

รายชื่อผู้จัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

คณะที่ปรึกษา

พลเอก ดร.ชรัติ อุ่มสัมฤทธิ์
นาวาอากาศเอก คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์
พันเอก จิรศักดิ์ จิวไม้แดง
พลตรี ไพรพงศ์ โพธิ์เหมือน
นาวาอากาศโท ดร.เพิ่มศักดิ์ ศิริพละ

บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

กองบรรณาธิการ

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

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ฝ่ายจัดการ

นางสาวอินทิรา จุลชาติ
นางสาวสวิตรี ระวังพิษ
นางสาวนุศรัตน์ ลวงลายทอง

นางสาวบุญญาภรณ์ วาณิชชาติ
นางสาวลัญญณ์ฐ์ ภาตะนันท์
ว่าที่ร้อยตรีหญิง ดร.ลำยอง แสนทวี

สารบัญ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ปีที่ 6 ฉบับที่ 14 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- การพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะ
ด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4
เฉษฏา คำพอง และ รุจชัย อึ้งอารุณยะวี A1-A10
- การพัฒนาระบบระบบขนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์
เพื่อใช้งานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่
พลกจิภา สุขศิริมัท และ จิรายุส จันทะวงศ์ A11-A24

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- แนวทางการพิจารณาการส่งออกผลิตภัณฑ์
อุตสาหกรรมความมั่นคงของไทยไปยังต่างประเทศ
บดินทร์ สันทัด และ นรวัชร แม่นอินทร์ D1-D22

บทความวิจัย (Research Articles)

- การวิจัยและออกแบบยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์
กฤษณ์ ตรีภพนาถกุล, ชานนทร์ เล็กธำรง, เกียรติศักดิ์ เพ็ชรศรี,
อรรถพล เจริญผล และ วรณชพัฒน์ ฤทธิ์เลื่อน R1-R14
- การวิจัยและพัฒนาระบบสนทนาอัตโนมัติในข้อมูลป้องกันประเทศ
ชนธิป ชื่นมนัส, วรากร เลื่องลือภูมิ, กิตติกร วิริยะศาสตร์, ผกามาศ วงศ์สาย,
อุบล ธงสถาพรวัฒนา, วิชัย แผ้วเกษม และ พันธุ์เทพ แก้วมงคล R15-R32
- การศึกษาและออกแบบขั้นต้นระบบปืนเล็กยาวอัตโนมัติ
นิวัฒน์ ใจคำ, เพ็ญเพ็ญ สุวรรณศิริ, อรรถพล เจริญผล,
พรสิริ สมุทรสาร และ วรณชพัฒน์ ฤทธิ์เลื่อน R33-R46
- การปรับปรุงสมบัติทางกลที่อับแรงดันด้วยการชุบแข็งแบบกระแสดเหนี่ยวนำ
สุรเดช เฉลิมบุญ, สิทธา สายดาราสุมุท, สาวิตรี ผาบจันดา,
อภิรัฐ โกสิตานนท์ และ กฤษณะ ธรรมิกานนท์ R47-R60
- การศึกษาผลของความหนาแน่นของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง
ด้วยการจำลองเชิงตัวเลข
ทัศนีย์ ทับเจริญ, ธนัช ชันทอง และ วีระชาติ กุลศิริเกษม R61-R70
- การพัฒนาฟิสิกส์เรซินดัดแปลงด้วยไซเลนทอนความร้อนสูง
สำหรับผลิตฉนวนกันความร้อนในท่อท้ายจรวด
ชัยพล แซ่ไ้ว, ไพศาล อภิณพัฒน์, พิมพ์ภัส งามสันติวงศ์ และ เฉษฏา ศิริรัฐนิคม R71-R87

บทบรรณาธิการ

ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศฉบับที่ 14 นี้ มีความหลากหลายในเนื้อหาของผลการ
ศึกษา วิจัย และพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มีการศึกษาและออกแบบขั้นต้นของระบบปืนเล็กยาว
อัตโนมัติ ซึ่งเป็นอาวุธสำคัญของกำลังพลในกองทัพไทย ทำให้ทราบถึงการออกแบบที่นำไปต่อยอดได้ในอนาคต
และมีความสอดคล้องไปตามทฤษฎี มีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับชิปนิวโรในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม.
ซึ่งอาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ของก๊าซการเผาไหม้เชื้อเพลิงดินปืน และวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข
แบบที่ละขั้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับในระบบอาวุธที่ใหญ่ เช่น ระบบจรวด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีดั้งเดิมของ สทป.
มีการศึกษาผลของความหนาแน่นของโล่ที่แตกต่างกัน คือ 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. ของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง
ด้วยการจำลองเชิงตัวเลข พบว่า มีความสามารถในการเจาะเป้าหมายเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของโล่ที่เพิ่มขึ้น
เนื่องจากสมมูลโมเมนตัมและพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น ทั้งยังมีผลการปรับปรุงสมบัติทางกลต่อรับแรงดัน
ของลูกจรวดด้วยการชุบแข็งแบบกระแสน้ำวน ซึ่งพบว่าการชุบแข็งด้วยกระแสน้ำวนส่งผลให้ชิ้นงาน
เหล็กกล้ามีโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงที่เปลี่ยนไป สามารถนำไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติทางกล
ให้กับท่อรับแรงดันให้มีความแข็งแรงตอบสนองต่อการใช้งานได้

นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยทางด้านการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) อย่างต่อเนื่อง
มีการทดลองระบบจักรกลที่สนทนากับข้อมูลบทความ พบว่า สามารถให้ความรู้และตอบคำถามแก่บุคคล
ภายนอกเกี่ยวกับข้อมูลของเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้มีความถูกต้องถึง 93% มีผลงานทางด้าน Internet of
Things คือ การพัฒนาระบบสารสนเทศสำหรับกล้องวงจรปิดแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะโดยโปรแกรม
Pineapple ภายใต้ตำรวจภูธรภาค 4 โดยออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งาน มีผลการวิจัยและ
พัฒนาเข้าสู่ระบบอาวุธอัจฉริยะ คือ การพัฒนาต้นแบบระบบขีปนาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้งานร่วมกับ
อากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ เพื่อติดอาวุธและทำลายเป้าหมายตามที่ได้ตั้งค่าไว้ โดยมีแนวทางให้ระบบที่
ทำงานนั้นเป็นอิสระต่อกันจำนวนสองระบบและทำงานไปพร้อมกัน ส่วนระบบยุทธโศภรณ์ขนาดใหญ่มีผลการ
วิจัยและออกแบบยานเกราะล้อ 4x4 อเนกประสงค์ ให้สามารถปฏิบัติการกิจเป็นไปตามความต้องการ
และมีสมรรถนะการใช้งานทั่วไป ที่มีความทันสมัยและมีประสิทธิภาพดีตรงตามความต้องการของผู้ใช้ และยัง
ได้มีการเสนอแนวทางการพิจารณาการส่งออกผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมความมั่นคงของไทยไปยังต่างประเทศ เพื่อ
เพิ่มศักยภาพในการส่งออกและความร่วมมือระหว่างประเทศในภาคส่วนการป้องกันประเทศ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

บรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

การพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วย โปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4

เจษฎา คำพอง^{1*} และ รุจชัย อึ้งอารุณยะวี²

วันที่รับ 12 กรกฎาคม 2567 วันที่แก้ไข 27 ธันวาคม 2567 วันตอบรับ 6 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบกล้องวงจรปิดบนสารสนเทศภูมิศาสตร์ ซึ่งมีการออกแบบและการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งานและการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยการทดสอบการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรมกับโปรแกรมอื่น ๆ ผลการศึกษาพบว่า แพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4 เป็นแพลตฟอร์มทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับแสดงตำแหน่งของกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ บนแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์หลายชนิด อาทิ Google Map, Bing Map เป็นต้น โดยโปรแกรมมีคุณสมบัติ ดังนี้ 1) โปรแกรมสามารถแสดงตำแหน่งและรายละเอียดข้อมูลของกล้องวงจรปิดที่ลงทะเบียนไว้กับระบบได้ 2) โปรแกรมสามารถแสดงผลวิดีโอจากกล้องวงจรปิดทุกตัวในระบบพร้อมกันได้ ทั้งแบบเวลาจริงและแบบย้อนหลัง 3) โปรแกรมสามารถดาวน์โหลดไฟล์วิดีโอจากกล้องวงจรปิดทุกตัวในระบบตามช่วงเวลาที่กำหนดได้ 4) โปรแกรมสามารถทำงานร่วมกับกล้องวงจรปิดได้

คำสำคัญ : กล้องวงจรปิด, ตำรวจ, แพลตฟอร์ม, วิดีโอ

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้แต่ง, อีเมล: jetsada.ku@rmuti.ac.th

Development of Smart Camera Network Platform using Pineapple Program for the CCTV System of Provincial Police Region 4

Jetsada Kumphong ^{1*} and Rujchai Ung-arunyawee ²

Received 12 July 2024 Revised 27 December 2024, Accepted 6 January 2025

Abstract

This study aims to develop a CCTV system based on geographic information. The design and development of the computer program aligns with the usage requirements and data analysis by comparing the efficiency of the program with other programs. The results showed that the Pineapple program, the smart camera network platform of the Provincial Police Region 4 is a computer program that is utilized for the purpose of showing the locations of closed circuit cameras that have been installed in various locations on a variety of geometrical information maps. These maps include Google Map, Bing Map, and others. The following characteristics are possessed by the program: 1) It displays details and an unlimited number of spots and positions of closed circuit cameras that have been registered with the system. 2) It displays the video clips recorded by all cameras in the system simultaneously at real time and flashback; 3) It downloads video files from all cameras at the time that is set; and 4) It is compatible with all brands of closed circuit cameras.

Keywords : Closed circuit camera, Police, Platform, Video

¹ Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan

² Faculty of Engineering, Khon Kaen University

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

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีคดีอาชญากรรมเกิดขึ้นทั่วประเทศ ซึ่งพบว่าเป็นคดีประเภทความผิดเกี่ยวกับชีวิต ร่างกาย เพศ ความผิดเกี่ยวกับทรัพย์สิน นอกจากนี้ยังพบคดีอาญาที่เกิดขึ้นจากการเมาสุราแล้วก่ออาชญากรรมหรือเกิดอุบัติเหตุจราจร เนื่องจากการเมาแล้วขับอีกด้วย ซึ่งกล้องวงจรปิดมักถูกนำมาเป็นเครื่องมือในการสืบค้นความจริงและสามารถนำไปเป็นหลักฐานในการจัดการหรือหาสาเหตุความจริงของคดีความ [1]

เทคโนโลยีกล้องวงจรปิดในปัจจุบันโดยทั่วไปมีหน้าที่บันทึกเหตุการณ์ต่าง ๆ มักติดตั้งบริเวณที่อยู่อาศัย สำนักงาน อาคาร สถานที่สำคัญ ๆ เพื่อเฝ้าระวังเหตุการณ์ต่าง ๆ ทั้งที่พึงประสงค์และไม่พึงประสงค์ โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กล้องวงจรปิดที่ติดตั้งภายในอาคาร กับกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งภายนอกอาคาร ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน และปัจจุบันมีมากมายหลากหลายยี่ห้อ [2] แต่มียี่ห้อที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ Hikvision และ Dahua [3] – [4]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีวิธีหลากหลายในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกล้องวงจรปิดโดยหลักการต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การพัฒนาระบบกล้องวงจรปิดให้ระบบติดตามเป้าหมายที่กำหนดที่เดินผ่านขอบเขตการมองเห็นภายใต้กรอบมุมมองของกล้องวงจรปิด โดยใช้หลักการ Monte Carlo Localization หรือพัฒนาระบบกล้องวงจรปิดให้ตรวจจับการฝ่าฝืนสัญญาณไฟแดงและผู้ไม่สวมหมวกนิรภัย โดยใช้หลักการการวิเคราะห์ภาพหรือสีของวัตถุ และการพัฒนาระบบกล้องวงจรปิดให้สามารถตรวจจับรถยนต์และรถจักรยานยนต์ที่ขับขึ้นทางเดินเท้า โดยการสร้าง Template Matching เป็นต้น ซึ่งผลการวิจัยหรือการศึกษาที่กล่าวมานี้ พบว่า ระบบกล้องวงจรปิดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน [5] – [7]

K. Nerngchamnong และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาระบบเฝ้าระวังที่ใช้กล้องวงจรปิด

อัจฉริยะในการติดตามแหล่งมรดกโลก ระบบนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวและวัดจำนวนผู้เยี่ยมชมที่เข้าและออกจากแหล่งมรดกโลก ซึ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยในช่วงนอกเวลาทำการ รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงกลยุทธ์การเฝ้าระวังและการแจ้งข้อมูลการวางแผนด้านความปลอดภัย ตัวอย่างเช่น ผู้เข้าร่วมสามารถแจ้งข้อมูลการวางแผนงานได้ ในการสร้างระบบเฝ้าระวังนี้ คณะวิจัยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อตรวจสอบและนับจำนวนบุคคลในภาพที่บันทึกไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบได้รับการทดสอบด้วยชุดข้อมูลวิดีโอสามชุด ซึ่งให้ความแม่นยำตั้งแต่ 80% ถึง 90%

ในต่างประเทศ J. Kurniawan และคณะ [9] นำเสนอวิธีการใหม่ในการตรวจจับความแออัดของการจราจร โดยใช้แนวทางการจำแนกภาพด้วยกล้องวงจรปิด (CCTV) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ใช้ชุดข้อมูลจากกล้องวงจรปิด 1,000 ตัว สามารถจำแนกภาพจราจรได้แม่นยำโดยเฉลี่ยถึง 89.50% นอกจากการใช้ในงานจราจร แนนอนว่ากล้องวงจรปิดใช้ในบ้านพักและสถานที่ต่าง ๆ E. D. Kembuan และคณะ [10] ได้แสดงให้เห็นว่ามีการเน้นย้ำถึงความจำเป็นที่เพิ่มระบบตรวจสอบในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยเฉพาะในสถาบันการศึกษาที่ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์มีความเสี่ยงในการสูญหายของสิ่งมีค่าต่าง ๆ การศึกษารังนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบจุดติดตั้งของกล้องวงจรปิด (CCTV) โดยมุ่งหวังที่จะประเมินประสิทธิภาพของระบบตรวจจับการบุกรุก การวิจัยนี้ใช้การสังเกตโดยตรงและการสัมภาษณ์ควบคู่กัน

ปัจจุบันปัญหากล้องวงจรปิดที่มีอยู่เดิมของตำรวจภูธรภาค 4 มีข้อจำกัดการใช้งาน คือ เมื่อเกิดเหตุการณ์หรือคดีความในพื้นที่ทางจังหวัดภายใต้พื้นที่ความรับผิดชอบ เจ้าหน้าที่ตำรวจจะต้องเดินทางไปจุดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคดีความเพื่อขอข้อมูลวิดีโอ บันทึกย้อนหลัง ซึ่งแต่ละพื้นที่อยู่ห่างไกลกัน และในการลงพื้นที่แต่ละครั้งต้องใช้งบประมาณและเวลา

ในการเดินทาง รวมถึงกำลังพลในการทำงานมาก ซึ่งหากการเกิดคดีความมีความถี่มากขึ้นและมีงบประมาณในการสนับสนุนการทำคดีความไม่เพียงพอ การพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะหรือนวัตกรรม จึงมีความจำเป็นเพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม Pineapple (โปรแกรมระบบกล้องวงจรปิดบนสารสนเทศภูมิศาสตร์) เป็นเครื่องมือเชื่อมต่อโครงข่ายกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังความปลอดภัยทางชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่ นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสืบค้นหาหลักฐานของคดีความ อาทิ การบันทึกเหตุการณ์ก่อเกิดหรือบันทึกเหตุการณ์ระหว่างการหลบหนีของคนร้าย ใช้ดำเนินคดีทางกฎหมายด้านการจราจร นอกจากนี้ ระบบสามารถลดความเสี่ยงในการสัมผัสหรือพบปะผู้ป่วยที่เสี่ยงต่อเชื้อ Covid-19 เพื่อการควบคุมการแพร่ระบาดสู่เจ้าหน้าที่รัฐ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแพลตฟอร์ม Pineapple กับแพลตฟอร์มการจัดการกล้องวงจรปิดต่าง ๆ ก็พบว่าแพลตฟอร์มอื่นจะจัดการกล้องวงจรปิดเฉพาะยี่ห้ออื่น ๆ ไม่มีระบบที่ทำงานข้ามยี่ห้อ ซึ่งในทางปฏิบัติในพื้นที่หนึ่งอาจมีการติดตั้งกล้องวงจรปิดมากกว่า 2 ยี่ห้อ เช่น พื้นที่สภ.เมืองขอนแก่น ติดตั้งกล้องวงจรปิดยี่ห้อ Hikvision, Hiview และ Dahua ซึ่งระบบการจัดการบันทึกวิดีโอที่ต่างยี่ห้อกันไม่สามารถจะรวมเป็นระบบเดียวได้

นอกจากนี้ การแสดงผลของกล้องวงจรปิดโดยทั่วไปจะแสดงในหน้าจอตามสถานที่นั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นเรื่องยากในการหาตำแหน่งหรือพิกัดของกล้องวงจรปิดนั้น ๆ และในการดาวน์โหลดไฟล์วิดีโอบันทึกเหตุการณ์มีวิธีการที่ยุ่งยากและใช้เวลามากในปัจจุบัน

จากที่กล่าวมาข้างต้น ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีกล้องวงจรปิดมาประยุกต์ใช้กับการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ตำรวจ เพื่อความสะดวกสบายในการปฏิบัติหน้าที่มากขึ้น และโปรแกรม Pineapple สามารถทำงานร่วมกับกล้องวงจรปิดที่ต่างยี่ห้อกันได้



รูปที่ 1 ตัวอย่างการแสดงผลของกล้องวงจรปิดทั่วไป

ซึ่งจะเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์ในการบังคับใช้กฎหมายของเจ้าหน้าที่ตำรวจ ในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดความผิดพลาดในการบังคับใช้กฎหมาย

2. วัตถุประสงค์

พัฒนาระบบกล้องวงจรปิดบนสารสนเทศภูมิศาสตร์ ที่มีความสามารถในการบริหารจัดการระบบกล้องวงจรปิดต่างยี่ห้อได้

3. วิธีการวิจัย

ในการพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4 มีวิธีการวิจัยดังนี้

1) กำหนดปัญหาหรือคำถามวิจัย (Problem Definition) โดยในขั้นตอนนี้เป็นกำหนดปัญหาหรือคำถามที่ต้องการแก้ไข และคำถามนี้ควรมีความชัดเจน และสามารถนำไปสู่การค้นหาวิธีการแก้ไขได้เช่น ทำอย่างไรจึงจะรวบรวมกล้องวงจรปิดหลากหลายยี่ห้อได้

2) ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review) ค้นหางานวิจัย บทความ หรือเอกสารที่เกี่ยวข้องกับปัญหาหรือคำถามวิจัย เพื่อศึกษาว่ามีการวิจัยหรือวิธีการที่เคยถูกพัฒนาไปในทางใดบ้าง

3) ออกแบบการทดลอง (Experiment Design) วางแผนและออกแบบการทดลองที่ใช้ในการทดสอบคำถามวิจัย คือ การเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่ไม่ได้ใช้เทคนิคใหม่ โดยการออกแบบนั้นจะต้องกำหนดตัวแปรต่างๆ เช่น ยี่ห้อกล้องวงจรปิด ข้อมูลพิกัด เป็นต้น

4) การพัฒนาและทดสอบโปรแกรม สร้างโปรแกรมหรือระบบที่ต้องการทดสอบ โดยใช้วิธีการ

หรือเทคนิคในการวิจัย ในหลาย ๆ สถานการณ์ ได้แก่ การทดสอบประสิทธิภาพ ความเสถียร เป็นต้น

การพัฒนาโดยการสร้างซีพียูไฟล์ข้อมูลไฟล์ .xlsx ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูล ได้แก่ Name, IP Address, User, Password, Port, Channel, Lat-Long, Direction, Company, Owner, Station จากนั้นโปรแกรมจะทำการติดต่อสื่อสารเพื่อรับข้อมูลจากกล้องวงจรปิด ซึ่งประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจะขึ้นอยู่กับระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

5) วิเคราะห์ผลการทดลอง (Data Analysis) วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาแล้วกับโปรแกรมที่มีอยู่เดิม

6) การอภิปรายผล (Discussion) อภิปรายเกี่ยวกับผลการทดลองที่ได้หรือควรปรับเปลี่ยนสิ่งใดในการพัฒนาจากการใช้งาน

7) สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendations) สรุปผลการวิจัยโดยรวมว่าโปรแกรมสามารถแก้ปัญหาหรือปรับปรุงโปรแกรมได้หรือไม่ และทำได้อย่างไร และข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

4. คุณสมบัติทางเทคนิคของระบบพื้นฐานของระบบ

โปรแกรม Pineapple หรือโปรแกรมระบบกล้องวงจรปิดบนสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Program for Geographic Information CCTV System) - ทะเบียนข้อมูล เลขที่ ว1. 008492, ปี พ.ศ. 2563 - เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับแสดงตำแหน่งของกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ บนแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์หลายชนิด อาทิเช่น Google Map, Bing Map เป็นต้น (ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3) โดยโปรแกรมมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) โปรแกรมสามารถแสดงตำแหน่งและรายละเอียดข้อมูลของกล้องวงจรปิดที่ลงทะเบียนไว้กับระบบได้

2) โปรแกรมสามารถแสดงผลวิดีโอจากกล้องวงจรปิดทุกตัวในระบบพร้อมกันได้ทั้งแบบเวลาจริง

และแบบย้อนหลัง

3) โปรแกรมสามารถดาวน์โหลดไฟล์วิดีโอจากกล้องวงจรปิดทุกตัวในระบบตามช่วงเวลาที่กำหนดได้

4) โปรแกรมสามารถทำงานร่วมกับกล้องวงจรปิดได้



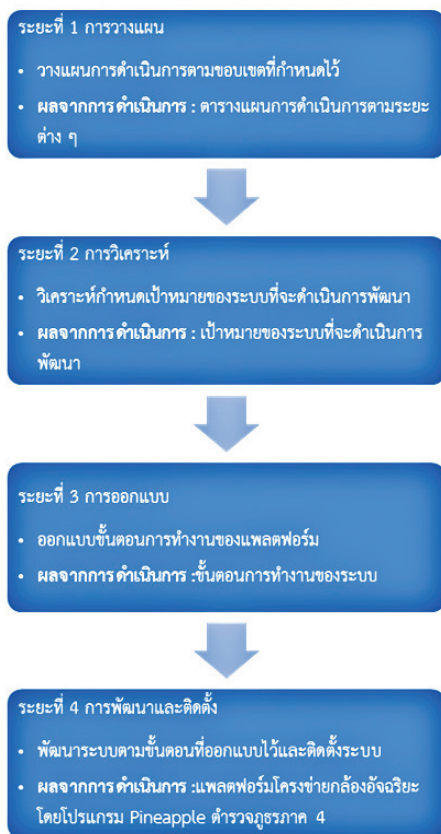
รูปที่ 2 สามารถแสดงผลกล้องวงจรปิดแบบเวลาจริงและย้อนหลัง



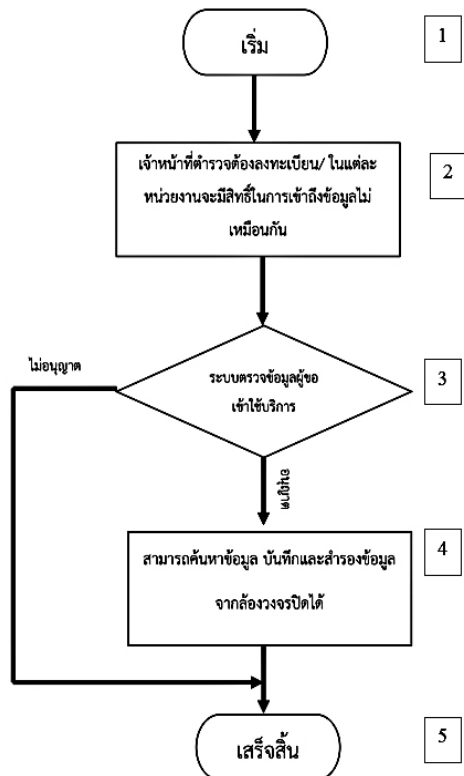
รูปที่ 3 ตัวอย่างการติดตั้งกล้องในโปรแกรมตามแผนที่ Google Map

5. แพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภาค 4

การพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภาค 4 ดำเนินการตามระยะ (Phase) ของวงจรชีวิตการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle) [11] ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4 โดยพัฒนาด้วยภาษาซีชาร์ป (C# Programming Language) ออกแบบให้มีไวยากรณ์ที่สนับสนุนการพัฒนาแอปพลิเคชันรูปแบบต่าง ๆ เช่น Web, Mobile เพื่อให้มีความสามารถในการ



รูปที่ 4 การดำเนินโครงการแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภาค 4 ตามระยะของวงจรชีวิตการพัฒนาระบบ



รูปที่ 5 แผนผังการทำงานของแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple

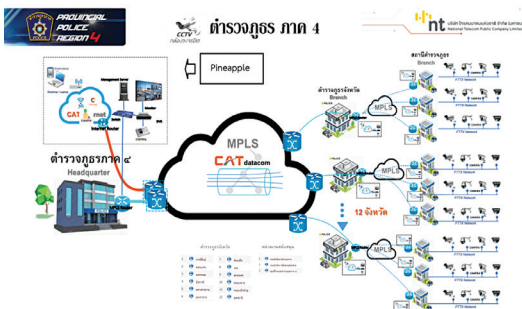
การทำงานกับหลายแพลตฟอร์มด้วย .NET Core ที่ต่อยอดมาจาก .NET Framework เพื่อช่วยให้สามารถเขียนโค้ดที่ทำงานได้บน Windows ซึ่งโปรแกรม Pineapple สามารถทำงานร่วมกับ Windows ได้

รูปที่ 5 เป็นการแสดงแผนผังการทำงานของระบบแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple โดยแสดงรายละเอียดขั้นตอนต่อเนื่องที่เกี่ยวข้องในการทำงาน เมื่อเปิดใช้งานแพลตฟอร์มแล้ว (เบอร์ 1) กระบวนการลงทะเบียนจะเริ่มขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องดำเนินการโดยเจ้าหน้าที่ตำรวจหรือตัวแทนที่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ระบบจะดำเนินการตรวจสอบเพื่อตรวจสอบว่าบุคคลที่พยายามเข้าถึงข้อมูล เป็นบุคคลที่ได้รับการอนุญาตหรือไม่ (เบอร์ 2) ในกรณีที่ระบบไม่พบการ

บันทึกการให้อนุญาต ระบบจะปิดระบบทันที เพื่อให้แน่ใจว่าปลอดภัยและป้องกันการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต ในทางกลับกัน หากได้รับการยืนยันว่าบุคคลนั้นลงทะเบียนแล้วหรือได้รับอนุญาตที่เหมาะสม (เบอร์ 3) ระบบจะดำเนินการแสดงแผนที่ภาพที่ระบุตำแหน่งของกล้องวงจรปิดทั้งหมดที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของผู้ลงทะเบียนได้รับคำสั่งจากผู้บังคับบัญชา นอกจากนี้ ผู้ใช้บริการยังสามารถค้นหาข้อมูลเฉพาะและบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องหรือภายใต้การรับผิดชอบผ่านข้อมูลของระบบได้ (เบอร์ 4) เมื่อผู้ใช้รวบรวมข้อมูลที่จำเป็นทั้งหมดสำเร็จและทำงานเสร็จสิ้นแล้ว ผู้ใช้บริการสามารถออกจากระบบและปิดระบบอย่างปลอดภัยซึ่งเป็นการสิ้นสุดการใช้งาน (เบอร์ 5)

ในการพัฒนาแพลตฟอร์ม Pineapple เป็นการร่วมข้อมูลกล้องวงจรปิดจากทั่วภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน โดยดำเนินการตามนโยบายของสำนักงานตำรวจแห่งชาติ ผู้ที่ได้รับมอบหมายงานจากผู้บังคับบัญชาต้องมีการลงทะเบียนและจัดเก็บข้อมูลต่างๆ เช่น พิกัดกล้องวงจรปิด รหัส IP ของกล้องวงจรปิด เป็นต้น

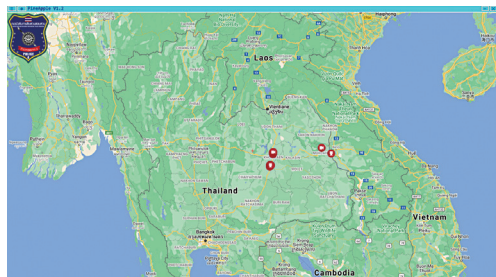
ในการทำงานของระบบฯ แสดงภาพรวมว่าแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple จะเป็นตัวกลางในการรับข้อมูลกล้องวงจรปิด ในระบบสถานีตำรวจภูธรภาค 4 และระดับตำรวจภูธรจังหวัด ซึ่งตัวเชื่อมต่อสื่อสารหรือโครงข่ายจะใช้เครื่องมือของบริษัท ไทโรคมเนคแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)



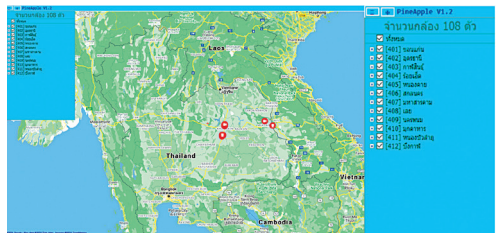
รูปที่ 6 Mind Map ในการทำงานของแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple

โดยโปรแกรม Pineapple จะแสดงผลในคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมที่สำนักงานตำรวจภูธรภาค 4 ดังแสดงในรูปที่ 6

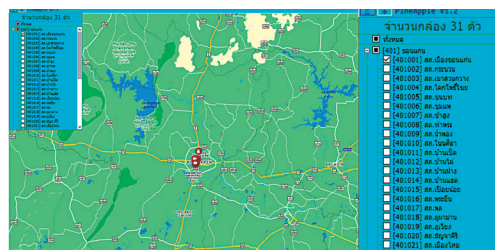
รูปที่ 7 ตัวอย่างการแสดงผลของแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple ของตำรวจภูธรภาค 4 ที่ได้ทำการพัฒนาเรียบร้อยแล้ว โดยมีการแสดงตำแหน่งของกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ บนแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์ของ Google Map ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ลงทะเบียนไว้กับหน่วยงาน นอกจากนี้ แพลตฟอร์มสามารถแสดงพื้นที่ของข้อมูลที่จะแสดงผลในระดับจังหวัดและในระดับอำเภอ



รูปที่ 7 ตัวอย่างการแสดงผลของแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple



รูปที่ 8 แพลตฟอร์มสามารถแสดงพื้นที่ของข้อมูลที่จะแสดงผล (ระดับจังหวัด)



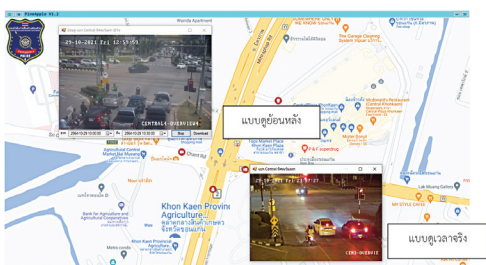
รูปที่ 9 ฟอรัมสามารถแสดงพื้นที่ของข้อมูลที่จะแสดงผลรายสถานีตำรวจ

โดยมีการแบ่งเป็นลำดับที่ชัดเจน เป็นระเบียบง่าย และสะดวกต่อการค้นหาข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9

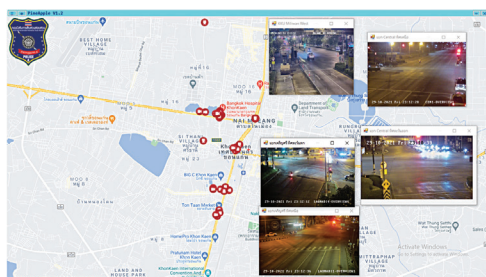
แพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะโดยโปรแกรม Pineapple ของตำรวจภูธรภาค 4 สามารถแสดงผลโครงข่ายของกล้องวงจรปิดโดยไม่จำกัดจำนวนและไม่จำกัดยี่ห้อในการเชื่อมต่อ นอกจากนี้ แพลตฟอร์มยังสามารถแสดงผลกล้องวงจรปิดแบบเวลาจริงและย้อนหลัง และสามารถบันทึกไฟล์วิดีโอที่มีการใช้งานที่ง่ายขึ้นและสะดวกรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12 และตัวอย่างการทดลองใช้งานในเขตอำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น แสดงในรูปที่ 13

6. การวิเคราะห์ข้อมูลวิดีโอ

ข้อมูลวิดีโอภายหลังการเชื่อมโยงข้อมูลภายใต้โครงการแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะโดยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4 ยกตัวอย่างด้านการจราจร มีการใช้เพื่อดำเนินคดีตามกฎหมายเกี่ยวกับการตรวจจับยานพาหนะฝ่าไฟแดง ระบบสามารถทำงานตรวจจับและเก็บข้อมูล



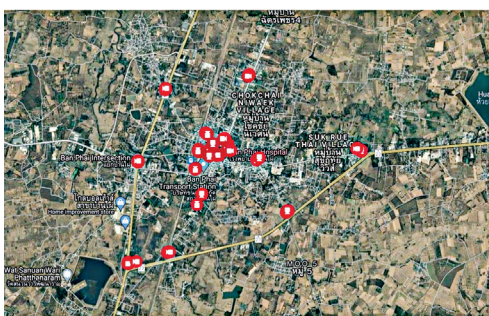
รูปที่ 10 แพลตฟอร์มสามารถแสดงผลกล้องวงจรปิดแบบเวลาจริงและย้อนหลัง



รูปที่ 11 แพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple ตำรวจภูธรภาค 4



รูปที่ 12 ห้องควบคุมเชื่อมต่อแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple ตำรวจภูธรภาค 4



รูปที่ 13 ตัวอย่างภาพการทดลองใช้งานในเขตอำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น



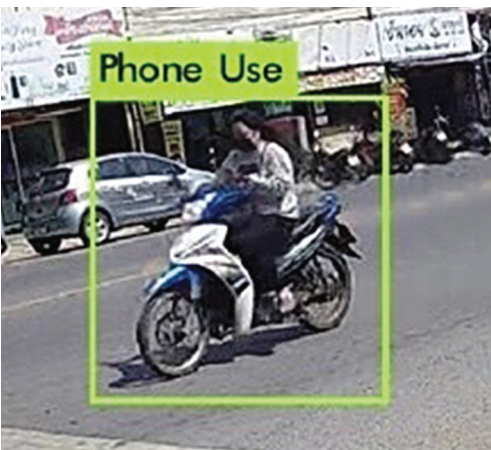
รูปที่ 14 ตัวอย่างการทำงานตรวจจับยานพาหนะและป้ายทะเบียน

ภาพยานพาหนะที่กระทำความผิดและป้ายทะเบียนยานพาหนะ [6] ดังแสดงในรูปที่ 14

7. แนวทางการพัฒนาข้อมูลสู่ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)

โครงการแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4 สามารถพัฒนาข้อมูลสู่ปัญญาประดิษฐ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการจัดเก็บข้อมูล

ภาพที่ต้องการมาวิเคราะห์เพื่อทำเป็นระบบอัตโนมัติได้โดยการสร้างการเรียนรู้โดยเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาตรวจจับใบหน้าหรือพฤติกรรมภาพต่าง ๆ ได้ [12] อาทิ หน่วยงานการจราจร ต้องการตรวจจับพฤติกรรมการใช้มือถือขณะขับ ซึ่งมีการเก็บข้อมูลภาพพฤติกรรมการใช้มือถือขณะขับรถจำนวนมากและทำการพัฒนาเรียนรู้ภาพพฤติกรรมโดย Machine learning ทำให้กล้องตรวจจับมีความจดจำจนกระทั่งสามารถตรวจจับได้อย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ตรวจจับพฤติกรรมการใช้มือถือขณะขับขี่

อย่างไรก็ตาม ในการพัฒนาการตรวจจับหรือจำแนกภาพต่าง ๆ จะได้รับการตรวจสอบประสิทธิภาพโดยหลักการ Confusion Matrix [13] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักการ Confusion Matrix

Predicted / actual	Positive	Negative
Positive	TP	FP
Negative	FN	TN

จากตารางที่ 1 หลักการ Confusion Matrix ประกอบด้วย True Positive (TP) คือ จำนวนข้อมูลที่ทำนายถูกว่าเป็นสิ่งที่กำลังสนใจอยู่ True Negative (TN) คือ จำนวนข้อมูลที่ทำนายถูกว่าเป็นสิ่งที่ไม่ได้สนใจ

False Positive (FP) คือ จำนวนข้อมูลที่ทำนายผิดมาเป็นสิ่งที่กำลังสนใจ และ False Negative (FN) คือ จำนวนข้อมูลที่ทำนายผิดมาเป็นสิ่งที่ไม่ได้สนใจ

8. สรุป

การพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายกล้องอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Pineapple สำหรับระบบกล้องวงจรปิดของตำรวจภูธรภาค 4 มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อพัฒนาระบบกล้องวงจรปิดบนสารสนเทศภูมิศาสตร์ ผลจากการดำเนินโครงการ แพลตฟอร์มเป็นเทคโนโลยีในการรวบรวมการแสดงผลของหน้าจอก้องวงจรปิดทั้งในเวลาจริง ณ ขณะนั้น และสามารถแสดงข้อมูลย้อนหลังของวิดีโอการเกิดเหตุการณ์ที่แสดงข้อมูลบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์โดยแพลตฟอร์มฯ สามารถรองรับการทำงานกับกล้องวงจรปิดได้ ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อความสะดวกสบายในการหาข้อเท็จจริงจากไฟล์วิดีโอของคดีความต่าง ๆ ของเจ้าหน้าที่ตำรวจสืบสวน ซึ่งแพลตฟอร์มฯ นี้จะถูกนำไปใช้จริงในพื้นที่อื่น ๆ ต่อไป และควรมีการศึกษาในประเด็นอื่น ๆ ต่อไป ดังนี้

- 1) การพัฒนากับกล้องที่ไม่ใช่กล้องวงจรปิด แต่เป็นการเชื่อมต่อกับกล้องหน้ารถยนต์หรือยานพาหนะอื่น ๆ ที่เคลื่อนที่ พร้อมกับแสดงภาพตามเวลาจริง
- 2) การทดสอบการเชื่อมต่อกับกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งในต่างประเทศ

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมคณะทำงานของคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น กองบังคับการสืบสวนสอบสวนตำรวจภูธรภาค 4 และบริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนโครงการในครั้งนี้

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานตำรวจแห่งชาติ. “จำนวนการจับกุมคดีอาชญากรรมของสำนักงานตำรวจแห่งชาติ จำแนกตามประเภทคดี (ประเภทคดีอาญา และ

- คดีสำคัญตาม พ.ร.บ.ที่มีโทษทางอาญา)." UBON.nso.go.th. <https://ubon.nso.go.th/about/law-regulation.html?view=article&layout=edit&id=103> (วันที่เข้าถึง ธ.ค. 1, 2564).
- [2] K. Harntoa, "CCTV Buying Decising Behavior of People in Bangkok," M.S. thesis, Dept. Manage. Sci., Silpakorn Univ., Bangkok, Thailand, 2016.
- [3] Hikvision. "Hikvision Products." HIKVISION.com. <https://www.hikvision.com/th/> (accessed Dec. 1, 2021).
- [4] Dahuasecurity. "Dahua Products." DAHUASECURITY.com. <https://www.dahuasecurity.com/th/> (accessed Dec. 1, 2021).
- [5] N. Santayakorn, "Increase of Pedestrian Tracking Performance in the Stationary Close-circuit Camera System using Mobile Camera System," M.S. thesis, Dept. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2018.
- [6] P. Wonghabut, R. Ung-arunyawee, T. Satiennam, W. Leelapatra, P. Jantosut, and J. Kumphon, "Development of Program for Red Light Running Violation and Helmet Wearing Using CCTV Camera," *KKU Res. J. (Graduate Stud.)*, vol.19, no. 2, pp. 41-52, Apr.-Jun. 2019.
- [7] S. Hiranchan, P. Pundee, and Mahasak Ketchum, "Vehicle Registration and Notification System for CCTV on Pavement," *Sci. Technol. Innov. J. (STIJ)*, vol.1, no. 1, pp. 1-6, Jan.-Feb. 2020.
- [8] K. Nerngchamnong, S. Kaviya, Y. Fujii, and P. P. Yupapin, "World Heritage City Surveillance System by a Smart CCTV System," *Procedia Eng.*, vol. 8, pp. 321-327, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.03.060.
- [9] J. Kurniawan, S. G. S. Syahra, C. K. Dewa, and Afiahayati, "Traffic Congestion Detection: Learning from CCTV Monitoring Images using Convolutional Neural Network," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 144, pp. 291-297, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.10.530.
- [10] E. D. Kembangan, J. R. Batmetan, M. Daud, and I. R. P. Tarandung, "CCTV Architectural Design for Theft Detection using Intruder Detection System," *Int. J. Inf. Technol. Educ.*, vol.1, no. 2, pp. 72-78, 2022, doi: 10.62711/ijite.v1i2.42.
- [11] P. Chaimeerang "Development of Information System for Managing Learning Outcomes of Higher Education Curriculum," *NEUARI*, vol.11, no. 2, pp. 68-82, Aug. 2021
- [12] K. Bunnag, "Generative Artificial Intelligence and Its Military Application," *Def. Technol. Acad. J.*, vol. 6, no. 13, pp. 28-41, May 2024.
- [13] E. Nintra, S. Airphaiboon, and S. Jiriwibhakorn, "Classification of Weapons using Convolution Neural Networks Suitable for Portable Devices," *Def. Technol. Acad. J.*, vol. 6, no. 13, pp. 4-15, May 2024.

