

DTAJ

Defence Technology Academic Journal

Volume 4 Issue 10 / July - December 2022





รายชื่อผู้จัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

คณะที่ปรึกษา

พลเอก ชูชาติ บัวขาว
นาวาอากาศเอก คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์
พันเอก จิรศักดิ์ จิวไม้แดง
พลตรี พีรพงศ์ โพธิ์เหมือน
นาวาอากาศโท ดร.เพิ่มศักดิ์ ศิริพละ

บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์
ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ธารีบุญ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ จิรวิภากร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ กฤษเจริญ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ฝ่ายจัดการ

นางสาวอินทิรา จุลชาติ
นางสาวสวิตรี ระงับพิษ
นางสาวนุศรัตน์ ลวงลายทอง

นางสาวบุญญาภรณ์ วาณิชชาติ
นางสาวลัญญณ์ฐ์ ภาตะนันท์
ว่าที่ร้อยตรีหญิง ดร.ลำยอง แสนทวี

สารบัญ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ปีที่ 4 ฉบับที่ 10 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- การพัฒนาแบบจำลองสามมิติต้นแบบสำหรับชิ้นส่วนของขีปนาวุธสำหรับลูกปืนประเภทแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการปลดล็อกขีปนาวุธพร้อมทำงานสำหรับลูกปืนขนาด 30 x 165 มม.
ทวี ดิจะมาลา 4
- การทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยเกี่ยวกับความรู้พื้นฐาน สถานะ และการพัฒนาวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออน
ปณิทัต หาสิน 16

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในการตอบสนองความมั่นคงของมนุษย์
กนก บุณาค 32

บทความวิจัย (Research Articles)

- การเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ทางทหารโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม
กรณีศึกษา: สงครามรัสเซีย-ยูเครน พ.ศ. 2565
พงศ์พันธุ์ จันทะคัต, พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ และ ยาวเรศ จันทะคัต 48
- การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรไฟิน
เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงจรวดเชื้อเพลิงแข็ง
ศิระ ศรีนิเวศน์, อภิสิทธิ์ การะเวก และ พิมพรัภัส งามสันติวงศ์ 58
- การศึกษาแบบจำลองเลนเซสเตอร์สำหรับสมรรถนะทางอากาศที่ความน่าจะเป็น
ของการโจมตีสำเร็จขึ้นกับระยะทาง
เทียนสิริ เหลืองวิไล, สมบูรณ์ พัฒนสกุลลอย และ ประกรณ์ ประทุมมา 70
- การประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่
นครินทร์ ชัยแก้ว, Nitin Kumar Tripathi, ชนาภานต์ วุฒิศักดิ์การุณ และ ศิริลักษณ์ พิมมะสาร 80
- การออกแบบและการหาค่าที่เหมาะสมทางอากาศพลศาสตร์ของจรวด DTI
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ในย่านความเร็วเหนือเสียง
โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล
วันชัย เจียจันทร์ และ เอกพล ใบโพธิ์ 90
- การศึกษาและพัฒนาต้นแบบปัญญาประดิษฐ์เพื่อระบบตรวจจับการเกิดไฟฟ้า
ด้วยข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ
ภูตินันท์ สิงห์คำฟู และ พลภัทร เหมวรรณ 108

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบันสภาพอากาศมีความแปรปรวนถึงขั้นวิกฤตจนเกิดฝนตกหนัก ภัยแล้ง คลื่นความร้อน ที่เป็นผลกระทบจากภาวะโลกร้อนเริ่มเห็นชัดเจนขึ้น ในปีนี้ หลาย ๆ ประเทศประสบคลื่นความร้อนและภัยแล้ง เช่น ทวีปยุโรป เป็นต้น มีคลื่นความร้อนรุนแรงเคลื่อนตัวเข้ามาพร้อมกับภัยแล้ง ก่อให้เกิดความเสียหายกับ พื้นที่เกษตรกรรมและเกิดไฟป่าเป็นเวลานานหลายเดือน และอาจต่อเนื่องยาวนานทั้งปีในพื้นที่ทางตอนใต้ ของทวีปยุโรป อีกทั้งเหตุการณ์น้ำท่วมครั้งใหญ่ในประวัติศาสตร์ของประเทศปากีสถานที่ทำให้พื้นที่กว่า 1 ใน 3 ของปากีสถานจมอยู่ใต้น้ำ มีประชาชนสังเวชีวิตกว่า 1,290 ศพ บาดเจ็บ 3,554 ราย และอีกกว่า 33 ล้านคน ได้รับผลกระทบ นับตั้งแต่ฤดูมรสุมเริ่มขึ้นในช่วงกลางเดือน มิ.ย. 65 ทางกรมปากีสถานประเมิน ความเสียหายเบื้องต้นว่าอยู่ที่ประมาณ 10,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือคิดเป็นเกือบ 4% ของตัวเลข GDP ในประเทศ เนื่องจากมีบ้านเรือนของประชาชนพังเสียหายไปกว่า 700,000 หลัง พื้นที่ไร่นาการเกษตร จมอยู่ใต้น้ำ คาดว่ายังเพาะปลูกไม่ได้ไปอีกหลายเดือน ส่วนในประเทศไทย ประกาศกองอำนวยการน้ำแห่งชาติ ฉบับที่ 30/2565 ลงวันที่ 19 สิงหาคม 2565 แจ้งว่าในช่วงวันที่ 20-24 สิงหาคม 2565 ประเทศไทยจะมีฝนเพิ่มขึ้น และมีฝนตกหนักถึงหนักมากบางแห่งในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง รวมทั้งกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ภาคตะวันออก และภาคใต้ และในระหว่างวันที่ 15-18 สิงหาคม 2565 เกิดสถานการณ์น้ำท่วม ในพื้นที่ 17 จังหวัด ได้แก่ ลำปาง พระนครศรีอยุธยา อ่างทอง สุพรรณบุรี ปราจีนบุรี สระแก้ว ฉะเชิงเทรา ขอนแก่น ชัยภูมิ และอุบลราชธานี กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ หวังว่าทุก ๆ ฝ่าย ในทั่วทุกมุมโลกจะมีความตระหนัก จริงจัง และมุ่งแก้ไขปัญหการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่ส่งผล ให้เกิดภัยพิบัติที่สร้างความเสียหายและรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชากรโลก และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยียานไร้คนขับ การจำลองยุทธและฝึกเสมือนจริง สารสนเทศและการสื่อสารทหาร และปัญญาประดิษฐ์ ภายใน สทป. จะเป็นส่วนสำคัญในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีและอุตสาหกรรมความมั่นคง ของไทย เพื่อร่วมเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศนี้

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

บรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

การพัฒนาแบบจำลองสามมิติต้นแบบสำหรับชิ้นส่วนของ ของชนวนหัวสำหรับลูกปืนประเภทแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ในการปลดล็อกชนวนพร้อมทำงานสำหรับลูกปืนขนาด 30 x 165 มม.

ทวี ดีจะมาลา^{1*}

วันที่รับ 16 พฤษภาคม 2565 วันที่แก้ไข 10 กรกฎาคม 2565 วันที่ตอบรับ 7 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

การศึกษาเรียบเรียงในครั้งนี้ 1) เพื่อออกแบบจำลองสามมิติต้นแบบสำหรับชิ้นส่วนของชนวนหัวลูกปืนขนาด 30x165 มม. โดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการปลดล็อกให้ชนวนพร้อมทำงาน (อาร์ม) และทำลายตัวเองด้วยแรงสปริง ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้กับลูกปืนต่อสู้อากาศยานทั่วไป 2) เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาวิเคราะห์ข้อมูลวิศวกรรมเฉพาะทางสำหรับเป็นแนวทางนำไปขยายผลต่อยอดในการสร้างต้นแบบชิ้นส่วนของชนวนหัวลูกปืนขนาด 30x165 มม. ดังนั้น หากใช้เทคนิควิธีการนี้จะช่วยยืดอายุการทำงานของชนวนได้มากกว่าแบบโฟโตรีเทคนิค ชนวนลูกปืนขนาด 30x165 มม. ที่ออกแบบมีอุปกรณ์กลไกการทำงานหลักอยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกทำหน้าที่ด้านความปลอดภัย ซึ่งจะป้องกันการทำงานของชนวนก่อนเวลาอันควร เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน หรือความปลอดภัยในการเก็บรักษา รวมถึงความปลอดภัยในการขนส่ง ซึ่งกลไกจะเป็นลักษณะประเภทเชิงกล ส่วนที่สองทำหน้าที่จุดระเบิดให้ทำงาน โดยชนวนจะพร้อมทำงานเมื่อลูกปืนถูกยิงออกจากลำกล้องปืน และหัวลูกปืนหมุนรอบตัวเองที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที โดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของลูกปืนจะทำให้สปริงเคลื่อนที่ขึ้นไปยังส่วนปลายชนวน และปลดล็อกกลไกชุดชิ้นส่วนกลไกภายในชนวนให้อยู่ในตำแหน่งพร้อมทำงาน เรียกตำแหน่งนี้ว่า ตำแหน่งอาร์ม และจะทำลายตัวเอง (Self-Destruction) เมื่อหัวลูกปืนหมุนรอบตัวเองช้าลงทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางน้อยกว่าแรงสปริงส่งผลให้เข็มแทงชนวนเคลื่อนที่กลับไปกระแทกดินเริ่มจุดการระเบิด

คำสำคัญ : ชนวนหัวลูกปืน 30 มม., ชนวนหัวลูกปืน 30x165 มม., ชนวนพร้อมทำงานด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง, ชนวนทำลายตัวเองด้วยแรงสปริง, ชนวนแบบกระแทกแตกทำลายตัวเอง

¹ กองวิชาฟิสิกส์และเคมี, ฝ้ายศึกษา, โรงเรียนนายเรือ

* ผู้แต่ง, อีเมล: taweemala@hotmail.com

Developing a prototype 3D model of fuze parts for the centrifugal force type to unlock the fuze at armed for the 30x165 mm cartridges

Thawee Deejamala^{1*}

Received 16 May 2022, Revised 10 July 2022, Accepted 7 September 2022

Abstract

The objectives of this research are 1) designing a 3D prototype model for the fuze part which is 30x165 mm cartridges that work on centrifugal force to unlock the fuze at armed and on spring force for self-destruction this is a principle that applies to general anti-aircraft cartridges 2) using to develop specialized engineering data analysis and, then, use the acquired knowledge for prototyping the fuze for 30x165 mm cartridges in the future. The applied technique could extend the lifetime of the fuze to be longer than the pyrotechnical method could. The proposed fuze design consisted of two parts. The first part was a mechanical system which prevented premature or accidental detonation in order to protect users as well as to ensure safety in shipping and storage. The second part of the design was a detonation system. The fuze was ready when the cartridge was fired. While the projectile rotated at the speed of 14,000 rpm, the centrifugal force caused the spring to move to the tip of the fuze. As a result, mechanical parts inside the fuze were unlocked and put in a ready-to-work position, which was known as the armed position. The self-destruction began when the centrifugal force was less than that of the spring as the projectile rotation slowed down, causing the firing pin to move back and impact the primer to initiate detonation.

Keywords : 30 mm. cartridge fuze, 30x165 mm cartridge fuze, Centrifugal fuze, Self-destruction spring fuze, Self-destruction impact fuze

¹ Department of Physics and Chemistry, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy

* Corresponding author, E-mail: taweemala@hotmail.com

1. บทนำ

ขนวนเป็นอุปกรณ์หรืออาวุธยุทธโธปกรณ์ที่บรรจุวัตถุระเบิดไว้ภายใน เพื่อใช้สำหรับจุดวัตถุระเบิดตามเงื่อนไขที่กำหนด นอกจากนี้ขนวนยังมีอุปกรณ์นิรภัยที่มีกลไกด้านความปลอดภัยปกป้องผู้ใช้งานจากการระเบิดก่อนเวลาอันควร หรือโดยไม่ได้ตั้งใจ ตัวอย่าง เช่น ลูกปืนใหญ่ ขนวนพร้อมทำงานโดยอาศัยความเร่งของลูกปืนใหญ่และการหมุนรอบตัวเองเพื่อปลดล็อกกลไกภายในขนวนที่แยกตัวจุดระเบิดออกจากส่วนบรรจุหลักจนกระทั่งลูกปืนถูกยิง [1], [2]

ขนวนปืนใหญ่ (Artillery fuze) [3], [4] เป็นขนวนหัวที่ใช้กับลูกกระเบิดยิงจากเครื่องยิงลูกระเบิด (ลย/ค.) หรือปืนใหญ่ ขนวนบางชนิดอาจมีเฉพาะองค์ประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือทางกลที่จำเป็นในการส่งสัญญาณ หรือกระตุ้นการระเบิด แต่มีขนวนบางตัวที่มีวัตถุระเบิดปฐมภูมิจำพวกดินเริ่มจำนวนเล็กน้อยเพื่อเริ่มต้นการระเบิด ขนวนสำหรับลูกปืนขนาดใหญ่อาจมีดินระเบิดที่เป็นตัวขยายการระเบิดรวมอยู่ด้วยเพื่อสนับสนุนการระเบิดให้สมบูรณ์

ขนวนปืนใหญ่ [5], [6], [7] เป็นอุปกรณ์กลไกประกอบเข้ากับเรือนหัวลูกปืนเพื่อให้ทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยทั่วไปแล้วจะจำแนกขนวนตามเงื่อนไขการจุดระเบิดดังนี้ 1) เมื่อกระทบเป้า (Impact fuze) จะทำการจุดระเบิดซึ่งจะมี 2 ตำแหน่งคือ จุดที่ส่วนปลายหัวลูกปืน (Point Detonating: PD) หรือจุดที่ส่วนท้ายหัวลูกปืน (Base Detonating: BD) เรียกขนวนแบบนี้ว่าขนวนกระทบแตก 2) เมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้หลังจากการยิง ซึ่งจะมีกลไกแบบลานนาฬิกาหรือมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่าขนวนเวลา (Time fuze) 3) จุดระเบิดเมื่อส่งสัญญาณตรวจพบเป้าในระยะใกล้กับพื้น โครงสร้าง หรือเป้าหมายอื่น ๆ เรียกว่า ขนวนคลื่นวิทยุ (Proximity fuze) [8], [9] ขนวนทุกประเภทจะมีการออกแบบ

ให้มีอุปกรณ์นิรภัยเพื่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาหรือนำไปใช้งาน ซึ่งคุณลักษณะด้านความปลอดภัยของขนวนจะเป็นดังนี้ 1) เป็นลักษณะลดนิรภัยเสียบขัดกับอุปกรณ์ภายในขนวนไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ 2) เป็นลักษณะกลไกการทำงานขัดขวางหรือเอียงหลบขบวนการวัตถุระเบิดไม่ให้อยู่ในแนวเดียวกัน โดยทั่วไปขนวนที่ผลิตสำหรับใช้กับลูกปืนจะปลดล็อกเพื่อให้ขนวนพร้อมทำงาน (Arms) ตามคุณลักษณะของอาวุธปืนที่ใช้ทำการยิงมี 2 ประเภทดังนี้

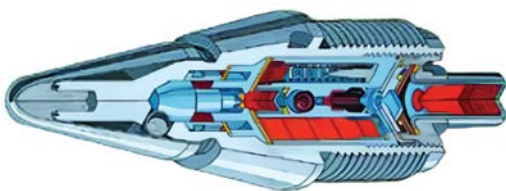
1. ขนวนที่ใช้กับปืนที่ไม่มีเกลียวในลำกล้อง เช่น เครื่องยิงลูกระเบิด (Mortars) ขนวนชนิดนี้จะอาศัยหลักการปลดล็อกเพื่อให้ขนวนพร้อมทำงานโดยอาศัยแรงเฉื่อยถอยหลัง (Set back forces) ที่เกิดจากความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกปืนภายในลำกล้องปืน

2. ขนวนที่ใช้กับปืนที่มีเกลียวในลำกล้องปืน เช่น ปืนใหญ่ (Artillery) ขนวนชนิดนี้จะอาศัยหลักการปลดล็อกเพื่อให้ขนวนพร้อมทำงานโดยอาศัยแรงเฉื่อยถอยหลังที่เกิดจากความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกปืนภายในลำกล้องปืน และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Rotational forces) ที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองเมื่อหัวลูกปืนเคลื่อนที่ตามเกลียวลำกล้องปืน

ปัจจุบันไทยสามารถผลิตลูกปืนต่อสู้อากาศยานระยะใกล้ ชนิดลูกฝึก (Target Practice Tracer: TP-T) และกำลังดำเนินการขยายขีดความสามารถให้สามารถผลิตลูกปืนชนิดหัวระเบิด (High Explosive: HE) ในการผลิตลูกปืนชนิดหัวระเบิด ส่วนประกอบหลัก เช่น ไพรเมอร์ ลองลูกปืน ดินขับ สามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ยกเว้น ขนวนหัวลูกปืน (Fuze) สำหรับขนวนลูกปืน 30x165 มม. ที่มีใช้อยู่ตามเหล่าทัพของไทย ทั้งกองทัพบกและกองทัพอากาศเป็นขนวนรุ่น A-670M

ขนาด 30x165 A-670M [10] เป็นขนาดชนิดกระทบแตกทำลายตัวเอง มีกลไกหน่วงเวลาที่ปลดล็อกให้ชนวนพร้อมที่ระยะ 20-100 เมตรห่างจากปากลำกล้องปืน ด้วยหลักการของแรงถอยหลังและแรงที่เกิดจากการหมุนของลูกปืน และหน่วงเวลาทำลายตัวเองด้วยสารไพโรเทคนิค โดยทำลายตัวเองที่เวลา 9-14 วินาที ภายหลังทำการยิงลูกปืน กำหนดอายุการใช้งาน (lifetime) ที่ 15 ปี แสดงรูปผ่าเห็นองค์ประกอบภายในของชนวนตามรูปที่ 1

ขนาด 30x165 A-670M สามารถใช้ได้กับลูกปืนชนิดระเบิดสองวิถี (HE-T) และระเบิดเพลิงสองวิถี (HE-IT) ใช้กับปืนอัตโนมัติ 2A42, 2A38, 2A72 และ ZTM1 ที่ติดตั้งบนยานเกราะอย่างของทหารราบทั่วไป เช่น BMP-2, BMP-3, BMD-2, BMD-3 และ BTR-80A



รูปที่ ๑ ขนาด 30 x 165 A-670M [10]

ขนาดหัวลูกปืนที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นขนาดหัวชนิดกระทบแตกทำลายตัวเอง (Self-Destruction) โดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์แบบง่ายๆ ในส่วนของอุปกรณ์ด้านความปลอดภัยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ของมวลต็มน้ำหนัก และเข็มรับแรงกระแทกที่แข็งแรงแตกหักง่าย ให้ชนวนทำงานเมื่อไปกระทบเป้าหมาย และทำลายตัวเองเมื่อไม่กระทบเป้าหมาย เนื่องจากความเร็วการหมุนรอบตัวเองลดลงตามเงื่อนไขที่กำหนด สำหรับการสร้างชนวนหัวจะเริ่ม

จากการทำความเข้าใจหน้าที่ของแต่ละชิ้นส่วนซึ่งจะมีหน้าที่หลักอยู่ 2 ส่วน คือ 1) ส่วนที่ทำหน้าที่ด้านความปลอดภัย ซึ่งจะป้องกันการทำงานก่อนเวลาอันควร 2) ส่วนที่ทำหน้าที่จุดวัตถุระเบิด เมื่อลูกปืนกระทบเป้าหมายหรือเมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานด้านสรรพาวุธ ดังนั้น จะต้องมีเครื่องทดสอบเพื่อทำการทดสอบชนวนหัวให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด [11], [12]

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อออกแบบจำลองสามมิติต้นแบบสำหรับชิ้นส่วนของชนวนหัวลูกปืนขนาด 30x165 มม. โดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการปลดล็อกให้ชนวนพร้อมทำงาน (อาร์ม) และทำลายตัวเองด้วยแรงสปริง ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้กับลูกปืนต่อสู้อากาศยานทั่วไป

2.2 เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาวิเคราะห์ข้อมูลวิศวกรรมเฉพาะทางสำหรับเป็นแนวทางนำไปขยายผลต่อยอดในการสร้างต้นแบบชิ้นส่วนของชนวนหัวลูกปืนขนาด 30x165 มม.

3. ขอบเขตของเรื่อง

ระยะที่ 1 ศึกษาวิเคราะห์แนวคิด ทฤษฎี และหลักการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชนวนหัวลูกปืนต่อสู้อากาศยานที่ใช้ตามเหล่าทัพต่าง ๆ ในประเทศไทย

ระยะที่ 2 ออกแบบและเขียนแบบ 3 มิติ ชิ้นส่วนชนวนหัวสำหรับลูกปืนขนาด 30x165 มม. โดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการปลดล็อกให้ชนวนพร้อมทำงาน และทำลายตัวเองด้วยแรงของสปริง

4. คำนิยาม

อาร์ม (Arms) [13], [14] หมายถึง กลไกการทำงานทางกลของส่วนประกอบขบวนเคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งพร้อมทำงาน

ขบวนการวัดระเบิด (Explosive Train) [15] หมายถึง ลำดับการทำงานของวัดระเบิด โดยเริ่มจากวัดระเบิดที่มีความไวในการจุดตัวมาก ไปยังวัดระเบิดที่มีความไวในการจุดตัวน้อย

5. เนื้อเรื่อง

ในทางการทหาร ขบวนเป็นส่วนหนึ่งของอาวุธ ที่มีอุปกรณ์กลไกการทำงานหลักอยู่ 2 ส่วน คือ 1) ส่วนที่ทำหน้าที่ด้านความปลอดภัย ซึ่งจะป้องกันการทำงานของขบวนก่อนเวลาอันควร เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน หรือความปลอดภัยในการเก็บรักษา รวมถึงความปลอดภัยในการขนส่ง ซึ่งกลไกจะเป็นลักษณะประเภทเชิงกล หรือไฟฟ้า หรือทั้งสองอย่างรวมกัน โดยผู้เรียบเรียงจะทำการออกแบบขบวนเป็นลักษณะประเภทเชิงกลอย่างเดียว เนื่องจากระบบการทำงานแบบเชิงกลมีความเสถียรมีอายุการใช้งานได้เป็น 100 ปี และมีความปลอดภัยในการเก็บรักษาสูงกว่าแบบอื่น ๆ 2) ส่วนที่ทำหน้าที่จุดระเบิดให้ทำงาน จะมีเงื่อนไขการทำงานอยู่ 2 แบบ ดังนี้ [16], [17]

1) แบบกระแทกแตก (Point Detonating: PD) ขบวนจะทำงานเมื่อขบวนหัวกระแทกเป้าหมาย พลังงานจลน์ที่ได้เกิดจากการกระแทก จะถูกส่งไปยังเข็มแทงขบวน พลังงานจากเข็มแทงขบวนจะส่งต่อไปให้กับวัดระเบิดประเภทดินเริ่มที่ไวต่อการเสียดสี เช่น Lead Styphnate [18] ซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตได้เอง เกิดการจุดตัวขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ในรูปของแรงดันและความร้อนส่งต่อไปตามขบวนการวัดระเบิด

2) แบบทำลายตัวเอง (Self-Destruction: SD) ขบวนจะทำงานเมื่อถึงเวลาที่ตั้งไว้หรือถึงระยะทางที่กำหนด พลังงานที่ส่งให้เข็มแทงขบวนจะเป็นพลังงานศักย์จากสปริงที่อยู่ในขบวนไปทำให้ดินเริ่มทำงาน หรือพลังงานความร้อนที่ได้จากดินถ่วงเวลา (ไพโรเทคนิค) หรือพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยผู้เรียบเรียงได้เลือกใช้การทำลายตัวเองด้วยพลังงานศักย์จากสปริง ซึ่งมีความเสถียรและเที่ยงตรงกว่าแบบสารไพโรเทคนิคที่ใช้ในขบวน A-670M

5.1 หลักการทำงาน :

ขบวนหัวลูกปืน 30x165 มม. แบบกระแทกแตก ทำลายตัวเองจะพร้อมทำงานเมื่อลูกปืนถูกยิงออกจากลำกล้องปืนด้วยความเร่งและการหมุนรอบตัวเองของหัวลูกปืน โดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของลูกปืนจะทำให้สปริงเคลื่อนที่ขึ้นไปยังส่วนปลายขบวนและปลดล็อกชุดชิ้นส่วนกลไกภายในขบวนให้อยู่ในตำแหน่งพร้อมทำงาน เรียกตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่ง อาร์ม โดยมีอุปกรณ์ดังนี้

5.1.1 อุปกรณ์นิรภัย มีระบบความปลอดภัย 2 เงื่อนไขตามมาตรฐานที่กำหนด โดยมีการทำงาน ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 ขบวนการวัดระเบิดจัดเรียงแนวแบบเยื้องศูนย์กลางกัน

1) อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อปลดล็อกสลัก ซึ่งเป็นระบบป้องกันที่ดีที่สุด เนื่องจากการหมุนของหัวลูกปืนตามความเร็วรอบที่กำหนด เพื่อปลดล็อกสลักจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อลูกปืนเคลื่อนที่ผ่านลำกล้องปืนเท่านั้น ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุลูกปืนทำงานภายนอกลำกล้องปืนการเคลื่อนที่ของหัวลูกปืนจะเกิดภายนอกไม่ผ่านเกลียวลำกล้อง หัวลูกปืนจะไม่หมุนที่ความเร็วรอบที่ตั้งไว้ สลักที่อยู่ภายในขบวนจะไม่ปลดล็อก ไม่อาร์ม

2) มีโรเตอร์เพื่อหมุนหน่วยเวลาและเอียงเอียงหลบขบวนการวัฏธนะเบิด เมื่อสลักปลดล็อกจะทำให้โรเตอร์เป็นอิสระในการเคลื่อนที่ ซึ่งโรเตอร์จะใช้เวลาในการหมุนเพื่อให้ตำแหน่งแนวของดินเริ่มมาอยู่ในแนวเข็มแทงขบวนเมื่อหัวลูกปืนเคลื่อนที่ห่างจากปากลำกล้องประมาณ 3 เมตร เป็นระยะความปลอดภัยที่กำหนดไว้ ซึ่งดีกว่าการหน่วยเวลาแบบใช้สารไพโรเทคนิคของขบวน A-670M สารไพโรเทคนิคอาจจะเสื่อมสภาพจากอุณหภูมิความชื้นได้ง่ายจากการเก็บรักษาที่ไม่ดี

เงื่อนไขที่ 2 ระบบป้องกันแรง หรือพลังงานที่จะไปทำให้ไพโรเมอร์จุดตัว

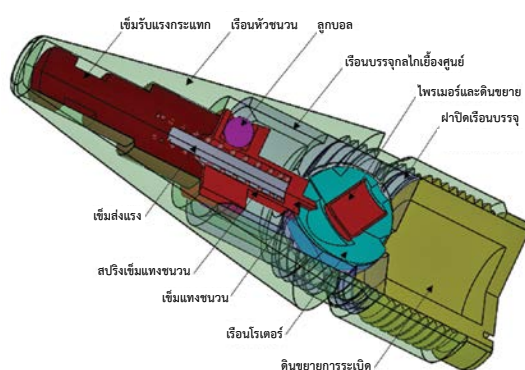
1) เข็มรับแรงกระแทกทำจากวัสดุที่แข็งเปราะเมื่อได้รับแรงกระทำที่ไม่พึงประสงค์ ทำจากแบ็กกาไลท์ (Bakelite) มีคุณสมบัติแข็งเปราะจะแตกหักเมื่อได้รับแรงกระทำก่อนเวลาอันควรเพื่อป้องกันไม่ให้เข็มแทงขบวนไปกระแทกไพโรเมอร์ป้องกันดินเริ่มจุดตัว ในกรณีเกิดอุบัติเหตุขึ้น ลูกปืนได้รับการกระทบกระแทกในขณะการหยิบยกหรือขนย้าย ซึ่งมีความปลอดภัยกว่าขบวน A-670M

2) เข็มแทงขบวนและลูกบอลได้รับการออกแบบคำนวณขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสมกับค่า k ของสปริงเข็มแทงขบวน เพื่อป้องกันแรงเฉื่อยที่จะเกิดขึ้นจากอุบัติเหตุต่าง ๆ โดยจะต้องผ่านเกณฑ์การทดสอบด้วยวิธีการ Drop Test ตามมาตรฐานที่กำหนด

5.1.2 การทำงานเมื่อกระทบเป้า จะเป็นแบบระเบิดเร็ว (Super quick) เมื่อหัวลูกปืนกระทบเป้าจะส่งพลังงานไปยังเข็มแทงขบวนไปกระแทกดินเริ่ม เปลวไฟจากดินเริ่มไปจุดดินนำ ดินขยายการระเบิดและดินระเบิดหลัก ตามลำดับ

5.1.3 การทำงานเมื่อไม่กระทบเป้า จะเป็นแบบทำลายตัวเอง (Self-Destruction) เมื่อหัวลูกปืนหมุนรอบตัวเองช้าลงทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางน้อยกว่าแรงสปริง ส่งผลให้เข็มแทงขบวนเคลื่อนที่กลับไปกระแทกดินเริ่ม เปลวไฟจากดินเริ่มไปจุดดินนำ ดินขยายการระเบิด และดินระเบิดหลักตามลำดับ ซึ่งดีกว่าทำลายตัวเองแบบใช้สารไพโรเทคนิคที่ใช้อยู่ในขบวน A-670M เนื่องจากมีความเสถียรและเที่ยงตรงกว่า และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเนื่องจากเมื่อเก็บขบวนไว้นาน ๆ สารไพโรเทคนิคจะเสื่อมสภาพจากการได้รับอุณหภูมิความชื้นที่สูงไม่เหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมที่ร้อนชื้นแบบประเทศไทย

ขบวนหัว 30x165 มม. ตามรูปที่ 2 รุ่นนี้เป็นรุ่นแรกที่ยกแบบให้ง่ายต่อการผลิต มีกลไกการทำงานไม่ซับซ้อนมาก เน้นความปลอดภัยในการใช้งานเป็นหลัก ตัวเรือนทำจากอะลูมิเนียมแข็งแบบขึ้นเดียวและมีฐานเกลียวขนาด M18x0.75 เพื่อให้ประกอบเข้ากับส่วนปลายเรือนหัวลูกปืน 30x165 มม. ได้ มีช่องบรรจุชิ้นส่วนชุดนิรภัยกลไกด้านความปลอดภัยและชุดกลไกการจุดระเบิดพร้อมชุดดินขยายการระเบิด

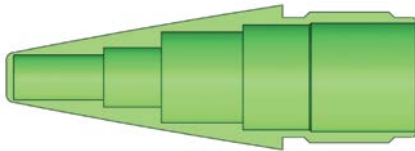


รูปที่ ๒ ขบวนหัวสำหรับลูกปืนขนาด 30x165 มม.

5.2 ส่วนประกอบ

5.2.1 เรือนหัวชนวน 30x165 มม. (Fuze Body)

ตามรูปที่ 3 ทำจากวัสดุอะลูมิเนียมกลึงขึ้นรูปขึ้นเดียว และมีฐานเกลียวขนาด M18x0.75 สำหรับบรรจุชิ้นส่วนกลไกการทำงานต่าง ๆ ของชนวน รวมถึงวัตถุระเบิดเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่ทนต่อการกัดกร่อนเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศอย่างประเทศไทย



รูปที่ ๓ เรือนหัวชนวน 30x165 มม.

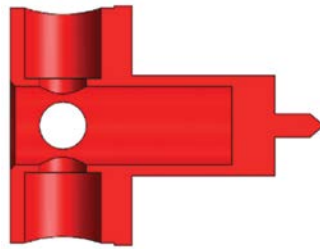
5.2.2 ชุดเข็มแทงชนวน (Firing Unit) ประกอบอยู่ตำแหน่งส่วนปลายของชนวนสำหรับบรรจุชุดวัตถุระเบิด ประกอบด้วยชิ้นส่วน ดังนี้

5.2.2.1 เข็มรับแรงกระแทก (Impact Pin) ตามรูปที่ 4 ทำหน้าที่รับพลังงานจากการที่ชนวนไปกระทบเป้าหมาย แล้วส่งต่อพลังงานไปยังเข็มแทงชนวน ทำจากแบ็กกาลีท์ (Bakelite) มีคุณสมบัติแข็งเปราะ จะแตกหักเมื่อได้รับแรงกระทำก่อนเวลาอันควรในกรณีเกิดอุบัติเหตุ เพื่อป้องกันเข็มแทงชนวนไปกระแทกไพรเมอร์



รูปที่ ๔ เข็มรับแรงกระแทก

5.2.2.2 เข็มแทงชนวน (Firing Pin) ตามรูปที่ 5 ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม มีหน้าที่ส่งพลังงานไปยังไพรเมอร์ซึ่งบรรจุวัตถุระเบิดประเภทดินร่วนที่มีความไวต่อการกระแทก เสียดสี



รูปที่ ๕ เข็มแทงชนวน

5.2.2.3 เข็มส่งแรง (Support Pin) ตามรูปที่ 6 ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม มีหน้าส่งแรงกระแทก



รูปที่ ๖ เข็มส่งแรง

5.2.2.4 สปริงเข็มแทงชนวน (Firing Pin Spring) ตามรูปที่ 7 ทำหน้าที่ล็อกเข็มแทงชนวนไว้กับโรเตอร์ และส่งพลังไปยังเข็มแทงชนวนในกรณีที่ชนวนทำลายตัวเอง กำหนดคุณสมบัติเฉพาะให้สามารถใช้งานได้ไม่น้อยกว่า 50 ปี



รูปที่ ๗ สปริงเข็มแทงชนวน

5.2.2.5 ลูกบอล (Ball) ตามรูปที่ 8 ทำจากวัสดุสแตนเลส มีหน้าที่สร้างแรงยกให้เข็มแทงชนวนเพื่อปลดล็อกโรเตอร์



รูปที่ ๘ ลูกบอล

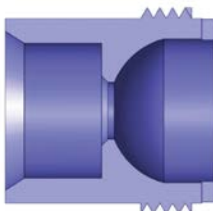
5.2.3 ชุดกลไกเืองศูนย์ (Rotor Unit) อยู่ด้านล่างชุดเข็มแทงขนวน เป็นชุดนิรภัยที่ป้องกันการดำเนินงานของขนวนโดยไม่ได้ตั้งใจก่อนการยิง โดยอาศัยหลักการเอียงวัตถุระเบิดหนีจากแนวของเข็มแทงขนวน ซึ่งเป็นการหลบหนีขนวนการวัตถุระเบิดเพื่อป้องกันไม่ให้เข็มแทงขนวนไปกระแทกไพโรเมอร์ หรือป้องกันเปลวไฟไม่ให้ไปจุดดินขยายในกรณีเกิดความผิดพลาดไพโรเมอร์ทำงาน ซึ่งแนวของขนวนการวัตถุระเบิดจะเอียงกันอยู่จนกว่าจะได้ระยะปลอดภัยที่ขนวนพร้อมทำงาน (Arms) เมื่อยิงลูกปืน หัวลูกปืนเคลื่อนที่และหมุนรอบตัวเองที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาที ชุดตัวล็อกจะเริ่มปลดล็อกให้โรเตอร์เป็นอิสระและโรเตอร์เคลื่อนที่หมุนเพื่อให้แนวของวัตถุระเบิดมาตรงกับแนวเข็มแทงขนวน ประกอบด้วยชิ้นส่วน ดังนี้

5.2.3.1 เรือนโรเตอร์ (Rotor Body) ตามรูปที่ 9 ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม มีหน้าที่บรรจุดินระเบิดและ Detonator ขัดขวางขนวนการวัตถุระเบิดโดยการหมุนเอียงไม่ให้ดินระเบิดอยู่ในแนวเข็มแทงขนวน



รูปที่ ๙ เรือนโรเตอร์

5.2.3.2 เรือนบรรจุชุดกลไกเืองศูนย์ (Rotor Holder) ตามรูปที่ 10 ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม มีหน้าที่เป็นเรือนบรรจุชิ้นส่วนกลไกเืองศูนย์



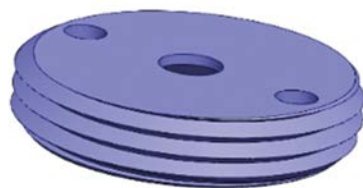
รูปที่ ๑๐ เรือนบรรจุชุดกลไกเืองศูนย์

5.2.3.3 ไพโรเมอร์และดินขยาย ตามรูปที่ 11 บรรจุดินระเบิดประเภทดินระเบิด เช่น เลดสตีฟเนต (Lead styphnate) และดินขยายการระเบิด (Detonator) [19]



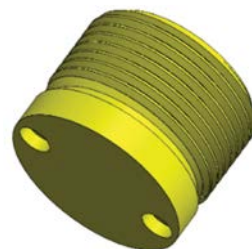
รูปที่ ๑๑ ไพโรเมอร์และดินขยาย

5.2.3.4 ฝาปิดเรือนบรรจุชุดกลไกเืองศูนย์ (Cup Holder) ตามรูปที่ 12 ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม มีหน้าที่ปิดครอบโรเตอร์



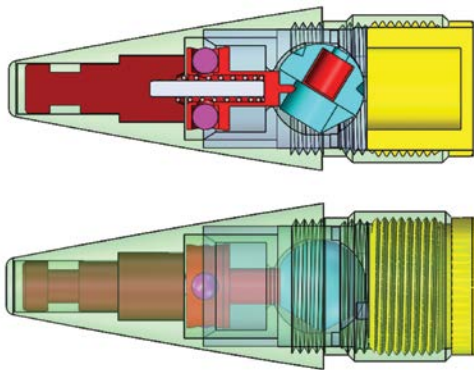
รูปที่ ๑๒ ฝาปิดเรือนบรรจุชุดกลไกเืองศูนย์

5.2.4 ดินขยายการระเบิด (Booster) ตามรูปที่ 13 ประกอบอยู่ส่วนล่างสุดของขนวน บรรจุดินระเบิด PETN [19] เพื่อใช้จุดดินระเบิดหลัก



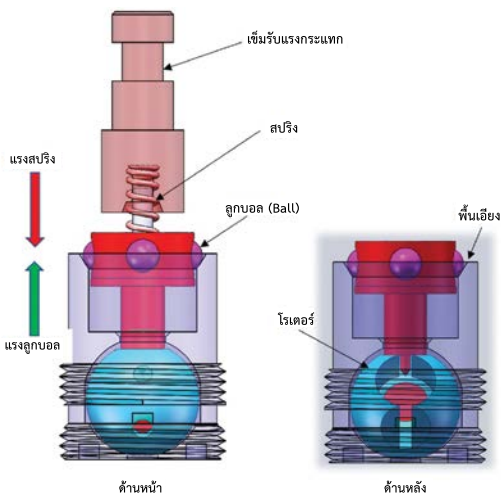
รูปที่ ๑๓ ดินขยายการระเบิด

5.3 ประกอบรวมชิ้นส่วนชนวน ตามรูปที่ 14



รูปที่ ๑๔ ชิ้นส่วนต่าง ๆ ประกอบอยู่ภายในหัวชนวน โดยวางไพโรเมอร์เอียงหลบเข็มแทงชนวน

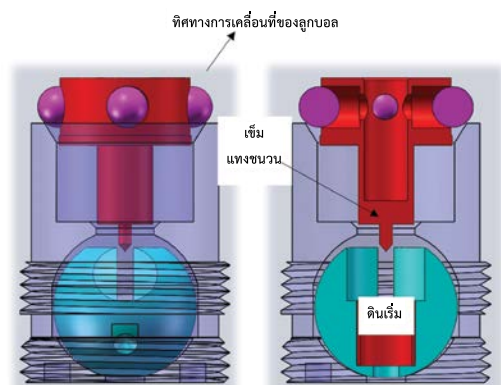
5.4 การทำงานของชนวน



รูปที่ ๑๕ กลไกภายในชนวน สถานะไม่อาร์ม โรเตอร์เอียงเอียงไม่ให้ไพโรเมอร์อยู่ในแนวเข็มแทงชนวน

รูปที่ 15 แสดงตำแหน่งชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชนวนที่บรรจุอยู่ในเรือนหัวชนวนวางอยู่ในตำแหน่งสถานะชนวนไม่อาร์ม อุปกรณ์ด้านนิรภัยยังไม่ได้ปลดล็อกมีความปลอดภัยในการหยิบยกขนย้าย

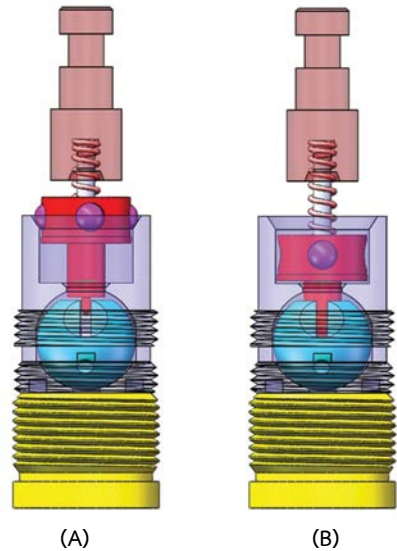
เนื่องจากขบวนการวัดระยะเปิดยังวางเอียงเอียงศูนย์กลางอยู่ โดยไพโรเมอร์ที่บรรจุอยู่ในโรเตอร์ยังวางเอียงไม่อยู่ในแนวของเข็มแทงชนวน และเข็มแทงชนวนยังขัดและกดทับที่บ่าของโรเตอร์โดยมีปลายสปริงด้านหนึ่งดันที่บ่าเข็มแทงชนวน อีกด้านดันอยู่กับเข็มรับแรงกระแทก เพื่อไม่ให้โรเตอร์เคลื่อนที่หรือหมุนได้ ซึ่งค่าแรงกดของสปริงนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสปริง ที่เรือนเข็มแทงชนวนจะมีช่องบรรจุลูกบอลจำนวน 4 ช่อง สำหรับบรรจุลูกบอลช่องละ 1 ลูก โดยลูกบอลที่บรรจุอยู่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามบ่าของเรือนบรรจุชุดกลไกเอียงศูนย์กลางที่ทำมุมเอียงขึ้นเพื่อยกเข็มแทงชนวนให้เคลื่อนที่ขึ้นจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของลูกบอลขณะที่ชนวนกำลังหมุนรอบตัวเอง ในการออกแบบได้วางตำแหน่งของเข็มรับแรงกระแทกบนสปริงเข็มแทงชนวน เพื่อลดแรงกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกปืนด้วยความเร็วสูงมาก ๆ ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเข็มรับแรงกระแทกที่มาจากวัสดุแบ็กก้าไลท์ที่มีค่า Compressive Yield Strength ประมาณ 250 MPa



รูปที่ ๑๖ สถานะอาร์มเข็มแทงชนวนเคลื่อนที่ขึ้นปลดล็อกโรเตอร์และโรเตอร์หมุนให้ไพโรเมอร์อยู่ในแนวเข็มแทงชนวน

รูปที่ 16 แสดงชนวนพร้อมทำงาน หรืออาร์ม เมื่อลูกปืนถูกยิง ดินซัจะสร้างแรงดันในรังเพลิงเฉลี่ย ประมาณ $3,600 \text{ kg/cm}^2$ ทำให้หัวลูกปืนเคลื่อนที่ตามแนวลำกล้อง และหัวลูกปืนจะถูกบังคับให้หมุนรอบตัวเองตามเกลียวลำกล้องปืน ขณะที่หัวลูกปืนหมุนรอบตัวเองจะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) กระทำกับลูกบอล โดยทิศของแรงของลูกบอลจะไปตามแนวรัศมีของชนวน แต่เนื่องจากลูกบอลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ได้ตามแนวเอียงทำมุมยกไปยังส่วนปลายของชนวน ขณะที่ลูกบอลเคลื่อนที่จะส่งแรงยกไปกระทำกับเข็มแทงชนวนให้เข็มแทงชนวนเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนและปลดล็อกโรเตอร์ แต่ในขณะที่ลูกปืนเคลื่อนที่ในลำกล้องปืนจะเป็นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงจากมวลของชุดเข็มแทงชนวนติดอยู่กับโรเตอร์ทำให้โรเตอร์ยังเคลื่อนที่ไม่ได้โดยเข็มแทงชนวนจะเริ่มยกตัวขึ้นเมื่อลูกปืนเริ่มเคลื่อนที่ออกจากลำกล้องปืน ซึ่งลูกปืนจะเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงเนื่องจากแรงต้านของอากาศทำให้ชุดเข็มแทงชนวนเกิดแรงเฉื่อยเสริมกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของลูกบอล ในการออกแบบชนวนดังกล่าวนี้ได้กำหนดเงื่อนไขที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที จะได้แรงที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของลูกบอลในแนวตามยาวของชนวนมีค่ามากกว่าแรงของสปริงที่กดอยู่บนเข็มแทงชนวนทำให้เข็มแทงชนวนเคลื่อนที่ปลดล็อกชุดโรเตอร์ ส่งผลให้โรเตอร์เป็นอิสระ สามารถเคลื่อนที่หมุนได้ โดยโรเตอร์นี้ถูกออกแบบรูปร่างให้แนวแกนหมุนอยู่ในแนวที่ทำให้โรเตอร์หมุนไพล์มาตรงกับเข็มแทงชนวน การเคลื่อนที่แบบหมุนของโรเตอร์เป็นไปตามหลักของโมเมนต์ความเฉื่อยจะหมุนให้จุดศูนย์กลางมวลอยู่ในแนวแกนหมุนทำให้ไพล์มาซึ่งบรรจุวัตถุระเบิดประเภทดินเริ่มตั้งตรงอยู่ในแนวเดียวกับเข็มแทงชนวน โดยโรเตอร์จะใช้เวลาในการหมุนให้ขบวนการ

วัตถุระเบิดอยู่ในแนวเดียวกันใช้เวลาประมาณ 0.003 วินาที ซึ่งความเร็วลูกปืน $30 \times 165 \text{ มม.}$ มีความเร็วปากลำกล้องปืนประมาณ 970 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะอาร์มห่างจากปากลำกล้องปืนประมาณ 3 เมตร



รูปที่ ๑๗ (A) แรงที่ Bearing มากกว่าแรงสปริง
(B) แรงสปริงมากกว่าแรงที่ Bearing (ทำลายตัวเอง)

รูปที่ 17 แสดงชนวนทำลายตัวเอง (Self-Destruction: SD) เมื่อหัวลูกปืนเคลื่อนที่ออกจากลำกล้องปืนไปในอากาศจะมีแรงเสียดทานระหว่างหัวลูกปืนกับอากาศ เกิดแรงต้านทำให้หัวลูกปืนเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง ส่งผลให้ความเร็วในการหมุนของหัวลูกปืนลดลงเรื่อยๆ ในการออกแบบชนวนนี้ได้กำหนดเงื่อนไขเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของหัวลูกปืนน้อยกว่า 10,000 รอบต่อนาที แรงที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของลูกบอลในแนวตามยาวของชนวนจะมีค่าน้อยกว่าแรงของสปริงที่กดอยู่บนเข็มแทงชนวน ส่งผลให้เข็มแทงชนวนเคลื่อนที่กลับมากะแทกไพล์ ทำให้ดินเริ่มจุดตัวเกิดเปลวไฟไปจุดดินนำ ดินขยายการระเบิด และดินระเบิดหลักตามลำดับ เรียกการจุดตัวตามลำดับแบบนี้ว่า

ขบวนการวัตถุระเบิด (Explosive Train) ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลูกปืนจนถึงจุดที่ทำให้ความเร็วของการหมุนรอบตัวเองของหัวลูกปืนตามเงื่อนไขดังกล่าวจะใช้เวลา 12 ± 5 วินาที ภายหลังการยิง เรียกเวลานี้ว่า เวลาทำลายตัวเองของขบวน

6. สรุป

ขบวนที่ออกแบบเป็นขบวนชนิดกระทบแตกทำลายตัวเอง (PD-SD) สำหรับลูกปืนขนาด 30×165 มม. โดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์แบบง่าย ๆ ใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ของมวลตมุน้ำหนักในการปลดล็อกให้ขบวนพร้อมทำงาน ขบวนทำการจุดระเบิดเมื่อไปกระทบเป้าหมายและทำลายตัวเองเมื่อไม่กระทบเป้าหมายจากพลังงานศักย์ของสปริง ตัวเรือนทำจากอะลูมิเนียมแข็งแบบขึ้นเดียวและมีฐานเกลียวขนาด $M18 \times 0.75$ ขบวนพร้อมทำงานเมื่อลูกปืนถูกยิงหัวลูกปืนจะเคลื่อนที่ และหมุนรอบตัวเองตามเกลียวลากล่องปืน ทำให้ลูกบอลเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนที่ตามพื้นเอียงดันให้เข็มแทงขบวนเคลื่อนที่ขึ้นไปยังส่วนปลายของขบวนที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที ที่ระยะความปลอดภัย 3 เมตร ห่างจากปากลากล่องปืนและทำลายตัวเองในเวลา 12 ± 5 วินาที เมื่อความเร็วในการหมุนของหัวลูกปืนลดลงจนแรงที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของลูกบอลในแนวตามยาวของขบวนจะมีค่าน้อยกว่าแรงของสปริงที่กดอยู่บนเข็มแทงขบวน การนิรภัยใช้หลักการเอียงเอียงไม่ให้ขบวนการวัตถุระเบิดอยู่ในแนวเดียวกัน มีอายุการใช้งานมากกว่า 50 ปี โดยคุณภาพของขบวนหัวลูกปืนและข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นกับการทำงานของขบวนจะขึ้นอยู่กับสปริงเข็มแทงขบวนเป็นหลัก ดังนั้น วัสดุที่จะนำมาใช้ทำสปริงจะต้องมีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด

7. ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการคำนวณขนาดและน้ำหนักของเรือนโรเตอร์จะต้องให้ได้โมเมนต์ความเฉื่อยที่จะทำให้โรเตอร์ หมุนให้ขบวนการวัตถุระเบิดอยู่ในแนวของเข็มแทงขบวน

2. ผลรวมของน้ำหนักและตำแหน่งของลูกบอลจะต้องได้โมเมนต์ความเฉื่อยที่ทำให้เกิดแรงยกจากการหมุนของลูกปืนที่จำนวนรอบ 14,000 รอบต่อนาที มากกว่าแรงกดของสปริง โดยสปริงจะต้องไม่ล้าเมื่อเก็บไว้นาน ๆ (มากกว่า 50 ปี)

3. ระยะยุบตัวของสปริงที่รองรับเข็มรับแรงกระแทกจะต้องสามารถลดแรงที่เกิดจากแรงดันของดินขับจะต้องไม่ส่งผลให้เข็มรับแรงกระแทกเสียรูปทรง

8. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาเรียบเรียงในครั้งนี้ ผู้เรียบเรียงได้รับแรงบันดาลใจจากแนวคิดที่จะเห็นการพึ่งพาตนเองในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งปัจจัยหลักในการผลิตอาวุธ คือ การทำขบวนหัว โดยความรู้ทั้งหมดที่ผู้เรียบเรียงได้รับมาจากประสบการณ์ทำงานในกรมสรรพาวุธทหารเรือ ซึ่งมีบุคลากรที่มีคุณภาพได้ถ่ายทอดผ่านการพูดคุยและการศึกษาเรียนหลักสูตรต่าง ๆ ที่กรมสรรพาวุธทหารเรือเปิดสอน ผู้เรียบเรียงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านและขอขอบคุณครู อาจารย์ และผู้บังคับบัญชา ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่าน

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Anonymous. "Fuze." EN.WIKIPEDIA.org. <https://en.wikipedia.org/wiki/fuze> (accessed May. 9, 2022).

- [2] Weapons and Systems Engineering Department-United States Naval Academy. "Fundamentals of Naval Weapons Systems: Chapter 14 Fuzing." FAS.org. <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/fun/part14.htm> (accessed May. 9, 2022).
- [3] Anonymous. "Artillery fuze." EN.WIKIPEDIA.org. https://en.wikipedia.org/wiki/Artillery_fuze (accessed May. 9, 2022).
- [4] Anonymous. "Field Artillery Volume 6: Ballistics and Ammunition." https://archive.org/details/Ballistics_and_Ammunition_B-Gl-371-006 (access May. 9, 2022).
- [5] H.A. Bethel, *Modern Artillery in the Field*, 1st ed. London, UK: Macmillan, 1911.
- [6] O. F. G. Hogg, *Artillery: Its Origin, Heyday and Decline*, 1st ed., Hamden, CT, USA: Archon Books, 1970.
- [7] I. V. Hogg and L. F. Thurston, *British Artillery Weapons & Ammunition 1914-1918*, 1st ed., London, UK: Ian Allan, 1972.
- [8] *Ammunition, General*, 5th ed., Department of the Army, Washington, DC, USA, 1969.
- [9] A. Wali. "Delta M137 Mod 3 Next Generation Electronic Fuze." ACADEMIA.edu. https://www.academia.edu/34860350/DELTA_M137_MOD_3_Next_Generation_Electronic_Fuze_Chapter_1_AN_INTRODUCTION_TO_MECHANICAL_AND_ELECTRONIC_FUZES (accessed May. 9, 2022).
- [10] Arcus Co.. "Fuze A-670M." ARCUS.bg. <https://arcus.bg/fuze-a-670m-for-30x165mm-ammunition/> (accessed May. 9, 2022).
- [11] *Department of Defense Test Method Standard: Fuze and Fuze Components, Environmental and Performance Tests for*, MIL-STD-331C, U.S. Department of Defense, 2005.
- [12] *Military Standard: Fuze Design, Safety Criteria for*, MIL-STD-1316D, U.S. Department of Defense, 1991.
- [13] *Army Ammunition Data Sheets Artillery Ammunition Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers, and Artillery Fuzes*, U.S. Dept. Army, Washington, DC, USA, 2003.
- [14] Global Security. "Safing, Arming, Fuzing, and Firing (SAFF)." GLOBALSECURITY.org. <http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/safe.htm> (accessed May. 9, 2022).
- [15] *Ordnance Explosive Train Designers' Handbook*, U.S. Nav. Ordnance Lab., White Oak, MD, USA, 1952.
- [16] L. S. Ness and A. G. Williams, *Jane's Ammunition Handbook 2007-2008*. 16th ed. Croydon, UK: Jane's Inf. Group, 2007.
- [17] L. S. Ness and A. G. Williams, *IHS Jane's Weapons Ammunition 2012-2013*, USA: IHS Jane's, 2012.
- [18] *Military Explosive*, 4th ed., Dept. Army, Washington, DC, USA, 1984.

การทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยเกี่ยวกับ ความรู้พื้นฐาน สถานะ และการพัฒนาวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน ในระดับนาโนที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออน

ปณิทัต หาสิน^{1*}

วันที่รับ 23 กันยายน 2565 วันที่แก้ไข 28 ตุลาคม 2565 วันที่ตอบรับ 28 ตุลาคม 2565

บทคัดย่อ

การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและกักเก็บพลังงานที่มีราคาถูกและมีความปลอดภัยสูงถือเป็นเป้าหมายที่สำคัญของโลก เพื่อขับเคลื่อนทุก ๆ ประเทศให้เป็นกลางทางคาร์บอนก่อนปี ค.ศ. 2050 ในปัจจุบัน เทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้ทำให้ชีวิตของมนุษย์มีความทันสมัยมากขึ้นและยังช่วยให้พลังงานแก่กริดไฟฟ้าอีกด้วย แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจึงถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเคลื่อนไหวได้และยานพาหนะอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ปลดปล่อยมลพิษ อย่างไรก็ตาม นักวิจัยหลายท่านได้คำนึงถึงแหล่งกำเนิดของธาตุลิเทียม เนื่องจากธาตุลิเทียมมีอยู่ปริมาณจำกัดบนเปลือกโลก ส่งผลให้ราคาของธาตุลิเทียมเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความต้องการนำแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานขนาดใหญ่จึงลดลง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว นักวิจัยในปัจจุบันจึงได้สนใจระบบกักเก็บพลังงานชนิดอื่น แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนจึงถูกพิจารณาให้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากธาตุโซเดียมหาง่ายและมีสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกับธาตุลิเทียม เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานสูง ($160\text{--}220\text{ Wh kg}^{-1}$) มีค่าการกักเก็บประจุสัมพัทธ์มาก และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนได้ถูกนำมาใช้ในอากาศยานไร้คนบินขนาดเล็ก ในปัจจุบันนักวิจัยหลายท่านได้ทำการพัฒนาวัสดุคาร์บอนที่มีขนาดรูพรุนในระดับนาโน สารประกอบซัลไฟด์ของโลหะทรานซิชัน และวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนและสารประกอบของโลหะทรานซิชัน เพื่อใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน ในบทความชิ้นนี้ ผู้ประพันธ์ได้ทำการสรุปและวิจารณ์งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนในปัจจุบัน ดังนั้นบทความชิ้นนี้จึงได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของแบตเตอรี่โซเดียมไอออนและความสำคัญของวัสดุที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนด

คำสำคัญ : วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโน, สารประกอบซัลไฟด์ของโลหะทรานซิชัน, วัสดุคอมโพสิต, แบตเตอรี่โซเดียมไอออน, ขั้วแอโนด

¹ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี, ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้แต่ง, อีเมล: fscipths@ku.ac.th

Fundamentals, Status, and Research Development on Anode Materials Based Mesoporous Carbons for Sodium-Ion Batteries

Panitat Hasin ^{1*}

Received 23 September 2022, Revised 28 October 2022, Accepted 28 October 2022

Abstract

The development of energy production and storage technologies with low-cost and safety is the truly global coalition of every country for carbon neutrality by 2050. During the past decade, lithium-ion battery (LIB) advancement has improved today's modern world and empowered the world's electric grids. LIBs have been widely deployed in the portable electronics market and electrical vehicle mobility. The concerns for Li availability are increasing due to expected demand growth associated with the significant increase in the LIB market. Therefore, whether LIBs alone can satisfy the rapid development of large-format energy storage systems (ESSs) remains unclear. To mitigate these issues, the researchers have focused on alternative energy storage systems. Sodium-ion batteries (SIBs) are the promising alternatives for large-scale energy storage due to the similar operating principle, low cost, and abundance of sodium. Due to their high energy density (ranging between 160 - 220 Wh kg⁻¹), specific capacity, and long cycle life, SIBs have also been successfully applied to unmanned aerial vehicles. Mesoporous carbon materials, transition metal sulfides, and carbon/transition metal compound composites are considered as the promising anode materials for SIBs in order to improve electrochemical sodium storage behavior. This article systematically summarizes the latest research progress of materials and proposes future directions for SIBs. This presents the implication of SIBs from detailing the importance of anode materials.

Keywords : Mesoporous carbon, Transition metal sulfides, Composite material, Sodium-ion batteries, Anode

¹ Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC), Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Faculty of Science, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: fscipths@ku.ac.th

1. บทนำ

อนาคตรถไฟฟ้าส่งสัญญาณความชัดเจนมากขึ้นทุกขณะ ผู้ผลิตรถยนต์แทบทุกค่ายต่างทุ่มเม็ดเงินเพื่อลงทุนทั้งในส่วนของการผลิต การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ซึ่งแน่นอนว่า ‘แบตเตอรี่’ คือ หนึ่งในเทคโนโลยีที่ยังคงต้องได้รับการคิดค้น พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากแบตเตอรี่ถือเป็นหัวใจสำคัญของการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (รูปที่ 1) [1]



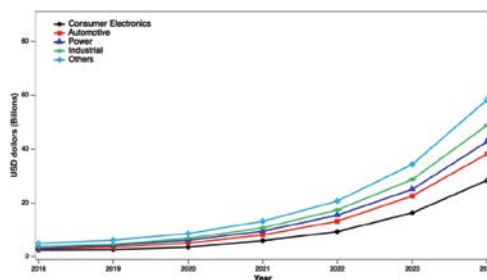
รูปที่ ๑ แบตเตอรี่ [1]

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ในปัจจุบันยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แม้ว่ามาตรฐานด้านความสามารถในการอัดประจุของแบตเตอรี่ จะขึ้นอยู่กับระบบการกักเก็บพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยลิเทียมไอออน ที่มีสถานะเป็นบวก และอิเล็กตรอนที่มีสถานะเป็นลบ เนื่องจากลิเทียมไอออนจะมีการเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กตรอนซึ่งเป็นการประจุแบตเตอรี่ [2]

ทั้งนี้ นักวิทยาศาสตร์และผู้เชี่ยวชาญด้านเคมีได้แนะนำว่าองค์ประกอบใหม่ของแบตเตอรี่ในอนาคตที่ควรนำมาใช้ทดแทนลิเทียมคือ ‘โซเดียม’ ซึ่งเรียกว่า ‘โซเดียมไอออน’ (sodium-ion) เบื้องต้นได้มีการนำแบตเตอรี่แบบโซเดียมไอออนไปใช้งานจริงแล้ว แม้จะ

เป็นเพียงรถจักรยานไฟฟ้า หรือ ‘e-Bike’ ที่ได้รับการออกแบบและผลิตเพื่อใช้งานจริงในประเทศอังกฤษเมื่อปี ค.ศ. 2015 แล้วก็ตาม [3]

แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนจะใช้โซเดียมไอออนเป็นสารตัวนำประจุ ซึ่งถือเป็นแบตเตอรี่ชนิดใหม่เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น และเกลือที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีราคาถูกกว่าเกลือที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดอื่นอีกด้วย โดยบริษัท พอร์ต มอเตอร์ถือเป็นบริษัทแรกที่ได้นำแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนมาใช้ในยานพาหนะเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 1967 ส่งผลให้แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลกในการเป็นแบตเตอรี่ทางเลือกแทนแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน รูปที่ 2 แสดงอุปสงค์ของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนในงานด้านต่าง ๆ ในช่วงเวลา 4 ปี ที่ผ่านมารวมถึงแสดงการทำนายอุปสงค์ของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนทั่วโลกในช่วงเวลา 3 ปีต่อไปอีกด้วย [4]



รูปที่ ๒ อุปสงค์ (USD ในหน่วยหนึ่งพันล้าน) ของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนในเชิงการค้าปีต่อปี [4]

รูปที่ 3(a) แสดงความสามารถในการกักเก็บพลังงานหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (Wh kg^{-1}) และความสามารถในการคายพลังงานหน่วยเป็น วัตต์ต่อกิโลกรัม (W kg^{-1}) ของแบตเตอรี่โซเดียมไอออนชนิดต่าง ๆ [5] โดยความต้องการของแบตเตอรี่โซเดียมไอออนเพื่อใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

Figure 1 consists of two Ragone plots, (a) and (b), showing Power density (W Kg^{-1}) on the y-axis versus Energy density (Wh Kg^{-1}) on the x-axis.

Plot (a) shows the performance of various battery and capacitor technologies. The y-axis ranges from 0 to 6000 W Kg^{-1} , and the x-axis ranges from 0 to 80 Wh Kg^{-1} . The legend indicates:

- Non aqueous sodium-ion batteries (red circle)
- Aqueous sodium-ion batteries (green circle)
- Sodium-ion hybrid capacitors (purple circle)

 The green circle (aqueous sodium-ion batteries) is the largest, covering a range from approximately 10 to 70 Wh Kg^{-1} and 1000 to 5000 W Kg^{-1} . The red circle (non-aqueous sodium-ion batteries) is smaller, centered around 25 Wh Kg^{-1} and 1000 W Kg^{-1} . The purple circle (sodium-ion hybrid capacitors) is the smallest, centered around 20 Wh Kg^{-1} and 1000 W Kg^{-1} .

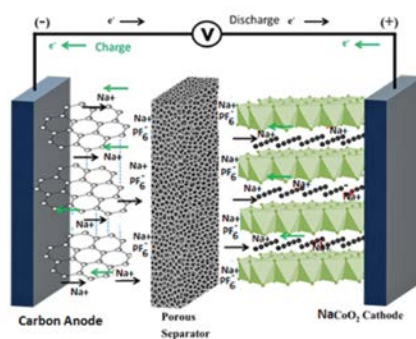
Plot (b) shows the performance of various supercapacitor technologies. The y-axis ranges from 10^{-3} to 10^3 MW , and the x-axis ranges from 10^{-3} to 10^5 MWh . The legend indicates:

- Low cost flywheels (red circle)
- Li-ion flywheels (blue circle)
- Li-ion batteries (orange circle)
- Li-ion capacitors (purple circle)
- Li-ion hybrid capacitors (green circle)
- Li-ion supercapacitors (yellow circle)
- Li-ion hybrid capacitors (grey circle)
- Li-ion hybrid capacitors (dark grey circle)
- Li-ion hybrid capacitors (light grey circle)
- Li-ion hybrid capacitors (very light grey circle)

 The orange circle (Li-ion batteries) is the largest, covering a range from approximately 0.1 to 100 MWh and 0.1 to 100 MW . The purple circle (Li-ion capacitors) is centered around 0.1 MWh and 0.1 MW . The green circle (Li-ion hybrid capacitors) is centered around 0.1 MWh and 1 MW . The yellow circle (Li-ion supercapacitors) is centered around 0.1 MWh and 10 MW . The grey circles represent various other Li-ion hybrid capacitor technologies.

1.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วน คือ 1) ขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งมักใช้เป็นวัสดุอินทรีย์ สารประกอบออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน และสารประกอบฟอสเฟต และขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งมักใช้เป็นสารประกอบซิลิโคต สารประกอบอินทรีย์ และวัสดุคาร์บอน 2) เซเพอเรเตอร์ (Separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกับขั้วแอโนด จนเกิดการลัดวงจร 3) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายเกลือของโซเดียม ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้ไอออนไหลผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน จึงเป็นตัวนำไอออนิกที่ดี แต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนิกส์ที่ไม่ดี และ 4) Current collector เป็นส่วนโลหะตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอก และเกิดการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้ (รูปที่ 4) [7]



รูปที่ ๔ ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน [7]

แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนทำงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมี โดยขณะที่ประจุไฟฟ้าพลังงานไฟฟ้าที่เราประจุไฟเข้าไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่ ซึ่งจะบังคับให้โซเดียมไอออนไหลออกจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด แล้วไหลผ่านอิเล็กโทรไลต์แล้วผ่าน Separator และเข้าไปสอดตัว (Intercalate) อยู่ในโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2 ผลของปฏิกิริยานี้จะทำให้วัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด เช่น ลิเทียมโลหะออกไซด์ (LiMO_2 หรือ LiM_2O_4), ลิเทียมโลหะฟอสเฟต (LiMPO_4) และวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด เช่น คาร์บอน (C), ดีบุก (Sn), ซิลิกอน (Si) อยู่ในสภาวะไม่เสถียรส่วนในขณะที่ใช้งาน (คายประจุ) ปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่จะสามารถเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous reaction) กล่าวคือโซเดียมไอออนที่ไหลออกจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด และไปแทรกตัวอยู่ที่ขั้วแอโนดนั้น จะไหลออกจากโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด และเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดตามเดิม ทำให้ระบบมีสภาพเสถียรอีกครั้ง พร้อมกับให้อิเล็กตรอนผ่านวงจรไฟฟ้า (โดยที่อิเล็กตรอนจะไหลผ่านโลหะ current collector) และให้พลังงานไฟฟ้าออกมา เมื่อใดก็ตามที่โซเดียมไอออนไหลกลับไป

ที่เดิมหมด ปฏิกริยาก็จะสิ้นสุดหรือถ่านหมดนั่นเอง หากต้องการนำแบตเตอรี่ไปใช้ใหม่ก็ต้องประจุไฟอีกครั้ง และเกิดเป็นเช่นนี้ต่อเนื่องไปจนกว่าแบตเตอรี่จะหมดสภาพและอายุการใช้งาน [8]

ประเด็นความน่าสนใจของเทคโนโลยีแบตเตอรี่โซเดียมไอออนคือ โซเดียมไอออนสามารถสร้างขึ้นได้จากเกลือที่ใช้ในการปรุงอาหาร ซึ่งโซเดียมไอออนนั้นนอกจากจะเอื้อให้การผลิตแบตเตอรี่มีความสะดวกมากขึ้นแล้ว ยังมีความได้เปรียบด้านต้นทุนการผลิตอีกด้วย เนื่องจากต้นทุนการผลิตโซเดียมไอออนต่ำกว่าการผลิตลิเทียมไอออน อีกทั้งแบตเตอรี่โซเดียมไอออนยังมีความปลอดภัยสูงกว่า เมื่อพิจารณาตามหลักการทางเคมี [9]

ล่าสุด นักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์ยังคงให้ความสนใจกับการพัฒนาโซเดียมไอออนอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าทีมค้นคว้าในประเทศฝรั่งเศสได้ก้าวสู่การพัฒนาแบตเตอรี่แบบชาร์จใหม่ได้ที่ต้นทุนต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียม ซึ่งนับเป็นครั้งแรกที่มีการพัฒนาแบตเตอรี่ ‘โซเดียมไอออน’ ด้วยการนำเกลือของโซเดียม ในรูปแบบที่เรียกว่า ‘แบตเตอรี่ 18650’ ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลาย ไม่ว่าจะเป็นแบตเตอรี่ในตู้กับข้าว ไฟฉาย LED หรือแม้กระทั่งรถยนต์ไฟฟ้า อย่าง Tesla Model S ฯลฯ โดยคาดว่าจะในอนาคตแบตเตอรี่โซเดียมไอออนนี้ จะได้รับการพัฒนามากขึ้น สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น [10]

อย่างไรก็ตาม คุณภาพของวัสดุ ถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่โซเดียมไอออน โดยในปี ค.ศ. 1980 หลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นได้ทำการพัฒนาแบตเตอรี่โซเดียมไอออน โดยใช้วัสดุคอมโพสิตของโลหะผสมระหว่างโซเดียม-ตะกั่ว และ Na_xCoO_2 เป็นขั้วแอโนดและแคโทด ตามลำดับ ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ดังกล่าว

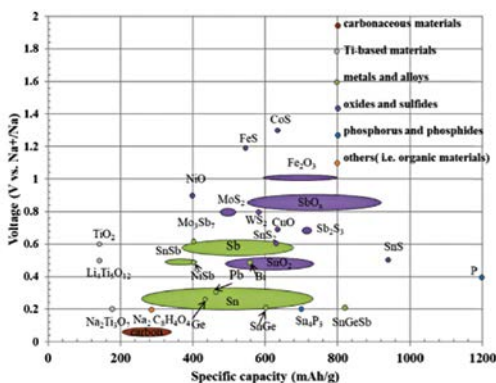
จะสามารถนำมาใช้งานได้มากถึง 300 รอบ แต่ค่าความต่างศักย์เฉลี่ยในกระบวนการคายประจุยังต่ำกว่า 3.0 V ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนของ carbon/LiCoO₂ ซึ่งมีค่าความต่างศักย์เฉลี่ยในกระบวนการคายประจุสูงถึง 3.7 V โดยการพัฒนาวัสดุเพื่อนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า โดยเฉพาะขั้วแอโนดให้มีค่าความต่างศักย์ในการกักเก็บ Na ที่เหมาะสม มีค่าการกักเก็บประจุมาก และมีความเสถียรเชิงโครงสร้างสูง ยังคงเป็นอุปสรรคในการพัฒนาแบตเตอรี่โซเดียมไอออน โดยงานวิจัยส่วนใหญ่มักจะเป็นการพัฒนาวัสดุที่สามารถประจุโซเดียมไอออนเข้าไปในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก โดยที่โครงสร้างไม่มีการขยายตัวมากเกินไป เพื่อที่จะสามารถลดปริมาณวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด ลดต้นทุนการผลิตจากค่าวัสดุ รวมถึงทำให้แบตเตอรี่มีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กลงด้วย

ในบทความชิ้นนี้ ผู้ประพันธ์ได้ทำการสรุปและวิจารณ์งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน โดยจะให้ความสนใจแก่วัสดุคาร์บอนที่มีขนาดรูพรุนในระดับนาโน สารประกอบซัลไฟด์ของโลหะทรานซิชัน และวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนและสารประกอบของโลหะทรานซิชัน

1.3 การออกแบบวัสดุเพื่อนำมาใช้เป็นขั้วแอโนด

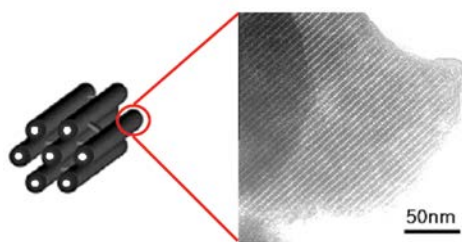
อย่างไรก็ตาม กราไฟต์ที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีค่าการเก็บประจุเชิงทฤษฎี (372 mA h/g) และมีอัตราการเกิด กระบวนการแทรกเข้า/เอาออกของลิเทียม (lithiation/delithiation) ที่ต่ำ จึงทำให้กราฟไฟต์เป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออน เพราะโซเดียมไอออนมีขนาดใหญ่กว่าลิเทียมไอออน (Na^+ 0.204 nm, Li^+

0.152 nm) จึงทำให้การแทรกเข้าของโซเดียมไอออนในโครงสร้างของกราฟไฟต์เกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการพัฒนาวัสดุที่มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานมาก มีราคาถูก และมีอัตราการเกิด sodiation/desodiation ที่เร็วเพื่อนำมาทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออน (รูปที่ 5) ส่งผลให้เทคโนโลยีการพัฒนาแบตเตอรี่โซเดียมไอออนยังคงได้รับความสนใจในแง่ของวัสดุที่นำมาใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตเป็นแบตเตอรี่เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคาร์บอนชนิดอื่น วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนถือว่าเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในแง่ของการปรับปรุงความสามารถในการกักเก็บและคายประจุ เพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์กักเก็บ/แปรรูปพลังงาน โดยรูพรุนที่เป็นระเบียบจะทำให้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนมีพื้นที่สัมผัสตรงบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้า/สารละลายอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น มีเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ต่อเนื่อง และทำให้เกิดการผ่อนคลายความเครียด (strain relaxation) ในระหว่างกระบวนการอัด/คายประจุ [11]



รูปที่ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย versus ค่าการคายประจุของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน (sodium-ion batteries; SIBs) [11]

ในบรรดาวัสดุคาร์บอน ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนอสัณฐาน กราไฟต์ และกราฟีน วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโน (mesoporous carbon) ถือเป็นวัสดุคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน เนื่องจากวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนมีปริมาณรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวสูง มีความเสถียรเชิงโครงสร้างที่ดี มีความสามารถในการอัดและคายประจุที่สูง และมีราคาถูก (รูปที่ 6) [12]

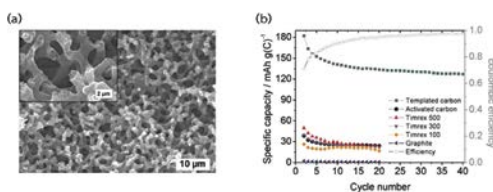


รูปที่ 6 วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโน (mesoporous carbon) [12]

1.4 วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโน (mesoporous carbon)

เป็นที่รู้กันดีว่ารูพรุนที่มีขนาดในระดับนาโนและเชื่อมติดกันอย่างเป็นระเบียบนั้นจะช่วยให้อัตราการแทรกเข้าของโซเดียมเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีค่าการเก็บประจุมากขึ้นเมื่อนำมาใช้เป็นขั้วแอโนด ดังนั้น S. Wenzel และคณะ [13] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนเชื่อมต่อกันโดยวิธี nanocasting route (รูปที่ 7(a)) เพื่อนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน จากผลการทดลองที่ได้พบว่าขั้วแอโนดที่ทำมาจากวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนเชื่อมต่อกันจะมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 100 mA h g^{-1} ที่ C/5 มีความสามารถในการอัด/คายประจุที่ดี และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

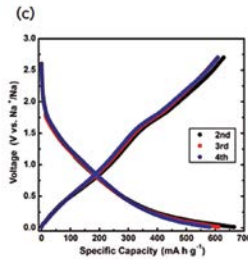
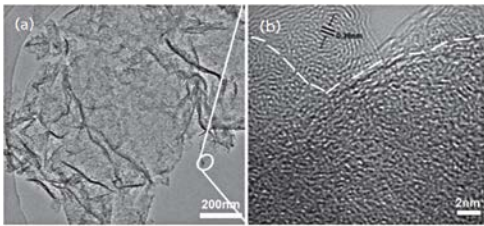
(รูปที่ 7(b)) เนื่องมาจาก (1) โครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมต่อกันจะช่วยลดระยะทางการแพร่ภายในขั้วไฟฟ้าและวัสดุคาร์บอน (2) การใช้ mesophase pitch เป็นแหล่งของคาร์บอนจะช่วยให้โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของวัสดุคาร์บอนมีความเป็นระเบียบมากขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนเชื่อมต่อกันมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุคาร์บอนที่เตรียมมาจากแหล่งคาร์บอนชนิดอื่น งานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการเปิดโอกาสในการพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในแบตเตอรี่โซเดียมไอออนที่ทนทานไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ๙ (a) ภาพถ่ายขยายด้วย SEM และ (b) ค่าการเก็บประจุและค่าประสิทธิภาพคูลอมบ์ของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนเชื่อมต่อกัน [13]

โครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมติดกันสามารถเพิ่มความสามารถเชิงเคมีไฟฟ้าในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนของวัสดุคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะเป็นการลดระยะทางการแพร่ของ Li⁺ โดยการแพร่ของ Na⁺ ภายในขั้วไฟฟ้าจะมีความคล้ายคลึงกับ Li⁺ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวถือเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการอัด/คายประจุ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมติดกันจึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการช่วยให้ความสามารถในการกักเก็บประจุของวัสดุคาร์บอนดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของ Na⁺ ให้ดีขึ้นด้วย ดังนั้น Y. Yan และคณะ [14] ได้ทำ

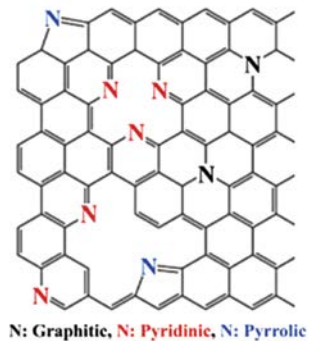
การสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันและกราฟีนที่มีลักษณะคล้ายแซนดวิช (รูปที่ 8(a) และรูปที่ 8(b)) เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากวัสดุคาร์บอนอัดแน่นจากผลการทดลองที่ได้พบว่าวัสดุนาโนคอมโพสิตดังกล่าวมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 400 mAh g⁻¹ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 mA g⁻¹ และมีความเสถียรที่ดี (250 mAh g⁻¹ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 A g⁻¹ หลังจากใช้งาน 1000 รอบ) (รูปที่ 8(c)) เนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้ (1) วัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นกราฟไฟต์ต่ำ จึงทำให้มีระยะห่างระหว่างระนาบของคาร์บอนมากถึง 0.418 nm จึงทำให้ Na⁺ สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ (2) โครงสร้างที่เป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บ Na⁺ จึงทำให้ Na⁺ แพร่ได้ดีขึ้น (3) การผสมกราฟีนลงไปในวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันจะช่วยเพิ่มความสามารถเชิงเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นการเติมกราฟีนเข้าไปยังช่วยเพิ่มบริเวณว่องไวและพื้นที่ผิวสำหรับกระบวนการอัด/คายประจุอีกด้วย และ (4) โครงสร้างที่คล้ายแซนดวิชที่เกิดจากการเติมกราฟีนลงไปในวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันจะทำให้วัสดุนาโนคอมโพสิตที่ได้มีความสามารถในการอัด/คายประจุที่ดี เพราะปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นได้ง่าย งานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการเปิดโอกาสในการนำวัสดุนาโนคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันและกราฟีนที่มีลักษณะคล้ายแซนดวิชมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เกี่ยวข้องกับโลหะไอออนที่มีขนาดใหญ่กว่าลิเทียม



รูปที่ ๘ (a) ภาพถ่ายขยายด้วย TEM (b) HRTEM และ (c) ค่าการเก็บประจุของวัสดุนาโนคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันและกราฟีนที่มีลักษณะคล้ายแซนด์วิช [14]

อย่างไรก็ตาม การที่โครงสร้างของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนไม่มีความเป็นกราฟิตต่ำ จึงส่งผลให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีค่าการนำไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพคูลอมบ์ (*coulombic efficiency*) และมีความสามารถในการอัดและคายประจุที่ไม่ดี ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว นักวิจัยส่วนใหญ่จึงทำการควบคุมสัดส่วนธาตุ คาร์บอนในวัสดุคาร์บอน เจือเฮเทอโรอะตอม (*heteroatom*) และเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และความสามารถในการอัดและคายประจุ ซึ่งการเจือธาตุไนโตรเจนถือเป็นวิธีที่มีศักยภาพวิธีหนึ่งในการเพิ่มบริเวณเร่งและค่าการนำไฟฟ้า เนื่องจากธาตุไนโตรเจนที่เจือเข้าไปในวัสดุคาร์บอนจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์และความเป็น

ผลึกของวัสดุคาร์บอนให้ดีขึ้น เนื่องมาจากการที่ธาตุไนโตรเจนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (3.5) ที่สูงกว่าคาร์บอน (3.0) เพราะธาตุไนโตรเจนมีขนาดเล็กกว่า จึงทำให้วัสดุคาร์บอนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนเกิดอันตรกิริยาที่ดีกับลิเทียม ส่งผลให้เกิดการแทรกเข้าของลิเทียมได้ดี จึงทำให้วัสดุคาร์บอนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนมีค่าการเก็บประจุมากกว่าวัสดุคาร์บอนที่ไม่ได้ถูกเจือด้วยธาตุใดๆ ยิ่งไปกว่านั้นการเจือธาตุไนโตรเจนเข้าไปในโครงข่ายกราฟิตของวัสดุคาร์บอนจะทำให้วัสดุคาร์บอนมีสมบัติการนำไฟฟ้าคล้ายกับสารกึ่งตัวนำชนิด N อีกด้วย เนื่องจากธาตุไนโตรเจนจะไปสร้างชั้นระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (donor states) ใกล้กับระดับเฟอร์มิ (Fermi level) (รูปที่ 9)

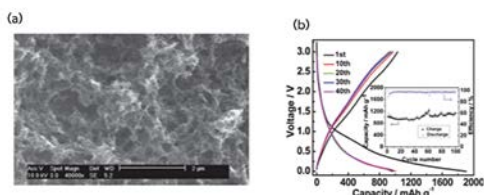


รูปที่ ๙ วัสดุคาร์บอนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน

1.5 วัสดุคาร์บอนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน (N-doped carbon)

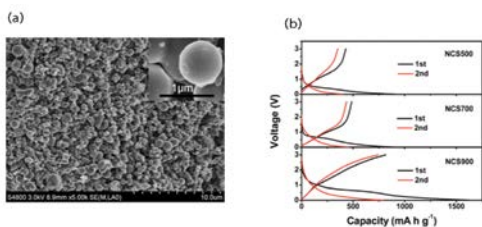
Y. Mao และคณะ [15] ได้ทำการประเมินความสามารถเชิงเคมีไฟฟ้าของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน ซึ่งเตรียมได้จากการเผาผลาญโดยใช้ CaCO_3 ที่มีขนาดในระดับนาโนเป็นแม่พิมพ์ (รูปที่ 10(a)) จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างที่เป็นรูพรุนในระดับนาโน

และปริมาณธาตุไนโตรเจนที่สูงจะทำให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 1200 mA h g^{-1} (รูปที่ 10(b)) เนื่องจากธาตุไนโตรเจนที่เจือเข้าไปจะทำให้วัสดุคาร์บอนมีบริเวณบกพร่องมาก ซึ่งจะเป็บริเวณที่เกิดการแทรกเข้าของลิเทียม จึงส่งผลให้วัสดุดังกล่าวมีความสามารถในการกักเก็บลิเทียมได้ดี นอกจากนี้ pyridinic nitrogen และอะตอมไฮโดรเจนยังช่วยเพิ่มความสามารถในการอัด/คายประจุของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนอีกด้วย ดังนั้นพลังงานการดูดซับของลิเทียมไอออนที่มากตรงบริเวณบกพร่องที่มีโครงสร้างคล้าย pyridinic และพลังงานกระตุ้นของการแทรกซึมลิเทียมตรงบริเวณบกพร่องที่ต่ำ จึงทำให้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนมีความสามารถในการกักเก็บลิเทียมได้ดี ในขณะที่โครงสร้างที่เป็นรูพรุนในระดับนาโนของวัสดุคาร์บอนจะช่วยเพิ่มความเสถียรเนื่องจากการลดระยะการแพร่ของลิเทียมไอออนและยังเป็นการเพิ่มพื้นผิวตรงบริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้า/อิเล็กโทรไลต์สำหรับการแลกเปลี่ยนประจุอีกด้วย งานวิจัยชิ้นนี้ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์แปรรูปและกักเก็บพลังงานอื่นๆ ได้อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้า เซลล์ลิเทียม-ซัลเฟอร์ หรือเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น



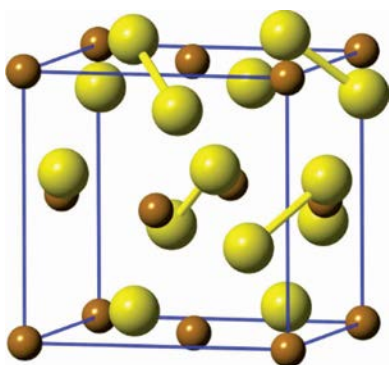
รูปที่ ๑๐ (a) ภาพถ่ายขยายด้วย SEM และ (b) ค่าการเก็บประจุของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน [15]

นอกจากนี้ วัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมได้ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออนเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุที่มีรูปร่างเป็นรูปทรงกลมนั้นจะมีความหนาแน่นมาก มีพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ มีความเสถียรเชิงโครงสร้างสูง และสามารถเตรียมเป็นฟิล์มบนขั้วไฟฟ้าได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น ไมโครบีดส์ที่มีรูพรุนในระดับนาโน (mesocarbon microbeads) ดังนั้น T. Chen และคณะ [16] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ โดยใช้ซูโครสที่ละลายในตัวทำละลายของน้ำและเอทิลีนไกลคอลเป็นแหล่งของคาร์บอน (รูปที่ 11(a)) จากผลการทดลองที่ได้พบว่า วัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 816 mA h g^{-1} ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 mA g^{-1} และยังคงค่าการเก็บประจุอยู่ที่ 660 mA h g^{-1} หลังการใช้งาน 50 รอบ หรือแม้แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1000 mA g^{-1} วัสดุคาร์บอนดังกล่าวยังมีค่าการเก็บประจุที่ 255 mA h g^{-1} (รูปที่ 11(b)) เนื่องมาจากวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนมีพื้นที่ผิวสูงที่สามารถกักเก็บลิเทียมได้ในปริมาณมาก มีปริมาณ graphitic nitrogen สูง จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนในช่วงความต่างศักย์สูง ส่งผลให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีความสามารถในการกักเก็บลิเทียมได้ดี งานวิจัยชิ้นนี้ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน



รูปที่ ๑๑ (a) ภาพถ่ายขยายด้วย SEM และ (b) ค่าการเก็บประจุของวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรongกลมที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน [16]

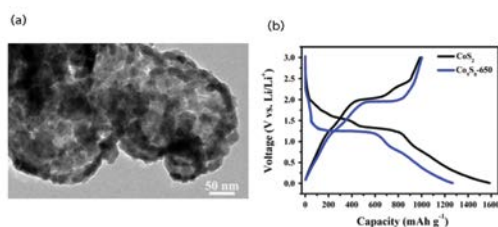
นอกจากนี้ สารประกอบประเภทโลหะออกไซด์และโลหะซัลไฟด์ยังได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นวัสดุที่นำมาทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออนอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารประกอบประเภทโลหะซัลไฟด์ ยกตัวอย่างเช่น SnS_2 , MoS_2 , FeS_2 , TiS_2 และ CoS_2 จัดว่าเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากสารประกอบดังกล่าวมีความจุเชิงทฤษฎีสูง และมีพันธะ M-S ที่อ่อน จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งสารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์ (CoS , CoS_2 , Co_3S_4 และ Co_9S_8) ถือเป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ สารประกอบดังกล่าวยังถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย (รูปที่ 12)



รูปที่ ๑๒ โครงสร้างของสารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์

1.6 สารประกอบซัลไฟด์ (sulfide compound)

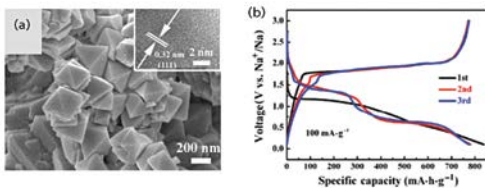
สารประกอบ Co_9S_8 ถือเป็นสารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์ที่นักวิจัยส่วนใหญ่นำมาใช้ทำเป็นขั้วแอโนดเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าสูง มีความเสถียรเชิงความร้อนที่ดี และมีค่าการเก็บประจุเชิงทฤษฎีมาก ดังนั้น Y. Zhou และคณะ [17] จึงได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบ Co_9S_8 ที่มีลักษณะเป็นรูพรongกลมกลวงที่มีรูพรongในระดับนาโน โดยปฏิกิริยา solvothermal แล้วตามด้วยการเผาภายใต้บรรยากาศ Ar/H_2 ที่อุณหภูมิสูง (รูปที่ 13(a)) ซึ่งสารประกอบ Co_9S_8 ที่มีลักษณะเป็นรูพรongกลมกลวงที่มีรูพรongในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 1414 mA h g^{-1} หลังจากใช้งาน 100 รอบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 mA g^{-1} (รูปที่ 13(b)) โดยการที่สารประกอบ Co_9S_8 มีความสามารถในการกักเก็บโซเดียมได้นั้น จึงทำให้สารประกอบ Co_9S_8 ที่มีลักษณะเป็นรูพรongกลมกลวงที่มีรูพรongในระดับนาโนมีศักยภาพสูงในการนำมาทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน



รูปที่ ๑๓ (a) ภาพถ่ายขยายด้วย TEM และ (b) ค่าการเก็บประจุของสารประกอบ Co_9S_8 ที่มีลักษณะเป็นรูพรongกลมกลวงที่มีรูพรongในระดับนาโน [17]

เพื่อให้สารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์สามารถนำไปผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน เพื่อนำไปขายเชิงการค้า สารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์ควรที่จะมีโครงสร้างในระดับ

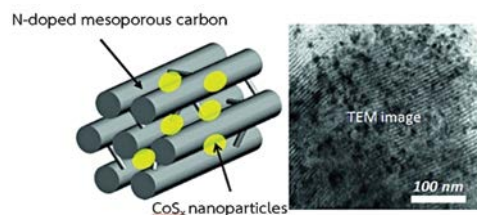
ไมโครเมตร/นาโนเมตร เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าว มีค่าการเก็บประจุเชิงปริมาตรสูงและมีการแลกเปลี่ยน อิเล็กตรอนที่ดี ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีขนาด ในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรตามลำดับ ดังนั้น X. Liu และคณะ [18] จึงได้ทำการสังเคราะห์ สารประกอบ CoS_2 ที่มีขนาดในระดับไมโครเมตร/ นาโนเมตรโดยใช้วิธี hydrothermal/solvothermal (รูปที่ 14(a)) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสารประกอบ CoS_2 ที่มีขนาดในระดับไมโครเมตร/นาโนเมตรนั้น จะมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 690 mA h g^{-1} ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 Ag^{-1} หลังจากใช้งาน 100 รอบ ในช่วงความต่างศักย์ $0.1\text{--}3.0 \text{ V}$ และมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 240 mA h g^{-1} หลังจากใช้งาน 800 รอบ ในช่วงความต่างศักย์ $1.0\text{--}3.0 \text{ V}$ (รูปที่ 14(b)) งานวิจัยชิ้นนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสารประกอบ CoS_2 มีความสามารถในการกักเก็บโซเดียมได้ดี จึงสามารถนำสารประกอบ CoS_2 ดังกล่าวมาใช้เป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออนได้



รูปที่ ๑๔ (a) ภาพถ่ายขยายด้วย SEM และ (b) ค่าการเก็บประจุของสารประกอบ CoS_2 ที่มีขนาดในระดับไมโคร/นาโนเมตร [18]

อย่างไรก็ตาม สารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์ (CoS_x) จะมีอายุการใช้งานที่สั้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรที่เกิดจากการแตกของเนื้อวัสดุ (pulverization) จึงส่งผลให้แบตเตอรี่ที่ทำมาจากสารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์มีความสามารถในการอัด/คายประจุที่ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

ที่ขั้วไฟฟ้าจะเกิดได้ไม่ดี เมื่อเร็ว ๆ นี้ จึงได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติการกักเก็บ Na โดยการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิตของ CoS_x /คาร์บอน โดยวัสดุนาโนคอมโพสิตดังกล่าวจะทำให้อนุภาคของ CoS_x ที่ได้มีขนาดเล็กลง ซึ่งส่งผลให้ระยะทางการแพร่ของไอออนสั้นลงไปด้วย ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุคาร์บอนในนาโนคอมโพสิตจะช่วยให้การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรอันเนื่องมาจากความเครียดของวัสดุอีกด้วย และเนื่องจากวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนมีพื้นที่ผิวสูงดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงทำให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นตัวพองอนุภาคของโคบอลต์ซัลไฟด์ที่มีขนาดในระดับนาโนในวัสดุนาโนคอมโพสิต เพื่อที่จะนำมาทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายอย่างมากในการพัฒนาขั้วแอโนดที่ทำมาจากวัสดุนาโนคอมโพสิตของ CoS_x /วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่โซเดียมไอออนให้สูงขึ้น (รูปที่ 15)

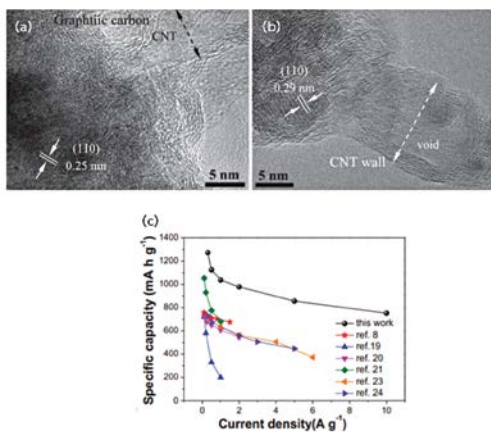


รูปที่ ๑๕ วัสดุนาโนคอมโพสิตของ CoS_x /วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน

1.7 วัสดุคอมโพสิตของโคบอลต์ซัลไฟด์บนวัสดุคาร์บอน (cobalt sulfide/carbon composite)
เมื่อเร็ว ๆ นี้ นักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบโลหะซัลไฟด์ที่มีรูพรุนใน

ระดับนาโนและมีลักษณะกลวงข้างในโครงสร้าง โดยสารประกอบโลหะซัลไฟด์ที่มีพื้นฐานวิทยาศาสตร์จะทำให้ Na^+ สามารถแพร่เข้าไปในวัสดุได้ดี เป็นการลดระยะทางการแพร่ของ Na^+ นอกจากนี้ ยังเป็นการเพิ่มปริมาตรของวัสดุเพื่อลดความเครียดของโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดการแทรกเข้า/แทรกออกของ Na^+ ได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้สารประกอบโลหะซัลไฟด์ที่มีรูพรุนในระดับนาโนและมีลักษณะกลวงข้างในโครงสร้างมีความเสถียรสูง ยิ่งไปกว่านั้นการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของโลหะซัลไฟด์กับวัสดุคาร์บอนที่นำไฟฟ้าถือเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีประสิทธิภาพเชิงเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้น ซึ่งวัสดุคาร์บอนที่นำไฟฟ้านั้นจะช่วยให้วัสดุคอมโพสิตมีความยืดหยุ่นเชิงกลที่ดี และช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุอีกด้วย จึงส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ดังนั้น R. Wu และคณะ [19] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของโคบอลต์ซัลไฟด์บนวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนและท่อนาโนคาร์บอนผ่านปฏิกิริยาการสลายตัวและการเติมซัลไฟด์ (sulfidation) ของแม่พิมพ์โคบอลต์ที่ถูกเจือในโครงข่ายของ zeolitic imidazolate (ZIF-67) (รูปที่ 16(a) และรูปที่ 16(b)) เมื่อนำวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวไปทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แล้วนำมาทดสอบความสามารถในการเก็บประจุ พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการอัด/คายประจุสูงถึง 1668 mA h g^{-1} หลังจากใช้งาน 100 รอบ และมีค่าการเก็บประจุสูงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ อีกด้วย ($1038, 979, 858$ และ 752 mA h g^{-1} ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1, 2, 5 และ 10 A g^{-1}) (รูปที่ 16(c)) การที่วัสดุคอมโพสิตของโคบอลต์ซัลไฟด์บนวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนและท่อนาโน

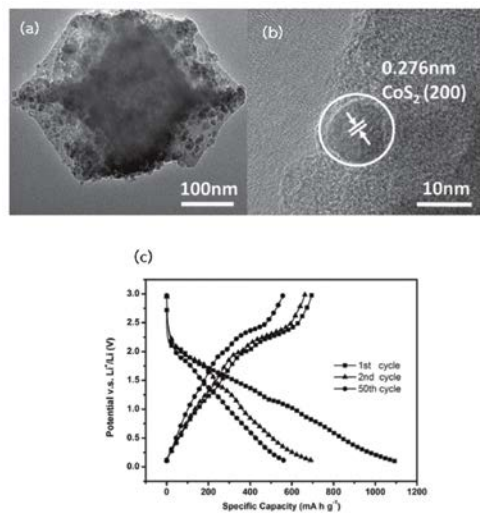
คาร์บอนมีค่าการเก็บประจุสูง มีความเสถียรที่ดี และความสามารถในการอัด/คายประจุที่มาก เนื่องจากข้อดีของสารประกอบโคบอลต์ซัลไฟด์และวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโน/ท่อนาโนคาร์บอนดังต่อไปนี้ (1) ผลึกโคบอลต์ซัลไฟด์ที่มีขนาดในระดับนาโนจะช่วยลดระยะทางการแพร่ของ Na^+ ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาการแทรกเข้า/แทรกออกของ Na^+ เกิดได้ดีขึ้น จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการอัด/คายประจุของวัสดุคอมโพสิต (2) สันฐานวิทยาที่เป็นช่องว่างและกลวงภายในวัสดุ รวมทั้งความพรุนตรงบริเวณรอบนอกของวัสดุจะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เกิดจากกระบวนการแทรกเข้า/แทรกออกของ Na^+ จึงทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์แพร่ผ่านไปในโครงข่ายของวัสดุได้เร็วขึ้น (3) วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนและท่อนาโนคาร์บอนจะทำหน้าที่เป็นตัวพอง เพื่อลดความเครียดของโครงสร้าง ลดการรวมตัวกันของอนุภาค และลดความต้านทานตรงบริเวณรอยต่อของอนุภาคอีกด้วย จึงทำให้โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตยังคงรูปเหมือนเดิมเมื่อนำไปใช้งาน และ (4) ท่อนาโนคาร์บอนที่อยู่บนพื้นผิวของวัสดุคอมโพสิตจะทำให้ Na^+ สามารถแพร่ผ่านได้ทุกทิศทาง และยังช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้มากขึ้นอีกด้วย จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความสามารถเชิงเคมีไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้น ดังนั้น วัสดุคอมโพสิตของโคบอลต์ซัลไฟด์บนวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนและท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้จึงสามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีความสามารถในการกักเก็บ/คายพลังงานสูง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย



รูปที่ ๑๖ (a) และ (b) ภาพถ่ายขยายด้วย HRTEM และ (c) กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของวัสดุคาร์บอนคอมโพสิตของวัสดุคอมโพสิตของโคบอลต์ซัลไฟด์กับวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนและท่อคาร์บอน [19]

Q. Wang และคณะ [20] ได้ใช้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนเป็นโครงสร้างหลัก เพื่อให้ที่ว่างแก่ CoS_2 ในการขยายปริมาตรและเพื่อป้องกันการแตกของเนื้อวัสดุ ที่สำคัญไปกว่านั้นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนยังสามารถดูดซับและจับ polysulfide ที่เป็นสารมัธยันต์ เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุอีกด้วย ดังนั้น Q. Wang และคณะ จึงทำการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน/ CoS_2 โดยใช้ ZIF-67 ที่ประกอบด้วย Co^{2+} และ methylimidazole ligand ที่มีธาตุ N เป็นองค์ประกอบเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ (รูปที่ 17(a) และรูปที่ 17(b)) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน/ CoS_2 มีค่าการเก็บประจุสูงถึง 560 mA h g^{-1} ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 mA g^{-1} หลังจากใช้งาน 50 รอบ หรือแม้แต่ว่าความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าสูงถึง $2,500 \text{ mA g}^{-1}$ วัสดุคอมโพสิตดังกล่าวยังมีค่าการเก็บประจุที่ 410 mA h g^{-1} (รูปที่ 17(c)) การที่วัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนถูกเจือด้วยไนโตรเจน/ CoS_2 มีความสามารถในการเก็บประจุและมีความเสถียรที่ดีเมื่อนำไปใช้ในแบตเตอรี่ เนื่องมาจากอนุภาค CoS_2 ที่มีขนาดเล็กและชั้นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนถูกเจือด้วยไนโตรเจนที่บาง ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ช่วยในเรื่องการพัฒนาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยใช้วัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน/ CoS_2 มาทำเป็นขั้วไฟฟ้า



รูปที่ ๑๗ (a) ภาพถ่ายขยายด้วย TEM (b) HRTEM และ (c) ค่าการเก็บประจุของวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน/ CoS_2 [20]

ชนิดของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนด ค่าการเก็บประจุ ค่าความต่างศักย์เฉลี่ย ช่วงความต่างศักย์สำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออนได้สรุปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออน

วัสดุ	ค่าการเก็บประจุ (mA h g ⁻¹)	ค่าความต่างศักย์เฉลี่ย (V)	ช่วงความต่างศักย์ (V)	เอกสารอ้างอิง
วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนเชื่อมต่อกัน	100	0.80	0.0-1.6	13
วัสดุนาโนคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เชื่อมติดกันและกราฟีนที่มีลักษณะคล้ายแซนดวิช	400	1.25	0.0-2.5	14
วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน	1200	1.25	0.0-3.0	15
วัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน	816	1.25	0.0-3.0	16
สารประกอบ Co ₉ S ₈ ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมกลวงที่มีรูพรุนในระดับนาโน	1414	1.5	0.0-3.0	17
สารประกอบ CoS ₂ ที่มีขนาดในระดับไมโครเมตร/นาโนเมตร	690	1.25	0.0-3.0	18
วัสดุคอมโพสิตของโคบอลต์ซัลไฟด์บนวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนและท่อนาโนคาร์บอน	1668	1.75	0.0-3.0	19
วัสดุคอมโพสิตของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน/CoS ₂	560	1.75	0.0-3.0	20

2. บทสรุป

แบตเตอรี่โซเดียมไอออนได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเชิงวิชาการตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 และวัสดุชนิดใหม่ที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนดก็ได้ถูกค้นพบเป็นอย่างมากในโลก โดยผลการศึกษาที่ผ่านมาทำให้นักวิจัยหลายท่านสามารถออกแบบแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งแบตเตอรี่โซเดียมไอออนถือเป็นแบตเตอรี่ที่สามารถชาร์จใหม่ได้ที่สามารถถูกยกระดับให้อยู่ในอุตสาหกรรมได้ในอนาคตอันใกล้

ถึงแม้ว่าจะมีอุปสรรคที่ยากที่จะแก้ไขก็ตาม ดังนั้นการแข่งขันกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีความล้ำสมัยและมีการกักเก็บพลังงานที่สูง (ระบบ graphite/LiCoO₂) ไม่ได้เป็นเรื่องง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการกักเก็บพลังงานเชิงปริมาตร ส่งผลให้นวัตกรรมของวัสดุมีความจำเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่โซเดียมไอออนก็มีข้อดีอย่างมากในแง่ของการปลดปล่อย

พลังงานและราคา ทำให้แบตเตอรี่โซเดียมไอออน มีศักยภาพในการนำมาใช้ในระบบแบตเตอรี่สำหรับ ยานพาหนะไฮบริดและระบบการกักเก็บพลังงาน เชิงไฟฟ้า ซึ่งต้องการแบตเตอรี่ที่มีการปลดปล่อย พลังงานอย่างรวดเร็วและราคาถูกตามลำดับ ดังนั้น นักวิจัยหลายท่านจึงมีความเชื่อว่าแบตเตอรี่โซเดียม ไอออนจะกลายเป็นระบบแบตเตอรี่ที่สามารถ ขาร์จใหม่ได้ที่มีความสำคัญในชีวิตประจำวันของเรา เทียบเท่ากับระบบลิเทียมที่มีค่าการกักเก็บพลังงานสูง

3. กิตติกรรมประกาศ

แผนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทุนอุดหนุน โครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2564 สถาบัน เทคโนโลยีป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหม และ ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทาง เคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ในการให้ความอนุเคราะห์ทั้งอุปกรณ์ สถานที่ และเวลาในการทำงาน เพื่อให้คณะผู้วิจัย สามารถดำเนินงานได้อย่างคล่องตัว

4. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.-M. Tarascon, "Is lithium the new gold?," *Nat. Chem.*, vol. 2, no. 6, pp. 510 - 510, 2010.
- [2] S.-W. Kim, D.-H. Seo, X. Ma, G. Ceder, and K. Kang, "Electrode Materials for Rechargeable Sodium-Ion Batteries: Potential Alternatives to Current Lithium-Ion Batteries," *Adv. Energy Mater.*, vol. 2, no. 7, pp. 710 - 721, 2012.
- [3] T. Oshima, M. Kajita, and A. Okuno, "Development of Sodium-Sulfur Batteries," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 269-276, 2004.
- [4] Sodium-Ion Batteries Market To 2024 Key Application Categories (Consumer Electronics, Automotive, Power, Industrial), Regional Segmentation, Competitive Dynamics, M&A Insights, Pricing Analysis (OPP, IPP, RAP) and Segment Forecast, Ameri Res.
- [5] Y. Fang, L. Xiao, J. Qian, Y. Cao, X. Ai, Y. Huang, and H. Yang, "3D Graphene Decorated $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$ Microspheres as a Superior High-Rate and Ultracycle-Stable Anode Material for Sodium Ion Batteries," *Adv. Energy Mater.*, vol. 6, no. 19, 2016, doi: 10.1002/aenm.201502197.
- [6] M. Farag, "Lithium-Ion Batteries: Modelling and State of Charge Estimation," M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., McMaster Univ., Ontario, Canada, 2013.
- [7] M. S. Whittingham, "Chemistry of Intercalation Compounds: Metal Guests in Chalcogenide Hosts," *Prog. Solid State Chem.*, vol. 12, no. 1, pp. 41 - 99, 1978.
- [8] C. Delmas, J.-J. Braconnier, C. Fouassier, and P. Hagenmuller, "Electrochemical Intercalation of Sodium in Na_xCoO_2 Bronzes," *Solid State Ion.*, vol. 3-4, pp. 165 - 169, 1981.

- [9] K. M. Abraham, "Intercalation Positive Electrodes for Rechargeable Sodium Cells." *Solid State Ion.*, vol. 7, no. 3, pp. 199 - 212, 1982.
- [10] R. Fong, U. von Sacken, and J. R. Dahn, "Studies of Lithium Intercalation into Carbons Using Nonaqueous Electrochemical Cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 137, no. 7, pp. 2009 - 2013, 1990.
- [11] H. Kim *et al.*, "Sodium Intercalation Chemistry in Graphite," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 10, pp. 2963 - 2969, 2015.
- [12] V. Palomares, P. Serras, I. Villaluenga, K. B. Hueso, J. Carretero-González, and T. Rojo, "Na-ion Batteries, Recent Advances and Present Challenges to Become Low Cost Energy Storage Systems," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 5884 - 5901, 2012.
- [13] S. Wenzel, T. Hara, J. Janek, and P. Adelhelm, "Room-temperature Sodium-ion Batteries: Improving the Rate Capability of Carbon Anode Materials by Templating Strategies," *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 9, pp. 3342 - 3345, 2011.
- [14] Y. Yan, Y.-X. Yin, Y.-G. Guo, and L.-J. Wan, "A Sandwich-Like Hierarchically Porous Carbon/Graphene Composite as a High-Performance Anode Material for Sodium-Ion Batteries," *Adv. Energy Mater.*, vol. 4, no. 8, p. 1301584, 2014.
- [15] Y. Mao *et al.*, "Lithium storage in Nitrogen-rich Mesoporous Carbon Materials," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 7, pp. 7950 - 7955, 2012.
- [16] T. Chen *et al.*, "Porous Nitrogen-doped Carbon Microspheres as Anode Materials for Lithium Ion Batteries," *Dalton Trans.*, vol. 43, no. 40, pp. 14931 - 14935, 2014.
- [17] Y. Zhou *et al.*, "Hollow Nanospheres of Mesoporous Co₉S₈ as a High-capacity and Long-life Anode for Advanced Lithium Ion Batteries," *Nano Energy*, vol. 12, pp. 528 - 537, 2015.
- [18] X. Liu, K. Zhang, K. Lei, F. Li, Z. Tao, J. Chen, "Facile Synthesis and Electrochemical Sodium Storage of CoS₂ Micro/Nano-structures," *Nano Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 198 - 206, 2016.
- [19] R. Wu *et al.*, "In-Situ Formation of Hollow Hybrids Composed of Cobalt Sulfides Embedded within Porous Carbon Polyhedra/Carbon Nanotubes for High-Performance Lithium-Ion Batteries," *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 19, pp. 3038 - 3044, 2015.
- [20] Q. Wang *et al.*, "Facile Synthesis of Ultrasmall CoS₂ Nanoparticles within Thin N-Doped Porous Carbon Shell for High Performance Lithium-Ion Batteries," *Small*, vol. 11, no. 21, pp. 2511 - 2517, 2015.

อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในการตอบสนองความมั่นคงของมนุษย์

กนก บุนนาค^{1*}

วันที่รับ 6 กรกฎาคม 2565 วันที่แก้ไข 6 กันยายน 2565 วันที่ตอบรับ 16 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์ในบริบทที่เกี่ยวข้องกับประเทศไทยในปัจจุบัน (2) เพื่อสำรวจบริบทของประชากรไทยในปัจจุบันที่ส่งผลต่อทัศนคติด้านความมั่นคงของมนุษย์ (3) เพื่อศึกษาบทบาทของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในการสร้างความมั่นคงของมนุษย์ ผลจากการศึกษาพบว่า (1) การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และผลกระทบจากสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครนเป็นภัยคุกคามที่สะท้อนให้เห็นบทบาทของรัฐในการพิทักษ์รักษาทรัพยากรมนุษย์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดของความมั่นคงรูปแบบใหม่ (2) ในด้านบริบทของประชากรไทยที่ส่งผลต่อความมั่นคง ประชากรวัยทำงานหลักใน 15 ปีข้างหน้า 3 เจเนอเรชัน เป็นกลุ่มประชากรหลักที่มีความตื่นตัวและให้ความสำคัญกับความมั่นคงในการดำรงชีวิตตามแนวความคิดความมั่นคงของมนุษย์มากยิ่งขึ้น เนื่องมาจากปัญหาการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 การได้รับผลกระทบจากสถานการณ์ความขัดแย้งที่เกิดขึ้นในโลก และการเข้าสู่สังคมผู้สูงวัย (3) อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยสามารถตอบสนองความมั่นคงของมนุษย์ใน 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ การสร้างโอกาสสำหรับแรงงานในการประกอบอาชีพ การกระตุ้นเศรษฐกิจในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ รวมถึงการสร้างความมั่นคงแบบดั้งเดิมไปพร้อมกับความมั่นคงของมนุษย์ การส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศจึงถือเป็นวิธีการในการผสมผสานทางความคิดระหว่างกองทัพและประชาชนในการที่จะดำรงจุดมุ่งหมายในการรักษาไว้ซึ่งอธิปไตยและผลประโยชน์ของชาติไปพร้อมกับการสร้างความปลอดภัย รวมถึงความมั่นคงให้กับประชาชนในการดำเนินชีวิตประจำวัน ให้สามารถดำรงชีวิตในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว โดยผู้เขียนได้เสนอแนะแนวทางเชิงนโยบายสำหรับรัฐในการที่จะส่งเสริมพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเพื่อความมั่นคงของมนุษย์ที่ยั่งยืน

คำสำคัญ : ความมั่นคงของมนุษย์, อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ, การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019, ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน

¹ ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: kanok.b@dti.or.th

Thai Defence Industry in Response to Human Security

Kanok Bunnag^{1*}

Received 6 July 2022, Revised 6 September 2022, Accepted 16 September 2022

Abstract

This article is intended for 3 primary purposes: (1) to examine human security concept with regard to Thai contemporary issues; (2) to research demographic factors affecting Thai people's attitude toward human security; and (3) to identify roles of Thai defence industry in maintaining human security. The study found that Coronavirus Disease (COVID-19) and effects of Russia-Ukraine conflict have been non-traditional threats which can reflect the Thai government's ability to preserve its valuable human resource. Additionally, the 3 Thai working generations 15 years ahead of time are concerning more about human security as COVID-19 continues to spread, whereas the society is affected by global conflicts, and as the Thai society transforms into a complete aged society. However, Thai Defence Industry can positively contribute to the preservation of human security in Thailand in 3 crucial ways. Firstly, it can create more employment opportunities for a workforce. Secondly, it helps to stimulate both local and national economies. And thirdly, it offers a conciliatory mean for the Thai armed forces and Thai people in regard to contemporary conflicts of interest. So, the Thai armed forces can continue to enhance its capabilities and strengths in defending the state's sovereignty, while ensuring the safety and security of Thais in accordance with the human security concept. Strategic recommendations for promoting Thai Defence Industry in response to the human security concept have also been provided within this article.

Keywords : Human security, Defence industry, COVID-19, Russia-Ukraine conflict

¹ Defence Technology Analysis Department, Defence Technology Institute

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

1. บทนำ

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 เป็นต้นมา ประเทศไทยต้องเผชิญกับภัยคุกคามรูปแบบใหม่ (Non-Traditional Threat) ที่มีความหลากหลายยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และผลกระทบจากสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของประเทศไทยในด้านต่าง ๆ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจที่ในปี พ.ศ. 2563 มีการขยายตัวเฉลี่ยในภาพรวม (GDP) ตีลบในอัตราร้อยละ 6.1 และอัตราการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมตีลบในอัตราร้อยละ 5.9 [1] และถึงแม้แนวโน้มเศรษฐกิจของประเทศไทยจะเริ่มขยายตัวขึ้นในช่วงไตรมาสแรกของปี พ.ศ. 2565 เป็นอัตราร้อยละ 3.5 ก็ตาม ภาพเศรษฐกิจไทยก็ยังประสบปัญหาการชะลอตัวจากผลกระทบอันเนื่องมาจากสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครนที่ส่งผลให้ราคาวัตถุดิบ พลังงาน และอัตราเงินเฟ้อปรับตัวสูงขึ้น โดยเป็นที่คาดการณ์ว่าประเทศไทยจะประสบอัตราเงินเฟ้อในปี 2565 ถึงร้อยละ 5.0 ซึ่งเป็นอัตราที่มากกว่าปี พ.ศ. 2564 ถึง 4 เท่าด้วยกัน [2] ด้านสังคมที่ประชากรมีจำนวนผู้ติดเชื้อไวรัสโคโรนาเฉลี่ยประมาณ 2,000 คนต่อวัน (ข้อมูล ณ วันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 [3]) มีแนวโน้มอัตราการว่างงานของผู้ที่ไม่เคยทำงานมาก่อนและการว่างงานในระยะยาวเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การว่างงานในกลุ่มแรงงานที่จบการศึกษาสูงยังคงอยู่ในระดับสูง [4] อีกทั้งการสำรวจประเด็นรายได้และค่าใช้จ่ายของครัวเรือน พบว่า ร้อยละ 33.8 ของครัวเรือนที่สำรวจมีรายได้ไม่เพียงพอต่อรายจ่าย โดยครัวเรือนส่วนใหญ่ต้องการรายได้เพิ่มเติมเฉลี่ยร้อยละ 10-20 และมีครัวเรือนมากถึงร้อยละ 67.5 ที่ไม่มีเงินออม [5] นอกจากนี้ ในทางการทหาร

ก็ได้รับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบริหารงบประมาณที่มีความจำกัดยิ่งขึ้น เนื่องมาจากการปรับลดงบประมาณกระทรวงกลาโหมลงจำนวน 11,249 ล้านบาท และการกำหนดกรอบงบประมาณในการพัฒนากองทัพให้สามารถจัดซื้อจัดหาอาวุธยุทโธปกรณ์ได้ไม่เกิน 1 ใน 3 ของงบประมาณพัฒนากองทัพที่ได้รับ (ร้อยละ 17 ของงบประมาณกระทรวงกลาโหม ปี 2565) [6] ส่งผลให้การพัฒนากำลังรบไม่สามารถกระทำได้ตามแผนที่วางไว้ก่อนหน้านี้ นอกเหนือไปจากนั้น ห่วงโซ่อุปทานในการดำรงขีดความสามารถในการป้องกันประเทศของไทยยังได้รับผลกระทบจากความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน โดยไทยมียุทธโธปกรณ์ที่จัดหาจากประเทศคู่ขัดแย้งทั้งสอง อาทิ รถถัง Oplot MBT และรถลำเลียงพลหุ้มเกราะล้อยาง 8x8 BTR-3E1 ที่จัดหาจากยูเครน และเฮลิคอปเตอร์ใช้งานทั่วไป Mi-17V5 จากรัสเซีย [7] ซึ่งยุทธโธปกรณ์ข้างต้นนั้นต้องการการบำรุงรักษาเพื่อคงสภาพในการใช้งาน ผลกระทบต่าง ๆ เหล่านี้ของภัยคุกคามรูปแบบใหม่ทำให้เกิดความไม่มั่นคง (Insecurity) ทั้งต่อรัฐที่เปรียบเสมือนผู้เล่นหลักในทฤษฎีความมั่นคงแบบดั้งเดิม (Traditional Security) และต่อหน่วยที่ย่อยลงมาจากรัฐไม่ว่าจะเป็นองค์กร สังคม และที่สำคัญอย่างยิ่งคือประชากรที่อาศัยอยู่ภายใต้การดูแลของรัฐ การนี้ ทฤษฎีความมั่นคงแบบดั้งเดิมซึ่งให้ความสำคัญกับความเข้มแข็งทางทหารเป็นหลักไม่สามารถนำมาใช้ในการอธิบาย รวมถึงใช้รับมือกับความไม่มั่นคงจากภัยคุกคามรูปแบบใหม่ที่เกิดขึ้นได้ จึงต้องมีการพิจารณาถึงแนวคิดความมั่นคงใหม่มาใช้ประกอบ ในที่นี้ ผู้เขียนได้ทำการวิจัยเชิงเอกสาร (Documentary Research) โดยได้ศึกษาและนำทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์ (Human Security)

มาอธิบายปรากฏการณ์ด้านความมั่นคงที่เกิดขึ้นในประเทศไทยภายใต้ภาวะที่โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ยังคงมีการแพร่ระบาดอยู่ และปัญหาผลกระทบจากสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครนยังคงดำเนินต่อไป รวมทั้งแสดงข้อมูลด้านสังคมประชากรของไทยประกอบ เพื่อชี้ให้เห็นว่าประชาชนไทยได้ให้ความสนใจกับชีวิตประจำวันและการอยู่รอดมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ผู้เขียนได้ทำการวิเคราะห์ถึงโอกาสของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในการเป็นทางออกของการประนีประนอมทางความคิดระหว่างกองทัพและประชาชนในการดำรงไว้ซึ่งความมั่นคงของรัฐแบบดั้งเดิมควบคู่ไปกับการส่งเสริมความมั่นคงของมนุษย์สำหรับประชาชนในประเทศ พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการดำเนินการเชิงนโยบายของรัฐในการที่จะส่งเสริมพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเพื่อความมั่นคงของมนุษย์ที่ยั่งยืน

2. ทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์ (Human Security)

ในทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยเผชิญกับปัญหาวิกฤตเศรษฐกิจ การเงิน ความขัดแย้งทางความคิด เหตุจลาจลทางการเมือง รวมถึงภัยพิบัติต่าง ๆ ทั้งอัคคีภัย วาตภัย และอุทกภัย ส่งผลให้ประชาชน ชุมชน และสังคมไทยได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมทั้งทางด้านความมั่นคงทางเศรษฐกิจและสังคมที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตั้งแต่ช่วงต้นปี พ.ศ. 2563 เป็นต้นมา สังคมโลกรวมถึงประเทศไทยตกอยู่ภายใต้สภาวะการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งนับเป็นวิกฤตการณ์ครั้งใหญ่หลวงที่สุดสำหรับมวลมนุษยชาติ นับตั้งแต่สงครามโลก ครั้งที่ 2 เป็นต้นมา โรคระบาดครั้งนี้ไม่ใช่วิกฤตด้านการ

สาธารณสุขเท่านั้น แต่ยังเป็นวิกฤตด้านเศรษฐกิจและสังคมที่ส่งผลต่อความมั่นคงและชีวิตความเป็นอยู่ของผู้คนเป็นพันล้านคนทั่วโลก นอกจากนี้ วิกฤตการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครนที่รัสเซียได้บุกรุกเข้าทำการปฏิบัติการทางทหารอย่างเต็มรูปแบบในดินแดนของยูเครน ตั้งแต่วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2565 ที่ผ่านมานั้น ได้ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม และความมั่นคงของโลกอย่างเป็นวงกว้างและส่งผลกระทบมายังประเทศไทย ซึ่งเป็นการซ้ำเติมและชะลอการฟื้นตัวทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ

ภัยคุกคามเหล่านี้เป็นภัยคุกคามรูปแบบใหม่ (Non-Traditional Threat) ซึ่งมีแนวโน้มจะมีความถี่และทวีความรุนแรงมากขึ้น และส่งผลให้แนวความคิดเรื่อง “ความมั่นคงของมนุษย์” ทวีความสำคัญ รวมถึงได้รับการยอมรับเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ แนวความคิดความมั่นคงของมนุษย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ แนวความคิดความมั่นคงของมนุษย์แบบแคบ (Narrow Approach) ซึ่งมุ่งเน้นเกี่ยวกับความมั่นคงของมนุษย์ที่ต้องเผชิญกับความรุนแรงทางด้านการเมืองการปกครอง และแนวความคิดความมั่นคงของมนุษย์แบบกว้าง (Broad Approach) ซึ่งขยายกรอบความมั่นคงของมนุษย์จากแบบแคบให้ครอบคลุมทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม การเมือง อาหาร ยา ภัยโรค สิ่งแวดล้อม และความมั่นคงส่วนบุคคล [8] โดยทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์ปรากฏสู่เวทีโลกอย่างเป็นทางการในลักษณะของแนวความคิดความมั่นคงของมนุษย์แบบกว้าง ภายในเอกสารรายงานการพัฒนาทุนมนุษย์ของโครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติ (United Nations Development Program Human Development Report หรือ UNDP HDR)

ปี ค.ศ. 1994 ซึ่งมีหลักการพื้นฐานอันได้แก่ การที่มนุษย์มีสิทธิที่จะได้รับการปกป้องจากความกลัว (Fear) กล่าวคือได้รับการคุ้มกันให้ปลอดภัยจากภัยคุกคาม รวมถึงความรุนแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสงคราม การขัดกันด้วยอาวุธ หรือความขัดแย้งต่างๆ และมนุษย์มีสิทธิที่จะได้รับเสรีภาพจากความต้องการ (Want) ด้วยการทำให้ความปรารถนาของมนุษย์บรรลุผล นั่นคือสามารถอยู่รอดในสังคมได้ [9] ในส่วนของประเทศไทยเองนั้น ได้มีการสนองตอบแนวความคิดด้านความมั่นคงของมนุษย์เช่นเดียวกัน โดยแผนพัฒนางานสวัสดิการสังคมและสังคมสงเคราะห์แห่งชาติ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2545-2549) ได้ให้คำจำกัดความของความมั่นคงของมนุษย์ไว้ว่า “การที่ประชาชนได้รับหลักประกันด้านสิทธิความปลอดภัย การตอบสนองต่อความจำเป็นพื้นฐาน สามารถดำรงชีวิตในสังคมได้อย่างมีศักดิ์ศรี ประสบปัญหาความยากจน ไม่สิ้นหวัง และมีความสุขตลอดจนได้รับโอกาสอย่างเท่าเทียมในการพัฒนาศักยภาพของตนเอง” [10] ซึ่งได้ให้ความสำคัญกับทั้งหลักการเสรีภาพจากความกลัว (Freedom from Fear) และเสรีภาพจากความต้องการ (Freedom from Want) รวมถึงได้เพิ่มเติมความมั่นคงของมนุษย์ในด้านสิทธิความเสมอภาคอีกด้วย ความมั่นคงของมนุษย์ประกอบไปด้วยลักษณะที่สำคัญ 4 ประการ ได้แก่ 1) การเป็นเรื่องสากล (universal) เพราะภัยคุกคามในปัจจุบันมีความหลากหลายและภัยคุกคามหลายประเภทส่งผลต่อทุกคนบนโลก 2) ความเชื่อมโยงกัน (interdependent) จากการเป็นโลกาภิวัตน์ทำให้ความไม่มั่นคงจากภัยคุกคามในประเทศใดประเทศหนึ่งมักส่งผลกระทบกับความมั่นคงของมนุษย์ในประเทศอื่น ๆ ด้วย 3) การป้องกัน (prevention) เป็นเครื่องมือสำคัญในการสร้างความ

มั่นคงของมนุษย์ และ 4) ความมั่นคงให้ความสำคัญกับมนุษย์เป็นศูนย์กลาง (human-centered) [11]

ทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์ให้ความสนใจเกี่ยวกับเสถียรภาพความมั่นคงโดยมีมนุษย์เป็นศูนย์กลาง เนื่องจากทรัพยากรมนุษย์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศให้ก้าวไปด้วยความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน ซึ่งแตกต่างจากแนวความคิดความมั่นคงแบบดั้งเดิมที่ให้ความสำคัญกับความเป็นรัฐในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ และดำรงไว้ซึ่งความมั่นคง อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาตามแนวความคิดความมั่นคงแบบดั้งเดิม การที่รัฐจะรักษาหรือได้มาซึ่งความมั่นคงของรัฐนั้น รัฐต้องบริหารจัดการทรัพยากรต่างๆ เช่น ทรัพยากรพลังงาน อาหาร รวมถึงทรัพยากรมนุษย์ เพื่อดำรงไว้ซึ่งอธิปไตยและเสริมสร้างกำลังอำนาจของรัฐในการป้องปรามการรุกรานจากรัฐอื่น ดังนั้นจึงถือได้ว่ารัฐมีบทบาทหน้าที่สำคัญในการปกป้องทรัพยากรมนุษย์ให้เกิดความปลอดภัย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์ การนี้ทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์แบบกว้างตามที่องค์การสหประชาชาติได้ให้การสนับสนุนนั้น ถือเป็นโอกาสที่ดีในการให้รัฐบริหารจัดการทรัพยากรมนุษย์ของรัฐนั้น ๆ ให้มีเสรีภาพจากความกลัว (Freedom from Fear) และเสรีภาพจากความต้องการ (Freedom from Want) รวมถึงการเสริมสร้างความร่วมมือกับรัฐอื่น ๆ และรัฐพันธมิตรในภูมิภาคในการสร้างความมั่นคงด้านสุขภาพ เศรษฐกิจ และการให้ความช่วยเหลือด้านมนุษยธรรมระหว่างกัน อีกทั้งการส่งเสริมสิทธิความเสมอภาค (Equality) ตามแผนพัฒนางานสวัสดิการสังคมและสังคมสงเคราะห์แห่งชาติของประเทศไทยยังเป็นการสนับสนุนให้ประชาชนไทยมีสิทธิการเข้าถึงความปลอดภัยและความมั่นคงในการดำรงชีวิตอย่างเท่าเทียม

การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ส่งผลให้รัฐต้องดำเนินนโยบายการปิดสถานที่ การจำกัดและควบคุมการเดินทางและการดำเนิน กิจกรรมต่าง ๆ ทำให้ประชาชนจำนวนมาก ไม่สามารถประกอบอาชีพได้ตามปกติ การหดตัวของ ภาคการท่องเที่ยว การหยุดชะงักของการผลิตและ ห่วงโซ่อุปทาน การชะลอตัวของภาคการค้า การส่งออก ปัญหาสภาพคล่องทางธุรกิจ รวมทั้งอัตราการว่างงาน เพิ่มขึ้น ประชากรบางส่วนไม่ได้รับการบริการ ทางสาธารณสุขที่เหมาะสม ปัจจัยทางสังคมในกลุ่ม ประชากรบางกลุ่มที่ส่งผลต่อสุขภาพ เช่น ที่พักอาศัย ไม่เป็นสัดส่วน ไม่เหมาะแก่การกักตัวหรือการเว้น ระยะห่างทางสังคม หรือแม้กระทั่งความหวาดกลัว สับสน ไม่เชื่อมั่นและหวาดระแวงมาตรการต่าง ๆ ของรัฐ ก่อปรกับวิกฤตการณ์ความขัดแย้งระหว่าง รัฐเซียและยูเครนซึ่งส่งผลให้เศรษฐกิจไทยยังคง ชะลอตัว ราคาพลังงาน รวมถึงราคาสินค้าในการ อุปโภคและบริโภคปรับตัวสูงขึ้น รายได้ของประชากร ไม่เพียงพอต่อรายจ่าย อีกทั้งขีดความสามารถในการ อุปโภคบริโภคของประชากรลดน้อยลง ผลกระทบ ต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลกระทบอย่างใหญ่หลวงต่อความ มั่นคงของมนุษย์และความมั่นคงในการดำเนินชีวิต ประจำวันโดยตรง ไม่ว่าจะเป็นการขาดแคลนปัจจัย พื้นฐานในการดำรงชีวิต ประชาชนไม่สามารถเข้าถึง การบริการทางการแพทย์และสุขภาพ ไม่ได้รับ สวัสดิการที่พึงได้ รัฐซึ่งเป็นผู้กำหนดนโยบายจึงต้อง พยายามรับมือกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นให้ประชาชน มีความปลอดภัยมากที่สุด รวมถึงมีแนวทางในการ ดำรงชีวิตและหนทางในการประกอบอาชีพเพื่อความ อยู่รอดต่อไปตามทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์

3. บริบทของประชากรไทยในสังคมปัจจุบัน

ข้อมูลสถิติประชากรไทยจากสำนักงานสถิติ แห่งชาติ [12] บ่งชี้ว่า ในระยะเวลา 10 ปี ที่ผ่านมา (พ.ศ. 2555-2564) โครงสร้างอายุของประชากรไทย มีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดย สัดส่วนของจำนวนประชากรสูงอายุ (ประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไป) มีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ สัดส่วนประชากรวัยทำงาน (ประชากรอายุ 15-59 ปี) รวมถึงประชากรวัยเด็ก (อายุ 0-14 ปี) มีแนวโน้ม ที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งหมายความว่าประเทศไทย จะเข้าสู่ยุคที่มีสัดส่วนจำนวนประชากรสูงวัยเกิน 1 ใน 5 หรือสังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์ในไม่ช้า ผลกระทบของโครงสร้างอายุประชากรที่เปลี่ยนไป อย่างเห็นได้ชัด ประการหนึ่งคือ อัตราการพึ่งพิง ประชากรวัยสูงอายุที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยในปี พ.ศ. 2559 ประชากรวัยทำงาน 100 คน ต้องรับ ภาระดูแลผู้สูงอายุ 19 คน ในปี พ.ศ. 2563 ประชากร วัยทำงานต้องรับภาระการดูแลเพิ่มขึ้นเป็น 23 คน และสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ได้คาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2573 ประชากรวัยทำงาน 100 คน ต้องรับภาระดูแลผู้สูงอายุสูงถึง 44 คน [13] ประชากรวัยทำงานจึงมีแนวโน้มที่จะประสบปัญหา ความมีเสรีภาพจากความต้องการ (Freedom from want) ซึ่งอาจทำให้การอยู่รอดในสังคมของคนกลุ่มนี้ เป็นไปได้ด้วยความยากลำบากขึ้น ผลกระทบของ โครงสร้างอายุประชากรที่เปลี่ยนไปอีกประการหนึ่ง คือ การขาดแคลนกำลังแรงงาน ซึ่งส่งผลให้รัฐจำเป็นต้องหาหนทางในการเพิ่มผลิตภาพแรงงานเพื่อชดเชย การขาดหายไปของกำลังแรงงานดังกล่าว ทั้งการเพิ่ม ทักษะของประชากรวัยแรงงานให้สามารถปฏิบัติงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล รวมถึงการ

ส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีในการผลิตเพื่อทดแทนกำลังแรงงานที่ลดลงและเพิ่มผลผลิต

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงกลุ่มประชากรตามเกณฑ์อายุแล้วจะเห็นได้ว่ากลุ่มคนที่จะมีบทบาทสำคัญในด้านของการบริหารจัดการองค์กรและด้านของแรงงานภายในระยะเวลา 15 ปีข้างหน้า นั่นคือกลุ่มประชากรใน 3 เจเนอเรชัน ซึ่งมีคุณลักษณะ ค่านิยม และทัศนคติที่แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากวิถีชีวิต สภาพแวดล้อม และเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละยุคสมัย ได้แก่

1) เจเนอเรชันเอ็กซ์ (Generation X) ซึ่งเกิดในช่วงปี พ.ศ. 2508-2522 มักจะมีความเป็นปัจเจกบุคคล (Individualist) ชอบพึ่งพาตนเอง (Self-Reliant) มีแนวโน้มที่จะเอาตนเองเป็นศูนย์กลาง (Self-Centered) ในการทำงาน ปรับตัวกับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปได้ดี มีทักษะในการเอาตัวรอด ชอบความตรงไปตรงมา และไม่ชอบการใช้อำนาจ [14] นอกจากนี้ เจเนอเรชันเอ็กซ์ยังให้ความสำคัญกับสุขภาพ การมีชีวิตสงบสุข รวมถึงการมีความรัก ความสัมพันธ์ในครอบครัวที่ดีอีกด้วย โดยในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เจเนอเรชันเอ็กซ์ให้ความสำคัญกับการรักษาสุขภาพของตนเอง และการดูแลรักษาคนในครอบครัวให้ปลอดภัยจากการติดเชื้อเป็นอย่างมาก [15] ซึ่งคุณลักษณะและค่านิยมเหล่านี้บ่งชี้ให้เห็นว่า กลุ่มคนเจเนอเรชันเอ็กซ์ให้ความสำคัญกับความมั่นคงของมนุษย์ในการให้ตนเองและครอบครัวปลอดภัยจากภัยคุกคาม

2) เจเนอเรชันวาย (Generation Y) ซึ่งเกิดในช่วงปี พ.ศ. 2523-2540 เป็นกลุ่มคนที่มีความเชื่อมั่นในตนเองสูง มีความใฝ่รู้ด้านเทคโนโลยี มีความคิดสร้างสรรค์ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ด้วยขีดความสามารถ

ในการเข้าถึงและสืบค้นข้อมูลจากแหล่งข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้ กลุ่มคนเจเนอเรชันวายส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับคุณภาพชีวิตมากกว่าจำนวนรายได้ที่ได้รับจากการทำงาน [16] อีกทั้งมีความทะเยอทะยานในการที่จะสร้างอิสระให้กับชีวิตตนเอง [17] อย่างไรก็ตาม ในช่วงการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และช่วงภาวะเศรษฐกิจที่ย่ำแย่ สินค้าและพลังงานในการอุปโภคและบริโภคมีราคาที่สูงขึ้น กลุ่มคนเจเนอเรชันวายมีแนวโน้มในการต้องการความมั่นคงด้านรายได้มากยิ่งขึ้น [18] ซึ่งสะท้อนให้เห็นความสำคัญของทฤษฎีความมั่นคงของมนุษย์ในปัจจุบัน

3) เจเนอเรชันแซด (Generation Z) ซึ่งเกิดในช่วงปี พ.ศ. 2541-2552 เป็นกลุ่มที่เพิ่งเริ่มก้าวเข้าสู่วัยทำงาน ซึ่งมีความคุ้นเคยกับเทคโนโลยีเป็นอย่างสูงเนื่องจากได้สัมผัสกับเทคโนโลยีที่อยู่รายรอบตัวมาตั้งแต่เกิด มีความเป็นตัวของตัวเองสูง และกล้าแสดงออก อย่างไรก็ตาม กลุ่มประชากรเจเนอเรชันแซดนี้มีความกังวลในเรื่องโอกาสในการทำงาน และสภาวะการว่างงาน รวมถึงความมั่นคงทางการเงิน [19] เนื่องจากการได้เห็นประสบการณ์และผลกระทบของภัยคุกคามรูปแบบใหม่ที่เกิดขึ้นกับพ่อแม่และครอบครัวของตนเอง รวมถึงการที่ผู้เริ่มเข้าสู่วัยทำงานใหม่ได้สัมผัสกับความยากลำบากในการหางานและประกอบอาชีพเพื่อหารายได้ในช่วงการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และช่วงที่ผลกระทบจากสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครนยังคงดำรงอยู่ จึงทำให้กลุ่มคนเจเนอเรชันนี้มีแนวโน้มที่จะใช้จ่ายเงินอย่างรัดกุมยิ่งขึ้น [20] ซึ่งถือเป็นการปรับตัวเพื่อการอยู่รอดในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงไป

กลุ่มคนทั้ง 3 เจเนอเรชันข้างต้นเป็นประชากร

วัยทำงานภายในระยะ 15 ปีนับจากปัจจุบัน โดยกลุ่มเจนเอเรชั่นเอ็กซ์และเจนเอเรชั่นวาย เป็นกลุ่มคนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดในช่วงที่โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ยังมีการแพร่ระบาดอยู่และสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครนยังคงดำเนินต่อไป เนื่องจากเจนเอเรชั่นเอ็กซ์เป็นกลุ่มที่ได้มีการก่อร่างสร้างฐานความมั่นคงในการประกอบอาชีพมาเป็นเวลาพอสมควรแล้ว เป็นกลุ่มวัยที่กำลังก้าวขึ้นสู่ระดับผู้บริหาร และมีกิจการเป็นของตนเอง ในขณะที่กลุ่มคนเจนเอเรชั่นวายเป็นกลุ่มคนที่เป็นแรงงานหลักที่กำลังพยายามสร้างความมั่นคงให้กับตนเองและครอบครัว การกำหนดนโยบายของรัฐที่พยายามจะลดการแพร่ระบาดของโรคด้วยการจำกัดและควบคุมการเดินทางและการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ รวมถึงการปิดสถานที่ ทำให้ประชาชนจำนวนมากทั้งเจนเอเรชั่นเอ็กซ์และเจนเอเรชั่นวายไม่สามารถประกอบอาชีพได้ตามปกติ กิจการหลายประเภทต้องปิดกิจการลง ส่งผลให้อัตราการว่างงานเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อสถานการณ์โรคระบาดเริ่มคลี่คลายลง สภาวะเศรษฐกิจและสังคมยังไม่สามารถฟื้นฟูได้อย่างเต็มที่อันเนื่องมาจากผลกระทบของวิกฤตการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ส่งผลให้กลุ่มคนเจนเอเรชั่นแซตที่เพิ่งเริ่มก้าวเข้าสู่วัยทำงาน ต้องมีการแข่งขันในการหางานที่สูงขึ้น และเกิดความไม่มั่นคงในการดำเนินชีวิตประจำวัน ตั้งแต่เริ่มเข้าสู่วัยทำงาน ทั้งนี้ กลุ่มคนวัยแรงงานดังกล่าวเป็นกลุ่มคนที่มีขีดความสามารถในการเข้าถึงเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารที่มีความรวดเร็วและทันสมัย การรับรู้และแพร่กระจายข่าวสารจึงเป็นไปได้โดยง่าย โดยเฉพาะในกลุ่มคนเจนเอเรชั่นวายและเจนเอเรชั่นแซตที่เกิดขึ้นและใช้ชีวิตร่วมกับเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารที่ทันสมัยมาโดยตลอด ดังนั้น กลุ่ม

ประชากรวัยแรงงานนี้จึงเป็นกลุ่มคนหลักที่ออกมาแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับการบริหารงานของรัฐในการรับมือสถานการณ์ฉุกเฉินในการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และการรองรับผลกระทบจากความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน โดยเฉพาะราคาน้ำมันและพลังงานที่ปรับสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังเช่นราคาน้ำมันดีเซลที่มีการปรับตัวสูงขึ้น 6.50 บาทต่อลิตร ภายในระยะเวลาประมาณ 5 เดือน (เปรียบเทียบข้อมูล ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ และวันที่ 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 [21]) ซึ่งตัวแทนสหพันธ์การขนส่งทางบกแห่งประเทศไทยและสมาคมขนส่ง 10 แห่ง ได้เคยออกมาเรียกร้องให้รัฐบาลออกมาตรการในการแก้ไขปัญหาและตรึงราคาน้ำมันดีเซลในช่วงปลายเดือนเมษายน พ.ศ. 2565 [22] อีกทั้งดัชนีความเชื่อมั่นผู้ประกอบการค้าปลีก (Retailer Sentiment Index: RSI) ประจำเดือน พ.ศ. 2565 ที่สำรวจโดยธนาคารแห่งประเทศไทย มีการปรับตัวลดลงจากสาเหตุภาวะค่าครองชีพที่ปรับตัวสูงขึ้น ขณะที่มาตรการกระตุ้นการบริโภคจากภาครัฐหมดลง [23] การออกมาแสดงความคิดเห็นต่าง ๆ นี้ มีวัตถุประสงค์ร่วมกันคือ เพื่อต้องการให้เกิดความมั่นคงของมนุษย์ในการดำเนินชีวิตประจำวัน และการประกอบอาชีพให้ได้มาซึ่งรายได้ในการอยู่รอดของตนเองและครอบครัว รวมถึงเพื่อให้เกิดความเสมอภาคในการเข้าถึงบริการของรัฐในการสร้างความปลอดภัยและมั่นคงดังกล่าวให้แก่ประชาชนด้วย

ในสถานการณ์ที่ประเทศไทยกำลังเผชิญกับวิกฤตการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และผลกระทบจากความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครนนี้ ประชาชนไทยมีแนวความคิดที่จะปกป้องตนเองและครอบครัวจากการระบาดของโรค รวมถึงต้องการให้รัฐช่วยสนับสนุน พร้อมทั้ง

ใส่ใจความอยู่รอดและคุณภาพในการดำเนินชีวิตของประชาชนมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น ความต้องการให้รัฐจัดหาวัคซีนและกระจายวัคซีนให้เหมาะสมและทั่วถึง [24] การเรียกร้องให้รัฐออกมาตรการควบคุมราคาสินค้าและพลังงาน รวมถึงความต้องการให้ภาครัฐบริหารจัดการงบประมาณให้เหมาะสม มีการกำหนดกลุ่มเป้าหมายในการสนับสนุนงบประมาณในการช่วยอุดหนุนแก้ปัญหาความเป็นอยู่ของประชาชนที่ชัดเจน [25] โดยความต้องการของประชาชนเหล่านี้มีความประสงค์ให้รัฐมุ่งเน้นรับมือกับสถานการณ์วิกฤตและความเป็นอยู่ของประชาชนในปัจจุบันมากกว่าความมั่นคงของรัฐแบบดั้งเดิมที่ต้องมีการเสริมสร้างกำลังทางทหารให้เข้มแข็งเพื่อพร้อมรับสถานการณ์ภัยคุกคามที่มีต่ออธิปไตยของชาติ ดังเช่น การที่ประชาชนออกมาเรียกร้องให้กองทัพเรือชะลอการจัดซื้อเรือดำน้ำลำที่ 2 และ 3 ในปีงบประมาณ 2564 และ 2565 เนื่องจากเห็นว่าเป็นการใช้งบประมาณที่ไม่เหมาะสมในสถานการณ์วิกฤต ซึ่งส่งผลให้กองทัพเรือตัดสินใจที่จะชะลอโครงการจัดหาเรือดำน้ำออกไปก่อน โดยไม่ขอรับการจัดสรรงบประมาณโครงการดังกล่าวในปีงบประมาณ 2564 และ 2565 [26] ทศณคติและพฤติกรรมของประชาชนไทยในห้วงสถานการณ์วิกฤตนี้ได้แสดงให้เห็นว่าประชาชนไทยได้หันมาให้ความสำคัญกับความมั่นคงของมนุษย์มากยิ่งขึ้น และในระหว่างที่เผชิญกับภัยคุกคามรูปแบบใหม่และผลกระทบจากภัยคุกคามนั้น ประชาชนไทยได้ให้ความสำคัญกับความมั่นคงของมนุษย์มากกว่าความมั่นคงแบบดั้งเดิม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันสภาวะทางสังคมทางด้านประชากรได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยประเทศไทยกำลังจะเข้าสู่ภาวะสังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์ กำลังแรงงานจะ

ลดลง และประชากรวัยทำงานต้องรับภาระการทำงานเพื่อรายได้ในการเลี้ยงดูตนเองและครอบครัวมากยิ่งขึ้น อีกทั้งประชากรวัยทำงานดังกล่าว แม้ว่าจะเป็นกลุ่มคนจากต่างเจนเนอเรชันที่มีคุณลักษณะ ค่านิยม และทัศนคติที่แตกต่างกันไปจากการเจริญเติบโตมาในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละยุคสมัยก็มีทัศนคติไปในทิศทางเดียวกันในปัจจุบัน ซึ่งภัยคุกคามในรูปแบบใหม่อันได้แก่ การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และผลกระทบจากความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ส่งผลต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของประชากรเป็นอย่างมาก โดยประชากรเหล่านี้ต้องการการอยู่รอด ทั้งที่เป็นความปลอดภัยจากโรคระบาดและความมั่นคงในการดำเนินชีวิตให้ยังสามารถหาเลี้ยงชีพ รวมถึงดูแลครอบครัวได้ การที่มุมมองด้านความมั่นคงของประชาชนไทยได้ให้ความสำคัญกับความมั่นคงของมนุษย์มากยิ่งขึ้นนี้ จึงถือเป็นโอกาสสำคัญให้อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยได้ขับเคลื่อนและพัฒนาต่อไปในลักษณะของการตอบสนองต่อความมั่นคงของมนุษย์ของประชาชนในชาติ

4. อุตสาหกรรมป้องกันประเทศกับความมั่นคงของมนุษย์

ผลกระทบจากสถานการณ์วิกฤต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และผลกระทบจากสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ส่งผลให้ประชาชนไทยมีความตระหนักและให้ความสำคัญกับความมั่นคงในการดำรงชีวิตตามแนวความคิดความมั่นคงของมนุษย์มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ อุตสาหกรรมป้องกันประเทศสามารถตอบสนองความมั่นคงของมนุษย์ให้กับประเทศไทยได้ใน 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ การสร้าง

โอกาสสำหรับแรงงานในการประกอบอาชีพ การกระตุ้นเศรษฐกิจในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ รวมถึงการสร้างความมั่นคงแบบดั้งเดิมไปพร้อมกับความมั่นคงของมนุษย์ การส่งเสริมอุตสาหกรรม ป้องกันประเทศถือเป็นทางออกร่วมกันระหว่าง กองทัพและประชาชนในการที่จะดำรงจุดมุ่งหมาย ในการรักษาไว้ซึ่งอธิปไตยและผลประโยชน์ของชาติ ไปพร้อมกับการสร้างความปลอดภัย รวมถึงความ มั่นคงให้กับประชาชนในการดำเนินชีวิตประจำวัน ให้สามารถดำรงชีวิตในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ไปอย่างรวดเร็ว

4.1 การสร้างโอกาสสำหรับแรงงานในการ ประกอบอาชีพ

อุตสาหกรรม ป้องกันประเทศถือเป็น อุตสาหกรรมเกิดใหม่ของประเทศไทย ซึ่งสำนักงาน คณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.) ได้กำหนดไว้เป็น 1 ใน 12 อุตสาหกรรม เป้าหมาย จึงเป็นโอกาสสำหรับการเพิ่มอัตราการ จ้างงานให้มากขึ้น ทั้งนี้ สกพอ. ได้ประมาณการความ ต้องการบุคลากรในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ในปี พ.ศ. 2562-2566 สำหรับ 10 กลุ่มอุตสาหกรรม ซึ่งยังไม่รวมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เป็นจำนวน 475,688 อัตรา [27] ดังนั้น อุตสาหกรรมป้องกัน ประเทศจึงเป็นอีกหนทางในการเพิ่มอัตราการจ้างงาน จำนวนมากให้กับประเทศ

นอกจากนี้ อุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็น อุตสาหกรรมที่มีความน่าสนใจและมีแรงดึงดูดให้ ประชากรวัยแรงงานอยากเข้ามามีส่วนร่วม เนื่องจาก อุตสาหกรรมป้องกันประเทศโดยส่วนใหญ่แล้วเป็น อุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงที่ต้องอาศัยแรงงาน ที่มีทักษะเฉพาะทางสูง สามารถใช้งานและทำงาน

ร่วมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้ การนี้ ประชากรวัย แรงงานของไทยในปัจจุบันเป็นกลุ่มเจนเอชเอ็นที่มี ความคุ้นเคยกับเทคโนโลยีอยู่แล้วพอสมควร และมีความสามารถในการปรับตัวได้ง่ายกับสภาพแวดล้อม ที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่ตลอดเวลา จึงมีความเหมาะสม กับการทำงานในอุตสาหกรรมประเภทนี้ อีกทั้งการพัฒนาทรัพยากรแรงงานให้มีขีดความสามารถและ ทักษะเพียงพอในการปฏิบัติงาน ถือเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งในปัจจุบัน สกพอ. ได้มี แนวทางในการพัฒนาทรัพยากรบุคคลเพื่อรองรับ เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออกในลักษณะ Demand Driven Education โดยมุ่งเน้นความร่วมมือระหว่าง ภาครัฐอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษาในพื้นที่ ในการปรับมาตรฐานการศึกษาและจัดหลักสูตรให้ สอดคล้องกับความต้องการทรัพยากรบุคคลของภาค อุตสาหกรรม [27] ดังนั้น ผู้ที่จะเข้ามาเป็นแรงงานใน อุตสาหกรรมป้องกันประเทศจึงมีโอกาที่จะได้รับ การพัฒนาทักษะ ความรู้ ความสามารถเฉพาะทาง ที่จำเป็นในลักษณะเดียวกัน การตัดสินใจที่จะเข้าร่วม อุตสาหกรรมป้องกันประเทศจึงเป็นการเปิดโอกาสให้ แรงงานสามารถพัฒนาทักษะวิชาชีพของตนเพื่อนำ ไปใช้ต่อยอดในอนาคตได้อีกด้วย ซึ่งถือได้ว่าเป็นการ เพิ่มโอกาสการอยู่รอดในสังคมปัจจุบันที่มีการแข่งขัน ด้านการประกอบอาชีพสูงและผู้มีทักษะเฉพาะด้าน ในการประกอบอาชีพ มีความได้เปรียบในการได้รับ การจ้างงาน

4.2 การกระตุ้นเศรษฐกิจในระดับท้องถิ่นและ ระดับประเทศ

อุตสาหกรรมป้องกันประเทศสามารถช่วย กระตุ้นเศรษฐกิจในท้องถิ่นและระดับประเทศ ในภาพรวมได้ โดยในระดับท้องถิ่นนั้นการมีนิคม

อุตสาหกรรมป้องกันประเทศสามารถดึงดูดแรงงานเข้าสู่พื้นที่ ทำให้เกิดการหมุนเวียนของกระแสเงินเข้าสู่ท้องถิ่นจากการใช้จ่ายใช้สอยของแรงงานเหล่านี้ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มการแข่งขันของตลาดแรงงานในพื้นที่ ซึ่งอาจส่งผลให้อัตราค่าจ้างขั้นต่ำของแรงงานในพื้นที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย การที่เศรษฐกิจในพื้นที่สามารถขยายตัวขึ้นนี้ จึงเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการดำรงชีวิตของทั้งบุคลากรในภาคอุตสาหกรรมและประชาชนท้องถิ่น ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมในระดับประเทศ อุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็นอุตสาหกรรมมูลค่าสูง ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในการส่งออกเทคโนโลยีทั้งที่เป็นยุทธโศปกรณ์ทางทหารและเทคโนโลยีที่เป็นลักษณะ Dual-Use ที่สามารถใช้ได้สำหรับทั้งภาคพลเรือนและภาคความมั่นคง นอกจากนี้ อุตสาหกรรมป้องกันประเทศยังช่วยลดการนำเข้ายุทธโศปกรณ์และอะไหล่ต่าง ๆ ในขณะที่เพิ่มขีดความสามารถในการผลิตและการแข่งขันให้กับบริษัทภายในประเทศด้วย ซึ่งถือเป็นการสร้างความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน สำหรับเศรษฐกิจของประเทศ รวมถึงช่วยให้ประชาชนไทยมีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นในทางอ้อมจากสถานะเศรษฐกิจที่ดีขึ้นด้วย

4.3 การสร้างความมั่นคงแบบดั้งเดิมไปพร้อมกับความมั่นคงของมนุษย์

อุตสาหกรรมป้องกันประเทศเอื้อต่อการดำรงขีดความสามารถในการรักษาไว้ซึ่งอธิปไตยของชาติ ซึ่งเป็นจุดมุ่งหมายหลักของทฤษฎีความมั่นคงแบบดั้งเดิม ในขณะที่เกื้อกูลความมั่นคงของมนุษย์ให้ประชาชนในชาติสามารถดำรงชีวิตได้อย่างเป็นสุข และมั่นใจได้ว่าตนมีความปลอดภัยจากภัยคุกคามทั้งแบบดั้งเดิม (Traditional Threat) และภัยคุกคาม

รูปแบบใหม่ (Non-Traditional Threat) ที่จะกระทบต่อการอยู่รอดและการดำเนินชีวิตประจำวัน ทั้งนี้ กองทัพบกไทย (ซึ่งหมายรวมถึงทั้ง 3 เหล่าทัพ และกองบัญชาการทหารสูงสุด) มีบทบาทหน้าที่สำคัญอยู่ 2 ด้าน อันได้แก่ บทบาททางทหารที่มุ่งเน้นถึงการเตรียมกำลังและใช้กำลังในการปกป้องไว้ซึ่งเอกราชของราชอาณาจักรไทย และบทบาทที่ไม่ใช่ทางทหาร ได้แก่ การสนับสนุนในการช่วยเหลือประชาชน และการสนับสนุนทางการทูตผ่านความร่วมมือทางการทหาร ดังนั้น กองทัพบกไทยจึงยังคงต้องเตรียมกำลังพลและยุทธโศปกรณ์ให้มีความเพียงพอและมีความพร้อมในการรองรับสถานการณ์วิกฤตต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งส่วนหนึ่งของการเตรียมความพร้อมก็คือ การใช้งบประมาณในการจัดหายุทธโศปกรณ์เพื่อความเข้มแข็งทางทหารในการป้องปรามการรุกรานจากรัฐอื่น และรองรับสถานการณ์สถานการณ์วิกฤตต่าง ๆ ด้านความมั่นคงที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต อาทิ เช่น กองทัพเรือรับมือบเรือหลวงภูมิพลอดุลยเดช ที่ต่อจากประเทศเกาหลีใต้ขึ้นระวางประจำการในวันที่ 7 มกราคม พ.ศ. 2562 เพื่อภารกิจในการป้องกันอธิปไตยเหนืออาณาเขตทางทะเลของไทย รักษาผลประโยชน์ของชาติทางทะเล และช่วยเหลือด้านมนุษยธรรมและบรรเทาสาธารณภัย [28] กองทัพบกจัดหารถยนต์เกราะล้อยาง Stryker Infantry Carrier Vehicle จากประเทศสหรัฐอเมริกา เข้าประจำการในปี พ.ศ. 2562 เพื่อตอบสนองภารกิจด้านความมั่นคงบริเวณชายแดน [29] อย่างไรก็ตาม ด้วยมุมมองด้านความมั่นคงที่เริ่มเปลี่ยนแปลงไปในปัจจุบัน ซึ่งประชาชนหันมาให้ความสำคัญกับความมั่นคงของมนุษย์มากยิ่งขึ้น การจัดซื้อจัดจ้างยุทธโศปกรณ์จากต่างประเทศเพียงอย่างเดียวในการสร้างความมั่นคงของชาติจึงไม่ตอบโจทย์ประชาชนในความ

ต้องการความมั่นคงในการดำรงชีวิตอีกต่อไป การนี้ การที่กองทัพอากาศได้จัดทำสมุดปกขาวกองทัพ อากาศ พ.ศ. 2563 [30] ออกมาเผยแพร่แนวทาง ในการพัฒนากองทัพอากาศอย่างเป็นรูปธรรมโดย มีการวางแผนการใช้งบประมาณแผ่นดินอย่างคุ้มค่า และส่งเสริมการพึ่งพาตนเองผ่านอุตสาหกรรม ป้องกันประเทศ ด้วยแนวทางจัดหาพร้อมการพัฒนา (Purchase and Development) ให้ประเทศไทยได้ รับองค์ความรู้และสามารถต่อยอดพัฒนายุทโธปกรณ์ ได้เอง จึงถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีของกองทัพ ในการสื่อสารเชิงยุทธศาสตร์ให้ประชาชนได้เข้าใจ ถึงภารกิจ การปฏิบัติหน้าที่ของกองทัพในสภาวะ แวดล้อมที่เปลี่ยนไป การดำรงไว้ซึ่งขีดความสามารถ ทางทหาร รวมถึงความสำคัญของการจัดหาและ พัฒนาขีดความสามารถทางทหาร โดยมิได้ลดค่า ความสำคัญของความมั่นคงของมนุษย์ในด้านอื่น ๆ นอกจากนี้ การที่สำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหมกับ กองบัญชาการกองทัพไทยและเหล่าทัพ ร่วมลงนาม บันทึกข้อตกลง (MOU) การสั่งซื้อ/สั่งจ้าง ผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2564 [31] แสดงให้เห็นถึงสัญญาณที่ดีที่ กระทรวงกลาโหมจะมุ่งเน้นส่งเสริมขีดความสามารถ ในการพึ่งพาตนเองทางด้านความมั่นคง รวมถึง เศรษฐกิจและขีดความสามารถในการแข่งขันของรัฐ ในภาพรวมผ่านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ให้รัฐ มีความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน รวมทั้งประชาชนในรัฐ มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ดังนั้น ในปัจจุบันที่ประเทศไทย ยังประสบผลกระทบจากการแพร่ระบาดของโรค ติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 รวมถึงผลกระทบจากความ ขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ประชาชนต้องการ ให้รัฐให้ความสำคัญกับความอยู่รอดของประชาชน เป็นอันดับแรก อุตสาหกรรมป้องกันประเทศจึงเป็น

ทางออกให้กองทัพสามารถดำรงขีดความสามารถ ในการปกป้องอธิปไตยและรักษาผลประโยชน์ของ ชาติได้ โดยที่ยังคงได้รับการสนับสนุนจากประชาชน เนื่องจากประชาชนสามารถรับทราบถึงแนวทางการ บริหารจัดการงบประมาณที่โปร่งใสจากแผนการ ลงทุนและการจัดซื้อจัดจ้างยุทธโธปกรณ์ของกองทัพ กับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ รวมทั้งสามารถรับรู้ ถึงผลประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรมสำหรับประชาชน ในชาติอีกด้วย

5. บทสรุป

ในสภาพแวดล้อมทางความมั่นคงและทาง สังคมที่แปรเปลี่ยนไปอย่างประจักษ์ในปัจจุบัน ภัยคุกคามในมุมมองความมั่นคงได้เปลี่ยนแปลงและ ทวีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น จากภัยคุกคามแบบดั้งเดิม ที่เป็นการขัดแย้งกันระหว่างรัฐ โดยมีความเข้มแข็ง ทางทหารเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้รัฐสามารถอยู่รอดได้ ขยายกรอบแนวความคิดมาเป็นภัยคุกคามในรูปแบบ ใหม่ที่หมายรวมถึงภัยคุกคามในบริบทของเศรษฐกิจ สังคมและการอยู่รอดของมนุษย์ด้วย ทั้งนี้ การที่ ประชาชนต้องเผชิญกับภัยคุกคามในรูปแบบใหม่ โดยตรง ทั้งที่เป็นในรูปแบบของผลกระทบด้าน เศรษฐกิจและสังคมจากสถานการณ์ความขัดแย้ง ที่เกิดขึ้นในโลก และในรูปแบบของโรคระบาด ดังเช่น โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ที่ยังคงมีการแพร่ ระบาดอยู่ ซึ่งมีผลกระทบอย่างยิ่งกับความอยู่รอด และการดำเนินชีวิตประจำวันของประชาชน ส่งผลให้ประชาชนไทยให้ความสนใจกับความมั่นคง ของมนุษย์มากยิ่งขึ้น รวมถึงให้ความสำคัญ กับความมั่นคงของมนุษย์มาก่อนความมั่นคงแบบ ดั้งเดิม ดังเห็นได้จากการที่ประชาชนไทยได้แสดง ความไม่เห็นด้วยกับการขออนุมัติจัดสรรงบประมาณ

กระทรวงกลาโหมในการจัดหายุทธโธปกรณ์มูลค่าสูง ในช่วงที่โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ยังคงแพร่ระบาดและประชาชนยังคงประสบปัญหาความยากลำบากในการดำรงชีวิต อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมป้องกันประเทศสามารถช่วยในการตอบสนองความต้องการประชาชนไทยในการอยู่รอดได้ เนื่องมาจากการที่การส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเป็นการเพิ่มอัตราการจ้างงานและพัฒนาทักษะแรงงานให้มีขีดความสามารถในการแข่งขันในการประกอบอาชีพ รวมถึงเป็นการกระตุ้นเศรษฐกิจทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศให้ประชาชนมีชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นจากการประสบผลกระทบบจากการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และวิกฤตการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ดังนั้น การปรับเปลี่ยนกระบวนทัศน์การให้ความสำคัญกับการจัดหายุทธโธปกรณ์จากต่างประเทศเป็นหลักมาเป็นการจัดหาพร้อมการพัฒนา (Purchase and Development) การรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีผ่านนโยบายการชดเชยทางยุทธพณิชย์ (Offset Policy) และส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศให้ประเทศไทยมีขีดความสามารถในการพึ่งพาตนเองและสามารถผลิตยุทธโธปกรณ์ตามมาตรฐานที่กองทัพต้องการได้ จึงถือเป็นทางออกสำหรับกองทัพไทยในการดำรงไว้ซึ่งขีดความสามารถในการปฏิบัติการปกป้องเอกราชและรักษาผลประโยชน์แห่งราชอาณาจักรไทยโดยได้รับการสนับสนุนจากประชาชน

การนี้ ภาครัฐควรดำเนินการส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยใน 4 ประเด็นหลัก ได้แก่

(1) รัฐควรกำหนดนโยบายส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศอย่างเป็นรูปธรรม โดยกำหนดสัดส่วน

การจัดหาเทคโนโลยีป้องกันประเทศให้เป็นการจัดหายุทธโธปกรณ์ ชิ้นส่วนและอะไหล่อุปกรณ์จากภายในประเทศเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างมีนัยสำคัญ

(2) รัฐควรกำหนดนโยบายการชดเชยทางยุทธพณิชย์ (Offset Policy) อย่างเป็นรูปธรรม เพื่อให้อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยมีขีดความสามารถด้านองค์ความรู้และเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น และมีขีดความสามารถในการแข่งขันกับบริษัทเทคโนโลยีป้องกันประเทศของต่างชาติในอนาคต

(3) กระทรวงกลาโหมควรมีการกำหนดลำดับความสำคัญของเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่มีความจำเป็นและเป็นที่ต้องการ ให้มีความชัดเจนและโปร่งใส รวมถึงเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนได้รับทราบ เพื่อสอบถามความจำเป็นในการใช้งบประมาณของประเทศ และเป็นการลดความคิดเห็นที่ขัดแย้งจากความไม่มั่นคงของมนุษย์ที่ประชาชนอาจต้องเผชิญ

(4) หน่วยงานที่มีพันธกิจในการสนับสนุนส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ดังเช่น สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ควรพิจารณากำหนดแนวทางร่วมกับ สกพอ. ในการพัฒนาขีดความสามารถของแรงงานให้มีทักษะเฉพาะทางที่จำเป็นต้องใช้ในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยดึงขีดความสามารถการพัฒนาแรงงานจากภาครัฐ ภาคเอกชน และสถาบันการศึกษามหาบูรณาการความร่วมมือในการดำเนินการ เพื่อให้ประชากรวัยแรงงานมีทักษะที่เพียงพอในการปฏิบัติงาน มีโอกาสในการหางาน และมีโอกาสในการเลี้ยงชีพ ซึ่งเป็นการสนองตอบด้านความมั่นคงของมนุษย์มากยิ่งขึ้น

การดำเนินการเชิงนโยบายของภาครัฐทั้ง 4 ประการข้างต้นจะเป็นการช่วยส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และในขณะเดียวกัน

ยังเป็นการสนับสนุนความมั่นคงของมนุษย์ ให้ประชากรชาวไทยมีขีดความสามารถในการดำรงชีวิตและมีชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น จึงถือเป็นทางออกให้กองทัพไทยสามารถพัฒนาขีดความสามารถกำลังรบให้มีความทันสมัยในการดำรงรักษาอธิปไตยและส่งเสริมพลังอำนาจแห่งชาติ โดยมีประชาชนให้การสนับสนุนในการดำเนินการ เพื่อให้ประเทศไทยมุ่งสู่เป้าประสงค์ความเป็นรัฐที่มีความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน โดยที่ประชาชนชาวไทยมีความสุขและความมั่นคงในการดำเนินชีวิตไปพร้อม ๆ กัน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Chalamwong. “Effects of COVID-19 from Wave 2 to Wave 3 on the Thai Labor Market.” TDRI.or.th. <https://tdri.or.th/2021/04/covid-19-2-3-affected-thai-labor-market> (accessed Feb. 1, 2022). (in Thai)
- [2] Ministry of Finance. “Thai Economic Prediction for 2565 B.E.” in *Ministry of Finance Newsletter*, April 2022 . (in Thai)
- [3] Department of Disease Control. “Corona Virus Disease (COVID-19).” DDC.MOPH.go.th. <https://ddc.moph.go.th/covid19-dashboard/?dashboard=main> (accessed Jul. 5, 2022). (in Thai)
- [4] Office of the National Economic and Social Development Council. “Social Situation and Outlook 2565.” NESDC.go.th https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=12687&filename=social_outlook (accessed Jul. 1, 2022). (in Thai)
- [5] Brand Inside. “Costumers and SMEs Take Hit by the Russia-Ukraine Conflict.” BRANDINSIDE.asia. <https://brandinside.asia/russia-ukraine-to-thai-sme-and-consumer> (accessed Jul. 1, 2022). (in Thai)
- [6] Defence Spokesperson. “DoD Budget.” WEB.FACEBOOK.com. <https://web.facebook.com/304086039798233/photos/a.337829996423837/1609725525900938> (accessed Jul. 1, 2022). (in Thai)
- [7] Janes. “Ukraine Conflict: How Russia’s Invasion Impacts Ukraine’s Defence Industrial Base.” CUSTOMER.JANES.com. https://customer.janes.com/Janes/Display/BSP_13955-JDIN (accessed Jul. 3, 2022).
- [8] M. Kaldor, *Human Security*. Oxford, UK: Polity Press, 2007, p. 183.
- [9] United Nations Development Program, “New Dimensions of Human Security,” in *Human Development Report 1994*, New York, USA: Oxford Univ. Press, 1994, p. 24.
- [10] Ministry of Social Development and Human Security. “Thai National Strategy on Social Work and Social Welfare 2002-2006.” M-SOCIETY.go.th. https://www.m-society.go.th/news_view.php?nid=2213 (accessed Jun. 25, 2022). (in Thai)
- [11] N. Puapongsakorn. “Human Security: Key Performance Indication Establishment Guidelines for Thailand.” TDRI.or.th.

