195.

[14] Tang, X.-G., Hou, M., Zou, J., Truss, R. and Zhu, Z. "The creep behaviour of poly (vinylidene fluoride)/"bud-branched" nanotubes nanocomposites." Composites Science and Technology. 72 (2012.) : 1656-1664.

[15] Srivastava VK. "Modeling and mechanical

performance of carbon nanotube/epoxy resin composites." Materials & Design. 39 (2012) : 432-436.

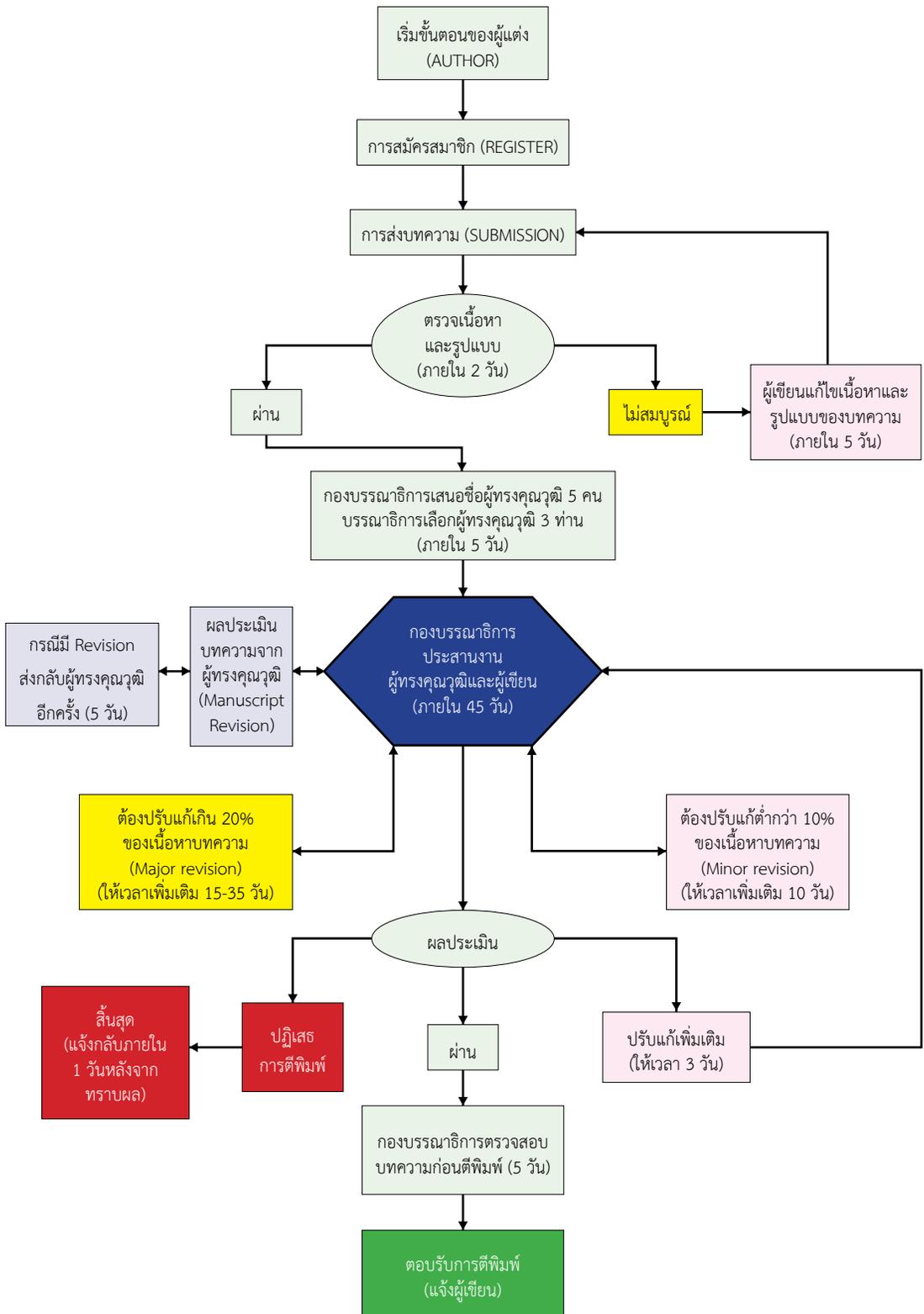
[16] Tang, X.-G., Hou, M., Zou, J., Truss, R. and Zhu, Z. "The creep behaviour of poly (vinylidene fluoride)/"bud-branched" nanotubes nanocomposites." Composites Science and Technology. 72 (2012.) : 1656-1664.

[17] Yeetsorn, R. "Development of Electrically Conductive Thermoplastic Composites for Bipolar Plate Application in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell." Ph.D.Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, Canada, 2010.

[18] Ma P-C, Siddiqui NA, Marom G, Kim J-K. "Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. (41) 2010 : 1345-1367.

[19] T. Phuttachart et al. "PMMA/PU/CB Composite Bipolar Plate for Direct Methanol Fuel Cell" Energy Procedia. (52) 2014: 516 – 524.

## ขั้นตอนการประเมินบทความของกองบรรณาธิการ DTAJ (2 เดือน)





# วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2562

## บทความวิชาการ (Academic Articles)

- เทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดดอกซีโพลีเมอร์จะเป็นทางเลือกใหม่หรือไม่  
รังสิมา หนีตสอน
- การศึกษาความต้องการข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพัฒนา Mobile4RU เพื่อการเผชิญเหตุสาธารณภัยและภัยพิบัติ  
สุริยะเวช บุญธรรารัตน์, นิคม โกปราชญ์ และ สมสฤษฏ์ สิ้นหนึ่ง

## บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Articles)

- การวิเคราะห์ความเป็นไปได้การถ่ายทอดเทคโนโลยีป้องกันประเทศภายใต้โครงการอพยพระหว่างไทยและยูเครน  
บดินทร์ สันต์

## บทความวิจัย (Research Articles)

- Surrogate-assisted optimization for UAV wing preliminary design using evolutionary algorithm  
Kittinan Wansasueb, Natee Panagant, Nantiwat Pholdee and Sujin Bureerat
- อิทธิพลของสารตัวเติมผสมซิลิกาและเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฉนวนรองในท่อมอเตอร์จรวด  
ณัฐวัฒน์ วิญญา และ ปิยนันท์ บุญประเสริฐ
- การระบุพื้นที่น้ำท่วมจากข้อมูลดาวเทียมและแบบจำลองทางกายภาพ: กรณีศึกษา อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2561  
ธนัทเดช ไรจนุกุล, อุบล แสงโยธา และ ชีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ
- การวิเคราะห์โรเตอร์แอโรไดนามิกส์ของใบพัด VTOL UAV โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ  
ณัฐวิชวัฒน์ พลดี, สุจินต์ บุรีรัตน์ และ วีระพล นวนทอง
- Small Arms Simulator for Military and Security Trainings - an Industry and Competitor Analysis  
Ranchida Khantong
- Comparison of manufacturing effectiveness on ablative material  
Suriyawate Boonthalarath
- กระบวนการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตทางเลือกสำหรับประยุกต์ใช้ในกิจการพลังงานทดแทน  
หัตตดาว พุทธิชาติ, นฤมล เครื่องอานุกูล และ รังสิมา หนีตสอน