การพัฒนาต้นแบบระบบขบวนอาวุธ แบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้งานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่

พฤกจิภา สุขศิริรัช ^{1*} และ จิรายุส จันทะวงศ์ ²

วันที่รับ 9 สิงหาคม 2567 วันที่แก้ไข 23 ธันวาคม 2567 วันที่ตอบรับ 5 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

ระบบขบวนหัวรบได้ถูกนำมาติดตั้งในระบบอาวุธหลายชนิด เช่น ระบบกระสุนปืนใหญ่ ระบบจรวด ระบบมิสไซล์ และระบบขีปนาวุธนิวเคลียร์ เป็นต้น เพื่อที่จะสามารถโจมตีเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันเริ่มมีแนวคิดพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งเป็นอากาศยานไร้คนขับแบบติดอาวุธ เพื่อนำมาใช้งานในการโจมตีหรือป้องกัน เช่น การนำฝูงอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่บินเข้าโจมตีศัตรู เป้าหมายละลอกที่ 2 เพื่อเน้นการโจมตีกองกำลังทหารที่กำลังหลบหนี บินโจมตีในพื้นที่รวบรวมกำลังพล หรือบินป้องกันการโจมตีทางอากาศจากขีปนาวุธหรืออากาศยานต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษา กลไกการทำงานของระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ โดยในขั้นต้นเป็นการศึกษาและรวบรวมองค์ความรู้ในการออกแบบการทำงานของระบบขบวนหัวรบแบบ อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ให้มีการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยในการนำไปใช้งานจริง จากการศึกษาระบบขบวนแบบอิเล็กทรอนิกส์นำมาสู่การออกแบบวงจรไฟฟ้า สำหรับขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตอบสนองการทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ได้ โดยออกแบบภายใต้มาตรฐาน MIL-STD-1316 ต้องประกอบด้วยระบบที่ทำงานอิสระต่อกันจำนวน 2 ระบบ และ ต้องทำงานพร้อมกัน มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ วงจร Safe & Arming ระบบการเก็บรักษา ระบบการรับรู้ และระบบจุดชนวน เป็นต้น โดยเริ่มต้นทำงานแบบ 2-Stage Arming ในช่วงแรกทำการเช็คค่าความแรง ที่อากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ได้ Take-off ขึ้นไปในอากาศ เมื่อค่าพารามิเตอร์และระยะเวลามากกว่า ค่าที่กำหนดไว้ ทำการปลดความปลอดภัยขั้นที่ 1 ออก หลังจากอากาศยานเดินทางเข้าสู่เป้าหมายน้อยกว่า ระยะที่กำหนดไว้ ระบบขบวนหัวรบจะปลดความปลอดภัยขั้นที่เหลือออก ทำให้ขบวนหัวรบพร้อมทำงาน เมื่อกระทบเป้าหมายทำการจุดวัตถุระเบิดโดยทันที จากขั้นตอนการทำงานที่ได้จากการศึกษาระบบขบวนหัวรบ ได้มีการออกแบบบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อจำลองการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการใช้งานจริงและ เป็นต้นแบบในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

คำสำคัญ : โดรนกามิกาเซ่, โดรนติดอาวุธ, ขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์, กลไกขบวนหัวรบ

¹ ส่วนงานวิศวกรรมวัตถุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ส่วนงานวิศวกรรมอากาศยาน, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: Phulkjika.s@dti.or.th

Development of Electronic Fuzing System Prototype for Kamikaze Unmanned Aerial Vehicle

Phulkjika Sooksirimuch ^{1*} and Jirayuth Jantawong ²

Received 9 August 2024 Revised 23 December 2024, Accepted 5 January 2025

Abstract

Fuze systems are integral components of numerous weapon systems, including artillery shells, rockets, missiles, and nuclear warheads, enhancing target engagement effectiveness. The current trend involves the development of armed kamikaze UAVs for both offensive and defensive applications. These UAVs can be deployed in swarms for second-wave attacks, targeting fleeing enemy forces, striking troop concentrations, or intercepting incoming missiles and aircraft. This necessitates a thorough investigation into the operational mechanisms of electronic fuze systems within the context of kamikaze UAV integration. This research focuses on the design and development of an effective and safe electronic fuze system for seamless integration with kamikaze UAVs. The study involves compiling existing knowledge and developing a design that ensures efficient and reliable operation. The resulting design of the electronic fuze circuit adheres to MIL-STD-1316 military standards. It comprises two independent, concurrently operating systems, with key components including a safe & arming circuit, a storage system, a sensing system, and a detonation system. The fuze system employs a two-stage arming sequence. The initial stage involves monitoring acceleration data following the kamikaze UAV's takeoff. Once predetermined parameters and durations are met, the first safety mechanism is disengaged. Upon the UAV's approach to the target within a specified range, the remaining safety mechanisms are released, activating the fuze. Upon target impact, the explosive charge is immediately detonated. Based on this operational analysis, an electronic board has been designed to simulate the arrangement of real-world electronic components. This prototype serves as a foundation for further research and development efforts.

Keywords: Kamikaze drones, Loitering Munition, Electronic fuze, Safe and arm

¹ NBC and Explosive Engineering Division, Research & Development Department, Defence Technology Institute

² Aeronautical Engineering Division, Research & Development Department, Defence Technology Institute

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

1. บทนำ

ในบทความฉบับนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการรวบรวมข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบขบวนอาวุธอิเล็กทรอนิกส์และในส่วนที่สอง คือ การออกแบบบอร์ดิอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบขบวนอาวุธอิเล็กทรอนิกส์ขั้นต้น โดยมีรายละเอียดในเนื้อหาต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.1 ความสำคัญของระบบจุดชนวนในอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่

ในปัจจุบันเริ่มมีแนวคิดนำระบบขบวนทั้งในส่วนอิเล็กทรอนิกส์และส่วนของเครื่องกลมาประยุกต์ใช้กับยุทธโศภรณ์ทางทหารต่าง ๆ เช่น นำไปใช้กับโดรนติดอาวุธหรือการโจมตีด้วยอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งสามารถทำได้โดยการบรรจุวัตถุอันตรายเพื่อนำไปทิ้งในตำแหน่งที่ต้องการหรือจุดระเบิดในตำแหน่งที่ต้องการ เพื่อให้เกิดการบาดเจ็บหรือทำลายสิ่งก่อสร้าง อาจรวมถึงการบรรจุวัตถุระเบิดแล้วจุดชนวนกลางอากาศอีกด้วย ยังมีการนำระบบจุดชนวนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้กระสุนที่จุดชนวนกลางอากาศ ทำให้สารเคมีหรือรังสีและชีวภาพแพร่กระจาย การวางระเบิดในถ้ำโดยใช้หุ่นยนต์เป็นตัวนำวัตถุระเบิดไปวางและจุดระเบิดด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้การกำหนดเวลาให้ระเบิดหรือมีการศึกษาการจุดชนวนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำมาใช้กับเรือดำน้ำไร้คนขับที่สามารถติดวัตถุระเบิดเพื่อไปโจมตีเป้าหมาย เป็นต้น จากแนวคิดดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาระบบจุดชนวนให้มีความทันสมัยรองรับเทคโนโลยีในอนาคตควบคู่ไปกับการความต้องการทางเทคนิค เพื่อให้มีความมั่นใจในระดับสูงว่าในการออกแบบระบบจุดชนวนมีความปลอดภัยในทุกขั้นตอนของการพัฒนา เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดลงให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการใด ๆ กับระบบจุดชนวนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ยังคงมีความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาเช่นกัน

ในประวัติศาสตร์ยุคแรกของการบินระบบขบวนไร้คนขับ ความแตกต่างระหว่างโดรนและขีปนาวุธนำวิถี

ไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจน จนในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 Kettering Bug ซึ่งเป็นหนึ่งในโดรนรุ่นแรก ๆ ที่ออกแบบมาให้ทำการระเบิดด้วยการพุ่งชนเป้าหมายเหมือนจรวด เพื่อสนับสนุนช่วยเหลือการรบและโจมตีอากาศยาน ซึ่งได้มีการนิยามระบบนี้ว่า “โดรน” (Drone) แต่ปัจจุบันได้ถูกเรียกขึ้นมาใหม่ว่า Loitering Munitions ซึ่งระบบที่เรียกขึ้นมาใหม่นี้ทำให้เกิดความสับสนระหว่าง โดรน และ จรวดนำวิถี หรืออาจจะถูกเรียกว่าโดรนกามิกาเซ่ (Kamikaze Drone) ในบางสถานที่ [1]

Loitering Munitions เป็นระบบอากาศยานไร้คนขับประเภทหนึ่งที่ถูกออกแบบมาเพื่อโจมตีเป้าหมายภาคพื้นดินที่อยู่นอกขอบเขตนอกสายตาด้วยหัวรบระเบิด ซึ่งระบบอากาศยานดังกล่าว จะสามารถพกวาเคลื่อนย้ายได้สะดวกและมาพร้อมกับจำนวนที่ค่อนข้างมาก ที่มีไว้สำหรับใช้งานในหน่วยภาคพื้นดิน เช่น ทหารราบที่มีอาวุธนำวิถีที่แม่นยำ ซึ่งมาพร้อมกับกล่องอิเล็กทรอนิกส์และอินฟราเรดความละเอียดสูง ช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งเป้าหมาย การสำรวจ และนำทางอากาศยานไร้คนขับไปยังเป้าหมายได้ การกำหนดลักษณะเฉพาะของอาวุธยุทธโศภรณ์คือ ความสามารถในการ Loitering ในอากาศเป็นระยะเวลานานก่อนจะโจมตี โดยใช้เวลาในการตัดสินใจว่าจะโจมตีเป้าหมายเมื่อใดและอย่างไร [2]

ในส่วนของระบบอาวุธที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับจะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้ ระบบค้นหาเป้าหมาย (Seeker) ระบบขบวน (Fuze) ระบบหัวรบ (Warhead) เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบมีความสำคัญและมีรูปแบบการใช้งาน หรือรูปแบบการทำงานที่แตกต่างกันออกไป แต่ทุกส่วนมีระบบการทำงานร่วมกันเพื่อให้สามารถทำลายเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ [3] ซึ่งระบบอากาศยานไร้คนขับประเภทโจมตีเป้าหมายโดยใช้วิธีการทำลายเป้าหมายไปพร้อมกับตัวอากาศยานจะเรียกว่า โดรนกามิกาเซ่ หรือ อากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งคำว่า กามิกาเซ่ หรือ คามิกาเซะ นั้นถูกนำมาใช้เรียกอากาศยานพลีชีพของประเทศญี่ปุ่น

ในสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งได้ทำภารกิจโดยการบรรทุกวัตถุระเบิดและพุ่งเข้าชนเรือรบ ลักษณะการใช้งานของระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่นั้น ตัวระบบจะถูกกำหนดเป้าหมายเบื้องต้นไว้อย่างชัดเจนหรือให้ระบบประมวลผลบนตัวลำทำการค้นหาเป้าหมายอย่างอิสระ

อากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่จะสามารถทำลายเป้าหมายที่กำหนดไว้ ด้วยการพุ่งเข้าใส่เป้าหมายเพื่อเป็นกระสุนนำทางหรือทำลายเป้าหมาย ความสำเร็จในการโจมตีเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับหัวรบและชนวนที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่เป็นหลัก ดังนั้น รูปแบบการใช้งานระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่จะขึ้นอยู่กับระบบหัวรบและเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ ส่วนผลการทำลายของหัวรบนั้น จะขึ้นอยู่กับประเภทและวัตถุระเบิดเป็นหลัก เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการพิสูจน์คุณลักษณะของชนวนหัวรบ จึงได้ทำการแบ่งชนวนหัวรบออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ ส่วนประกอบ การนำไปใช้ทางเทคนิค ซึ่งต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดด้านมาตรฐานความปลอดภัยและลักษณะทางกายภาพ ดังนั้น ควรมีการนำมาตรฐานต่าง ๆ รวมถึงความปลอดภัยสำหรับการประเมินหัวรบและชนวนหัวรบ ซึ่งในการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถทำการพิสูจน์ให้เห็นถึงความต้านทานต่อปัจจัยทางภูมิอากาศและการทำงานทางกายภาพเป็นหลัก ส่วนในปัจจุบันประเด็นปัญหาในการวิจัยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบเป็นชนวนหัวรบ คือ การกำหนดเงื่อนไขอายุการทำงานของอุปกรณ์และประสิทธิภาพ เพื่อนำมาใช้บนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยในระยะเวลาที่ยาวนานสูงสุด เป็นต้น [4] - [9]

ระบบชนวนหัวรบของอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการสร้างระดับความเสียหายต่อเป้าหมายและควรได้รับการพัฒนาและทดสอบภายใต้ข้อกำหนดที่เข้มงวด ดังนั้น คุณลักษณะของระบบชนวนหัวรบที่เชื่อถือได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้จากการออกแบบ

การตรวจสอบ (รวมถึงการทดสอบระยะการยิง) จะสามารถกำหนดประสิทธิภาพของระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ในการนำมาใช้งานเพื่อปฏิบัติการในภารกิจต่าง ๆ ได้

1.2 ประวัติและวิวัฒนาการของระบบจุดชนวนแบบอิเล็กทรอนิกส์

ระบบชนวน (Fuze) เป็นระบบทางกายภาพ ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้ตอบสนองกับเป้าหมายหรือเงื่อนไขต่าง ๆ อีกทั้งยังใช้เป็นตัวเริ่มจุดวัตถุระเบิดหรือสารเคมีที่บรรจุอยู่ภายในหัวรบภายใต้เงื่อนไขของการจุดระเบิด โดยปกติชนวนจะประกอบด้วยกลไกทางกล กลไกทางไฟฟ้า หรือกลไกทางกลทำงานร่วมกับกลไกทางไฟฟ้า และในชนวนหัวยังมีระบบกลไก Safety and Arming Device (SAD, S&A) ที่ช่วยป้องกันการเริ่มทำงานหรือการเริ่มจุดชนวนวัตถุระเบิด (Explosive Train) ก่อนเวลาอันควรอีกด้วย ซึ่งชนวนนี้จะถูกนำไปใส่ในหัวรบโดยถ้าใส่ในตำแหน่งด้านหน้าของหัวรบจะเรียกว่า ชนวนหัวหรือชนวนหัวรบ แต่ถ้านำชนวนไปใส่ไว้ทางด้านท้ายของหัวรบจะเรียกว่า ชนวนท้าย เป็นต้น

ระบบกลไกการทำงานของระบบชนวนหัวรบ จะมีหน้าที่สำคัญได้แก่ “SAFE”, “ARM” และทำให้เกิดการปะทุหรือระเบิดของอาวุธยุทธโธปกรณ์ (เช่น จรวด ฟันระเบิด กระสุนระเบิดไม่นาวีถิขนาด 20 มม. ถึง 406 มม. และชิ้นส่วนย่อยในระบบอาวุธยุทธโธปกรณ์ เป็นต้น) ในระยะแรกของระบบชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ ถูกออกแบบมาในขนาด 5 นิ้ว สำหรับการใช้นิงานของกองทัพเรือในการป้องกันภัยและขีปนาวุธทางอากาศจนเมื่อสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการพัฒนานำกระบวนการ Continuous Wave Doppler Radar ในการสร้างการเกิดปะทุของวัตถุระเบิดหรือขีปนาวุธเมื่อระบบอาวุธได้เคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายเครื่องบินรบ และในการนำไปประยุกต์ใช้งานพบว่าได้มีการนำไปใช้ในงานจุดชนวนระบบอาวุธประเภทหัวรบนิวเคลียร์อีกด้วย โดยในปัจจุบันจะพบว่า จรวด และระเบิดจำนวนมาก นำระบบชนวนหัวรบแบบประเภทอิเล็กทรอนิกส์

ในประเภทที่มีความซับซ้อนของระบบแตกต่างกันออกไปมาใช้ ทำให้เกิดการพัฒนาระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ไปอย่างมากในหน่วยงานทหารของสหรัฐอเมริกา (U.S. Army Application) [6] จนกระทั่งไม่นานมานี้ในการพัฒนาระบบวิถีโค้งขนาดใหญ่ได้นำขบวนหัวรบแบบทางกลไปเข้าโปรแกรม The Army's M-762 และถูกเปลี่ยนเป็นขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ ในขั้นต้นของการออกแบบระบบขบวนหัวรบและความปลอดภัยจะทำการออกแบบภายใต้เอกสารมาตรฐานทางทหาร MIL-STD-1316 ซึ่งจะเป็มาตรฐานสำคัญที่จะสามารถสรุปได้ว่าขบวนหัวรบดังกล่าวมีความปลอดภัยจากการออกแบบและนำไปใช้งานในหัวขัอทฤษฎีที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบความปลอดภัยของขบวนหัวรบจะต้องมีอย่างน้อย 2 ระบบที่ทำงานในด้านระบบกลไกที่ถูกออกแบบให้แยกทำงานอย่างอิสระหรือกระบวนการประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะของขบวนหัวรบเป็น "Arming" เพื่อที่จะทำให้เกิดการประทุของการระเบิดทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการโจมตีเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ [10] – [12]

ระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นกลไกของการ Safety และ Arming แบบใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ซึ่งในยุคแรกจะใช้วงจรแอนะล็อก โดยใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (R, L, C) มาต่อเชื่อมกันเพื่อความเร็วในการประมวลผลของสัญญาณไฟฟ้า ต่อมาเริ่มมีการนำอุปกรณ์จำพวกลอจิกเกต (Logic Gate) เข้ามาใช้ในการพัฒนาระบบขบวนหัวรบมากขึ้นจากนั้นพัฒนาต่อยอดเป็นชิปไอซี (Integrated Circuit) ในปัจจุบันมีการนำชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เข้ามาช่วยประมวลผลคำสั่งและลดความซับซ้อนของวงจรทางไฟฟ้า ทำให้วงจรไฟฟ้ามีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังสั่งการและรับข้อมูลจากเซนเซอร์ เพื่อนำค่าข้อมูลที่วัดค่าได้มาเป็นเงื่อนไขในการทำงานได้อีกด้วย โดยในปัจจุบันพบว่า จรวดอากาศยานไร้คนขับ กระสุนปืนและระเบิดจำนวนมาก

ที่มีการนำระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อนของระบบที่แตกต่างกันนำมาใช้งานได้ เกิดการพัฒนาระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ไปอย่างมาก

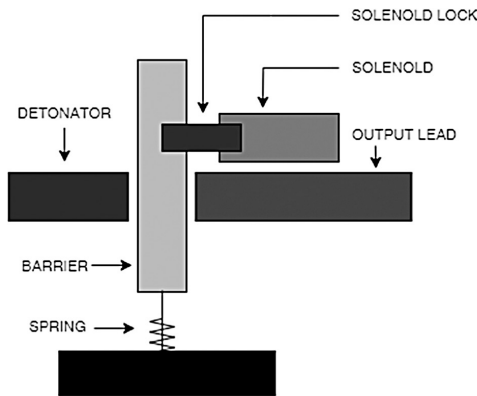
2. หลักการทำงานของระบบขบวนแบบอิเล็กทรอนิกส์

2.1 องค์ประกอบหลักของระบบขบวน

ส่วนประกอบหลักของระบบขบวนหัวรบสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ ระบบ Safe and Arm ระบบ Energy Storage ระบบ Event Sensing และระบบ Detonator ซึ่งทุกส่วนประกอบอยู่ในขบวนหัวรบโดยมีรายละเอียดดังนี้ [13] – [15]

2.1.1 ระบบ Safety and Arming

ระบบ Safety and Arming (S&A) ของขบวนหัวรบจะเป็นส่วนประกอบหลักในการออกแบบหัวรบและการทำงานของหัวรบให้เกิดการจุดระเบิดให้เสร็จสมบูรณ์โดยการออกแบบระบบกลไก S&A นี้จะใช้หลักมาตรฐานความปลอดภัยทางทหาร MIL-STD 1316 [12] เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ โดยได้กำหนดให้กลไก S&A จะต้องมึกลไกการทำงานอย่างน้อย 2 ชุดที่ทำงานเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งอาจจะเป็กลไกทางกลทำงานร่วมกันทั้ง 2 ชุด กลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ทำงานร่วมกันทั้ง 2 ชุด หรือกลไกทางกลทำงานร่วมกับกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ก็ได้ แต่ในการออกแบบและนำไปใช้งานจะต้องมั่นใจว่าระบบกลไก S&A นี้มีความปลอดภัยในการใช้งานตามคำสั่งที่แม่นยำและจะไม่ทำงานเองก่อนเวลาอันควร ในส่วนของหลักการการทำงานระบบกลไก S&A นั้นอธิบายได้ว่า ในกรณีที่ขบวนหัวรบอยู่ในสถานะ Safed อาจทำหน้าที่เป็นตัวจุดขบวน หรือเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับขบวนวัตถุระเบิดของขบวนหัวรบ หากมีการจุดขบวนในขณะดังกล่าว คลื่นแรงดันหรือแรงกระแทกจะไม่สามารถส่งต่อกลไกถัดไปให้ทำงานได้ซึ่งจะกล่าวได้ว่าระบบ Safed อย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 1 เป็นการทำงานแบบขัดจังหวะของตัวจุดขบวน จะทำการป้องกันไม่ให้แรงดันจากการจุดระเบิดส่งไปยังวัตถุระเบิดหลัก ซึ่งถูกเรียกว่า Interrupted

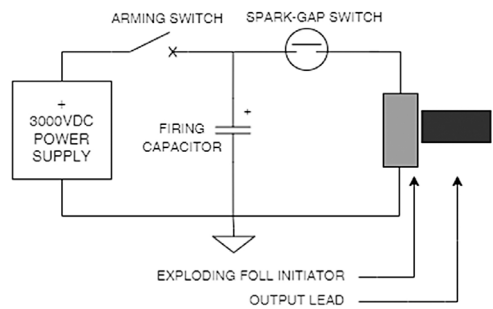


รูปที่ 1 ตัวอย่างการทำงานของวงจร S&A ของการทำงาน วงจรชนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Interrupted Explosive Train [13]

Explosive Train ซึ่งเป็นระบบกลไก S&A ในส่วนแรก และทำงานอย่างอิสระ ในการทำงานของส่วนที่สอง จะเป็นการให้พลังงานไปยังส่วนตัวจุดชนวนด้วยระบบ อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเรียกว่า Micro Detonators จะทำการ ปลดปล่อยพลังงานขนาด Milli-Joules ไปยังตัวจุดชนวน ดังรูปที่ 2 ใช้ระบบไฟฟ้าในการจุดชนวนอาวุธ จะเห็น ได้ว่าวงจรจะมีการต่อเข้าด้วยกันทั้งหมด เมื่อมีการ เปลี่ยนสถานะของสวิตช์และมีการแสไฟฟ้าต้นทาง ระบบไฟฟ้าจะวิ่งต่อไปยังระบบอาวุธโดยอัตโนมัติ ซึ่งเรียกว่า Non-Interrupted Explosive Train เนื่องจากจะไม่มีส่วนใด ทำการเคลื่อนที่นอกจากกระแสไฟฟ้าที่ทำการวิ่งไป ยังตัวจุดชนวนเท่านั้น โดยทั้งสองระบบได้ทำหน้าที่ เหมือนกันคือส่งพลังงานไปยังตัวจุดชนวนอาวุธ เป็นต้น

2.1.2 ระบบ Energy Storage

ระบบชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ มีการออกแบบให้ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้ และยังสามารถ เก็บพลังงานไว้ในระยะเวลาที่นาน ทั้งนี้ ได้มีการพัฒนา ระบบแหล่งจ่ายพลังงานให้สามารถจัดเก็บให้ยาวนาน ขึ้นมากกว่า 20 ปี โดยแบตเตอรี่จำนวนมากในอดีต จะนิยมใช้สารเคมีอิเล็กโทรไลต์เหลวเก็บไว้ในหลอด บรรจุชนิดแก้ว ซึ่งระบบชนวนหัวรบที่ได้ถูกยิงออกไป ในระบบปืนจะสร้างความแรงทำให้แก้วแตก ทำให้ แบตเตอรี่ได้ทำปฏิกิริยาเคมีในการเติมพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2 ตัวอย่างการทำงานของวงจร S&A ของการทำงาน วงจรชนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Non-Interrupted Explosive Train [13]

ในระบบ ส่วนในระบบทุ่นระเบิดและวัตถุระเบิดขนาดเล็ก จะใช้การทำลายตัวแก้วแทน ในระเบิดหรือจรวด จะใช้โครงสร้างพลังงานในการกำเนิดกระแสไฟฟ้าในบางระบบ จะนำความร้อนจาก Pyrotechnic Charge มาใช้งาน โดยใช้ Thermoelectric ในการสร้างพลังงาน แล้วนำ เก็บในตัวเก็บประจุ ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปใช้ในการ จุดชนวนอาวุธในภายหลัง ซึ่งอาจจะผ่านกลไกทางกล หรือ อุปกรณ์สวิตช์ประเภทสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในชนวน อาวุธเกือบทั้งหมดจะมีการจัดสรรพลังงาน เพื่อใช้ในการจุดตัวชนวนตัวเอง

2.1.3 ระบบ Event Sensing

ระบบ Event Sensing หรือระบบตรวจจับ เป้าหมาย โดยการใช้เซนเซอร์ในการหาจุดที่เหมาะสม สำหรับการจุดตัวของระบบจุดชนวนให้ทำงานอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะสามารถกำหนดให้ทำงานก่อนถึงเป้าหมาย หรือทำงานเมื่อกระทบเป้าหมาย หรือทำงานหลังจาก กระทบเป้าหมายเมื่อเวลาผ่านไปตามระยะเวลาที่ได้ กำหนดไว้จากระบบชนวนอาวุธ โดยระบบเซนเซอร์จะ ทำงานแบบเรียบง่าย เช่น การใช้สวิตช์แบบตกกระทบ เป้าหมาย เมื่อเกิดการกระทบเป้าหมายแล้วจะทำการ ปิดระบบนำทางให้กระแสไหลผ่านไปยังตัวจุดชนวนได้ โดยระบบต่าง ๆ ในรูปแบบอื่นยังพบเห็นการใช้ระบบกล้อง ถ่ายภาพ ระบบกล้องอินฟราเรด(IR) ผ่านระบบอัตโนมัติ DSP (Digital Signal Processing) ระบบคลื่นเรดาร์ FM-CW ซึ่งนำมาประยุกต์และประมวลผลทำให้ระบบชนวน

หวัรรมมีความหลากหลายในการนำไปใช้งานที่มากขึ้น

2.1.4 ระบบ Detonator

ระบบ Detonator หรือระบบสำหรับจุดชนวนระเบิด ในสมัยก่อนจะใช้วัตถุระเบิดชนิด Trinitrotoluene หรือ TNT เป็นตัวจุดระเบิด แต่เนื่องจากประสบปัญหาสารประกอบ Nitroglycerin ใน TNT เกิดการไหลมารวมตัวเกาะกันเป็นแท่ง ซึ่งมักจะเกิดเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยอาจจะนำไปสู่การจุดตัวโดยไม่ตั้งใจจากการสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยได้ ดังนั้น ระบบอาวุธสมัยใหม่จะใช้ระบบจุดชนวนที่ใช้วัตถุระเบิดที่มีความเสถียร เช่น C-4 เป็นต้น วัตถุระเบิดเหล่านี้จะถูกจุดโดยใช้สารเคมีที่มีพลังงานในการสร้างมากกว่า 105 PSI ขึ้นไปเพื่อทำให้เกิดการระเบิดขึ้น ในการออกแบบระบบจุดชนวนจะใช้การขยายพลังระเบิดจากจำนวนน้อยสู่การระเบิดที่ทรงพลัง

2.2 การทำงานของระบบชนวน

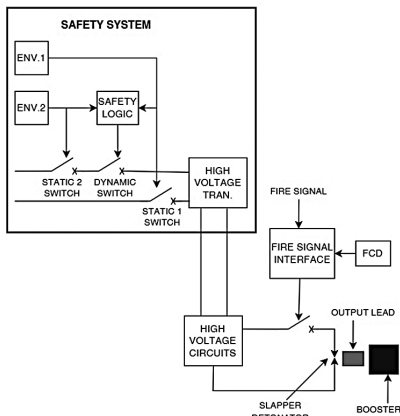
ระบบชนวนหวัรรมจะเริ่มทำงานตั้งแต่ทำการปล่อยหรือยิงอาวุธออกไป และเมื่อระบบผ่านเงื่อนไขความปลอดภัยทั้งหมดตามที่ถูกออกแบบหรือติดตั้งไว้ ระบบจะทำการเปลี่ยนสถานะจาก Safety เป็น Arming ซึ่งเป็นสถานะพร้อมจุดชนวน เมื่อเกิดการกระทบเป้าหมายหรือรอบเวลาทำงานครบตามคำสั่งในการจุดตัวจะทำให้ระบบชนวนหวัรรมทำการจุดระเบิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ดังนั้น การทำงานของชนวนอาวุธจะต้องไม่มีความซับซ้อนและทำงานได้อย่างถูกต้องและสมบูรณ์ ตามรูปที่ 3 ซึ่งอธิบายได้ว่า ในส่วนของระบบชนวนหวัรรมแบบอิเล็กทรอนิกส์จะมีอยู่ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วน Safety ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขการทำงานอย่างน้อย 2 กลไก (ENV.1, ENV.2) ในส่วนของกลไกนี้อาจจะใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มาเป็นตัวประมวลผลการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อการทำงานของกลไกถึงจุดที่กำหนดจะทำให้สวิตช์สับลง เพื่อเปิดกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านไปยังระบบถัดไป คือ High Voltage Transformer โดยทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าไปยังส่วนที่ 2 คือ ส่วน Arming สำหรับ

เตรียมการจุดชนวน ประกอบไปด้วยวงจร High Voltage Circuit จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปให้ส่วนต่าง ๆ ให้ทำงานครบวงจรสำหรับบรอสถานะการจุดชนวน ทั้งนี้ อาจต้องมีระบบประมวลผลเพื่อใช้ในการคำนวณตั้งแต่ขั้นตอนการเริ่มไปจนถึงเป้าหมาย ระบบไฟฟ้าที่เพียงพอเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ บนชุดชนวนอาวุธ และระบบการสื่อสารร่วมกับอุปกรณ์อื่น เนื่องจากระบบที่ใช้อาจเซนเซอร์ร่วมกับอุปกรณ์ชุดควบคุมและนำทางหรือแม้กระทั่งการรับค่าเงื่อนไขรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้ทราบว่าการทำงานจะถูกออกแบบเพื่อจุดประสงค์หลักคือการทำลายเป้าหมาย แต่ระบบจะต้องมีการทำงานที่ปลอดภัยกับผู้ใช้งานร่วมด้วย [14] - [16]

2.3 ประเภทของสัญญาณจุดชนวน

ในการแยกประเภทของสัญญาณจุดชนวนแบ่งได้ตามลักษณะของชนวนได้ 4 ประเภท ดังนี้ ชนวนแบบเวลา (Time Fuze) ชนวนแบบตกกระทบ (Impact Fuze) ชนวนแบบหน่วงเวลา (Delay Fuze) และชนวนแบบระยะทาง (Proximity Fuze) [12] - [14] ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

1. ชนวนแบบเวลา (Time to ARM/Time to Detonate) อุปกรณ์ประเภทนี้จะใช้การตั้งเวลาในการเริ่มทำงานและตั้งเวลาในการระเบิดหลังจากเปลี่ยนสถานะเป็น Arming ระบบชนวนแบบเวลาจะถูกใช้ในระบบกระสุนและจรวด ตัวอย่างเช่น การนำชนวนแบบเวลาไปใช้งานใน M762 ของกองทัพสหรัฐอเมริกาเป็นระยะเวลาเกือบ 10 ปีตั้งแต่มีการพัฒนามา ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็นวงจรสัญญาณนาฬิกา ข้อดีของชนวนแบบเวลาจะคำนวณเป็นระยะเวลาจากจุดเริ่มต้นขณะยิง เมื่อทำการยิงออกไประบบชนวนอาวุธจะเริ่มทำงานและนับเวลาไปจนกว่าจะถึงเวลาที่กำหนดไว้ ซึ่งทำให้ไม่ต้องสนใจว่าจะกระทบเป้าหมายหรือไม่ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้จากระยะเวลาในการเดินทางของอาวุธ ให้ทำงานได้ในจุดใดจุดหนึ่งตามที่ต้องการ ข้อเสียของชนวนแบบเวลาคือ ต้องการวงจรนับสัญญาณนาฬิกา หากสัญญาณนาฬิกาไม่ถูกต้อง



รูปที่ 3 ลักษณะรูปแบบการทำงานของระบบชนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์ [13]

จะทำให้เวลาในการเดินทางและจุดที่ระเบิดจะผิดเพี้ยนไป และหากกระทบเป้าหมายแล้วระบบชนวนยังไม่ถึงเวลาที่กำหนดไว้ อาจส่งผลให้ระเบิดทำงานอย่างไม่สมบูรณ์

2. ชนวนแบบตกรกระทบ (Time to ARM/ Impact to Detonate) อุปกรณ์ประเภทนี้จะทำการตั้งเวลาให้เริ่มทำงานและใช้การกระทบเป็นการจุดระเบิด ระบบชนวนประเภทนี้นิยมใช้ในระบบกระสุน ระเบิด จรวด และอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็น Piezoelectric Sensor ข้อดีของชนวนแบบตกรกระทบจะใช้ในการทำลายเป้าหมาย เช่น ยานพาหนะต่าง ๆ เสาสัญญาณ ซึ่งชนวนแบบตกรกระทบจะทำงานทันทีเมื่อสัมผัสกับเป้าหมาย และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย ข้อเสียของชนวนแบบตกรกระทบจะต้องมีการทำงานที่รวดเร็ว ซึ่งจะต้องทำงานทันที หรือมีประสิทธิภาพความเร็วสูงมากกว่ามิลลิวินาที

3. ชนวนแบบหน่วงเวลา ระบบชนวนประเภทนี้จะทำการตั้งเวลาดังแต่ช่วงเริ่มต้นเพื่อให้เปลี่ยนสถานะเป็น Arming และเวลาที่ใช้ในการระเบิดหลังจากได้กระทบเป้าหมาย ซึ่งระบบดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในระบบกระสุน ระเบิด จรวด และอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็น Piezoelectric Sensor ร่วมกับวงจร