- https://tdri.or.th/wp-content/uploads/2013/07/YE2003_2_01.pdf (accessed Jun. 24, 2022). (in Thai)
- [12] National Statistical Office. “Demography Population and Housing Branch.” STATBBI. NSO.go.th. <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/01.aspx> (accessed Jul. 5, 2022). (in Thai)
- [13] R8Way. “2020 Annual Report.” Ministry of Public Health Region 8, Udon Thani, Thailand, pp. 17. (in Thai)
- [14] J. Rojananant. “Public Sector Personnel is Ready for Aged Society: Why? What? How?.” OCSC.go.th. <https://ocsc.go.th/sites/default/files/attachment/page/naangsaaw-cchinaangkhuur-orcchnnant.pdf> (accessed Jul. 23, 2021). (in Thai)
- [15] Far East Fame Line DDB. “Generational Face-Off During Pandemics.” *The Wall Issue 2020*, pp. 11-15. FAREASTFAMELINEDDB.com. https://www.fareastfamineddb.com/assets/uploads/insights/pdf_en/20201202072644_993C8374-6F5F-4399-8E76-94A77B90B916.pdf (accessed Jul. 23, 2021). (in Thai)
- [16] D. Dechawattanapaisan, K. Numpaya, J. Nualluk, and C. Pluemboon, “A Study of Viewpoints and Expectations of Generational Characteristics between Generation X and Generation Y.,” *Chulalongkorn Bus. Rev.*, vol. 36, no. 3, pp. 1 - 17, Jul.-Sep. 2014. (in Thai)
- [17] Far East Fame Line DDB. “Generational Face-Off During Pandemics.” *The Wall Issue 2020*, pp. 6. FAREASTFAMELINEDDB.com. https://www.fareastfamineddb.com/assets/uploads/insights/pdf_en/20201202072644_993C8374-6F5F-4399-8E76-94A77B90B916.pdf (accessed Jul. 23, 2021). (in Thai)
- [18] Far East Fame Line DDB. “Generational Face-Off During Pandemics.” *The Wall Issue 2020*, pp. 11. FAREASTFAMELINEDDB.com. https://www.fareastfamineddb.com/assets/uploads/insights/pdf_en/20201202072644_993C8374-6F5F-4399-8E76-94A77B90B916.pdf (accessed Jul. 23, 2021). (in Thai)
- [19] C. Seemiller and M. Grace. *Generation Z: A Century in the Making*, 1st ed., London, UK: Routledge. 2018, p. 253.
- [20] Far East Fame Line DDB. “Generational Face-Off During Pandemics.” *The Wall Issue 2020*, pp. 4. FAREASTFAMELINEDDB.com. https://www.fareastfamineddb.com/assets/uploads/insights/pdf_en/20201202072644_993C8374-6F5F-4399-8E76-94A77B90B916.pdf (accessed Jul. 23, 2021). (in Thai)
- [21] PTT. “Oil Price.” PTTOR.com. https://www.pttor.com/th/oil_price (accessed Jul. 5, 2022). (in Thai)

- [22] The Standard. "Transport and People Group Called on Diesel Freezing Price." THESTANDARD.co. <https://thestandard.co/transport-and-people-group-called-on-diesel-freezing-price> (accessed Jul. 5, 2022). (in Thai)
- [23] Thai Post. "High Cost of Living Affects Sentiment Index." THAIPOST.net. <https://www.thaipost.net/columnist-people/156167> (accessed Jul. 5, 2022). (in Thai)
- [24] The Government Public Relations Department. "Centre for the Administration of the Situation due to the Outbreak of the Communicable Disease Coronavirus 2019 Apologies for Insufficient Vaccines." PRD.go.th. <https://www.prd.go.th/th/content/category/detail/id/39/iid/24252> (accessed Jul. 2, 2022). (in Thai)
- [25] TDRI. "Government Should Avoid Market Intervention and Should Spend Wisely." TDRI.or.th. <https://tdri.or.th/2022/03/tdri-publicseminar-inflation> (accessed Jul. 5, 2022). (in Thai)
- [26] Manager Online. "Thai Navy Delays Submarine Acquisition Program." MGRONLINE.com. <https://mgronline.com/politics/detail/9640000070570> (accessed Jul. 22, 2021). (in Thai)
- [27] Eastern Economic Corridor Office. "Human Resource Development under EEC Model." EECO.or.th. <https://www.eeco.or.th/th/eec-model> (accessed Jul. 27, 2021). (in Thai)
- [28] Thairath Online. "HTMS Bhumibol Adulyadej Powerful Thai Navy Ship." THAIRATH.co.th. <https://www.thairath.co.th/news/auto/review/1464941> (accessed Jul. 27, 2021). (in Thai)
- [29] T. Wongpunya. "Thai Army Held a Ceremony in the Receive of 3-Billion-Baht Strykers from the US." THESTANDARD.co. <https://thestandard.co/stryker-rta-icv-stryker-royal-thai-army-infantry-carrier-vehicle> (accessed Jun. 27, 2022). (in Thai)
- [30] Royal Thai Air Force. "RTAF White Paper 2020." RTAF.mi.th. <https://www.rtaf.mi.th/th/Documents/Publication/63%20OIT/20022020%20RTAF%20White%20Paper%20THA.pdf> (accessed Jul. 27, 2021). (in Thai)
- [31] Thai PBS News. "DoD Paves Way for the Development of Defence Industry's Products." NEWS.THAIPBS.or.th. <https://news.thaipbs.or.th/content/302274> (accessed Jul. 5, 2022). (in Thai)

การเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ทางทหาร โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม กรณีศึกษา: สงครามรัสเซีย-ยูเครน พ.ศ. 2565

พงศ์พันธุ์ จันทะคัต^{1*} ปรศักดิ์ เอี่ยมละออ¹ และ เยาวเรศ จันทะคัต²

วันที่รับ 1 กรกฎาคม 2565 วันที่แก้ไข 28 กรกฎาคม 2565 วันที่ออกรับ 5 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้เสนอแนวทางการใช้ชุดข้อมูลการรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) ด้วยเทคนิคการตรวจการเปลี่ยนแปลง (Change detection) เพื่อการเฝ้าติดตามความเคลื่อนไหวของพื้นที่ทางทหารในกรณีศึกษาสงครามรัสเซีย-ยูเครน ปี พ.ศ. 2565 โดยการศึกษานี้ได้วิเคราะห์พื้นที่ฐานทัพอากาศตามแนวชายแดนของประเทศยูเครนเป็นกรณีศึกษา ได้แก่ 1) Saki Air Base ในไครเมีย 2) Primorsko-Akhtarsk Air Base ในประเทศรัสเซีย และ 3) Machulishchy Air Base ในประเทศเบลารุส ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 SAR ร่วมกับวิธีการทดสอบ Omnibus test สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ทางทหารได้ โดยสามารถประมวลผลผ่านแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine) ซึ่งเป็นวิธีและเครื่องมือหนึ่งที่จะเป็นประโยชน์ต่อการเฝ้าตรวจและติดตามความเคลื่อนไหวตามแนวชายแดนของประเทศไทย และสนับสนุนภารกิจทางทหารอื่นๆ ได้ต่อไป

คำสำคัญ : ข้อมูลการรับรู้ระยะไกล, การตรวจการเปลี่ยนแปลง, พื้นที่ทางทหาร, สงครามรัสเซีย-ยูเครน

¹ กองวิชาวิศวกรรมโยธา, ส่วนการศึกษา, โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

² คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้แต่ง, อีเมล: pongpun.ju@crma.ac.th

Detecting Change in Military Sites Using Satellite Imagery Case Study: Russia-Ukraine War in 2022

Pongpun Juntakut ^{1*} Peerasak Aemlaor ¹ and Yaowaret Jantakat ²

Received 1 July 2022, Revised 28 July 2022, Accepted 5 August 2022

Abstract

This study is to present a guideline of the remote-sensing application with the change detection techniques for monitoring the change at military sites in case study of Russia-Ukraine war in 2022. In this study, air bases along the Ukrainian border were analyzed for case studies as 1) Saki Air Base in Crimea, 2) Primorsko-Akhtarsk Air Base in Russia and 3) Machulishchy Air Base in Perarus. The results of this study demonstrate the application of satellite images (Sentinel-1 SAR) with the Omnibus test to be able to analyze and monitor the change in military sites by using the Google Earth Engine platform which can be an efficient tool for monitoring the border of Thailand and supporting other military operations.

Keywords : Remote sensing, Change detection, Military site, Russia-Ukraine war

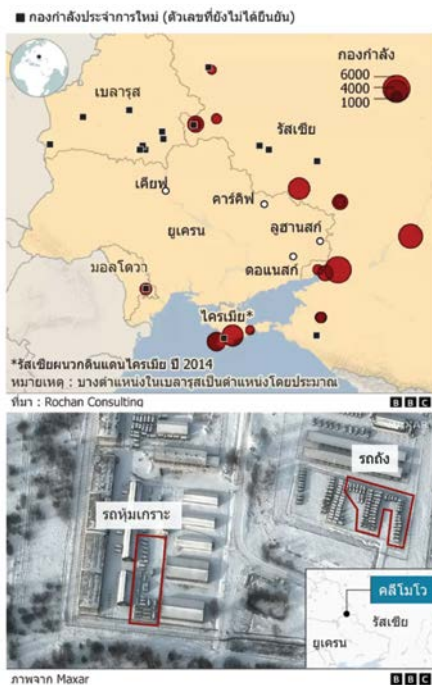
¹ Civil Engineering Department, Academic Division of Chulachomklao Royal Military Academy

² Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding author, E-mail: pongpun.ju@crma.ac.th

1. บทนำ

การรุกรานของรัสเซียที่มีต่อยูเครนอย่างเต็มรูปแบบเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 เป็นการยกระดับความรุนแรงของสงครามรัสเซีย-ยูเครน [1] ภายหลังวิกฤตการณ์ไครเมีย เมื่อปี พ.ศ. 2557 การรุกรานทำให้เกิดวิกฤตผู้ลี้ภัยครั้งใหญ่ที่สุดในยุโรป นับตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่สอง โดยมีประชาชนชาวยูเครนประมาณ 7 ล้านคนเดินทางออกนอกประเทศ และหนึ่งในสามกลายเป็นประชากรพลัดถิ่น [2] ในเดือนมกราคม พ.ศ. 2565 รัสเซียได้ระดมกำลังทหารราว 100,000 นาย พร้อมด้วยอาวุธยุทโธปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ รถถัง ปืนใหญ่ และกำลังทางอากาศ เข้าประชิดชายแดนที่ติดกับประเทศยูเครน เช่น เมืองคลีโมว แคว้นบริฮันส์ก และเมืองเยลนีเย แคว้นสโมเลนส์ก เป็นต้น [3] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ ๑ การระดมกองกำลังทหารของรัสเซียตามแนวชายแดนของยูเครน ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 (แหล่งภาพข่าวจาก BBC News) [3]

ช่วงแรกของการรุกรานของรัสเซียได้เริ่มต้นขึ้นที่แนวรบด้านเหนือจากประเทศเบลารุสไปยังเมืองเคียฟ แนวรบด้านตะวันออกเฉียงเหนือไปยังเมืองคาร์คิฟ แนวรบด้านใต้จากแคว้นไครเมีย และแนวรบด้านตะวันออกเฉียงใต้จากเมืองลูฮันส์กและดอแนสค์ [4] การรุกรานของรัสเซียที่มีต่อยูเครนในครั้งนี้ได้รับการประณามอย่างกว้างขวางจากนานาชาติ โดยหลายประเทศได้กำหนดมาตรการคว่ำบาตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของรัสเซียและทั่วโลก [5]

จากสถานการณ์ดังกล่าวการประยุกต์ใช้ชุดข้อมูลการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing) ด้วยเทคนิคการติดตามการเปลี่ยนแปลง (Change Detection) เพื่อใช้งานทางทหาร เช่น การเฝ้าตรวจความเคลื่อนไหวของพื้นที่ทหาร จึงเป็นอีกหนึ่งเครื่องมือทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการประเมินสถานการณ์และคาดการณ์การรุกรานของกำลังฝ่ายทหารอีกฝ่ายตามแนวชายแดนหรือพื้นที่ที่สนใจได้ ตัวอย่างเช่นในสงครามรัสเซีย-ยูเครน เป็นต้น

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ชุดข้อมูลการรับรู้ระยะไกลด้วยเทคนิคการตรวจการเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้งานทางทหารได้แก่ Joshua R. และคณะ [6] ได้ทำการวิเคราะห์เฝ้าตรวจการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่สนามบินทางทหารของนาโต้ (The North Atlantic Treaty Organization: NATO) ณ เมืองไคล์เลนเคียร์เชิน (Geilenkirchen) ประเทศเยอรมนี และงานวิทยานิพนธ์ของ J.C. van Heyningen จากมหาวิทยาลัย TUDelft ประเทศเนเธอร์แลนด์ [7] ได้ใช้ชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 SAR เพื่อการตรวจพบการพังทลายของอาคารภายหลังจากการโจมตีทางอากาศ ณ พื้นที่อีสต์เกอทา (East-Ghoutha) ประเทศซีเรีย แต่อย่างไรก็ตามจากตัวอย่างงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมายังไม่มี

การนำมาวิเคราะห์ผลและใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง สำหรับภารกิจทางทหารตามแนวชายแดน เพื่อใช้เป็นข้อมูลข่าวสารเบื้องต้นในการวางแผนและเตรียมการรับมือกับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อเป็นการเสนอแนวทางการใช้ชุดข้อมูลการรับรู้ระยะไกลด้วยเทคนิคการติดตามการเปลี่ยนแปลงสำหรับการใช้งานทางทหาร เช่น การเฝ้าติดตามและตรวจความเคลื่อนไหวในพื้นที่ทางทหาร กรณีศึกษาสงครามรัสเซีย-ยูเครน ปี พ.ศ. 2565

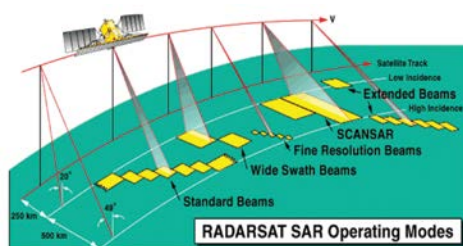
3. เครื่องมือและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เรดาร์รับแสงสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar)

เรดาร์รับแสงสังเคราะห์ (SAR) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นเครื่องมือในการสร้างรูปภาพของภูมิประเทศ ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายรูปที่ทำการถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพจากอากาศสู่พื้น [8] โดยระบบเรดาร์ SAR นั้นจะมีลักษณะแบบแอคทีฟคือจะมีแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเอง ซึ่งข้อดีที่สำคัญของระบบเรดาร์ SAR คือสามารถทำงานได้ตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเองจึงไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงสว่างอื่นเพื่อการถ่ายภาพ [8]

โดยทั่วไปหลักการทำงานของระบบเรดาร์ SAR จะอาศัยการเคลื่อนที่ของแพลตฟอร์มและการประมวลผลสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาในการสร้างรูรับแสงสังเคราะห์ (Synthetic Aperture) ขึ้นมา ซึ่งความยาวของรูรับแสงสังเคราะห์นั้นจะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่เป้าหมายจะโดนฉายด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศที่ใช้งาน [9] ในระหว่างการเคลื่อนที่ของแพลตฟอร์ม ระบบเรดาร์ SAR จะทำการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงมากระทบกับพื้นผิวด้านล่าง และทำการบันทึกข้อมูลสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศของระบบเรดาร์ ตลอดแนวทางการเคลื่อนที่ของแพลตฟอร์ม โดยรูปแบบของโหมดการทำงานจะมีหลายรูปแบบด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ScanSAR, Wide Swath และ Standard Beams ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ ๒ โหมดการทำงานของระบบเรดาร์ SAR [9]

การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีระบบเรดาร์ SAR ปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยทีมงานวิจัยและหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนทั่วโลก สำหรับประเทศไทยนั้น หน่วยงานที่ดำเนินงานเกี่ยวข้องกับระบบเรดาร์ SAR โดยตรงคือ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (Geo-Informatics and Space Technology Development Agency: GISTDA) [10] ซึ่งได้ให้บริการเกี่ยวกับระบบข้อมูลดาวเทียมทั้งเพื่องานวิจัยและการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านภัยพิบัติ ด้านการเกษตรกรรม ด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น แต่ทว่ายังไม่มีการนำเอาเทคโนโลยีระบบเรดาร์ SAR และชุดข้อมูลมาใช้งานทางทหารอย่างเด่นชัดในประเทศไทย

3.2 Google Earth Engine (GEE)

ปัจจุบันการใช้แพลตฟอร์มในคลาวด์เป็นสิ่งที่สะดวกขึ้นและไม่เสียค่าใช้จ่ายสำหรับการเข้าถึงข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ตัวอย่างแพลตฟอร์มที่ให้บริการ ได้แก่ Amazon Web Services (AWS) และกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine: GEE) โดยกูเกิลเอิร์ธเอนจินเป็นแพลตฟอร์มภูมิสารสนเทศของกูเกิล (Google) ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์และการสร้างภาพ (Visualization) จากชุดข้อมูลเชิงพื้นที่ (Geospatial Information) ของภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite Image) โดยกูเกิลได้จัดทำภาพถ่ายดาวเทียมและเก็บข้อมูลบันทึกย้อนหลังมากกว่า 40 ปี ไว้ในแบบคลังข้อมูลสาธารณะ โดยการใช้งานแพลตฟอร์ม GEE จะเป็นการเขียนโค้ดคำสั่ง (Code Editor) ด้วยภาษา JavaScript เพื่อเรียกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม นำมาวิเคราะห์และประมวลผลตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา เช่น แสดงข้อมูลอุณหภูมิ (Temperature) ข้อมูลปริมาณน้ำฝน (Precipitation) หรือข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use) และรวมถึงชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 SAR ที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ [11]

3.3 Omnibus Test for Change Detection

สำหรับการศึกษานี้ได้นำวิธีการทดสอบ Omnibus test ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการตรวจการเปลี่ยนแปลงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 SAR ได้ถูกนำเสนอโดย Conradsen และคณะ [12] โดยวิธี Omnibus test ใช้หลักการ The complex Wishart distribution ซึ่งพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์เมทริกซ์ covariance และค่า equivalent number of looks (ENL) ซึ่งมี

รูปแบบของการทดสอบดังแสดงในสมการที่ (1) [13]

$$\ln Q = n(pk \ln k + \sum_{i=1}^k \ln |X_i| - k \ln \left| \sum_{i=1}^k X_i \right|) \quad (1)$$

โดย Q คือค่าทางสถิติการทดสอบของสัดส่วนความเป็นไปได้ (Likelihood ratio test statistic) n คือค่าตัวเลขเทียบเท่า (Equivalent number of looks) p คือค่ามิติ (Dimensionality) k คือค่าจำนวนที่สังเกต (Observation) X_i คือค่าที่คำนวณได้จาก $n \cdot C$ เมื่อ C คือค่าพารามิเตอร์เมทริกซ์แปรปรวน (Covariance matrix) ดังแสดงในสมการที่ (2) [13]

$$C = \begin{bmatrix} (S_{vv}|^2) & 0 \\ 0 & (S_{vh}|^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดย S_{vv} คือค่าแอมพลิจูดในแกนแนวตั้งสำหรับการส่งและรับค่า (Complex scattering amplitude for vertically polarized emission) และ S_{vh} คือค่าแอมพลิจูดในแกนแนวตั้งและแนวนอนสำหรับการส่งและรับค่า ตามลำดับ (Complex scattering amplitude for the vertical emission horizontal reception)

สำหรับการพิจารณาค่าความเป็นไปได้ (Probability) นั้น ค่า $-2 \ln Q$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าสังเกตการณ์ z ซึ่งสามารถคำนวณหาความเป็นไปได้ในทอมของค่าทางสถิติการทดสอบของค่า Q (Test Statistic of Q) ได้จากสมการที่ (3) [13]

$$\Pr(-2 \ln Q \leq z) \cong P_{x^2, 2(k-1)}(z) \quad (3)$$

โดย $P_{x^2, f}(z)$ คือค่าความเป็นไปได้จากการแจกแจงแบบ Chi-Square ด้วยค่า f คือค่าระดับอิสระ (Degrees of freedom) โดย $f=2(k-1)$ ซึ่ง k คือ

จำนวนที่สังเกต (Observation) และ z คือค่าทางสถิติที่สังเกตการณ์ได้ (Observed statistics) ในช่วงเวลาที่กำหนด

ซึ่งค่าทางสถิติการทดสอบ (Q) ในวิธีการทดสอบ Omnibus test สามารถถูกนำมาเขียนในรูปแบบลำดับของการทดสอบทางสถิติ (Sequence of test statistics: R_j) ได้ดังแสดงในสมการที่ (4) [13]

$$\ln Q = \sum_{j=2}^k \ln R_j^l \quad (4)$$

โดย R_j^l คือค่าทางสถิติในรูปแบบลำดับ ซึ่ง $l = 1 \dots k-1$ และ $j = l+1 \dots k$ ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (5)

$$\ln R_j = n(p(j \ln j - (j-1) \ln(j-1) + (j-1) \ln \left| \sum_{i=1}^{j-1} X_i \right| + \ln |X_j| - j \ln \left| \sum_{i=1}^j X_i \right|) \quad (5)$$

ดังนั้น ค่าความเป็นไปได้ในเทอมของ R_j สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) [13]

$$\Pr(-2 \ln R_j^l \leq z) \cong P_{x^2, 2}(z) \quad (6)$$

ตัวอย่างการพิจารณาในกรณี $k = 5$ (จำนวน 5 รูปภาพ) สามารถทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงได้จากการพิจารณาเริ่มจากทีละแถวและทดสอบค่าตามคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3

l/j	2	3	4	5
1	R_2^1	R_3^1	R_4^1	R_5^1
2		R_3^2	R_4^2	R_5^2
3			R_4^3	R_5^3
4				R_5^4

รูปที่ ๓ ตัวอย่างการพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงในกรณี $k = 5$ (จำนวน 5 รูปภาพ)

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้ได้นำแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine: GEE) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการทดสอบ Omnibus test เพื่อการวิเคราะห์และประเมินผลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 SAR ในการเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ทางทหาร โดยในรูปที่ 4 ได้แสดงขั้นตอนของการศึกษาในแพลตฟอร์ม GEE ผ่านการเขียนโค้ดคำสั่งด้วยภาษา Python และ JavaScript เพื่อเรียกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากฐานข้อมูลนำมาวิเคราะห์และประมวลผล

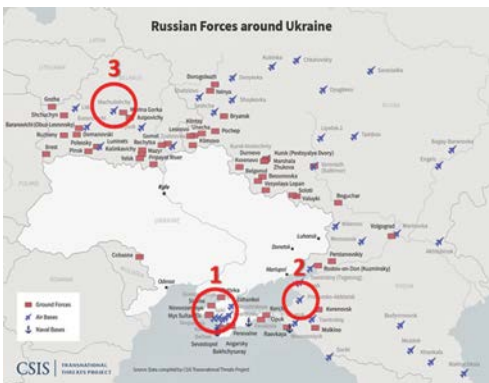


รูปที่ ๔ แผนผังของวิธีการดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้ได้แบ่งวิธีการศึกษาออกเป็นขั้นตอนหลักด้วยกัน 3 ขั้นตอน คือ 1) การกำหนดพื้นที่ที่ศึกษาและช่วงเวลาของข้อมูลเพื่อการดาวน์โหลดจากฐานข้อมูลโดยผ่านโปรแกรมภาษา Python ใน Google colab 2) การเรียกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและนำข้อมูลมาวิเคราะห์และประมวลผลในแบบอัตโนมัติตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาโดยผ่านโปรแกรมภาษา JavaScript ในแพลตฟอร์ม GEE CODE และ 3) การนำผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่แสดงในแดชบอร์ด (Dashboard) และแสดงในรูปแบบออนไลน์โดยผ่านเครื่องมือ GEE APP

5. ผลการศึกษา

จากสถานการณ์สงครามยูเครนและรัสเซีย การศึกษานี้ได้เลือกพื้นที่ทางทหารโดยมุ่งเน้นพื้นที่ฐานทัพอากาศเพื่อแสดงผลการศึกษาเป็นตัวอย่่างของการเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ทางยุทธศาสตร์ทางทหาร ได้แก่ 1) Saki Air Base ในไครเมีย 2) Primorsko-Akhtarsk Air Base ในประเทศรัสเซีย และ 3) Machulishchy Air Base ในประเทศเบลารุส ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ ๕ พื้นที่ศึกษา 1) Saki Air Base ในไครเมีย 2) Primorsko-Akhtarsk Air Base ในประเทศรัสเซีย และ 3) Machulishchy Air Base ในประเทศเบลารุส [14]

5.1 Saki Air Base

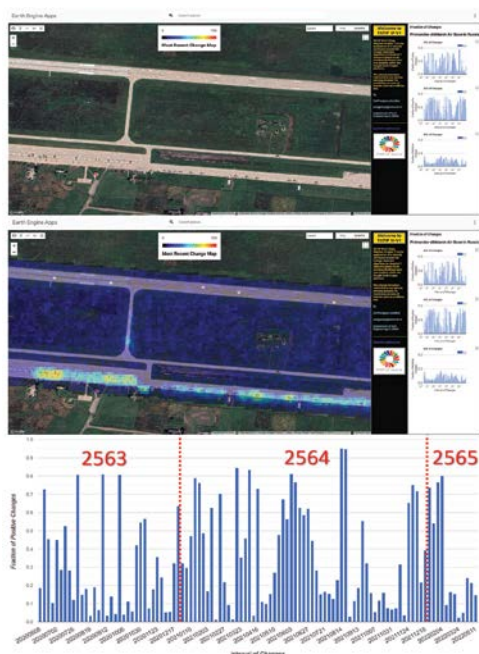
สนามบิน Saki Air Base เป็นฐานทัพอากาศที่ตั้งอยู่ในไครเมีย สามารถรองรับเครื่องบินรัสเซียอย่างน้อยได้จำนวน 26 ลำ [1] ผลการศึกษาชี้ให้เห็นตำแหน่งของความเคลื่อนไหวของเครื่องบินที่มีบ่อยครั้งขึ้นเริ่มตั้งแต่ในช่วงปลายปี พ.ศ. 2564 ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าสนามบิน Saki Air Base ถูกใช้เป็นฐานบินเพื่อเตรียมการรุกรานประเทศยูเครน ซึ่งได้เกิดขึ้นเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2565 ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ ๖ ผลการศึกษา ณ ฐานทัพอากาศ Saki Air Base ในไครเมีย ระหว่างวันที่ 6 มิถุนายน 2564 ถึง 2 พฤษภาคม 2565

5.2 Primorsko-Akhtarsk Air Base

สนามบิน Primorsko-Akhtarsk Air Base เป็นฐานทัพอากาศหนึ่งของกองทัพอากาศรัสเซีย ซึ่งมีที่ตั้งอยู่ทางตอนใต้ของประเทศรัสเซีย โดยได้ก่อตั้งมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1954 (พ.ศ. 2497) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นตำแหน่งของความเคลื่อนไหวของเครื่องบินที่มีบ่อยครั้งขึ้นเริ่มตั้งแต่ในช่วงกลางปี พ.ศ. 2564 และมีการเปลี่ยนแปลงเคลื่อนไหวที่ชัดเจนในช่วงต้นปี พ.ศ. 2565 ซึ่งสอดคล้องกับเวลาที่กองกำลังรัสเซียได้เริ่มโจมตีอย่างเต็มรูปแบบ โดยจากผลการศึกษาสามารถสันนิษฐานถึงความเป็นไปได้ว่าสนามบิน Primorsko-Akhtarsk Air Base ได้ถูกใช้เป็นสนามบินหลักในการโจมตียูเครน ดังแสดงในรูปที่ 7

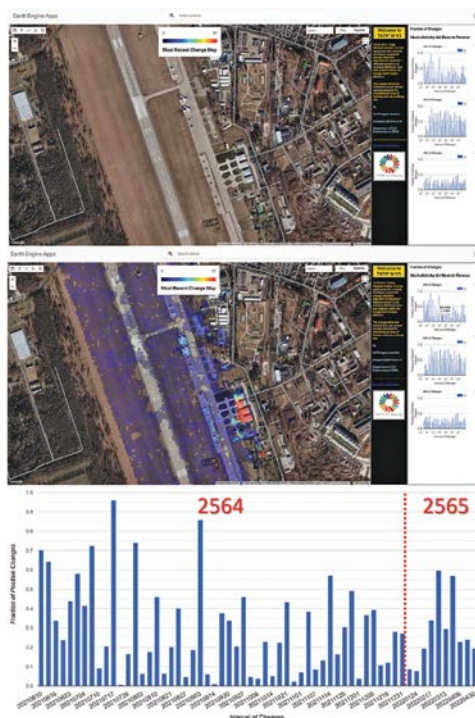


รูปที่ ๗ ผลการศึกษา ณ ฐานทัพอากาศ Primorsko-Akhtarsk Air Base ในประเทศรัสเซีย ระหว่างวันที่ 8 มิถุนายน 2563 ถึง 11 พฤษภาคม 2565

5.3 Machulishchy Air Base

สนามบิน Machulishchy Air Base เป็นฐานทัพอากาศของกองทัพอากาศและกองกำลังป้องกันภัยทางอากาศของประเทศเบลารุส ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Machulishchy ในภูมิภาค Minsk เป็นที่ตั้งของฐานทัพอากาศคอมโพสิตที่ 50 ประเภทของเครื่องบินที่ใช้บินในสนามบินนี้ ได้แก่ Antonov An-26s, Ilyushin Il-76MD's, Mil Mi-8 และ Mil Mi-24s [1] จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นตำแหน่งของความเคลื่อนไหวของเครื่องบินรบในสนามบิน Machulishchy Air Base โดยช่วงเวลาของการเริ่มมีการโจมตียูเครนอย่างเต็มรูปแบบของกองกำลังรัสเซียเมื่อต้นปี พ.ศ. 2565 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงความเคลื่อนไหวที่ไม่มากนัก ซึ่งจากผลการศึกษา

สามารถสันนิษฐานได้ว่าสนามบิน Machulishchy Air Base ไม่ได้ถูกใช้เป็นฐานปฏิบัติการทางอากาศในช่วงของการเริ่มมีการโจมตียูเครน ซึ่งสอดคล้องกับที่ตั้งของสนามบิน Machulishchy Air Base ที่ตั้งอยู่ในประเทศเบลารุส โดยไม่ได้สนับสนุนการโจมตีหลักให้กับกองกำลังรัสเซีย ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ ๘ ผลการศึกษา ณ ฐานทัพอากาศ Machulishchy Air Base ในประเทศเบลารุส ระหว่างวันที่ 10 มิถุนายน 2564 ถึง 30 เมษายน 2565

5.4 แอปพลิเคชันของผลการศึกษา

ผลการศึกษาทั้งสามพื้นที่ทางทหารในข้อที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ได้แสดงไว้ในรูปแบบออนไลน์ผ่านทาง Google Earth Engine App ซึ่งสามารถเข้าแอปพลิเคชันได้โดยสแกนบาร์โค้ดในรูปที่ 9



<https://juntaku37.users.eorthergine.app/view/novodorivka-saki-air-base-in-ukraine>



<https://juntaku37.users.eorthergine.app/view/primorsko-akhtarsk-air-base-in-russia>



<https://juntaku37.users.eorthergine.app/view/machulishchy-air-base-in-belarus>

รูปที่ ๙ แอปพลิเคชันแสดงผลการศึกษา

6. บทสรุป

จากวัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือการนำเสนอแนวทางการใช้ชุดข้อมูลการรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) ด้วยเทคนิคการติดตามการเปลี่ยนแปลง (Change detection) สำหรับการใช้งานทางทหาร เช่น การเฝ้าติดตามและตรวจความเคลื่อนไหวในพื้นที่ทางทหาร กรณีศึกษาสงครามรัสเซีย-ยูเครน ปี พ.ศ. 2565 โดยการศึกษาได้วิเคราะห์พื้นที่ฐานทัพอากาศตามแนวชายแดนของยูเครนเป็นกรณีศึกษา ได้แก่ 1) Saki Air Base ในไครเมีย 2) Primorsko-Akhtarsk Air Base ในประเทศรัสเซีย และ 3) Machulishchy Air Base ในประเทศเบลารุส ซึ่งจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสนามบิน Saki Air Base ในไครเมีย และสนามบิน Primorsko-Akhtarsk Air Base ทางตอนใต้ของประเทศรัสเซีย มีความเป็นไปได้ว่าสนามบินทั้งสองเป็นสนามบินที่ถูกใช้พื้นฐานปฏิบัติการทางอากาศในช่วงเวลาของการเริ่มมีการโจมตียูเครนอย่างเต็มรูปแบบของกองกำลังรัสเซียเมื่อต้นปี พ.ศ. 2565 แต่หาว่าสนามบิน Machulishchy Air Base ในประเทศเบลารุส ไม่ได้ถูกใช้พื้นฐานบินสนับสนุนในช่วงเวลาของการเริ่มมีการโจมตียูเครนของกองกำลังรัสเซีย

ดังนั้น การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 SAR ร่วมกับวิธีการทดสอบ Omnibus test สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ทางทหารได้ โดยสามารถประมวลผลผ่านแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine) ซึ่งเป็นวิธีและเครื่องมือทางเลือกหนึ่งที่จะเป็นประโยชน์ต่อภารกิจเฝ้าตรวจและติดตามความเคลื่อนไหวตามแนวชายแดนของประเทศไทย และสนับสนุนภารกิจทางทหารอื่นๆ ได้ต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] CNBC. "Russian Forces Invade Ukraine." CNBC.com. <https://www.cnbc.com/2022/02/24/russian-forces-invade-ukraine.html> (accessed Aug. 30, 2022).
- [2] United Nations High Commissioner for Refugees. "Ukraine Refugee Situation." UNHCR.org. <https://data.unhcr.org/en/situations/ukraine> (accessed Jun. 24, 2022).

- [3] BBC News. “รัสเซียเสริมกำลังพลที่พรมแดนยูเครนใหญ่เพียงใด.” BBC.com. <https://www.bbc.com/thai/international-60170269> (accessed Jun. 24, 2022).
- [4] The New York Times. “Ukraine Says Russia Begins Assault in the East After Raining Missiles Nationwide.” <https://www.nytimes.com/2022/04/18/world/europe/ukraine-russia-missiles-lviv-donbas.html> (accessed Mar. 21, 2022).
- [5] CNN Business. “Russia Faces Financial Meltdown as Sanctions Slam Its Economy.” CNN.com. <https://edition.cnn.com/2022/02/28/business/russia-ruble-banks-sanctions/index.html> (accessed Mar. 21, 2022).
- [6] J. Rutkowski, M. J. Canty, and A. A. Nielsen, “Site Monitoring with Sentinel-1 Dual Polarization SAR Imagery Using Google Earth Engine.” *J. Nucl. Mater. Manage.*, vol. 46, no. 3, pp. 48 – 59, 2018.
- [7] J. C. van Heyningen, “Building Damage Detection Using Google Earth Engine,” M.S. dissertation, Delft Univ. Tech., Delft, Netherlands, 2018.
- [8] OHB. “SAR-Lupe.” OHB-SYSTEM.de <https://www.ohb-system.de/sar-lupe-english.html> (accessed Jun. 24, 2022).
- [9] A. Moreira and G. Krieger, “Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) Systems: State of the Art and Future Developments,” in *11th GAAS Symp.*, Munich, Germany, 2003, pp. 385 – 388.
- [10] Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization). “ข้อมูลขององค์กร.” GISTDA.or.th. https://www.gistda.or.th/news_view.php?n_id=1435&lang=TH (accessed Jun. 19, 2022).
- [11] Google Earth Engine. “A Planetary-scale Platform for Earth Science Data & Analysis.” EARTHENGINE.GOOGLE.com. <https://earthengine.google.com> (accessed Mar. 31, 2022).
- [12] K. Conradsen, A. A. Nielsen, and H. Skriver, “Determining the Points of Change in Time Series of Polarimetric SAR Data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 5, pp. 3007 – 3024, 2016.
- [13] M. J. Canty, A. A. Nielsen, K. Conradsen, and H. Skriver, “Statistical Analysis of Changes in Sentinel-1 Time Series on the Google Earth Engine,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 1, 2020.
- [14] CSIS. “Russia’s Losing Hand in Ukraine.” CSIS.org. <https://www.csis.org/analysis/russias-losing-hand-ukraine> (accessed Jun. 21, 2022).

การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรฟีน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงจรวดเชื้อเพลิงแข็ง

ศิริระ ศรีนิเวศน์^{1*} อภิสิทธิ์ การะเวก¹ และ พิมพ์ภัส งามสันติวงศ์^{2*}

วันที่รับ 29 กรกฎาคม 2565 วันที่แก้ไข 15 กันยายน 2565 วันที่ตอบรับ 20 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

จรวดเชื้อเพลิงแข็งเป็นอาวุธที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่อาศัยปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งหรือดินขับในการขับเคลื่อน ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ (Burning rate catalyst) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการเร่งการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้ไวยิ่งขึ้น สร้างแรงดันและเพิ่มความเร็วให้กับจรวด โดยในงานวิจัยนี้นักวิจัยสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์และแกรฟีน เพื่อให้ได้อนุภาคเหล็กออกไซด์นาโนที่มีความไวต่อปฏิกิริยาและตรึงอยู่บนวัสดุแกรฟีน โดยใช้สารตั้งต้นของเหล็กออกไซด์ที่มีความแตกต่างกันคือ ไอรอน(II)ซัลเฟต (FeSO_4), ไอรอน(II)ไนเตรท ($\text{Fe(NO}_3)_2$) หรือ ไอรอน(III)คลอไรด์ (FeCl_3) และทดสอบกระบวนการสังเคราะห์สามกระบวนการ คือ กระบวนการทางเคมีตามด้วยการเผาให้แตกตัว (Calcination) เมื่อตัวกลางคือน้ำ (กระบวนการ 1) และสารละลายเอทานอลในน้ำ (กระบวนการ 2) และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process) (กระบวนการ 3) เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งการเผาไหม้ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบประสิทธิภาพด้วยการเร่งการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต (NH_4ClO_4) และทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาลิซิส (Thermogravimetric analysis: TGA) พบว่าตัวอย่างที่ใช้ไอรอน(III)คลอไรด์ และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (กระบวนการ 3) มีแนวโน้มที่ดีที่สุดในกลุ่ม ยืนยันได้จากการตรวจสอบวัสดุคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) พบตัวอย่างมีลักษณะเป็นอนุภาคเหล็กขนาด 30-50 นาโนเมตร กระจายบนแผ่นรองรับแกรฟีน และให้กราฟการสลายตัวแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตเป็นแบบช่วงเดียว ซึ่งแสดงถึงการเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพดี

คำสำคัญ : แกรฟีน, ดินขับ, จรวดเชื้อเพลิงแข็ง, ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้

¹ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมนาโนคอมโพสิต (NanoCEN), ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล

² ส่วนบริหารองค์ความรู้, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: sira.sri@mahidol.ac.th

A synthesis of iron oxide-graphene nanocomposite and its application as a catalyst for solid rocket propellant

Sira Srinives^{1*} Apisit Karawek¹ and Phimraphas Ngamsantivongsa²

Received 29 July 2022, Revised 15 September 2022, Accepted 20 September 2022

Abstract

The solid-propellant rocket or solid rocket is a weapon with a propulsion mechanism that relies on solid fuels. The role of the burning rate catalyst is to facilitate oxidizer decomposition and promote the thrust force for the rocket. This research work focuses on developing an iron oxide/graphene composite. The iron oxide nanoparticles were synthesized and immobilized on a graphene oxide sheet, providing active surfaces for the burning rate reaction. Three types of iron oxide precursors, including iron(II)sulfate (FeSO_4), iron(II)nitrate ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$), and iron(III)chloride (FeCl_3), were used. We utilized three techniques, including chemical reduction using aqueous (Process I) or ethanol in an aqueous solution (Process II) medium, followed by calcination and hydrothermal process (Process III). The composites were tested for their ability to catalyze a decomposition of ammonium perchlorate (NH_4ClO_4), an oxidizer, using thermogravimetric analysis (TGA). In this study, the best results were obtained from iron oxide/graphene composites using FeCl_3 as a precursor and synthesized via hydrothermal process. This was confirmed by a scanning electron microscope (SEM), which revealed 30-50 nm iron oxide nanoparticles decorated on graphene sheets. A great characteristic of the composite catalyst was the one-shoulder decomposition of ammonium perchlorate observed during the TGA experiment.

Keywords : Graphene, Solid propellant, Rocket propellant, Burning rate catalyst

¹ Nanocomposite Engineering Lab (NanoCEN), Dept. of Chemical Engineering, Fac. of Engineering, Mahidol Univ.

² Knowledge Management Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: Sira.sri@mahidol.ac.th

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

จรวดเชื้อเพลิงแข็ง (Solid-fuel rocket หรือ Solid rocket) เป็นอาวุธที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่อาศัยปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ผงดินปืน หรือ ไตรไนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene: TNT) ในการขับเคลื่อน หนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญในจรวดเชื้อเพลิงแข็ง คือ เชื้อเพลิงแข็ง หรือ “ดินขับ” ที่ทำหน้าที่ในการเผาไหม้ ปลดปล่อยพลังงานและก๊าซร้อนออกทางช่องทางด้านปลาย เกิดเป็นแรงผลักดันให้กับจรวด ทั้งนี้ อาจแบ่งชนิดดินขับออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ดินขับเนื้อเดียวและดินขับเนื้อผสม [1] โดยดินขับเนื้อเดียวเป็นแท่งตันคล้ายเทียน ในขณะที่ดินขับเนื้อผสมเป็นผงหยาบอัดกัน ดินขับเนื้อผสมเมื่อติดไฟจะมีค่าการปลดปล่อยพลังงานที่สูงกว่าดินขับเนื้อเดียว และมีองค์ประกอบสำคัญประกอบไปด้วย สารออกซิไดซ์ (Oxidizer) เชื้อเพลิง (Fuel) สารเชื่อม (Binder) สารเร่งแข็ง (Curing agent) และตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ (Burning rate catalyst)

เหล็กออกไซด์ (Ferric Oxide: Fe_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด อันเป็นผลจากความจำเพาะเจาะจงต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ในที่อุณหภูมิสูงและความเสถียรในที่อุณหภูมิห้อง [2] ทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ คือการเพิ่มความตื่นตัวในการเกิดปฏิกิริยาด้วยการทำให้อนุภาคเหล็กออกไซด์เป็นอนุภาคนาโน ทั้งนี้ อนุภาคนาโน (Nanoparticles) เป็นกลุ่มวัสดุที่มีอย่างน้อย 1 มิติ ใน 3 มิติ (กว้าง-ยาว-สูง) ที่มีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ในกรณีของอนุภาคเหล็กออกไซด์นาโน มีการตรวจพบสมบัติทางแม่เหล็กที่เด่นชัดขึ้น มีพื้นที่ผิวสูงและไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น เป็นต้น [3] อย่างไรก็ตาม อนุภาคนาโนมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) ได้ดี อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงดึงดูด

จากประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวนาโนภาค ส่งผลให้พื้นที่ผิวอนุภาคลดน้อยลงและลดความไวในการเกิดปฏิกิริยาแนวทางในการแก้ไขคือการตรึงอนุภาคนาโนบนวัสดุรองรับอื่น เช่น วัสดุคาร์บอนอย่างคาร์บอนนาโนทิวและแกรฟีน

แกรฟีนเป็นวัสดุคาร์บอนแบบสองมิติ คือเป็นแผ่นฟิล์มที่มีความบางระดับอะตอม ประกอบกับสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล และทางเคมีที่โดดเด่น จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลกและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเข้ากับงานที่หลากหลาย [4], [5] กระบวนการที่ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์แกรฟีนมีทั้งกระบวนการเคลือบไอทางเคมี (Chemical vapor deposition: CVD) กระบวนการลอกชั้นทางกล (Mechanical exfoliation) และกระบวนการลอกชั้นทางเคมี (Chemical exfoliation)

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมนาโนคอมโพสิต (NanoCEN) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ได้ทำการสังเคราะห์แกรฟีนจากกระบวนการลอกชั้นทางเคมี พบว่าเป็นกระบวนการที่ง่าย ดำเนินการได้ในห้องปฏิบัติการ และให้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุภาคแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide: GO) ปริมาณในหน่วยกรัม แกรฟีนออกไซด์เป็นโครงสร้างแผ่นแกรไฟต์ที่แยกจากกันและมีตำหนิ (Defect) ในโครงสร้างในรูปของหมู่ฟังก์ชัน เช่น อีพอกซี (C-O-C) ไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอกซิล (COOH) [6] ตำหนิในโครงสร้างเหล่านี้ เป็นแหล่งกักเก็บประจุที่ดึงดูดไอออนบวกจากในสารละลายมารวมตัวกัน เมื่อแกรฟีนออกไซด์เจอเข้ากับไอออนบวกของโลหะ ตำหนิในโครงสร้างจะเป็นตำแหน่งที่ดึงดูดให้ไอออนโลหะมารวมตัวเกิดเป็นอนุภาคโลหะนาโนบนแกรฟีนออกไซด์ เรียกว่าเป็นวัสดุคอมโพสิตโลหะออกไซด์/แกรฟีนออกไซด์ [7], [8]

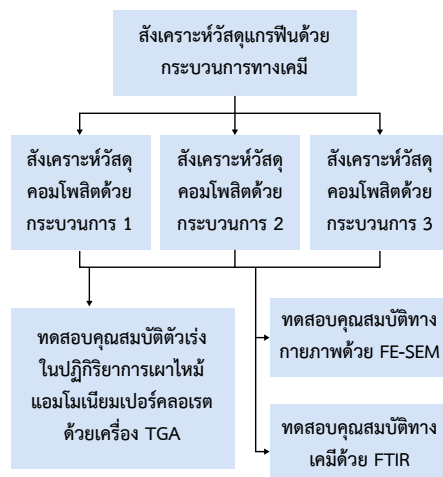
Zhou และคณะ [9] ได้วิจัยการกระจายแกรฟีนออกไซด์ใน เอ็น, เอ็น-โดเมทิลฟอราไมด์

(N,N-dimethylformamide) ผสมเข้ากับเฟอร์ริกอะซีติลอะซีโตนเทท (Ferric acetylacetonate: $\text{Fe}(\text{acac})_3$, $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_3$) และกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนจะนำไปใส่ในเครื่องอบความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ได้เป็นวัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์ Yuan และคณะ [10] เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต หรือ AP (NH_4ClO_4) ของอนุภาคเหล็กออกไซด์นาโน ขนาด 60-80 นาโนเมตร กับอนุภาคเหล็กออกไซด์ระดับไมโครเมตร พบว่า อัตราการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อนุภาคเหล็กออกไซด์นาโนและเมื่อปริมาณอนุภาคเหล็กออกไซด์นาโนเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังระบุสัดส่วนมวลของเหล็กออกไซด์ต่อแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตไว้สูงสุดที่ 3%

ในงานวิจัยนี้นักวิจัยมีความสนใจในการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กออกไซด์นาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ และจะทำการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งยิ่งขึ้น ด้วยการตรึงอนุภาคบนแผ่นแกรฟีน เกิดเป็นวัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์และแกรฟีน และมีการทดสอบสมรรถนะของตัวเร่งที่สังเคราะห์ได้เพื่อการใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ในจรวดเชื้อเพลิงแข็งจากสารตั้งต้น ไอร์รอน(II)ซัลเฟต (FeSO_4), ไอร์รอน(II)ไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$) หรือ ไอร์รอน(III)คลอไรด์ (FeCl_3) และทดสอบกระบวนการสังเคราะห์สามกระบวนการคือ กระบวนการทางเคมีตามด้วยการเผาให้แตกตัว (Calcination) เมื่อตัวกลางคือน้ำ (กระบวนการ 1) และสารละลายเอทานอลในน้ำ (กระบวนการ 2) และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (กระบวนการ 3) เพื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพดีช่วยการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงจรวดเชื้อเพลิงแข็ง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ทั้งหมดในการทดลองนี้เป็นเกรดเคมีวิเคราะห์ (Reagent grade) และสารละลายทั้งหมดถูกเตรียมด้วยน้ำปราศจากไอออน (Milli Q, Deionized water) แผนการวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก ๆ คือ การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์และแกรฟีน และการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาลิซิส (Thermogravimetric analysis, TGA, TG 209 F1 Libra, NETZSCH) รวมไปถึงการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL JSM-6610LV) หรือคุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR, FT/IR-6800, Jasco) วิธีการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ ๑ วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์

ผสมเกล็ดแกรไฟต์ 2 กรัม เข้ากับโซเดียมไนเตรท 1 กรัม และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4 , 98%, RCI Labscan) ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ก่อนจะนำของผสมใส่ลงใน

ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะ 0 องศาเซลเซียส (อ่างน้ำแข็งผสมเกลือ) พร้อมกวนตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที จากนั้นจึงเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4 , 99%, Ajax FineChem) ลงในของผสม ทุก ๆ 10 นาที ภายในเวลา 2.5 ชั่วโมง จนหมด 7.3 กรัม นำขวดรูปชมพู่ออกจากถังน้ำแข็ง และตั้งบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กที่ อุณหภูมิห้อง ณ ความเร็ว 900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ของผสมสีน้ำตาลเหลืองก่อนที่จะเติมน้ำ ปราศจากไอออน ปริมาตร 90 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง ก่อนจะทำการหยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 , 30%, Merck) 7 มิลลิลิตร ในน้ำ 55 มิลลิลิตร เมื่อ กรองของผสมที่ได้ด้วยชุดกรองสุญญากาศผ่าน กระดาษกรองจะได้อนุภาคแกรฟีนออกไซด์ออกมา ตามต้องการ ทำการล้างแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl , 37%, RCI LabScan) ที่ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร สลับกับน้ำ 2-3 รอบ จนน้ำล้างมีค่าพีเอช (pH) ไม่เปลี่ยนแปลง จึงนำเอาแกรฟีนออกไซด์ที่ได้ไปอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำมาเก็บ ในภาชนะกันความชื้น (Desiccator) ระหว่างรอการใช้งานต่อไป

2.2 การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์และแกรฟีน

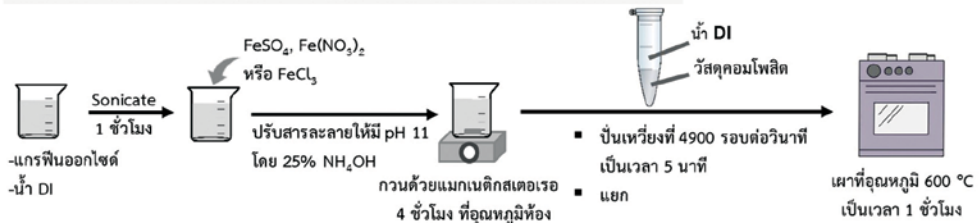
2.2.1 กระบวนการที่ 1 (รูปที่ 2): แวนดอลอยแกรฟีนออกไซด์ในน้ำ DI และทำการแยกอนุภาคด้วยการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนเติมสารละลายไอรอน(II)ซัลเฟต (FeSO_4 , Ajax FineChem), ไอรอน(II)ไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$, Ajax FineChem) หรือ ไอรอน(III)คลอไรด์ (FeCl_3 , CARLO ERBA Reagents) ลงในสารผสม พร้อม

ปรับให้เป็น pH 11 ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH , Quality Reagent Chemical (QREC)) (25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล) ก่อนจะทำการปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการปั่นเหวี่ยงของผสมเพื่อแยกวัสดุคอมโพสิตออกมาที่ความเร็ว 4,900 รอบต่อวินาที ต่อด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กระบวนการที่ 1 เป็นกระบวนการที่ประยุกต์มาจากกระบวนการที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กออกไซด์นาโน และเพิ่มแกรฟีนเข้ามาในสารผสม

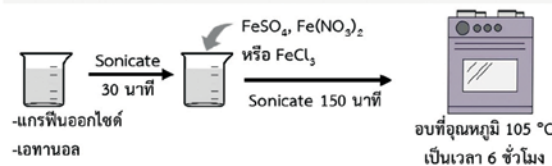
2.2.2 กระบวนการที่ 2 (รูปที่ 2): ทำการกระจายแกรฟีนออกไซด์ในเอทานอลด้วยการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) เป็นเวลา 30 นาที และเติมสารละลายไอรอน(II)ซัลเฟต (FeSO_4), ไอรอน(II)ไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$) หรือ ไอรอน(III)คลอไรด์ (FeCl_3) ลงในสารผสม ในระหว่างที่ทำการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงจนครบเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำของผสมไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กระบวนการที่ 2 ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายฐาน และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ต่ำกว่ากระบวนการที่ 1 นักวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่าจะเป็นกระบวนการที่รักษาภาพวัสดุแกรฟีนและลดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุแกรฟีนได้ดีกว่ากระบวนการที่ 1

2.2.3 กระบวนการที่ 3 (รูปที่ 2): เตรียมสารแขวนลอยแกรฟีนออกไซด์ในน้ำ ก่อนผสมเข้ากับไอรอน(III)คลอไรด์ (FeCl_3) และยูเรีย ปั่นกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 90 นาที หลังจากนั้นเติมไฮดราซีน (Hydrazine, Applichem GmbH) และถ่ายของผสมไปยังเครื่องปฏิกรณ์เทฟลอนไลน์ (Teflon-lined Reactor) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ก่อนจะ

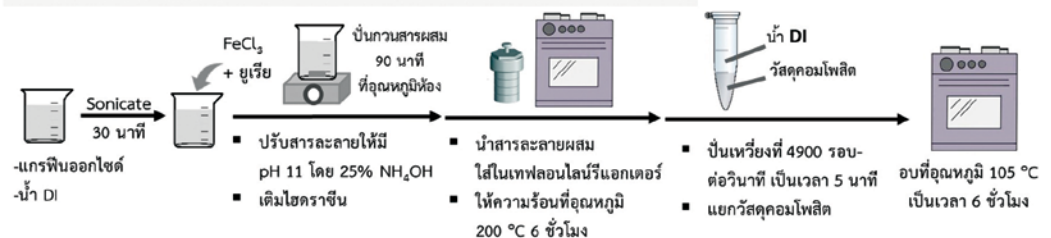
วิธีการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรฟีน กระบวนการที่ 1



วิธีการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรฟีน กระบวนการที่ 2



วิธีการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรฟีน กระบวนการที่ 3



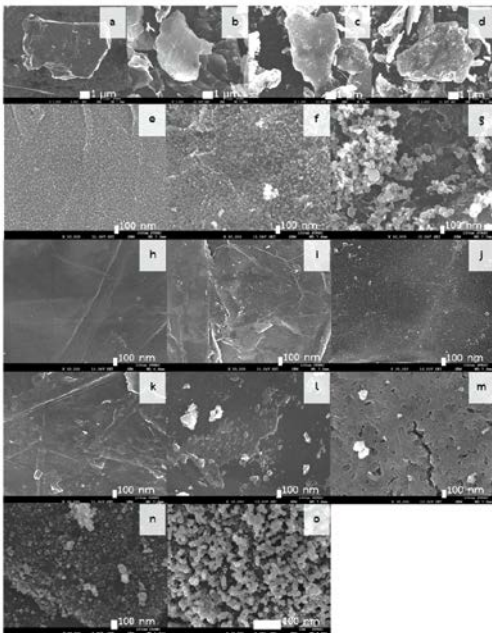
รูปที่ ๒ วิธีการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรฟีน

ทำการแยกผงคอมโพสิตออกจากของผสมด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ 4,900 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 5 นาที และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส กระบวนการที่ 3 เป็นกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่มีความได้เปรียบในการรักษาคุณภาพของแกรฟีนและสังเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ต้องการจากเหล็กออกไซด์นาโน จึงตั้งสมมุติฐานว่าจะให้วัสดุคอมโพสิตเหล็กออกไซด์/แกรฟีนที่มีประสิทธิภาพดี

2.2.4 การทดสอบสมรรถนะของวัสดุคอมโพสิตในฐานะตัวเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้: สมรรถนะของวัสดุคอมโพสิตทดสอบได้โดยการผสมวัสดุคอมโพสิตเข้ากับแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตที่ปริมาณ 3% ถึง 6%

โดยมวล และนำอนุภาคผสมไปทดสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส โดยทำการให้ความร้อนกับอนุภาคในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส และศึกษาน้ำหนักมวลที่เปลี่ยนแปลงไปของอนุภาค

2.2.5 การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาค: ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุ ขนาดอนุภาคเหล็กออกไซด์ รวมไปถึงการกระจายของอนุภาคนาโนบนแกรฟีน วิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) เพื่อตรวจสอบหาพันธะเคมีและหมู่ฟังก์ชันของวัสดุ



รูปที่ 3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวตัวอย่างด้วย SEM กำลังขยาย 1,000 เท่าของ (a) แกร์ฟีนออกไซด์, กระบวนการ 1 (b) $1\text{FeSO}_4:3\text{GO}$, (c) $1\text{FeSO}_4:1\text{GO}$ และ (d) $3\text{FeSO}_4:1\text{GO}$: กำลังขยาย 30,000 เท่า กระบวนการ 1 (e) $1\text{FeSO}_4:3\text{GO}$, (f) $1\text{FeSO}_4:1\text{GO}$ และ (g) $3\text{FeSO}_4:1\text{GO}$: กระบวนการ 1 (h) $1\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$, (i) $3\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$ และ (j) $5\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$: กระบวนการ 2 (k) $1\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$, (l) $3\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$ และ (m) $5\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$: กำลังขยาย 50,000 เท่า กระบวนการ 3 (n) $1\text{FeCl}_3:1\text{GO}$ และ กำลังขยาย 20,000 เท่า (o) $1\text{FeCl}_3:1\text{GO}$

3. ผลงานวิจัย

3.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ในการศึกษาลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่างของอนุภาค และลักษณะการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาคของแกร์ฟีนออกไซด์และเหล็กออกไซด์แกร์ฟีนที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของแกร์ฟีนออกไซด์และเหล็กออกไซด์แกร์ฟีนที่อัตราส่วนของเหล็กต่อแกร์ฟีนออกไซด์ $1\text{FeSO}_4:3\text{GO}$, $\text{FeSO}_4:1\text{GO}$, และ $3\text{FeSO}_4:1\text{GO}$ ¹ ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวของแกร์ฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดประมาณ 100×100 ตารางไมโครเมตร (รูปที่ 3(a)) และในวัสดุคอมโพสิตที่สังเคราะห์จาก FeSO_4 (รูปที่ 3(b, c, d)) พบการจับตัวของอนุภาคเหล็กเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนปริมาณเหล็กต่อแกร์ฟีนออกไซด์ โดยเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ที่สัดส่วนปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นจาก $1\text{FeSO}_4:3\text{GO}$ (รูปที่ 3(e)), $1\text{FeSO}_4:1\text{GO}$ (รูปที่ 3(f)) และ $3\text{FeSO}_4:1\text{GO}$ (รูปที่ 3(g)) พบว่าอนุภาคเหล็กที่เกาะบนแผ่นแกร์ฟีนมีปริมาณที่มากขึ้นและมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจาก เล็กจนไม่ทราบขนาด เป็น 50 และ 120 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ การที่อนุภาคใหญ่และหนาแน่นเกินไปนั้น อาจทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงตามไปด้วย

เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดพรีเคอร์เซอร์ที่ใช้สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตด้วยกระบวนการ 1 จาก FeSO_4 เป็น $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ พบว่าได้ปริมาณอนุภาคลดน้อยลงอย่างมาก โดยแม้จะมีการเพิ่มปริมาณพรีเคอร์เซอร์จาก $1\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$ (รูปที่ 3(h)), $3\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$ (รูปที่ 3(i)) และ $5\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:1\text{GO}$ (รูปที่ 3(j)) แล้วก็ตาม ปริมาณและขนาดของอนุภาคเหล็กออกไซด์นาโนที่ได้ ก็ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ และไม่สามารถระบุขนาดได้อย่างชัดเจนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน

เมื่อเปลี่ยนวิธีการสังเคราะห์ จากกระบวนการที่ 1 เป็นกระบวนการที่ 2 และใช้ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ เป็นพรีเคอร์เซอร์สามารถตรวจพบอนุภาคเหล็กเกาะอยู่บนแกร์ฟีนได้มากขึ้น (รูปที่ 3(k, l, m)) แต่เหล็กที่ได้นั้น

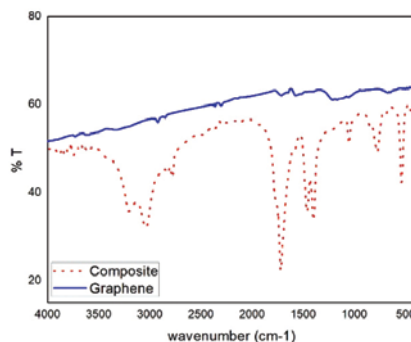
¹ พิจารณาสัดส่วนเหล็กต่อแกร์ฟีนออกไซด์จากปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ กล่าวคือ ใช้สัดส่วนโดยน้ำหนัก ไอรอนซัลเฟตต่อแกร์ฟีนออกไซด์ เป็น 1:3, 1:1, และ 3:1 ตามลำดับ

จะมีลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มเคลือบอยู่บนแกรฟีน แผ่นหนาจนเกิดเป็นรอยแตกปรากฏขึ้นบนผิว ทำให้พื้นที่ผิวลดลง และความสามารถในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงได้

เมื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กออกไซด์/แกรฟีนคอมโพสิตด้วยไอรอน(III)คลอไรด์ (FeCl_3) ฟรีเคอร์เซอร์ ด้วยกระบวนการ 3 (รูปที่ 3(n, o)) พบอนุภาคเหล็กออกไซด์กระจายตัวบนแผ่นแกรฟีน โดยมีขนาดอนุภาคในช่วง 30-50 นาโนเมตร โดยอนุภาคเหล็กบางส่วนเกิดเป็นลักษณะกิ่งยื่นออกมาจากแผ่นแกรฟีนด้วย โดยลักษณะทางกายภาพที่พบสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าอนุภาคเหล็กออกไซด์/แกรฟีน คอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการที่ 3 จะมีสมรรถนะที่โดดเด่นในฐานะตัวเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้

3.2 วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

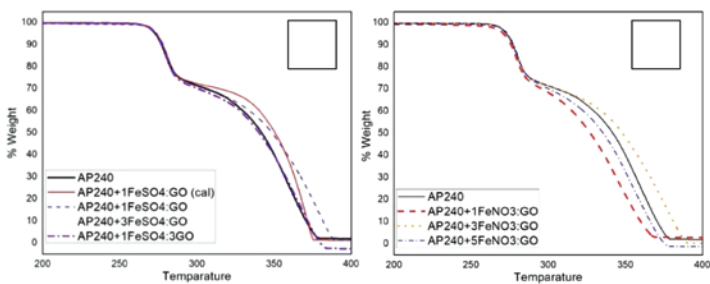
การวิเคราะห์พันธะเคมีและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบพันธะเคมีและหมู่ฟังก์ชันของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์กับแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ แม้จะไม่ได้แสดงถึงสมรรถนะในฐานะตัวเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยตรง แต่ก็เป็นหนึ่งในผลการศึกษาที่สื่อถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างแกรฟีนกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ ทั้งนี้ ตัวอย่างอนุภาคคอมโพสิตที่สังเคราะห์จากกระบวนการ 3 และแกรฟีนออกไซด์ (รูปที่ 4) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกันคือ หมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ($3626\text{-}3333\text{ cm}^{-1}$), หมู่เมทิล (C-H) ($2922\text{-}2852\text{ cm}^{-1}$), หมู่แอลคีน (Alkene) ($2384\text{-}2305\text{ cm}^{-1}$), หมู่คาร์บอนิล (C=O) (1715 cm^{-1}) และหมู่แอลคีน (C=C) (1576 cm^{-1}) ซึ่งเป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของอะโรมาติกและ C-O ($1214\text{-}1060\text{ cm}^{-1}$) ทั้งนี้ ความแตกต่างสำคัญระหว่างวัสดุคอมโพสิตกับแกรฟีนออกไซด์คือพีกในช่วงเลขคลื่น $600\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ ที่ตีความได้ว่าในวัสดุคอมโพสิตมีพันธะระหว่างเหล็กกับคาร์บอน (Fe-C) หรือเหล็กกับออกซิเจน (Fe-O) ประกอบอยู่ด้วย



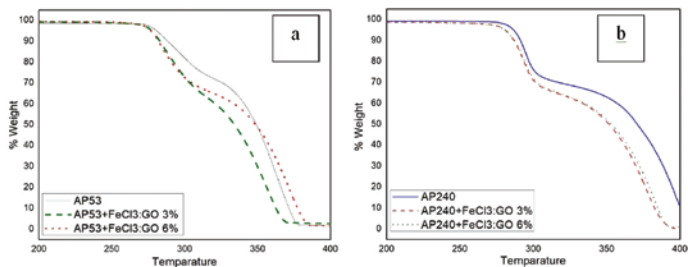
รูปที่ ๔ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จากตัวอย่างแกรฟีนออกไซด์ (GO) และวัสดุคอมโพสิต ($\text{FeCl}_3\text{:GO}$) ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ 3

3.3 วิเคราะห์สมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาลิซิส (TGA)

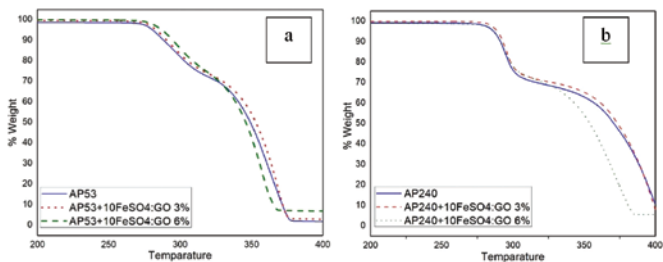
ประสิทธิภาพในเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาของวัสดุคอมโพสิตถูกตรวจสอบได้จากการศึกษาการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย โดยเตรียมตัวอย่างผสมระหว่างแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตและตัวเร่งปฏิกิริยา และตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสารผสมเทียบกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป โดยนำวัสดุคอมโพสิต 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมรวมกับแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต 97 เปอร์เซ็นต์ การทดลองชุดแรก (รูปที่ 5) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวัสดุคอมโพสิตที่สังเคราะห์จาก กระบวนการที่ 1 โดย AP240 สื่อถึงอนุภาคแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 240 ไมโครเมตร และ FeSO_4 และ $\text{Fe(NO}_3)_2$ สื่อถึงไอรอน(II)ซัลเฟต และไอรอน(II)ไนเตรท ที่ใช้เป็นสารฟรีเคอร์เซอร์ในการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กตามลำดับ การสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตและเพิ่มอุณหภูมิขึ้น (รูปที่ 5(a)) พบพีกของการสลายตัวสองช่วงคือที่ 240 และ 350 องศาเซลเซียส เมื่อทดลองใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา $1\text{FeSO}_4\text{:GO}$, $3\text{FeSO}_4\text{:GO}$ และ $\text{FeSO}_4\text{:3GO}$ เข้าผสมกับแอมโมเนียมไนเตรตและทำการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการสลายตัวไม่ดีขึ้น โดยนักวิจัยคาดว่าอาจเกิดจากการที่



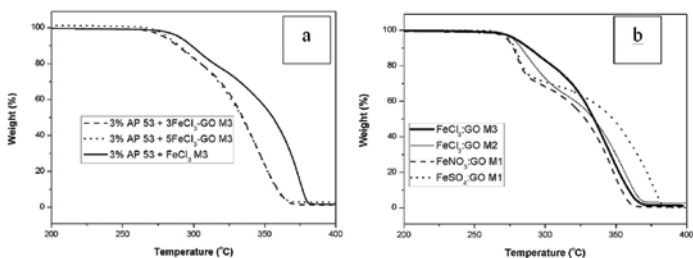
รูปที่ ๕ เทอร์โมแกรม TGA การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิ เมื่อใช้ตัวเร่งเหล็กออกไซด์แกรฟีนคอมโพสิต ($\text{FeSO}_4:\text{GO}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2:\text{GO}$) ที่สังเคราะห์จาก กระบวนการ 1



รูปที่ ๖ เทอร์โมแกรม TGA การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิ ตัวอย่าง $\text{FeCl}_3:\text{GO}$ ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ 2 สำหรับอนุภาคแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต ขนาดเฉลี่ยที่ 53 ไมโครเมตร (AP53) (a) และ 240 ไมโครเมตร (AP240) (b)



รูปที่ ๗ เทอร์โมแกรม TGA การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิตัวอย่าง $\text{FeSO}_4:\text{GO}$ ที่สังเคราะห์ได้จาก กระบวนการ 2 สำหรับอนุภาคแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต ขนาดเฉลี่ยที่ 53 ไมโครเมตร (AP53) (a) และ 240 ไมโครเมตร (AP240) (b)



รูปที่ ๘ เทอร์โมแกรม TGA การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิ ตัวอย่าง $\text{FeCl}_3:\text{GO}$ ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ 2 สำหรับอนุภาคแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต ขนาดเฉลี่ยที่ 53 ไมโครเมตร (AP53) (a) และ 240 ไมโครเมตร (AP240) (b)

สารตั้งต้นหลักต่างชนิดกันแตกต่างกันอาจทำให้เฟสของอนุภาคของไอรอนออกไซด์แตกต่างกันและส่งผลต่อความสามารถการย่อยสลายของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต จากรูปที่ 5(b) นักวิจัยได้ทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัสดุคอมโพสิตระหว่างไอรอนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ 1 จากไอรอน(II)ไนเตรต พบว่าจากตัวอย่าง $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 : \text{GO}$, $3\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 : \text{GO}$ และ $5\text{FeNO}_3 : \text{GO}$ ที่ใช้อัตราส่วนระหว่างไอรอน(II)ไนเตรตกับแกรฟีนที่ 1:1 ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 : \text{GO}$) ช่วยในการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตได้ดีที่สุด

นักวิจัยทำการศึกษาลักษณะจากขนาดอนุภาคแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตขนาด 53 (AP53) และ 240 ไมโครเมตร (AP240) โดยใช้วัสดุคอมโพสิตระหว่างไอรอนออกไซด์จากกระบวนการ 2 โดยใช้ไอรอน(III)คลอไรด์ (FeCl_3) เป็นพรีเคอร์เซอร์ (รูปที่ 6(a)) พบว่า AP53 มีแนวโน้มที่จะสลายตัวเพียงครั้งเดียว (One shoulder) อีกทั้งยังสลายตัวหมดก่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าในกรณี AP240 (รูปที่ 6(b)) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ จาก 3% เป็น 6% ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งกลับไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ การทดสอบการย่อยสลายของ AP53 และ AP240 โดยใช้ $10\text{FeSO}_4 : \text{GO}$ ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ 2 (รูปที่ 7) พบว่าแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตทั้งสองขนาดมีการสลายตัวที่เร็วขึ้นในช่วงอุณหภูมิราว 320 องศาเซลเซียสขึ้นไป และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งคอมโพสิตจาก 3% เป็น 6% โดยน้ำหนักเทียบกับแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของตัวเร่ง $10\text{FeSO}_4 : \text{GO}$ ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ 2 ยังน้อยกว่า $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ ที่สังเคราะห์จากกระบวนการเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด จึงสรุปได้ว่า $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ 2 เป็นตัวเร่งที่ดีกว่า

ทั้งนี้ ผู้วิจัยต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งคอมโพสิต โดยมีเป้าหมายคือการให้แอมโมเนียมเปอร์คลอเรตสลายตัวเพียงช่วงเดียว

(One Shoulder) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาวิธีการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างไอรอนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการ 3 ต่อไปโดยจากผลการทดลองที่นำเสนอไปแล้ว นักวิจัยได้จับประเด็นปัญหาและหาวิธีแก้ไขดังนี้

1. ตัวอย่างวัสดุชิ้นก่อนที่จะถูกนำไปตรวจด้วยเครื่อง TGA มีการควบคุมความชื้น โดยการใส่เม็ดดูดความชื้นลงในตัวอย่าง และบรรจุลงในขวดโหลปิดก่อนทำการส่งตรวจ

2. กระบวนการที่ 1 และ 2 ที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต ใช้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ ส่งผลให้แกรฟีนออกไซด์เกิดการสลายตัวโดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในภาวะที่เหล็กออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ลดความสามารถของวัสดุคอมโพสิตในฐานะตัวเร่งปฏิกิริยา นักวิจัยได้ทดลองแก้ไขโดยทำการสังเคราะห์ $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลใน Teflon line autoclave (กระบวนการที่ 3) เพื่อรักษาสภาพแกรฟีนออกไซด์ (รูปที่ 8(a)) ผลที่ได้คือตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ แสดงประสิทธิภาพในการสลายแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตแบบขั้นตอนเดียว โดยจากการทดลอง $3\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ และ $5\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ 3 แสดงความสามารถในการเร่งการสลายตัวของ AP53 ได้ดีทัดเทียมกัน และสูงกว่าอนุภาคไอรอนออกไซด์ (FeCl_3 กระบวนการ 3) อย่างมีนัยยะสำคัญ อันเป็นผลเนื่องมาจากการที่แกรฟีนทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับอนุภาคเหล็กนาโน และป้องกันการรวมตัวของอนุภาคเล็กนาโนได้อย่างดีเยี่ยม [7], [8] ส่งผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงขึ้น นอกจากนี้ แกรฟีนออกไซด์มีความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดีทำให้สามารถช่วยเรื่องการถ่ายเทอิเล็กตรอนของเหล็กไอออนในปฏิกิริยาการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต [9], [10]

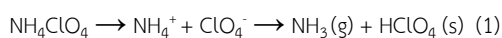
ตัวอย่างที่ทดสอบจากการทดลองก่อนคือ $\text{FeSO}_4 : \text{GO}$ กระบวนการ 1 และ $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$

กระบวนการ 2, $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ กระบวนการ 3 และ $\text{FeNO}_3 : \text{GO}$ กระบวนการ 1 มาทดสอบเร่งการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต (รูปที่ 8(b)) ทั้งนี้ M1, M2 และ M3 สืบถึงกระบวนการ 1, 2 และ 3 ตามลำดับพบว่า วัสดุระหว่างไอรอนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์จากกระบวนการ 1 จากไอรอน(II)ไนเตรดสามารถช่วยเร่งการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตในช่วงอุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าวัสดุระหว่างไอรอนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์จากกระบวนการ 3 โดยตัวเร่งการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถช่วยเร่งการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันทั้ง 3 วิธี อย่างไรก็ตาม วัสดุระหว่างไอรอนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์จากกระบวนการ 3 สามารถสลายตัวแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตได้ภายในช่วงเดียวอย่างชัดเจน ทั้งนี้หากต้องการลดอุณหภูมิการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต การใช้วัสดุระหว่างไอรอนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์จากกระบวนการ 1 และ 2 เป็นตัวเร่งการสลายที่เหมาะสมและขณะที่หากต้องการสลายตัวแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตได้ภายในช่วงเดียว การใช้แอมโมเนียมเปอร์คลอเรตได้ภายในช่วงเดียวของกระบวนการที่ 3 เป็นตัวเร่งการสลายที่เหมาะสม

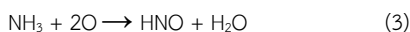
3.4 วิพากษ์กลไกการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต

กลไกการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน [10]

1. การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตจาก orthorhombic เป็น cubic ที่ช่วงอุณหภูมิ 240-250 องศาเซลเซียส
2. การสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตในช่วงอุณหภูมิ 300-330 องศาเซลเซียส เกิดเป็นแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และเปอร์คลอเรตไอออน (ClO_4^-) ก่อนจะเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และเปอร์คลอเรต (HClO_4) ตามสมการที่ 1



3. แอมโมเนียมเปอร์คลอเรตสลายตัวในช่วงอุณหภูมิสูง ตามสมการที่ 2-5



ทั้งนี้ ระหว่างการสลายตัวในช่วง 300-330 องศาเซลเซียส ClO_4^- และ NH_4^+ และในระหว่างการสลายปฏิกิริยาจากออกซิเจนเป็นซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) เป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เหล็กออกไซด์จะสามารถทำหน้าที่ของ Fe^{3+} ในการถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาข้างต้นและช่วยเร่งอัตราการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต อย่างไรก็ตาม อนุภาคเหล็กออกไซด์นาโนมีพื้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาก่อนข้างน้อยเนื่องจากเกิดการสะสมตัว แกรฟีนจึงทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาและช่วยลดด้านการถ่ายเทอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาด้วย

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์และแกรฟีน สามชนิดคือ $\text{FeSO}_4 : \text{GO}$, $\text{Fe(NO}_3)_2 : \text{GO}$ และ $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ วัสดุคอมโพสิตทั้งสามชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นจากสามกระบวนการคือ กระบวนการทางเคมีตามด้วยการเผาให้แตกตัว (Calcination) เมื่อตัวกลางคือน้ำ (กระบวนการ 1) สารละลายเอทานอลในน้ำ (กระบวนการ 2) และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลใน Teflon line autoclave (กระบวนการ 3) ทั้งนี้ วัสดุคอมโพสิต $\text{FeCl}_3 : \text{GO}$ จากกระบวนการ 3 เป็นวัสดุคอมโพสิตที่ทำหน้าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดีที่สุด อันเป็นผลเนื่องมาจากแกรฟีนเองสามารถเกิดการสลายตัวได้เมื่อมีเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่ง กระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำในการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตอย่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ในสถานะสังเคราะห์ความดันสูง (Autoclave) ทำให้ได้ตัวเร่งคอมโพสิตที่มีคุณภาพดีกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ยืนยันได้จากการตรวจสอบวัสดุ

คอมพิวเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบตัวอย่างมีลักษณะเป็นอนุภาคเหลี่ยมขนาด 30-50 นาโนเมตร กระจายบนแผ่นรองรับแกรฟีน และแสดงประสิทธิภาพในการสลายแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งแสดงถึงการเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยการสังเคราะห์วัสดุคอมพิวเตอร์ระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรฟีน: ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงจรวดเชื้อเพลิงแข็ง งบประมาณและแอมโมเนียมเปอร์คลอเรตได้รับการสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ทั้งนี้ นักวิจัยขอขอบคุณ นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์ ตำแหน่งผู้อำนวยการฝ่ายองค์ความรู้และการเผยแพร่ นายสุวิชา จันทน์กะพ้อ ตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนงานวิจัยพลังงานทดแทนและรักษาการผู้อำนวยการส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน ว่าที่ร้อยตรีหญิง ดร.ลายอง แสนทวี ตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนบัณฑิตศึกษา นางสาวสันธิตา รัตนพันธุ์ ตำแหน่งนักวิจัย นางสาวสุนันทา ไทวระ ตำแหน่งเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา และนายพลวัฒน์ ธนะจันทร์ ตำแหน่งเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา ในความร่วมมือและช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองบรรณาธิการวิทยาศาสตร์. “ย้อนเส้นทาง “จรวดดินขับ” ฟองโลกพิลึกส์.” MGRONLINE.com. <http://mgronline.com/science/detail/9580000054177> (วันที่เข้าถึง พ.ศ. 28, 2558).
- [2] T. P. Rudy *et al.*, “Iron Oxide Catalyst Propellant, and Method for Making Same,” U.S. Patent 4881994A, Nov. 21, 1989.
- [3] L. Xu *et al.*, “Green and Simple Method for Preparing Iron Oxide Nanoparticles Supported on Mesoporous Biochar as a Fenton Catalyst,” *Appl. Organomet. Chem.*, vol. 34, no. 9, pp. 1 - 8, Sep. 2020, doi: 10.1002/aoc.5786.

- [4] I. V. Pushkareva *et al.*, “Reduced Graphene Oxide-Supported Pt-Based Catalysts for PEM Fuel Cells with Enhanced Activity and Stability,” *Catalysts*, vol. 11, no. 2, p. 256, Feb. 2021, doi: 10.3390/catal11020256.
- [5] H. Wang, Z. Zhao, P. Liu, and X. Guo, “Laser-Induced Graphene Based Flexible Electronic Devices,” *Biosensors*, vol. 12, no. 2, p. 55, Jan. 2022, doi: 10.3390/bios12020055.
- [6] J. Zhang, H. Yang, G. Shen, P. Cheng, J. Zhang, and S. Guo, “Reduction of Graphene Oxide via L-ascorbic Acid,” *Chem. Commun.*, vol. 46, no. 7, pp. 1112 - 1114, Dec. 2009, doi: 10.1039/B917705A.
- [7] N. Lertthanaphol *et al.*, “One-Step Hydrothermal Synthesis of Precious Metal-Doped Titanium Dioxide-Graphene Oxide Composites for Photocatalytic Conversion of CO₂ to Ethanol,” *ACS Omega*, vol. 6, pp. 35769 - 35779, Dec. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c05799.
- [8] N. K. Chowdhury and B. Bhowmik, “Role of Graphene-metal Oxide Composite for Performance Improvement of Chemical Sensor: Study for Various Analytes,” in *AIP Conf. Proc.*, vol. 2341, 2021, p. 040011, doi: 10.1063/5.0049957.
- [9] D. Zhou, T. L. Zhang, and B. H. Han, “One-step Solvothermal Synthesis of an Iron Oxide-graphene Magnetic Hybrid Material with High Porosity,” *Micropor. Mesopor. Mat.*, vol. 165, pp. 234 - 239, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.micromeso.2012.08.011.
- [10] Y. Yuan *et al.*, “Hydrothermal Preparation of Fe₂O₃/Graphene Nanocomposite and Its Enhanced Catalytic Activity on the Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 303, pp. 354 - 359, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.03.005.

การศึกษาแบบจำลองแลนเซสเตอร์สำหรับ สมรรถนะทางอากาศที่ความน่าจะเป็นของการโจมตีสำเร็จขึ้นกับระยะทาง

เทียนสิริ เหลืองวิไล^{1*} สมบูรณ์ พัฒนสกุลลอย¹ ประกรณ์ ประทุมมา²

วันที่รับ 17 สิงหาคม 2565 วันที่แก้ไข 17 กันยายน 2565 วันที่ตอบรับ 30 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

ในสมรรถนะใหม่นั้น การจะวิเคราะห์และพยากรณ์ผลลัพธ์ของสมรรถนะด้วยความรู้และประสบการณ์ของผู้บัญชาการในการรบเพียงอย่างเดียวเป็นเรื่องที่ซับซ้อนเกินไป ดังนั้นการมีเครื่องมือหรือแบบจำลองเพื่อช่วยในการวิเคราะห์และพยากรณ์จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ จุดประสงค์ของวิจัยชิ้นนี้ คือศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมรรถนะการรบทางอากาศ โดยเริ่มต้นจากแบบจำลองแลนเซสเตอร์ แล้วจึงดำเนินการประยุกต์เพิ่มเติมแปรเพื่อให้สามารถเก็บพฤติกรรมทั้งหมดของสมรรถนะได้ โดยสมการหลักเป็นสมการการเปลี่ยนแปลงของการเปรียบเทียบกำลังรบของสองกองกำลัง โดยมีปัจจัยสำคัญของสมรรถนะการรบทางอากาศ เช่น การโจมตีทางอากาศ ระบบป้องกันตัวเอง ระบบเรดาร์ การรับรู้สถานการณ์ข้าศึก ระบบป้องกันภัยทางอากาศ และการเสื่อมสภาพของอากาศยานในการพร้อมรบ จะถูกนำมาพิจารณาไว้ในแบบจำลองนี้ด้วย นอกจากนี้พฤติกรรมและผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราความน่าจะเป็นของการยิงถูกเป้าหมายของอาวุธอากาศยานที่ขึ้นกับระยะทางจะถูกนำมาวิเคราะห์และศึกษาด้วย จากนั้นตัวอย่างกรณีศึกษาจะถูกนำมาวิเคราะห์และอธิบายโดยผลของงานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยเพิ่มความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมรรถนะทางอากาศให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนและการวางแผนการรบทางอากาศ

คำสำคัญ : แบบจำลองแลนเซสเตอร์, อาวุธที่ขึ้นกับระยะ, ความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้า, สงครามสมัยใหม่, สมรรถนะทางอากาศ

¹ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

² สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: thiansiri.l@gmail.com

The Study of the Lanchester model of air combat with the effect of range-dependent weapons' kill probability

Thiansiri Luangwilai^{1*} Somboon Pattanasagulloy¹ Prakorn pratoonma²

Received 17 August 2022, Revised 17 September 2022, Accepted 30 September 2022

Abstract

In modern warfare, it becomes more sophisticated for a commander to predict their battles and mission solely by their own knowledge and experience. Therefore, a tool or prediction model becomes inevitable for every force. This investigation aims to study and develop a mathematical model of aerial warfare behaviour. The study begins with the Lanchester model, and then the model is modified and extended to capture the generic behaviour of modern aerial warfare. The governing equations are the changes in the relative strengths of two forces. An air-to-air attack, sensor and situation awareness system, aircraft defence system, aircraft survivability, and aircraft deterioration are all included in the model. The effects of range-dependent weapons and their kill probabilities are also being investigated and studied. Then the case study is analysed and discussed. As a result, this study will provide an insightful understanding of modern aerial warfare, which will benefit the Royal Thai Air Force. Consequently, the model can be used for future air warfare studies and air mission planning.

Keywords : Lanchester, Range-dependent weapons, Kill probability, Modern warfare, Aerial warfare

¹ Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

² Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: thiansiri.l@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันแบบจำลองและการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของสมรภูมินั้นถือว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้การตัดสินใจในการรบเป็นไปอย่างถูกต้องและสามารถประเมินผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยการวิเคราะห์และตัดสินใจการรบส่วนใหญ่ในอดีตนั้น ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้บังคับบัญชา ซึ่งจะถูกต้องตรงจากประสบการณ์และการฝึกของผู้บังคับบัญชาเหล่านั้น โดยการรบในอดีตมีมิติของสมรภูมิที่ยังไม่ซับซ้อนมากนัก แต่สมรภูมิในยุคปัจจุบันมีการพัฒนาไปจากเดิมมาก มีปัจจัยมากขึ้น มีองค์ประกอบการรบมากขึ้น ทำให้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทำให้การตัดสินใจจากประสบการณ์อย่างเดียวนั้นเป็นไปได้อย่างยากมาก จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีแบบจำลองเพื่อช่วยในการวิเคราะห์สถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อให้การตัดสินใจเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ แบบจำลองของสมรภูมิการรบนั้นยังถือว่าจำเป็นต่อการฝึกและการเรียนของเหล่าเสนาธิการทหารเพื่อใช้ในการประกอบการวางแผนและการตัดสินใจการรบในสมรภูมิสมัยใหม่อีกด้วย

โดย D.A. Novikov [1] ได้อธิบายรูปแบบการจำลองยุทธทางทหารในรูปแบบต่าง ๆ และได้มีการอธิบายคุณลักษณะไว้อย่างละเอียดในงานของ A.M. Novikov [2] โดยรูปแบบหนึ่งของการจำลองสถานการณ์ของสมรภูมิการรบนั้น คือการวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนกำลังรบของแต่ละฝ่ายที่เปลี่ยนแปลงไปแต่ละช่วงเวลา โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบรูปแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย F.W. Lanchester [3] เพื่อใช้ในการพยากรณ์การรบของในช่วงสงครามโลกครั้งที่หนึ่ง

หลังจากนั้นแบบจำลองและสมการของ Lanchester ได้มีการประยุกต์และนำไปใช้กับสถานการณ์ต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น การสงครามกองโจร [4] การรบในสมรภูมิต่อหน้า [5], [6]

การจำลองพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตในชีววิทยา [7] การจำลองการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต [8] การจำลองสถานการณ์ในวิดีโอเกม [9] การจำลองสถานการณ์ในการดำเนินโฆษณา [10] และสงครามนอกแบบ [11]

นอกจากนี้ แบบจำลองยังได้รับการตรวจสอบความถูกต้องจากการเปรียบเทียบกับข้อมูลของสถานการณ์สมรภูมิในอดีตอีกด้วย [12] - [15]

โดย S. Pattanasagulloy และ T. Luangwilai [16] ได้ดำเนินการพัฒนาต่อยอดแบบจำลอง Lanchester [3] เพื่อรองรับปัจจัยสำคัญของสมรภูมิทางอากาศ เช่น ความสามารถในการโจมตีของอากาศยาน ความสามารถในการทำลายของจรวดโจมตี ความสามารถในการรับรู้ข้อมูลเป้าหมาย อัตราส่วนการสูญเสียหลังใช้ความสามารถในการป้องกันจากจรวดโจมตีของข้าศึกและการเสื่อมสภาพของอากาศยาน

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะดำเนินการพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติมออกไปอีกด้วยการเพิ่มตัวแปรที่คำนึงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการโจมตีของอาวุธที่ขึ้นอยู่กับระยะทาง ซึ่งถือว่าเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญมากในการรบทางอากาศที่มีการใช้จรวดหลากหลายระยะโจมตี

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

S. Pattanasagulloy และ T. Luangwilai [16] ได้พัฒนาต่อแบบจำลองของ Lanchester ให้สามารถรองรับปัจจัยที่สำคัญของสมรภูมิการรบทางอากาศในสงครามยุคใหม่ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้ คือ อากาศยาน ระบบป้องกันตัวเอง ระบบเรดาร์ การรับรู้สถานการณ์ข้าศึก ระบบป้องกันภัยทางอากาศ และการเสื่อมสภาพของอากาศยานในการพร้อมรบ โดยปัจจัยเหล่านี้จะอธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังรบของฝ่ายน้ำเงิน $B(t)$ และ $R(t)$ ฝ่ายแดง ในสมการที่ (1) และ (2)

$$\frac{dB(t)}{dt} = -J_R W_R S_R A_B R(t) - K_B B(t) \quad (1)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = -J_B W_B S_B A_R B(t) - K_R R(t) \quad (2)$$

โดยรายละเอียดตัวแปรและกระบวนการพัฒนาได้ถูกอธิบายไว้ใน [16] ซึ่งนิยามและคำอธิบายได้แสดงไว้ในหัวข้อภาคผนวก โดยในสมการเชิงอนุพันธ์สมการที่ (1) และ (2) แสดงอัตราการลดลงของกำลังรบของแต่ละฝ่าย

2.1 ปัจจัยของสมรรถนะทางอากาศ

1) J_B และ J_R คือ ความสามารถในการโจมตีของอากาศยาน ปัจจัยด้านนี้พัฒนาต่อยอดมาจากพฤติกรรมการลดลงของกำลังรบตามพื้นฐานของแบบจำลอง Lanchester โดยขีดความสามารถทั้งสองตัวนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานโดยตรง แสดงถึงความสามารถจะเป็นในความสำเร็จของอากาศยาน ในการโจมตีอากาศยานฝ่ายตรงข้าม เช่น ความเร็วในการบินและความสามารถในการปล่อยจรวดไปยังเป้าหมายของอากาศยานฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดง และความสามารถจะเป็นในการป้องกันตนเองหรือหลบหลีกจรวดของกองทัพฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดง เช่น การใช้เป้าลวงแบบวัตถุ (Chaff) เป้าลวงแบบความร้อน (Flare)

2) W_B และ W_R คือ ความสามารถของอาวุธในการทำลายศัตรู โดยแบบจำลองของพฤติกรรมการถูกพัฒนาขึ้นโดย K. Iida [17]

3) S_B และ S_R ความสามารถในการรับรู้ข้อมูลเป้าหมาย โดยการสมรรถนะทางอากาศในยุคใหม่นั้นจะเป็นระบบโครงข่ายเป็นศูนย์กลาง (Network Centric Operation) ทำให้ผลกระทบตัวแปรแต่ละตัวนั้น จะส่งผลต่อกันและความซับซ้อนของสมรรถนะมีมากขึ้น [18], [19]

โดย M. Kress [11] ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมการรับรู้เป้าหมายและสถานการณ์ ทำให้มีรูปแบบยิงแบบเล็งเป้าหมายและการยิงพื้นที่ ซึ่งระดับการรับรู้สถานการณ์เกี่ยวกับเป้าหมายของฝ่ายตรงข้ามจะมีผลต่อผลการต่อสู้

4) A_B และ A_R อัตราส่วนการสูญเสียหลังใช้ความสามารถในการป้องกันจากจรวดโจมตีของข้าศึก โดย T. Komiya [18] และ T. Komiya และ I. Koji [20] ได้พัฒนาแบบจำลองของพฤติกรรมการสมรรถนะที่มีตัวแปรของการโจมตีด้วยจรวดและการป้องกันตัวเองจากจรวด ซึ่งขีดความสามารถของระบบการป้องกันภัยทางอากาศหรือระบบต่อต้านจรวดนั้น มีตัวอย่างจริง เช่น ระบบขีปนาวุธป้องกันการโจมตีทางอากาศ Iron Dome ของอิสราเอล หรือระบบต่อต้านขีปนาวุธ THAAD ของอเมริกาที่เป็นเสมือนเกราะป้องกันจากการโจมตี

5) K_B และ K_R การเสื่อมสภาพของอากาศยาน โดย R.E. Bach และคณะ [21] ได้อธิบายแบบจำลองของการเสื่อมสภาพของอาวุธและกำลังรบ ทำให้ความสามารถในการพร้อมรบลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

2.2 ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการโจมตีที่ขึ้นกับระยะทาง

เนื่องจากสมรรถนะการรบทางอากาศในยุคใหม่ใช้จรวดที่มีการนำวิถีเป็นหลัก ทำให้ระยะห่างระหว่างทั้งสองฝ่ายในการรบนั้นกลายมาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบ่งชี้ความสำเร็จในการโจมตีเป้าหมายของอาวุธ

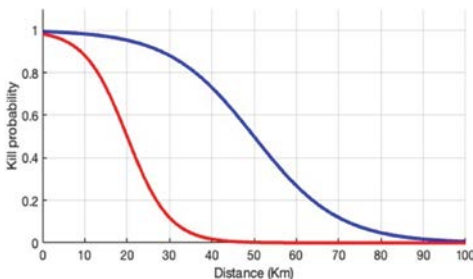
โดยในงานวิจัยของ S.H. Denney [22], Steigers [23] และ G.A. Rao และ S.P. Mahulikar [24] ได้อธิบายพฤติกรรมและขีดความสามารถของจรวดของอากาศยานไว้โดยละเอียดและได้อธิบายพฤติกรรมการลดลงของความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมายไว้โดยจรวดทางอากาศจะมีขีดความสามารถและความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมายอย่างแน่นอนจนถึงระยะหนึ่ง ในช่วงระยะนี้จะเรียกว่าระยะสังหาร (Weapon lethal range) หากเลยระยะนี้ไป ความน่าจะเป็นจะลดลงอย่างรวดเร็วในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ทำให้ค่าของตัวแปรความน่าจะเป็นของการยิงถูกเป้าหมายของ

จรวดยานน้ำเงินและฝ่ายแดง (P_{WB} และ P_{WR}) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักของปัจจัยความสามารถของอาวุธในการทำลายศัตรูฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดง (W_B และ W_R) ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่แล้ว ได้เปลี่ยนแปลงไปจากงานวิจัยของ [16] จากที่เป็นค่าคงที่ มาเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับระยะทางและสามารถอธิบายพฤติกรรมนี้ได้ด้วยสมการ

$$P_{WB} = \frac{1}{1 + M_B e^{\beta_B (d - \gamma_B)}} \quad (3)$$

$$P_{WR} = \frac{1}{1 + M_R e^{\beta_R (d - \gamma_R)}} \quad (4)$$

ในสมการนี้มี d เป็นระยะห่างระหว่างอากาศยานที่โจมตีและอากาศยานเป้าหมาย โดย β_B และ β_R เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของความน่าจะเป็นในการโจมตีโดนเป้าหมาย ส่วน γ_B และ γ_R เป็นจุดศูนย์กลางการลดลงของความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมาย และ M_B และ M_R เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการเลื่อนพฤติกรรมลดลงของความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมาย



รูปที่ ๑ ตัวอย่างพฤติกรรมลดลงของความน่าจะเป็นของอาวุธที่ยิงถูกเป้าหมายของจรวดพิสัยใกล้และพิสัยกลาง

รูปที่ 1 พฤติกรรมลดลงของความน่าจะเป็นของจรวดที่ยิงถูกเป้าหมายของจรวดพิสัยใกล้และพิสัยกลาง โดยเส้นสีแดงเป็นค่าสมมุติของจรวดพิสัยใกล้ ($\beta_B = 0.1$, $M_B = 0.1$ และ $\gamma_B = 20$) และเส้นสีน้ำเงินเป็นจรวดพิสัยกลาง ($\beta_R = 0.1$, $M_R = 0.1$

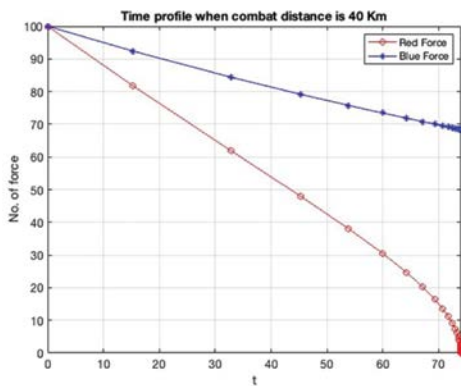
และ $\gamma_R = 40$) ที่ระยะต่าง ๆ ระหว่างเป้าหมายกับอากาศยานที่โจมตี (d) โดยด้วยค่าตัวแปรสมมุตินี้ จรวดพิสัยใกล้จะลดความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมายที่ระยะ 10 กิโลเมตร แล้วความน่าจะเป็นนี้จะลดลงในรูปแบบของเอ็กซ์โพเนนเชียล จนเข้าใกล้ศูนย์ที่ระยะประมาณ 30 กิโลเมตร ส่วนในกรณีของจรวดพิสัยกลาง ความน่าจะเป็นจะเริ่มลดลงที่ระยะประมาณ 30 กิโลเมตร และเข้าใกล้ศูนย์ที่ระยะประมาณ 80 กิโลเมตร ซึ่งค่าตัวแปรที่สมมุติขึ้นมาในหัวข้อนี้สอดคล้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของจรวดในสองระยะพิสัยนี้ [22] - [24]

3. การวิเคราะห์และผล

ในขั้นตอนการวิเคราะห์นั้น สมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่ (1) และ (2) และสมการตัวแปรปัจจัยที่สำคัญทั้ง 5 ด้าน ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อภาคผนวก อีกทั้งปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นของการยิงถูกเป้าหมายของจรวดในสมการที่ (3) และ (4) จะถูกดำเนินการหาผลเฉลยด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อศึกษาพฤติกรรมพื้นฐานของผลกระทบของปัจจัยความแตกต่างด้านขีดความสามารถของจรวดในการรบ

โดยคำตอบในรูปแบบทั่วไป จะสามารถอธิบายพฤติกรรมพื้นฐานได้อย่างครบถ้วน แต่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะต่างไปจากความเป็นจริงบ้าง โดยถ้าจะนำไปใช้จริง จำเป็นที่จะต้องประเมินค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับค่าเฉพาะของกองกำลังของแต่ละฝ่ายและสถานการณ์ที่แตกต่างกันไป

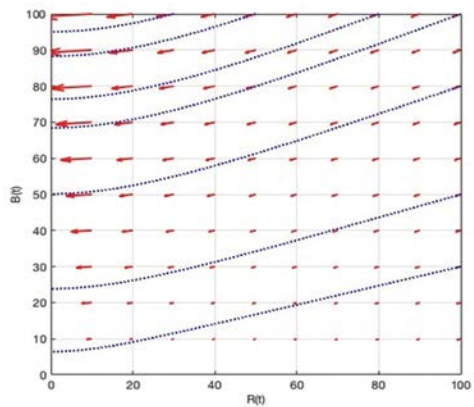
โดยในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์พฤติกรรมการรบของสมรภูมิทางอากาศที่ทั้งสองฝ่ายใช้จรวดที่มีความสามารถต่างกัน โดยกองกำลังฝ่ายน้ำเงินจะมีจรวดพิสัยใกล้และกลาง ส่วนฝ่ายแดงจะมีจรวดพิสัยใกล้อย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งค่าความน่าจะเป็นของการยิงถูกเป้าหมายของจรวดที่ระยะต่าง ๆ ในกรณีศึกษา นี้ จะใช้ค่าสมมุติจากรูปที่ 1



รูปที่ ๒ จำนวนของกำลังรบฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดงในแต่ละช่วงเวลา

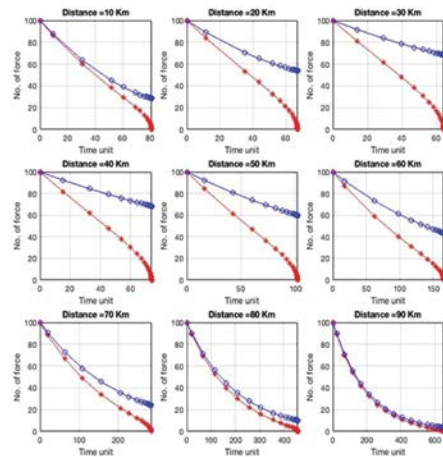
รูปที่ 2 แสดงจำนวนของกำลังรบทั้งสองฝ่ายที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลา (Time profile solution) ของกรณีตัวอย่าง ซึ่งกราฟนี้ได้จากการดำเนินการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและหาผลเฉลยของสมการที่ (1) และ (2) รวมทั้งตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยผลเฉลยที่ได้จะอยู่ในรูปที่เทียบกับเวลา โดยในกรณีตัวอย่างนี้กองกำลังฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดงมีจำนวนอากาศยานเริ่มต้นเท่ากันอยู่ที่ฝ่ายละ 100 หน่วย แต่ละฝ่ายจะเริ่มยิงโจมตีกันเมื่ออยู่ห่างกันที่ระยะห่างกัน 40 กิโลเมตร จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทั้งสองฝ่ายเริ่มยิงโจมตีกันอย่างสุดกำลัง โดยทั้งสองฝ่ายแตกต่างกันเพียงแค่ฝ่ายน้ำเงินจะมีจรวดพิสัยกลางอยู่ด้วย แต่ค่าตัวแปรและคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เหลือนั้นเท่ากัน (กรณีศึกษาที่คุณสมบัติอื่น ๆ แตกต่างกันนั้นได้อธิบายไว้ในงานวิจัยของ [16]) ทำให้ฝ่ายน้ำเงินมีความได้เปรียบอย่างมากในการต่อสู้โดยสามารถกำจัดกองกำลังฝ่ายแดงได้ทั้งหมดภายใน 74 หน่วยเวลา และกองกำลังฝ่ายน้ำเงินยังเหลือกำลังรบอยู่อีก 68 หน่วย

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพเปรียบเทียบอัตราส่วนในการลดจำนวนของกองกำลังฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดงเปรียบเทียบกัน (Phase plane solution) ซึ่งกราฟนี้ได้จากการดำเนินการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและหาผลเฉลยของสมการที่ (1) และ (2) และ



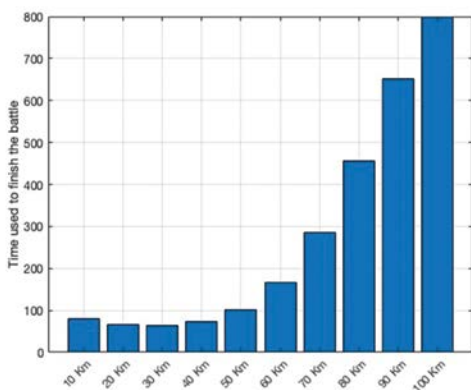
รูปที่ ๓ กราฟแสดงจำนวนกำลังรบทั้งสองฝ่ายเปรียบเทียบกันของกรณีศึกษา

เปรียบเทียบกำลังทั้งสองฝ่ายกันเอง โดยจากแผนภาพนี้แสดงให้เห็นว่า กองกำลังฝ่ายน้ำเงินนั้นมีความได้เปรียบกองกำลังฝ่ายแดงมาก จนทำให้กรณีที่กองกำลังฝ่ายน้ำเงินที่มีน้อยกว่า สามารถทำลายกองกำลังฝ่ายแดงที่มี 100 หน่วย ได้หมด ตัวอย่างเช่น กรณีฝ่ายน้ำเงินมีกำลังรบเริ่มต้น 80 หน่วย เมื่อกำจัดฝ่ายแดงหมดจะเหลือ 50 หน่วย กรณีฝ่ายน้ำเงินมี 50 หน่วย จะเหลือ 24 หน่วย และกรณีฝ่ายน้ำเงินมี 30 หน่วย จะเหลือ 8 หน่วย



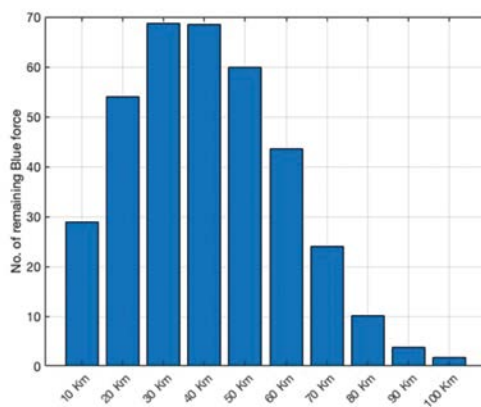
รูปที่ ๔ แสดงจำนวนของกำลังรบฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดงในแต่ละช่วงเวลาของสมการภูมิทางอากาศที่ระยะต่าง ๆ

รูปที่ 4 แสดงจำนวนของกำลังรบทั้งสองฝ่ายที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลา (Time profile solution) ในกรณีที่ทั้งสองฝ่ายเริ่มรบและโจมตีกัน ที่ระยะ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 กิโลเมตร โดยกองกำลังฝ่ายน้ำเงินมีความได้เปรียบและสามารถเอาชนะกองกำลังฝ่ายแดงได้หมด โดยที่ระยะ 30 และ 40 กิโลเมตรนั้น กองกำลังฝ่ายน้ำเงินสามารถกำจัดกองกำลังฝ่ายแดง 100 หน่วย ได้หมด แล้วเหลือกำลังรบมากที่สุด คือเหลืออยู่ที่ 68 หน่วย ในทางตรงกันข้ามที่ระยะ 90 กิโลเมตร ทั้งสองฝ่ายโจมตีกันแทบไม่ได้ทำให้สมรภูมิมีความยืดเยื้อมากถึงประมาณ 650 หน่วยเวลา และกองกำลังฝ่ายน้ำเงินเหลืออยู่เพียง 3 หน่วย



รูปที่ ๕ กราฟแสดงเวลาที่ใช้ของกองกำลังฝ่ายน้ำเงินในการกำจัดกองกำลังฝ่ายแดงทั้งหมดที่ระยะต่าง ๆ ของสมรภูมิ

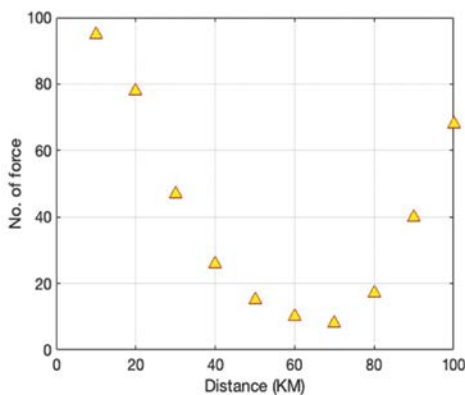
จากรูปที่ 5 แสดงเวลาที่ใช้ในการจบสมรภูมิการรบเมื่อกองกำลังฝ่ายแดงถูกกำจัดหมด โดยจากรูปนี้สังเกตว่าหากสมรภูมิการรบเกิดขึ้นโดยที่ทั้งสองกองกำลังอยู่ห่างกันน้อยกว่า 50 กิโลเมตร สมรภูมิจะสามารถจบลงได้อย่างรวดเร็วภายใน 100 หน่วยเวลา แต่หากยิ่งไกลออกไปสมรภูมิจะยิ่งยืดเยื้อ เพราะความน่าจะเป็นในการยิงโดนเป้าหมายของแต่ละฝ่ายจะลดน้อยลงมาก



รูปที่ ๖ กราฟแสดงกำลังรบที่เหลืออยู่ของฝ่ายน้ำเงิน หลังจากกำจัดกองกำลังฝ่ายแดงทั้งหมดที่ระยะต่าง ๆ ของสมรภูมิ