สัญญาณนาฬิกา ข้อดีของชนวนแบบหน่วงเวลา คือสามารถนำไปใช้ในการทำลายเป้าหมายที่อยู่ภายในอาคาร ยานพาหนะ สิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ซึ่งเมื่อระบบอาวุธกระทบเป้าหมายชนวนอาวุธจะทำงานและหน่วงเวลาในการทำงาน ซึ่งมีโอกาสที่จะสามารถทำลายเป้าหมายที่อยู่ภายใต้สถานที่ป้องกันได้ ข้อเสีย คือ ชนวนแบบหน่วงเวลาจะไม่ทำงานในการระเบิดทันที ซึ่งหากระบบมีความเสียหายจากชุดวงจรและระยะเวลาหน่วงไม่ทำงาน หรือเวลาหน่วงมากเกินไป อาจจะทำให้ระเบิดทำงานไม่สมบูรณ์

4. ชนวนแบบระยะทาง ระบบชนวนประเภทนี้จะทำการตั้งเวลาดังแต่ช่วงเริ่มต้นเพื่อให้เปลี่ยนสถานะเป็น Arming และทำการระเบิดเมื่อเข้าใกล้เป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งระบบดังกล่าวจะถูกนำไปในระบบกระสุน ร็อกเก็ตและจรวด ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็นเรดาร์เซนเซอร์วัดความกดอากาศ เลเซอร์วัดระยะทางหรือกล้องถ่ายภาพ ข้อดีของชนวนแบบระยะทางจะทำงานก่อนถึงเป้าหมาย ซึ่งจะส่งผลให้สามารถทำลายเป้าหมายที่อยู่บนภาคพื้นหรือบนอากาศได้จำนวนมาก ซึ่งจะทำให้ระบบอาวุธกระจายตัวเป็นวงกว้างต่อเป้าหมายต่าง ๆ เช่น โรงกลั่นน้ำมัน โรงไฟฟ้า อาคาร บ้านเรือน ที่อยู่อาศัย เป็นต้น ข้อเสียของชนวนแบบระยะทางคือ จะต้องทำการบรรจุอุปกรณ์ตรวจวัดระยะเข้าไปด้วยกับระบบชนวนทำให้อุปกรณ์มีน้ำหนักและขนาดที่มากกว่าเดิมและระบบประมวลผลจะต้องทำงานอย่างรวดเร็วเพื่อให้ทันต่อการประมวลผล

3. การออกแบบและการพัฒนา

3.1 ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ

ในด้านความปลอดภัยการออกแบบจะอยู่ภายใต้มาตรฐานการออกแบบทางทหาร MIL-STD-1316 [12] นอกจากการออกแบบตามมาตรฐานดังกล่าวแล้วยังพบว่า เกณฑ์การออกแบบของระบบชนวนอาวุธยังแบ่งออกได้อีก 4 หัวข้อ โดยมีหัวข้อที่ต้องคำนึงถึงในด้านต่าง ๆ ดังนี้ ด้านงบประมาณและราคา (Cost) ด้านการเก็บรักษามากกว่า 20 ปี (Twenty Year Storage Life) ด้านการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอัตราการเร่ง

(Shock and Acceleration) และ ด้านขนาดและน้ำหนัก (Size and Weight) [17] - [18] ซึ่งในด้านต่าง ๆ เหล่านี้ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ด้านงบประมาณและราคา

ในการออกแบบระบบขีปนาวุธถูกกำหนดด้วยปัจจัยหลากหลายประการ สิ่งที่ได้ชัดเจนที่สุดคือราคา จะต้องเหมาะสมเมื่อเทียบกับราคาของอาวุธที่นำไปใช้ในเป้าหมายเพื่อการต่อต้านศัตรูหรือมิใช่เพื่อการครอบครองในการผลิตระบบขีปนาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ แม้ว่าจะถูกจำกัดด้านราคา แต่ยังคงประสิทธิภาพทั้งความปลอดภัย ความแม่นยำ และความน่าเชื่อถือ

2. ด้านการเก็บรักษามากกว่า 20 ปี

เนื่องด้วยทางรัฐบาลมักจะนิยมซื้ออาวุธมาเก็บไว้จนกว่าจะมีความจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ ซึ่งอาวุธและยุทธโศภรณ์ รวมถึงระบบขีปนาวุธต่าง ๆ จะต้องมีความเสถียรสูง โดยมีอายุการเก็บรักษาอย่างน้อย 20 ปี ในการใช้งานของระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ แม้ว่าจะถูกออกแบบและผลิตขึ้นในปัจจุบัน แต่อาจจะถูกใช้งานในการป้องกันหรือโจมตีเป้าหมายในอนาคต ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ระบบขีปนาวุธอิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีความน่าเชื่อถือแม้ว่าจะถูกจัดเก็บมากกว่า 20 ปี

3. ด้านการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอัตราการเร่ง

การใช้งานระบบขีปนาวุธอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ มักจะมีความหลากหลายในการใช้งาน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงขึ้นความสูงจากการทำการบินของอากาศยานไร้คนขับ และช่วงเวลาการนำทางเพื่อโจมตีเข้าสู่เป้าหมาย เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วของชั้นบรรยากาศที่อากาศยานทำการบินขึ้นไป โดยปกติบนภาคพื้นดินจะมีอุณหภูมิประมาณ 40°C แต่เมื่อทำการบินขึ้นไปอุณหภูมิจะลดลงเรื่อย ๆ อากาศบางประเภทอาจจะขึ้นไปจนติดลบในเวลาไม่ถึง 30 นาที ซึ่งแล้วแต่ความสูงของอากาศยานที่ทำการบิน แต่เมื่อต้องการ

โจมตีเป้าหมายทำให้ต้องลดระดับความสูงลงเพื่อพุ่งไปที่เป้าหมายทำให้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือเรียกว่า เพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจากการบินลดระดับ และยังมีความเร่งในการวิ่งเข้าสู่เป้าหมายเป็นต้น ดังนั้น การออกแบบดังกล่าวจะต้องรองรับรูปแบบการทำงานหรือการทำการบินที่มีความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเร่งของระบบอากาศยานอย่างรวดเร็วด้วย

4. ด้านขนาดและน้ำหนัก

การออกแบบการใช้งานขีปนาวุธอิเล็กทรอนิกส์บนระบบอากาศยานไร้คนขับจะถูกจำกัดทั้งขนาดและน้ำหนัก เนื่องจากพื้นที่บนอากาศยานไร้คนขับมีจำกัด ซึ่งต้องออกแบบทั้งขนาดและน้ำหนักให้มีความเหมาะสม รวมถึงตำแหน่งในการติดตั้งขีปนาวุธ เพราะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบังคับอากาศยานไร้คนขับ ยิ่งน้ำหนักรวมของอากาศยานเบาจะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการบินได้นานขึ้น เป็นต้น

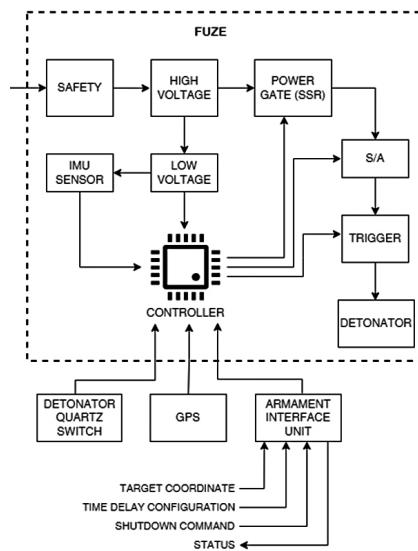
3.2 การทดสอบและการทดลอง

การทดสอบและทดลองของระบบขีปนาวุธจะมีความเกี่ยวข้องกับมาตรฐานที่สำคัญจำนวน 3 หัวข้อ ดังนี้ หัวข้อทดสอบ STANAG 4187 Edition 4 (Fuzing Systems - Safety Design Requirements) รวมถึง MIL-STD-1316E (Fuze Design, Safety Criteria For) หัวข้อทดสอบ STANAG 4497 (Hand-Emplaced Munitions (HEM), Principles for Safe Design) รวมถึง MIL-STD-1911A (Hand-Emplaced Ordnance Design, Safety Criteria For) และหัวข้อทดสอบ STANAG 4157 Edition 2 และ AOP-20 (Tests for the Safety Qualification of Fuzing Systems) รวมถึง MIL-STD-331C (Fuze and Fuze Components, Environmental and Performance Tests For) [19] ซึ่งแต่ละการทดสอบจะเป็นการบ่งบอกว่าระบบขีปนาวุธที่ได้รับการออกแบบมาจะสามารถทำงานได้อย่างมีความปลอดภัย

3.3 ระบบขีปนาวุธแบบนำวิถีใช้งานร่วมกับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่

การนำระบบขีปนาวุธไปใช้งานร่วมกับระบบอากาศยานไร้คนขับจะมีอยู่ใน 3 รูปแบบหลัก ได้แก่รูปแบบ

ติดบนอาวุธประเภทปล่อยจากอากาศยาน รูปแบบติดบนอาวุธประเภทยิงออกจากอากาศยาน และรูปแบบติดบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อพุ่งชนไปยังเป้าหมาย เป็นต้น สำหรับการออกแบบของระบบเพื่อการนำไปใช้งานแบบกามิกาเซ่ เมื่อทำการพิจารณาประเภทอากาศยานจะพบว่า มีอากาศยานจำนวน 2 ประเภท ได้แก่ อากาศยานประเภทหลายใบพัด (Multi-Rotor) และอากาศยานประเภทปีกนิ่ง (Fixed-Wing) เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักคือ การนำระบบอากาศยานพุ่งสู่เป้าหมายและทำลายตนเองพร้อมไปกับเป้าหมายไปด้วยกัน การพัฒนาระบบขบวนหัวรบจะถูกเลือกจากการใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะไม่เหมือนกับการใช้งานบนอาวุธประเภทกระสุน จรวด หรือขีปนาวุธ ที่จะมีแรงขับส่งให้อาวุธออกตัวด้วยความเร่งที่สูง ส่วนการออกตัวของอากาศยานไร้คนขับจะมีการออกตัวที่แตกต่างกันออกไป ส่วนการออกแบบโดยการใช้ขบวนหัวรบประเภทอิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างจะมีความน่าสนใจ เนื่องจากในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาติดตั้งบนระบบอากาศยานไร้คนขับค่อนข้างจะถูกจำกัดด้วยน้ำหนักและขนาด [20] ดังนั้น เพื่อการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำการเลือกใช้ระบบประมวลผลหลักเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ความเร็วสูง และในระบบขบวนหัวรบจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้ง IMU เพื่อวัดค่าความเร่ง วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า และวงจรการจุดระเบิด รวมถึงจะต้องทำการต่อร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกจำนวน 3 จุด ได้แก่ Impact Switch, GPS และ Target Information โดยการนำข้อมูลดังกล่าว มาทำให้ระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ดังการออกแบบระบบแสดงตามรูปที่ 4 ถูกออกแบบให้มีระบบประมวลผลกลางที่ทำการรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากระบบและสัญญาณจากภายนอก เช่น พิกัดตำแหน่งตัวเอง สัญญาณเป้าหมายและเซนเซอร์วัดแรงกระแทก เป็นต้น เพื่อเริ่มกระบวนการทำงานของขบวนอาวุธให้มีการทำงานที่ปลอดภัยและน่าเชื่อถือ ซึ่งสามารถสื่อสารกับระบบชุดควบคุมอาวุธ (Armament Interface Unit) ที่ใช้บนอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์และระบบการทำงานที่ถูกนำไปใช้บนระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับ

เพื่อสั่งการ ให้ระบบขบวนอาวุธเริ่มทำงานในช่วงเวลาที่คาดหวังไว้ และทำการจุดตัวเมื่อถึงเป้าหมาย โดยมีความแม่นยำและไม่ทำงานก่อนถึงระยะที่กำหนดไว้ รวมถึงความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายที่จะทำให้ระบบไม่เริ่มทำงานโดยไม่ตั้งใจ

4. แนวโน้มในอนาคต

4.1 การพัฒนาเทคโนโลยีจุดขบวนใหม่

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจสำหรับอุตสาหกรรมตลาดขบวนอาวุธพบว่า อุตสาหกรรมดังกล่าวจะมีอัตราส่วนการเติบโตขึ้นประมาณ 4% โดยคาดว่าตลาดอุตสาหกรรมจะมีมูลค่าประมาณ 1,290.78 ล้านเหรียญสหรัฐ (ประมาณสี่หมื่นห้าพันล้านบาท) ในปี 2031 [21] จะเห็นได้ว่า หากแบ่งตามลักษณะจะสามารถแบ่งออกได้เป็น ขบวนหัวรบกระสุนปืนครก ขบวนหัวรบกระสุนปืนใหญ่ ขบวนหัวรบจรวดและขีปนาวุธ และขบวนหัวรบอากาศยาน ซึ่งในการใช้งานนั้นระบบขบวนหัวรบกระสุนปืนครกจะเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากปืนครกมีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายได้เร็ว มีความแม่นยำสูง และตัวกระสุนมีความหลากหลายต่อการใช้งาน ทำให้วิเคราะห์ได้ว่า

การพัฒนาระบบขบวนหัวรบจะขึ้นอยู่กับลักษณะอาวุธที่ถูกนำไปติดตั้ง ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มนำไปติดตั้งบนโดรนหรือระบบอากาศยานไร้คนขับ โดยจะสามารถใช้ขบวนหัวรบทั้งแบบทางกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะเป็นไปตามการนำไปใช้งานเพื่อทำลายเป้าหมายอย่างสมบูรณ์ ทั้งแบบการติดตั้งระบบอาวุธปล่อยหรือระบบที่ทำให้ตัวโครงสร้างทำลายไปพร้อมกัน ในการพัฒนาระบบขบวนหัวรบอาจมีการทำงานในระบบดิจิทัลมากขึ้น โดยการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาทำงานร่วมกัน ตัวอย่างเช่น ระบบนำทางด้วยพิกัดดาวเทียม (GPS) ระบบเซนเซอร์วัดตำแหน่งที่มีขนาดเล็ก (IMU, INS, AHRS) เป็นต้น เนื่องจากระบบขบวนหัวรบต้องการความเสถียรภาพมากขึ้น ทำให้เกิดความต้องกระบบขบวนหัวรบที่มีความน่าเชื่อถือที่สูงขึ้น และมูลค่าต้นทุนจากเทคโนโลยีขั้นสูงที่ลดลงจากการเข้าถึงที่ง่ายขึ้น ซึ่งอาจพบความสามารถของขบวนหัวรบที่มีระยะเวลาเก็บของขบวนหัวรบที่ยาวนานมากกว่า 30 ปี รวมถึงมีขนาดเล็กและมีความน่าเชื่อถือ ความแม่นยำที่สูงขึ้น ตามเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไป

4.2 ผลกระทบต่อการพัฒนาอาวุธ

ในการพัฒนาได้นำระบบอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้งานในระบบอาวุธมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งการที่ระบบขบวนหัวรบเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์อาจถูกโจมตีจากเป้าหมายต่าง ๆ เช่น Electromagnetic Pulses (EMPs) เป็นการสร้างคลื่นสนามแม่เหล็กส่งไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีการหยุดการทำงานหรือทำงานผิดพลาดไป ซึ่งจะทำให้ระบบอาวุธนั้นไม่สามารถที่จะใช้งานได้และยังจะเป็นอันตรายต่อผู้ที่นำไปใช้อีกด้วย ซึ่งเมื่อมีการโจมตีจึงต้องมีการป้องกันที่สูงขึ้น ดังนั้น ผลกระทบต่อการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ในระบบอาวุธอาจจะเป็นความเสี่ยง จึงต้องออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ให้มีวงจรป้องกันสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และทดสอบตามมาตรฐานทางไฟฟ้าต่าง ๆ ให้เพียงพอก่อนการนำไปใช้งาน เมื่อเริ่มนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้มากขึ้น จะพบว่า การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้และขายต่อในท้องตลาดมากขึ้น

หากไม่ได้เป็นประเทศที่สามารถผลิตชิป (Chip) ได้เอง อาจจะพบปัญหาในการหาอุปกรณ์เพื่อสร้างระบบอาวุธที่มีความแม่นยำสูงได้ โดยปัญหาดังกล่าวอาจจะย้อนมาถึงชนิดแร่บริสุทธิ์ที่ได้นำมาผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

4.3 การพัฒนาชุดวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์

การพัฒนาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันจะสามารถเลือกคุณภาพของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้จากหลากหลายบริษัท ซึ่งในการออกแบบจะเริ่มตั้งแต่การเลือกอุปกรณ์ ช่วงอุณหภูมิการทำงาน ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ การทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก เป็นต้น ซึ่งระบบอิเล็กทรอนิกส์จะต้องทำการอ่านค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัด เช่น การวัดท่าทาง ความเร่ง และการตกกระทบเป้าหมายของระบบอาวุธ ตามอุปกรณ์ที่มีอยู่บนบอร์ดประมวลผล และสามารถทำงานตามการทำงานของโปรแกรมที่ถูกเขียนกำหนดไว้อย่างถูกต้อง โดยสามารถเก็บและนำมาทำงานได้ภายใต้ระยะเวลาที่มากกว่า 20 ปี ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องไม่ชำรุดหรือเสียหายเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน (ในการเก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นระยะเวลานานมักจะพบปัญหาของอุปกรณ์ตัวเก็บประจุชำรุดเสียหาย ส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด) ในการออกแบบชุดขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์จึงต้องทำการเลือกอุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้งานจริงได้เมื่อเวลาผ่านไปเป็นระยะเวลาที่นาน

ทั้งนี้ จากการศึกษาะบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวมานี้ นำมาสู่การออกแบบวงจรสำหรับขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตอบสนองการทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ได้ โดยระบบจะสามารถทำการประมวลผลและตอบสนองต่อการนำไปใช้งานได้ ซึ่งในการพัฒนาดังกล่าวจะถูกออกแบบตามมาตรฐาน MIL-STD-1316 และต่อยอดโดยการนำไปทดสอบตามมาตรฐานของ MIL-STD-331 หากระบบมีการเขียนภาษาโปรแกรมเพื่อใช้ทำงาน อาจจะต้องนำโปรแกรมคำสั่งไปทำการทดสอบการทำงานเพื่อให้แน่ใจว่าคำสั่งโปรแกรมต่าง ๆ จะสามารถทำงาน

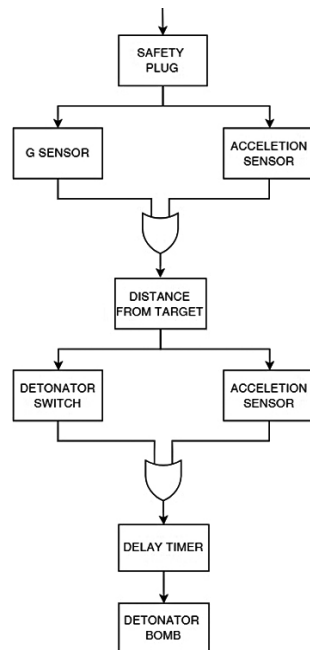
ได้อย่างถูกต้องโดยไม่มีข้อผิดพลาด ซึ่งกล่าวได้ว่าระบบชุดวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์จะมีส่วนของการออกแบบชิ้นงานและโปรแกรมควบคุมการทำงานที่ได้มาตรฐานสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

จากรูปที่ 5 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ โดยเริ่มต้นระบบจากการทำงานแบบ 2-Stage Arming โดยในช่วงแรกระบบจะทำการเช็คค่าความเร่งที่อากาศยานทำการ Take-off เมื่อเกินค่าพารามิเตอร์และระยะเวลาที่ได้กำหนดไว้ จะทำการปลดความปลอดภัยในส่วนแรก ต่อมาเมื่ออากาศยานได้เดินทางเข้าสู่เป้าหมายน้อยกว่าระยะที่ได้กำหนดไว้ระบบจะทำการปลดความปลอดภัยออกทั้งหมดทำให้ขบวนอาวุธพร้อมทำงาน เมื่อระบบอาวุธกระทบเป้าหมาย จะทำการนับค่า Delay Time ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งหากไม่ได้ถูกกำหนดไว้หรือครบตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ระบบขบวนอาวุธจะทำการจุดตัวเริ่มทำงานโดยทันที

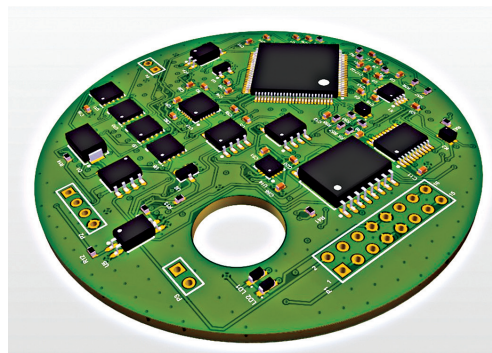
จากรูปที่ 4 การทำงานของระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประ) นักวิจัยได้ออกแบบแบบจำลองวงจรทางไฟฟ้า เป็นไปตามรูปที่ 6 ด้านบนของบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ และรูปที่ 7 ด้านล่างของบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ โดยบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. ซึ่งมีตัวประมวลผลหลักเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32F4 และประกอบไปด้วยตัวเซนเซอร์วัดแรงเฉื่อยในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขการทำงาน รวมถึงกลไก Safety and Arming ที่อยู่ด้านล่างของบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ Solid Stage Relay เป็นตัวปลดขั้นตอนการทำงานแต่ละส่วน ทั้งนี้ในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นส่วนของความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตและทดสอบ เพื่อเป็นต้นแบบในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

5. บทสรุป

ระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการออกแบบจากมาตรฐานความปลอดภัย MIL-STD-1316 จะสามารถนำไปใช้ในการติดตั้งร่วมกับอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ที่ได้ออกแบบไว้

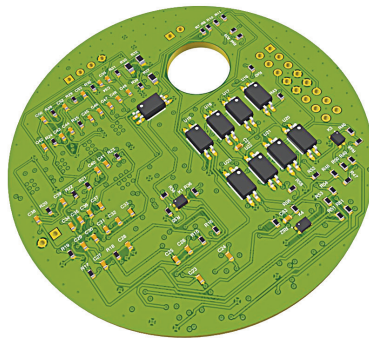


รูปที่ 6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ (ด้านบน) โดยมีอุปกรณ์วัดค่าแรงเฉื่อยอยู่ตรงกลางบอร์ดทั้ง 2 ด้าน ในตำแหน่งเดียวกัน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการทำงานของระบบประมวลผลที่มีจุดหมุนและจุดเปรียบเทียบอ้างอิงที่จุดเดียวกัน โดยในการออกแบบจะคำนวณให้อุปกรณ์วัดค่าแรงเฉื่อยทั้งสองอยู่ที่ระยะทางที่เท่ากันบนบอร์ด เพื่อการทำงานแบบ Redundancy ซึ่งหากอัตราส่วนไม่เท่ากันจะทำให้ลักษณะการรับแรงจะไม่เท่ากันและบนบอร์ดประมวลผลจะมีช่องให้สายไฟผ่านลงไปเชื่อมต่อยังระบบอื่น ๆ เพื่อให้ชุดบอร์ดไม่เป็นสิ่งกีดขวางรวมทั้งทำงานและสื่อสารได้ง่ายขึ้น

แบบกามีกาเซ่ได้ และหากมีการทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-331 จะสามารถระบุได้ว่า ระบบชนวนอาวุธดังกล่าวปลอดภัยเมื่อนำไปใช้งาน โดยนักวิจัยได้ทำการออกแบบภายใต้มาตรฐาน MIL-STD-1316 ซึ่งจะต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ข้อมูลของเป้าหมาย ตำแหน่งพิกัดทาง GPS และกระแสไฟฟ้า เป็นต้น จากอุปกรณ์ภายนอก โดยหากไม่ทำการศึกษาหรือนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ให้ระบบก็จะไม่สามารถ Arming ได้ ดังนั้น ระบบชนวนหัวรบทางอิเล็กทรอนิกส์จะไม่มีโอกาสจุดตัวจากการทำงานของตัวอุปกรณ์เองโดยอัตโนมัติจากชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากไม่มีระบบไฟฟ้าในตัวและต้องการข้อมูลตำแหน่งตัวเองและเป้าหมาย ดังนั้น จะสามารถระบุได้ว่าระบบดังกล่าวปลอดภัยจากการทำงานเองโดยไม่ตั้งใจ โดยการทำงานของระบบชนวนหัวรบที่ทำการออกแบบมานั้นจะสามารถแปลงระบบชนวนหัวรบได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบชนวนหัวรบแบบตกกระทบและรูปแบบชนวนหัวรบแบบหน่วงเวลา โดยจะสามารถใช้ติดตั้งได้ทั้งข้างหน้าและข้างหลังของระบบหัวรบเพื่อนำไปใช้งานที่แตกต่างได้โดยการออกแบบระบบชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ในครั้งนี้มุ่งเน้นในรูปการทำงานของระบบชนวนหัวรบภายใต้ความปลอดภัยและศึกษาแนวทางในการพัฒนาบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัย

6. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

การออกแบบระบบชนวนหัวรบทางอิเล็กทรอนิกส์ในขั้นต้นเป็นการออกแบบในชุดควบคุม ซึ่งมีความซับซ้อนและต้องการออกแบบให้มีความปลอดภัยสูง ซึ่งปัจจุบันโปรแกรมในการออกแบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการออกแบบบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ จึงไม่อาจออกแบบบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ให้มีการป้องกันที่มีคุณภาพได้ในการออกแบบชุดชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ยังจะต้องทำการออกแบบระบบให้ครบ ซึ่งจะต้องทำการเลือกระบบอุปกรณ์ทำงานต่าง ๆ มาประกอบรวมให้ครบระบบและนำหลักเบาะ ซึ่งอาจจะมีการออกแบบและใช้งบประมาณสำหรับการนำไปสร้างขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อนำไปประกอบผลิติดอกมาและมีการปรับเปลี่ยนวัสดุเพื่อ



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ (ด้านล่าง) แสดงวงจร Safe and Arm ของชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์

ให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะสมกับความปลอดภัย ขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา เหมาะกับการนำไปใช้งานมากที่สุด เมื่อทำการทดสอบและขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จสิ้นแล้ว ยังมีการใช้งบประมาณสำหรับการทดสอบ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยตามมาตรฐานทางทหาร MIL-STD-331

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Mori, "The Japanese Contribution to Violence in the World: The Kamikaze Attacks in World War II," *Int. forum Psychoanalysis*, vol. 28, no. 1, pp. 1-7, 2017. September 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/320071487>
- [2] M. Rutherford. "Kamikaze Drone Loiters Above, Waits for Target." CNET.com. <https://www.cnet.com/science/kamikaze-drone-loiters-above-waits-for-target/> (accessed Mar. 12, 2024).
- [3] K. A. Rigby., "Introduction to Weapons Integration," in *Aircraft Systems Integration of Air-Launched Weapons*, P. Belobaba, J. Cooper, R. Langton and A. Seabridge, Eds., NJ, USA: Wiley, 2013, pp. 6 - 15.
- [4] V. Boulanin and M. Verbruggen, "Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems," SIPRI, Solna, Sweden, 2017.
- [5] Z. Zhang, J. Li, Y. Yang, C. yang, and R. Mao, "Research on Speed Scheme for Precise

- Attack of Miniature Loitering Munition,” *Mathematical Problems Eng.*, vol. 2020, pp. 1 – 19, 2020, doi: 10.1155/2020/4963738.
- [6] S. E. Fowler, G. N. Hemmings, and J. V. McVay, “Self-Checking Arming and Firing Controller,” U.S. Patent 4,541,341, Sep. 17, 1985.
- [7] B. S. Davis, E. F. Bukowski, and W. P. D’Amico, “Electronic Safe and Arm Apparatus for Initiating a Pyrotechnic,” U.S. Patent 6,401,621 B1, Jun. 11, 2002.
- [8] T. B. Mellor, E. Brogmus, G. E. Dunn P. Willens, and M. L. Sedig, “Rocket Guidance Adapter” U.S. Patent 8,291,827 B2, Oct. 23, 2012.
- [9] V. Kumar and R. P. Gaikar, A. Ramchandani, N. Sharma, and P. Raut, “Electronic Time Fuze,” in *Int. Conf. Emerg. Trends Electron. & Commun. Eng. (ETECE-2015)*, Pune, Mahrastra, India, Apr. 2015, pp. 1 - 6.
- [10] E. M. Klotz, “The Fuze Industrial Base at Naval Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, California,” M.S. thesis, Nav. Postgraduate School, Monterey, CA, USA, 1992. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10945/23686>
- [11] *Engineering Design Handbook: Ammunition Series - Fuzes*, U.S. Army Materiel Command, Washington, D.C., 1969, pp 1 - 8.
- [12] *Fuze Design, Safety Criteria For*, MIL-STD-1316E, U.S. Department of Defense, Washington, D.C., USA, Jul. 2015.
- [13] S. E. Fowler, “Safety and Arming Device Design Principles,” Nav. Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, CA, USA, Rep. NAWCWD TP 8431, 1999.
- [14] F. Sauerlaender, “Design Methodology for Safe and Arm Devices,” Nav. Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, CA, USA, Rep. NAWCWD TP 8504, 2001.
- [15] Naval Air System Command. *Description and Characteristics Airborne Bomb and Rocket Fuze Manual*. (2008). [Online]. Available: <https://info.publicintelligence.net/USNavyRocketBombFuzeManual.pdf>
- [16] M. Grujicic and W. C. Bell., “Smart-fuze Design and Development Based on Computational Analysis of Warhead/Urban-target Interactions,” *Res. Appl. Mech. Eng. (RAME)*, vol. 2, no. 1, pp. 1 – 10, Mar. 2013.
- [17] L. Jianping and W. Bing., “A Ground Monitor Designed for an Electronic Safety and Arming Fuze,” in *2007 8th Int. Conf. Electron. Meas. Instrum.*, 2007, pp. 4-402 - 4-405.
- [18] M. Dennis, B. Hanrahan, and C. Brackmann, “Electronic Fuzing,” Texas Instruments, Texas, USA, 1991. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/snoa217/snoa217.pdf>
- [19] *Fuze, Ignition Safety Devices and Other Related Components, Environmental and Performance Tests for*, MIL-STD-331D Department of Defense Test Method Standard, May 2017.
- [20] S. Singh, S. C. Ramu, P. Kumar, P. K. Reddy, and P. Chinni, “ORNITHOPTER - IoT Based Kamikaze Drone,” in *2023 IEEE 11th Region 10 Humanitarian Technol. Conf. (R10-HTC)*, Oct. 2023, p. 474.
- [21] Business Research Insights. “Electronic fuze market report overview.” BUSINESSRESEARCHINSIGHTS. com. <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/electronic-fuzes-market-101687> (accessed Jul. 14, 2024).

แนวทางการพิจารณาการส่งออกผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมความมั่นคงของไทยไปยังต่างประเทศ

บดีนทร์ สันทัด^{1*} และ นรวัชร แม้นอินทร์¹

วันที่รับ 11 มกราคม 2567 วันที่แก้ไข 11 เมษายน 2567 วันที่ตอบรับ 19 เมษายน 2567

บทคัดย่อ

เอกสารนี้มุ่งมุ่งหมายในการสืบค้นและวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ที่ส่งผลต่อการส่งออกผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมความมั่นคงของไทยไปยังตลาดต่างประเทศ และรวบรวมฐานข้อมูลเกี่ยวกับโอกาสและความต้องการของประเทศเป้าหมายที่มีศักยภาพ และสามารถพัฒนาแนวทางและข้อเสนอแนะสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอีกด้วย เอกสารนี้มีวิธีการศึกษาด้วยวิธีการเชิงคุณภาพ เนื่องด้วยปัจจุบันไม่ปรากฏงานวิชาการใดที่ให้หลักเกณฑ์การพิจารณาที่ชัดเจนในการส่งออกยุทธโศปกรณ์ เอกสารนี้จึงทำการทดลองเสนอข้อพิจารณาสถานะแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ 9 ประการ ที่น่าจะส่งผลกระทบต่ออย่างสำคัญในการพิจารณาการตัดสินใจการส่งออกยุทธโศปกรณ์ โดยพิจารณาทั้งหมด 9 ประเทศ การศึกษานี้มี 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นบทบรรยายเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์สำหรับการส่งออกผลิตภัณฑ์ความมั่นคงไทย ซึ่งรวมถึงปัจจัยทางเศรษฐกิจ การเมือง การครอบครองเทคโนโลยี สังคม และความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ ส่วนที่ 2 เป็นตารางวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ เป็นข้อพิจารณาที่มีอิทธิพลต่อศักยภาพการส่งออก โดยคำนึงถึงความต้องการและฐานอุตสาหกรรมของประเทศเป้าหมาย ส่วนที่ 3 เป็นตารางสรุปผลิตภัณฑ์ความมั่นคงและการจัดลำดับความเร่งด่วนที่ควรนำเสนอต่อประเทศเป้าหมาย ผลลัพธ์ของการศึกษานี้ค้นพบว่า ประเทศฟิลิปปินส์มีความพร้อมและความเหมาะสมสูงสุดในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่ไทยจะส่งออกผลิตภัณฑ์ ส่วนประเทศเมียนมาร์และกัมพูชามีข้อจำกัดมาก มีความพร้อมและความเหมาะสมต่ำสุด เอกสารนี้มีเจตนารมณ์ที่จะเป็นฐานข้อมูลที่มีค่าสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมความมั่นคง และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจและดำเนินการเกี่ยวกับการส่งออกผลิตภัณฑ์ความมั่นคงได้ โดยเฉพาะประเทศในแถบภูมิภาคอาเซียน เพื่อเพิ่มศักยภาพในการส่งออกและความร่วมมือระหว่างประเทศในภาคส่วนการป้องกันประเทศ

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์ความมั่นคง, การส่งออก, ประเทศในอาเซียน

¹ ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: bodin.s@dti.or.th

Export Assessment Guidelines of Thai Security Products to Foreign Countries

Bodin Suntud ^{1*} and Narawach Man-in ¹

Received 11 January 2024, Revised 11 April 2024, Accepted 19 April 2024

Abstract

This research aims to investigate and analyze strategic factors influencing the export of Thailand's security products to foreign markets. It compiles a comprehensive database detailing the opportunities and demands of potential target countries for importing these products and provides guidelines and recommendations for relevant agencies. Employing a qualitative research method, this study introduces nine strategic factors influencing arms export decisions. These factors were applied to a thorough analysis of nine countries, offering a framework for assessing the strategic ramifications of arms export decisions. The study is structured into three main sections. The first section provides an overview of strategic environments, including economic, political, technological ownership, social factors, and international relations. The second section analyzes the strategic environments and opportunities influencing export potential, considering the specific needs and industry base of target countries. The third section presents a summary table of prioritization and recommendations of defense products suitable for the target countries. The research indicates that the Philippines are the best-prepared and most suitable export destination among Southeast Asian nations to export, while Myanmar and Cambodia are difficult destinations and are the least prepared and suitable choices. This document serves as a valuable database for agencies involved in defense industry exports, providing strategic decisions and actions related to the export of defense products. It focuses on countries with established diplomatic relations with Thailand and a moderate to low level of domestic defense industrial development, especially in Southeast Asia, aiming to enhance export potential and international cooperation in the defense sector.