รูปที่ 6 แสดงกำลังรบที่เหลืออยู่ของฝ่ายน้ำเงินหลังจากจบสมรภูมิลงไป โดยทั้งสองฝ่ายมีกำลังรบเริ่มต้นเท่ากันที่ 100 หน่วย จากนั้นด้วยความได้เปรียบทางด้านอาวุธของกองกำลังฝ่ายน้ำเงินจึงสามารถทำลายกำลังรบทั้งหมดของฝ่ายแดงลงไปได้ และยังเหลือกำลังรบตามรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการรบที่อยู่ระหว่าง 30 ถึง 40 กิโลเมตร เป็นช่วงที่ทำให้กองกำลังฝ่ายน้ำเงินนั้นได้เปรียบมากที่สุด เพราะในระยะนี้อัตราการโจมตีถูกเป้าหมายของอาวุธฝ่ายน้ำเงินอยู่ในระดับที่สูงอยู่ แต่อัตราการโจมตีถูกเป้าหมายของฝ่ายแดงนั้นลดน้อยลงไปตามแผนภาพนี้ผู้วางแผนการรบสามารถนำไปวางแผนการบินและโจมตีในพิภพที่ได้เปรียบอยู่เสมอได้

เนื่องจากในสมรภูมิการรบตัวอย่างนี้ กองกำลังฝ่ายน้ำเงินมีจรวดที่มีความได้เปรียบกองกำลังฝ่ายแดง ทำให้กองกำลังฝ่ายน้ำเงินสามารถเอาชนะได้ในทุกกรณี โดยในรูปที่ 7 แสดงจำนวนกองกำลังฝ่ายแดงที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถเอาชนะและกำจัดกองกำลังฝ่ายน้ำเงินจำนวน 100 หน่วยได้ โดยจำนวนกองกำลังฝ่ายน้ำเงินที่น้อยที่สุดนั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละช่วงระยะการโจมตี ตัวอย่างเช่น ถ้าสมรภูมิการรบที่ทั้งสองฝ่ายอยู่ห่างกันประมาณ



รูปที่ ๗ กราฟแสดงจำนวนกำลังน้อยที่สุดของฝ่ายน้ำเงินที่สามารถกำจัดกำลังฝ่ายแดง 100 หน่วย ลงไปได้ในระยะต่าง ๆ ของสมรภูมิ

10 กิโลเมตร กองกำลังฝ่ายน้ำเงินจำเป็นต้องใช้อากาศยานถึง 95 หน่วย เพื่อจะเอาชนะกองกำลังฝ่ายแดงจำนวน 100 หน่วย แต่หากสมรภูมิเกิดขึ้นในระยะ 70 กิโลเมตร กองกำลังฝ่ายแดงจำเป็นต้องใช้เพียงแค่ 10 หน่วย เพื่อเอาชนะกองกำลังฝ่ายแดง 100 หน่วย เหตุผลเพราะว่าสมรภูมิการรบและโจมตีเกิดขึ้นในระยะที่ไกลเกินกว่าที่อากาศยานฝ่ายแดงจะสามารถโจมตีได้ แต่อาวุธของฝ่ายน้ำเงินนั้นยังพอสามารถโจมตีได้

4. สรุปผล

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ผลของสมรภูมิการรบทางอากาศในรูปแบบการเพิ่มเติมกำลังของสองฝ่าย โดยได้เริ่มต้นจากแบบจำลองของ Lanchester จากนั้นจึงดำเนินการเพิ่มตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมรภูมิการรบทางอากาศ เช่น ความสามารถในการโจมตีของอากาศยาน ความสามารถในการทำลายของจรวดโจมตี ความสามารถในการรับรู้ข้อมูลเป้าหมาย ความสามารถในการป้องกันตนเองจากจรวดโจมตีของข้าศึกและการเสื่อมสภาพของ

อากาศยาน โดยคุณสมบัติและพฤติกรรมต่างๆ ของตัวแปรเหล่านี้ได้ถูกวิเคราะห์และอธิบายไว้ในงานวิจัยของ [16] ซึ่งในบทความนี้ได้ต่อยอดและนำเสนอแนวคิดในการจำลองพฤติกรรมที่เป็นผลกระทบจากจรวดที่มีระยะโจมตีที่แตกต่างกัน ทำให้ความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมายที่ระยะต่างๆ กันมีการเปลี่ยนแปลงไป เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับระยะทาง

ในงานวิจัยชิ้นนี้พฤติกรรมการลดถอยของกำลังรบในแบบจำลองนี้มีความหลากหลายรูปแบบทั้งแบบเชิงเส้น แบบเอ็กโพเนนเชียล และแบบผกผัน ซึ่งมีความซับซ้อนกว่าแบบจำลองดั้งเดิมของ Lanchester ที่จะมีอัตราการลดเป็นแบบเชิงเส้น

โดยผลของตัวอย่างในการวิเคราะห์แบบจำลองในงานวิจัยชิ้นนี้อยู่ในรูปทั่วไปที่สามารถอธิบายพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ของสมรภูมิการรบทางอากาศได้อย่างครบถ้วน แต่การนำไปใช้จริงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (Sensitivity analysis of model parameters) เพื่อให้การพยากรณ์ผลของสมรภูมิการรบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5. ภาคผนวก

A_B, A_R — อัตราส่วนการสูญเสียหลังใช้ความสามารถในการป้องกันจากจรวดโจมตีของข้าศึกของฝ่ายน้ำเงินและแดง

$$[A_B = \frac{1}{\alpha_B B(t)}, A_R = \frac{1}{\alpha_R R(t)}]$$

B_0, R_0 — จำนวนเริ่มต้นของกองกำลังทั้งฝ่าย

C_{WB}, C_{WB} — จำนวนกระสุนที่ยิงถูกเป้าหมายฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดงแล้วเป้าหมายถูกทำลาย

J_B, J_R — ความสามารถในการโจมตีของอากาศยานฝ่ายน้ำเงินและแดง

$$[J_B = P_{JB} V_{JB} (1 - P_{R0}), J_R = P_{JR} V_{JR} (1 - P_{B0})]$$

K_B, K_R — การเสื่อมสภาพของอากาศยานฝ่ายน้ำเงินและแดง

M_B, M_R — ค่าสัมประสิทธิ์ในการเลื่อนพฤติกรรม การลดลงของความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมายฝ่ายน้ำเงินและแดง

P_{B0}, P_{R0} — ความน่าจะเป็นในการป้องกันตนเองหรือหลบหลีกจรวดฝ่ายน้ำเงินและแดง

P_{JB}, P_{JR} — ความน่าจะเป็นในการโจมตีฝั่งตรงข้ามได้ของอากาศยานฝ่ายน้ำเงินและแดง

P_{WB}, P_{WR} — ความน่าจะเป็นยิงถูกเป้าหมายของจรวด ฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดง

$$[P_{WB} = \frac{1}{1+M_B e^{\beta_B(d-\gamma_B)}}, P_{WR} = \frac{1}{1+M_R e^{\beta_R(d-\gamma_R)}]}$$

S_B, S_R — ความสามารถในการรับรู้ข้อมูลเป้าหมาย

$$[S_B = \frac{\sigma_B R_0 + (1-\sigma_B)R(t)}{R_0}, S_R = \frac{\sigma_R B_0 + (1-\sigma_R)B(t)}{B_0}]$$

V_{JB}, V_{JR} — ความเร็วในการบินและความสามารถในการปล่อยจรวดไปยังเป้าหมายของอากาศยานฝ่ายน้ำเงินและแดง

V_{WB}, V_{WR} — ความเร็วในการยิงจรวดของฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดง

W_B, W_R — ความสามารถของอาวุธในการทำลายศัตรู

$$[W_B = \frac{P_{WB} V_{WB}}{C_{WB}}, W_R = \frac{P_{WR} V_{WR}}{C_{WR}}]$$

α_B, α_R — ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการป้องกันการโจมตีจากจรวดของข้าศึกของฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดง

β_B, β_R — ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของความน่าจะเป็นในการโจมตีเป้าหมายฝ่ายน้ำเงินและแดง

γ_B, γ_R — จุดศูนย์กลางการลดลงของความน่าจะเป็นในการยิงถูกเป้าหมายฝ่ายน้ำเงินและแดง

σ_B, σ_R — อัตราการรับรู้ตำแหน่งของเป้าหมายข้าศึกของฝ่ายน้ำเงินและฝ่ายแดง $[0 \leq \sigma_B, \sigma_R \leq 1]$

$$P_{JB} = P_{JR} = V_{JB} = V_{JR} = V_{WB} = V_{WR} = P_{B0} = P_{R0} = \sigma_B = \sigma_R = \alpha_B = \alpha_R = 0.5$$

$$C_{WB} = C_{WR} = 1 \quad K_B = K_R = 0.005$$

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. A. Novikov, "Hierarchical Models of Warfare," *Automat. Remote Control*, vol. 74, no. 10, pp. 1733 - 1752, 2013.
- [2] A. M. Novikov and D. A. Novikov, "Methodology," M.: SINTEG, 2007, p. 668.
- [3] F. W. Lanchester, *Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm*, London, Constable and Company Limited, 1916.
- [4] S. J. Deitchman, "A Lanchester Model of Guerrilla Warfare," *Oper. Res.*, vol. 10, no. 6, pp. 818 - 827, 1962.
- [5] G. G. Brown and A. R. Washburn, "The Fast Theater Model (FATHM)," *Mil. Oper. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 33 - 45, 2007.
- [6] H. W. Jones, *COSAGE User's Manual, Volume 1-Main Report. Revision 4.* ARMY CONCEPTS ANALYSIS AGENCY BETHESDA MD, 1995.
- [7] E. S. Adams and M. Mesterton-Gibbons, "Lanchester's Attrition Models and Fights Among Social Animals," *Behav. Ecol.*, vol. 14, no. 5, pp. 719 - 723, 2003.
- [8] D. D. Johnson and N. J. MacKay, "Fight the Power: Lanchester's Laws of Combat in Human Evolution," *Evol. Hum. Behav.*, vol. 36, no. 2, pp. 152-163, 2015.
- [9] M. A. Stanescu, N. Barriga, and M. Buro, "Using Lanchester Attrition Laws for Combat Prediction in StarCraft,"

- in *11th Artif. Intell. Interac. Digit. Entertainment conf.*, 2015.
- [10] S. Jørgensen and S. Signé, "A Lanchester-Type Dynamic Game of Advertising and Pricing," in *Games in Management Science*, Springer, Cham., 2020, pp. 1 - 14.
- [11] M. Kress, "Lanchester Models for Irregular Warfare," *Mathematics*, vol. 8, no. 5, p. 737, 2020.
- [12] T. W. Lucas and T. Turkes, "Fitting Lanchester equations to the Battles of Kursk and Ardennes," *Nav. Res. Logistics*, vol. 51, pp. 95 - 116, 2004.
- [13] M. Sahni and S. K. Das, "Performance of Maximum Likelihood Estimator for Fitting Lanchester Equations on Kursk Battle Data," *J. Battlef. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 23 - 30, 2015.
- [14] N. MacKay, C. Price, and A. J. Wood, "Weight of Shell Must Tell: A Lanchestrian Reappraisal of the Battle of Jutland," *History*, vol. 101, no. 4(347), pp. 536 - 563, 2016.
- [15] P. R. Syms, "Validating Lanchester Models: The First 60 Years," in *34th Int. Symp. Mil. Oper. Res. (ISMOR)*, Jul. 2017.
- [16] S. Pattanasagulloy and T. Luangwilai, "Mathematical Modelling of Air Combat by Using Lanchester Model," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, (In press).
- [17] K. Iida, *Theory of Operation Research Applied for Nation Defense*. Nagoya, Japan. Sankeisha, 2002.
- [18] T. Komiya, *Lanchester Model*, Nagoya, Japan. Sankeisha, 2019.
- [19] J. X. Liu, S. H. Xu, J. S. Gao, and Y. Q. Yuan, "An Integrated Network/firepower Operation Model Based on Lanchester Equation," *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 17, no. 2, pp. 112 - 117, 2018.
- [20] T. Komiya and I. Koji, "Deterministic Lanchester Model of Missile Striking Battle (Part 2) Evaluation Model of Regional Air Defense capability and Information Capability," *Scientific and engineering journal of the national defense academy*, Japan, 2006.
- [21] R. E. Bach, Jr, L. Dolansky, and H. L. Stubbs, "Some Recent Contributions to the Lanchester Theory of Combat," *Oper. Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 314 - 326, 1962.
- [22] S. H. Denney, *A review of literature on the theory of hit and kill probabilities*, 1970.
- [23] Steigers and C. William, "A Critical Analysis of a Range Dependent Probability of Kill for the NATO Seasparrow Missile System," M.S. Thesis, Nav. Postgraduate School, Monterey, CA, USA, 1993.
- [24] G. A. Rao and S. P. Mahulikar, "New Criterion for Aircraft Susceptibility to Infrared Guided Missiles," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 8, pp. 701 - 712, 2005.

การประเมินพื้นที่อ่อนไหว ต่อการเกิดดินถล่มในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

นครินทร์ ชัยแก้ว¹ Nitin Kumar Tripathi² ชนาภานต์ วุฒิสักดิ์การุณ³
และ ศิริลักษณ์ พิมมะสาร^{4*}

วันที่รับ 18 สิงหาคม 2565 วันที่แก้ไข 19 กันยายน 2565 วันตอบรับ 20 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการจัดทำแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มโดยการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process; AHP) ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่มมากที่สุดคือ ความลาดชัน รองลงมา ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ระยะห่างจากถนน ความสูงภูมิประเทศ ระยะห่างจากทางน้ำ ชั้นหิน ทิศทางของพื้นผิวลาดชัน สิ่งปกคลุมดิน ความโค้งของผิวน้ำภูมิประเทศ และดัชนีความชื้นที่สัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ ตามลำดับ และเมื่อนำปัจจัยดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อจำแนกพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม 5 ระดับ คือ อ่อนไหวสูงมาก สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก พบว่ามีพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มเท่ากับ 0.31, 15.23, 218.36, 1,681.07 และ 269.89 ตร.ม. ตามลำดับ โดยมีค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) ของการประเมิน ร้อยละ 85.37 และมีค่าสัมประสิทธิ์แคปปาอยู่ที่ 0.71 แสดงถึงระดับความถูกต้องของแผนที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและการตัดสินใจในการเฝ้าระวังและเตรียมการรับมือสำหรับเหตุการณ์ดินถล่มเพื่อลดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

คำสำคัญ : กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, ภาพถ่ายจากดาวเทียม, การสำรวจระยะไกล, ดินถล่ม

¹ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, มหาวิทยาลัยพะเยา

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

³ บริษัท จีไอเอส จำกัด

⁴ กองบริหารงานวิจัย, มหาวิทยาลัยพะเยา

* ผู้แต่ง, อีเมล: Siriruk.pim@gmail.com

Landslide Susceptibility Assessment in Khao Yai National Park.

Nakarin Chaikaew¹ Nitin Kumar Tripathi² Chanakan Wuthisakkaroon³
and Siriruk Pimmasarn^{4*}

Received 18 August 2022, Revised 19 September 2022, Accepted 20 September 2022

Abstract

This study aims to create landslide susceptibility map using the integration of Remote Sensing (RS) data, Geographical Information Systems (GIS), and Analytical Hierarchy Process (AHP) at Khao Yai National Park. The results were found that the most factor influencing to landslide activities was slope, followed by precipitation, distance from road, elevation, distance from drainage, lithology, aspect, curvature and Topographic Wetness Index (TWI) respectively. With the consideration of these influenced factors, the susceptibility landslide area was classed into 5 classes as very high (0.31 km²), high (15.23 km²), moderate (218.36 km²), low (1,681.07 km²) and lowest (269.89 km²) respectively with the overall accuracy of 85.37% and Kappa coefficient of 0.71. This accuracy assessment revealed the level of landslide susceptibility map accuracy is useful for planning and decision-making in order to monitor and cope with landslide occurrence in the future at Khao Yai National Park.

Keywords : Analytical hierarchical process (AHP), Geographic Information System (GIS), Satellite image, Remote sensing, Landslide

¹ School of Information and Communication Technology, University of Phayao

² School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology

³ GIS Co., Ltd.

⁴ Division of Research Administration, University of Phayao

* Corresponding author, E-mail: Siriruk.pim@gmail.com

1. บทนำ

เหตุการณ์ดินถล่มเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่ทั่วโลกตระหนักและให้ความสนใจเนื่องจากสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินประเทศไทยเองก็เป็นประเทศหนึ่งที่ประสบปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีสภาพภูมิประเทศเป็นภูเขา ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงในปัจจุบันที่มีการขยายพื้นที่เมืองเพิ่มมากขึ้นและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้แนวโน้มในการเกิดพิบัติภัยดินถล่มเพิ่มสูงขึ้น เพื่อลดการสูญเสียชีวิตและมูลค่าความเสียหายจากการเกิดดินถล่ม การประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นในการติดตามเฝ้าระวังและวางแผนเพื่อป้องกันและหาแนวทางแก้ไขเพื่อลดความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นจากการเกิดแผ่นดินถล่มในอนาคต [1]-[3] การจัดทำแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม (Landslide susceptibility mapping) ถือเป็นขั้นตอนแรกในการประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มเพื่อช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องหรือผู้มีหน้าที่ตัดสินใจใช้ในการจัดการเบื้องต้นได้อย่างเหมาะสม ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมาวิธีการในการจัดทำแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มถูกพัฒนาขึ้นอย่างมากและมีการประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ พื้นที่ [4]-[8]

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้มีการระบุว่าข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลขเป็นข้อมูลที่สำคัญที่สุดที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม เนื่องจากข้อมูลนี้มีความเชื่อมโยงกับข้อมูลอื่น ๆ ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ กล่าวคือข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลขถูกใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการสร้างข้อมูลอื่น ๆ เช่น ข้อมูลความลาดชัน ข้อมูลทิศทางของพื้นผิวลาดชัน และข้อมูลความโค้งของผิวดินภูมิประเทศ [9]-[11] ซึ่งในปัจจุบันข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลขถูกนำมาใช้วิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดแผ่นดินถล่มค่อนข้างหลากหลาย เช่น ASTER-DEM (The Advanced Spaceborne

Thermal Emission and Reflection Radiometer), SRTM-DEM (Shuttle Radar Topography Mission) และ ALOS DEM (Advanced Land Observation Satellite) [12]-[14] สำหรับวิธีการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในปัจจุบันได้มีการจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative methods) การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative methods) และการวิเคราะห์เชิงกึ่งคุณภาพ (Semi-quantitative methods) และวิธีการจัดลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) ถือเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งจากกลุ่มวิธีวิเคราะห์เชิงกึ่งคุณภาพ [4], [15] ที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการจัดทำแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม [4], [13]

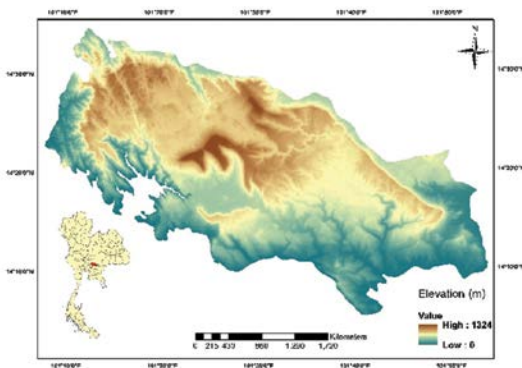
ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับข้อมูลการสำรวจระยะไกลเพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดแผ่นดินถล่มในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยทำการวิเคราะห์ความสำคัญของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่มด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ เพื่อสร้างแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดแผ่นดินถล่มเพื่อใช้ในการเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจในการวางแผนป้องกันและลดความรุนแรงของเหตุการณ์ดินถล่มในอนาคต

2. ข้อมูลพื้นที่ศึกษา

อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ตั้งอยู่ระหว่างละติจูดที่ $14^{\circ}5' - 14^{\circ}35'$ เหนือ และลองจิจูด $101^{\circ}5' - 101^{\circ}55'$ ตะวันออก มีพื้นที่ทั้งหมด 2,168 ตร.กม. มีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสลับซับซ้อน และมีขอบเขตพื้นที่ศึกษาดังแสดงในรูปที่ 1

3. ข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่มที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด



รูปที่ ๑ ที่ตั้งพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

10 ปัจจัย คือ ข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ข้อมูลความลาดชัน ข้อมูลทิศทางของพื้นผิวลาดชัน ข้อมูลความโค้งของผิวน้ำภูมิประเทศ ข้อมูลดัชนีความชื้นที่สัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ ข้อมูลสิ่งปกคลุมดิน ข้อมูลชั้นหิน ข้อมูลระยะห่างจากทางน้ำ ข้อมูลระยะห่างจากถนน และข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย (1) โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ QGIS (2) โปรแกรมระบบสารสนเทศศาสตร์ SAGA GIS (3) Google Earth Pro (4) โปรแกรม R (5) เครื่องบันทึกตำแหน่งพิกัดเชิงภูมิศาสตร์บนโลก (Handheld GPS)

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 การเตรียมข้อมูล

ขั้นตอนแรก ข้อมูลปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่มถูกเก็บรวบรวมโดยอาศัยการทบทวน การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึง การตรวจสอบข้อมูลที่มีให้บริการในเขตพื้นที่การศึกษา โดยในการศึกษานี้มีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิด ดินถล่มที่ถูกเลือกใช้ทั้งหมด 10 ปัจจัย จากนั้นข้อมูล ปัจจัยทั้งหมดจะถูกนำเข้าและจัดเตรียมในระบบ สารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยจัดทำให้อยู่ในรูปแบบ ข้อมูลเชิงพื้นที่แบบราสเตอร์ (Raster) ที่มีความ

ละเอียดของจุดภาพอยู่ที่ 12.5 ม. โดยการจัดเตรียม ข้อมูลแต่ละปัจจัยมีการดำเนินการดังนี้

1. ความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยการจัดกลุ่มความสูงของพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ALOS PALSAR DEM 12.5 ม. ดังแสดงในตารางที่ 1

2. ความลาดชัน เป็นการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความสูงจากข้อมูล ALOS PALSAR DEM จากจุดภาพหนึ่งไปยังจุดภาพข้างเคียง โดยในการศึกษาครั้งนี้ความลาดชันอยู่ที่ 0-90°

3. ทิศทางของพื้นผิวลาดชัน ถูกวิเคราะห์ ขึ้นจากข้อมูล ALOS PALSAR DEM โดยพื้นที่ราบ จะไม่มีทิศทางความลาดชันและมีค่าข้อมูลเท่ากับ -1 ในการศึกษาครั้งนี้ข้อมูลทิศทางของพื้นผิวลาดชันถูก แบ่งออกเป็น 9 กลุ่ม คือ พื้นที่ราบ ทิศเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออก ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศใต้ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ ทิศตะวันตก และ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

4. ความโค้งของผิวน้ำภูมิประเทศ ถูกคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวทางลาดและจัดเตรียม ขึ้นจากข้อมูล ALOS PALSAR DEM เช่นกัน โดยข้อมูล จะถูกแบ่งเป็นพื้นผิวแบบโค้งเว้า (Concave) พื้นผิว แบบราบ (Flat) และพื้นผิวแบบโค้งนูน (Convex)

5. ดัชนีความชื้นที่สัมพันธ์กับสภาพ ภูมิประเทศ เป็นข้อมูลปัจจัยที่วิเคราะห์ลักษณะ ภูมิประเทศกับอัตราการไหลสะสม แสดงถึงแนวโน้ม ของการเกิดการไหลของน้ำลงสู่พื้นที่ที่ลาดเอียงต่ำ ข้อมูลนี้ถูกวิเคราะห์และจัดเตรียมขึ้นจากข้อมูล ALOS PALSAR DEM

6. ข้อมูลสิ่งปกคลุมดิน เป็นข้อมูลตัวแทน ลักษณะสิ่งปกคลุมพื้นผิว ได้จากการแปลภาพถ่าย จากดาวเทียม Sentinel-2 และนำมาจำแนกข้อมูล ภาพถ่ายจากดาวเทียมด้วยวิธีการ Supervised Classification-Maximum Likelihood

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัยย่อยสำหรับการวิเคราะห์หาพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ศึกษาและค่าสัดส่วนความสอดคล้องกันของปัจจัย

ปัจจัย	ค่าถ่วงน้ำหนัก	ค่าลำดับ	CR	ปัจจัย	ค่าถ่วงน้ำหนัก	ค่าลำดับ	CR
ความลาดชัน (องศา)	0.294	1	0.054	ความโค้งผิวภูมิประเทศ	0.035	9	0.070
0-10	0.035	1		โค้งเว้า	0.649	1	
10-20	0.068	2		ที่ราบ	0.057	3	
20-30	0.134	3		โค้งนูน	0.295	2	
30-40	0.260	4					
>40	0.503	5					
ทิศทางพื้นผิวลาดชัน	0.045	7	0.066	ความสูง (ม.)	0.075	4	0.069
ที่ราบ	0.024	9		<700	0.045	7	
เหนือ	0.030	8		700-800	0.061	6	
ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.048	7		800-900	0.070	5	
ตะวันออก	0.056	6		900-1000	0.215	2	
ตะวันออกเฉียงใต้	0.098	4		1000-1100	0.134	4	
ใต้	0.269	1		1100-1200	0.163	3	
ตะวันตกเฉียงใต้	0.240	2		>1200	0.311	1	
ตะวันตก	0.142	3					
ตะวันตกเฉียงเหนือ	0.094	5					
ชุดหิน	0.059	6	0.080	สิ่งปกคลุมดิน	0.040	8	0.056
JKpw	0.173	3		ป่าสมบูรณ์, พื้นที่เกษตรกรรม	0.074	3	
Jpk	0.237	2					
PTrv	0.452	1		ป่าโปร่ง, สิ่งก่อสร้าง	0.283	2	
อื่นๆ	0.138	4		พื้นที่รกร้าง, พุ่มหญ้า	0.643	1	
ระยะห่างจากทางน้ำ (ม.)	0.064	5	0.052	ระยะห่างจากถนน (ม.)	0.165	3	0.038
เหนือ 0-200	0.435	1		0-200	0.436	1	
200-400	0.224	2		200-400	0.237	2	
400-600	0.117	3		400-600	0.124	3	
600-800	0.088	4		600-800	0.083	4	
800-1000	0.076	5		800-1000	0.072	5	
> 1000	0.059	6		> 1000	0.048	6	
ปริมาณน้ำฝน (มม./ปี)	0.195	2	0.012	ดัชนีความชื้นที่สัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ	0.027	10	0.057
< 1200	0.056	1		ต่ำ (< 5)	0.083	1	
1200-1400	0.092	2		ปานกลาง (5-10)	0.193	2	
1400-1600	0.114	3		สูง (> 10)	0.724	3	
1600-1800	0.139	4					
1800-2000	0.233	5					
> 2000	0.366	6					
CR = ๐.๐๒๐							

7. ข้อมูลชุดหิน เป็นข้อมูลราสเตอร์ที่แสดงชนิดหิน คุณลักษณะและคุณสมบัติของหินในพื้นที่ศึกษา โดยข้อมูลชั้นหินถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ PTrv, Jpk, JKpw และอื่น ๆ

8. ข้อมูลระยะห่างจากทางน้ำ จัดทำขึ้นจากข้อมูลเวกเตอร์ของแม่น้ำในประเทศไทยและนำมาจัดกลุ่มใหม่ตามระยะบัฟเฟอร์ (Buffer) ครอบคลุมข้อมูลเส้นแม่น้ำ

9. ข้อมูลระยะห่างจากถนน จัดทำขึ้นจากข้อมูลเวกเตอร์ของเส้นถนนและนำมาจัดกลุ่มใหม่ตามระยะบัฟเฟอร์ (Buffer) เพื่อสร้างพื้นที่ตัวแทนความใกล้เคียงจากแนวเส้นถนน

10. ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี ถูกคำนวณขึ้นจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรวมต่อปี โดยชั้นข้อมูลปัจจัยปริมาณน้ำฝนจะใช้การประมาณค่าช่วงแบบ IDW (Inverse Distance Weight)

4.2 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

ในการศึกษานี้ได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) โดยปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยที่ถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ศึกษาจะถูกนำมาเปรียบเทียบความสำคัญเป็นรายคู่ (Pairwise comparison) ในตารางเมตริกซ์ตามวิธีการของ Saaty (1980) [16] โดยผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 10 ท่าน ประกอบไปด้วยนักวิจัยที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับดินถล่ม และนักวิชาการที่มีหน้าที่ดูแลกำกับติดตามเกี่ยวกับดินถล่มในพื้นที่ จากนั้นค่าคะแนนจะถูกนำมาคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยเพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย และมีการคำนวณหาค่าความสอดคล้องกัน (Consistency Ratio; CR) เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกันของปัจจัยที่ถูกเปรียบเทียบเป็นคู่โดยผู้เชี่ยวชาญว่ามีความสมเหตุสมผลหรือไม่

หาค่า CR มีค่ามากกว่า 10 % แสดงว่าไม่มีความสอดคล้องกันของการเปรียบเทียบเชิงคู่ของแต่ละปัจจัย ต้องมีการทบทวนและปรับแก้ใหม่

4.3 การประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม

ในการประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มสามารถทำได้โดยคำนวณหาค่าดัชนีพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม (Landslide Susceptibility Index) โดยใช้สมการที่ 1 ซึ่งคำนวณได้จากการนำผลรวมของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการคูณค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยหลักกับปัจจัยย่อยในแต่ละชั้นข้อมูลราสเตอร์มาซ้อนทับกัน (Overlay) จากนั้นทำการจัดกลุ่มข้อมูลดัชนีพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มโดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นช่วงเท่า ๆ กันตามจำนวนระดับของพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม ซึ่งในการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็น 5 ระดับ คือ พื้นที่อ่อนไหวสูงสุด สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำสุด

$$LSI = \sum_{i=1}^n (Wi \times Ri) \quad (1)$$

เมื่อ LSI = ดัชนีพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม

W = ค่าน้ำหนักของปัจจัยหลัก

R = ค่าน้ำหนักของปัจจัยย่อย (หรือค่าคะแนนลำดับความสำคัญของปัจจัยย่อย)

n = จำนวนปัจจัยทั้งหมด

4.4 การประเมินความถูกต้อง

แผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มจะถูกตรวจสอบกับตำแหน่งหรือบริเวณที่เคยเกิดดินถล่ม ซึ่งส่วนใหญ่จะได้จากการสำรวจข้อมูลภาคสนามและการสำรวจพื้นที่ผ่านภาพถ่ายจากดาวเทียมความละเอียดสูง ในการศึกษานี้ได้มีการประเมินโดยการซ้อนทับแผนที่กับตำแหน่งของพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มในบริเวณพื้นที่ศึกษาว่ามีความถูกต้องหรือไม่และ

คำนวณหาค่าความถูกต้องโดยใช้การตรวจสอบแบบ Confusion matrix เพื่อหาค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) และใช้ Kappa coefficient เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ในการแสดงระดับความถูกต้องระหว่างข้อมูลที่ใช้ในการอ้างอิงบริเวณพื้นที่เคยเกิดดินถล่มในอดีตและข้อมูลที่ได้จากการประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม

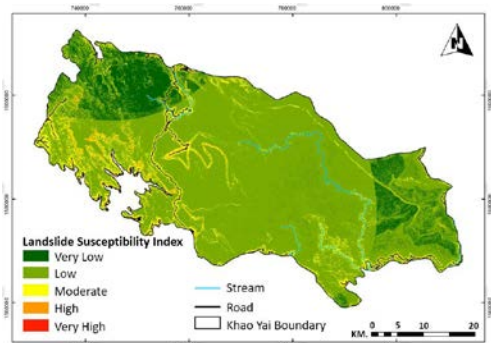
5. ผลการศึกษาและวิจารณ์

5.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่ม

ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ศึกษา พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ศึกษามากที่สุดคือ ความลาดชัน รองลงมา ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ระยะห่างจากถนน ความสูงภูมิประเทศ ระยะห่างจากทางน้ำ ชุดหิน ทิศทางของพื้นผิวลาดชัน สิ่งปกคลุมดิน ความโค้งของผิวหน้าภูมิประเทศ และดัชนีความชื้นที่สัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ โดยมีค่าถ่วงน้ำหนักอยู่ที่ 0.294, 0.195, 0.165, 0.075, 0.064, 0.059, 0.045, 0.040, 0.035 และ 0.027 ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบอัตราส่วนความสอดคล้องกันของการเปรียบเทียบเชิงคู่ของแต่ละปัจจัยกับค่าน้ำหนัก พบว่า ค่า CR ของทุกปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยมีค่าน้อยกว่า 0.10 (ตารางที่ 1) แสดงว่าค่าปัจจัยทั้งหมดมีความสอดคล้องกันและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม

5.2 พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม

จากการศึกษาพบว่าดัชนีความอ่อนไหวต่อการเกิดแผ่นดินถล่มในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ อยู่ในช่วง 0.05-0.37 และเมื่อนำช่วงค่าดังกล่าวมาแบ่งช่วงตามระดับพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินถล่มต่ำสุดมีจำนวนพื้นที่ทั้งหมด 269.89



รูปที่ ๒ แผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

ตร.กม. คิดเป็นร้อยละ 12.35 พบกระจายอยู่เฉพาะในบริเวณทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือและทิศตะวันออก โดยมีลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันต่ำ ($<20^\circ$) มีระยะห่างออกไปจากเส้นทางถนนและเส้นทางเดินน้ำ (>1000 ม.) ความสูงของภูมิประเทศอยู่ที่ <700 ม. และมีปริมาณฝนต่ำที่สุด (<2000 มม./ปี) พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดดินถล่มต่ำเป็นพื้นที่ที่พบมากที่สุด มีจำนวนพื้นที่ 1681.07 ตร.กม. คิดเป็นร้อยละ 76.94 พบกระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นที่ศึกษา พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันต่ำ ($<20^\circ$) มีระยะห่างจากเส้นทางถนนและเส้นทางน้ำมากกว่า 1000 ม. ความสูงของภูมิประเทศอยู่ที่ <700 ม. มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในพื้นที่มากกว่า 1800 มม. และเป็นพื้นที่ป่าไม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ พื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับปานกลางมีจำนวนพื้นที่ทั้งหมด 218.36 ตร.กม. คิดเป็นร้อยละ 9.99 ซึ่งจะพบหนาแน่นในพื้นที่รอบ ๆ เส้นทางถนนและเส้นทางน้ำในระยะห่างมากกว่า 200 ม. และมีความลาดชันสูง ความสูงของภูมิประเทศ ไม่เกิน 800 ม. มีปริมาณฝนเฉลี่ยในพื้นที่มากกว่า 2000 มม./ปี สำหรับพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มระดับสูงสุดและระดับสูง มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 0.31 ตร.กม. และ 15.23 ตร.กม. คิดเป็นร้อยละ 0.01 และ 0.70 ตามลำดับ พื้นที่ส่วนใหญ่จะอยู่รอบ ๆ บริเวณเส้นทางถนนและ

เส้นทางน้ำ (≤ 200 ม.) มีลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันสูง (>40 องศา) ความสูงภูมิประเทศต่ำกว่า 800 ม. และมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยค่อนข้างมากในพื้นที่ (>2000 มม./ปี) และพื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นพื้นที่โล่งหรือสันเขา มีต้นไม้ปกคลุมน้อย

5.3 การตรวจสอบความถูกต้อง

การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มได้มีการประยุกต์ใช้ Confusion matrix เพื่อคำนวณหาค่าความถูกต้องโดยรวม และสัมประสิทธิ์แคปปา โดยการเปรียบเทียบข้อมูลพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มในอดีตและพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มที่ได้จากการประเมินครั้งนี้พบว่า การประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มมีค่าความถูกต้องโดยรวมเท่ากับร้อยละ 85.37 และมีค่าสัมประสิทธิ์แคปปาเท่ากับ 0.71 แสดงว่าพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มที่ได้จากการประเมินมีความถูกต้องอยู่ในระดับสูง และมีความสอดคล้องกันของข้อมูลพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มที่ได้จากการประเมินและพื้นที่ที่เคยเกิดเหตุการณ์ดินถล่มในอดีตอยู่ในระดับปานกลาง ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม

Predicted data	Reference data	
	Non-Landslide areas	Landslide areas
No susceptible areas	18	4
Susceptible areas	2	17
Total	20	21
Overall accuracy	85.37%	
Kappa coefficient	0.71	

6. สรุปและอภิปรายผล

ดินถล่มนับเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่สร้างความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และการจัดทำแผนที่พื้นที่อ่อนไหวหรือเสี่ยงภัยดินถล่มยังคงเป็นที่ต้องการของหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องต่อการวางแผนหาแนวทางแก้ไขเพื่อลดความรุนแรงของเหตุการณ์มาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงยังคงเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจในกลุ่มนักวิจัยที่พยายามพัฒนางานวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง

ในการศึกษาวิธี AHP ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ประเมินและจัดทำแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ร่วมกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่ม ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ความลาดชัน ปัจจัยรองลงมา ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี ระยะห่างจากถนน ความสูงภูมิประเทศ ระยะห่างจากทางน้ำ ชันหิน ทิศทางของพื้นผิวลาดชัน สิ่งปกคลุมดิน ความโค้งของผิวน้ำภูมิประเทศ และดัชนีความชื้นที่สัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกับการศึกษาในอดีตในหลาย ๆ พื้นที่ทั้งในและต่างประเทศ โดยปัจจัยความลาดชัน ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี ระยะห่างจากถนน และความสูงภูมิประเทศ ถือเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดินถล่ม [17]-[20] โดยพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงเมื่อได้รับน้ำฝนในปริมาณมากอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จะทำให้ดินบริเวณดังกล่าวอิ่มตัวและมีน้ำหนักมากขึ้นจนขาดความสมดุลจนก่อให้เกิดการไหลหรือถล่มของดินจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ และเมื่อประเมินหาพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่การศึกษาพบว่า พื้นที่ที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มระดับสูงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันสูงและมี

ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยค่อนข้างสูงในพื้นที่ อยู่รอบ ๆ บริเวณเส้นทางถนน/ทางน้ำ สำหรับความถูกต้องของการประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในการศึกษานี้มีความถูกต้องโดยรวมของการประเมินร้อยละ 85.37 ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของแผนที่พื้นที่ที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและการตัดสินใจในการเฝ้าระวังและเตรียมการรับมือสำหรับเหตุการณ์ดินถล่มที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่และกรมทรัพยากรธรณีในการให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ จนทำให้การศึกษานี้สำเร็จลุล่วง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Shahabi and M. Hashim, "Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-based Statistical Models and Remote Sensing Data in Tropical Environment," *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 9899, pp. 1 - 15, 2015.
- [2] A. Wubalem, "Landslide Susceptibility Mapping Using Statistical Methods in Uatzau Catchment Area, Northwestern Ethiopia," *Geoenvironmental Disasters*, vol. 8, no. 1, pp. 1 - 21, 2021.
- [3] K. Suk-ueng, B. Phrommarat, S. Nanglae, T. Changruengnam, and S. Sudsanit, "Mapping of Landslide Susceptibility Area Using Geographic Information System and Logistic Regression Model with Environmental Factors: A Case Study of Ban Nanglae Nai, Muang District, Chiang Rai Province," *Veridian E-J. Sci. Technol. Silpakorn Univ.*, vol. 4, no. 6, pp. 1 - 10, 2017.
- [4] A. Abay, G. Barbieri, and K. Woldearegay, "GIS-based Landslide Susceptibility Evaluation Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach: The Case of Tarmaber District, Ethiopia," *Momona Ethiop. J. Sci.*, vol. 11, no. 1, p. 14, 2019.
- [5] Y. Achour, A. Boumezbeur, R. Hadji, A. Chouabbi, V. Cavaleiro, and E. A. Bendaoud, "Landslide Susceptibility Mapping Using Analytic Hierarchy Process and Information Value Methods Along a Highway Road Section in Constantine, Algeria," *Arab. J. Geosci.*, vol. 10, pp. 1 - 16, 2017.
- [6] N. Rakkapao, P. Plodpai, K. Boonma, and P. Wimonson, "Landslide Risk Assessment Using Geographic Information System: A Case Study of Phanom District, Surat Thani Province, Thailand," *J. Spat. Innov. Dev.*, vol. 1, no. 1, pp. 74 - 82, 2020.
- [7] M. Mehrabi and H. Moayed, "Landslide Susceptibility Mapping Using Artificial Neural Network Tuned by Metaheuristic Algorithms," *Environ. Earth Sci.*, vol. 80, no. 804, pp. 1-20, 2021.
- [8] D. Schulz, H. Yin, B. Tischbein, S. Verleysdonk, R. Adamou, and N. Kumar, "Land Use Mapping Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series in a Heterogeneous Landscape in Niger, Sahel," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 178, pp. 97 - 111, 2021.
- [9] C. J. van Westen, E. Castellanos, and S. L. Kuriakose, "Spatial Data for Landslide Susceptibility, Hazard, and Vulnerability

- Assessment: An Overview,” *Eng. Geol.*, vol. 102, no. 3 - 4, pp. 112 - 131, 2008.
- [10] P. Pradabmook and T. Laosuwan, “The Integration of Geo-informatics Technology with Universal Soil Loss Equation to Analyze Areas Prone to Soil Erosion in Nan province,” *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 16, no. 8, pp. 823 - 830, 2021.
- [11] E. Psomiadis, A. Papazachariou, K. X. Soulis, D. S. Alexiou, and I. Charalampopoulos, “Landslide Mapping and Susceptibility Assessment Using Geospatial Analysis and Earth Observation Data,” *Land*, vol. 9, p. 133, 2020.
- [12] J. Brock, P. Schratz, H. Petschko, J. Muenchow, M. Micu, and A. Brenning, “The Performance of Landslide Susceptibility Models Critically Depends on the Quality of Digital Elevation Models,” *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, vol. 11, no. 1, pp. 1075 – 1092, 2020.
- [13] Z. Chen, F. Ye, W. Fu, Y. Ke, and H. Hong, “The Influence of DEM Spatial Resolution on Landslide Susceptibility Mapping in the Baxie River Basin, NW China,” *Nat. Hazards*, vol. 101, pp. 853 - 877, 2020.
- [14] J. Roy and S. Saha, “Landslide Susceptibility Mapping Using Knowledge Driven Statistical Models in Darjeeling District, West Bengal, India,” *Geoenvironmental Disasters*, vol. 6, no. 11, pp. 1–18, 2019.
- [15] P. Jeefoo, N. Sangnoppakun, and R. Thongouam, “Assessment of Wildfire Risk Zonation Using Analytical Hierarchical Process in Phayao Province,” *J. Spat. Innov. Dev.*, vol. 2, no. 2, pp. 52-64, 2021.
- [16] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, Ed., New York, NY, USA: Scientific Research Publishing, 1980.
- [17] A. E. Jazouli, A. Barakat, and R. Khellouk, “GIS-multicriteria Evaluation Using AHP for Landslide Susceptibility Mapping in Oum Er Rbia High Basin (Morocco),” *Geoenvironmental Disasters*, vol. 6, no. 3, pp. 1 - 12, 2019.
- [18] N. Yossanthia, A. Tangsiriwattanawong, A. Thamboon, K. Khueabsungnoen, and J. Som-ard, “Analyzing the Villages into Landslide Risk Area in Loei Province,” in *The 13th Mahasarakham Univ. Res. Conf.*, 2017, pp. 598 – 609.
- [19] I. Sonker, J. N. Tripathi, and A. K. Singh, “Landslide Susceptibility Zonation Using Geospatial Technique and Analytical Hierarchy Process in Sikkim Himalaya,” *Quat. Sci. Adv.*, vol. 4, pp. 1 - 17, 2021.
- [20] P. Khiaosalab and P. Tongdeenok, “Application Techniques Analytic Hierarchy Process and Geographic Information System Comparison Susceptible Landslide Area in Huai Mae Saroi Watershed, Phrae Province and Khlong Tha Thon Watershed, Nakhon Si Thammarat Province,” *KKU Res. J. Grad. Stud.*, vol. 15, no. 1, pp. 63 – 79, 2015.

การออกแบบและการหาค่าที่เหมาะสม ทางอากาศพลศาสตร์ของจรวด DTI ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ในย่านความเร็วเหนือเสียง โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

วันชัย เจียจันทร์^{1*} และ เอกพล ไบโพธิ์¹

วันที่รับ 1 กันยายน 2565 วันที่แก้ไข 7 ตุลาคม 2565 วันที่ตอบรับ 13 ตุลาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตของจรวด DTI-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U โดยใช้โปรแกรม CFD และออกแบบหัวรบจรวด โดยใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด Optimization Method เพื่อเพิ่มสมรรถนะระยะยิงหัวงผล ในย่านความเร็วเหนือเสียง (มัก 1.5-4) จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะอากาศที่ได้จากการคำนวณพบว่า ผลลัพธ์ของค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CFD และการทดสอบอุโมงค์ลม มีความสอดคล้องใกล้เคียงกันคือ มีความแตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิต และไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์พลวัต ตลอดทุกค่าความเร็วที่ทำการศึกษา แสดงให้เห็นถึงความเชื่อถือได้ของค่าความถูกต้องของการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรม CFD จากผลลัพธ์ออกแบบจรวดอากาศใหม่โดยใช้วิธี Optimization ควบคู่กับการใช้โปรแกรม CFD พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้คือ รูปแบบหัวรบจรวดที่ออกแบบใหม่ มีสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับจรวดที่นำมาศึกษาที่ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของหัวรบที่ออกแบบใหม่ โดยใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมมีค่าลดลงเฉลี่ยโดยประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น จากผลลัพธ์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการเพิ่มสมรรถนะในระยะยิงหัวงผลของจรวดที่ออกแบบหัวรบใหม่ได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ : อากาศพลศาสตร์, จรวด, ความเร็วเหนือเสียง, โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

¹ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

* ผู้แต่ง, อีเมล: aerowanchai@gmail.com

Aerodynamics Design and Optimization of Supersonic 122 mm DTI Rocket by Using Computational Fluid Dynamics

Wanchai Jiajan^{1*} and Aekkapol Baipho¹

Received 1 September 2022, Revised 7 October 2022, Accepted 13 October 2022

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the static and dynamic coefficients of the 122 mm DTI-2 rocket with MRV-U warhead by using Computational Fluid Dynamics (CFD). Optimization method is also employed to design the warhead of DTI-2 rocket for enhancing the range performance in supersonic regimes (Mach 1.5 - 4). The analysis results show that the static and dynamic coefficients are agreed well with the available wind tunnel data. They are within 10% and 15% for static and dynamic coefficients, respectively throughout the whole range of operating Mach number. For the optimization processes coupled with CFD simulation, the optimization result shows that the new warhead design provides lower drag results when compared with the benchmark MRV-U warhead, while remains statically and dynamically stable. The optimum design total drag is reduced about 6%. The reduced drag can be clearly representing the possibility of enhancing the range performance of the optimum design.

Keywords : Aerodynamics, Computational fluid dynamics, Supersonic, Fin-stabilized rocket

¹ Education Division, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force

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

1. บทนำ

ตามนโยบายยุทธศาสตร์ชาติไทยรวมไปถึงยุทธศาสตร์กองทัพไทยที่มีนโยบายให้พัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเพื่อการพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืนโดยเน้นการเสริมสร้างคุณภาพด้านการพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ การดำเนินงานด้านวิจัยและพัฒนาการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์เป็นส่วนหนึ่งในนโยบายที่สนับสนุนให้บรรลุวิสัยทัศน์ของกระทรวงกลาโหม โดยเน้นให้มีการดำเนินงานตามแผนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจุดประสงค์หลักในการวิจัยและพัฒนาด้านอาวุธ ได้แก่ การออกแบบและสร้างรูปแบบอาวุธให้มีศักยภาพสูงสุดเพื่อสนับสนุนภารกิจที่หลากหลายในทางทหาร

โดยทั่วไปอาวุธยุทโธปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในกองทัพไทยเป็นส่วนหนึ่งของวัตถุที่ถูกออกแบบให้เคลื่อนที่ในย่านความเร็วเหนือเสียง ยกตัวอย่างเช่นจรวด (Rocket) ลูกกระสุนปืนใหญ่ที่นำวิถีและไม่นำวิถี (Guided and Unguided Projectile) [1] เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันจรวดนำวิถีและไม่นำวิถี ลูกกระสุนปืนใหญ่และปืนเล็กที่ใช้ในภารกิจของกองทัพไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ ถึงแม้ว่าได้มีการผลิตเพื่อนำมาใช้เองภายในกองทัพ อาทิเช่น กระสุนปืนและจรวด เป็นต้น

งานวิจัยและพัฒนาด้านจรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในภารกิจโจมตีแบบภาคพื้นสู่พื้น หรือ Surface to Surface เป็นหนึ่งในตัวอย่างการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่เน้นการพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืนซึ่งณปัจจุบันอยู่ในขั้นตอนการวิจัยและพัฒนา รวมถึงการทดสอบใช้งานโดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ [2] ซึ่งจากงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวยังสามารถต่อยอดขยายผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยี โดยการพัฒนาออกแบบต่อยอดเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านระยะยิงหวังผลของจรวดที่มากขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิจัยพัฒนาในครั้งนี้สามารถ

นำมาเป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาจรวดต้นแบบขนาดต่าง ๆ ของกองทัพ เพื่อรองรับการสนับสนุนในการกิจระดับยุทธวิธีและยุทธการต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและพัฒนาออกแบบรูปแบบของกระสุนและจรวดในการเพิ่มระยะยิงและระยะยิงหวังผลนั้น มีแนวคิดมาจากการออกแบบเพื่อลดแรงต้านทานอากาศซึ่งเป็นกุญแจสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพอาวุธยุทโธปกรณ์ โดยวิธีการเปลี่ยนลักษณะรูปทรงหรือติดตั้งอุปกรณ์ให้มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศลดลง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพของยุทโธปกรณ์เหล่านี้มีหลายวิธีการ เช่น การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Method) โดยงานวิจัยของ W. Jiajan และคณะ [4] ได้นำกระบวนการหาค่าที่ดีที่สุดมาออกแบบกระสุนปืนใหญ่ขนาด 155 มิลลิเมตรให้มีรูปทรงที่มีแรงต้านทานน้อยที่สุด โดยใช้สมการจากวิธี semi-empirical method ในการหาแรงต้านของกระสุน ซึ่งเป็น Objective function โดยมีผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถลดแรงต้านทานได้เป็นนัยสำคัญถึง 24 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดจะสามารถให้คำตอบรูปทรงที่รวดเร็ว แต่กระบวนการคำนวณแรงต้านจาก semi-empirical มีข้อจำกัดเรื่องความแม่นยำและขนาดของรูปร่างกระสุนที่นำมาศึกษา ซึ่งตรงจุดนี้จึงสามารถปรับปรุงแก้ไขให้มีความแม่นยำขึ้นได้ในงานวิจัยนี้

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจรวด A. Sumnu [3] ได้ใช้วิธี Optimization method ในรูปแบบของ Multi-objective Genetic Algorithm ผ่านโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ในการหารูปทรงจรวดที่มีค่าแรงต้านต่ำสุดในย่านความเร็วเหนือเสียง โดยมีจรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร แบบ N1G เป็นจรวดต้นแบบเพื่อใช้ในการฝึกศึกษา ผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถเพิ่ม

สมรรถนะในรูปแบบของอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้าน หรือที่เรียกว่า Aerodynamic efficiency ของจรวด ได้เป็นนัยสำคัญ ประมาณ 11-17 เปอร์เซนต์ อย่างไรก็ตาม กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมโดยผ่าน โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลนี้ยังมีข้อจำกัด ด้านเวลาและทรัพยากรในการคำนวณค่อนข้างสูง

สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมอีกรูปแบบหนึ่ง ในการออกแบบเพื่อลดแรงต้านคือการลดแรงต้าน จากส่วนท้าย หรือที่เรียกว่า Base drag โดยการออกแบบรูปทรงของกระสุนในส่วนท้ายใหม่ ให้มีความโค้งหรือส่วนเว้าลงไป เช่น งานวิจัยของ W. Jiajan และคณะ [5] และ J. DeSpirito [6] จากการศึกษาทำให้ทราบว่า การแก้ไขรูปทรงบริเวณ ส่วนหางของกระสุนนั้นสามารถลดแรงต้านทาน ได้มากกว่า 5 เปอร์เซนต์ แต่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพ ในการเคลื่อนที่ ทำให้มีระยะยิงเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถ นำมาเป็นแบบแผนและแนวทางในการออกแบบ ให้กระสุนมีแรงต้านทานลดลง อย่างไรก็ตาม ผลการ ออกแบบดังกล่าวยังไม่ได้มีกระบวนการทดสอบ ด้วยความเร็วเหนือเสียง ซึ่งอาจทำให้ผลลัพธ์นั้นอาจจะ มีความคลาดเคลื่อน

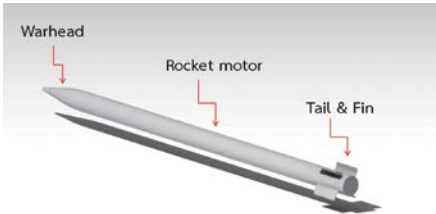
ดังนั้น จากวิธีการออกแบบอาวุธยุทโธปกรณ์ ที่กล่าวมาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในข้างต้น เพื่อเป็น การต่อยอดขยายผลงานวิจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพ ของจรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ในย่านความเร็วเหนือเสียง ให้มีระยะยิงหวังผลมากขึ้น รวมถึงเป็นการขยายองค์ความรู้ใหม่ในกระบวนการ ออกแบบรูปทรงจรวดที่มีแรงต้านต่ำ ในขณะที่ ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ตลอดย่าน การไหลความเร็วเหนือเสียงในงานวิจัยนี้ จึงเสนอ การประยุกต์ใช้วิธี Optimization method ในรูปแบบ Active Set Algorithm: Medium-Scale Optimization and Sequential Quadratic Programming (SQP) [7] โดยมีสมการเป้าหมาย คือ สมการการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้าน McCoy's

Semi-Empirical Method [8] เพื่อแก้ปัญหาด้าน ระยะเวลาในการคำนวณและความแม่นยำในการ คำนวณแรงต้านได้อย่างถูกต้อง นอกเหนือจากนี้ ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องศึกษาและวิเคราะห์หาค่า คุณสมบัติอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตของ จรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ในย่านความเร็วเหนือเสียง โดยใช้โปรแกรม CFD เพื่อให้ได้มาซึ่งฐานข้อมูลที่ต้องการและเป็นประโยชน์ ในการออกแบบจรวดใหม่ที่มีสมรรถนะสูงขึ้น

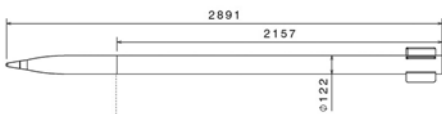
2. ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกจรวด DTI-2 [2] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 มาเป็นกรณีศึกษาในการหาค่าคุณสมบัติอากาศ พลศาสตร์สถิตและพลวัต โดยใช้โปรแกรม CFD เนื่องจากมีฐานข้อมูลค่าคุณสมบัติอากาศพลศาสตร์ ในย่านความเร็วเหนือเสียง ได้จากการทดลองใน อุโมงค์ลม (Wind Tunnel Testing) ในเงื่อนไข การทดสอบตั้งแต่ Mach 1.5-4 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของโปรแกรม CFD นอกจากนี้ยังใช้เป็น Benchmark model ในการออกแบบใหม่ เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในระยะยิงหวังผลโดยใช้ Optimization method ซึ่งรูปร่างจรวดที่นำมาศึกษาประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก (ดังรูปที่ 1) ได้แก่ 1) ส่วนหัวรบ (Warhead) 2) ส่วนลำตัวและขับเคลื่อน (Rocket Motor) และ 3) ส่วนหาง (Tail and Fins) ซึ่งส่วน หัวรบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เลือกหัวรบแบบ MRV-U ซึ่งมีลักษณะรูปร่างผสมผสานระหว่าง Secant Ogive โปรไฟล์ สำหรับลำตัวจรวดมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ความยาวตลอด ทั้งลำตัวของจรวดเมื่อติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U มีความยาว 2.891 เมตร ดังรูปที่ 2 ยิ่งไปกว่านั้น จรวดประเภทนี้ใช้ส่วนหาง (Tail) เพื่อควบคุม เสถียรภาพ (Fin-Stabilized Rocket) โดยลักษณะ ของส่วนหางจะมีลักษณะหางโค้งหรือที่เรียกว่า