Keywords : Security products, Export, ASEAN countries

¹ Defence Technology Analysis Department, Defence Technology Institute

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

1. บทนำ

บทวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการส่งออกผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมความมั่นคงของไทยไปยังต่างประเทศ โดยออกแบบให้มีการนำเสนอด้วยวิธีการศึกษาเชิงคุณภาพ ใช้เกณฑ์พิจารณา 9 ประการ ใน 9 ประเทศ ข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ในการพิจารณาการส่งออกยุทธโศปกรณ์ไปยังต่างประเทศ เป็นการให้ข้อมูลพื้นฐานของสภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ที่มีผลต่อการพิจารณาการส่งออกผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมความมั่นคงไปยังต่างประเทศ 9 ประการ เป็นเกณฑ์การพิจารณาว่าควรคำนึงถึงประเด็นทางเศรษฐกิจ การเมือง เทคโนโลยี สังคม ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ หรือความต้องการทางยุทธการ หรือผลประโยชน์แห่งชาติของประเทศเป้าหมายที่จะส่งออกเรื่องใดบ้าง

ส่วนที่ 2 ตารางวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ความมั่นคงของไทยไปยังประเทศเป้าหมาย โดยจะต้องมีเกณฑ์การตัดสินใจที่หลากหลาย เป็นเหตุผล และเป็นระบบ ว่าประเทศเป้าหมายจัดลำดับความสำคัญความต้องการยุทธโศปกรณ์หรือมีความต้องการทางยุทธการอย่างไร มีความพร้อมด้านฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในอย่างไร มีความเสี่ยงเรื่องใดบ้างที่ต้องคำนึงถึง (ความใกล้/ไกลทางภูมิศาสตร์ การละเมิดสิทธิมนุษยชน หรือการบริหารจัดการอาวุธไม่ให้ตกอยู่ในมือผู้ไม่พึงประสงค์) ส่วนใหญ่แล้วประเทศที่นำมาพิจารณาเป็นประเทศเพื่อนบ้านที่ไทยจะส่งออกยุทธโศปกรณ์โดยมีคุณลักษณะบางประการที่มีโอกาสที่จะจัดหาจากไทย เช่น มีความสัมพันธ์ทางการทูตอย่างเป็นทางการ มีสถานเอกอัครราชทูตหรือสถานทูตระหว่างกันมาช้านาน (รวมทั้งผู้ช่วยทูต

ทหารด้วย) มีความสัมพันธ์ระหว่างประเทศที่ค่อนข้างราบรื่นหรือในระดับแน่นแฟ้นขึ้นไปแล้วเพื่อใจกันได้ และประเทศเหล่านั้นมีพัฒนาการด้านฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ (เพราะถ้าประเทศเป้าหมายพัฒนาอุตสาหกรรมเต็มที่แล้ว โอกาสจัดหาจากไทยก็จะน้อยลงอย่างมาก เพราะประเทศเป้าหมายนั้นต้องพึ่งพาอุตสาหกรรมภายในของตนเองก่อน)

ส่วนที่ 3 ตารางสรุปผลิตภัณฑ์ความมั่นคงและการจัดลำดับความเร่งด่วนที่ควรนำเสนอต่อประเทศเป้าหมาย การจัดลำดับความเร่งด่วนจะพิจารณาถึงโอกาสที่จะขายได้มากที่สุดมีผลิตภัณฑ์หลาย Sector มากที่สุด และควรดำเนินการเร็วที่สุดตามลำดับไปจนถึงประเทศที่ควรดำเนินการน้อยที่สุด โดยแต่ละประเทศจะมีข้อมูลรายละเอียดบริษัทและผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับบริบทและความต้องการแตกต่างกันออกไป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นบริษัทอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่ได้รับการประเมินในระดับสูงและมีความสอดคล้องกับความต้องการทางยุทธการกับประเทศเป้าหมาย โดยมีผลิตภัณฑ์ของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) รวมอยู่ด้วย ประโยชน์ของผลลัพธ์ส่วนนี้คือ สามารถนำไปเป็นแนวทางฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์ความมั่นคงให้กับกระทรวงกลาโหม เช่น สำนักงานนโยบายและแผนของกระทรวงกลาโหม หรือศูนย์การพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และหน่วยงานอื่น ๆ เช่น กระทรวงพาณิชย์ (กรมส่งเสริมการส่งออก กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ) กระทรวงการต่างประเทศ (กรมอาเซียน กรมความร่วมมือสถานเอกอัครราชทูต สถานทูต สถานกงสุล ผู้ช่วยทูตทหาร ผู้ช่วยทูตพาณิชย์ของไทยในประเทศเป้าหมาย) ในประเทศเป้าหมายว่า ควรจะสนับสนุน นำเสนอ

หรือนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านใด บริษัทใด ที่มีศักยภาพสูง มีโอกาสสูง เข้าแข่งขัน เป็นพิเศษหรือควรริเริ่มหรือต่อยอดความร่วมมือด้านใด เป็นพิเศษหรือไม่ อย่างไร

2. สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ในการพิจารณาส่งออกยุทธโปกรณ์ไปยังต่างประเทศ

การพิจารณาการส่งออกยุทธโปกรณ์นั้น ปัจจุบันยังไม่ปรากฏงานทางวิชาการ หนังสือ ตำรา กฎหมาย หรือคู่มือใดให้แนวทางการประเมินที่ชัดเจนและครอบคลุมว่าการส่งออกยุทธโปกรณ์จากประเทศหนึ่งไปยังอีกประเทศหนึ่งที่กำหนด กฎเกณฑ์หรือข้อพิจารณาเบื้องต้นว่าต้องคำนึงถึงเรื่องใดบ้าง¹ [1] บทวิเคราะห์นี้ได้พยายามใช้การทดลอง การสังเกต และการรวบรวมจากตัวอย่าง การพิจารณา การส่งออกของต่างประเทศ กอปรกับ ประสบการณ์ของนักวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ กว่า 10 ปี ที่ได้สังเคราะห์ข้อพิจารณาด้านเทคนิค บทวิเคราะห์ทางความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ ในข่าวสารแหล่งเปิด รวมทั้งข้อมูลทางอุตสาหกรรม ว่าน่าจะมีปัจจัยใดที่สำคัญบ้าง เอกสารนี้จึงเป็นแนวคิด หรือแนวปฏิบัติทางวิชาการเบื้องต้นในการพิจารณา ส่งออกยุทธโปกรณ์ของไทยไปยังต่างประเทศ ในที่นี้ผู้เขียนได้ทดลองเสนอสภาวะแวดล้อม ข้อพิจารณาทางยุทธศาสตร์ 9 ประการ ดังต่อไปนี้

2.1 คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)

เพื่อประเมินโอกาสที่การขายยุทธโปกรณ์นั้น ในทางภูมิศาสตร์ จะถูกใช้เป็นภัยคุกคาม การละเมิดอธิปไตย ความขัดแย้ง คู่ขัดแย้ง พื้นที่ทับซ้อน การใช้กำลังทางทหารระหว่างกันหรือไปจนถึงสงครามกับไทย ทั้งทางบก ทางเรือ และทางอากาศ จากความใกล้ - ใกล้ทางชายแดน โดยควบคู่การพิจารณาด้านเจตนา (Intention) และขีดความสามารถ (Capability) ของแต่ละประเทศ

2.2 แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้น หรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)

เพื่อการประมาณการกำลังซื้อในอนาคต หากมีแนวโน้มงบประมาณทางทหารที่สูงขึ้นก็คาดการณ์ได้ว่า ประเทศเป้าหมายมีกำลังซื้อที่สูงขึ้น ในภาพรวมหรือพิจารณาแหล่งที่มาของรายได้ (Source of Income) ของลูกค้าว่าแหล่งเงินมาจากที่ใดมีความเป็นไปได้ สู้การจัดหาสินค้าจากไทยหรือไม่² [2]

2.3 การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีต ส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)

เพื่อศึกษาว่า ปัจจุบันประเทศเป้าหมายนั้น ด้านยุทธโปกรณ์พึ่งพิงประเทศใดเป็นหลัก (Foreign Dependencies) มากน้อยเพียงใด กำลังพลมีความคุ้นชินกับระบบหรือการทำงานของยุทธโปกรณ์ค่ายใด

¹ ผู้เขียนค้นพบว่า United Nations Arms Trade Treaty (UN ATT) อันเป็นความตกลงระหว่างประเทศที่ไทยลงนามให้การรับรองตามพันธสัญญาไปเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน 2013 สนธิสัญญาว่าด้วยการค้าอาวุธ หรือ Arms Trade Treaty (ATT) มีวัตถุประสงค์ในการกำหนดมาตรฐานระหว่างประเทศ เพื่อกำกับหรือยกระดับการกำกับการค้าอาวุธตามแบบระหว่างประเทศ ป้องกันและจัดการการค้าอาวุธตามแบบที่ผิดกฎหมาย รวมถึงป้องกันการเบี่ยงเบนของอาวุธตามแบบเหล่านั้น มีให้อาวุธตกไปอยู่กับบุคคลหรือกลุ่มบุคคลที่จะใช้อาวุธดังกล่าวในทางที่ผิดกฎหมาย สนธิสัญญาว่าด้วยการค้าอาวุธถือเป็นเครื่องมือที่มีผลผูกพันในทางกฎหมาย เพื่อให้รัฐได้ตระหนักและปฏิบัติตามพันธกรณีอย่างจริงจัง ในการควบคุมการเคลื่อนย้ายอาวุธตามแบบที่กำหนดไว้ในมาตรา 2 (1) จำนวน 8 หมวดหมู่ (a) - (g) ของสนธิสัญญาฯ และได้รับการปรับปรุงล่าสุดเมื่อเดือนมกราคม พ.ศ. 2565 อีกทั้งได้ระบุให้รัฐภาคีแต่ละรัฐควรใช้บทบัญญัติสนธิสัญญานี้กับอาวุธตามแบบอย่างกว้างขวางที่สุดด้วย ทั้งนี้ UN ATT ได้เสนอแนวทางการประเมินการส่งออกยุทธโปกรณ์ไว้บางประการที่สอดคล้องกับการศึกษาของผู้เขียนเช่นกัน เช่น ประเด็นด้านความเสี่ยงในการบ่อนทำลายสันติภาพและความมั่นคง การละเมิดหลักสิทธิมนุษยชน การกระทำการเป็นการก่อการร้ายหรืออาชญากรรมจัดตั้งข้ามชาติ เป็นต้น อันสอดคล้องกับแนวทางของกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา ที่พิจารณาถึงปัจจัยที่หลากหลาย เช่น การเมือง การทหาร เศรษฐกิจ การไม่เผยแพร่อาวุธ ความมั่นคงปลอดภัยทางเทคโนโลยี ผู้ใช้ปลายทาง และปัจจัยสิทธิมนุษยชนด้วย

² การประชุม WMEAT หรือ World Military Expenditures and Arms Transfers (WMEAT) 2021 เป็นการประชุมที่พิจารณาข้อมูลตัวเลขด้านงบประมาณทางทหารของระบบเศรษฐกิจของประเทศที่นำเข้ายุทธโปกรณ์ทั่วโลก แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตัดสินใจว่าประเทศจะจัดหายุทธโปกรณ์หรือไม่ อย่างไร และจากที่ใด (ที่มา: World Military Expenditures and Arms Transfers 2021 Edition, DECEMBER 30, 2021, US Department of State, accessed <https://www.state.gov/world-military-expenditures-and-arms-transfers/>)

มากกว่ากัน สามารถปฏิบัติงานร่วมกับยุทธโศภกรณ์ที่มีอยู่ได้ดีหรือไม่อย่างไร (Compatibility) ทำให้สามารถประเมินโอกาสที่ไทยจะทำการเจาะตลาดที่มีอยู่แล้วในประเทศนั้น ๆ หรือนำผลิตภัณฑ์เข้าไปแทรกตัวเปิดตัวกับวงจรการจัดหาของประเทศเหล่านั้นให้น่าสนใจได้อย่างไร³ [3]

2.4 ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)

เพื่อประเมินระดับความพร้อมของประเทศเป้าหมาย เพราะโดยกรณีทั่วไปสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ประเทศเป้าหมายมักจะต้องอุดหนุนและเลือกซื้ออุตสาหกรรมในประเทศตนเองก่อนการนำเข้าจากต่างประเทศ หากเป็นเช่นนั้น รายการสินค้าที่รัฐบาลประเทศเป้าหมายสนับสนุนสินค้าภายในของตนเอง ชำกับรายการขีดความสามารถที่ไทยมีก็จะทำให้โอกาสการจัดหาน้อยลงไปด้วย แต่ถ้าประเทศเป้าหมายมีอุตสาหกรรมอื่นที่ไม่ซ้ำกับผลิตภัณฑ์ของไทยหรือไปอุดหนุนผลิตภัณฑ์อื่นที่ไม่ซ้ำกับของไทย โอกาสการจัดหา ก็จะมากขึ้นไปด้วย

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)

เพื่อประเมินการส่งออกยุทธโศภกรณ์ในอนาคต หากเป็นประเทศที่ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศอยู่ในระดับดี การส่งออกยุทธโศภกรณ์ไปยังประเทศนั้นจะทำให้บรรลุเป้าหมาย มีความราบรื่น และยกระดับความสัมพันธ์ให้แน่นแฟ้นยิ่งขึ้น ในทางกลับกัน หากความสัมพันธ์ไม่ราบรื่นหรือเคยมีกรณีพิพาทกันมาก่อนจะถือว่าเป็นข้อควรระวังในการดำเนินการได้

2.6 ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้นเน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้ยุทธโศภกรณ์ใดในการป้องกันประเทศ หรือการป้องกันความมั่นคงภายใน

เพื่อประเมินการนำเสนอยุทธโศภกรณ์ของไทยว่ายุทธโศภกรณ์นั้นตอบโจทย์ภัยคุกคามประเทศเป้าหมายมากน้อยเพียงใดและขีดความสามารถของไทยน่าจะนำผลิตภัณฑ์ใดของบริษัทใดไปนำเสนอให้ประเทศเป้าหมาย

2.7 ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมาย หรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร

เพื่อประเมินว่าประเทศเป้าหมายมีความเสี่ยงในการใช้งานและการครอบครองยุทธโศภกรณ์ได้ดีมากเพียงใด มีมาตรการในการจัดการอาวุธ (Weapon Handling) ดีหรือไม่ อาจตกอยู่ในมือผู้ไม่ประสงค์ดีหรือผู้ก่อการร้ายหรือไม่ หากเรื่องดังกล่าวเป็นปัญหาอาจจะทำให้ไทยไม่พิจารณาส่งออกไปได้

2.8 กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด

เพื่อประเมินว่าหากประเทศใดมีระดับความสุ่มเสี่ยงในการละเมิดสิทธิมนุษยชนสูง ไทยต้องพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนในการส่งออก เพราะอาจผิดกฎหมายหรือขัดตกลงระหว่างประเทศ หรือจะทำให้ได้รับการวิพากษ์วิจารณ์อย่างกว้างขวางจากการตัดสินใจที่ไม่รอบด้านและได้รับการคัดค้านจากประชาคมนานาชาติ

³ บทความ Arms and Influence in Southeast Asia: The Link between Arms Procurement and Strategic Relations, Gavril Torrijos, September 22, 2022, CSIS (Center for Strategic and International Studies.), accessed <https://www.csis.org/blogs/new-perspectives-asia/arms-and-influence-southeast-asia-link-between-arms-procurement-and> ได้ชี้ให้เห็นว่า ประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มักจะพึ่งพิงผู้ส่งออกในอนาคตจากผู้ส่งออกในอดีตเสมอ เพราะจากการที่ฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศยังพัฒนาได้ไม่เต็มที่ การส่งกำลังบำรุงในอนาคตต้องเป็นการส่งกำลังของบริษัทที่เป็นผู้ขายเดิม อีกทั้งปัจจัยทางค่ายของความสัมพันธ์ระหว่างประเทศที่ประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้พยายามสร้างดุลแห่งอำนาจก็เป็นส่วนหนึ่งให้พึ่งพิงผู้ขายเดิมเช่นกัน โดยเฉพาะการแข่งขันกันสร้างอิทธิพลของจีนและสหรัฐอเมริกาในปัจจุบันด้วย การศึกษานี้จึงได้เห็นว่าปัจจัยนี้เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง

2.9 การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่มากนักแค่นั้น

เพื่อประเมินการส่งออกอาวุธของไทยจะส่งผลต่อเสถียรภาพความมั่นคงในภูมิภาคของประเทศเป้าหมายมากนักเพียงใด ทำให้ดุลอำนาจในภูมิภาคเปลี่ยนไปมากนักแค่ไหน ส่วนมากแล้วระดับการส่งออกของไทย โดยเฉพาะยุทธโประกรณ์ตามแบบอยู่ในระดับต่ำมาก จึงเป็นข้อพิจารณาที่ค่อนข้างน้อย หากเป็น Small Arms หรืออาวุธขนาดเล็ก หรืออาวุธประจำกาย อาจส่งผลต่อสันติภาพระหว่างประเทศและความมั่นคงได้ เป็นต้น

ข้อมูลจากการพิจารณาทั้ง 9 ประการ ข้างต้น อาจเป็นแนวทางสะท้อนการเชื่อมโยงปัจจัยภาพรวมว่า ทิศทางอุตสาหกรรมป้องกันประเทศน่าจะเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่ สมควรดำเนินการอย่างไร เพื่อประเมินภาพรวมและให้ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย กับสถานเอกอัครราชทูต สถานทูต สถานกงสุล ผู้ช่วยทูตทหาร ผู้ช่วยทูตพาณิชย์ของไทยในประเทศเป้าหมายว่า ควรจะสนับสนุน นำเสนอ หรือนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านใด บริษัทใด เข้าแข่งขันเป็นพิเศษ หรือควรริเริ่มหรือต่อยอดความร่วมมือด้านใดเป็นพิเศษ หรือไม่ อย่างไร

สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ที่ใช้ในการพิจารณาการส่งออกยุทธโประกรณ์ไปยังต่างประเทศ

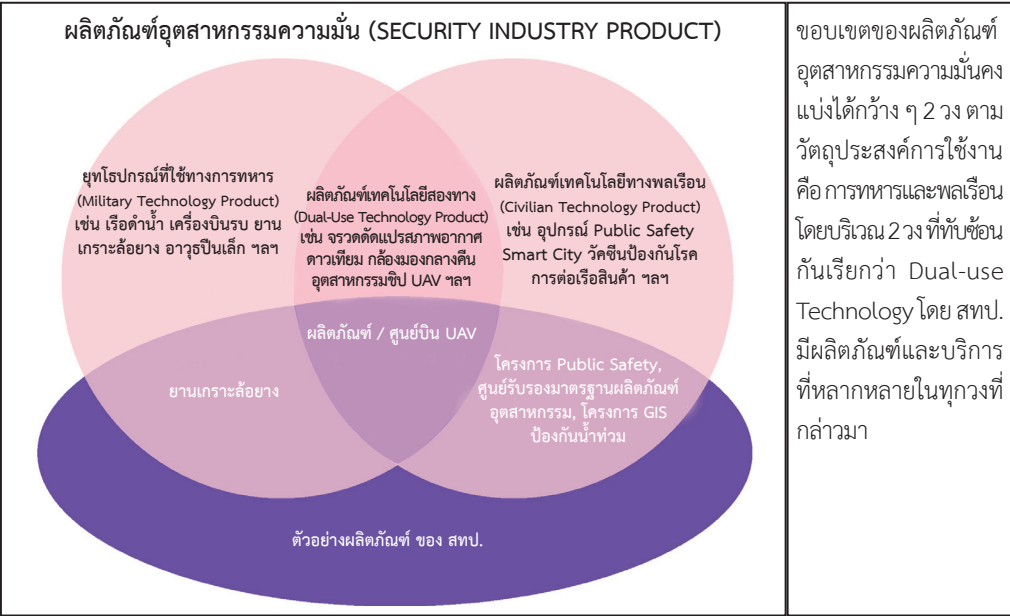


3. ตารางวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ความมั่นคงของไทยไปยังประเทศเป้าหมาย

เป็นแนวทางการพิจารณาและวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ในหลาย ๆ ด้านที่ครอบคลุมหลากหลายมิติ ทั้งศักยภาพ โอกาส และความเสี่ยงด้านเศรษฐกิจ การครอบครองเทคโนโลยี สังคม ความมั่นคงและความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ ประเทศที่นำมา

พิจารณานั้น ถือว่ามีศักยภาพด้านการส่งออก รวมทั้งมีสถานเอกอัครราชทูต สถานทูต และผู้ช่วยทูตฝ่ายทหารบก ฝ่ายทหารเรือ และฝ่ายทหารอากาศปฏิบัติงานอยู่ด้วย ในส่วนของสภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ทั้ง 9 ประการ ถือว่ามีบทบรรยายที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น โดยในส่วนนี้จะเน้นวิเคราะห์เป็นรายประเทศ เพื่อให้ได้เห็นมุมมองและรายละเอียดที่หลากหลาย เพื่อนำมาประเมินว่าประเทศใดมีลำดับความเร่งด่วนและความสำคัญ (Priority) และมีข้อเสนอแนะอย่างไร

ขอบเขตของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมความมั่นคงหลากหลายแบบและผลิตภัณฑ์ของ สทป.



ตารางที่ 1 ตารางวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางยุทธศาสตร์ที่ส่งผลต่อโอกาสการส่งออกผลิตภัณฑ์ความมั่นคงของไทยไปยังประเทศเป้าหมาย

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ) ⁴	- ทางบกและทางอากาศ ใกล้ชิดชายแดนไทยมาก - โอกาสรุกกล้ำอธิปไตยหรือเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบกและทางอากาศอยู่ในระดับต่ำมาก
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไรมากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank) ⁵	งบประมาณทหารอยู่ระดับต่ำที่สุดในอาเซียน (ร้อยละ 0.2 ของ GDP) ส่วนใหญ่การพัฒนาทางทหารขึ้นอยู่กับ foreign aid จากรัสเซียและจีน หากไทยจะส่งออกอาจต้องมี Financial Assistance, Soft-loan Banking เพื่อเพิ่มโอกาสขายให้มาก
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีต ส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's) ⁶	ยุทธโธปกรณ์ทางบกและทางอากาศ มาจากรัสเซียและจีนเป็นหลัก รองลงมา คือ เวียดนามและยูเครน ขณะนี้รัสเซียมีความขัดแย้งอยู่ ทำให้ระดับการช่วยเหลือผ่อนอิทธิพลลง จีนได้มีบทบาทมากขึ้น คู่แข่งการเจาะตลาดอาวุธของลาวน่าจะเป็นผลิตภัณฑ์จากจีนเป็นหลัก
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด ⁷ (ข้อมูลจาก Jane's)	เนื่องจากงบประมาณทางทหารที่ต่ำ และส่วนใหญ่เป็นการจ่ายเงินเดือน ทำให้ระดับขีดความสามารถและการลงทุนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในอยู่ในระดับต่ำที่สุดในอาเซียน ไทยสามารถเสนอขายยุทธโธปกรณ์ทางบกหรือเรือขนาดเล็กที่ปฏิบัติในแม่น้ำได้เท่านั้น เพราะไม่มีกองทัพเรือรบที่ปฏิบัติการในทะเลเปิด

⁴ เพื่อประเมินโอกาสที่จะเป็นภัยคุกคามกับไทย ทั้งทางบก ทางเรือ และทางอากาศ จากความใกล้เคียงทางชายแดน โดยควรพิจารณา Intention และ Capability

⁵ เพื่อการประมาณการกำลังซื้อในอนาคต หากมีแนวโน้มงบประมาณทางทหารที่สูงขึ้น ก็คาดการณ์ได้ว่า ประเทศเป้าหมายมีกำลังซื้อที่สูงขึ้น หรือพิจารณา Source of Income ของลูกค้าว่าแหล่งเงินมาจากไหน มีความเป็นไปได้สู่การจัดหาสินค้าจากไทยหรือไม่

⁶ เพื่อศึกษาว่า ปัจจุบันประเทศเป้าหมายนั้น พึ่งพิงประเทศใด ทำให้สามารถประเมินโอกาสที่ไทยจะทำการเจาะตลาดที่มีอยู่แล้วในประเทศนั้น ๆ หรือนำผลิตภัณฑ์เข้าไปแทรกตัว เปิดตัวกับวงจรการจัดหาของประเทศเหล่านั้นให้น่าสนใจได้อย่างไร

⁷ เพื่อประเมินระดับความพร้อมของประเทศเป้าหมาย เพราะประเทศเป้าหมายมักจะต้องอุดหนุนอุตสาหกรรมในประเทศตนเองก่อนการนำเข้าจากต่างประเทศ หากเป็นเช่นนั้น รายการสินค้าที่รัฐบาลประเทศเป้าหมายสนับสนุนสินค้าภายในของตนเอง ก็จะทำให้โอกาสการจัดหาจากไทยน้อย แต่ถ้าประเทศเป้าหมายมีอุตสาหกรรมอื่นที่ไม่ซ้ำกับผลิตภัณฑ์ของไทยหรือไปอุดหนุนผลิตภัณฑ์อื่นที่ไม่ซ้ำกับของไทย โอกาสการจัดหาที่จะมากขึ้นไปด้วย

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด ⁸ (ในภาพรวม)	ทั้ง Intention และ Capability ของทั้งสองประเทศ ไม่มีท่าที่เป็นภัยต่อกัน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศของไทยและลาวมีความสัมพันธ์ในระดับที่ราบรื่น
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้น เน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้อุทโธปกรณ์ใดในการป้องกัน หรือการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน ⁹	ภัยคุกคามหลักจะเป็นในเรื่องของระเบิดแสวงเครื่องหรือมกัณท์ที่ยังไม่ระเบิด (UXO-unexploded Ordnance) ได้ดิน ที่เหลือมาจากสงครามในอดีต นอกจากนี้ ยังมี การโจมตีด้วยอาวุธปืนเล็กและระเบิดต่อเป้าหมายพลเรือนและพ่อค้าชาวจีนในประเทศ ทางตอนเหนืออยู่ด้วย สิ่งนี้เป็นภัยคุกคามปัจจุบันต่อประชาชน ปัญหาความมั่นคงภายใน กับภูมิคุ้มกันได้คลี่คลายไปมาก ส่วนสถานการณ์กับประเทศเพื่อนบ้านค่อนข้างปกติ
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมายหรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร ¹⁰	ถือว่าปลอดภัย เพราะสถานการณ์ความมั่นคงภายในค่อนข้างสงบ เจ้าหน้าที่ทางทหารไม่ค่อยมีประวัติการก่ออาชญากรรม การลักขโมยอาวุธส่งให้กลุ่มก่อการร้ายหรือกลุ่มแบ่งแยกดินแดน
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด ¹¹	ส่วนใหญ่ผู้ก่อความไม่สงบจะมีเป้าหมายเป็นพลเรือนที่เป็นผู้ประกอบการชาวจีน และสิ่งปลูกสร้างของจีน จากกลุ่มที่ไม่เห็นด้วยในการเข้ามาประกอบธุรกิจของจีน ในทางตอนเหนือของประเทศลาว ส่วนกองทัพลาวมีบทบาทละเมิดสิทธิมนุษยชนในระดับต่ำมาก
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่ มากน้อยแค่ไหน ¹²	ด้วยโอกาสการสั่งซื้อขนาดใหญ่มีความเป็นไปได้น้อยมากและกองทัพลาวปัจจุบันยังมี ยุทโธปกรณ์ที่ไม่เพียงพอต่อการปฏิบัติการ แม้อุตสาหกรรมป้องกันประเทศจะส่งออกไปยังลาวได้ แต่ดุลอำนาจทางทหารและเสถียรภาพในภูมิภาคจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่ สมควรดำเนินการอย่างไรในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ¹³ ทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัท อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของ สทป.	ยุทธโธปกรณ์ที่น่าจะมี Priority อันดับต้น ๆ คือ ทุนยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด เพื่อตรวจจระเบิด UXO ที่กระจายอยู่ทั่วประเทศ อันเป็นภัยคุกคามชีวิตและทรัพย์สินลำดับต้น ๆ นอกจากนี้ บริษัทยานยนต์ทางบกและอมกัณท์หรือกระสุนน่าจะได้รับการประชาสัมพันธ์ในลำดับแรก ๆ ส่วนยุทธโธปกรณ์ทางเรือ นั้น อาจจะเป็นบริษัทที่เชี่ยวชาญการต่อเรือขนาดเล็กมากกว่า เพราะลาวมีกองทัพเรือสำหรับการปฏิบัติการข้ามลำน้ำเท่านั้น ไม่มีทะเลเปิด

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	ราชอาณาจักรกัมพูชา
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางบก ทางเรือ และทางอากาศ มีความใกล้ชิดมาก - โอกาสรุกล้ำอธิปไตยหรือเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบก ทางทะเล และทางอากาศ อยู่ในระดับสูงมาก มีประวัติการปะทะทางชายแดนทางบกมาแล้วอย่างหนัก ส่วนทางทะเลมีพื้นที่ทับซ้อนอยู่ แต่ยังไม่มีการขัดกันทางอาวุธที่ชัดเจน

⁸ เพื่อประเมินการส่งออกยุทธโธปกรณ์ในอนาคต หากเป็นประเทศที่มีความสัมพันธ์ระหว่างประเทศอยู่ในระดับดี การส่งออกยุทธโธปกรณ์ไปยังประเทศนั้น จะทำให้บรรลุเป้าหมาย มีความราบรื่น และยกระดับความสัมพันธ์ให้แน่นแฟ้นยิ่งขึ้น

⁹ เพื่อประเมินการนำเสนอยุทธโธปกรณ์ของไทยว่าตอบโจทย์ภัยคุกคามประเทศเป้าหมายมากน้อยเพียงใด ไทยน่าจะนำผลิตภัณฑ์ใดของบริษัทใดไปนำเสนอให้ประเทศเป้าหมาย

¹⁰ เพื่อประเมินว่า ประเทศเป้าหมายมีความเสี่ยงในการใช้งานและการครอบครองยุทธโธปกรณ์ได้มากเพียงใด หากเรื่องดังกล่าวเป็นปัญหา อาจจะ ทำให้ไทยไม่พิจารณาส่งออกไปได้

¹¹ เพื่อประเมินว่า หากประเทศใดมีระดับความสูญเสียการละเมิดสิทธิมนุษยชนสูง ไทยต้องพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนในการส่งออก เพราะอาจจะ ทำให้ได้รับการวิพากษ์วิจารณ์อย่างกว้างขวางจากการตัดสินใจที่รอบคอบ

¹² เพื่อประเมินว่า การส่งออกอาวุธของไทยจะส่งผลต่อเสถียรภาพความมั่นคงในภูมิภาคของประเทศเป้าหมายมากน้อยเพียงใด ทำให้ดุลอำนาจในภูมิภาคเปลี่ยนไปมากน้อยแค่ไหนหรือไม่

¹³ เพื่อประเมินภาพรวมและให้ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายกับสถานเอกอัครราชทูต สถานทูต สถานกงสุล ผู้ช่วยทูตทหาร ผู้ช่วยทูตพาณิชย์ของไทยในประเทศเป้าหมาย ว่าควรจะสนับสนุน นำเสนอ หรือนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้านใด บริษัทใด เข้าแข่งขันเป็นพิเศษ หรือควรริเริ่ม หรือต่อยอดความร่วมมือด้านใดเป็นพิเศษหรือไม่อย่างไร

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	ราชอาณาจักรกัมพูชา
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	งบประมาณทหารอยู่ที่ร้อยละ 2.4 ของ GDP ¹⁴ อันเป็นตัวเลขที่ตั้งเป้าหมายโดยแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติ นับเป็นตัวเลขที่สูงขึ้นมาจากร้อยละ 1.1 ในปี 2005 ในจำนวนนี้ปัจจุบันงบประมาณการจัดหาคงตัวอยู่ที่ร้อยละ 10-11 ของงบประมาณทหาร ซึ่งถือว่าต่ำมาก โดยปกติแล้วด้านยุทธโศปกรณ์เน้นการรับบริจาคและการจัดหาผ่าน soft-loan จากจีนและรัสเซียเป็นหลัก โดยเฉพาะยานเกราะและรถบรรทุก โดยไม่ค่อยปรากฏยุทธโศปกรณ์ของประเทศตะวันตกในตลาดอาวุธของกัมพูชา เพราะมีความกังวลเรื่องสิทธิมนุษยชน (Human rights) การค้ามนุษย์ (Human trafficking) และความใกล้ชิดจากจีน ในทุก ๆ ปี กองทัพบกได้รับงบประมาณทหารเป็นสัดส่วนที่สูงที่สุด (สัดส่วนร้อยละ 82 ร้อยละ 12 และร้อยละ 4 สำหรับกองทัพบก กองทัพเรือ และกองทัพอากาศ)
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีตส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	ยุทธโศปกรณ์ในอดีตส่วนใหญ่นำเข้า (ทั้งมือหนึ่งและมือสอง) จากจีนและรัสเซียเป็นหลัก (โดยมีรถถังหลักจากโปแลนด์) โดยเฉพาะกองทัพบกและกองทัพอากาศ ปัจจุบันรัสเซียลดบทบาทลงไปอย่างสำคัญ ทำให้เป็น Supplier รายหลักในตลาดอาวุธ การฝึกทางทหาร และการใช้พื้นที่ทางทหาร (ทั้งทางบกและทางเรือ) ในกัมพูชามากขึ้นเรื่อย ๆ พร้อม ๆ กับการที่สหรัฐอเมริกาว่าบาตรทางการค้าอาวุธในกัมพูชาไปเมื่อเดือนธันวาคม 2021 ที่ผ่านมา รายการการจัดหาล่าสุดที่น่าสนใจ คือ การจัดหารถถังจรวดหลายลำกล้อง RM-70 จำนวน 5 คัน จากสโลวาเกีย เสริมกำลังยิงจาก BM-21 ที่มีอยู่แล้ว 8 คัน และการจัดหาเฮลิคอปเตอร์ (จำนวน 12 ลำ จากจีน โดยจีนให้เครดิตการจัดหาด้วย)
ระดับความร่วมมือของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	จากรายงาน Jane's บ่งชี้ว่า กัมพูชาปราศจากภาคเอกชนด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ยุทธโศปกรณ์อาศัยการบริจาค การจัดหาด้วยเงินกู้ และการรับมอบจากต่างประเทศทั้งหมด ปรากฏรายงานเพียงโรงงานที่ร่วมมือกับเกาหลีเหนือเพื่อการผลิตอาวุธปืนและกระสุนขึ้นมูลฐาน รวมถึงการซ่อมบำรุงรถถังและอาวุธประจำกายด้วย อีกโรงงานหนึ่ง คือ Techo Hun Sen Military Technical Institute ที่จังหวัด Kampong Spue โรงงานนี้ทำการพัฒนาขีดความสามารถทางทหารบางอย่าง ที่คาดว่าจะเป็นการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ทางทหาร แต่ไม่ปรากฏข้อมูลที่แน่ชัด มีรายงานว่าจีนและเวียดนามได้มีส่วนร่วมการพัฒนาโรงงานนี้ด้วย ส่วนยุทธโศกรณ์ทางบกและทางอากาศนั้นพึ่งพาจีน รัสเซีย และเวียดนามเป็นหลัก
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	มีกรณีพิพาทและปะทะกันด้วยกำลังทหารในปี 2010 - 2011 โดยกัมพูชาใช้รถถังจรวดหลายลำกล้อง BM-21 เป็นยุทธโศปกรณ์หลักที่ยิงเข้ามาในฝั่งไทย ดังนั้น การขายยุทธโศปกรณ์ให้กับกัมพูชาเป็นเรื่องอ่อนไหวและต้องพิจารณารอบด้านว่าผู้ใช้นั้นจะไปใช้ในทางที่เป็นภัยคุกคามกับไทยหรือไม่
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้นเน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้ยุทธโศกรณ์ใดในการป้องกัน หรือการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน	ข้อมูลจาก Jane's บ่งชี้ว่าภัยคุกคามระดับชาติของกัมพูชาในระดับที่จะก่อเป็นสงครามระหว่างประเทศนั้นมีโอกาสที่ต่ำ อีกทั้งมีความสัมพันธ์ที่ดีกับจีน มีแต่ความเสียด้านการปะทะทางชายแดนทางบกและทางทะเลกับไทยเป็นหลัก จากการวิเคราะห์การจัดหาล่าสุดของกัมพูชา กัมพูชาให้ความสำคัญกับการครอบครองจรวดหลายลำกล้อง BM-21 และ RM-70 และเคยนำมาใช้ในสถานการณ์จริงอีกด้วย ส่วนภัยความมั่นคงภายในนั้นหลากหลายปัญหาที่มีความรุนแรง ไม่จะเป็นการเข้ามายุ่งยงของชาวจีนชนานใหญ่แล้วถูกตกเป็นเป้าของอาชญากรรม การประท้วง (Civil unrest) การวางระเบิดที่มีเหตุทางการเมือง การฟอกเงินจากคาสีโน การค้าอาวุธเถื่อน การค้ามนุษย์ การค้าสัตว์ป่าผิดกฎหมาย ยาเสพติด และอาชญากรรมข้ามชาติรูปแบบต่าง ๆ
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมายหรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	มีโอกาสที่ผลิตภัณฑ์ความมั่นคงจะตกอยู่ในมือผู้ไม่พึงประสงค์สูงมาก เนื่องจากปัญหาการฟอกเงินเป็นเหตุหลัก โดยมีปัจจัยคือการกำกับดูแลและธรรมาภิบาลที่ต่ำ เป็นสังคมที่ใช้เงินสดล้าในในตลาดค้าขาย การควบคุมคาสีโนที่หละหลวม (ชาวจีนและชาวไทย เป็นลูกค้าที่ใช้บริการต่อเนื่อง) ภาคการเงินที่โตไว และการกำกับดูแลสถาบันการเงินที่ไร้ประสิทธิภาพ ประชาชนที่ชอบการเสี่ยงพนันจากคาสีโนและหวยชายแดนที่ไร้หลัก ทั้งหมดยกนี้เป็นสิ่งที่ทำให้การฟอกเงินแก้ไขได้ยากมาก และอาวุธสงคราม เช่น อาวุธประจำกาย ระเบิด จรวดต่อสู้รถถัง ระเบิดแสวงเครื่อง และอื่น ๆ เป็นสินค้าหนึ่งที่มีความต้องการจากผู้มีอิทธิพลและถูกขายในตลาดมืดเช่นกัน

¹⁴ อาจจะดูเหมือนว่างบประมาณสูงต่อ GDP แต่จริง ๆ แล้ว กัมพูชาเป็นหนึ่งในประเทศที่ยากจนที่สุดในเอเชีย GDP เองก็ต่ำมาก ทำให้ร้อยละ 2.4 นั้นถือว่าน้อยมาก และส่วนใหญ่ (ร้อยละ 60-70) ใช้ในด้านการจ่ายเงินเดือนทหาร เครื่องแบบ อาวุธประจำกาย เพราะเป็นกองทัพที่มีการใช้กำลังพลจำนวนมาก

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	ราชอาณาจักรกัมพูชา
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	กระทรวงการต่างประเทศของสหรัฐอเมริกา (https://cambodianews.com/u-s-report-highlights-human-rights-abuses-by-cambodian-armed-forces/) รายงานว่า ทหารและตำรวจของกัมพูชามีการละเมิดสิทธิมนุษยชนและใช้กำลังแก่ประชาชนผู้ต่อต้านรัฐบาลนายกรัฐมนตรีนเรนทร สีฮานุม ด้วยการทรมาน การใช้กำลัง การละเมิดด้วยการใช้อุปกรณ์เล็กทรอนิกส์รุกล้ำสิทธิของประชาชนที่วิจารณ์รัฐบาล และมีปัญหาด้านที่ดินทำกิน อย่างไรก็ตาม เจ้าหน้าที่รัฐของกัมพูชาได้ให้การปฏิเสธทั้งหมด โดยกล่าวว่าเป็นการบังคับใช้กฎหมายและดำเนินการตามกฎหมายศาลตามปกติ ไม่ได้ละเมิดสถานการณ์ที่แท้จริงในกัมพูชา
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่ มากน้อยแค่ไหน	กัมพูชามีกลยุทธ์การได้มาของอาวุธที่เน้นไปที่การรับบริจาคให้เปล่าและสินค้ามือสองจากผู้ใต้ดำเนินการให้ การถ่ายเทอาวุธ หรือสินค้าผลิตภัณฑ์ความมั่นคง หรือเครื่องจักรอุปกรณ์ทางเทคโนโลยีใด ๆ ที่สามารถใช้ในด้านความมั่นคงได้จากไทย ไม่จะเป็นการขายหรือการให้บริจาค ถือว่าจะเกิดผลลัพธ์เชิงลบกับไทยอย่างมาก เพราะจากรายงานของ Jane's ได้กล่าวไว้อย่างชัดเจนว่าไทยเป็นคู่ขัดแย้งโดยตรงของกัมพูชา
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่ สมควรดำเนินการอย่างไรในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัทยุทสาหรกรรมป้องกันประเทศของไทยและของ สทป.	ในภาพรวมนั้น แม้ว่าสถานการณ์ไทย/กัมพูชาจะยังคงตึงเครียดอยู่ แต่รายงานของ Jane's ที่ระบุไว้และสถานการณ์รอบด้าน ได้บ่งชี้ชัดเจนว่า การให้การสนับสนุนผลิตภัณฑ์ความมั่นคงที่กัมพูชาสามารถใช้ในการทหารจะส่งผลกระทบต่อการดำเนินนโยบายต่างประเทศและความมั่นคงของไทยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากไทยเป็นคู่ขัดแย้งโดยตรงของกัมพูชา พิสัยของ BM-21 และ RM-70 บ่งชี้ชัดเจนว่ามีเพียงไทยประเทศเดียวเท่านั้นที่เป็นเป้าหมาย ทั้ง ๆ ที่กัมพูชามีงบประมาณในการจัดหาจำกัด แต่ยังคงจัดหาเพิ่มจำนวนหลายระบบ หากอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยไม่มีปฏิสัมพันธ์ด้วย ถือว่ามีโอกาสที่ผลิตภัณฑ์ความมั่นคงจะตกอยู่ในกลุ่มผู้ไม่พึงประสงค์สูงมาก อีกทั้งมีรายงานการละเมิดสิทธิมนุษยชนโดยทหารและตำรวจกัมพูชาอีกด้วย ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ตอกย้ำความไม่เหมาะสมของการดำเนินการใด ๆ กับกัมพูชาอย่างชัดเจน ยกเว้นอยู่กรณีเดียว คือ การช่วยเหลือทางมนุษยธรรมหรือการค้าและกู้ภัยประชาชนตามแนวชายแดนเท่านั้นที่เป็นปัจจัยเชิงบวก ซึ่งอาจอำนวยความสะดวกต่อการค้าขายผลิตภัณฑ์ความมั่นคงจากไทยไปสู่กัมพูชาที่มีความเป็นไปได้ ผลิตภัณฑ์ที่สมควรไปนำเสนอจะเป็นหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิดแบบต่าง ๆ ของ สทป. หรือโครงการ COP ที่จัดทำแผนที่สถานการณ์ HADR เท่านั้น ประเด็นผลิตภัณฑ์ความมั่นคงอื่น ๆ โดยเฉพาะสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อการใช้กำลังทางทหาร เช่น ยานเกราะล้อยาง จรวดหลายลำกล้อง เรือแบบต่าง ๆ หรืออุปกรณ์เทคโนโลยีขั้นสูงต่าง ๆ ควรจะหลีกเลี่ยงทั้งสิ้น

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐอินโดนีเซีย
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางบก ทางทะเล และทางอากาศ ค่อนข้างห่างไกล - โอกาสถูกล้ำอیدیโดยหรือเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบก ทางทะเล และทางอากาศอยู่ในระดับต่ำมาก
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	งบประมาณทางทหารอยู่ที่ร้อยละ 0.7 ของ GDP ¹⁵ ซึ่งถือว่าปรับลดลงจากร้อยละ 1.5 ของ GDP ในปี 2014 และยังมีนโยบายการเงินของกองทัพที่น่าสนใจ คือ Zero Growth Policy ¹⁶ นโยบาย Minimum Essential Force ¹⁷ และการมุ่งเป้าหมายให้งบประมาณทางทหารเพิ่มขึ้นไปถึงร้อยละ 1 ของ GDP นอกจากนี้ ภาครัฐยังใช้ Exim Bank เพื่อให้เกิดการซื้ออาวุธอีกด้วย
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีตส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	การจัดหาจะต้องเริ่มจากรัฐวิสาหกิจในประเทศเป็นลำดับแรก (PT Pindad, PT PAL, PTDI) หากไม่สามารถตอบสนองความต้องการได้จึงค่อยจัดหาต่างประเทศ ส่วนการนำเข้านั้นมาจากหลากหลายประเทศ ทั้งรัสเซีย อเมริกา ประเทศแถบยุโรป และมีการแข่งขันระหว่างกันที่รุนแรง เพราะมีกองทัพขนาดใหญ่ และต้องดูแลทั้งอากาศและน่านน้ำที่กว้างใหญ่อีกด้วย

¹⁵ ตัวเลขร้อยละ 0.7 ของ GDP นั้นอาจจะดูเหมือนมีงบประมาณทางทหารที่น้อย แต่มูลค่า Real Term นั้นอยู่สูงลำดับต้น ๆ ของอาเซียน เพราะในความเป็นจริงแล้วอินโดนีเซียเป็นประเทศขนาดใหญ่ มีประชากรกว่า 250 ล้านคน ทำให้ GDP ของอินโดนีเซียสูงเป็นลำดับที่ 1 ในอาเซียน เมื่อกล่าวว่ายู่ที่ร้อยละ 0.7 ของ GDP จึงถือว่าอยู่ในระดับที่สูงมาก (GDP มากกว่าไทย 2.5 เท่า)

¹⁶ เป็นนโยบายที่กำหนดให้ลดการเพิ่มงบประมาณด้านบุคลากรของกองทัพ (เงินเดือน สวัสดิการ) และกิจกรรมที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทหาร (Non-core Military Activities) เพื่อปรับเข็มมุ่งไปยังการจัดซื้อยุทโธปกรณ์ให้มากขึ้น

¹⁷ เป็นนโยบายหมายความถึงขีดความสามารถที่วางอยู่บนรากฐานของการป้องกันประเทศและระดับกองกำลังที่สามารถรับประกันการได้มาของผลประโยชน์ทางทหารระดับยุทธศาสตร์อย่างทั่วถึง ที่ซึ่งลำดับความเร่งด่วนของการจัดหาอาวุธนั้นมีเพื่อการพัฒนาความเข้มแข็งทางทหารขั้นต่ำที่สุด หรือการจำหน่ายยุทโธปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้การไม่ได้ออกไป

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐอินโดนีเซีย
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศไทยในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	มีหน่วยงานที่มีขีดความสามารถเฉพาะด้านการพัฒนายุทธโธปกรณ์อย่างครบวงจรตอบสนองความต้องการของกองทัพบก กองทัพเรือ และกองทัพอากาศ โดยทั้งหมดเป็นรัฐวิสาหกิจ ¹⁸ นอกจากนี้ยังมีบริษัทย่อยอื่น ๆ รวม 15-20 บริษัท ที่มีผลผลิตด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศด้วย อย่างไรก็ตาม การผลิตอุตสาหกรรมเหล่านี้ส่วนใหญ่ทำการผลิตตามใบอนุญาตที่มีเทคโนโลยีในระดับต่ำที่เรียกว่า Third-Tier ¹⁹
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	ความสัมพันธ์อยู่ในระดับดี ที่ผ่านมามีการดำเนินการซ้อมรบภายใต้รหัสการฝึก Cobra Gold และแลกเปลี่ยนนายทหารในหลักสูตรต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง และไทยเป็นลูกค้า PTDI และ PT Pindad อีกด้วย
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้นเน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้ยุทธโธปกรณ์ใดในการป้องกันประเทศ หรือการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน	แม้ว่าปัจจุบันไม่ปรากฏภัยคุกคามทางทหารที่ชัดเจน แต่ยังมีความขัดแย้งทางการเมืองระหว่างประเทศอย่างต่อเนื่อง ทั้งออสเตรเลีย มาเลเซีย และสิงคโปร์ แต่ยังไม่ได้ระดมไปสู่ความขัดแย้งทางทหาร กองทัพอินโดนีเซียเป็นกองทัพขนาดใหญ่ เพราะมีพื้นที่รับผิดชอบทั้งทางบกและทางทะเลที่กว้างขวาง ทำให้มีความต้องการยุทธโธปกรณ์ในระดับสูง
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมาย หรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	โอกาสที่อาวุธจะไปตกอยู่ในมือผู้ไม่พึงประสงค์มีน้อย เพราะปัจจุบันกองทัพอินโดนีเซียมีความเป็นมืออาชีพมากขึ้นทั้งในทางการเมืองและในทางวิชาชีพ ไม่ค่อยปรากฏข่าวว่ากองทัพทำอาวุธสูญหายหรือถูกปล้นชิงจากคลังอาวุธไปสู่แหล่งอื่น
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	รายงานของ UN บ่งชี้ว่า กองทัพบกและตำรวจมีส่วนในการสลายการชุมนุมที่ปราศจากอาวุธด้วยการที่รุนแรงถึงขั้นมีการใช้กระสุนจริงต่อประชาชนที่เรียกร้องสิทธิการเข้าถึงที่ดินและสิ่งแวดล้อมหรือการทำเหมือง
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่ มากน้อยแค่ไหน	การส่งออกอาวุธไปยังอินโดนีเซียไม่ทำให้ดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปมากนัก เพราะปัจจุบันอินโดนีเซียไม่ได้มีภัยคุกคาม (Immediate Threats) ที่ชัดเจน แต่จะเน้นด้านการฝึกกำลังพล การป้องกันประเทศ และการบังคับใช้กฎหมายในระดับปกติเท่านั้น
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่ สมควรดำเนินการอย่างไรในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัทอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของสหป.	ช่องว่างที่บริษัทไทยสามารถจะเข้าสู่ตลาดได้นั้น มีน้อยมาก เพราะขีดความสามารถอุตสาหกรรมป้องกันประเทศอินโดนีเซียมีความเพียบพร้อมมาก และอาจไม่คุ้มทุน เพราะอินโดนีเซียกำหนดให้ยุทธโธปกรณ์ทางทหารมีการดำเนินการขอฟีดแบ็กทุกรายการโดยไม่กำหนดมูลค่าขั้นต่ำ กลยุทธ์นั้นอาจจะต้องพิจารณาในแง่ของการให้บริการด้านอื่น ๆ ของบริษัทในประเภท (Category) อื่น ๆ รองลงมา เช่น การเป็นผู้จัดหาวัสดุตั้งต้น (Raw material supplier) ที่แข่งขันที่ราคา หรือการให้บริการการซ่อมบำรุงยานยนต์ทางทหาร หรือการ MRO โครงการขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ที่มีความคุ้มทุนในการดำเนินการในอินโดนีเซีย เป็นต้น ด้านยุทธโธปกรณ์ทางบกมีโอกาสน้อยที่จะบุกตลาดอินโดนีเซีย เพราะ PT Pindad เป็นรัฐวิสาหกิจที่มีผลิตภัณฑ์ที่รองรับความต้องการได้เกือบทุกรายการอยู่แล้ว ส่วนด้านยุทธโธปกรณ์ทางเรือนั้นก็ถือว่ามีโอกาสน้อยกว่าด้วย เพราะ PT PAL ถือเป็นรัฐวิสาหกิจที่เข้มแข็งที่สุดใน 3 รัฐวิสาหกิจหลัก และเข้มแข็งกว่าบริษัทเอกชนของไทยด้วย เพราะสามารถต่อเรือ Strategic Sealift Vessel หรือเรือยุทธบริการขนาดใหญ่ ต่อเรือกลพลขึ้นบก เรือฟริเกต และเรือดำน้ำที่ออกแบบโดยเกาหลีใต้ ถือว่าเกาหลีใต้ได้ครอง partnership กับ PT PAL มานานแล้ว ตลาด Fast Attack Craft ก็ดำเนินการโดย PT. Palindo Marine ส่วนโครงการ UAV ดำเนินการโดย PTDI อยู่แล้ว

¹⁸ PT Pindad ที่เชี่ยวชาญด้านยานรบทางบกและกระสุนหรือมกกันต์ PT Dahana ที่เชี่ยวชาญด้านวัตถุระเบิด กองกำลังทางเรือ มี PT PAL ในการบริการต่อเรือ ส่วนกำลังทางอากาศมี PTDI ที่รับผิดชอบด้านการประกอบอากาศยานและวิศวกรรมอากาศยาน รัฐวิสาหกิจทั้ง 4 มีเจ้าหน้าที่ประมาณ 9,000 คน ได้รับการสนับสนุนและควบคุมการปฏิบัติงานภายใต้รัฐมนตรีว่าการกระทรวงกลาโหมและอยู่ภายใต้กฎหมาย Defence Industry Bill

¹⁹ เช่น การผลิตโครงสร้างอากาศยานปีกหมุนและปีกนี้สำหรับการขนส่งระดับกลางและเล็ก ขีดความสามารถการวิจัย พัฒนา และผลิตรายการทางบก เช่น รถลำเลียงพลหุ้มเกราะ (นั่นคือ รถหุ้มเกราะ Anoa อุตสาหกรรมที่อาจเรียกได้ว่าประสบความสำเร็จสูงสุด เพราะสามารถผลิตได้เองทั้งสายการผลิต) อุปกรณ์ติดต่อสู้สารที่ไม่ซับซ้อน ยานรบทางเรือชั้น 3 เช่น เรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่ง เรือเร็วหรือเรือยาง การผลิตเครื่องกระสุนอาวุธปืนเล็ก อมกกันต์ และสารดินขับ ทั้งหมดนี้รวมถึงการซ่อมบำรุงพื้นฐาน การซ่อมสินค้าภาพ ในขณะที่อุปกรณ์หรือยุทธภัณฑ์ที่มีระดับเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบนำร่องเครื่องยิงขีปนาวุธ จะใช้การส่งนำเข้ามาประกอบภายในประเทศ

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา [4]
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางบก ทางเรือ และทางอากาศ มีความใกล้ชิดมาก - โอกาสถูกล้ำอับโดยหรือเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบก ทางทะเล และทางอากาศ อยู่ในระดับสูงมาก มีประวัติการละเมิดน่านฟ้า น่านน้ำ และพรมแดนธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง โดยที่ทางการเมียนมาไม่ได้แสดงการขอโทษอย่างชัดเจน
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	Jane's คาดการณ์ว่าปัจจุบันงบประมาณอยู่ที่เกือบร้อยละ 3 ของ GDP ²⁰ [6] โดยมีความกังวลและยากต่อการประเมิน ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลปิด อีกทั้งกองทัพมีบริษัทโฮลดิ้ง (Holding) ของตนเอง มีความสามารถในการใช้เงินนอกงบประมาณ และกฎหมายงบประมาณพิเศษที่ไม่ต้องผ่านการพิจารณาของรัฐสภา โดยที่งบประมาณส่วนนี้เชื่อมกับการสำรวจและผลิตก๊าซธรรมชาติร่วมกับจีนและรัสเซียด้วย
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีต ส่วนใหญ่มากจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	ปัจจุบันมีการคว่ำบาตรทางการทหารและความมั่นคงจากการรัฐประหารในปี 2017 และการละเมิดสิทธิมนุษยชนที่เลวร้ายลงในปี 2021 จากสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรปอยู่ และไม่มีแนวโน้มจะจบลงเร็ว ๆ นี้ ทำให้กองทัพเมียนมาพึ่งพาเทคโนโลยีทางทหารจากจีนและรัสเซียเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีอินเดีย ยูเครน และเบลารุสอีกด้วย การดำเนินการด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเท่าที่มีข้อมูลนั้น ปรากฏว่าดำเนินการโดยรัฐบาลและบริษัทในกองทัพทั้งหมด
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	นอกเหนือไปจากการจัดหา การพัฒนาอาวุธยุทโธปกรณ์ส่วนใหญ่จะขึ้นกับกรมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและกองทัพบก เรือ อากาศของเมียนมา ชัดความสามารถส่วนใหญ่จะอยู่ที่อาวุธทางบก เช่น ปืนครก เครื่องยิงลูกระเบิด ปืนกล ปืนเล็ก อากาศที่เกี่ยวกับ ยานเกราะ รวมทั้งด้านการซ่อมบำรุงเรือและอากาศยานขั้นพื้นฐาน ในด้านการวิจัยและพัฒนานั้น มีรายงานว่าเมียนมาได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีอาวุธจรวดนำวิถีเชื้อเพลิงเหลวพิสัยกลางจากเกาหลีเหนือ และยังได้รับความช่วยเหลือจากอินเดียและเบลารุสอีกด้วย
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	ผู้นำฝ่ายไทยมีการเยี่ยมเยือนเมียนมาเป็นครั้งคราวเพื่อให้ความช่วยเหลือ แต่ไทยก็ถูกคาดหวังจากประชาคมโลกให้ดำเนินการกดดันเมียนมาในทางการเมืองและทางเศรษฐกิจเช่นกัน ด้วยทำให้ไทยตกที่นั่งลำบากในการหาสมดุลระหว่างการเป็นเพื่อนบ้านและการบริหารความคาดหวังและบรรทัดฐานระหว่างประเทศ
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้น เน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ภัยุทโธปกรณ์ใดในการป้องกันประเทศ หรือการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน	ประเทศที่รายล้อมเมียนมามีความสัมพันธ์ในระดับที่ดีถึงดีมาก Jane's ประเมินว่าภัยคุกคามทางทหารจากภายนอกนั้นมีโอกาสน้อยมาก แต่ภายในประเทศมีการใช้กำลังทหารเมียนมากับชนกลุ่มน้อยทางชาติพันธุ์ติดอาวุธ ในรัฐคะฉิ่น กะเหรี่ยง รัฐฉาน ทั้งทางบกและทางอากาศ จนเป็นที่วิพากษ์วิจารณ์ของประเทศตะวันตกและองค์การสหประชาชาติ
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมาย หรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	ด้วยข้อเท็จจริงปรากฏว่ามีการใช้กำลังทหารมุ่งเป้าหมายไปยังกองกำลังชาติพันธุ์ติดอาวุธในประเทศ แต่พลเรือนเองก็ได้รับผลกระทบไปด้วย ทำให้อาวุธยุทโธปกรณ์ที่กองทัพเมียนมาใช้งานจะมีโอกาสสูงมากที่จะถูกใช้ต่อเป้าหมายพลเรือนและตกอยู่ในมือของผู้ไม่พึงประสงค์ได้ง่ายจากการปะทะกันหรือจากการทุจริตคอร์รัปชันที่มีอยู่อย่างแพร่หลายด้วย
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	ภายหลังการรัฐประหารในปี 2017 ทำให้มีการละเมิดสิทธิมนุษยชนโดยเจ้าหน้าที่ของกองทัพในระดับสูงมาก โดยเฉพาะในรัฐที่ห่างไกลที่สื่อมวลชนหรือระบบการสื่อสารหรือการคมนาคมไม่สะดวกหรือยังไม่ถึง โดยรายการส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับยุทโธปกรณ์ทางทหารหรือการป้องกันประเทศโดยตรง และมีการใช้ยุทโธปกรณ์เหล่านั้นต่อประชาชน

²⁰ อย่างไรก็ตาม Military Balance ของ IISS คาดการณ์ตัวเลขที่ต่างออกไป คือ ร้อยละ 2.94, 5.23 และ 3.15 ในปี 2020, 2021 และ 2022 ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความผันผวนพอสมควร

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา [4]
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่ มากน้อยแค่ไหน	การถ่ายเทอาวุธจากไทยไปยังเมียนมาจะไม่ทำให้ดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปมาก เพราะเมียนมาเองพึ่งพาตนเองด้านยุทธโประณ์ทางบกได้ระดับหนึ่ง จึงมีโอกาสน้อยที่จะสั่งซื้อ และด้านดังกล่าวมีการใช้งานอย่างปกติอยู่แล้ว นอกจากนี้ เมียนมายังมีกองทัพขนาดใหญ่และพื้นที่ปฏิบัติการที่กว้างขวางอีกด้วย
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่สมควรดำเนินการอย่างไรในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัทอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของ สทป.	จากการที่เมียนมาเองสามารถพึ่งพายุทธโประณ์ทางบกได้เองในประเทศ อีกทั้งโครงการยานเกราะเองก็เป็นเทคโนโลยี BTR ที่ได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตจนถึงการตั้งโรงงานในประเทศได้ด้วย ทำให้กล่าวได้ว่า ตลาดอาวุธทางบกมีความอึดตัวค่อนข้างมาก การจะนำบริษัทของไทยที่มีพื้นฐานของเทคโนโลยีจากสหรัฐอเมริกา (และยังขายอะไหล่ให้สหรัฐอเมริกาอยู่จนถึงปัจจุบัน) จึงเป็นการดำเนินการที่เสี่ยงเกินไปที่จะสูญเสียสหรัฐอเมริกาที่เป็นลูกค้าประจำ ทั้ง ๆ ที่ยังมีความไม่แน่นอนในการจัดหาอีก อีกทั้งปัจจุบันมีบริษัทไทย 12 แห่งถูกองค์กรสหประชาชาติรายงานว่าได้ส่งอะไหล่และเครื่องจักรบางอย่างให้กับกองทัพเมียนมาในห้วงปัจจุบันอย่างไม่ถูกต้องตามกฎหมายด้วยและเมียนมายังมีหลักฐานด้านการละเมิดสิทธิมนุษยชนรุนแรง การดำเนินการด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศกับเมียนมาจึงเป็นเรื่องที่มีความเสี่ยงมากกว่าประโยชน์ทางธุรกิจที่จะได้รับ การดำเนินธุรกิจกับเมียนมาจึงเป็นเรื่องที่ไม่สมควรดำเนินการใด ๆ ด้วย
รายชื่อประเทศเป้าหมาย	เนการาบรูไนดารุสซาลาม
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางบก ทางทะเล และทางอากาศ ค่อนข้างห่างไกลจากไทย - โอกาสถูกล้อฉลิวโดยหรือเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบก ทางทะเล และทางอากาศอยู่ในระดับต่ำมาก
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	บรูไนเป็นประเทศที่ร่ำรวย มีระบบเศรษฐกิจที่มีเสถียรภาพและมีผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศต่อหัว (GDP per capita) ที่สูง งบประมาณทางการทหารสูงถึงร้อยละ 2.5-3.0 ของ GDP โดยมีสุลต่านที่ดำรงตำแหน่งรัฐมนตรีว่าการกระทรวงกลาโหมด้วยตนเอง รัฐบาลพยายามรักษาดัชนีชี้วัดที่ให้อภัย แต่ยังคงได้รับผลกระทบจากราคาน้ำมันและภาวะเงินเฟ้ออยู่บ้าง นโยบายการพัฒนากองทัพอยู่ในแผนของ Wawasan 2035 [7] หรือ Vision 2035 และ White Paper ปี 2011 ที่ให้ลำดับความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูง สร้างขีดความสามารถทางเศรษฐกิจนอกเหนือจากเรื่องน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีต ส่วนใหญ่มากจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของบรูไนมีขนาดเล็ก ทำให้ต้องนำเข้ายุทธโประณ์จากต่างประเทศเกือบทั้งหมด โดยมาจากสหรัฐอเมริกา สิงคโปร์ ฝรั่งเศส เยอรมนี และสวีเดนเป็นหลัก อุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในของบรูไนเป็นการคงสภาพและบำรุงรักษายุทธโประณ์ที่นำเข้ามาให้ใช้งานได้ต่อเนื่อง
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	อุตสาหกรรมป้องกันประเทศและการจัดหายุทธโประณ์ถูกกำกับดูแลโดย Royal Brunei Technical Service (RBTS) ที่เป็นหน่วยงานของรัฐ แผนกที่สำคัญที่สุด คือ Vehicle Maintenance Centre ที่ทำหน้าที่ด้าน MRO การปรับปรุงยุทธโประณ์ การส่งกำลัง และการฝึกใช้งาน โดยมีบริษัทเอกชนจำนวนไม่มากเข้าร่วม ระดับความพร้อมด้านอุตสาหกรรมถือว่าอยู่ในระดับพื้นฐานและยังต้องพึ่งพิงเทคโนโลยีขั้นสูงจากต่างประเทศ
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	ไทยและบรูไนมีความสัมพันธ์อันดีต่อกันมายาวนาน ทั้งระดับราชวงศ์และระดับรัฐบาล โดยไม่ปรากฏประวัติความขัดแย้งกันในเวทีโลก

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	เนการาบูรไนดารุสซาลาม
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศไทย เน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ภัยยุทธโประณใดในการป้องปราม หรือการป้องกันประเทศ หรือการกิจความมั่นคงภายใน	ผลประโยชน์แห่งชาติของบรูไน คือ แหล่งสำรองน้ำมันและก๊าซธรรมชาติทางทะเลในเขตเศรษฐกิจจำเพาะในทะเลจีนใต้ ที่ทับซ้อนกับประเทศอื่น ๆ ในภูมิภาค การที่มีแหล่งพลังงานในทะเลทำให้กองทัพบรูไนมีความต้องการยุทธโประณด้านการปฏิบัติการยกพลขึ้นบกมาเป็นลำดับแรก ๆ โดยการปฏิบัติการทางทหารบรูไนเน้นการปฏิบัติการด้วยการนำทหารขึ้นเฮลิคอปเตอร์หรือขึ้นเรือปฏิบัติการลำนำไปทำการกิจทั้งทางบกและทางทะเล (โดยเฉพาะแท่นขุดเจาะกลางทะเล) รองลงมา คือ ยานเกราะและการซ่อมบำรุงที่ต่อเนื่อง รวมทั้งเป็นใหญ่สนามอีกด้วย นอกจากนี้ รัฐธรรมนูญว่าการกระทรวงกลาโหมยังแสดงความต้องการว่าต้องการอากาศยานไร้คนขับ เพื่อภารกิจการข่าว การลาดตระเวน และการตรวจการณ์ (ISR) อีกด้วย
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมายหรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	ทหารในกองทัพบรูไนมีความเป็นมืออาชีพและได้รับการฝึกอย่างดีจากออสเตรเลีย อังกฤษ และสิงคโปร์ สถานการณ์บ้านเมืองอยู่ในภาวะปกติและสงบสุข ภัยการก่อการร้ายข้ามชาติ หรือการก่อความไม่สงบอยู่ในระดับต่ำ การเมืองมีเสถียรภาพ ปัจจัยเหล่านี้ทำให้กองทัพมีความเป็นมืออาชีพและครอบครองยุทธโประณภายในบริบทปกติได้อย่างดี
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	ไม่ปรากฏหลักฐานหรือข่าวว่าทหารในกองทัพทำการละเมิดสิทธิมนุษยชนทั้งในประเทศและการส่งทหารไปภารกิจที่องค์การสหประชาชาติก็สามารถปฏิบัติงานอย่างปกติด้วย
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่ มากน้อยแค่ไหน	กองทัพบรูไนเป็นกองทัพขนาดเล็ก ดังนั้น จะส่งผลกระทบต่อดุลอำนาจทางทหารในระดับน้อยมาก เมื่อเทียบกับเพื่อนบ้านที่มีกองทัพใหญ่กว่า
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่สมควรดำเนินการอย่างไรในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัทอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของ สทป.	บริษัทไทยมีโอกาสเจาะตลาดบรูไนได้สูงมาก เนื่องจากปัจจัยความสัมพันธ์ระหว่างประเทศอยู่ในระดับที่ดี ไม่มีข้อขัดแย้ง โดยยุทธโประณที่ควรนำเสนอขึ้นต้องตรงกับความต้องการของกองทัพบรูไน นั่นคือ ยุทธโประณที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติการสะเทินน้ำสะเทินบก หรือยานเกราะล้อสำหรับภารกิจนาวิกโยธินของ สทป. ต่างก็เป็นตัวเลือกที่ดีที่บรูไนจะพิจารณา นอกจากนี้ยังมีความต้องการในด้านอากาศยานไร้คนขับอีกด้วย ด้วยพื้นที่ประเทศขนาดเล็ก อากาศยานไร้คนขับจึงอยู่ในพิสัยที่จำกัดและขนาดปานกลางเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น นอกเหนือไปจากนั้น อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของบรูไนยังเน้นด้านการ MRO ยุทธโประณที่มีอยู่ให้ใช้งานได้นาน ดังนั้น บริษัทไทยที่มีความโดดเด่นด้าน MRO ยานพาหนะทางบก รวมถึงการส่งอะไหล่ให้ ก็มีศักยภาพในการสร้างความร่วมมือและการส่งออกอะไหล่หรือให้บริการเพิ่มเติมเช่นกัน
รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐสิงคโปร์
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางอากาศ ใกล้ชิดมาก - โอกาสรุกรานโดยเรือหรือเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบก ทางทะเล และทางอากาศอยู่ในระดับต่ำมาก
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	แนวโน้มงบประมาณทหารอยู่ที่ร้อยละ 3.0-3.5 ของ GDP ซึ่งถือว่าสูงที่สุดของอาเซียน โดยงบประมาณส่วนใหญ่จะลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนาไปกับ DSTA ที่เป็นหน่วยงานวิจัยและพัฒนาทางทหาร และให้บริษัทลูกของ ST Engineering พัฒนายุทธโประณใหม่ ๆ ขึ้นมา และจัดหายุทธโประณที่มีเทคโนโลยีขั้นสูงจากสหรัฐอเมริกาและยุโรปหรือออสเตรเลียเป็นหลัก
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีตส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	สิงคโปร์นำเข้ายุทธโประณกว่าร้อยละ 60 จากสหรัฐอเมริกาเป็นหลัก ตามมาด้วยฝรั่งเศส เยอรมนี อิสราเอล โดยไม่เคยปรากฏการนำเข้ายุทธโประณจากรัสเซียหรือจีนในโครงการขนาดใหญ่หรือเทคโนโลยีขั้นสูงมาก่อน

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐสิงคโปร์
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	ระดับความพร้อมของสิงคโปร์อยู่ในระดับสูงสุดในอาเซียน เพราะมีรัฐวิสาหกิจด้านการป้องกันประเทศโดยเฉพาะ ไม่ว่าจะเป็น ST Kinetics, ST Marine, ST Aerospace หรือ ST Electronics รัฐวิสาหกิจเหล่านี้จะขายยุทธโปกรณ์ระดับกลางให้กับกองทัพ ส่วนเทคโนโลยีขั้นสูงนั้น สิงคโปร์จะไปจัดหาจากสหรัฐอเมริกาหรือทวีปยุโรปมาใช้งานหรือติดตั้งแทน ทำให้การเจาะตลาดเทคโนโลยีขั้นสูงและชั้นกลางทำได้ยากลำบากมากกว่าปกติ
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	ความสัมพันธ์ระหว่างไทยและสิงคโปร์มีความราบรื่นดี มีความสัมพันธ์ทางการค้าที่ดี ไทยยังคงจัดหาเรือรบจากสิงคโปร์เข้าประจำการอีกด้วย (เรือหลวงอ่างทอง) ส่วนสิงคโปร์ได้ใช้พื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี และเวทีการซ้อมรบ Cobra-Gold ในไทยอยู่เป็นประจำ ทำให้ความสัมพันธ์ทางทหารราบรื่น
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้น เน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้ยุทธโปกรณ์ใดในการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน	สถานการณ์ความมั่นคงในภูมิภาคที่มีต่อสิงคโปร์ถือว่ามีความเสี่ยงภาพที่ดี เพราะสิงคโปร์มีกองทัพที่เข้มแข็งและนโยบายการป้องกันประเทศที่ครบวงจรในแบบของการป้องกันประเทศแบบเบ็ดเสร็จ (Total Defence) ทำให้สร้างอำนาจการป้องกันปรามได้ดี โดยเฉพาะกองทัพอากาศที่มียุทธโปกรณ์อันดับหนึ่งของอาเซียน การนำเสนอผลิตภัณฑ์ของไทย โดยเฉพาะยานเกราะล้อยางหรือเรือขนาดเล็กในตลาดสิงคโปร์ทำได้ค่อนข้างยาก เพราะสิงคโปร์มี ST Kinetics ที่มียานเกราะล้อยางและ ST Marine ที่ทำการต่อเรืออยู่แล้ว ประกอบกับสิงคโปร์เน้นการจัดหาเทคโนโลยีในประเทศมาก่อนด้วย
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมายหรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	หากมีการยุทธโปกรณ์ใดส่งออกไปยังสิงคโปร์ได้ถือว่าปลอดภัยมาก เพราะระบบราชการที่มีประสิทธิภาพ การคอร์รัปชันที่ต่ำ และกองทัพที่เป็นมืออาชีพสูงมาก
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	กองทัพสิงคโปร์ไม่ปรากฏประวัติการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศ การที่หน่วยงานของรัฐจะส่งผลกระทบต่อประชาชนจะเป็นการควบคุมสื่อมวลชน และการควบคุมฝูงชนจากกฎหมายที่มีความเข้มงวดมากกว่า โดยหน่วยงานตำรวจจะถูกนำมาใช้งาน ไม่ใช่ทหาร
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสียภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่มากนักหรือไม่	การส่งออกอาวุธไปยังสิงคโปร์จากไทย ส่งผลน้อยต่อเสถียรภาพในภูมิภาค เพราะสิงคโปร์เองมีแนวทางที่ชัดเจนในการพัฒนากองทัพว่าเน้นการจัดหาจากในประเทศก่อน และภัยคุกคามจากภายนอกประเทศยังไม่มีมีความชัดเจนเท่าใดนัก
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่ สมควรดำเนินการอย่างไรในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัทอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของ สทป.	การที่สิงคโปร์ใช้รัฐวิสาหกิจในการผลิตสินค้าและให้บริการด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศแก่กองทัพเป็นอันดับแรก ทำให้โอกาสในการส่งออกผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (End-products) แก่กองทัพสิงคโปร์มีความเป็นไปได้้น้อยมาก ทั้งนี้ ช่องทางการตลาดของไทยที่เหลือน่าจะเป็นการสำรวจตลาดที่ขายวัสดุ (Raw materials) เพื่อเป็นห่วงโซ่อุปทาน (Supply chain) ป้อนให้กับตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในแก่สิงคโปร์มากกว่า เพราะสิงคโปร์ไม่มี raw material ภายในประเทศเอง โดยสินค้า raw materials เดิมที่ป้อนเข้าสู่สิงคโปร์ส่วนใหญ่มาจากประเทศไต้หวัน มาเลเซีย จีน หรือยุโรปตะวันออก โดยต้องเสนอราคาและคุณภาพที่ดีกว่าประเทศที่กล่าวมาแล้ว เช่น เหล็กกล้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น นอกจากนี้ การเป็นประเทศที่เคยซ้อมรบในไทย ทำให้สามารถขายยุทธโปกรณ์ตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562 ได้อีกด้วย

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สหพันธรัฐมาเลเซีย
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางบก ทางเรือ และทางอากาศ ใกล้ชิดมาก - โอกาสรุกล้ำอธิปไตยหรือเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบกอยู่ในระดับต่ำ แต่ทางทะเลยังมีความเป็นไปได้อยู่บ้าง
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	งบประมาณทางทหาร โดยเฉพาะด้านการจัดหายุทโธปกรณ์ในปัจจุบันมีความผันผวนพอสมควร แต่มีแนวโน้มลดลงจากปัญหาการขาดแคลนงบประมาณและเพิ่งพื้นที่ตัวจากวิกฤตโควิด-19 โดยงบประมาณทางทหารอยู่ที่ประมาณร้อยละ 1 ของ GDP ถือว่าอยู่ในระดับปานกลางในอาเซียน
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีตส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	มาเลเซียมีประวัติการนำเข้ายุทโธปกรณ์ที่มาจากทั้งฝั่งค่ายตะวันตกและฝั่งตะวันออก ทั้งไปแลนด์ อังกฤษ รัสเซีย จีน และเคยนำเข้ายานเกราะล้ออย่าง First Win จาก บริษัท ซัยเสรี เมืททอลแอนด์รับเบอร์ จำกัดของไทยอีกด้วย
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	ระดับความพร้อมของมาเลเซียอยู่ระดับกลางของอาเซียน แม้ว่ามาเลเซียจะมียุทธศาสตร์ในการอุดหนุนอุตสาหกรรมภายในก่อน การส่งออกของบริษัท ซัยเสรีเมืททอลแอนด์รับเบอร์ จำกัด ก็ยังเป็นไปได้อยู่ แม้ว่าจะถูกเรียกนโยบายชดเชย (Offset policy) ในอัตราที่สูงมากก็ตาม
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	โดยภาพรวมความสัมพันธ์ทางการระหว่างไทยและมาเลเซียมีความราบรื่น อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความตึงเครียดด้านพรมแดนทางทะเลอยู่เป็นครั้งคราว แต่ด้วยเป็นพื้นที่ทางทะเลจึงไม่ปรากฏเป็นข่าวมากนัก และกลไกการเจรจาจะร่วมกันทำให้ผ่านไปด้วยดี
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้น เน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้ยุทธโธปกรณ์ใดในการป้องกันประเทศ หรือการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน	มาเลเซียมีการกิจการทางทหารที่สำคัญต่อประเทศและภูมิภาค ทั้งการเป็นส่วนหนึ่งของช่องแคบมะละกา การรุกล้ำอธิปไตยในพื้นที่เขตเศรษฐกิจจำเพาะจากจีน และภัยการก่อการร้ายข้ามชาติ จากทิศตะวันออกของประเทศ สามารถคาดการณ์ได้ว่า ยานเกราะล้ออย่างและอุตสาหกรรมต่อเรือยังมีความเป็นไปได้ในการทำตลาดอยู่ และภารกิจทางความมั่นคงทางบกที่เน้นไปยังภาคตะวันออกของประเทศมากกว่าทางเหนือ หากขยายยานเกราะล้ออย่างให้มาเลเซียจะสร้างความกังวลต่อชายแดนไทยในระดับต่ำอยู่
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมายหรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	ถือว่าปลอดภัยมาก เพราะการปฏิบัติงานของกองทัพมาเลเซียอยู่ภายใต้รัฐบาลพลเรือนตามปกติ นอกจากนี้ ภัยคุกคามจากการก่อการร้ายข้ามชาติของกลุ่ม ISIS ได้ลดบทบาทลงไปในภูมิภาคด้วย
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	มาเลเซียเป็นประเทศที่มีผู้คน วัฒนธรรม และภาษาหลากหลายที่อยู่ด้วยกันอย่างสันติ เป็นส่วนมาก กองทัพมีความเป็นมืออาชีพในการปฏิบัติงาน ประเด็นอ่อนไหวของมาเลเซียจะเป็นด้านศาสนาและเชื้อชาติ แต่กองทัพไม่ได้มีบทบาทในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในส่วนนี้ งานด้านนี้จะอยู่ในความรับผิดชอบของตำรวจศาลามากกว่า โดยรายการส่วนใหญ่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับยุทธโธปกรณ์ทางทหารหรือการป้องกันประเทศ และไม่ได้มีการใช้ยุทธโธปกรณ์เหล่านั้นต่อประชาชน
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่ มากน้อยแค่ไหน	ที่ท่าของมาเลเซียมีความชัดเจนในการพยายามไล่ตามระดับการพัฒนาของคู่แข่งในภูมิภาค ทั้งสิงคโปร์และอินโดนีเซีย ที่พยายามพัฒนากองทัพอย่างเข้มแข็งเช่นกัน การถ่ายเทอาวุธของไทยไปยังมาเลเซีย โดยเฉพาะยานเกราะล้ออย่างและกระสุนหรืออมัลณ์ อาจะทำให้ดุลอำนาจทางทหาร (Military balance) กระทบไปบ้าง แต่มีโอกาสนำมาใช้ในความขัดแย้งจริงในระดับที่ต่ำ