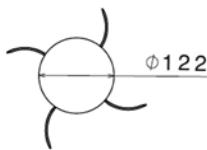
Wrapped Around Fins โดยชุดหางสามารถกางออกได้แบบอัตโนมัติ (Folding Fins) หลังจากทำการปล่อยยิง ดังรูปที่ 3



รูปที่ ๑ รูปร่างลักษณะของจรวด DTI-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ที่บรรจุหัวรบ MRV-U



รูปที่ ๒ ขนาดรูปร่างของจรวด DTI-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ที่บรรจุหัวรบ MRV-U (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)



รูปที่ 3 ลักษณะด้านท้ายลำตัวของรูปร่างลักษณะของจรวด DTI-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ที่มีหางโค้ง หรือ Wrapped around Fin (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

จากข้อมูลอ้างอิง การทดลองการยิงของจรวด DTI-2 [2] พบว่าจรวดมีระยะยิงหวังผลประมาณ 40,000 เมตร หรือ 40 กิโลเมตร และมีความเร็วปล่อยยิงคือ มัค 2.2 และมีความเร็วอยู่ในช่วง มัค 0.7 ถึง มัค 3.3 ซึ่งการยิงในระยะแรกความเร็วของจรวดยังเป็นความเร็วเหนือเสียงและมีความเร็วส่วนใหญ่ในการเดินทางถึงเป้าหมายของจรวด ซึ่งช่วงความเร็วย่านนี้ก่อนเข้าสู่ย่าน Transonic เป็นช่วงที่มีความสำคัญยิ่งต่อค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ โดยเฉพาะ

อย่างยิ่งแรงต้านที่เกิดขึ้นกับตัวจรวด หากจรวดที่ถูกปล่อยยิงในย่านความเร็วเหนือเสียงนี้เกิดจากการออกแบบเป็นอย่างดี จรวดสามารถลดแรงต้านได้เป็นอย่างดีตั้งแต่เมื่อเริ่มปล่อยยิง ระยะยิงหวังผลที่ได้จะเพิ่มขึ้นเป็นหลายเท่าตัว จึงเป็นเหตุผลสำคัญของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ซึ่งได้มีการกำหนดขอบเขตการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของจรวดไว้ในย่านความเร็วเหนือเสียงเท่านั้น

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของจรวดอากาศโดยใช้โปรแกรม CFD

ในงานวิจัยนี้ จรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร จะถูกคำนวณเพื่อหาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิต และพลวัต (Static/Dynaimic coefficients) โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในรูปแบบของ Finite Volume Method ซึ่งใช้โปรแกรม Ansys Fluent CFD [9] โปรแกรมนี้ใช้นำไปแก้สมการจำลองการไหลของกระแสอากาศแบบของเทอร์บูเลนต์ Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation (RANS) ซึ่งเป็นการไหลในย่านความเร็วเหนือเสียง และการไหลมีการอัดตัว (Compressible Flow)

ในงานวิจัยนี้ค่าอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตถูกคำนวณในการไหล 3 มิติ (3D-solver) เพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางถ่วงของจรวดอากาศในมุมปะทะต่าง ๆ มากกว่านั้นผลกระทบของการหมุนรอบแกนลำตัวต่อค่าอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตในรูปแบบ 3 มิติ (effect of spinning motion) ยังพิจารณาในงานวิจัยนี้ด้วยเช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้การแพร่ของอากาศถูกจัดรูปใหม่โดยใช้วิธีแบบ Roe's upwind flux splitting method ค่าความแม่นยำแบบ second order accuracy และส่วน Viscous fluxes ในสมการ RANS ถูกจัดรูปใหม่โดยใช้วิธีแบบ central

difference method ท้ายที่สุดรูปแบบใหญ่ของทั้งระบบสมการจะแก้ในรูปแบบของ Implicit Scheme ซึ่งมีข้อดีโดยไม่ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของการคำนวณเชิงตัวเลข Unconditional stability เพื่อแก้สมการทั้งระบบ รูปแบบของเทอร์บูเลนต์ที่ถูกเลือกจะต้องให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบการไหล เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการคำนวณหาค่าอากาศพลศาสตร์ โดยเฉพาะในชั้นขีตผิวแบบเทอร์บูเลนต์ turbulent boundary layer ซึ่งมีความซับซ้อนมากไปกว่านั้น รูปแบบการไหลวนของอากาศที่เกิดขึ้นบนจรวด Circulation flow ที่ถูกต้องยังขึ้นอยู่กับ การเลือกชนิดของรูปแบบของเทอร์บูเลนต์ด้วย

ในงานวิจัยได้เลือกใช้รูปแบบเทอร์บูเลนต์ (Turbulent Model) แบบ (SST) k- ω [10] เนื่องจากเทอร์บูเลนต์โมเดลนี้ได้รับการยอมรับจาก NASA ว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูงในหลายชนิดของการไหล โดยเฉพาะการไหลที่มีความดันย้อนกลับสูง (strong adverse pressure gradient) การไหลแยกตัวของอากาศ (flow separations) และการไหลในชั้นขีตผิว (boundary layer) เป็นต้น นอกจากนี้ เทอร์บูเลนต์โมเดลชนิดนี้เป็นแบบลูกผสม ซึ่งได้ถูกออกแบบจากการนำเอาข้อดีระหว่างเทอร์บูเลนต์โมเดลแบบ standard k- ω และเทอร์บูเลนต์โมเดลแบบตระกูล k- ϵ กล่าวคือ เทอร์บูเลนต์โมเดลแบบ standard k- ω แก้ปัญหาการไหลได้ดีในชั้นขีตผิว และข้อดีของเทอร์บูเลนต์โมเดลแบบตระกูล k- ϵ สามารถแก้ปัญหาได้ดีในชั้นการไหลนอกชั้นขีตผิวนั้นเป็นเหตุผลว่าทำไมเทอร์บูเลนต์โมเดลชนิดนี้ถึงได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง

3.2 การคำนวณหาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์พลวัต Pitch Damping Moment Coefficient และ Roll Damping Moment Coefficient

สำหรับการคำนวณหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์พลวัต ในงานวิจัยได้ดำเนินการ

คำนวณค่า Pitch Damping Moment Coefficient โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยอ้างอิงจากวิธี Steady Luna Coning Methodology ของ P. Weinacht [11] โดยใช้สมการในการคำนวณดังสมการที่ (1)

$$C_n = \delta(\dot{\phi}d/2V) [C_{m_q} + \gamma C_{m_{\dot{\alpha}}}] \quad (1)$$

โดยที่

$C_{m_q} + \gamma C_{m_{\dot{\alpha}}}$	= Pitch-damping moment coefficient, $(2U_\infty/D)(\partial C_m/\partial \dot{\alpha})$
C_n	= Yawing moment coefficient
δ	= Sine of total angle of attack
γ	= Cosine of total angle of attack
D, d	= Body diameter (m)
V, U_∞	= Free stream velocity (m/s)
ϕ	= Coning rate (rad/s)

สำหรับการคำนวณหาค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์พลวัตของค่า Roll Damping Moment Coefficient สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$C_{l_p} = 2 \frac{\partial C_l}{\partial p^*} \quad (2)$$

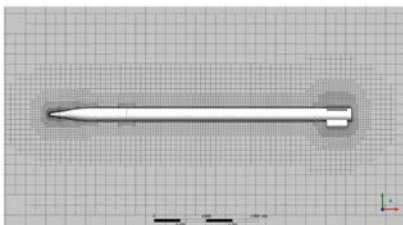
โดยที่

C_{l_p}	= Roll-damping moment coefficient, $(2U_\infty/D)(\partial C_l/\partial p^*)$
p^*	= Nondimensional roll rate, pD/U_∞

3.2.1 การสร้างรูปแบบตาข่ายรอบอากาศยาน (Grid generations)

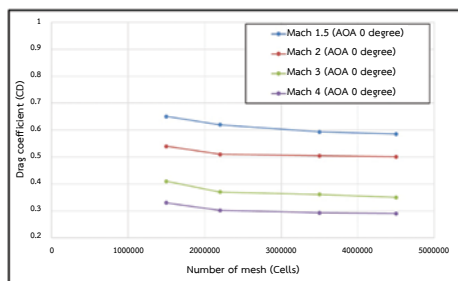
เพื่อแก้สมการเชิงตัวเลขของสมการ RANS รูปแบบตาข่ายที่เป็นระเบียบ (Structured Mesh) ได้ถูกสร้างรอบตัวของจรวดอากาศโดยใช้โปรแกรม Ansys Meshing ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 จากรูปนี้

แสดงให้เห็นว่า รายละเอียดความหนาแน่นของตาราง จะอยู่บริเวณรอบลำตัวของจรวดอากาศและบริเวณ ใกล้ชั้นขีตผิว ทั้งนี้ เพื่อสามารถคำนวณรายละเอียด ของกระแสอากาศไหลวนที่ท้ายของจรวดอากาศ และสามารถคำนวณรายละเอียดของชั้นขีตผิวแบบ เทอร์บูเลนซ์ได้ โดยเฉพาะรายละเอียดของ Laminar Sub Layer ที่อยู่ในชั้นขีตผิวซึ่งมีความยากและซับซ้อน ที่จะคำนวณโดยละเอียด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ค่า ความถูกต้องของชั้นขีตผิวมีความแม่นยำมากขึ้น โดยใช้เทอร์บูเลนซ์ SST k- ω ดังกล่าวในเบื้องต้น ค่า y+ ที่คำนวณได้จะต้องถูกกำหนดให้มีค่าตามเงื่อนไข y+<2 ดังนั้น ความห่างของรูปแบบตาข่าย หรือ เซลล์ (Cells) ในชั้นแรกที่ติดกับผิวอากาศยานจะต้องมีค่า ประมาณ 10^{-5} mm และสำหรับชั้นต่อไปของ Cells จะมีอัตราส่วนการยืดออก (Stretching Ratio) ประมาณ 1.25 ระยะห่างของระยะจากขอบเขตการไหลเข้า ของอากาศ (Inflow) ถึงส่วนหน้าของจรวดอากาศ ระยะจากท้ายอากาศยานถึงขอบเขตการไหลออก ของอากาศ (Outflow) และระยะจากผิวลำตัว อากาศยานถึง Boundary ประมาณ 10 เท่าของ ความยาวคอर्डเนตเฉลี่ย ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

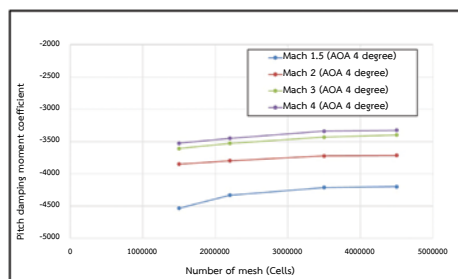


รูปที่ ๔ การสร้างรูปแบบตาข่ายบนจรวด DTI-2

โดยเป็นที่ทราบว่าจำนวนเซลล์ในการสร้าง ตารางมีผลกระทบกับผลลัพธ์ของโปรแกรม CFD ดังนั้น เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่ถูกต้องแม่นยำโดยผลลัพธ์ ไม่มีการแปรผันตามจำนวนเซลล์ จึงดำเนินการศึกษา ความละเอียดของจำนวนเซลล์ที่มีผลต่อผลลัพธ์ CFD (Grid resolution study) ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ ๕ ผลลัพธ์การศึกษาความละเอียดของจำนวนเซลล์ ต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน



รูปที่ ๖ ผลลัพธ์การศึกษาความละเอียดของจำนวนเซลล์ ต่อค่า Pitch damping moment coefficient

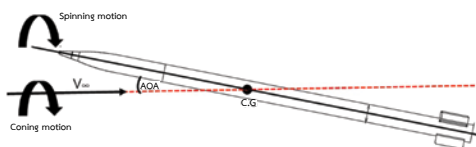
จากรูปที่ 5 และ 6 จะพบว่าจำนวนเซลล์ 3,500,000 เซลล์ มีค่าความถูกต้องเพียงพอต่อการคำนวณทั้งในส่วนของคุณลักษณะอากาศ พลศาสตร์สถิตและพลวัต ซึ่งจะถือได้ว่าจำนวนเซลล์ ไม่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ CFD อีกต่อไป ถึงแม้ว่า จะมีการเพิ่มจำนวนเซลล์ขึ้นไปอีก ดังนั้น จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มจำนวนเซลล์อีกเพื่อให้ได้มา ซึ่งคำตอบที่ถูกต้อง

3.2.2 เงื่อนไขและขอบเขตการไหล Boundary Conditions

การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการไหลของ โปรแกรมคำนวณอากาศพลศาสตร์ โดยขอบเขต การไหลเข้าของอากาศ (Inflow) และขอบเขตการไหล ออกของอากาศ (Outflow) ถูกตั้งค่าโดยใช้อ้างอิงของ ค่ามาตรฐานของความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

ที่ระดับน้ำทะเล (101325 Pa และ 288 K) ค่า Turbulent intensity และค่าอัตราส่วนความหนืด Viscosity Ratio ที่ Inflow ถูกตั้งค่าเป็น 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ผิวของโมเดล ถูกตั้งค่าแบบความเร็วอากาศเป็นศูนย์ No-Slip Condition และอุณหภูมิผิวคงที่ Isothermal (300 K) โดยการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล สามารถแสดงได้ในตารางที่ 1

สำหรับในกรณีที่จำลองอากาศมีการหมุนรอบตัวเอง เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของจรวดอากาศในโปรแกรม CFD แบบ Moving Wall Condition ถูกตั้งค่าขึ้นให้หมุนรอบตัว Spinning Motion โดยใช้อัตราการหมุนเท่ากับ 5 รอบ/วินาที ซึ่งทิศทางการหมุนรอบตัวจรวดอากาศแสดงไว้ในรูปที่ 7 นอกจากนี้การหมุนรอบแกนขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่อากาศ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะแบบกรวย หรือ Coning motion เพื่อหาค่า Pitch Damping Moment Coefficient ดังตารางที่ 1 โดยใช้หลักการหมุนในการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล คือ Rotating Reference Frame



รูปที่ ๗ การกำหนดทิศทางการหมุนรอบตัวจรวดอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 การกำหนดเงื่อนไขของการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลของจรวด DTI-2

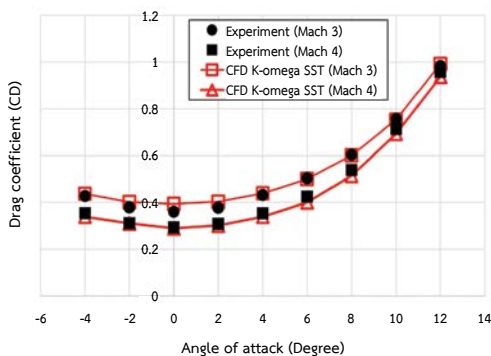
เงื่อนไขการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CFD	ค่าที่กำหนด
ความเร็วที่กำหนด (Mach Number)	Mach 1.5 - 4
ค่ามุมปะทะ	-4 ถึง 12 องศา
ค่าเลขเรย์โนลด์ (อ้างอิงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง)	$4.2 \times 10^5 - 1.1 \times 10^7$
ค่าความดันบรรยากาศ	101,325 Pa
ค่าอุณหภูมิผิว	300 K
ค่าอัตราการหมุน Coning motion	100 Hz, 200 Hz, 300 Hz

3.3 ผลการคำนวณค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัต

3.3.1 การเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าอากาศพลศาสตร์สถิตที่คำนวณจากโปรแกรม CFD กับข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของการทดสอบจริงของจรวดจากแหล่งข้อมูลอ้างอิง (Validation Study)

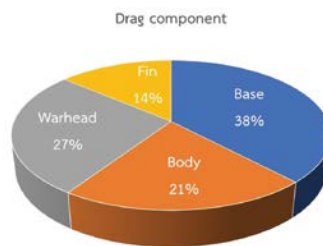
➢ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient, C_D)

จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับมุมปะทะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD กับการทดลองของจรวดที่ติดหัวรบแบบ MRV-U ในทำการการบินตั้งแต่ -4 ถึง 12 องศา ที่ความเร็ว มัค 3 และ 4 ตามลำดับ จากภาพเห็นได้ว่าผลลัพธ์ของ CFD มีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งอยู่ในระดับความเชื่อถือได้ทางวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering Accuracy) คือ มีความแตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ในตลอดทุกมุมปะทะและช่วงความเร็วที่ทำการศึกษา นอกจากนี้จากรูปนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมปะทะ โดยมีเส้นโปรไฟล์เป็นรูปพาราโบลาอย่างชัดเจน คุณลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำสุด เกิดที่มุมปะทะ 0 องศา ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของโปรไฟล์รูปแบบพาราโบลา และเป็นจุดที่มีค่าแรงยกมีค่าใกล้เคียงศูนย์โดยจุดนี้สัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าประมาณ 0.4 และ 0.3 ที่ความเร็ว มัค 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อมุมปะทะสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากความชันที่สูงขึ้นในช่วงมุมปะทะ 4 องศาขึ้นไป ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เนื่องจากการกระจายความดันข้างหน้าลำตัวและหลังลำตัวมีค่าเริ่มแตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเริ่มแยกตัวของกระแสอากาศบนลำตัว เป็นผลให้มีค่าแรงต้านเนื่องจากความดันมากขึ้น



รูปที่ ๘ กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับมุมปะทะของจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U ที่ความเร็ว มัค 3 และ 4

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์แรงต้านในส่วนต่าง ๆ ของจรวดอากาศที่ติดหัวรบแบบ MRV-U ในสภาวะการบินระดับ ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า สัมประสิทธิ์แรงต้านส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น คือ บนส่วนท้ายจรวด หรือ Base Drag ประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นแรงต้านเนื่องจากการลดลงอย่างฉับพลันของความดัน เนื่องจากการเกิด Expansion Waves ที่ส่วนท้ายจรวด และการเกิดกระแสวนด้านท้ายจรวด ในขณะที่ส่วนหัวรบของจรวดมีค่าแรงต้านในลำดับรองลงมาถึงประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนใหญ่เป็นแรงต้านเนื่องจาก Wave Drag ของการเกิด Compression shock ที่บริเวณส่วนหัวรบลำดับถัดมา คือ แรงต้านที่เกิดขึ้นบนลำตัวประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิว และสุดท้ายคือ แรงต้านที่เกิดขึ้นที่หาง โดยมีค่าประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นแรงต้านที่เกิดจาก Compression Shock เช่นเดียวกันกับส่วนหัวรบของจรวด ซึ่งข้อมูลการกระจายส่วนของแรงต้านเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาต่อยอด เพื่อเพิ่มสมรรถนะของจรวดอากาศได้ต่อไป



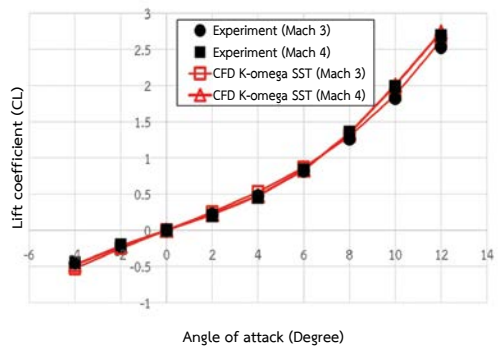
รูปที่ ๙ กราฟแสดงการกระจายแรงต้านของจรวด DTI-2 ที่ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U

➢ คำนวณพันธ์สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก (Normal Force Derivative Coefficient, C_{Na}) และ จุดศูนย์กลางความดัน (Center of Pressure)

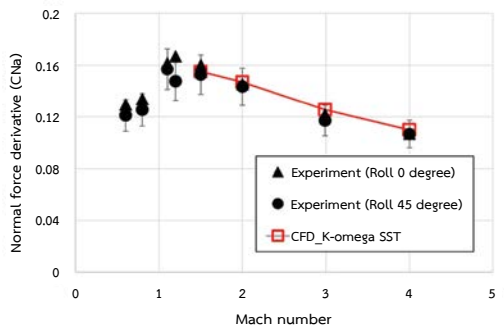
รูปที่ 10 แสดงผลลัพธ์ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะที่ได้จากโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลและการทดสอบอุโมงค์ลมของจรวดที่ติดหัวรบแบบ MRV-U ในท่าทางการบิน ตั้งแต่ -4 ถึง 12 องศา ที่ความเร็ว มัค 3 และ 4 ตามลำดับ จากภาพพบว่า ที่มุมปะทะ 0 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อมุมปะทะมีค่าสูงขึ้นในช่วงระหว่าง -4 ถึง 4 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้น ในขณะที่เมื่อมีมุมปะทะสูงขึ้นเกิน 6 องศาขึ้นไป จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้น ทั้งนี้ เนื่องจากการแยกตัวของกระแสอากาศที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไหลในช่วงมุมปะทะต่ำ

จากการเปรียบเทียบค่าของอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับแนวแกนลำตัว (Normal Force Derivative) และจุดศูนย์กลางความดัน (Center of Pressure) ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD กับการทดลองของจรวดอากาศที่ติดหัวรบแบบ MRV-U ในย่านการไหลความเร็วเหนือเสียง ตั้งแต่ มัค 1.5-4 (ค่าผลลัพธ์จากการทดสอบอุโมงค์ลม ที่ความเร็วต่ำกว่ามัค 1.5 ไม่ได้ถูกเปรียบเทียบกับ

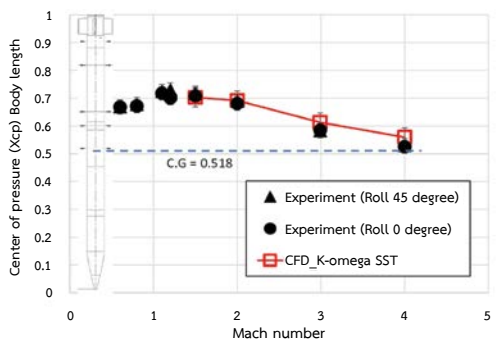
ผล CFD เนื่องจากไม่ได้อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้) ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 พบว่า ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและจุดศูนย์กลางความดัน (Center of Pressure) มีค่าความถูกต้องแม่นยำสูงมากเมื่อเทียบกับผลการทดลอง กล่าวคือ มีค่าความแตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ตลอดทุกความเร็วในย่านความเร็วเหนือเสียงที่ศึกษา ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ นอกจากนี้ทำทางการเคลื่อนที่แบบมีมุมหมุนรอบแกนลำตัวที่ค่า Roll 0 และ 45 องศา มีผลต่อค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์นี้น้อยมากอย่างไม่เป็นนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากแรงยกและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากมุมปะทะต่ำ ๆ มีผลมาจากการกระจายตัวของความดันรอบผิวจรวดอากาศโดยส่วนใหญ่ซึ่งโปรแกรม CFD จะสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และผลลัพธ์ของค่าอากาศพลศาสตร์ทั้งสองนี้ไม่มีผลกระทบน้อยมากกับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์หรือลามินาร์ นอกจากนั้น จากการวิเคราะห์เสถียรภาพสถิตเบื้องต้นในแนวแกนลำตัวของจรวดอากาศพบว่า จรวดอากาศมีจุดศูนย์กลางความดันอยู่หลังจุดศูนย์กลางของจรวดอากาศทั้งลำ ซึ่งตามทฤษฎีของจรวดเนื่องจากจรวดมีรูปลักษณะที่สมมาตรกันในเกือบทุกมิติ ทำให้จุดศูนย์กลางความดันมีค่าใกล้เคียงมากกับจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ที่ยานการบินที่มีมุมปะทะต่ำ ๆ ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าจุดศูนย์กลางความดันเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกับอากาศยานโดยทั่วไปหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือจุดศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์นั่นเอง ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าจรวดอากาศมีเสถียรภาพสถิตในแนวแกนลำตัวซึ่งสามารถสังเกตได้จากจรวดอากาศมีจุดศูนย์กลางความดันอยู่หลังจุดศูนย์กลางของจรวดทั้งลำ โดยมีระยะ Static Margin โดยเฉลี่ยประมาณ 3.55 เท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือประมาณ 0.15 เท่าของความยาวจรวด ดังปรากฏในรูปที่ 12



รูปที่ ๑๐ กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะของจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U ที่ความเร็วมาค์ 3 และ 4



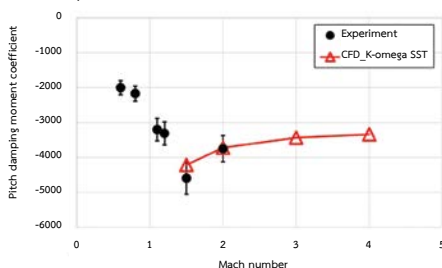
รูปที่ ๑๑ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับความเร็วจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U



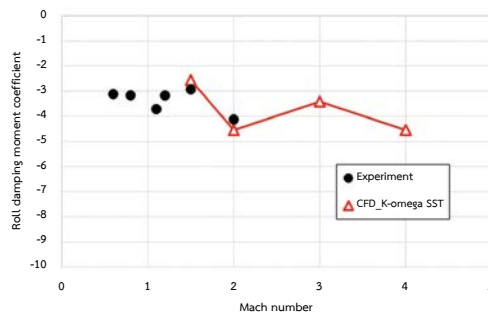
รูปที่ ๑๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดศูนย์กลางความดันกับความเร็วจรวด

3.3.2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าอากาศพลศาสตร์พลวัตที่คำนวณจากโปรแกรม CFD กับข้อมูลการทดสอบจริงของจรวดจากแหล่งข้อมูลอ้างอิง (Validation Study)

จากการดำเนินการในการคำนวณค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์พลวัตของจรวด DTI-2 โดยใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันกับหัวข้อ 3.2 สามารถแสดงผลลัพธ์การคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล ดังปรากฏในรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวแสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pitch Damping Moment Coefficient และค่า Roll Damping Moment Coefficient เทียบกับความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD ที่ความเร็วมาค์ 1.5, 2 3 และ 4 ตามลำดับ กับการทดลองของจรวด DTI-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U ที่ความเร็วมาค์ 1.5 และ 2 ตามลำดับ (ค่าผลลัพธ์จากการทดสอบอุโมงค์ลม ที่ความเร็วต่ำกว่ามาค์ 1.5 ไม่ได้ถูกเปรียบเทียบกับผล CFD เนื่องจากไม่ได้อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้) จากภาพเห็นได้ชัดเจนว่าผลลัพธ์ของ CFD มีความถูกต้องแม่นยำและมีแนวโน้มเป็นลักษณะไปในทางเดียวกัน ในช่วงความเร็วที่ทำการศึกษา ซึ่งอยู่ในระดับความเชื่อถือได้ทางวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering Accuracy) คือ มีค่าความแตกต่างไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ในตลอดทุกช่วงความเร็วที่ทำการศึกษา



รูปที่ ๑๓ กราฟแสดง Pitch Damping Moment Coefficient เทียบกับความเร็วของจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U



รูปที่ ๑๔ กราฟแสดง Roll Damping Moment Coefficient เทียบกับความเร็วของจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U

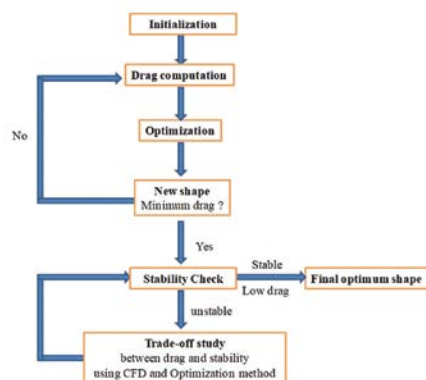
3.4 การออกแบบจรวดด้วยระเบียบวิธี Optimization Method

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบจรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มสมรรถนะในระยะยิงหวังผล โดยใช้วิธี Optimization method ซึ่งในทางอากาศพลศาสตร์การลดแรงต้านของจรวดอากาศเป็นกุญแจที่สำคัญในการเพิ่มสมรรถนะในด้านระยะยิงหวังผลของจรวดในย่านความเร็วเหนือเสียงและมากกว่านั้นคือการคงไว้ซึ่งเสถียรภาพจรวดอากาศที่ออกแบบใหม่ทั้งเสถียรภาพสถิตและพลวัตก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ

จากการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของจรวดอากาศที่ความเร็วต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม CFD ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียงการออกแบบบริเวณส่วนหัวรบจรวดอากาศใหม่เท่านั้น เนื่องจากบริเวณส่วนนี้มีการกระจายตัวของแรงต้านรองเป็นอันดับสอง และมีความง่ายไม่ซับซ้อน รวมถึงมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของจรวดอากาศน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับารออกแบบชุดพวงหางโค้งและท้ายจรวดซึ่งมีระบบค่อนข้างซับซ้อนในการกางหางออกแบบอัตโนมัติหลังจากทำการปล่อยยิง

3.4.1 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการวิธี Optimization method

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมมีรายละเอียดตามรูปที่ 15 ซึ่งสามารถอธิบายภาพรวมของขั้นตอนได้ดังนี้ เริ่มจากขั้นตอนการกำหนดรูปร่างเริ่มต้น (Initialization) ของหัวรบจรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงเริ่มต้นและนำผลลัพธ์ที่ได้กลับไปคำนวณต่อในวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าขอบเขตบนและล่างของรูปทรง รวมถึงเงื่อนไขการบินในย่านความเร็วต่าง ๆ ที่กำหนด หลังจากการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเสร็จสิ้นลงจะได้รูปร่างของหัวรบจรวดที่มีขนาดความยาวส่วนหัวจรวด ความยาวลำตัว และโปรไฟล์ของส่วนหน้าจรวดที่มีแรงต้านเกิดขึ้นน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม การมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มีค่าน้อยที่สุดไม่ได้เป็นการการันตีเรื่องเสถียรภาพของจรวดอากาศ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของจรวดอากาศที่ถูกออกแบบใหม่ด้วยโปรแกรม CFD ถ้าโปรแกรมตรวจสอบพบว่าเสถียรภาพของจรวดอากาศไม่ตอบสนองต่อความต้องการหรือไม่เสถียรภาพ โปรแกรมต้องคำนวณใน Loop อีกครั้งเพื่อ tradeoff ระหว่างแรงต้านและเสถียรภาพ จนกระทั่งได้รูปร่างของหัวรบจรวดที่มีแรงต้านต่ำและยังคงไว้ซึ่งความมีเสถียรภาพถึงจะเป็นที่สุดของการเสร็จสิ้นกระบวนการ โดยแต่ละขั้นตอนของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะมีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



รูปที่ ๑๕ กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการหารูปร่างหัวรบจรวดอากาศ

3.4.2 ระเบียบวิธี Optimization Method

วัตถุประสงค์ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมคือการค้นหารูปร่างลักษณะของส่วนหัวรบของจรวดที่มีแรงต้านน้อยที่สุดในเงื่อนไขการบินที่มุมปะทะต่ำ ๆ หรือประมาณ 0 องศา ในหัวข้องานวิจัยนี้ Active Set Algorithm: Medium-Scale Optimization and Sequential Quadratic Programming (SQP) ถูกเลือกนำมาประยุกต์ใช้ในการ Optimize ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ทั้งนี้ เนื่องจากมีความง่ายในการประยุกต์ใช้งาน มีความเร็ว และความแม่นยำในการคำนวณ โดยสมการของฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) คือ สมการการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มุมปะทะ 0 องศา ซึ่งมีที่มาจากรูปแบบกึ่งการทดลองของแมคคอย McCoy's Semi-Empirical Method [3] รูปแบบของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแสดงดังสมการที่ (3)

$$\min_{\mathbf{d} \in \mathbf{x}_k} \left[\frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{H}_k \mathbf{d} + \nabla f(\mathbf{x}_k) \cdot \mathbf{d} \right] \quad (3)$$

Subject to $\nabla g(\mathbf{x}_k) \cdot \mathbf{d} + g(\mathbf{x}_k) = 0$

โดยที่ $\mathbf{H}_k$ คือ Hessian Matrix, $\mathbf{d}$ คือ เวกเตอร์ Steepest Descent, $f(\mathbf{x})$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย, $g(\mathbf{x})$ คือ Constraint Function และ k คือ ตัวเลขที่บ่งบอกถึงจุดเริ่มต้นการคำนวณ

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ตัวหนา คือ ปริมาณเวกเตอร์
เพื่อทำการหาจุดที่เหมาะสมที่สุด สมการที่ (3)
จำเป็นต้องจัดให้อยู่ในรูปของ Lagrangian ดังแสดง
ไว้ในสมการที่ (4)

$$\Lambda(\mathbf{d}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T H_k \mathbf{d} + \nabla f(x_k) \cdot \mathbf{d} - \lambda (\nabla g(x_k) \cdot \mathbf{d} + g(x_k)) \quad (4)$$

ในสมการที่ (4) ค่าจุดต่ำสุดหรือจุดวกกลับจะเกิดขึ้นที่

$\nabla \Lambda(\mathbf{d}) = \mathbf{0}$ (Derivative of Eq. (11) with
Respect to $\mathbf{d}$)

ดังนั้นจะได้

$$H_k \mathbf{d} - \lambda \nabla g(x_k) = -\nabla f(x_k) \quad (5)$$

โดยที่ λ คือ Lagrangian Multiplier สมการที่ (5) คือ
รูปแบบสุดท้ายของ SQP Optimization Method
ที่พร้อมทำการคำนวณ ดังที่กล่าวไปในเบื้องต้น
งานวิจัยนี้ สมการเป้าหมาย $f(\mathbf{x})$ ในสมการที่ (3)
เป็นสมการของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน
ในย่านความเร็วเหนือเสียงของรูปทรงจรวด ซึ่งเป็น
สมการกึ่งการทดลองของ McCoy ซึ่งสามารถเขียน
ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันได้ ดังนี้

$$f(\mathbf{x}_k) = C_{D0}(L_N, L_{CYL}, L_{BT}, \beta) \quad (6)$$

โดยที่ $\mathbf{x}_k$ เป็นปริมาณเวกเตอร์ของค่ารูปร่างลักษณะ
ของรูปทรงหัวรบจรวด ดังปรากฏในรูปที่ 16 (ขนาด
ความยาวส่วนหน้าจรวด L_N , ความยาวลำตัว L_{CYL}
ความยาวส่วนท้ายจรวด L_{BT} และ มุมของส่วนท้าย
จรวด β , ตามลำดับ) โดยสมการที่ (12) ถูกควบคุม
หรือสัมพันธ์กับสมการที่ (7) ดังนี้ (หมายเหตุ: ใน
งานวิจัยกำหนด L_{BT} และ β เท่ากับ 0 เนื่องจากหัวรบ
จรวดจะไม่มีส่วนท้ายที่เรียกว่า Boattail และมุม
Boattail)

$$g(\mathbf{x}_k) = L_N + L_{CYL} + L_{BT} = L \quad (7)$$



รูปที่ ๑๖ ค่ารูปร่างลักษณะของรูปทรงหัวรบจรวดอากาศ
DTI-2 ที่ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U

จากสมการที่ (5) เป็นการแก้ปัญหา Quadratic
Programming (QP) Subproblem ในแต่ละ
Iteration ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะได้ค่าใหม่ ซึ่งเป็นไป
ตามสมการที่ (8)

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (8)$$

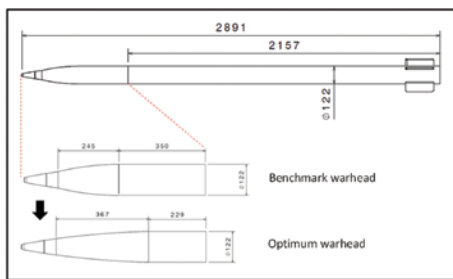
โดยที่ α_k คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกคำนวณ โดยการ
หาค่าจากรูปแบบเส้นที่เหมาะสม (Line search)

เนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมายเป็นฟังก์ชันของ
สมการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านของจรวด ดังนั้น
การประยุกต์ใช้สมการต้องคำนึงขีดจำกัดของสมการ
ที่บ่งบอกถึงขนาดหัวจรวด ลำตัวจรวด และขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลางจรวด เป็นต้น รวมถึงเงื่อนไข
ในย่านความเร็วที่สามารถใช้ได้ ในสมการนี้ ทั้งหมด
ที่กล่าวมาล้วนเป็นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง
ในกระบวนการหาค่าตอบที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้
โปรแกรมในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมได้เขียนขึ้น
ในรูปแบบของโปรแกรมภาษา MATLAB

4. อภิปรายผล

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมจะ
ได้รูปร่างของส่วนหัวรบจรวดที่ออกแบบใหม่ ภายใต้
เงื่อนไขหัวรบที่มีแรงต้านต่ำในขณะที่ยังคงไว้ซึ่ง
เสถียรภาพ ในการเคลื่อนที่ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้ คือ
มีความยาวของส่วนหัวที่ออกแบบใหม่ Nose Length

เท่ากับ 367 มิลลิเมตร และลักษณะของรูปร่างหัวจรวดจะเป็นเส้นโปรไฟล์แบบ Secant Ogive ในขณะที่ส่วนหัวรบของจรวดมีขนาดความยาวเท่าเดิมคือ 595 มิลลิเมตร (ไม่รวมขนาดตัวจุดระเบิด MRV-U Fuze) ดังในรูปที่ 17



รูปที่ ๑๗ ลักษณะรูปร่างของหัวรบของจรวด DTI-2 ที่ออกแบบใหม่ด้วยวิธี Optimization (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

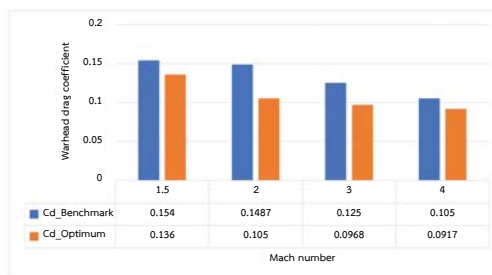
4.1 การเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตของจรวดอากาศที่ออกแบบใหม่กับจรวดอากาศที่นำมาศึกษา

4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

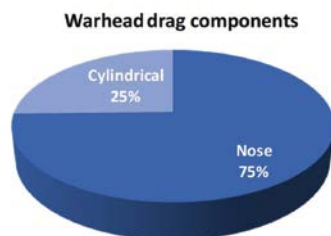
ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของหัวรบจรวดทั้ง 2 รูปแบบโดยใช้โปรแกรม CFD ซึ่งแสดงผลลัพธ์ไว้ในรูปที่ 18 จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของหัวรบที่ออกแบบใหม่ โดยใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมมีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าประมาณโดยเฉลี่ย 19 เปอร์เซ็นต์ ที่ทุกย่านความเร็วเหนือเสียงที่ทำการศึกษา โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของหัวรบประกอบด้วยแรงต้าน 2 ส่วนหลัก ๆ คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านจากคลื่นอัดตัว และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นในรูปแบบเดียวกันกับหัวรบต้นแบบที่นำมาศึกษา กล่าวคือ สัมประสิทธิ์แรงต้านจากคลื่นอัดตัวจะมีค่ามากถึง 75 เปอร์เซ็นต์ ของสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม ในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ส่วนทรงกระบอก

จะมีค่าประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 19 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการออกแบบส่วนบริเวณหน้าหัวรบจรวดมีผลกระทบโดยตรงต่อการลดลงของแรงต้านเป็นอย่างมาก เนื่องจากการลดความรุนแรงของคลื่นอัดตัว (Strong Compression Shock) โดยตรง

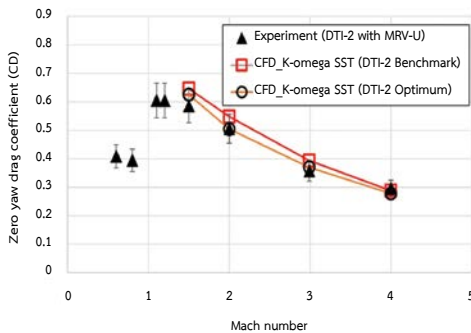
เมื่อรวมสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เกิดจากหัวรบจรวดเข้ากับส่วนลำตัว และหางโค้งจรวดจะพบว่าจรวดที่ติดตั้งหัวรบจรวดที่ออกแบบใหม่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำกว่าจรวด DTI-2 หัวรบ MRV-U เฉลี่ยโดยประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 20 ดังนั้นจากผลลัพธ์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสามารถชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการเพิ่มสมรรถนะในระยะยิงหวังผลของจรวดที่ออกแบบหัวรบใหม่ได้อย่างเป็นรูปธรรม



รูปที่ ๑๘ กราฟแผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ย่านความเร็วเหนือเสียงต่างๆ ที่มุมปะทะ 0 องศา



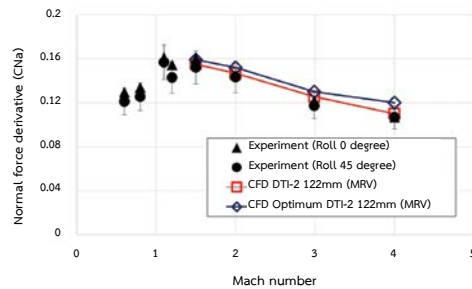
รูปที่ ๑๙ กราฟแสดงส่วนประกอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เกิดขึ้นบนส่วนหัวรบจรวด



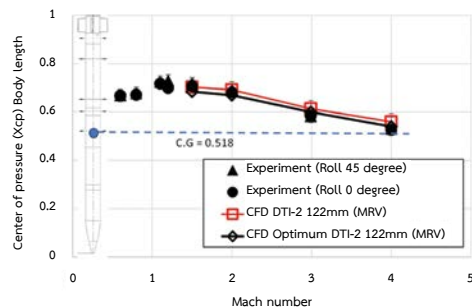
รูปที่ ๒๐ กราฟการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของ จรวดอากาศทั้ง 2 รูปแบบ

4.1.2 ค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Force Derivative Coefficient, $C_{L\alpha}$) และจุดศูนย์กลางความดัน (Center of Pressure)

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์แรงยกและค่าสัมประสิทธิ์อนุพันธ์โมเมนต์ของจรวด DTI-2 หัวรบ MRV-U และรูปทรงที่ออกแบบใหม่โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลที่เงื่อนไขการเคลื่อนที่ตั้งแต่ - 4 ถึง 4 องศา (ช่วงเชิงเส้น) ดังรูปที่ 21 และ 22 ตามลำดับ พบว่าค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์แรงยกของรูปทรงที่ออกแบบใหม่มีค่าสูงขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์โมเมนต์มีค่าลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ เนื่องจากการกระจายความดัน (Pressure Distribution) ของรูปทรงที่ออกแบบใหม่ มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงส่วนหัวที่ยาวขึ้น ทำให้เกิดแรงยกได้เพิ่มมากขึ้นในกรณีที่มีการเคลื่อนที่แบบมีมุมปะทะ นอกจากนั้นการกระจายความดันบริเวณส่วนหัวของรูปทรงที่ออกแบบใหม่ทำให้จุดศูนย์กลางความดัน (Center of Pressure) เลื่อนถอยหลังเข้าใกล้จุดศูนย์กลางถ่วงมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์มีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม จรวดที่ออกแบบใหม่ยังคงมีเสถียรภาพสถิตตลอดช่วงความเร็วที่ทำการศึกษา (โดยมีการกำหนดค่า C.G. ที่ตำแหน่งเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับจรวดที่นำมาศึกษา)



รูปที่ ๒๑ กราฟการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกระหว่างจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U แบบดั้งเดิม กับหัวรบที่ออกแบบใหม่

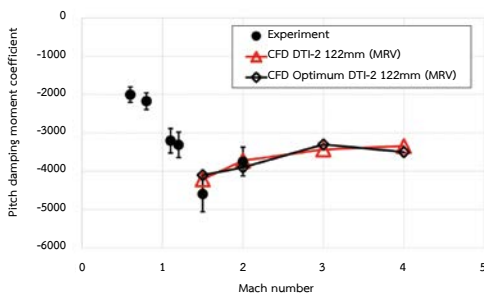


รูปที่ ๒๒ กราฟการเปรียบเทียบจุดศูนย์กลางความดันระหว่างจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U แบบดั้งเดิม กับหัวรบที่ออกแบบใหม่

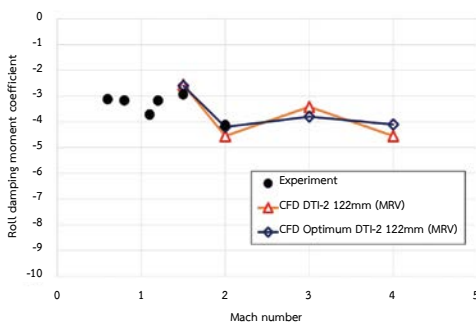
4.1.3 ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์พลวัต (สัมประสิทธิ์ Pitch Damping Moment Coefficient และค่า Roll Damping Moment Coefficient)

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่า Pitch Damping Moment Sum Coefficient และ Roll Damping Moment Coefficient ของจรวด DTI-2 หัวรบ MRV-U ที่ศึกษา และรูปทรงที่ออกแบบใหม่โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล ดังรูปที่ 23 และ 24 ตามลำดับ พบว่า ค่า Pitch Damping Moment Sum Coefficient มีค่าแตกต่างกันไม่เป็นนัยสำคัญของทั้งสองรูปทรง คือมีค่าความแตกต่างประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ตลอดช่วงความเร็วที่กำหนด เมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรง

ที่นำมาศึกษา ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ Roll Damping Moment Coefficient ที่เป็นผลโดยตรงจากเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนลำตัว (Spinning Motion) มีความแตกต่างไม่เป็นนัยสำคัญเช่นเดียวกัน (มีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 1 เปอร์เซนต์) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปทรงหัวรบของจรวด DTI-2 ส่งผลน้อยมากแทบไม่มีนัยสำคัญกับค่าคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์พลวัตของจรวด ซึ่งเป็นไปตามที่คาดหมายเอาไว้ตั้งแต่แรก นั่นเป็นเหตุผลว่าทำไมการศึกษาในงานวิจัยนี้จึงเลือกกำหนดการออกแบบเฉพาะหัวรบใหม่โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการยิงหวังผลในขณะที่จำเป็นต้องคงสภาพการรักษาเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของจรวดให้ได้มากที่สุด



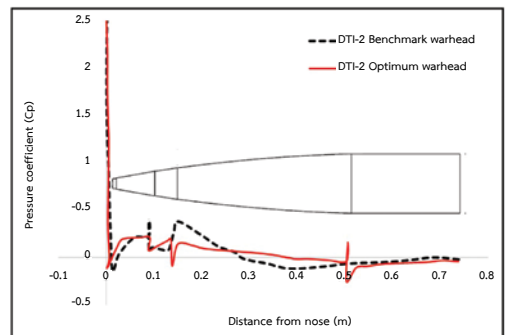
รูปที่ ๒๓ กราฟการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ Pitch Damping Moment ระหว่างจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U แบบดั้งเดิมกับหัวรบที่ออกแบบใหม่



รูปที่ ๒๔ กราฟการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ Roll Damping Moment ระหว่างจรวด DTI-2 ติดตั้งหัวรบแบบ MRV-U แบบดั้งเดิมกับหัวรบที่ออกแบบใหม่

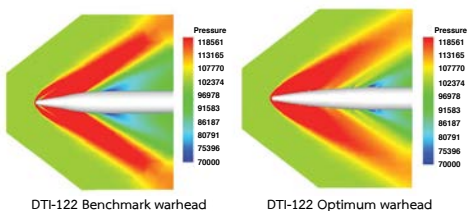
4.2 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์เชิงคุณภาพจรวดอากาศที่ออกแบบใหม่กับจรวดอากาศที่นำมาศึกษา

รูปที่ 25 แสดงกราฟการเปรียบเทียบการกระจายความดัน (Surface Pressure Distributions) บนพื้นผิวบริเวณส่วนต่างๆ ของหัวรบจรวดทั้ง 2 รูปแบบ จากภาพนี้แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวความดันบริเวณส่วนหัวของหัวรบจรวดที่ออกแบบใหม่ มีการกระจายความดันที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งตรงนี้เป็นที่ยืนยันถึงการลดความรุนแรงของคลื่นอัดตัวที่อยู่บริเวณส่วนหน้าของหัวรบจรวด เป็นผลให้การกระจายความดันมีค่าลดลงและมีผลต่อการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงดัน ซึ่งทั้งหมดเป็นผลมาจากรูปร่างส่วนหัวที่ออกแบบ โดยกระบวนการหารูปร่างที่เหมาะสมหรือ Optimization Method

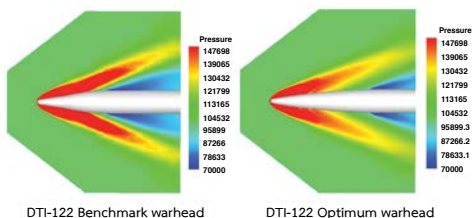


รูปที่ ๒๕ กราฟการเปรียบเทียบการกระจายความดันบนพื้นผิวบริเวณส่วนต่างๆ ของหัวรบจรวดทั้ง 2 รูปแบบ

นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายเหตุผลของการลดความรุนแรงของ Strong Compression Shock หรือการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงดันที่บริเวณส่วนด้านหน้าของหัวรบจรวดด้วยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพในรูปแบบการจำลองการไหลของกระแสอากาศ (Flow Visualization) ผ่านส่วนหัวรบของจรวดดังแสดงไว้ในรูปที่ 26 และ 27 ตามลำดับ



รูปที่ ๒๖ การเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของกระแสอากาศผ่านบริเวณหัวรบจรวดทั้ง 2 รูปแบบ ที่ความเร็วมาค 2 มุมปะทะ 0 องศา



รูปที่ ๒๗ การเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของกระแสอากาศผ่านบริเวณหัวรบจรวดทั้ง 2 รูปแบบ ที่ความเร็วมาค 3 มุมปะทะ 0 องศา

รูปที่ 26 และ 27 แสดงการเปรียบเทียบมุมของคลื่นอัดตัว Compression Shock ของหัวรบจรวดทั้งสองรูปแบบ โดยจากภาพจะพบว่าที่ย่านความเร็วเท่ากัน มุมของคลื่นอัดตัวที่เกิดขึ้นของบริเวณส่วนหน้าหัวรบจรวดอากาศที่ออกแบบใหม่จะมีมุมที่น้อยกว่าหัวรบจรวดอากาศที่นำมาศึกษา ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 26 ที่ความเร็วที่มัค 2 หัวรบจรวดที่ออกแบบใหม่จะมีมุมของคลื่นอัดตัวเทียบกับเส้นขนานผ่านลำตัวประมาณ 24.8 องศา ในขณะที่มุมคลื่นอัดตัวของหัวรบจรวดอากาศที่นำมาศึกษามีมุมประมาณ 25.9 องศา จากทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ในย่านความเร็วเหนือเสียงที่เท่ากันของวัตถุใด ๆ ถ้ามุมคลื่นอัดตัวที่เกิดขึ้นบนวัตถุใด ๆ มีมุมที่สูงกว่าจะมีมุมแรงของคลื่นอัดตัวที่สูงกว่า ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การสังเกตจากมุมของคลื่นอัดตัวบริเวณส่วนหัวของรูปทรงหัวรบจรวดที่คล้ายกัน 2 รูปทรง สามารถบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ในการลดแรงต้านของรูปทรง

นั้น ๆ ได้ ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่า มุมคลื่นอัดตัวของหัวรบที่ออกแบบใหม่มีค่าน้อยกว่าหัวรบจรวดที่นำมาศึกษาทุกย่านความเร็วเหนือเสียง

5. สรุปผล

จากการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตของจรวด DTI-2 โดยใช้โปรแกรม CFD และการเปรียบเทียบค่าอากาศพลศาสตร์ที่ได้กับข้อมูลการทดสอบจริงในอุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียง พบว่า ทั้ง 2 วิธี มีแนวโน้มสอดคล้องใกล้เคียงกัน คือ มีค่าความแตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิต และไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์พลวัต ในตลอดทุกค่าความเร็วที่ทำการศึกษา และจากการศึกษาโดยการวิเคราะห์ในรายละเอียดของที่มาของสัมประสิทธิ์แรงต้านบนจรวดที่นำมาศึกษา พบว่า สัมประสิทธิ์แรงต้านส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นคือ บนส่วนท้ายจรวด หรือ Base drag ประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ส่วนหัวรบของจรวดมีค่าแรงต้านในลำดับรองลงมา ถึงประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ ลำดับถัดมาคือ แรงต้านที่เกิดขึ้นบนลำตัวประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ และสุดท้ายคือ แรงต้านที่เกิดขึ้นที่หาง โดยมีค่าประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์

จากการออกแบบหัวรบของจรวดใหม่ โดยใช้วิธี Optimization method ควบคู่กับการใช้โปรแกรม CFD พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้คือได้รูปแบบหัวรบจรวดที่ออกแบบใหม่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของหัวรบที่ออกแบบใหม่มีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับหัวรบจรวดต้นแบบ ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าประมาณโดยเฉลี่ย 19 เปอร์เซ็นต์ ที่ทุกย่านความเร็วเหนือเสียงที่ทำการศึกษา นอกจากนี้ เมื่อรวมแรงต้านที่เกิดขึ้นจากหัวรบจรวดเข้ากับส่วนลำตัวและหางคั้งจรวด จะพบว่าจรวดที่ติดตั้งหัวรบจรวดที่ออกแบบใหม่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำกว่าจรวด DTI-2 หัวรบ

MRV เฉลี่ยโดยประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น จากสัมประสิทธิ์ผลลัพธ์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน สามารถชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการเพิ่มสมรรถนะในระยะยิงหวังผลของจรวดที่ออกแบบหัวรบใหม่ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Jiajan and N. Sukuprakan, "Aerodynamic Analysis of Supersonic 2.75 inch Fin-Stabilized Rocket using Computational Fluid Dynamics," *NKRAFA J. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 13, pp. 34 - 44, 2017.
- [2] Pattarakorn. "สทป. ยิงทดสอบจรวดขนาด 122 มม. (ไม่นำวิถี) ภายใต้โครงการวิจัยและพัฒนา ระบบจรวดสมรรถนะสูงแบบ DTI-2." DTI.or.th. https://www.dti.or.th/page_bx.php?lang=eng&cid=27&eno=6156 (วันที่เข้าถึง ก.ค. 17, 2565).
- [3] A. Sumnu, I. H. Guzelbey, and O. Ogucu, "Aerodynamic Shape Optimization of a Missile Using a Multi-objective Genetic Algorithm," *J. Aerosp. Eng.*, vol. 2020, pp. 1-17, 2020, doi: 10.1155/2020/1528435.
- [4] W. Jiajan, R. S. M. Chue, T. Nguyen, and S. Yu, "Optimisation of Round Bodies for Aerodynamic Performance and Stability at Supersonic Speeds," *Aeronaut. J.*, vol. 117, no. 1193, pp. 661 - 685, 2013.
- [5] W. Jiajan, R. S. M. Chue, T. Nguyen, and S. C. M. Yu, "Boattail Juncture Shaping for Spin-stabilized Rounds in Supersonic Flight," *Shock Waves*, vol. 25, no. 2, pp. 189 - 204, 2015.
- [6] J. DeSpirito, "Effects of Base Shape on Spin-Stabilized Projectile Aerodynamics," in *26th AIAA Appl. Aerodynamics Conf.*, Honolulu, Hawaii, 2008.
- [7] K. J. Beers, *Numerical Method for Chemical Engineering Applications in MATLAB*. New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2006.
- [8] R. L. McCoy, "MC Drag - A Computer Program for Estimating the Drag Coefficients of Projectiles," U.S. Army Armament Research & Development Command, MD, USA, Tech. Rep. ARBRL-TR-02293, 1981.
- [9] FLUENT, 2016, "FLUENT 16 User's Guide," ANSYS, Inc.
- [10] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1650, 1994.
- [11] P. Weinacht and W. Sturek, "Navier-Stokes Predictions of Pitch Damping for Finned Projectiles Using Steady Coning Motion," in *Proc. AIAA 8th Appl. Aerodynamics Conf.*, AIAA, Washington, D.C., USA, 1990, pp. 632 - 642.