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สหพันธรัฐมาเลเซีย
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่สมควรดำเนินการอย่างไร ในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัท อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของ สทป.	ยุทธโธปกรณ์ที่น่าจะมีลำดับความเร่งด่วนและความสำคัญ (Priority) อันดับต้น ๆ คือ การรักษาฐานลูกค้าเดิมจากการขายยานเกราะล้อยางของบริษัท ซัยเสรีเมห์ทอลแอนด์รับเบอร์ จำกัด ให้กับบริษัท Deftech ด้วยการเสนอบริการปรับปรุงรถยานเกราะให้ทันสมัย มีความต่อเนื่องด้านการบริการ หรือเสนอบริการหลังการขายให้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ส่วนอีกโครงการหนึ่งของบริษัทที่ร่วมทุนของ สทป. ที่สามารถนำเสนอได้ คือ โครงการบินและอาวุธประจำกาย ที่ผลิตในไทย ที่สามารถเข้าสู่ตลาดของมาเลเซียได้ รวมทั้งแนะนำบริษัทด้านอู่ต่อเรือ เพื่อขยายตลาด เพราะเรือขนาดเล็กและขนาดกลางยังเป็นเรือที่มาเลเซียมีความต้องการใช้ในกองทัพเรือและหน่วยงานบังคับใช้กฎหมายทางทะเลของมาเลเซีย (Malaysia Maritime Enforcement Agency) ด้วย หน่วยงานนี้ถือว่ามีความสำคัญต่อมาเลเซียและภูมิภาคอาเซียนมาก เพราะดูแลเส้นเลือดหลักทางพาณิชย์นาวีของภูมิภาคนี้ นอกจากนี้ การเป็นประเทศที่เคยซ้อมรบในไทย ทำให้สามารถขายยุทธโธปกรณ์ตามพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562 ได้อีกด้วย

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางเรือและทางอากาศ ใกล้ชิด - โอกาสเกิดความขัดแย้งกับไทยทางบกและทางอากาศอยู่ในระดับต่ำมาก ส่วนทางทะเลอาจมีผลกระทบอยู่บ้างจากการรุกล้ำช่องเรือประมงจากเวียดนาม
แนวโน้มงบประมาณทางทหาร เป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	งบประมาณทางทหารขยายตัวขึ้นตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและภัยคุกคามความมั่นคงจากจีนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 2.3-2.7 ของ GDP (ค่าโดยประมาณ IISS แจ้งว่าจะอยู่ที่ร้อยละ 1.5-1.6) ยุทธโธปกรณ์เดิมของเวียดนามพึ่งพิงรัสเซียเป็นส่วนมาก ขณะนี้รัสเซียอยู่ในช่วงความขัดแย้งกับยูเครนทำให้เกิดช่องว่างที่ตลาดของไทยจะเข้าไปเติมเต็มได้อย่างดียิ่ง
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีตส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	ยุทธโธปกรณ์ทั้งทางบก เรือ อากาศ จะนำเข้าจากรัสเซียเป็นหลัก โดยมีอิสราเอล ฝรั่งเศส และจีนอยู่บ้างในกองทัพ
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	เวียดนามพึ่งพาตนเองได้ในส่วนของยุทธโธปกรณ์พื้นฐานที่ผลิตโดยกรมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ภายใต้กระทรวงกลาโหมฝ่ายการเมือง หน่วยงานนี้มีโรงงานทั้งหมด 60 โรงงาน เน้นไปยังกระสุน อมmunition ปืนเล็ก ในส่วนนี้สามารถพึ่งพาตนเองได้ ส่วนยานเกราะส่วนใหญ่ที่จัดหาหรือรับมอบมาจากรัสเซียอยู่ในสภาพใช้ราชการได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ เพราะรอการซ่อมบำรุงอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อไม่นานมานี้มีรายงานว่าเวียดนามเริ่มผลิตอากาศยานไร้คนขับ จรวด รวมทั้งต่อเรือตรวจการณ์อีกด้วย
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	ในอดีตสมัยสงครามเย็นถือว่าเวียดนามเป็นภัยคุกคามหลักของไทย ปัจจุบันความสัมพันธ์อยู่ในระดับที่ปกติ อย่างไรก็ตาม พื้นที่ทางทะเลยังมีส่วนที่ทับซ้อนกันอยู่บ้าง แต่ไม่ได้ถือเป็นการปะทะกันทางอาวุธหรือกองกำลังทหาร
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้น เน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้ยุทธโธปกรณ์ใดในการป้องกันประเทศ หรือการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน	ภัยคุกคามทางทหารหลักที่เวียดนามมีความกังวล คือ การเผยแพร่อิทธิพลของจีน แม้ว่าสมุดปกขาวไม่ได้กล่าวอย่างชัดเจน แต่สามารถเข้าใจได้ว่า เวียดนามถ้อยยุทธศาสตร์ด้านการป้องกันประเทศจากเรื่องดังกล่าวเป็นหลัก เวียดนามมีความล่อแหลมจากทางทิศเหนือที่มีพรมแดนทางบกและทางอากาศติดกับจีนตอนใต้ และทางทะเล ทั้งจากทะเลเวียดนามและทางฝั่งกัมพูชา ซึ่งมีความร่วมมือทางทหารที่แข่งขันกับจีน จึงสามารถกล่าวได้ว่าความต้องการทางยุทธการของเวียดนามมีทั้งทางยุทธโธปกรณ์ทางบก ทางเรือ และทางอากาศ และประวัติศาสตร์ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า จีนมีขีดความสามารถที่จะดำเนินการเช่นนั้นได้หากจำเป็น

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมายหรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	ทหารในกองทัพเวียดนามได้รับการยอมรับจากประชาชนเป็นการทั่วไป และเวียดนามมีโอกาที่จะถูกรุกรานจากกลุ่มก่อการร้ายเช่น ISIS ในระดับต่ำ ทำให้การถ่ายทอดอาวุธไปยังกองทัพเวียดนามมีความเสี่ยงต่ำที่จะตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	ปัจจุบันไม่ค่อยปรากฏข่าวด้านการละเมิดสิทธิมนุษยชนแก่ประชาชนโดยกองทัพเวียดนามที่ชัดเจน
การส่งออกหรือถ่ายทอดอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่มากนักแน่ไหน	การถ่ายทอดอาวุธ หรือการส่งออก หรือกิจกรรมทางอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยที่จะมีต่อเวียดนามอาจส่งผลกระทบต่อดุลอำนาจอย่างมีนัยสำคัญ น่าจะขึ้นอยู่กับการเสนอโครงการปรับปรุง ซ่อมบำรุง หรือยกระดับ หรือการถอดปน (Cannibalization) ยานเกราะทางบก หรือเรือที่เดิมเป็นของจีนหรือรัสเซีย ที่ชำรุดรอการซ่อมบำรุง ให้น่ากลับมาใช้ได้ใหม่ สิ่งนี้จะทำให้ยุทธโธปกรณ์ประเภทยานรบทั้งทางบกและทางเรือของเวียดนามยกระดับขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่สมควรดำเนินการอย่างไรในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัทอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของสหป.	สามารถดำเนินการได้หลากหลาย เนื่องจากเวียดนามมีภัยคุกคามที่ชัดเจน มีงบประมาณที่มีแนวโน้มที่สูงขึ้น และไทยมีรายการยุทธโธปกรณ์ที่เวียดนามขาดแคลน โดยเฉพาะยานเกราะล้อยางหรือเรือขนาดเล็ก เรือเนกประสงค์อื่น ๆ หรือจรวดขนาด 122 มม. ของ สหป. นับว่าสอดคล้องกับความต้องการทางยุทธการของเวียดนามอย่างชัดเจน โดยที่พลียของจรวดเหล่านี้ยังไม่ถึงชายแดนไทยแน่นอนด้วย การนำเสนอยุทธโธปกรณ์แก่กองทัพ หรือกระทรวงกลาโหมของเวียดนามสามารถดำเนินการด้วยการเสนอได้ทั้งการขายผลิตภัณฑ์ใหม่และการเสนอเข้าปรับปรุง ซ่อมบำรุง หรือยกระดับยานเกราะทางบก หรือเรือที่ชำรุดรอการซ่อมบำรุงจำนวนมาก เช่น อาจจะให้บริษัทที่เชี่ยวชาญด้านการ MRO เข้าไปสำรวจตลาด โดยเฉพาะยุทธโธปกรณ์เก่าจากสหภาพโซเวียต ก็จะสามารถเพิ่มโอกาสทางการตลาดให้กับบริษัทของไทยได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม อาจจะต้องระมัดระวังการแบ่งปันเทคโนโลยีการต่อเรือด้วย เพราะอาจถูกนำมาใช้ด้านความมั่นคงกับไทยได้

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐฟิลิปปินส์
คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (ทางบก ทางเรือ ทางอากาศ)	- ทางบก ทางเรือ และทางอากาศ ไกลมาก - โอกาสการรุกรานโดยอ้อมอยู่ในระดับต่ำมาก ในประวัติศาสตร์ไม่เคยปรากฏการใช้กำลังทางทหารระหว่างกันมาก่อน
แนวโน้มงบประมาณทางทหารเป็นอย่างไร มากขึ้นหรือน้อยลง (ข้อมูลจาก Jane's หรือ World Bank)	แนวโน้มการใช้งบประมาณในการปรับปรุงขีดความสามารถกองทัพถูกกำหนดไว้ในกฎหมาย Revised AFP Modernization Act ที่มี 3 เฟส ที่ทำให้คาดการณ์ความต้องการทางยุทธการของกองทัพฟิลิปปินส์ได้ในระยะยาว ทั้งทางบก ทางเรือ และทางอากาศ ทั้งนี้ งบประมาณทางทหารอยู่ที่ร้อยละ 1.3 ของ GDP ถือว่าอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ
การนำเข้า/ส่งออกอาวุธในอดีตส่วนใหญ่มาจากประเทศใด (ข้อมูลจาก Jane's)	ส่วนใหญ่ได้รับการสนับสนุนจากสหรัฐอเมริกาเป็นหลัก และช่วงหลังมานี้จัดหามาจากอินโดนีเซีย เกาหลีใต้ และอิสราเอลอย่างต่อเนื่อง
ระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ข้อมูลจาก Jane's)	รัฐบาลฟิลิปปินส์มีโรงงานอาวุธและกระสุน รวมทั้งอู่ซ่อมรถถังพื้นฐาน เช่น Government Arsenal ²¹ อุตสาหกรรมทางเรือมีอยู่ต่อเรือภายในประเทศ โดยรวมแล้วมีศักยภาพในการพึ่งพาตนเองระดับปานกลาง แต่ยังคงพึ่งพาการต่อเรือรบและอุปกรณ์เทคโนโลยีขั้นสูงจากต่างประเทศเป็นหลัก การต่อเรือปัจจุบันพึ่งพิงบริษัทอุตสาหกรรมต่อเรือของเกาหลีใต้และอินโดนีเซียเป็นหลัก
ความสัมพันธ์ระหว่างไทยกับประเทศนั้นอยู่ในระดับใด (ในภาพรวม)	ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศอยู่ในระดับดีมีการแลกเปลี่ยนนายทหารในหลักสูตรต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง

²¹ เป็นบริษัทที่มีรัฐบาลเป็นเจ้าของที่มีขนาดใหญ่ที่สุด บริษัทนี้ก่อตั้งในปี ค.ศ. 1957 เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ด้านการพึ่งพาตนเองด้านอาวุธประจำกายและอาวุธประจำหน่วยระดับพื้นฐาน โดย GA เน้นการผลิตเพื่อจำหน่ายแก่ภาครัฐภายในประเทศ (หน่วยงานทางทหารและหน่วยงานความมั่นคงอื่น ๆ เช่น ตำรวจ) โดยสามารถมีกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่หลากหลาย ทั้งการจัดตั้งการร่วมทุน การผลิตร่วมกับหน่วยงานทั้งในและต่างประเทศ รวมทั้งสามารถส่งออกได้ด้วย บริษัท GA มีโรงงานหลักครบวงจรในตัว 4 โรงงาน คือ โรงงานปลอกและกระสุน โรงงานไพรเมอร์ โรงงานดินขับ และโรงงานประกอบรวมกระสุนและห้องทดสอบทดลองอื่น ๆ ด้วย

รายชื่อประเทศเป้าหมาย	สาธารณรัฐฟิลิปปินส์
ผลประโยชน์และความมั่นคงแห่งชาติของประเทศนั้น เน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ใช้ยุทธโศปกรณ์ใดในการป้องกัน หรือการป้องกันประเทศ หรือภารกิจความมั่นคงภายใน	ภัยคุกคามระหว่างประเทศมาจากกรณีความขัดแย้งและข้อพิพาททางทะเลในพื้นที่ทะเลจีนใต้กับจีนเป็นหลัก ที่ต้องใช้กองกำลังทางเรือและทางอากาศไว้ป้องกันประเทศ ส่วนภัยคุกคามในประเทศจะเป็นกลุ่มก่อการร้ายระหว่างประเทศและผู้ก่อความไม่สงบ กรณีล่าสุดมีเหตุการณ์ที่กลุ่ม ISIS ยึดจังหวัด Marawi ที่เป็นเหตุทำให้รัฐบาลพยายามผลักดันให้จัดตั้งหน่วยบัญชาการนาวิกโยธินเป็นหน่วยแยกอิสระ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาการปฏิบัติการสะเทินน้ำสะเทินบก
ประเมินโอกาสที่เทคโนโลยีทางทหารจะถูกใช้ในทางไม่ชอบด้วยกฎหมายหรือตกอยู่ในผู้ครอบครองที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างไร	กองทัพยังมีระดับของการคอร์รัปชันที่พบเห็นได้ทั่วไป และพื้นที่ของประเทศยังเป็นเกาะแก่งที่เข้าถึงได้ยาก ทำให้มีระดับความเสี่ยงปานกลางที่อาวุธยุทธโศปกรณ์จะตกอยู่ในกลุ่มผู้ใช้งานที่ไม่พึงประสงค์
กองทัพมีส่วนในการละเมิดสิทธิมนุษยชนในประเทศอยู่ในระดับใด	เจ้าหน้าที่ของกองทัพมีระดับความเสี่ยงในการละเมิดสิทธิมนุษยชน โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ความขัดแย้งกับกลุ่มผู้ก่อความไม่สงบภายในประเทศ โดยรายการส่วนใหญ่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับยุทธโศปกรณ์ทางทหารหรือการป้องกันประเทศ และไม่ได้มีการใช้ยุทธโศปกรณ์เหล่านั้นต่อประชาชน
การส่งออกหรือถ่ายเทอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคและดุลอำนาจทางทหารเปลี่ยนไปหรือไม่ มากน้อยแค่ไหน	ไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก เพราะยุทธโศปกรณ์ที่ไทยน่าจะนำเข้าเป็นยุทธโศปกรณ์ทางบกเป็นส่วนใหญ่ แต่ลักษณะทางภูมิรัฐศาสตร์ของฟิลิปปินส์ไม่มีพื้นที่ติดต่อกับประเทศอื่น
ภาพรวมเป็นอย่างไร เหมาะสมหรือไม่ สมควรดำเนินการอย่างไร ในด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ทั้งผลิตภัณฑ์ของบริษัท อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยและของ สทป.	สมควรสนับสนุนให้บริษัทของ สทป. เข้าถึงตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของฟิลิปปินส์ได้มากกว่านี้ โดยเฉพาะกิจการของบริษัทร่วมทุนที่สามารถช่วยติดตั้งเกราะให้กับยานยนต์ทางบกหรือโครงการปืน นอกจากนี้ ผลผลิตภัณฑ์ของ สทป. เช่น หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด หรือรถสะพานเครื่องหนูน้มน ก็สามารถนำเสนอได้เช่นกัน ในส่วนของอุตสาหกรรมทางเรือ นั้น เรือขนาดตั้งแต่คอร์เวตขึ้นไปฟิลิปปินส์มีคู่ค้าอยู่แล้ว คือ เกาหลีใต้และอินโดนีเซีย บริษัทไทยสมควรได้รับการประชาสัมพันธ์เพิ่มเติมให้กับกองทัพเรือฟิลิปปินส์ เพราะมีน่านน้ำที่กว้างขวาง

ตารางข้างต้น เป็นรายการประเทศเป้าหมายที่ถือว่ามีความสำคัญภาพและความเป็นไปได้ที่จะส่งออกผลิตภัณฑ์ความมั่นคง เพราะมีการสถาปนาความสัมพันธ์ทางการทูตที่ชัดเจนและยาวนาน มีความไว้วางใจกัน มีความสัมพันธ์ระหว่างประเทศในระดับที่ราบรื่น สามารถเจรจากันได้ มีการค้าระหว่างกันในระดับปกติ มีสถานเอกอัครราชทูตและสถานทูตของทั้งสองฝ่าย มีขนาดของกองทัพขนาดปานกลางหรือขนาดใหญ่ อยู่ไม่ไกลจากไทยมากนัก (การขนส่งมีมูลค่าไม่สูง) รวมทั้งมีข้อมูลที่ครบถ้วนในการพิจารณาส่วนประเทศอื่นๆ นอกเหนือจากตารางนี้ ไม่ได้หมายความว่าไม่ควรดำเนินการเชิงพาณิชย์ด้วย โดยเฉพาะประเทศแถบตะวันออกกลางและแอฟริกา ในส่วนของตะวันออกกลางนั้น ส่วนใหญ่มีระบอบการปกครองแบบสมบูรณาญาสิทธิราชย์ที่มี

การตั้งมกุฎราชกุมาร (Crown Prince) หรือผู้ใกล้ชิดพระมหากษัตริย์เป็นรัฐมนตรีว่าการกระทรวงกลาโหม ที่มีอำนาจเต็มในการตัดสินใจการจัดซื้อยุทธโศปกรณ์ การติดต่อค้าขายยุทธโศปกรณ์กับประเทศเหล่านี้ใช้ช่องทางการติดต่อระหว่างบริษัทกับประเทศเป้าหมายเป็นหลัก ทั้งการผ่านตัวกลางประสานงาน การแสดงสินค้า ผ่านการจัดนิทรรศการ (Exhibition) ในต่างประเทศ ไม่ได้ผ่านช่องทางของรัฐบาลไทย ส่วนประเทศในแถบแอฟริกันนั้น ผู้จัดทำไม่มีข้อมูลใด ๆ ที่จะสามารถเป็นตัวชี้วัดโอกาสหรือลำดับความเร่งด่วนใด ๆ ได้แบบเดียวกับประเทศที่กล่าวมาแล้ว ทำให้การดำเนินการศึกษาโอกาสในการส่งออกยุทธโศปกรณ์ในประเทศแถบตะวันออกกลางและแอฟริกา จึงเป็นเรื่องที่วิเคราะห์ได้ยากลำบาก ในทางวิชาการ นั้นเป็นเหตุที่ทำให้ประเทศดังกล่าวถูกตัดออกไปจากการวิเคราะห์ครั้งนี้

ส่วนประเทศในแถบโลกที่ 1 ที่ตัดออกไปด้วยนั้น เนื่องจากเป็นประเทศที่มีอุตสาหกรรมภายในประเทศที่เข้มแข็ง เช่น สหรัฐอเมริกา ยุโรปตะวันตก ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น หรือแคนาดา ประเทศเหล่านี้มีนโยบายปกป้องทางการค้า (Trade protectionism) กีดกันการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศ หากอุตสาหกรรมป้องกันประเทศภายในประเทศเหล่านั้นสามารถจัดหาได้ เช่น กฎหมาย Buy America หรือ American First ที่ถือเป็น Industrial Policy ที่มีบังคับในสหรัฐอเมริกาให้ต้องทำการจัดหายุโรปกรณจากอุตสาหกรรมในประเทศก่อน ส่วนในทวีปยุโรปจะมี The Law of Collaborative Defence Procurement ที่กำหนดให้ประเทศต่าง ๆ จัดหาสินค้าและบริการยุโรปกรณแบบรวมการในยุโรปเพื่อลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพ และเพิ่มความสามารถในการปฏิบัติงานร่วมกันระหว่างกองทัพประเทศต่าง ๆ ให้ใช้ยุโรปกรณที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกัน หรือประเทศอย่างเช่น อินเดีย ก็จะมี Made in India หรือเกาหลีใต้มี Buy Korean Defense ที่บังคับให้เกิดการจัดหาในประเทศเป็นลำดับความเร่งด่วนอย่างแรก หากอุตสาหกรรมในประเทศไม่สามารถตอบสนองได้ จึงดำเนินการให้จัดหาจากต่างประเทศ เป็นต้น การเกิดขึ้นของนโยบายการกีดกันดังกล่าว ทำให้การส่งออกในฐานะผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Finished products) เป็นไปได้ยากมาก เพราะระบบเศรษฐกิจภายในมีภาคอุตสาหกรรมที่ตอบสนองได้อยู่แล้ว หากอุตสาหกรรมของไทยมีความต้องการในการส่งออก อาจจะต้องอาศัยการส่งออกชิ้นส่วนเฉพาะ อะไหล่ หรือวัสดุ (Raw Materials) แทน ซึ่งอาจจะเพิ่มโอกาสในการส่งออกได้ และวิธีการนี้ เป็นวิธีการที่บริษัท ซีเอสเอ็มเทคอลแอนด์รับเบอร์ จำกัด ดำเนินการอยู่ กล่าวคือ หาก Finished Products ของซีเอสเอ็ม คือ รถหุ้มเกราะ First-win อาจกล่าวได้ว่า ชิ้นส่วนเฉพาะ อะไหล่ของบริษัท ซีเอสเอ็ม คือ ล้อกดสายพาน ยาง Run-flat

ดินตะขารถถังหลักที่สามารถส่งออกได้ในฐานะชิ้นส่วน (Parts) หรือ Raw materials หรือการให้บริการอัปเกรดที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

4. ตารางสรุปผลิตภัณฑ์ความมั่นคงและการจัดลำดับความเร่งด่วนที่ควรนำเสนอต่อประเทศเป้าหมาย

สามารถสรุปลำดับความเร่งด่วนและความสำคัญ (Priority) ในการตลาดยังประเทศเป้าหมาย และคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อโอกาสในการทำการตลาดได้ว่า

4.1 ประเทศฟิลิปปินส์เป็นประเทศที่มีลำดับความเร่งด่วนสูงที่สุดในการทำการตลาด เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ในการพิจารณาความพร้อมและความเหมาะสมสูงที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสัมพันธ์ระหว่างประเทศที่ราบรื่น และแนวทางการพัฒนากองทัพที่เน้นการนำเข้ายุโรปกรณจากต่างประเทศเป็นหลัก และรายการที่ฟิลิปปินส์มีความต้องการนั้นสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ที่ไทยมีจุดเด่นด้านขีดความสามารถและห่วงโซ่อุปทานอีกด้วย (ด้านผลิตภัณฑ์และบริการด้านยานยนต์ทางทหารและเรือผิวน้ำ)

4.2 ส่วนประเทศที่มีลำดับความเร่งด่วนลดหลั่นลงมา เช่น มาเลเซีย บรูไน เวียดนาม ลาว มีศักยภาพในการส่งออกเช่นกัน โดยปัจจัยที่ยังมีความพร้อมปานกลางหรือน้อย (สีแดงหรือสีเหลือง) ก็เป็นปัจจัยที่ควรได้รับการส่งเสริมเช่นกัน เพื่อโอกาสทางความร่วมมือและการขายยุโรปกรณที่อาจจะมากขึ้นในอนาคต

4.3 ส่วนประเทศกัมพูชาหรือเมียนมาเป็นประเทศที่สมควรระงับการให้ความช่วยเหลือด้านอุตสาหกรรมป้องกันประเทศหรือการส่งออกยุโรปกรณ เพราะมีปัจจัยเสี่ยงทางความมั่นคงและความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ อันมีผลเสียมากกว่าผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจที่ได้รับ หากปัจจัยภูมิรัฐศาสตร์ระหว่างประเทศที่เข้มข้นยังเป็นดังเช่นปี 2023 ที่ทำการ

ศึกษาวิจัยนี้ หรือสถานการณ์เลวร้ายลงมากกว่านี้
ไทยควรสงวนท่าทีในการดำเนินการทางการค้าและ

การสร้างความร่วมมือทางด้านยุทธโปกรณ์และ
อุตสาหกรรมความมั่นคงกับประเทศเหล่านี้ไปก่อน

ปัจจัยทางยุทธศาสตร์ 9 ข้อ ประเมินพร้อมทั้งโอกาสและความพร้อมเป้าหมาย 9 ประเทศ	อันดับ 1 พิธีป็นัส	อันดับ 2 มาเลเซีย	อันดับ 3 บรูไน	อันดับ 4 เวียดนาม	อันดับ 5 ลาว	อันดับ 6 สิงคโปร์	อันดับ 7 อินโดนีเซีย	อันดับ 8 กัมพูชา	อันดับ 9 เมียนมา
ให้ผลลัพธ์เชิงบวก/ เกิดประโยชน์ต่อเศรษฐกิจ และความมั่นคง									
ให้ผลลัพธ์ปานกลาง/ เมื่อดำเนินการจะไม่ ส่งผลกระทบมากนัก									
ให้ผลลัพธ์เชิงลบ/ ไม่ควรดำเนินการ/หาก ดำเนินการจะอันตราย									
1. คุณลักษณะทางภูมิศาสตร์จากชายแดนไทย (Geopolitics)									
2. ประเทศเป้าหมายมีแนวโน้มงบประมาณการจัดหาที่เป็นไปได้สูง หรือเป็นประเทศที่ ระบบเศรษฐกิจมีกำลังซื้อที่สูง หรือมีกฎหมาย หรือมี White Paper ที่แสดงความจำนง ในการนำเข้าอาวุธที่ชัดเจน (Financial Performance)									
3. ประเทศเป้าหมายสามารถต่อยอดจากโครงการในอดีต (Previous Procurement)									
4. ประเทศเป้าหมายมีผลิตภัณฑ์ที่ต้องการครอบคลุมมากกว่า 2 Sector ขึ้นไป (Staff Requirement)									
5. ระดับความพร้อมขีดความสามารถด้านอุตสาหกรรมในประเทศ (Local Industrial Capability) (สีเขียว-อ่อนแอ ส่งออกจากไทยง่าย) (สีเหลือง-ปานกลาง ส่งออกจากไทยได้) (สีแดง-เข้มแข็ง ส่งออกจากไทยยาก)									
6. ประเทศเป้าหมายมีระดับความสัมพันธ์ระหว่างประเทศกับไทยในระดับดีหรือดีมาก/ ไม่ขัดแย้งกันมาก่อน (Strategic Partnership)									
7. ผลประโยชน์แห่งชาติเน้นไปที่ภัยคุกคามประเภทใด ยุทธโปกรณ์จากไทยตอบโจทย์ หรือไม่ (National Interests)									
8. ประเทศเป้าหมายมีกองทัพที่ไม่ละเมิดสิทธิมนุษยชน และมีการควบคุมอาวุธที่มีประสิทธิภาพ ปราศจากผู้ไม่หวังดีหรือกลุ่มก่อการร้าย (Human Right Abuses and Weapon Handling)									
9. การส่งออกอาวุธจะทำให้เสถียรภาพในภูมิภาคดีขึ้นหรือไม่ ดุลอำนาจทางทหารเป็น อย่างไร (Regional Stability and Balance of Power)									

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Arms Trade Treaty. "Background Documents." THEARMSTRADETREATY.org. <https://thearmstradetreaty.org/background-documents.html?templateId=1257700> (accessed Jan. 25, 2024).
- [2] U.S. Department of State. "World Military Expenditures and Arms Transfers 2021 Edition." STATE.gov. <https://www.state.gov/world-military-expenditures-and-arms-transfers-2021-edition/> (accessed Feb. 1, 2024).
- [3] G. Torrijos. "Arms and Influence in Southeast Asia: The Link between Arms Procurement and Strategic Relations." CSIS.org. <https://www.csis.org/blogs/new-perspectives-asia/arms-and-influence-southeast-asia-link-between-arms-procurement-and> (accessed Mar. 4, 2024).
- [4] E. M. Lederer, "UN Expert: Myanmar Military Imported \$1 Billion in Weapons since 2021 Coup," APNEWS.com. <https://apnews.com/article/myanmar-weapons-russia-china-singapore-05bd26bc54df8bc682ee1143f0f36a5e> (accessed Mar. 25, 2024).
- [5] Jane's Information Group, *Jane's World Defence Industry 2020*. Coulsdon, London, UK: Jane's Information Group, 2020.
- [6] The International Institute for Strategic Studies (IISS), *The Military Balance 2021: The Annual Assessment of Global Military Capabilities and Defence Economics*, London, UK: Routledge, 2021.
- [7] Pejabat Wawasan Brunei. "Laporan Wawasan Brunei 2035 (2015 – 2022)." WAWASANBRUNEI.gov.bn. [https://www.wawasanbrunei.gov.bn/Downloads/Files/Laporan Wawasan Brunei 2035 _2015-2022.pdf](https://www.wawasanbrunei.gov.bn/Downloads/Files/Laporan%20Wawasan%20Brunei%202035%202015-2022.pdf) (accessed Mar. 25, 2024).

การวิจัยและออกแบบยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์

กฤษณ์ ตรีภวนาถกุล¹ ชานนทร์ เล็กอึ้ง^{1*}
เกียรติศักดิ์ เพ็ชรเมธี¹ อรรถพล เจริญผล¹ และ วรณชพัฒน์ ฤทธิ์เลื่อน¹

วันที่รับ 3 พฤษภาคม 2567 วันที่แก้ไข 30 กรกฎาคม 2567 วันตอบรับ 29 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ

การวิจัยและออกแบบยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ มีจุดมุ่งหมายในการพัฒนายานเกราะล้อยาง 4x4 ตามความต้องการของกองทัพ ด้วยระเบียบวิธีทางวิศวกรรมศาสตร์ที่เป็นระบบ โดยเริ่มจากการรวบรวมความต้องการของหน่วยผู้ใช้งานและออกแบบตามความต้องการ ดำเนินการวิเคราะห์สมรรถนะทางพลศาสตร์หรือการขับเคลื่อน (Vehicle Dynamics Performance) และสมรรถนะในการป้องกันตนเอง (Protection Performance) เมื่อผลการวิเคราะห์ตรงตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้ จึงดำเนินการออกแบบและพัฒนาส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบย่อย แล้วนำมาประกอบเป็นยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ ที่สมบูรณ์ จากนั้นทำการพิสูจน์และทวนสอบ (Verification) ด้วยการทดสอบในสนามทดสอบเฉพาะทางและการทดสอบคุณลักษณะเฉพาะการใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่ายานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ มีคุณลักษณะเฉพาะในการใช้งานเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ เพื่อให้ระบบมีความสมบูรณ์ (Validation) ผลการทดสอบพบว่า ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ สามารถปฏิบัติการได้เป็นไปตามความต้องการและมีสมรรถนะการใช้งานทั่วไปที่มีความทันสมัยและมีประสิทธิภาพดี สามารถใช้ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ ในพื้นที่ภูมิประเทศที่ทุรกันดารได้เป็นอย่างดี มีอุปกรณ์อำนวยความสะดวก ข้างง่าย ช่วงล่างนิ่มนวล สามารถลำเลียงพลและทำความเร็วได้ดีตรงตามความต้องการของผู้ใช้

คำสำคัญ : ยานเกราะล้อยาง 4x4, การป้องกันกระสุน, ยานเกราะอเนกประสงค์

¹ ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: chanon.l@dti.or.th,

Research and Design of Multi - purposed 4x4 Wheeled Armored Vehicle

Krit Threepopnartkul¹ Chanon Lekthamrong^{1*}

Kiattisak Phetmeesri¹ Attapon Charoenpon¹ and Watchaphat Ridluan¹

Received 3 May 2024, Revised 30 July 2024, Accepted 29 August 2024

Abstract

The research and design of the 4x4 multi-purpose wheeled armored vehicle focused on developing a vehicle to the needs of the Army using a systematic engineering approach. The project began with the collection of user requirements, followed by design and analysis of vehicle dynamics and protection performance. Upon meeting the specified criteria, subsystems were designed, developed, and assembled into a complete vehicle. Verification involved specialized field tests and functional evaluations to ensure the vehicle met defined operational standards. The results confirmed that the 4x4 multi-purpose wheeled armored vehicle fulfilled mission requirements, exhibiting modern and efficient performance. It proved to be well-suited for rugged terrains, equipped with user-friendly features, smooth suspension, capable of transporting personnel and achieving desired speeds as specified by the users.

Keywords : Armour vehicle 4x4, Ballistic protection, Multi - purposed vehicle

¹ Military Vehicle Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: chanon.l@dti.or.th

1. บทนำ

งานวิจัยนี้จะเป็นการมุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนายานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำองค์ความรู้การออกแบบ การวิจัย และการพัฒนาเทคโนโลยียานเกราะล้ออย่าง 8x8 มาใช้ในการวิจัยและพัฒนาสมรรถนะยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์ที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศ และเกิดเครือข่ายความร่วมมือด้านการพัฒนาและส่งเสริมสร้างศักยภาพการวิจัยในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ นำไปสู่การพัฒนาความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) และบริษัทผู้ร่วมทุน คือ บริษัท ชัยเสรีเมท์ทอลแอนด์รีเบอรั จำกัด

ยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์เป็นยานพาหนะช่วยรบขับเคลื่อน 4 ล้อ ที่มีความคล่องแคล่ว ในการเคลื่อนที่ทั้งบนทางราบและทางในภูมิประเทศ สามารถใช้ปฏิบัติการกิจในพื้นที่ทุรกันดารได้ดี ใช้ได้หลากหลายภารกิจ ตลอดจนการนำมาใช้ลำเลียงขนส่งเจ้าหน้าที่หน่วยทหารปฏิบัติการพิเศษเพื่อขยายขีดความสามารถในการป้องกันรักษาและแก้ไขปัญหาในการผลประโยชน์ของชาติในพื้นที่ภูมิภาคต่าง ๆ ตามยุทธศาสตร์ชาติสามารถลำเลียงกำลังพลพร้อมอาวุธประจำกายและสัมภาระที่จำเป็น

งานวิจัยฉบับนี้แบ่งเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมา จากนั้นส่วนที่ 2 จะเป็นการทบทวนวรรณกรรม ในส่วนที่ 3 นำเสนอผลการวิจัยและพัฒนา ซึ่งเป็นการประยุกต์ทฤษฎีการออกแบบเพื่อศึกษาและปรับปรุงสมรรถนะระบบยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์ ผลการทดสอบจะกล่าวถึงในส่วนที่ 4 และในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยเป็นการสรุปผลการศึกษาค้นคว้าวิจัย

2. การทบทวนวรรณกรรม

ที่ผ่านมาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยานเกราะล้ออย่างเป็นขั้นความลับทางการทหาร จึงไม่มีการเผยแพร่อย่างแพร่หลาย โดยที่ผ่านมาเน้นการวิจัยและพัฒนายานเกราะล้ออย่างที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นเพียงบทความวิชาการที่มุ่งเน้นถึงการประยุกต์ใช้การจัดทำแบบจำลอง และการจำลองผลเชิงตัวเลขที่ใช้ในกระบวนการออกแบบ การวิจัยและพัฒนายานเกราะล้ออย่าง นำเสนอโดย M. Hoenlinger และคณะ [1]

เพื่อให้กระบวนการการออกแบบ วิจัย พัฒนา และการทดสอบ ตลอดจนการเตรียมการยานเกราะล้ออย่าง 8x8 เป็นมาตรฐาน สทป. จึงได้ริเริ่มประยุกต์ใช้กระบวนการวงจรการจัดการผลิตภัณฑ์ (Product Lifecycle Management) นำเสนอในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยและพัฒนาความร่วมมือยานเกราะล้ออย่างสำหรับปฏิบัติการกิจของหน่วยบัญชาการนาวิกโยธิน (นย.) [2] และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยและพัฒนาความร่วมมือยานเกราะล้ออย่าง 8x8 (ลำเลียงพล) [3]

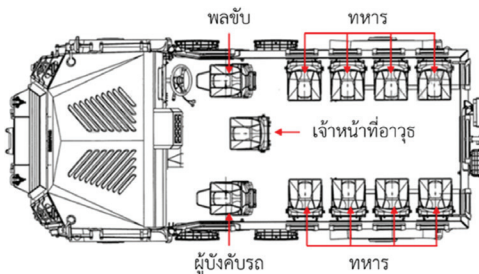
3. ผลการวิจัยและพัฒนา

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการวิจัย ออกแบบและพัฒนายานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์ ให้เป็นไปตามความต้องการของกองทัพ โดยยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์มีความต้องการให้สามารถบรรทุกกำลังพลได้รวม 11 นาย มีอำนาจการยิงโดยติดตั้งระบบอาวุธขนาด 7.62 มิลลิเมตร (มม.) สามารถทำงานแบบอัตโนมัติที่ทันสมัย ติดตั้งระบบวิทยุสื่อสารทางทหารตามมาตรฐานที่กองทัพใช้งาน และมีความสามารถป้องกันอันตรายจากการถูกยิงโจมตีจากทางด้านข้างได้สูงสุดตามมาตรฐาน NATO STANAG ระดับ 2 และสามารถป้องกันแรงระเบิด

จากทางด้านล่างตามมาตรฐาน NATO STANAG ระดับ 2a และ 2b [4] มีความสามารถในการเคลื่อนที่บนบกได้ตามมาตรฐาน และได้ติดตั้งระบบจำเป็นต่อความปลอดภัยของกำลังพล

3.1 การจัดวางพื้นที่ภายในระบบตัวถัง (Space Management)

การพิจารณาตัวถังและโครงสร้างนั้นคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น แนวคิดในการจัดวางผู้โดยสารภายในยานเกราะและการจัดวางอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนรถตลอดจนการพิจารณาความอยู่รอดของยานเกราะ ล้อยาง เป็นต้น เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์สามารถบรรจุพลขับ 1 คน ผู้บังคับรถ 1 คน เจ้าหน้าที่อาวุธ 1 คน และพลรบ 8 คน โดยศึกษาการจัดวางเรียงพลขับ 1 คน ผู้บังคับรถ 1 คน เจ้าหน้าที่อาวุธ 1 คน และทหาร 8 คน เป็นไปตามรูปที่ 1 โดยการจัดเรียงเก้าอี้ของทหารมีลักษณะแบบเดียวกับการจัดเรียงเก้าอี้ของยานเกราะล้อยาง 8x8 ของ สทป. ทำให้การเข้าออกตัวยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์สามารถเข้าและออกได้ง่าย สะดวก และคล่องแคล่วกว่า



รูปที่ 1 การจัดเรียงเก้าอี้สำหรับพลขับ 1 คน ผู้บังคับรถ 1 คน เจ้าหน้าที่อาวุธ 1 คน และทหาร 8 คน

3.2 การป้องกันกระสุน

การป้องกันขีปนาวุธหรือกระสุนนั้น เป็นการศึกษาด้านพฤติกรรมของการกระแทก (Impact) มีการเกี่ยวข้องกับหลายแขนงวิชา อย่างวัตถุที่กระแทกด้วยความเร็วต่ำกว่า 2 เมตร/วินาที (m/s) อาจพิจารณาเป็นพฤติกรรมในรูปแบบของพลศาสตร์ในโครงสร้าง (Structural Dynamic) ที่ทำให้เกิดเพียงหลุมกด (Indentation) เพียงเล็กน้อย

ผลงานวิจัยที่ได้พัฒนาสมการอธิบายการทำนายความหนาของแผ่นเกราะ เอกสาร UFC4-023-07 [5] ได้แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับป้องกันการเจาะทะลุของกระสุน

$$T = D \left(\frac{V m^{0.5} \cos^{0.8}(\theta)}{1.125 D^{1.5} \log_{10}(BHN)} \right)^{1.25} \quad (1)$$

โดยที่

T คือ ความหนาของแผ่นเหล็กที่ไม่ทำให้เกิด Perforation ในหน่วย มม.