การศึกษาและพัฒนาต้นแบบปัญญาประดิษฐ์ เพื่อระบบตรวจจับการเกิดไฟฟ้าด้วยข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ

ภูตินันท์ สิงห์คำฟู¹ และ พลภัทร เหมวรรณ^{2*}

วันที่รับ 5 กันยายน 2565 วันที่แก้ไข 4 ตุลาคม 2565 วันตอบรับ 7 ตุลาคม 2565

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ 1) เพื่อบินถ่ายภาพทางอากาศของเหตุการณ์การเกิดไฟฟ้าในพื้นที่ศึกษาด้วยอากาศยานไร้คนขับ และ 2) เพื่อศึกษาและพัฒนาาระบบปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับการเกิดไฟฟ้าด้วยระบบอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่เฝ้าระวังการเกิดไฟฟ้าซ้ำซาก ผลของการศึกษาจากการบินถ่ายภาพทางอากาศของภาพการเกิดไฟฟ้าจริงในพื้นที่ศึกษาด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อนำมาใช้เป็นภาพต้นแบบของการสร้างการเรียนรู้ข้อมูลให้กับระบบปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับการเกิดไฟฟ้าในพื้นที่จริง การทดลองได้ใช้ภาพที่ถูกกำหนดให้มีไฟ จำนวน 655 ภาพ และไม่มีไฟ จำนวน 3,881 ภาพ โดยมีการแบ่งข้อมูลใช้ในการทดลองเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกใช้ในการฝึกสอน (train) กลุ่มที่สองใช้ในการประเมินความลำเอียงของโมเดล (validation) และกลุ่มที่สามใช้ทดสอบโมเดล (test) หลังจากนั้นได้แบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนเพื่อนำมาทดสอบ โดยที่ใช้เทรนโมเดล จำนวน 840 ภาพ ทดสอบความเร็วและความถูกต้องโมเดล จำนวน 208 ภาพ และทดสอบการใช้งานโมเดล จำนวน 262 ภาพ งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือวัดประสิทธิภาพของโมเดล 4 ชนิด คือ Accuracy, Sensitivity, Specificity, และ Matthews correlation coefficient ซึ่งได้นำมาทดสอบด้วยวิธี direct validation โดยในการนี้ได้ทดลองใช้อัลกอริทึมของการเรียนรู้เชิงลึกมาทดสอบ 6 ชนิด คือ Resnet18, Resnet34, Alexnet, Vgg11, Densenet121 และ Vgg16 และได้ทำการใช้กลุ่มภาพที่แยกไว้สำหรับสอนโมเดลทำการสอนโมเดลโดยใช้ Densenet121 ในระบบ Kaggle เพื่อฝึกสอนโมเดลเชิงลึก ซึ่งได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นโมเดลที่พร้อมใช้งานที่มีประสิทธิภาพของการสอนทั้งหมดจำนวน 10 รอบ โดยจากผลลัพธ์เห็นได้ว่า จำนวนเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ (accuracy) จะเพิ่มขึ้นจาก 44.97% ไปจนถึง 68.42% ตามลำดับ และจำนวนครั้งที่ได้รับการฝึกสอนให้กับโมเดล

คำสำคัญ : อากาศยานไร้คนขับ, ระบบปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับการเกิดไฟฟ้า

¹ วิทยาลัยศิลปะ สื่อ และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

² ภาควิชาภูมิศาสตร์, คณะสังคมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

* ผู้แต่ง, อีเมล: phonpat.h@cmu.ac.th, p.hemwan@gmail.com

The Study and Development of Artificial Intelligence (AI) Prototype for Forest Fire Detection (FFD) System using Image Data from Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Phudinan Singkahmfu¹ and Phonpat Hemwan^{2*}

Received 5 September 2022, Revised 4 October 2022, Accepted 7 October 2022

Abstract

The research project aimed 1) to monitor the specific studied area of its wildfire, using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) 2) to study and to develop the Artificial Intelligence (AI) system in purpose of detecting wildfire in surveillance location where may occur repeated fire, using automatic steering ship. Both operations in an actual location and applied theoretical knowledge used, were tested. Those done by the results from fire forest images data of actual locations using UAV, were used to build an Artificial Intelligence prototype in detecting forest fire in the actual location. The method of the research was made with specific 655 images of fire figure included within those 3,881 images of fire figure not included. The data was divided into 3 groups; the first group was used to train, the second group was used to validation, and the last group was used to test the model. The data then was divided into 2 parts for testing, which are composed of 840 images of train model, 208 images of speed and accuracy test on model, and 208 images of performance test on model. The research was applied 4 measurement tools; Accuracy, Sensitivity, Specificity, and Matthews correlation coefficient. Those of which were specifically tested through direct validation. Aside, to do the test, the research employed 6 deep learning algorithms, which included Restnet18, Restnet34, Alexnet, Vgg11, Densenet121, and Vgg16. Separated images were also used in the research to teach models, and deep models were taught using Densenet121 on the Kaggle system. Ten ready-models for effective teaching were shown in the results. As can be observed, both the quantity of training and the accuracy percentage increased from 44.79 to 68.42, respectively.

Keywords : Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Artificial Intelligent (AI) in detecting forest fire

¹ College of Arts, Media and Technology, Chiang Mai University

² Department of Geography, Faculty of Social Science, Chiang Mai University

* Corresponding author, E-mail: phonpat.h@cmu.ac.th, p.hemwan@gmail.com

1. บทนำ

ปัญหาหมอกควันภาคเหนือเป็นปัญหาที่เริ่มเกิดขึ้นเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2549 จนกระทั่งในปัจจุบัน ถือเป็นภัยพิบัติที่ได้สร้างผลกระทบต่อพื้นที่ภาคเหนือและภูมิภาคอื่นๆ ของประเทศ และได้ทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น โดยสาเหตุหลักประการหนึ่งที่ทำให้มีความเข้มข้นของฝุ่นควันขนาดเล็ก PM 2.5 คือ การเผาไหม้ในที่โล่ง โดยเฉพาะการเกิดไฟป่าที่มีการเข้าถึงในการเข้าควบคุมไฟไม่ให้ลุกลามหรือการดับไฟนั้นกระทำได้อย่างยาก โดยจากข้อมูลการประเมินจุดความร้อน (fire hotspot) ข้อมูลดาวเทียมระบบ MODIS ในปี 2562 ที่ผ่านมา พบว่า มีจุดความร้อนเกิดขึ้นทั้งหมด 10,214 จุด คิดเป็นเนื้อที่ประมาณ 7,211,517 ไร่ โดยในจำนวนนี้เป็นจุดความร้อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่เขตป่าทั้งป่าสงวนแห่งชาติ จำนวน 4,274 จุด และป่าอนุรักษ์ จำนวน 5,045 จุด รวมเป็นจำนวน 9,319 จุด หรือคิดเป็นร้อยละ 91 ของจุดความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด [1]

ปัจจุบันในการติดตาม (monitoring) และตรวจจับ (detection) พื้นที่เผาไหม้ในที่โล่งและพื้นที่เกิดไฟป่าได้มีเพียงวิธีการเดียว คือ การได้มาจากการประมวลผลด้วยข้อมูลจุดความร้อน (active fire hotspot) โดยอาศัยข้อมูลจากระบบเซนเซอร์ของดาวเทียมที่มีความสามารถในการติดตามข้อมูลความร้อนบนพื้นผิวโลกในระบบหลักขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งสหรัฐอเมริกา (NASA) ด้วยดาวเทียมใน 2 ระบบ คือ ระบบ VIIRS จากดาวเทียม Suomi NPP ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ของข้อมูล 375 เมตร ทำการบันทึกข้อมูลใน 2 ช่วงเวลาของทุกวัน คือ เวลา 14:00-16:00 น. และ 02:00-04:00 น. และตรวจหาด้วยระบบ MODIS จากดาวเทียม TERRA และ AQUA ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตร ทำการบันทึกข้อมูลใน 4 ช่วงเวลา

ของทุกวัน คือ เวลา 00:00-02:00 น. 10:00-12:00 น. 12:00-14:00 น. และ 22:00-24:00 น. ทั้งนี้จากการตรวจจับข้อมูลจุดความร้อนด้วยระบบดาวเทียมดังกล่าว ถือได้ว่าจะมีข้อจำกัดของรอบเวลาในการบันทึกข้อมูลซ้ำในพื้นที่เดิมหรือความละเอียดเชิงเวลา (temporal resolution) ที่มีความละเอียดต่ำต่อการนำมาประยุกต์ใช้การติดตามและเฝ้าระวังการเกิดไฟป่าในระดับพื้นที่ [2]

จากประเด็นดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจต่อการศึกษาทางด้านการพัฒนาเทคนิควิธีการด้วยปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) หรือที่รู้จักกันดีในนามของเทคโนโลยี AI เพื่อการพัฒนาาระบบตรวจจับการเกิดไฟป่าในพื้นที่เฝ้าระวังการเกิดไฟป่าซ้ำซากหรือมีความเสี่ยงต่อการเกิดไฟป่าในแบบอัตโนมัติด้วยอากาศยานไร้คนขับ (หลังจากนี้เรียกว่า UAV) เพื่อเป็นการทดแทนข้อจำกัดทางด้านเวลาในการบันทึกซ้ำในพื้นที่เดิมจากระบบดาวเทียม ดังนั้น ระบบเฝ้าระวังการเกิดไฟป่าด้วยระบบตรวจจับการเกิดไฟป่าด้วยปัญญาประดิษฐ์บนแพลตฟอร์มของระบบ UAV ขนาดเล็กจึงมีความสำคัญต่อการดำเนินงานในระดับพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเป็นการดำเนินงานจากเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลเชิงพื้นที่จากการสำรวจระยะไกลที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และสะดวกต่อการดำเนินการ [3] โดยเฉพาะหน่วยงานในระดับพื้นที่สามารถนำไปประยุกต์ดำเนินการได้จริง อันจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการสนับสนุนต่อการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติระดับพื้นที่ในการกิจด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย โดยเป็นการจัดสร้างชุดข้อมูลภูมิสารสนเทศและแผนที่พื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติที่ในหลายหน่วยงานยังคงมีความต้องการและมีความถี่สูงต่อการใช้งานจากข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นปัจจุบันและทันสมัย

2. ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยประยุกต์เชิงพัฒนา นวัตกรรม โดยดำเนินการศึกษาจากกระบวนการ ปฏิบัติงานในพื้นที่จริง มุ่งศึกษาองค์ความรู้ที่มีอยู่ ในเชิงทฤษฎีโดยนำไปใช้ในปฏิบัติการและทดลอง ดำเนินงานเพื่อสร้างและค้นหาองค์ความรู้ใหม่จาก กระบวนการและผลลัพธ์ของการดำเนินงานดังกล่าว สามารถแยกขอบเขตการดำเนินงานใน 2 ประเด็น ดังนี้

1) การบินถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยาน ไร้คนขับขนาดเล็กของการเกิดไฟป่าจริงในพื้นที่ศึกษา ด้วยการใช้อัล้องช่วงแสงขาวมองเห็นได้ (visible light) หรือในระบบตรวจจับแสงในช่วงคลื่น Blue Green และ Red ที่ติดตั้งอยู่ในกล้องถ่ายภาพของ UAV ทั่วไป [4] เพื่อนำมาใช้เป็นภาพต้นแบบของการสร้าง การเรียนรู้ข้อมูลให้กับระบบปัญญาประดิษฐ์ในการ ตรวจจับการเกิดไฟป่าในพื้นที่จริง

2) การศึกษาและพัฒนาระบบตรวจจับไฟป่า แบบอัตโนมัติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยการใช้ แพลตฟอร์มของระบบอากาศยานไร้คนขับหรือระบบ UAV ขนาดเล็กเพื่อพัฒนาระบบตรวจจับควันไฟ รวมถึง แหล่งกำเนิดควันไฟในที่โล่งหรือพื้นที่มีต้นไม้หนาแน่น โดยมีเป้าหมายที่จะสามารถตรวจจับพื้นที่หรือจุดที่ เกิดไฟป่าหรือการเกิดการเผาไหม้ในที่โล่ง โดยการใช้ วิธีการเก็บระบบภาพถ่าย (snap shot) จากระบบ กล้องถ่ายภาพของ UAV แล้วนำมาวิเคราะห์หาจุด เป้าหมาย และรายงานเป็นตำแหน่งพิกัด (coordinate) โดยอัตโนมัติ เพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลเพื่อพร้อม สำหรับการต่อยอดสร้างระบบเตือนภัยและแจ้งเตือน การเผาไหม้ในพื้นที่เผ่าระวังการเกิดไฟป่าที่มีต้นทุน ต่ำอันสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับพื้นที่

3. วิธีการวิจัย

การพัฒนากระบวนการปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับ ไฟป่าด้วยการใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยาน ไร้คนขับขนาดเล็กมาสร้างระบบจำแนกวัตถุด้วย AI แบบประมวลผลภาพ (Image processing) ได้แก่

1) ส่วนการพัฒนาการสร้างตัวจำแนกประเภท โดยการลงพื้นที่และใช้อากาศยานไร้คนขับถ่ายภาพเก็บ ข้อมูลในพื้นที่เป้าหมายในสภาพต่าง ๆ เช่น พื้นที่ ที่ยังไม่เกิดไฟตอนสมบูรณ์ พื้นที่ที่ยังไม่เกิดไฟตอน หน้าแล้ง และพื้นที่ที่เกิดไฟตามจุดต่าง ๆ หลังจากนั้น นำข้อมูลที่ได้ออกมาคัดกรองและแยกประเภท (labeled) ขึ้นตอนสุดท้ายเป็นการวัดผลการทำนายและทดสอบ จากการลงพื้นที่สำรวจจริงในภาคสนาม

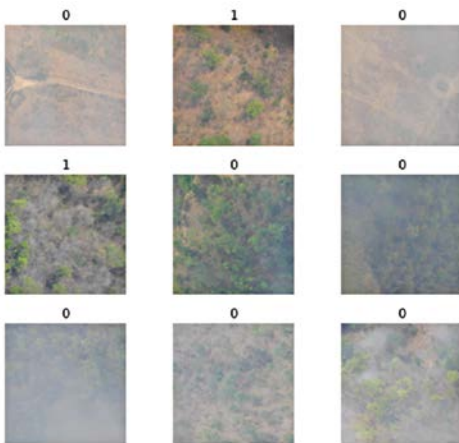
2) ส่วนของการพัฒนาระบบแจ้งเตือนจาก AI โดยแจ้งเตือนจากข้อมูลโดรนสำรวจในรูปแบบของ พิกัดตำแหน่งจาก GPS โดยการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ รับภาพจาก UAV มาจำแนกข้อมูลและแสดงผลพิกัด จุดที่เกิดปัญหาและจุดที่ควรเผ่าระวัง โดยอัตโนมัติ

กระบวนการเตรียมภาพสำหรับสอนโมเดล ภาพแต่ละภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับมีขนาด ใหญ่เกินกว่าที่จะนำไปใช้งานได้ จึงต้องซอยแบ่งภาพ ขนาดใหญ่ให้ได้เป็นส่วนของภาพตามขนาดมาตรฐาน ของโมเดลเป็นภาพขนาดเล็กคือ 416 x 416 pixels



รูปที่ ๑ ตัวอย่างภาพใหญ่ที่ถูกซอยย่อยเป็นภาพขนาด 416 x 416 pixels

ได้ทำการแบ่งภาพเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นภาพที่มีไฟป่าหรือควันไฟในภาพ เก็บภาพกลุ่มนี้ไว้ในโฟลเดอร์ที่มีชื่อว่า Fire และให้ชื่อสถานะเป็นหมายเลข 0 กลุ่มที่สองเป็นภาพที่ไม่มีไฟหรือควันไฟในภาพ เก็บภาพกลุ่มนี้ในโฟลเดอร์ที่มีชื่อว่า No_fire และให้สถานะภาพเป็นหมายเลข 1

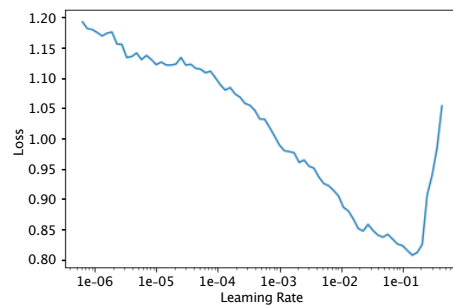


รูปที่ ๒ ตัวอย่างภาพถ่ายที่มีการให้สถานะมีไฟป่า (0) และไม่มีไฟป่า (1)

ในแต่ละกลุ่มแบ่งภาพอีกเป็นสองกลุ่มย่อยเพื่อไว้ใช้สำหรับสอนและทดสอบโมเดล โดย 80% ของภาพจะใช้สำหรับการสอน ที่เหลืออีก 20% ใช้สำหรับการทดสอบความถูกต้องของโมเดล ภาพในกลุ่มที่ใช้สำหรับสอนโมเดลจะทำการ Augmentation เพื่อเพิ่มจำนวนคุณลักษณะภาพเพื่อให้การสอนโมเดลมีความแม่นยำมากขึ้น เช่น การหมุนภาพแนวตั้ง 90 องศา การกลับภาพ เป็นต้น การในการทดลองนี้ทำการ Augmentation จำนวน 10 แบบ จึงทำให้จำนวนภาพที่นำมาสอนโมเดลมีจำนวนเพิ่มขึ้น 10 เท่า

กระบวนการสอนโมเดล เป็นการสอนโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกในเบื้องต้นใช้การเรียนรู้เชิงลึกที่มีอัลกอริทึมชื่อว่า Densenet121 เป็นโครงสร้างพื้นฐานใช้ภาพสำหรับสอนในการสอนโมเดลการเรียนรู้

เชิงลึกเพื่อให้โมเดลได้เรียนรู้การแยกภาพมีไฟหรือไม่มีไฟ ระหว่างการสอนมีการปรับอัตราการเรียนรู้ (learning rate) ของโมเดลเพื่อให้ได้อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม หากอัตราการเรียนรู้ต่ำไปจะเกิดเหตุการณ์โมเดล Underfitting แต่หากอัตราการเรียนรู้สูงเกินไปจะเกิดเหตุการณ์โมเดล Overfitting ทั้งนี้เมื่อได้เลือกค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมส่งผลให้ค่าความสูญเสียในการเรียนรู้จะลดลงแต่เมื่อถึงจุดหนึ่งเมื่อค่าอัตราการเรียนรู้เพิ่มขึ้นค่าความสูญเสียไม่ได้ลดลงแต่กลับเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ ๓ ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเรียนรู้และความสูญเสียที่เกิดขึ้น

epoch	train_loss	valid_loss	accuracy	time
0	0.297418	0.953580	0.799043	00:21
1	0.427451	1.257859	0.866029	00:21
2	0.433230	0.616897	0.837321	00:20
3	0.413947	0.809503	0.818182	00:21
4	0.392105	0.907639	0.688995	00:21
5	0.376523	0.475150	0.842105	00:20
6	0.377835	0.320377	0.880383	00:21
7	0.342661	0.279484	0.889952	00:21
8	0.318579	0.270332	0.899522	00:20
9	0.293501	0.260011	0.904306	00:21

รูปที่ ๔ ตัวอย่างประสิทธิภาพของโมเดลที่ได้หลังจากได้รับการสอนไปจำนวน 10 รอบ

เมื่อได้โมเดลที่ได้รับการสอนจากการทดสอบแล้วจึงได้ทำการทดสอบโมเดลที่ได้มาด้วยการนำเข้ากลุ่มภาพที่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของโมเดล หากประสิทธิภาพของโมเดลยังไม่มีคุณภาพตามระดับที่ยอมรับได้ก็จะทำการปรับปรุงโมเดล โดยวิธีการ คือ เพิ่มจำนวนภาพที่ใช้สอน เปลี่ยนโครงสร้างของอัลกอริทึมที่ใช้ เพิ่มจำนวนรอบในการสอน เป็นต้น [5]

การทดสอบความเหมาะสมของโมเดลที่เลือกใช้นั้น ได้ผ่านการวัดประสิทธิภาพด้วยวิธีการ direct validation กับโมเดลชนิดอื่น และได้ทำการใช้ตัวแปรในการวัดประสิทธิภาพ คือ Accuracy เป็นการวัดความแม่นยำของโมเดลกับประเภทของข้อมูลที่นำไปเทรน Sensitivity คือ ความไวต่อผลบวกจริง (true positive rate) ซึ่งความไวมีความสัมพันธ์กับการแยกผลลบปลอม โดยหากมีความไวมากขึ้นก็จะส่งผลให้การพบผลลบปลอม (false negative) นั้นลดน้อยลง ส่วน Specificity คือ ความจำเพาะซึ่งเป็นสัดส่วนของผลลัพธ์ที่เป็นจริงของการทดสอบนั้น ๆ โดยที่ความจำเพาะนี้มีประโยชน์ในการกันผลลบปลอม (false negative) ซึ่งพบว่าหากการทดสอบมีความจำเพาะมากขึ้นก็จะส่งผลให้โอกาสที่จะได้ผลบวกที่ไม่เป็นจริง (false positive) นั้นก็จะลดน้อยลงเช่นกัน และ Matthews correlation coefficient คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แมตทิวส์ เป็นตัววัดคุณภาพของไบนารี (สองชั้น) โดยการจำแนกประเภทนี้เป็นการวัดค่าทางสถิติที่จะให้คะแนนสูงเมื่อการทำนายได้ผลดีในทั้งสี่ตัวแปรดังกล่าวด้วยการวัดค่าผลรวมของตัวแปรทั้งสี่ประเภทรวมกัน หากผลลัพธ์ของการทดสอบที่ได้มีค่ามากก็แสดงถึงอัลกอริทึมที่ทำงานแบบเดาสุ่มน้อยลงหรือมีความแม่นยำมากขึ้น

4. ผลการวิจัย

4.1 การบินถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กของการเกิดไฟป่าจริงในพื้นที่ศึกษา

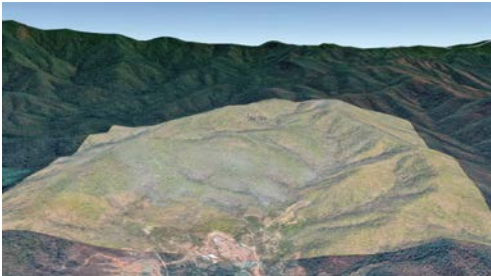
การเก็บข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับเป็นการบินถ่ายภาพครอบคลุมพื้นที่ป่าไม้ โดยกำหนดให้มีรูปแบบของการถ่ายภาพให้เป็นภาพตั้ง (vertical image) ที่มีแกนของกล้องถ่ายภาพมีมุม 90 องศา กับระดับพื้นดิน และมีความละเอียดของไฟล์ภาพที่ 20 เมกะพิกเซล โดยกำหนดความสูงของการบินถ่ายภาพที่ 425 เมตรจากระดับของพื้นที่ดินที่จุดปล่อยของ UAV ซึ่งจากความสูงดังกล่าวส่งผลให้สามารถกำหนดความละเอียดเชิงพื้นที่หรือระยะสุ่มเชิงพื้นที่ (GSD) ของภาพถ่ายอยู่ที่ระดับ 10 เซนติเมตรต่อจุดภาพ (pixel) ซึ่งถือเป็นภาพถ่ายทางอากาศที่มีความละเอียดสูง (high spatial resolution)



รูปที่ ๕ ตัวอย่างภาพถ่ายทางอากาศที่มีการเกิดไฟจริงจากอากาศยานไร้คนขับ

สำหรับความถูกต้องเชิงพื้นที่ (spatial accuracy) ของภาพถ่ายได้ถูกกำหนดรูปแบบการบินถ่ายภาพด้วยเทคนิคการปรับค่าเชิงตำแหน่งเวลาจริงแบบ Real-Time Kinematic (RTK) ร่วมกับ

การประมวลผลหลังการดำเนินงานแบบ Post-Processing Kinematic (PPK) ด้วยการรับสัญญาณจากเครื่องรับวัดตำแหน่ง GNSS ในภาคสนามเพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบของภาพถ่ายอยู่ที่ระดับ 2 เซนติเมตร ซึ่งถือได้ว่ามีความถูกต้องเชิงพื้นที่สูงตามมาตรฐานทางแผนที่ของ ASPRS โดยความถูกต้องของภาพถ่ายนี้จะถูกนำไปยืนยันในการระบุพิกัดตำแหน่งของการเกิดไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้าต่อไประบบการแรงดันไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนั้นได้ออกแบบให้มีการนำข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับนำมาทำการอัปโหลดเข้าสู่ระบบเพื่อจำแนกหาตำแหน่งที่มีควันและไฟในภาพ พร้อมทั้งรายงานตำแหน่งพิกัดด้วยการแสดงตำแหน่งไฟลงบนแผนที่พื้นฐานเพื่อแจ้งพิกัดการเกิดไฟด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากระบบอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ ๖ ภาพถ่ายออร์โธโมเสกที่มีการเกิดไฟฟ้า จำนวน 452 ภาพ

4.2 การศึกษาและพัฒนาระบบตรวจจับไฟฟ้าแบบอัตโนมัติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยการใช้ภาพจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

4.2.1 การสร้างและทดสอบระบบรู้จำรูปภาพ

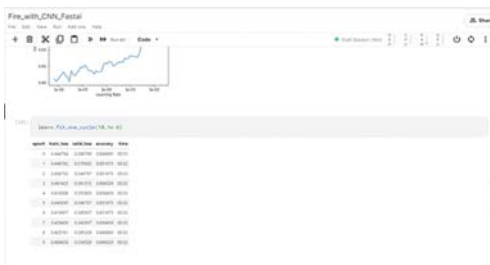
ข้อมูลภาพที่นำมาใช้ในการทดลองได้ใช้ภาพที่มีไฟเกิดขึ้น 655 ภาพ และไม่มีไฟ 3,881 ภาพ จากภาพที่ถ่ายได้จากอากาศยานไร้คนขับในฤดูกาลไฟป่าที่ผ่านมา โดยมีแบ่งข้อมูลใช้ในการทดลองเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกใช้ในการฝึกสอน (train)

กลุ่มที่สองใช้ในการประเมินความลำเอียงของโมเดล (validation) และกลุ่มที่สามใช้ทดสอบโมเดล (test) จากตารางเห็นว่าจำนวนของภาพที่มีไฟและไม่มีไฟมีจำนวนต่างกันมาก ซึ่งพิจารณาได้ว่าข้อมูลไม่มีความสมดุล เพื่อแก้ปัญหาคือความสมดุลของข้อมูล ผู้วิจัยใช้ภาพที่มีไฟทุกภาพในการทดลอง แต่สำหรับกลุ่มภาพไม่มีไฟผู้วิจัยได้สุ่มเลือกภาพในกลุ่มนี้มาในจำนวนที่เท่ากับภาพที่มีไฟ ภาพในกลุ่มที่หนึ่งและสองมีจำนวนภาพรวมกันเป็นร้อยละ 80 ของภาพทั้งหมดที่เหลือเป็นกลุ่มที่สาม

ตารางที่ 1 รายละเอียดชุดข้อมูลที้นำมาใช้ในการทดลอง

	Fire	No Fire
Number	655	3881
Train	420	420
Validation	104	104
Test	131	131

การสร้างโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แพลตฟอร์มของ Kaggle ซึ่งเป็นบริการหนึ่งของ Google ที่ให้บริการซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ซึ่งอนุญาตให้นักวิทยาศาสตร์ข้อมูลได้ทำการทดลองแนวคิด สร้าง แบ่งปันชุดข้อมูลและโมเดลที่สร้างขึ้น เพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ของผู้คนในวงการ รวมถึงจัดให้มีการแข่งขันแก้ปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูลเพื่อชิงเงินรางวัลอีกด้วยดังรูปที่ 7 แสดงหน้าเว็บของ Kaggle และตัวอย่างการใช้งาน ในภาพเป็นการฝึกสอนโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกอัลกอริทึมหนึ่ง 10 รอบ และแสดงผลความถูกต้องของโมเดลจากกราฟสรุป ทีมวิจัยจึงเลือกใช้ Densenet121 เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการวัดประเมินผล

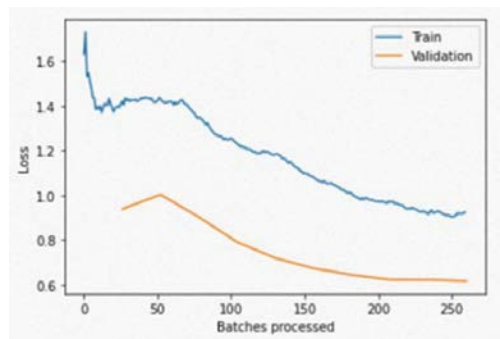


รูปที่ ๗ หน้าจอแสดงผลของ Kaggle

โดยจากรูปที่ 7 train_loss คือ loss ที่เกิดจากการคำนวณจากข้อมูลที่ใช้สอนโมเดล และ valid_loss คือ loss ที่เกิดจากการคำนวณจากข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ใช้เพื่อทดสอบโมเดลในกรณีที่เรานำไปใช้จริง แล้วโมเดลต้องเจอกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน แล้วจะยังสามารถทำอย่างที่เราต้องการได้หรือไม่ ความสามารถที่โมเดลเรียนรู้เมื่อโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกผ่านการฝึกสอนมากขึ้น

4.2.2 การสอนโมเดล

ในการสอนโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกในเบื้องต้น ใช้การเรียนรู้เชิงลึกที่มีอัลกอริทึมชื่อว่า Densenet121 เป็นโครงสร้างพื้นฐาน ภาพสำหรับสอนในการสอนโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อให้โมเดลได้เรียนรู้การแยกภาพมีไฟหรือไม่มีไฟ ได้มาจากการเก็บข้อมูลภาคสนามในฤดูกาลที่ผ่านมา ทั้งนี้ระหว่างการสอนต้องมีการปรับอัตราการเรียนรู้ (learning rate) ของโมเดลเพื่อให้ได้อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม หากอัตราการเรียนรู้ต่ำไปจะเกิดเหตุการณ์โมเดล Underfitting แต่หากอัตราการเรียนรู้สูงเกินไปจะเกิดเหตุการณ์โมเดล Overfitting เมื่อเลือกค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมค่าความสูญเสียในการเรียนรู้จะลดลง แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งเมื่อค่าอัตราการเรียนรู้เพิ่มขึ้นค่าความสูญเสียไม่ได้ลดลงแต่กลับเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป



รูปที่ ๘ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเรียนรู้และความสูญเสียที่เกิดขึ้น

หลังจากได้โมเดลที่ได้รับการสอนแล้ว การทำการทดสอบโมเดลที่ได้มาด้วยการป้อนกลุ่มภาพที่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของโมเดล ผลที่ได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของโมเดลยังไม่ได้ระดับที่คาดหวังจะทำการสอนสามารถทำการปรับปรุงโมเดลหลายวิธี เช่น เพิ่มจำนวนภาพที่ใช้สอน เปลี่ยนโครงสร้างของอัลกอริทึมที่ใช้ เพิ่มจำนวนรอบในการสอน เป็นต้น

4.2.3 ระบบแจ้งเตือนการเกิดไฟป่า

ระบบแจ้งเตือนได้ทำการออกแบบให้มีขั้นตอน Pre-Processing Process โดยการอ่านค่าพิกัดจากภาพถ่ายทางอากาศที่ผู้ใช้ได้อัปโหลดสำเร็จแล้วเพื่อนำมาตัดแบ่งภาพออกเป็นภาพย่อย 4x5 ส่วน และ Processing Process โดยการนำค่า GNSS Info ที่ได้มาจากภาพถ่ายนำเข้าสู่สูตรการคำนวณเพื่อหาพิกัดอ้างอิงเชิงตำแหน่งละติจูด (latitude) และลองจิจูด (longitude) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ ดังนี้

$$C = d + \left(\frac{m}{60}\right) + \left(\frac{s}{3600}\right) \quad (1)$$

โดยที่ C คือ Coordinate

d คือ degrees

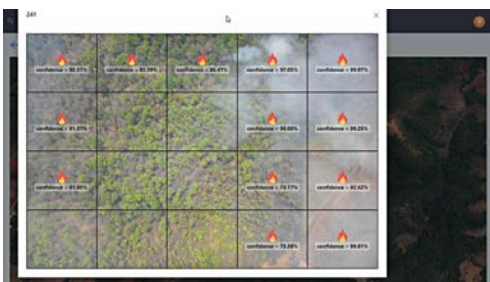
m คือ minutes

s คือ seconds

หลังจากการประมวลผลในขั้นทั้งหมดแล้ว ระบบจะทำการสรุปผลข้อมูล โดยแสดงผลการประเมินในแผนที่ออนไลน์ที่สามารถอ้างอิงพิกัดตำแหน่งของภาพที่อัปโหลดเพื่อประมวลผลในระบบ โดยการแสดงผลการทำงานและแสดงระบบแจ้งเตือนเป็นการอธิบายโดยภาพรวม ซึ่งระบบได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้พร้อมสำหรับการใช้งานจริง ในฤดูกาลที่เกิดไฟป่าในปีต่อไปเพื่อเป็นระบบที่มีความแม่นยำและสามารถใช้งานได้อย่างอิงจากข้อมูล สภาพภูมิประเทศป่าของเชียงใหม่ เพื่อการสร้างผลตรวจจับอย่างแม่นยำทั้งนี้ความแม่นยำของโมเดลจะเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการเพิ่มจำนวนภาพตัวอย่างในการเรียนรู้ของโมเดล จะสามารถสร้างการจำแนกลักษณะไฟและควันที่เกิดขึ้นในพื้นที่ป่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ ๙ แสดงตัวอย่างผลการประเมินผลจาก AI โดยอ้างอิง Coordinate จากภาพที่อัปโหลด



รูปที่ ๑๐ แสดงตัวอย่างตำแหน่งที่ถูกประเมินว่าได้เกิดไฟป่าขึ้น โดยสามารถแสดงค่าร้อยละความเชื่อมั่นของการเกิดไฟ

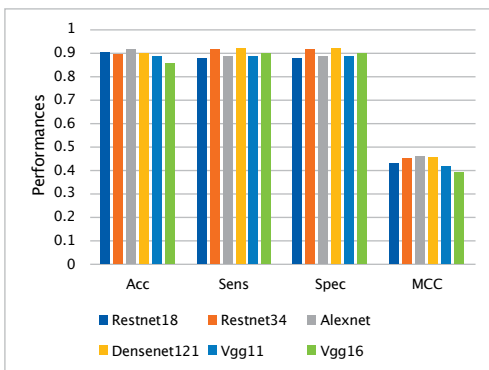
5. อภิปรายผลการศึกษา

การพัฒนาแบบปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับไฟป่าด้วยการใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อสร้างระบบจำแนกวัตถุด้วย AI ด้วยการประมวลผลภาพ (Image processing) ประกอบด้วยการพัฒนาโมเดลที่ได้จาก Kaggle Export ซึ่งเป็น PT format นำมาประมวลผลร่วมกับ Pytorch Library ซึ่งใช้สำหรับการทำงานด้าน AI ด้วยรูปแบบภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Python ที่สามารถพัฒนาโปรแกรมสำหรับการอัปโหลดภาพและการเข้าสู่กระบวนการจำแนกข้อมูลบนภาพได้ โดยหลังทำการอัปโหลดภาพถ่ายทางอากาศระบบได้ดำเนินการ Extract Exif Data จาก Metadata ของภาพถ่ายจากระบบอากาศยานไร้คนขับ โดยมีค่าพิกัดตำแหน่งของภาพ (GPSInfo) เป็นข้อมูลอ้างอิงเชิงตำแหน่งบนแผนที่ทั้งพิกัดละติจูดและลองจิจูด (GPSLatitudeRef และ GPSELongitudeRef) หลังจากทำการกระบวนการข้างต้นแล้วจะนำค่าที่ได้จากภาพมาทำการคำนวณหาพิกัดอ้างอิง และจัดเก็บไว้เป็นตามจุดที่มีการตรวจเจอไฟและควัน

การทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของโมเดลที่นำมาใช้ในการศึกษาและพัฒนาในครั้งนี้ โดยการเปรียบเทียบโมเดลต่าง ๆ เพื่อสร้างโมเดลทำนายข้อมูลแบบสองสถานะ (binary classifier) ด้วยการใช้เครื่องมือวัดประสิทธิภาพของโมเดลเพื่อทำการประเมินว่าโมเดลชนิดใดที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานกับข้อมูลภาพถ่ายการเกิดไฟป่า งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือวัดประสิทธิภาพของโมเดล 4 ชนิด คือ Accuracy, Sensitivity, Specificity, และ Matthews correlation coefficient

การศึกษาค้นคว้านี้ได้ทดลองใช้อัลกอริทึมของการเรียนรู้เชิงลึกมาทดสอบ 6 ชนิด คือ Resnet18,

Restnet34, Alexnet, Vgg11, Densenet121 และ Vgg16 โดยได้ผลการวัดประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 11 และ ตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า Densenet121 คือ โมเดลที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการใช้งานกับข้อมูลประเภทนี้ในระบบ Kaggle ด้วยมีผลของประสิทธิภาพในทั้ง 4 ด้านที่ดีที่สุด อันสามารถนำไปสู่การฝึกสอนโมเดลเชิงลึกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด



รูปที่ ๑๑ กราฟสรุปประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึก 6 แบบ

	Acc	Sens	Spec	MCC
Restnet18	0.899369	0.878032	0.878032	0.431277
Restnet34	0.892202	0.910987	0.910987	0.450118
Alexnet	0.912557	0.884883	0.884883	0.460309
Densenet121	0.893922	0.915548	0.915548	0.456683
Vgg11	0.884174	0.884809	0.884809	0.415829
Vgg16	0.849771	0.896279	0.896279	0.389063

จากกระบวนการทดสอบของอัลกอริทึมดังกล่าวเพื่อเป็นการวัดประสิทธิภาพของโมเดลแล้ว โดยการใช้กลุ่มภาพที่แยกไว้สำหรับทำการสอนโมเดล ซึ่งได้เลือกใช้อัลกอริทึม Densenet121 ในระบบ Kaggle เนื่องจากมีผลของประสิทธิภาพในทั้ง 4 ด้านที่ดีที่สุด เพื่อทำการฝึกสอนโมเดลเชิงลึก ผลลัพธ์ทำให้ได้โมเดลที่พร้อมใช้งานในการทดสอบโมเดลนั้น โดยได้ทำการทดสอบโดยการป้อนกลุ่มภาพที่แบ่งไว้ใช้

สำหรับทดสอบ จำนวน 208 รูป เพื่อหาประสิทธิภาพความแม่นยำในการจำแนกข้อมูล

epoch	train_loss	valid_loss	accuracy	time
0	1.410730	0.937948	0.449761	00:31
1	1.436906	1.002798	0.449761	00:29
2	1.345647	0.902475	0.535885	00:30
3	1.237255	0.790503	0.574163	00:29
4	1.178961	0.718780	0.636364	00:29
5	1.084527	0.672842	0.641148	00:30
6	1.012022	0.643200	0.665072	00:30
7	0.972650	0.621979	0.693780	00:29
8	0.920105	0.621864	0.688995	00:29
9	0.923507	0.615587	0.684211	00:29

รูปที่ ๑๒ การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลจากการสอนจำนวน 10 รอบ

จากผลลัพธ์ของกระบวนการทดสอบประสิทธิภาพของการสอนโมเดลจะเห็นได้ว่าการสอนโมเดลทั้งหมด 10 รอบ จำนวนและร้อยละของความแม่นยำ (accuracy) โดยเริ่มจาก 44.97% เพิ่มความแม่นยำไปจนถึง 68.42% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนครั้งที่ได้รับการสอนโมเดลที่เพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้มีความแม่นยำมากขึ้นเช่นกัน ดังข้อมูลในรูปที่ 12 โดยจากการสอนโมเดลที่ใช้วิธีการ Transfer Learning ซึ่งสามารถทำการสอนโมเดลได้ด้วยเวลาและทรัพยากรที่จำกัดที่ไม่จำเป็นต้องสร้าง Convolutional Neural Network ใหม่อีกครั้ง หลังจากนั้นได้นำโมเดลดังกล่าวมาเป็นโมเดลตั้งต้นเพื่อทำการสอนให้เข้ากับชุดข้อมูลที่ผู้วิจัยได้ทำการจัดเก็บมา ซึ่งเป็น Dataset ขนาดเล็กในงานเฉพาะทาง จึงสามารถเป็นการลดระยะเวลาในการสอนโมเดลได้ภายใน 10 รอบ และได้ประสิทธิภาพที่ดีและให้อยู่ในระดับความแม่นยำที่ยอมรับได้

6. บทสรุป

การศึกษาและพัฒนาต้นแบบปัญญาประดิษฐ์เพื่อระบบตรวจจับการเกิดไฟฟ้าด้วยข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ ได้ทำการบินถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กของการเกิดไฟฟ้าจริงในพื้นที่ศึกษาด้วยการบันทึกภาพแบบ snap shot จากระบบกล้องถ่ายภาพของ UAV ในช่วงแสงขาวมองเห็นได้ (visible light) หรือในระบบตรวจจับแสงในช่วงคลื่น Blue Green และ Red เพื่อนำมาใช้เป็นภาพต้นแบบของการสร้างการเรียนรู้ข้อมูลให้กับระบบปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับการเกิดไฟฟ้า โดยได้ทำการบันทึกภาพ รวมจำนวน 4,536 ภาพ โดยเป็นภาพที่มีไฟฟ้า จำนวน 655 ภาพ และไม่มีไฟ จำนวน 3,881 ภาพ และได้จำแนกข้อมูลออกเป็นสองส่วนเพื่อนำมาทดสอบและสอนโมเดล จำนวน 840 ภาพ ทดสอบความเร็วและความถูกต้องโมเดล 208 ภาพ และทดสอบการใช้งานโมเดล 262 ภาพ

สำหรับการพัฒนาระบบตรวจจับไฟฟ้าแบบอัตโนมัติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อตรวจจับไฟฟ้าและควันไฟในพื้นที่ป่าไม้ที่มีต้นไม้หนาแน่น โดยการใช้เครื่องมือวัดประสิทธิภาพของโมเดล 4 ชนิด คือ Accuracy, Sensitivity, Specificity และ Matthews correlation coefficient ซึ่งได้นำมาทดสอบด้วยวิธี Direct validation โดยได้ทดลองใช้อัลกอริทึมของการเรียนรู้เชิงลึกมาทดสอบ 6 ชนิด คือ Resnet18, Resnet34, Alexnet, Vgg11, Densenet121 และ Vgg16 และได้ทำการใช้กลุ่มภาพที่แยกไว้สำหรับสอนโมเดลทำการสอนโมเดล จากการประเมินประสิทธิภาพโมเดล Densenet121 ในระบบ Kaggle ได้ถูกเลือกใช้ในการฝึกสอนโมเดลเชิงลึก ซึ่งได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นโมเดลที่พร้อมใช้งานที่มีประสิทธิภาพของการสอน เพื่อทำการวิเคราะห์หาจุดเกิดไฟฟ้าเป้าหมาย และทำการรายงานเป็นพิกัดตำแหน่งของไฟฟ้าโดยอัตโนมัติในระบบแจ้งเตือนไฟฟ้า

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่ได้อนุเคราะห์และสนับสนุนงบประมาณในการศึกษาและพัฒนาการวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), “สรุปสถานการณ์ไฟฟ้าและหมอกควันด้วยภาพถ่ายดาวเทียมประจำปี 2562,” กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, 2562.
- [2] พ. เหมวรรณ. การวิเคราะห์และแปลความภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ. เชียงใหม่: ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2563.
- [3] ส. บุญธรรัตน์, ธ. เหล่าสุวรรณ, และ อ. ภูมิระกาญจนะ โรแบร์, “รูปแบบการตรวจสอบความเสียหายโครงข่ายสายส่งไฟฟ้าด้วยอากาศยานไร้คนขับ,” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 4, น. 12 - 31, 2563.
- [4] พ. สันติธรรมนนท์, ภ. อุทัยศรี, และ ธ. ชื่นชม. สนามทดสอบการทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [5] W. Sun, P. Singkhamfu, and P. Suwansrikham, “UAV Photogrammetry-Based Accident Assessment Road Condition Analysis Using Image Classification,” in *Int. Conf. Digit. Arts, Media Technol.*, 2022, pp. 319 - 322, doi: 10.1109/ECTIDAMTNCN 53731.2022.9720398.
- [6] A. Bhradwaj, L. Sam, Akansaka, F. J. Martin -Torres, and R. Kumar, “UAVs as Remote

- Sensing Platform in Glaciology: Present Application and Future Prospects,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 175, pp. 196 - 204, 2016.
- [7] S. P. Bemis *et al.*, “Ground-based and UAV-based Photogrammetry: A Multi-scale, High Resolution Mapping Tool for Structural Geology and Paleoseismology,” *J. Struct. Geol.*, vol. 69, Part A, pp. 163 - 178, 2014.
- [8] C. C. Li, G. S. Zhang, T. J. Lei, and A. D. Gong, “Quick Image-processing Method of UAV without Control Points Data in Earthquake Disaster Area,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 21, Supplement 3, pp. s523 - s528, 2011.
- [9] J. R. R. Uijlings, K. E. A. Van de Sande, T. Gevers, and A. W. M. Smeulders, “Selective Search for Object Recognition,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 104, pp. 154 - 171, 2013.
- [10] O. Küng *et al.*, “The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-light UAV Imagery,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XXXVIII-1/C22, pp. 125 - 130, 2011.
- [11] S. Nebiker, A. Annen, M. Scherrer, and D. Oesch, “A Light-weight Multispectral Sensor for Micro UAV Opportunities for Very High Resolution Airborne Remote Sensing,” in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Beijing, China, 2008, pp. 1193 - 1199.
- [12] C. A. Rokhmana, “The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 24, pp. 245 - 253, 2015.
- [13] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks,” in *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 6, pp. 1137 - 1149, 2017.
- [14] S. Siebert and J. Teizer, “Mobile 3D Mapping for Surveying Earthwork Projects Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System,” *Autom. Constr.*, vol. 41, pp. 1 - 14, 2014.
- [15] S. Sudhakar, V. Vijayakumar, C. Sathiyakumar, V. Priya, L. Ravi, and V. Subramaniaswamy, “Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and Monitoring for Reducing False Alarms in Forest-fires,” *Comput. Commun.*, vol. 149, pp. 1 - 16, 2020.
- [16] M. Uysal, A. S. Toprak, and N. Polat, “DEM Generation with UAV Photogrammetry and Accuracy Analysis in Sahitler Hill,” *Measurement*, vol. 73, pp. 539 - 543, 2015.
- [17] D. Ventura, M. Bruno, G. J. Lasinio, A. Belluscio, and G. Ardizzone, “A Low-cost Drone Based Application for Identifying and Mapping of Coastal Fish Nursery Grounds,” *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 171, pp. 85 - 98, 2016.
- [18] S. A. Vollgger and A. R. Cruden, “Mapping Folds and Fractures in Basement and Cover Rocks using UAV Photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia,” *J. Struct. Geol.*, vol. 85, pp. 168 - 187, 2016.

คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DTAJ)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศเป็นวารสารของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สำหรับการบริหาร จัดการ ส่งเสริม แบ่งปัน และแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ และบทวิเคราะห์ จากการศึกษา ค้นคว้า วิจัยและพัฒนา ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งจัดพิมพ์เป็นราย 6 เดือน

ผู้สนใจเขียนบทความเพื่อส่งเข้ามาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศสามารถติดต่อขอข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ โทร. 02 980 6688 ต่อ 2123 หรือ 2124 หรือ e-mail: admin-dtaj@dti.or.th



■ หลักเกณฑ์การพิจารณาเลือกรองบทความ

บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ต้องเป็นบทความ ที่แสดงให้เห็นถึงคุณภาพทางวิชาการและมีประโยชน์ ในเชิงทฤษฎีหรือเชิงปฏิบัติ โดยผ่านการพิจารณาและ ให้ความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) ซึ่ง ต้องมีคุณสมบัติอย่างต่ำตามเกณฑ์มาตรฐาน คือเป็น ผู้เชี่ยวชาญในสาขานั้น ๆ ทำงานวิจัยและมีผลงานวิจัย อย่างต่อเนื่องจำนวนอย่างน้อย 2 ท่านขึ้นไปต่อบทความ และ/หรือ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็น รายการนี้



■ คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์

บทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์จะต้อง ไม่เคยเผยแพร่ในวารสารใดมาก่อนและไม่อยู่ในระหว่าง การพิจารณาของวารสารอื่น หากมีเนื้อหาข้อมูลวิจัย บางส่วนเคยพิมพ์ในรายงานการประชุมวิชาการจะต้อง มีส่วนที่เพิ่มเติมหรือขยายจากส่วนที่เคยตีพิมพ์และต้อง มีคุณค่าทางวิชาการที่เด่นชัด โดยได้รับการกลั่นกรองจาก ผู้ทรงคุณวุฒิและได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

■ บทความที่รับพิจารณาลงพิมพ์



บทความวิจัย

มีความยาวไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows หรือไม่น้อยกว่า 2,500 คำ โดยการใช้คำสั่ง Word count ใน MS Word เพื่อนับคำ (แต่ไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ A4) ประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน (Title) สถานที่ทำงาน (Work place of author & co-authors) ช่องทางการติดต่อผู้เขียน (Contact address of correspondence) บทคัดย่อ (Abstract) และคำสำคัญ (Keywords ไม่เกิน 3-5 คำ) โดยเนื้อหาดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง ภาคผนวก (ถ้ามี)

เนื้อเรื่องจะประกอบด้วยบทนำ (Introduction) ขอบเขต การวิจัย/วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย/ทดลอง (Materials and Methods) ผลการวิจัย/ทดลอง (Results) วิจารณ์ อภิปรายผล (Discussion) บทสรุป (Conclusions) กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) (ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง (References)

บทความวิชาการ

มีความยาวไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows หรือไม่น้อยกว่า 2,500 คำ โดยการใช้คำสั่ง Word count ใน MS Word เพื่อนับคำ (แต่ไม่ควรเกิน 10 หน้ากระดาษ A4) เป็นบทความที่รวบรวม หรือเรียบเรียงจากหนังสือ เอกสาร ประสพการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ มีคุณค่าทางวิชาการ

บทความวิชาการต้องประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน (Title) สถานที่ทำงาน (Work place of author & co-authors) ช่องทางการติดต่อผู้เขียน (Contact address of Correspondence) บทคัดย่อ (Abstract) และคำสำคัญ (Keywords ไม่เกิน 3-5 คำ) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง ซึ่งลักษณะองค์ประกอบของเนื้อเรื่องอาจจะ คล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง ผลการวิจัยหรือผลการทดลอง เป็นต้น

กระบวนการพิจารณากลับรองบทความ (Review Process)

➤ บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DTAJ) จะต้องดำเนินการทุกขั้นตอนผ่านระบบออนไลน์ โดยขั้นตอนการพิจารณากลับบทความมีทั้งสิ้น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอน
01



ผู้เขียนส่งบทความเพื่อขอรับการพิจารณาผ่านระบบออนไลน์

ขั้นตอน
02



กองบรรณาธิการตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาและรูปแบบของบทความเบื้องต้นโดยอาจตอบรับหรือปฏิเสธการตีพิมพ์

ขั้นตอน
03



จัดส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาและประเมินบทความอย่างน้อย 2 ท่านต่อ 1 บทความ

ขั้นตอน
04



กองบรรณาธิการพิจารณาผลการประเมินในเบื้องต้นและส่งบทความให้ผู้เขียนแก้ไขหรือปฏิเสธการตีพิมพ์

ขั้นตอน
05



ผู้เขียนแก้ไขบทความและส่งบทความฉบับแก้ไขพร้อมคำชี้แจงการแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ประเมิน

ขั้นตอน
06



กองบรรณาธิการตรวจสอบความถูกต้องของบทความภายหลังการแก้ไขก่อนทำหนังสือตอบรับการตีพิมพ์

ขั้นตอน
07



จัดทำรูปเล่มและเผยแพร่ลงในวารสารรูปแบบออนไลน์ผ่านระบบ ThaiJO

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ปีที่ 4 ฉบับที่ 10 / กรกฎาคม - ธันวาคม 2565

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- 🌈 การพัฒนาแบบจำลองสามมิติต้นแบบสำหรับชิ้นส่วนของชนวนหัวสำหรับลูกปืนประเภทแรงเหวี่ยง
หนีศูนย์กลางในการปลดปล่อยชนวนพร้อมทำงานสำหรับลูกปืนขนาด 30 x 165 มม.
ทวี ดิจะมาลา
- 🌈 การทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยเกี่ยวกับความรู้พื้นฐาน สถานะ และการพัฒนาวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน
ในระดับนาโนที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออน
ปณิทัต หาสิน

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- 🌈 อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในการตอบสนองความมั่นคงของมนุษย์
กนก บุนนาค

บทความวิจัย (Research Articles)

- 🌈 การเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ทางทหารโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม
กรณีศึกษา: สงครามรัสเซีย-ยูเครน พ.ศ. 2565
พงศ์พันธุ์ จันทะคัด, พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ และ เยาวเรศ จันทะคัด
- 🌈 การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตระหว่างเหล็กออกไซด์นาโนและแกรไฟิน
เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงจรวดเชื้อเพลิงแข็ง
ศิระ ศรีนิเวศน์, อภิสิทธิ์ ภาระเวก และ พิมพ์ภัส งามสันติวงศ์
- 🌈 การศึกษาแบบจำลองแลนเชสเตอร์สำหรับสมรรถนะทางอากาศที่ความน่าจะเป็น
ของการโจมตีสำเร็จขึ้นกับระยะทาง
เทียนสิริ เหลืองวิไล, สมบูรณ์ พัฒนสกุลลอย และ ประกรณ์ ประทุมมา
- 🌈 การประเมินพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่
นกรินทร์ ชัยแก้ว, Nitin Kumar Tripathi, ชนากานต์ วุฒิศักดิ์การุณ และ ศิริลักษณ์ พิมพ์สาร
- 🌈 การออกแบบและการหาค่าที่เหมาะสมทางอากาศพลศาสตร์ของจรวด DTI
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ในย่านความเร็วเหนือเสียง
โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล
วันชัย เจียจันทร์ และ เอกพล ใบโพธิ์
- 🌈 การศึกษาและพัฒนาต้นแบบปัญญาประดิษฐ์เพื่อระบบตรวจจับการเกิดไฟฟ้า
ด้วยข้อมูลสภาพจากอากาศยานไร้คนขับ
ภูตินันท์ สิงห์คำฟู และ พลภัทร เหมวรรณ