V คือ ความเร็วของหัวกระสุนในหน่วย m/s

m คือ มวลของหัวกระสุนในหน่วย กก.

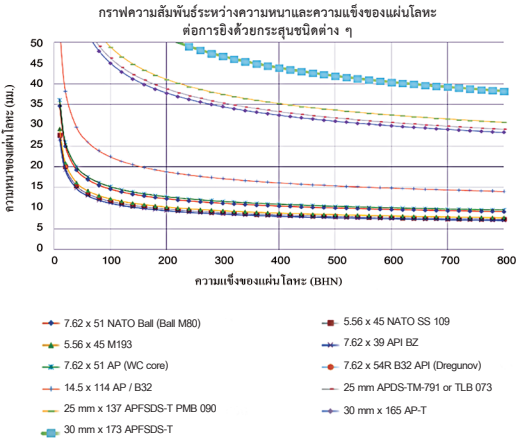
θ คือ มุมตกกระทบของกระสุนในหน่วย องศา

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกระสุนในหน่วย มม.

BHN คือ ความแข็งบริเนลล์ของตัวแผ่นโลหะ

จากสมการที่ (1) สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของแผ่นเกราะเหล็กและความหนาของแผ่นเกราะเหล็กที่ต้องใช้ในแต่ละชนิดของกระสุนปืนได้ การทำนายการยิงด้วยกระสุนปืนตามมาตรฐาน STANAG 4569 [5] ใส่แผ่นเกราะเหล็ก Armox500t ด้วยสมการที่ (1) สามารถทำนาย

ความหนาของแผ่นเหล็กอย่างน้อย 7 มม. สำหรับการยิงกระสุนตามมาตรฐาน STANAG 4569 ระดับ 1 และ 2 ส่วนการยิงกระสุนตามมาตรฐาน STANAG 4569 ระดับ 3 และ 4 สามารถทำนายความหนาของแผ่นเหล็กอย่างน้อย 10 มม. และ 15 มม. ตามลำดับ และการยิงกระสุนตามมาตรฐาน STANAG 4569 ระดับ 5 และ 6 นั้นต้องการความหนาของแผ่นเหล็กอย่างน้อย 34 มม. และ 43 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทำนายการยิงด้วยกระสุนปืนตามมาตรฐาน STANAG 4569 ใส่แผ่นเกราะเหล็ก ArmoX500t ด้วยสมการที่ (1)

การทำนายด้วยการจำลองการยิงกระสุนใส่แผ่นเกราะด้วยกระสุนขนาด 14.5 มม. (STANAG ระดับ 4) ใส่แผ่นเกราะ ArmoX500t ที่ความหนา 10, 15, 20 และ 25 มม. ตามลำดับ (มุมยิง 0 องศา เป็นมุมยิงที่มีแรงกระทำของกระสุนต่อแผ่นเกราะมากที่สุด และน้อยสุดที่ 45 องศา) ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3 ที่ความหนา 10 มม. กระสุนสามารถเจาะทะลุแผ่นเกราะได้ ส่วนความหนาที่ 15, 20 และ 25 มม. กระสุนไม่สามารถเจาะทะลุแผ่นเกราะได้ แต่จะเกิด Perforation หรือการโป่งพองด้านหลังของแผ่นเกราะ ถึงแม้ว่าความหนา 15 มม. สามารถทนต่อการเจาะทะลุได้แต่เกิดการโป่งพองด้านหลังแผ่นเกราะสูง ส่วนที่ความหนา 25 มม. มีการเกิดการโป่งพองที่ต่ำกว่า ดังนั้นในเบื้องต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแผ่นเกราะ ArmoX500t สามารถทนต่อกระสุนขนาด 14.5 มม. ตามมาตรฐาน STANAG 4569 นั้น ควรมีความหนาอยู่ที่ 25 มม. โดยมุมยิง 0

จะเป็นมุมยิงที่สร้างความเสียหายได้มากที่สุด (Severe Case) และมุมยิง 45 เป็นมุมที่สร้างความเสียหายได้น้อยที่สุด

ความหนา	10	15	20	25
มุมยิง 0	 ทะลุ	 โป่งพอง	 โป่งพอง	 ไม่ทะลุ
มุมยิง 45	 ทะลุ	 ไม่ทะลุ	 ไม่ทะลุ	

รูปที่ 3 การจำลองการยิงด้วยกระสุนปืนขนาด 14.5 มม. ตามมาตรฐาน STANAG 4569 ใส่แผ่นเกราะเหล็ก ArmoX500t ที่ความหนาต่าง ๆ

เมื่อเทียบผลการจำลองการยิงด้วยกระสุนปืนขนาด 14.5 มม. กับผลการทำนายจากสมการที่ 2 แล้ว พบว่ามีค่าแตกต่างกัน โดยผลการจำลองในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะ ArmoX500t ที่สามารถทนต่อกระสุนปืนขนาด 14.5 มม. ต้องมีค่าเท่ากับ 25 มม. ซึ่งพิจารณาการโป่งพองด้านหลังของแผ่นเกราะด้วย ส่วนสมการที่ (1) นั้นให้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งได้ความหนาที่ 15 มม. ดังนั้นเมื่อพิจารณาเป็นสัดส่วนที่ต้องเพิ่มเติมเข้าไปในการทำนายความหนาของแผ่นเกราะที่กระสุนระดับอื่น ๆ จึงหาได้จากสมการที่ (2)

$$Z = \frac{t_{numerical}}{t_{Analytical}} = \frac{25}{15} = 1.67 \quad (2)$$

โดยที่

Z คือ ตัวคูณปรับแก้ความหนาเกราะ

$t_{numerical}$ คือ ความหนาเกราะที่ได้จากการโปรแกรมจำลองโดยได้ผลในรูปที่ 3

$t_{analytical}$ คือ ความหนาเกราะที่ได้จากทฤษฎี โดยได้ผลในรูปที่ 2

เบื้องต้นจะนำค่าสัดส่วน 1.67 นี้ไปใช้ในการคำนวณความหนาแนะนำสำหรับแผ่นเกราะในการป้องกันกระสุนปืนตามมาตรฐาน STANAG 4569 ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับยานเกราะที่ต้องการทนทานต่อกระสุนปืนตามมาตรฐาน STANAG 4569 ระดับ 2 นั้น ที่แผ่นเกราะเหล็ก ArmoX500t ควรมีความหนาอย่างน้อย 12 มม.

ตารางที่ 1 ความหนาที่ออกแบบสำหรับแผ่นเกราะในการป้องกันกระสุนปืนตามมาตรฐาน STANAG 4569

STANAG LV	ความหนาตามสมการที่ (1)	ความหนาที่พิจารณาการโป่งพอง (ความหนาที่ใช้ในการออกแบบ)
I	7	12
II	7	12
III	10	17
IV	15	25
V	34	57
VI	43	72

3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะการเคลื่อนที่

เพื่อให้การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของยานเกราะทำได้ง่าย สมมติฐานหนึ่งที่จะต้องพิจารณาเป็นลำดับแรกคือ เรื่องของระบบมวลยานเกราะ ทั้งนี้ เนื่องจากรถยนต์ประกอบไปด้วยส่วนประกอบย่อยจำนวนมาก โดยปกติการพิจารณาระบบมวลในการศึกษาพลศาสตร์ของยานยนต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ มวลรวมทั้งคันและมวลรวมแยกระหว่างตัวรถยนต์และระบบกันสะเทือน โดยระบบมวลรวมทั้งคันพิจารณาระบบมวลทุกส่วนประกอบของรถยนต์ ให้เป็นมวลเดียวกัน (Lumped Mass) โดยตำแหน่งมวลจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของรถยนต์ (Center of Gravity: CG) สมมติฐานดังกล่าวเหมาะกับการศึกษาการตอบสนองของรถยนต์ต่อแรงกระทำต่าง ๆ

สำหรับระบบมวลรวมแยกระหว่างตัวรถยนต์และระบบกันสะเทือนพิจารณาระบบมวลทุกส่วนประกอบของรถยนต์ ตั้งแต่ส่วนของสปริงขึ้นไป (รวมมวลของสปริง) เป็นหนึ่งหน่วยมวล โดยจะเรียกว่า มวลที่ถูกแขวน (Sprung Mass) และพิจารณาระบบมวลของทุกส่วนประกอบของรถยนต์ ตั้งแต่ส่วนของสปริงลงมารวมถึงล้อรถยนต์ เรียกว่า มวลที่ไม่ถูกแขวน (Unsprung Mass) โดยมวลทั้งสองส่วนจะอยู่ที่ตำแหน่งของจุด CG ของส่วนประกอบแต่ละกลุ่ม สมมติฐานนี้เหมาะกับการศึกษาการตอบสนองของรถยนต์และคุณภาพการขับขี่ (Ride Quality)

หลักการขับเคลื่อนของยานยนต์อาศัยการส่งกำลังของเครื่องยนต์ ผ่านระบบส่งกำลังสู่เพลาขับเคลื่อนและส่งกำลังสู่ล้อ ไม่ว่าจะเป็นล้อหน้าล้อหลัง หรือทั้งสี่ล้อ โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนนที่มากพอ แรงขับเคลื่อนก็จะสามารถส่งผ่านล้อสู่พื้นถนนและผลักดันให้ยานยนต์เคลื่อนที่ไปได้ ในขณะที่การส่งกำลังผ่านระบบส่งกำลังไม่มีความสมบูรณ์ 100% เนื่องจากความสูญเสียในระบบส่งกำลัง แรงขับเคลื่อนของยานยนต์ที่กำลังจะเคลื่อนที่นั้นจะต้องมีค่ามากเพียงพอที่จะเอาชนะมวลของรถเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ และในขณะที่เคลื่อนที่ไปแล้วต้องมีค่ามากพอที่จะชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อให้รถสามารถดำรงสภาวะเคลื่อนที่อยู่ได้ [6]

หากจะอธิบายการขับเคลื่อนของยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์สามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's 2nd Law of Motion) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\sum F = Ma \quad (3)$$

โดยที่

$\sum F$ คือ ผลรวมของแรงที่มีผลกระทบต่อยานเกราะ

M คือ มวลของยานเกราะ

a คือ อัตราเร่งของยานเกราะ

ซึ่งในส่วนของแรงนั้น จะประกอบไปด้วยผลต่างของแรงขับเคลื่อนกับแรงต้านทาน ในเบื้องต้นนี้จะกำหนดตามสมการที่ (4)

$$\sum F_{drive} - \sum F_{resistance} = Ma \quad (4)$$

โดยที่

$\sum F_{drive}$ คือ ผลรวมแรงขับเคลื่อนยานเกราะ

$\sum F_{resistance}$ คือ ผลรวมแรงต้านทานยานเกราะ

M คือ มวลของยานเกราะ

a คือ อัตราเร่งของยานเกราะ

ดังนั้น จะพบว่า เมื่อ

$\sum F_{drive} = \sum F_{resistance}$ ส่งผลให้ $\sum F = 0$ หมายถึงหยุดนิ่งคือความเร็วคงที่

$\sum F_{drive} > \sum F_{resistance}$ ส่งผลให้ $\sum F > 0$ หมายถึงเร่งมีความเร็ว

$\sum F_{drive} < \sum F_{resistance}$ ส่งผลให้ $\sum F < 0$
หมายถึงรถมีความหน่วง

โดยทั่วไปแล้วยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ จะเกิดสภาวะใดสภาวะหนึ่งในสามอยู่เสมอ ข้อควรระวัง ในการพิจารณา คือ การเปลี่ยนแปลงของแรงต่าง ๆ โดยเมื่อมีความเร็วคงที่ แรงต่าง ๆ ที่พิจารณาอาจจะ ถือเป็นค่าคงที่ได้เสมอ และในขณะที่การพิจารณา เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ค่าของแรงโดยเฉพาะ แรงต้านทานอาจจะไม่ค่าไม่คงที่และอาจจะไม่เป็น เชิงเส้น ประกอบด้วย แรงต้านทานการหมุนของล้อ (Rolling Resistance: F_R) แรงต้านจากอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics Resistance: F_A) และแรงต้านทางชัน (Gradient Resistance: F_G)

การวิเคราะห์พลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ทางตรง เพื่อให้ยานเกราะมีสมรรถนะตามความต้องการ ตามตารางที่ 1 จึงต้องทำการประเมินแรงต้านทานที่ กระทำต่อรถยานเกราะในสภาวะต่าง ๆ เช่น การวิ่ง ด้วยความเร็ว 100 กิโลเมตร/ชั่วโมง (km/h) การ ไต่ทางลาดชัน หรือระยะเลี้ยวที่กำหนด

การพิจารณาการเลือกเครื่องยนต์ให้มีความกำลัง เพียงพอจากกรณีวิ่งด้วยความเร็ว 100 km/h โดยไม่คิดอัตราทดเกียร์จะต้องใช้กำลังเครื่องยนต์ จากสมการที่ (5) และ (6)

$$P = \frac{FV}{\eta} \quad (5)$$

และ

$$F_w = \frac{T_w}{r_w} \quad (6)$$

หรือเขียนในรูปแบบของทอร์กจะได้ดังสมการที่ (7)

$$T_w = F_w \times r_w \quad (7)$$

โดยที่

P คือ กำลังของเครื่องยนต์ ในหน่วย Watts

F คือ แรงต้านที่กระทำต่อรถ ในหน่วย N

V คือ ความเร็วรถ ในหน่วย m/s

r คือ ระยะของวงล้อ ในหน่วย m

จะเห็นได้ว่าการคำนวณอัตราทดเกียร์ สามารถเปลี่ยนแรงมาเป็นแรงบิดที่เหมาะสมต่อการ ใช้งาน เพื่อที่จะได้เลือกเครื่องยนต์ที่เหมาะสมต่อการ ใช้งานและเป็นการจัดสรรพื้นที่ในห้องเครื่องที่มี อยู่อย่างจำกัด ดังนั้น จึงจะทำการเลือกเครื่องยนต์ที่ มีกำลังอยู่ในช่วง 230 - 320 แรงม้า เพื่อให้ครอบคลุม การทำงานได้ทางลาดชัน 60% และสามารถทำความ เร็วในแนวราบได้ 100 km/h โดยจะทำการเลือก อัตราทดเกียร์และระบบส่งกำลังที่เหมาะสมกับการ ใช้งานควบคู่กันไป

จากการศึกษายานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ จะมีระบบส่งกำลังขับเคลื่อน (Driveline) ทำให้มี อัตราทดสูงขึ้น เพื่อความสามารถในการสร้างแรงบิด ให้เพียงพอต่อการใช้งาน โดยทั่วไประบบส่งกำลัง ขับเคลื่อนจะประกอบไปด้วย

ชุดส่งกำลัง (Transfer Case) มีหน้าที่รับแรง ที่มาจากเกียร์และดรอปปอกซ์ (Drop Box) แล้วกระจาย แรงไปยังเพลาดต่าง ๆ ตามที่ต้องการ (ขับเคลื่อน 4 ล้อ ตามโหมดการขับเคลื่อน)

เพลาคขับเคลื่อน (Axle) มีหน้าที่รับแรงจาก Transfer Case เพื่อกระจายไปสู่ล้อ และมีระบบ การล็อกดิฟเฟอเรนเชียล (Diff Lock) เพื่อสามารถ กระจายแรงบิดไปที่ล้อทั้งสองข้างได้เท่า ๆ กัน

หมุนวงล้อ (Wheel Hub) มีหน้าที่ส่งผ่าน แรงบิดจากเพลายังล้อ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะมีอัตราทดตามการออกแบบ เพื่อเพิ่มอัตราทดของเกียร์และให้ได้อัตราทด ที่เหมาะสมต่อการใช้งานและพื้นที่การจัดวางอุปกรณ์

ทำการเลือกเครื่องยนต์ซึ่งมีแรงม้า 300 Hp @2,500 RPM (223,800 Watt@261.8 rad/s)

ทำการหา งานการทำงานจากสเปกเบื้องต้น นำมาหา Engine Performance Curve จากการประมาณค่าด้วยสมการที่ (8) ซึ่งพัฒนาโดย R.N. Jazar ในปี 2008 [7] ดังนี้

$$P_e = f(\omega_e) = \sum_{i=1}^3 P_i \omega_e^i = P_1 \omega_e^1 + P_2 \omega_e^2 + P_3 \omega_e^3 \quad (8)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3$

ป้อนค่าสำหรับเครื่องยนต์ Indirect Injection Diesel

โดยที่

$$P_1 = 0.6 \frac{P_M}{\omega_M} = 512$$

$$P_2 = 1.4 \frac{P_M}{\omega_M^2} = 4.5714$$

$$P_3 = -\frac{P_M}{\omega_M^3} = -0.0125$$

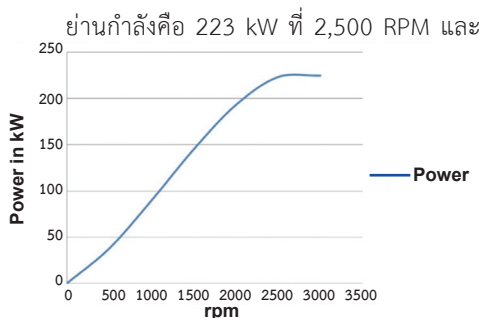
$$P_e = 512.911 \omega_e^1 + 4.5714 \omega_e^2 - 0.0125 \omega_e^3$$

P_M คือ กำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ ในหน่วย W

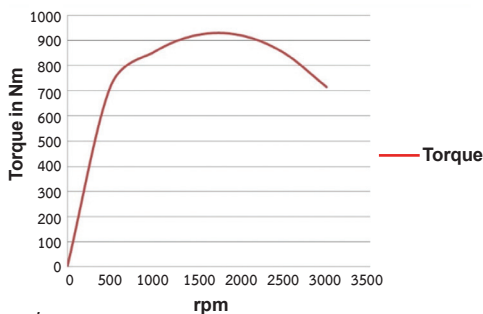
ω_M คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่กำลังสูงสุดในหน่วย rad/s

เมื่อนำสมการที่ได้ไปสร้างกราฟจะได้ดังแสดงใน

รูปที่ 4 (a) และ 4 (b)



รูปที่ 4 (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเครื่องยนต์ต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์



รูปที่ 4 (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์

แรงบิด 920 ที่รอบ 1,500 RPM (157.07 rad/s)

ทำการคำนวณแรงบิดเมื่อผ่านระบบส่งกำลัง โดยสมการคำนวณอัตราทด ดังแสดงในสมการที่ (9)

Axle มี 2 ล้อ ดังนั้น แรงบิดจะถูกแบ่งไปที่ล้อซ้าย

$$N_g = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad (9)$$

โดยที่

N_g คือ อัตราทด

T คือ แรงบิด มีหน่วยเป็น Nm

ω คือ ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น rad/s หรือ RPM

N คือ จำนวนฟันเฟือง

r คือ รัศมี มีหน่วยเป็น m

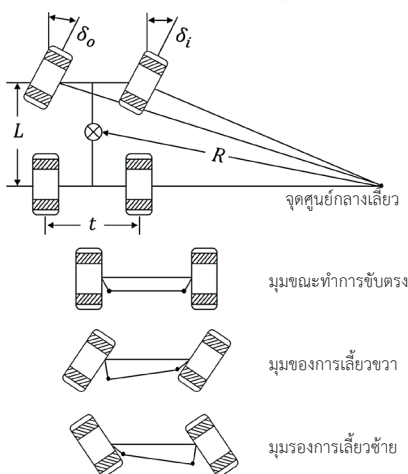
และขออย่างละเอียด ๆ กัน ล้อละ 12,173.53 Nm หรือแรงบิดที่ล้อทั้งระบบ 48,694.162 Nm ซึ่งมากกว่าแรงต้านในการไต่ทางขึ้น 41.83% (แต่ล้อละ 7,080 Nm ทั้งระบบ 28,321.5 Nm)

ดังนั้น หากคิดแรงบิดย้อนกลับ โดยใช้เกียร์ 1 ที่มีอัตราทด 3.49 และอัตราทดรวมของระบบ Driveline ที่ 15.1658 รอบการใช้งาน 1,500 RPM เพื่อหากำลังเครื่องยนต์ที่เพียงพอสำหรับการไต่ทางขึ้น ได้ 122.669 Hp คำนวณหาความเร็วที่ทำได้ เมื่อใช้เครื่องยนต์ที่ 2,500 rpm และรัศมีล้อที่ 0.540 เมตร (m) (แตกต่างจากการไต่ทางขึ้นเนื่องจากโหมดการขับเคลื่อนแบบ Highway) โดยใช้เกียร์ 6 ที่มีอัตราทด 0.65 และอัตราทดรวมของระบบ Driveline ที่ 6.69 (Transfer Case โหมด Hi) จะได้ความเร็วเท่ากับ 117.03 km/h

การเลือกใช้เครื่องยนต์ที่มีแรงม้า 300 Hp ควบคู่กับเกียร์และระบบส่งกำลังที่มีอัตราทดตามตารางที่ 2 และ 3 สามารถทำให้รถยนต์ไต่ทางลาดชัน 60% ได้ และทำความเร็วสูงสุดได้มากกว่า 100 km/h ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ จะเห็นได้ว่า อัตราทดที่สูงถึง 52.90 (Low Mode) ทำให้เครื่องยนต์มีแรงบิดที่มากกว่าแรงต้าน 41.83% ในการไต่ทางลาดชัน และเมื่อปรับอัตราทดชุดส่งกำลัง (Transfer Case) เหลือ 1.09 (Hi Mode) ทำให้รถยนต์สามารถทำความเร็วได้มากกว่า 100 km/h ได้ และจะมีความคล่องตัวสูงในการไต่ทางลาดชันหรือทางภูมิประเทศ เนื่องจากมีแรงบิดอย่างพอเพียง

ระบบบังคับเลี้ยวเป็นระบบสำคัญในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของยานยนต์ โดยเป็นระบบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางและการเคลื่อนที่ของรถยนต์ การวิเคราะห์และการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวสามารถทำได้โดยอาศัยหลักการจลนศาสตร์ (Kinematics) โดยพฤติกรรมของระบบบังคับเลี้ยวจะแตกต่างกันออกไป เนื่องจากการออกแบบและมักจะมีผลต่อการควบคุมทิศทางของรถยนต์ (Handling)

ทั้งนี้ เพื่อให้รถยนต์สามารถเข้าโค้งได้โดยไม่เกิดการลื่นไถล (Skid) ที่ล้อ (ยางถูไปกับพื้นโดยที่ล้อไม่หมุน) และเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติของการเลี้ยว เนื่องจากทรงรูปร่าง (Geometry) ของระบบบังคับ ซึ่งหากผิดเพี้ยนไปจากนี้ก็จะทำให้เกิดความเสียหายกับระบบบังคับเลี้ยวได้ หรือหากบังคับเลี้ยวแล้วองศาของล้อไม่เป็นไปตามนี้ แสดงว่าอาจมีลิงเกจ (Linkage) บางชิ้นส่วนได้รับความเสียหาย โดยในทางทฤษฎีความแตกต่างหรือค่าของมุมการหมุนด้านในและด้านนอก ควรมีค่าเป็นไปตาม Ackerman Steering [6] ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพแสดงมุมการหมุนของล้อด้านในและด้านนอกตามทฤษฎี Ackerman Steering

จากภาพ เมื่อ $R \gg L$

$$\begin{aligned}\delta_o &= \tan^{-1} \left(\frac{L}{R + \frac{t}{2}} \right) \approx \frac{L}{R + \frac{t}{2}} \\ \delta_i &= \tan^{-1} \left(\frac{L}{R - \frac{t}{2}} \right) \approx \frac{L}{R - \frac{t}{2}}\end{aligned}\quad (10)$$

สำหรับมุมที่มีค่าน้อยจะทำให้ $\tan^{-1}(x) \approx x$

โดยที่

δ_o คือ องศาล้อด้านนอก

δ_i คือ องศาล้อด้านใน

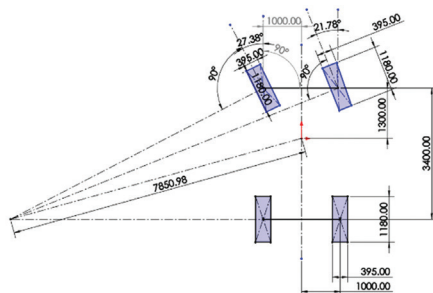
R คือ รัศมีโค้งที่จุดศูนย์กลางของรถกับวงเลี้ยว

L คือ ระยะห่างฐานล้อของรถโดยวัดที่

กึ่งกลางเพลารากถึงกึ่งกลางเพลาสุดท้าย

t คือ ระยะที่วัดจากกึ่งกลางล้อซ้ายถึงกึ่งกลางล้อขวา

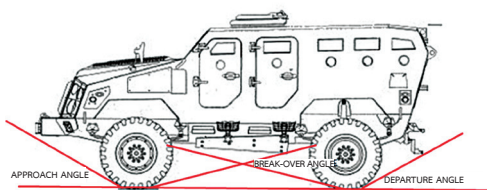
สมมติฐานในการออกแบบต้องการให้ยานเกราะล้อ 4x4 อเนกประสงค์ มีวงเลี้ยวประมาณ 8 เมตร วัดจากจุด CG โดยสมมติให้จุด CG ห่างจากเพลาคู่หน้าเป็นระยะ 1,300 มม. จะต้องออกแบบวงเลี้ยวของล้อด้านในและล้อด้านนอกของเพลาคู่หน้า โดยที่ล้อจะไม่ชนกับตัวถังยานเกราะล้อ 4x4 อเนกประสงค์ จะต้องมีความกว้างอย่างน้อย 27.38 และ 21.78 องศา ตามลำดับตามกฎ Ackerman Steering ดังแสดงในรูปที่ 6



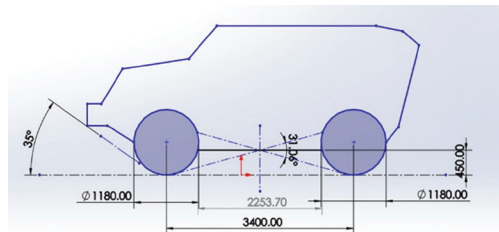
รูปที่ 6 ระยะวงเลี้ยวของรถยานเกราะ ตามกฎ Ackerman Steering

ระยะของฐานวงล้อ (Wheel Base) มีผลต่อขนาดของห้องโดยสารและเสถียรภาพในการขับเคลื่อน การปรับเปลี่ยนระยะห่างของเพลานั้น ส่งผลต่อความสามารถในการขับเคลื่อนในเส้นทางทุรกันดารของรถ (Off Road Capability) เนื่องจากการข้ามสิ่งกีดขวาง นอกจากจะมีแรงเสียดสี (Traction) ระหว่างยางและพื้นถนนเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นซึ่งจะช่วยให้รถผ่านสิ่งกีดขวางได้โดยไม่กระแทกครูด หรือติดค้างอยู่ที่สิ่งกีดขวาง ได้แก่ มุมปะทะ (Approach) คือมุมที่วัดจากจุดสัมผัสหน้ายางกับถนนไปตัดกับขอบของกันชนหน้า หากวัดด้านหลังตัดกับขอบกันชนหลัง เรียกว่า มุมจาก (Departure) โดยจะสามารถรู้ได้จากการออกแบบตัวถังภายนอกให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งาน และมุม Break-over Angle (มุมที่ใช้เพื่อวัดความสูงของพื้นระหว่างล้อกับพื้นของรถ) เป็นมุมที่ใช้สำหรับป้องกันไม่ให้ตัวรถติดอยู่ตรงกลางในขณะไต่ขึ้นลงจากทางลาดชันหรือสิ่งกีดขวาง โดยคำนวณจากระยะห่างระหว่างพื้นกับกึ่งกลางของระยะห่างของล้อ ดังแสดงในรูปที่ 7

การกำหนดเรขาคณิต (Geometry) เบื้องต้น โดยให้ความสูงใต้ท้องรถที่ 450 มม. ระยะฐานล้อที่ 3,400 มม. ระยะ Breaker Angle จะอยู่ที่ 31.06 องศา ดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้ การข้ามสิ่งกีดขวางหรือการข้ามคูน้ำจะขึ้นอยู่กับความสูงของสิ่งกีดขวางและความลึกของขอบคูน้ำด้วย



รูปที่ 7 มุมต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์ สำหรับการข้ามสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 8 รายละเอียดขนาดของระยะ Wheel Base และมุม Break-over Angle ของยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์

ระยะของฐานวงล้อมีผลต่อสมรรถนะของรถ ยานเกราะ ดังนี้ ระยะฐานวงล้อที่ยาว มีเสถียรภาพมาก เนื่องจากความสูงของ CG ต่ำกว่าระยะฐานวงล้อสั้น แต่ความสามารถในการวิ่งในที่ทุรกันดารจะต่ำ เพราะมุม Break-over Angle น้อย และความคล่องตัวจะต่ำกว่ารถที่มีระยะฐานวงล้อต่ำ ดังนั้น เมื่อยานเกราะลดระยะฐานวงล้อให้สั้นลงจะสามารถข้ามสิ่งกีดขวางได้ตมามากยิ่งขึ้นและมีวงเลี้ยวที่แคบขึ้น แต่ก็สูญเสียความมั่นคงและพื้นที่ภายในตัวรถเช่นกัน ซึ่งการออกแบบต้องคำนึงถึงภารกิจและลักษณะการใช้งานให้เหมาะสม

4. การทดสอบยานเกราะล้ออย่าง 4x4 อเนกประสงค์

การทดสอบแบ่งเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ด้านประสิทธิภาพ/สมรรถนะและด้านสภาวะแวดล้อม อ้างอิงตามมาตรฐานยุทธโธปกรณ์ กระทรวงกลาโหม ว่าด้วยรถเกราะล้ออย่าง (กมย.กท.1/2563) [8] ครอบคลุม 7 หัวข้อ ดังนี้

รายการทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ
ทดสอบรัศมีวงเลี้ยว	≤14 m
ทดสอบระยะเบรก	≤15, ≤20
ทดสอบข้ามเครื่องกีดขวางสูง	50 cm
ผลการทดสอบได้/ลงลาดชัน	60%
ทดสอบวัดความดังเสียงภายในห้องโดยสาร	≤80 dB (รถไม่เคลื่อนที่) ≤95 dB (รถเคลื่อนที่)
ทดสอบวัดอุณหภูมิภายในห้องโดยสาร	≤27 °C

4.1 ด้านประสิทธิภาพ/สมรรถนะ

4.1.1 การทดสอบบรัคมีวงเลี้ยว

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพความคล่องแคล่วในการเคลื่อนที่ ด้านความกว้างของวงเลี้ยว การทดสอบแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 9

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบบรัคมีวงเลี้ยว

วงเลี้ยว	เกณฑ์ที่กำหนด (m)	ค่าที่วัดได้ (m)
ด้านซ้าย	≤ 14	8.2
ด้านขวา	≤ 14	8.3



รูปที่ 9 การทดสอบบรัคมีวงเลี้ยวด้วยการโรยผงแป้งไว้ด้านข้างล้อตลอด จนทำการเลี้ยวสำเร็จ

4.1.2 การทดสอบระยะเบรก

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบเบรก การทรงตัวของรถขณะเบรก และการยึดเกาะถนนของยาง การทดสอบแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 10

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการวัดระยะเบรกตามความเร็วที่กำหนด

ความเร็ว	เกณฑ์ที่กำหนด (m)	ค่าที่วัดได้ (m)
40 km/h	≤ 15	14.2
60 km/h	≤ 20	18.0



รูปที่ 10 การทดสอบการวัดระยะเบรกของรถ โดยการวิ่งที่ความเร็ว 40 และ 60 km/h แล้วทำการเหยียบเบรก

4.1.3 การข้ามเครื่องกีดขวางสูง

เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ระบบช่วงล่าง ระบบส่งกำลัง ความสมดุลของรถ ประสิทธิภาพของยางรถยนต์ การทดสอบแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 11

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบข้ามเครื่องกีดขวางสูง 50 cm

เกณฑ์ที่กำหนด	ผลการทดสอบ
รถเคลื่อนที่ผ่านไปได้	สามารถผ่านไปได้



รูปที่ 11 การทดสอบข้ามเครื่องกีดขวางสูงที่ความสูง 50 cm โดยรถมีกำลังเพียงพอสามารถผ่านไปได้

4.1.4 การไต่/ลงลาดชัน

เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ระบบช่วงล่าง ระบบส่งกำลัง ความสมดุลของรถ และประสิทธิภาพของยางรถยนต์โดยไม่ได้กำหนดความเร็วที่ใช้ การทดสอบแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 12

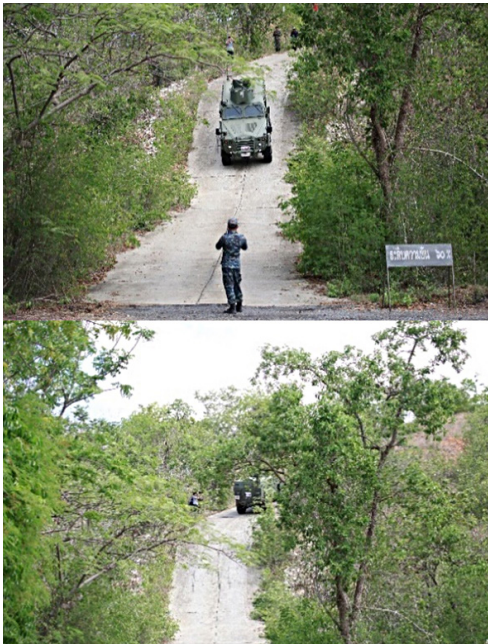
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบไต่/ลงลาดชันที่ 60%

เกณฑ์ที่กำหนด	ผลการทดสอบ
รถเคลื่อนที่ผ่านไปได้	สามารถผ่านไปได้

4.2 ด้านสภาวะแวดล้อม

4.2.1 การทดสอบวัดความดังเสียงภายในห้องโดยสาร

เพื่อทดสอบระดับเสียงที่เกิดขึ้นภายในห้องโดยสาร ไม่รบกวนหรือเป็นอันตรายต่อการปฏิบัติงานของพลรบและพลประจำรถขณะทำการปิดประตูโดยสารทั้งหมด การทดสอบแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 13



รูปที่ 12 การทดสอบการไต่/ลงลาดชันที่มีความชัน 60%

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบวัดความดังเสียงภายในห้องโดยสารทั้งรถเคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่

เงื่อนไขของการทดสอบความดังเสียง	เกณฑ์ที่กำหนด (dB (A))	ค่าที่วัดได้ (dB (A))
รถไม่เคลื่อนที่	≤80	71.33
รถเคลื่อนที่	≤95	86.42

4.2.2 การทดสอบวัดอุณหภูมิภายในห้องโดยสาร

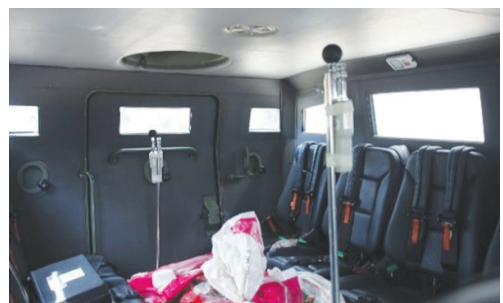
เพื่อทดสอบประสิทธิภาพด้านการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยสารของระบบปรับอากาศขณะปิดประตูยานเกราะล้อ 4x4 อเนกประสงค์ ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 14

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิภายในห้องโดยสารตามระยะเวลาที่กำหนด

เงื่อนไขของการทดสอบอุณหภูมิ	เกณฑ์ที่กำหนด (°C)	ค่าที่วัดได้ (°C)	หมายเหตุ
30 นาทีแรก	≤27	24.76	อุณหภูมิภายนอก 38.8 °C
1 ชม. 30 นาที		23.64	



รูปที่ 13 การทดสอบวัดความดังเสียงภายในห้องโดยสารโดยการติดอุปกรณ์วัดความดังและทำการวิ่งทดสอบทั้งขณะรถเคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่



รูปที่ 14 การทดสอบวัดอุณหภูมิภายในห้องโดยสารโดยทำการจอดตากแดดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

5. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอระเบียบวิธีทางวิศวกรรมศาสตร์ ตรรกะ และเป็นระบบ เพื่อใช้ในการวิจัย ออกแบบ และสร้าง ตลอดจนทดสอบ ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ โดยคำนึงถึงความต้องการของหน่วยผู้ใช้เป็นสำคัญ สหป. ได้นำกระบวนการวางแผนการจัดการผลิตภัณฑ์และองค์ความรู้ที่ได้มาจากการวิจัยและพัฒนา ยานเกราะล้อยาง 8x8 ประยุกต์ใช้ในการดำเนินกระบวนการวิจัยและพัฒนา ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ โดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ร่วมกับ บริษัท ซีเอสเอ็มทีเอสแอนดริบบอร์ จำกัด

จากการวิจัยและออกแบบระบบตัวถังและโครงสร้าง และสมรรถนะทางพลศาสตร์ ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ พบว่า จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ร่วมกับผลการจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยและพัฒนา ยานเกราะล้อยางสำหรับปฏิบัติการกึ่ง นย. ที่แผ่นเกราะสำหรับสร้างตัวถังต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 12 มม. สำหรับการป้องกันกระสุนตามมาตรฐาน STANAG 4569 ระดับ 2

การเลือกใช้เครื่องยนต์ซึ่งมีแรงม้า 300 Hp ควบคู่กับเกียร์และระบบส่งกำลังที่มีอัตราทดตามตารางที่ 2 และ 3 สามารถทำให้ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ ไต่ทางลาดชัน 60% ได้ และทำความเร็วสูงสุดได้มากกว่า 100 km/h ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ จะเห็นได้ว่า อัตราทดรวมของระบบสูงถึง 52.90 (Low Mode) ทำให้เครื่องยนต์มีแรงบิดที่มากกว่าแรงต้าน 41.83% ในการไต่ทางลาดชัน แต่จะมีความเร็วสูงสุดเพียง

51.62 km/h และเมื่อปรับอัตราทด Transfer Case เหลือ 1.09 (Hi Mode) ทำให้ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ สามารถทำความเร็วได้มากกว่า 100 km/h ได้ และจะมีความคล่องตัวสูงในการไต่ทางลาดชันหรือทางภูมิประเทศ เนื่องจากมีแรงบิดอย่างพอเพียง

ระยะ Wheel Base มีผลต่อสมรรถนะของรถ ยานเกราะ ดังนี้ ระยะ Wheel Base ที่ยาวมีเสถียรภาพมากเนื่องจากความสูงของ CG ต่ำ แต่ความสามารถในการวิ่งในที่ทุรกันดารจะต่ำ เพราะมุม Break-over Angle น้อย และความคล่องตัวจะต่ำกว่ารถที่มี Wheel Base ต่ำ ดังนั้น เมื่อรถ ยานเกราะลดระยะ Wheel Base ให้สั้นลงจะสามารถข้ามสิ่งกีดขวางได้ดีมากยิ่งขึ้น และมีวงเลี้ยวที่แคบขึ้น แต่ก็จะสูญเสียความมั่นคงและพื้นที่ภายในตัวรถเช่นกัน ซึ่งการออกแบบต้องคำนึงถึงภารกิจและลักษณะการใช้งานให้เหมาะสม การกำหนด Geometry เบื้องต้น โดยให้ความสูงใต้ท้องรถที่ 450 มม. ระยะฐานล้อที่ 3,400 มม. มีระยะ Break-over Angle อยู่ที่ 31.06 องศา ทั้งนี้ การข้ามสิ่งกีดขวางหรือการข้ามคูน้ำจะขึ้นอยู่กับความสูงของสิ่งกีดขวางและความลึกของขอบของคูน้ำด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือจากบริษัท ซีเอสเอ็มทีเอสแอนดริบบอร์ จำกัด ซึ่งได้ลงนามบันทึกความเข้าใจด้านการวิจัยและพัฒนา เทคโนโลยีและความร่วมมือในการผลักดันและดำเนินโครงการพัฒนาเทคโนโลยี ยานเกราะล้อยาง 4x4 อเนกประสงค์ เมื่อวันที่ 14 ก.พ. 62 และสำนักปลัดกระทรวงกลาโหมทำการทดสอบต้นแบบ ยานเกราะล้อยาง 4x4 ตามมาตรฐาน

ยุทธโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม ว่าด้วยรถเกราะล้อยาง (กมย.กท. 1/2563) และผ่านการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว สอดคล้องกับการวิจัยสมรรถนะตั้งต้นและพร้อมที่จะนำงานวิจัยนี้สู่สายการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเพื่อส่งมอบให้เหล่าทัพทั้งไทยและนานาชาติ

[7] R. N. Jazar, "Vehicle Dynamics Theory and Application," NY, USA: Springer, 2008.

[8] มาตรฐานยุทธโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม ว่าด้วยรถเกราะล้อยาง, คำสั่งกระทรวงกลาโหม (เฉพาะ) ที่ 178/63, พ.ศ. 2563.

7. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Hoenlinger, U. Glauch, G. Steger, "Modelling and Simulation in the Design Process of Armored Vehicles," in *RTO AVT Symp.*, Paris, France, Apr. 22 - 25, 2022.

[2] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, "รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยและพัฒนา ร่วมยานเกราะล้อยางสำหรับปฏิบัติการกิจของหน่วยบัญชาการนาวิกโยธิน," สทป., ปากเกร็ด, นนทบุรี, ไทย, ก.พ. 2564.

[3] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, "รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยและพัฒนา ร่วมยานเกราะล้อยาง 8x8 (ลำเลียงพล)," สทป., ปากเกร็ด, นนทบุรี, ไทย, มี.ค. 2567.

[4] *Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles*, STANAG 4569, NATO, 2004.

[5] U.S. Army Corp of Engineer, "*Desing to Resist Direct Fire Weapons Effects*," Feb. 1, 2017.

[6] J. - S. Zhao, X. Liu, Z - J. Feng, and J. S. Dai, "Design of an Achermann-type Steering Mechanism," in *Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sci.*, Nov. 2013, pp. 2549 - 2562.

การวิจัยและพัฒนาระบบสนทนาอัตโนมัติในข้อมูลป้องกันประเทศ

ชนาธิป ชื่นมนัส^{1*} วรากร เลื่องลือวุฒิ¹ กิตติกร วิริยะศาสตร์^{1, 2}

ผกามาศ วงศ์สาย¹ อุบล ธงสถาพรวัฒนา¹ วิชัย แผ้วเกษม¹ และ พันธุ์เทพ แก้วมงคล¹

วันที่รับ 24 เมษายน 2567 วันที่แก้ไข 24 มิถุนายน 2567 วันตอบรับ 24 กรกฎาคม 2567

บทคัดย่อ

จักรกลสนทนา (Chatbot) เป็นปัญญาประดิษฐ์ (AI) ประเภทหนึ่งซึ่งอยู่ในสาขาการประมวลภาษาธรรมชาติ (NLP) เป็นเทคโนโลยีส่วนการเรียนรู้ของเครื่องที่ช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถตีความ จัดการ และทำความเข้าใจภาษามนุษย์ได้ องค์การในปัจจุบันมีข้อมูลเสียงและความจำแนกจำนวนมากจากช่องทางการสื่อสารต่าง ๆ เช่น อีเมล ข้อความ พิตชวาทซ์เสียงลึ้มเดียว วิดีโอ เสียง และอื่น ๆ โดยใช้ซอฟต์แวร์ NLP เพื่อประมวลผลข้อมูลนี้โดยอัตโนมัติ ในปัจจุบันโมเดลภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Model: LLM) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ถูกฝึกด้วยข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อนำไปใช้ในการสร้างข้อความคล้ายกับที่มนุษย์เขียนหรือพูดได้ สามารถสร้างข้อความที่มีความสมเหตุสมผลและเป็นธรรมชาติเหมือนที่มนุษย์สร้าง แต่เนื่องจาก LLM ถูกเทรนมาจากข้อมูลที่มีอยู่จำนวนมาก การตอบคำถามที่อยู่บนพื้นฐานข้อมูลเฉพาะเจาะจงและเป็นปัจจุบันอาจไม่ถูกต้องแม่นยำ ซึ่งเรียกว่าเกิดการ “Hallucination” การเกิด Hallucination นี้เป็นความท้าทายสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงโมเดลภาษาขนาดใหญ่ เพราะอาจทำให้ผู้ใช้ได้รับข้อมูลที่ผิดพลาดและเกิดความเข้าใจผิด วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบระบบจักรกลสนทนาที่ข้อมูลบทความในวารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ว่าสามารถให้ความรู้และตอบคำถามแก่บุคคลภายนอกเกี่ยวกับข้อมูลของเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้แม่นยำเพียงใด โดยใช้เทคโนโลยีการดึงข้อมูลเชิงเพิ่มประสิทธิภาพ (Retrieval-Augmented Generation: RAG) ที่มีอยู่แล้วนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหา Hallucination ใน LLM ผลการทดลองพบว่า ระบบจักรกลสนทนาที่ใช้เทคโนโลยี RAG มีประสิทธิภาพในการตอบคำถามได้อย่างถูกต้องถึง 93% ซึ่งสามารถตอบคำถามที่มีข้อมูลบทความในวารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้ถูกต้องดีมาก

คำสำคัญ : จักรกลสนทนา, ปัญญาประดิษฐ์, การประมวลภาษาธรรมชาติ, โมเดลภาษาขนาดใหญ่, การดึงข้อมูลเชิงเพิ่มประสิทธิภาพ

¹ ส่วนงานวิศวกรรมกรรมการสื่อสารข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์และเครือข่ายคอมพิวเตอร์, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้แต่ง, อีเมล: chanatip.c@dti.or.th

Research and Development of Chatbot in National Defense Information

Chanatip Chuenmanus ^{1*} Warakorn Luangluewut ¹ Kittakorn Viriyasatr ^{1,2}
Pakamaj Wongsai ¹ Ubon Thongsatapornwatana ¹ Wichai Pawgasame ¹ and Pantape Kaewmongkol ¹

Received 24 April 2024, Revised 24 June 2024, Accepted 24 July 2024

Abstract

A chatbot is a type of Artificial Intelligence (AI) that falls within the field of Natural Language Processing (NLP). It is a machine learning technology that enables computers to interpret, manage, and understand human language. Nowadays, organizations have large amounts of data from various communication channels such as emails, text messages, social media news feeds, videos, audio, and more. They use NLP software to automatically process this data. Currently, Large Language Models (LLMs), which are technologies trained with large datasets to generate text similar to what humans write or speak, can create reasonable and natural - sounding text like that produced by humans. However, because LLMs are trained on vast amounts of existing data, their responses to specific, current information may not always be accurate, a phenomenon known as “Hallucination”. This hallucination is a significant challenge in the development and improvement of LLMs, as it may lead to users receiving incorrect information and developing misunderstandings. The purpose of this research is to experiment with a chatbot using information from the DTech (Thailand Defence Technology Journal) to determine its accuracy in providing knowledge and answering questions about defense technology information to external individuals. The chatbot applies Retrieval-Augmented Generation (RAG) technology to address the issue of hallucinations in large language models (LLMs). The experimental results showed that the chatbot utilizing RAG technology was highly effective, accurately answering questions 93% of the time, demonstrating a high level of correctness in responding to questions based on the DTech articles.

Keywords : Chatbot, Artificial intelligence, Natural language processing, Large language model, Retrieval-augmented generation

¹ Data Communication Division, Defence Technology Institute

² Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

* Corresponding author, E-mail: chanatip.c@dti.or.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในด้านปัญญาประดิษฐ์ หรือ Artificial Intelligence (AI) มีบทบาทในโลกของเราอย่างมากมาย ซึ่งหนึ่งในนั้นที่กำลังเป็นที่นิยมอยู่ คือ จักรกลสนทนา (Chatbot) ซึ่งเป็น AI ประเภทหนึ่งในสาขาการประมวลภาษาธรรมชาติ หรือ Natural Language Processing (NLP) เป็นเทคโนโลยี Machine Learning ที่ช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถตีความ จัดการ และทำความเข้าใจภาษาของมนุษย์ได้ องค์การในปัจจุบันมีข้อมูลเสียงและข้อความจำนวนมากจากช่องทางการสื่อสารต่าง ๆ เช่น อีเมล ข้อความ พิดข่าวโซเชียลมีเดีย วิดีโอ เสียง และอื่น ๆ โดยใช้ซอฟต์แวร์ NLP เพื่อประมวลผลข้อมูลนี้โดยอัตโนมัติ เพื่อวิเคราะห์เจตนาหรือความเชื่อมั่นในข้อความ และตอบสนองการสื่อสารของมนุษย์

โมเดลภาษาขนาดใหญ่ หรือ Large Language Model (LLM) เป็นโมเดลปัญญาประดิษฐ์ประเภทหนึ่งที่ได้รับการฝึกฝนบนชุดข้อมูลข้อความขนาดใหญ่ โมเดลเหล่านี้สามารถเรียนรู้รูปแบบและความสัมพันธ์ระหว่างคำวลี และประโยค ซึ่งทำให้สามารถทำงานประมวลผลภาษาธรรมชาติได้หลากหลาย โดยงานหนึ่งที่ LLM สามารถทำได้ดี คือ การตอบคำถาม ซึ่งเหมาะกับจุดประสงค์ในงานวิจัยนี้ แต่ในปัจจุบัน LLM ยังมีข้อจำกัดและปัญหาสำคัญคือ

1. การเกิดอาการหลอน (Hallucination)

หมายถึง การที่ LLM สร้างข้อความที่ไม่ถูกต้องเท็จ หรือไร้เหตุผล แม้ว่าจะดูเหมือนสมเหตุสมผลก็ตาม จะทำให้มนุษย์เกิดการเข้าใจผิดว่าเป็นข้อมูลที่ถูกต้องแล้วหากขาดการตรวจสอบ สาเหตุหลัก ๆ ที่ทำให้เกิด Hallucination อาจเกิดจากข้อมูลที่ผู้ใช้เรียนรู้มีข้อมูลที่ผิดพลาด เป็นเท็จ มีอคติ หรือไม่สมบูรณ์ ขาดความเข้าใจบริบทของข้อความ มีความคลุมเครือของภาษา

2. ปัญหาข้อมูลที่ LLM เรียนรู้ไม่เป็นปัจจุบัน

การที่ข้อมูลที่ LLM เรียนรู้ไม่เป็นปัจจุบัน อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพและความถูกต้องของโมเดล สาเหตุหลักที่ข้อมูลไม่เป็นปัจจุบัน เพราะข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ข้อมูลใหม่ ๆ ถูกสร้างขึ้น ข้อมูล

เก่าถูกลบ ข้อมูลที่มีอยู่ถูกแก้ไข LLM ที่ได้รับการฝึกฝนเกี่ยวกับข้อมูลเก่าอาจไม่สามารถสร้างผลลัพธ์ที่ถูกต้องหรือเป็นประโยชน์

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงมีการคิดค้นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มศักยภาพของ LLM ที่มีชื่อว่า Retrieval-Augmented Generation (RAG) โดยการเพิ่มคลังความรู้ที่เฉพาะเจาะจงและน่าเชื่อถือให้แก่ LLM ให้กลายเป็นผู้เชี่ยวชาญที่ครอบคลุมความรู้ในสายงานนั้น ๆ ตามข้อมูลที่เพิ่ม ส่งผลให้ LLM ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้น

1. แก้ปัญหาการเกิด Hallucination

RAG ช่วยให้ LLM ตรวจสอบข้อเท็จจริงของข้อความที่สร้างขึ้น โดยเปรียบเทียบข้อความกับข้อมูลในแหล่งความรู้ภายนอก LLM สามารถระบุและแก้ไขข้อผิดพลาดในข้อความหรือปฏิเสธข้อความที่ไม่ถูกต้อง RAG ช่วยให้ LLM เข้าใจบริบทของข้อความ โดยดึงข้อมูลเพิ่มเติมจากแหล่งความรู้ภายนอก LLM สามารถสร้างข้อความที่สอดคล้องกับบริบทของการสนทนาและมีความหมายมากขึ้น

2. แก้ปัญหาข้อมูลที่ LLM เรียนรู้ไม่เป็นปัจจุบัน

RAG ช่วยให้ LLM เข้าถึงข้อมูลที่เป็นปัจจุบันจากแหล่งความรู้ภายนอก เช่น ฐานข้อมูล เอกสาร เว็บไซต์ และ API ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้ LLM เรียนรู้ข้อมูลใหม่ ๆ และอัปเดตข้อมูลที่มีอยู่ให้ทันสมัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบระบบจักรกลสนทนาที่ทำการเรียนรู้ข้อมูลบทความในวารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศ หรือ Thailand Defence Technology Journal (DTech) ที่จัดทำโดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยทำการสร้าง RAG จากข้อมูลบทความในวารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศจำนวน 5 เล่ม แต่ละเล่มจะคัดบทความทั้งบทที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกันประเทศรวมแล้วได้ 22 บทความ จากนั้นจึงทำการทดสอบกับโมเดลแบบต่าง ๆ ที่มีการกำหนดพารามิเตอร์ต่างกัน เลือกโมเดลที่มีประสิทธิภาพในการตอบคำถามได้ดีที่สุดเพื่อจะนำไปสร้าง Chatbot ในการตอบคำถามของบุคคลทั่วไปที่ถามเกี่ยวกับข้อมูลบทความในวารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 Large Language Model (LLM)

การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) เป็นสาขาย่อยของปัญญาประดิษฐ์ (AI) ที่มุ่งเน้นไปที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอมพิวเตอร์กับภาษาของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเดล NLP ช่วยให้คอมพิวเตอร์เข้าใจ ตีความ และสร้างข้อความหรือคำพูดที่เหมือนมนุษย์ได้ โมเดลภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Model: LLM) เป็นโมเดล NLP ขั้นสูงภายในหมวดหมู่ของโมเดลภาษาที่ได้รับการฝึกล่วงหน้า (Pre-trained Language Models: PLM) ประสบความสำเร็จในด้านการปรับขนาดโมเดล คลังข้อมูลที่ถูกรวบรวมล่วงหน้า และทรัพยากรการคำนวณ [1]

Large Language Model (LLM) ประมวลผลข้อมูลและรูปแบบบทสนทนาได้คล้ายกับภาษาของมนุษย์ เป็นโมเดลที่มีขนาดใหญ่มาจากการฝึกฝนและวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้อความจำนวนมากจากแหล่งข้อมูลทั้งเอกสาร หนังสือ บทความ รวมถึงข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต LLM สามารถเรียนรู้และเชื่อมต่อกับคำได้คล้ายกับมนุษย์ อีกทั้งยังสามารถตีความจากข้อความในประโยคที่ไม่ชัดเจน โดยอาศัยการคาดเดาและการวิเคราะห์จากรูปแบบประโยค ทำให้การสื่อสารเป็นไปได้อย่างธรรมชาติ นอกจากนี้ LLM ยังสามารถขยายขนาดปรับตัว และมีความยืดหยุ่นสูง โดยใช้การตั้งค่าเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่ต้องปรับการตั้งค่าเลย [2]

LLM ได้รับการพัฒนาผ่านวิธีการเรียนรู้เชิงลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้สถาปัตยกรรม Transformer โดยตัว Transformer นี้เป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Google ในปี 2017 [3]

ตัวอย่างของ LLM เช่น ChatGPT [4], Codex [5], PaLM [6] ที่ก่อให้เกิดความสามารถในการประมวลผลภาษาธรรมชาติที่น่าสนใจ รวมถึงความสามารถในการปรับขนาดที่นำไปสู่การยอมรับ LLM ในงาน NLP ที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม LLM ส่วนใหญ่สามารถเข้าถึงได้ในรูปแบบกล่องดำ (Black Box) เท่านั้น ซึ่งเป็นเพราะ

มันไม่ใช่ซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สและเก็บไว้เป็นส่วนตัว เช่น ChatGPT เป็นต้น นอกจากนี้ ระดับพารามิเตอร์ขนาดใหญ่ต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก ซึ่งผู้ใช้ไม่อาจจะหาซื้อทรัพยากรเหล่านี้ได้เสมอไป แนวทางในการสร้าง LLM มี 2 แนวทางหลัก ดังนี้

1. Pre-trained Model เหมาะสำหรับการเริ่มต้นใช้ LLM เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดเวลา อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ขนาดของโมเดลและทรัพยากรระบบที่ต้องการใช้งาน ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการใช้โมเดล ทั้งค่าใช้จ่ายด้าน Computing Resource และค่าใช้จ่ายสำหรับโมเดลที่เป็นสินค้าพาณิชย์ ประเด็นด้านความเป็นส่วนตัวและความปลอดภัยของข้อมูล เมื่อข้อมูลถูกส่งไปยัง API ของโมเดลภายนอก ปัญหาเกี่ยวกับ “Hallucinations” ซึ่งหมายถึงโมเดลสร้างข้อมูลหรือคำตอบที่ไม่สะท้อนความจริงหรือไม่เกี่ยวข้องกับข้อมูลที่ได้รับ

2. การถ่ายโอนการเรียนรู้ (Transfer Learning) เป็นการนำข้อมูลในส่วนของ Pre-trained Model มาปรับแต่ง (Fine-tuning) ด้วยข้อมูลที่เฉพาะเจาะจง เพื่อลดปัญหาตัวอย่างเช่น Hallucinations และปัญหาด้านความเป็นส่วนตัวของข้อมูล เป็นต้น การเรียนรู้การถ่ายโอน ช่วยให้โมเดลตอบสนองต่อคำถามหรือคำขอที่เฉพาะเจาะจงได้ดีขึ้น เช่น การนำโมเดล Llama ที่เป็น Pre-trained Model มาใช้โดยตรงอาจไม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีในภาษาไทย แต่ถ้า Transfer Learning ด้วยข้อมูลภาษาไทยที่เฉพาะเจาะจง โมเดลสามารถทำนายผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องมากขึ้น นอกจากนี้ ควรคำนึงถึงการเตรียมข้อมูลสำหรับ Transfer Learning ให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมกับ Pre-trained Model และปรับให้เข้ากับภาษาหรือบริบทที่ต้องการด้วยการจัดเตรียมข้อมูลสำหรับ Fine-tuning ใน LLM ที่ใช้สถาปัตยกรรม Transformer จะมี “Attention” เป็นกลไกหลักที่ช่วยให้โมเดลสามารถเน้นและตีความความสำคัญของโทเคนต่าง ๆ ในข้อความได้ กลไกนี้ช่วยให้โมเดลสามารถประมวลผลข้อมูลที่ซับซ้อนและเข้าใจบริบทของข้อความได้ดีขึ้น

การ Fine-tuning เป็นกระบวนการที่เราปรับแต่ง Pre-trained Model ให้เข้ากับงานหรือบริบทเฉพาะ ซึ่งในกระบวนการนี้ความสามารถของโมเดลในการใช้กลไก Attention จะถูกปรับให้เข้ากับข้อมูลใหม่ด้วยการ Fine-tuning เพื่อให้โมเดลเรียนรู้วิธีการให้น้ำหนักและตีความข้อความ และความสำคัญของโทเคนในบริบทที่เฉพาะเจาะจงมากขึ้น การจัดเตรียมข้อมูลสำหรับ Fine-tuning ใน LLM ต้องดำเนินการอย่างรอบคอบเพื่อรักษาความหมาย (Semantic Meaning)

ข้อควรระวังหลักคือ เทคนิคที่ใช้ใน NLP แบบดั้งเดิม เช่น Stop-words Removal, Stemming, Truncation อาจทำให้ข้อความสูญเสียความหมายที่แท้จริงได้ ตัวอย่างเช่น การตัดคำหรือประโยค (Truncation) จาก “เมื่อเช้าฉันไปโรงเรียน และพบว่าลิ้มหนังสือไว้ที่บ้าน” เป็น “เมื่อเช้าฉันไปโรงเรียน” ทำให้สูญเสียประเด็นหลักของเรื่องราว เป็นต้น

จากการศึกษาที่มีอยู่ได้พิสูจน์แล้วว่าความสามารถของ LLM สามารถใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้นด้วยวิธีการโต้ตอบที่ออกแบบมาอย่างพิถีพิถัน โดยมีตัวอย่างดังนี้

1. GenRead [7] ใช้ Prompt กับ LLM เพื่อสร้างบริบทแทนที่การปรับใช้ตัวดึงข้อมูล (Retriever) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า LLM สามารถดึงความรู้ภายในโดยการใช้ Prompt โดยที่ Prompt คือข้อความที่ส่งให้กับ LLM โดยคาดหวังให้ LLM ตอบกลับหรือทำอะไรบางอย่างตามที่เรากำลังต้องการ โดย Prompt อาจจะประกอบไปด้วยคำสั่ง คำถาม หรือแม้แต่การบอกเล่าด้วยข้อมูล

2. ReAct [8] และ Self-Ask [9] ผสมผสาน Chain-of-Thought (CoT) ซึ่งเป็นเทคนิคที่จะแบ่งคำถามที่ซับซ้อนออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เป็นตรรกะซึ่งเลียนแบบขบวนการความคิดที่เป็นลำดับและการโต้ตอบ (Interactions) ด้วยเว็บ API นอกจากนี้ ReAct อาศัยเพียงการสร้าง Prompt เท่านั้น ดังนั้น ReAct เป็นพื้นฐานใหม่สำหรับงานเชิงโต้ตอบ

3. Demonstrate-Search-Predict (DSP) [10] กำหนดไปป์ไลน์ (Pipeline) ที่ซับซ้อนระหว่าง LLM และ

Retriever ซึ่งต่างจาก ReAct ตรงที่ DSP ผสมผสาน Prompts สำหรับการสุ่มกลุ่มตัวอย่าง (Demonstration Bootstrap) นอกเหนือจากการ Multihop Breakdown และ Retrieval (Multihop Breakdown และ Retrieval เป็นกระบวนการรับรู้ใน AI NLP ที่ข้อมูลจะถูกรวบรวมและส่งเคราะห์ข้ามบริบทหรือคลังความรู้ โดยเกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงขั้นตอนการอนุมานต่าง ๆ เพื่อให้ได้คำตอบที่ครอบคลุม ช่วยเพิ่มความเข้าใจและการแก้ปัญหา)

แม้จะมีความคาดหวังในการตั้งค่า LLM ให้เป็นศูนย์หรือปรับตั้งค่าเพียงเล็กน้อย แต่ในบางครั้งพฤติกรรมของ LLM ก็จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนมาก ดังนั้นแนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้คือการต่อท้ายด้วยโมเดลขนาดเล็กที่สามารถฝึกได้ไว้ด้านหน้าหรือด้านหลัง LLM โดยโมเดลขนาดเล็กนี้เป็นส่วนหนึ่งของพารามิเตอร์ของระบบที่สามารถปรับแต่งอย่างละเอียด (Fine-tuned) เพื่อการปรับให้เหมาะสม (Optimization) ได้

4. RePlug [11] ถูกเสนอเพื่อ Fine-tune ตัว Retriever แบบ Dense สำหรับ Frozen LLM หรือไม่ต้องการปรับค่า LLM ใน Retrieve-then-read Pipeline ตัว Retriever ได้รับการฝึกภายใต้การดูแลของ LLM เพื่อรับเอกสารที่เหมาะสมสำหรับ LLM ด้วยจุดประสงค์เดียวกัน Directional Stimulus Prompting [12] ใช้แบบจำลองขนาดเล็กเพื่อกระตุ้น LLM เช่น คำสำคัญ (Keywords) สำหรับการสรุป หรือการดำเนินการสนทนาสำหรับการสร้างการตอบสนอง ซึ่งได้รับการอัปเดตตามคะแนนของ LLM เป็นตัวกำหนด

2.2 Retrieval Augmented Generation (RAG)

เป็นเทคนิคที่ใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของ LLM ให้ดีขึ้น โดยสร้างข้อความที่เสริมด้วยการเรียกค้นข้อมูล ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ฐานข้อมูลภายนอกเพื่อช่วยให้โมเดลภาษาขนาดใหญ่สามารถสร้างข้อความที่มีความถูกต้องและมีความหลากหลายได้ โดยปกติโมเดลที่ใช้ในการสร้างข้อความจะพึ่งพาข้อมูลที่ได้รับการฝึกฝนมาเพื่อสร้างข้อความใหม่ แต่ RAG ยกระดับการทำงานนี้

ขึ้นไปอีกขั้น โดยการค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ก่อน แล้วจึงใช้ข้อมูลนั้นเป็นพื้นฐานในการสร้างข้อความ

RAG มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วหลังจากปี 2020 เมื่อมีการปล่อย GPT-3 และ ChatGPT ออกมา ซึ่งเป็นโมเดลภาษาขนาดใหญ่ที่มีความสามารถสูงมีแนวคิดหลักสามประเภท คือ Naive RAG, Advanced RAG และ Modular RAG ซึ่งแตกต่างกันตามวิธีการเรียกค้นข้อมูล วิธีการสร้างข้อความและวิธีการปรับปรุงโมเดล ซึ่งมีการวิจัยเรื่องนี้เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน โดย RAG มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1. Retriever 2. Generator และ 3. Augmentation Method ซึ่งมีเทคโนโลยีหลายอย่างที่ใช้ในแต่ละส่วน เช่น Embedding, Re-ranking, Compression, Alignment, Adapter, Validation ฯลฯ

การทำงานของ RAG สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่

1. ขั้นตอนการค้นหาข้อมูล (Retrieval Step)

โมเดลจะค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากฐานความรู้ภายนอก เช่น ฐานข้อมูลข้อความออนไลน์ เอกสาร หรือเว็บไซต์ต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าให้กับโมเดลสร้างข้อความจากฐานข้อมูลหรือเอกสารที่มีอยู่ โดยอาศัยคำหรือประโยคที่ได้รับเป็นคำแนะนำ

2. ขั้นตอนการสร้างข้อความ (Generation Step)

ข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการค้นหาจะถูกนำมาเป็นอินพุตในการสร้างข้อความใหม่ โดยอาศัยโมเดลที่มีความสามารถในการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และเทคนิค NLP (Natural Language Processing) เพื่อผลิตข้อความที่ทั้งเกี่ยวข้องและเป็นธรรมชาติ เช่น Transformer หรือ GPT (Generative Pre-trained Transformer) โดยโมเดลเหล่านี้จะถูกฝึกให้เข้าใจและสร้างข้อความได้ดีในหลาย ๆ ประเภท เช่น แปลภาษา สร้างคำบรรยาย และการตอบคำถาม เป็นต้น

เมื่อมีการรวมการสร้างข้อความและการค้นหาข้อมูลเหล่านี้เข้าด้วยกัน โมเดลที่ได้จะมีความสามารถในการสร้างเนื้อหาที่มีความเชื่อถือได้มากขึ้น โดยมีความรู้

และข้อมูลจากฐานความรู้ภายนอกเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาที่สร้างขึ้น เช่น การตอบคำถามโดยใช้ข้อมูลจากฐานความรู้เพื่อเสริมสร้างคำตอบที่มีความเชื่อถือมากขึ้น หรือการสร้างบทความโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการค้นหาข้อมูลจากฐานข้อมูลออนไลน์

RAG สามารถประยุกต์งานในหลายแอปพลิเคชัน เช่น การตอบคำถามอัตโนมัติ การสร้างเนื้อหาตามคำขอ รวมถึงการสร้างบทความหรือรายงาน ซึ่งข้อดีของ RAG คือการที่สามารถผลิตข้อความที่แม่นยำและรวดเร็วขึ้น โดยอาศัยข้อมูลที่มีความเกี่ยวข้องสูง ทำให้เป็นเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาโมเดล AI ในอนาคต

การเปรียบเทียบระหว่าง RAG กับ Fine-tuning

RAG (Retrieval Augmented Generation) และ Fine-tuning เป็นเทคนิคสองแบบที่ใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของ LLM แต่มีวิธีการทำงานที่แตกต่างกัน โดยที่ RAG คล้ายกับการให้โมเดลเรียนหนังสือ ทำให้สามารถเรียกค้นข้อมูลตามคำถามที่เฉพาะเจาะจงได้ วิธีการนี้เหมาะสำหรับสถานการณ์ที่โมเดลต้องการตอบคำถามที่เฉพาะเจาะจงหรือแก้ไขงานเกี่ยวกับการเรียกค้นข้อมูล โดยโมเดลจะดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูลภายนอกและจะใช้ข้อมูลที่ดึงมาเพื่อสร้างข้อความ

ส่วน Fine-tuning เป็นการปรับโมเดล LLM ที่มีอยู่โดยใช้ชุดข้อมูลเฉพาะโดเมน โมเดลจะเรียนรู้จากตัวอย่างในชุดข้อมูลที่เหมาะสำหรับงานเฉพาะ เช่น โมเดล LLM ที่ผ่านการ Fine-tuning บนชุดข้อมูลบทความข่าว สามารถเขียนบทความข่าวได้ดีกว่า Fine-tuning ที่ทำการปรับแต่งโมเดลที่มีอยู่ โดยใช้ชุดข้อมูลเฉพาะเจาะจงกับงานที่ต้องการเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดลให้เหมาะสมกับงานนั้น ๆ มุ่งเน้นการปรับแต่งโมเดลให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในงานที่ต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากแหล่งฐานความรู้ภายนอก ดังนั้น RAG และ Fine-tuning สร้างได้ดังนี้

Fine-tune เมื่อต้องการข้อมูลเฉพาะเจาะจงโมเดล (ความรู้ในด้านเฉพาะ สไตล์ของโมเดลความคาดหวัง

ในรูปแบบของผลลัพธ์ เป็นต้น)

RAG เมื่อต้องการให้คำตอบมีความเป็นจริง (คำตอบต้องถูกต้อง ข้อมูลเปลี่ยนแปลงบ่อย คำตอบต้องมีการอ้างอิง มีขอบเขตกว้างเกินไปสำหรับความรู้ที่มีพารามิเตอร์ เป็นต้น) ที่สำคัญคือ ถ้าชุดข้อมูลมีขนาดใหญ่ทรัพยากรที่จำเป็นสำหรับการฝึกหรือทำการ Fine-tune โมเดลอาจมีขนาดใหญ่ เช่นกัน RAG และ Fine-tuning สามารถเสริมกันได้ ช่วยเพิ่มความสามารถของโมเดลในระดับต่าง ๆ ในบางสถานการณ์การผสมผสานเทคนิคสองอย่างนี้สามารถทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด กระบวนการที่จะปรับปรุงด้วย RAG และ Fine-tuning อาจต้องทำซ้ำหลายรอบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ

RAG Framework รูปแบบการวิจัย Naive RAG แสดงถึงวิธีการแรกเริ่มที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางหลังจากการใช้ ChatGPT อย่างแพร่หลาย Naive RAG ปฏิบัติตามกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ประกอบด้วย การจัดทำดัชนี การเรียกค้น และการสร้าง ถือว่าเป็น “Retrieve-Read” Framework กระบวนการทำงานของ RAG ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. Indexing (การจัดสรรดัชนี)

เนื้อหาที่ใช้ในการสร้าง (Generation) จะถูกจัดเก็บไว้ในรูปแบบของดัชนี เพื่อให้สามารถทำการสืบค้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลที่จัดเก็บในดัชนีสามารถเป็นข้อความอย่างเดียวหรือรวมข้อมูลภาพหรือเสียงก็ได้ เพื่อให้สามารถใช้ในกระบวนการ Generation ได้อย่างหลากหลาย โดยทำความสะอาดและแยกข้อมูลออกเป็นข้อความธรรมดาที่ไม่มีโครงสร้าง และแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วน ๆ ที่อาจจะมีความยาวเหมาะสมสำหรับโมเดลในการทำงาน จากนั้นใช้ตัวฝังข้อมูล que เลือกเพื่อแปลงข้อมูลเหล่านั้นเป็นรูปแบบเวกเตอร์ เก็บไว้ในรูปแบบดัชนีข้อมูล

2. Retrieval (การสืบค้น)

เป็นขั้นตอนที่ระบบจะทำการสืบค้นข้อมูลที่เก็บไว้ในดัชนีตามคำค้นหาหรือเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อให้ได้เนื้อหาที่เกี่ยวข้องมากที่สุด การสืบค้นนี้สามารถ

ใช้วิธีการต่าง ๆ ได้ เช่น การใช้คำค้นหาเป็นข้อความ การใช้ภาพเป็นข้อมูลเข้าช่วยในการค้นหา หรือแม้กระทั่งการใช้รายการเนื้อหาที่มีเนื้อความคล้ายคลึงกัน เป็นต้น Retrieval จะใช้ข้อมูลเดียวกันกับขั้นตอน Indexing เพื่อฟังคำถามของผู้ใช้และเรียกค้นเอกสารที่คล้ายกันที่สุดตามเกณฑ์ความคล้ายคลึงที่กำหนดไว้ บางเกณฑ์ที่นิยมใช้คือ Cosine Similarity, Euclidean Distance, Dot Product ซึ่งแต่ละเกณฑ์มีข้อดีในรูปแบบของตัวเอง

3. Generation (การสร้าง)

เมื่อข้อมูลที่เกี่ยวข้องถูกสืบค้นและเลือกมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างเนื้อหาใหม่จากข้อมูลที่ถูกรวบรวมเหล่านั้น การสร้างนี้อาจใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อสร้างเนื้อหาที่มีความสมเหตุสมผลและมีคุณภาพ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากขั้นตอน Retrieval เป็นข้อมูลอ้างอิง

ในขั้นตอนการเลือกเอกสารที่จะส่งให้กับ LLM สามารถทำได้โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ความสำคัญ (Importance)

เอกสารที่มีความสำคัญสูงสุดสำหรับคำถามหรืองานที่กำลังดำเนินการ ความสำคัญของเอกสารสามารถวัดได้จากคะแนนการค้นคืน (Retrieval Score) ความสัมพันธ์กับคำถามว่ามีความสอดคล้องเพียงใดกับคำถามนั้น ๆ

2. ความหลากหลาย (Diversity)

เอกสารที่มีความหลากหลายในเนื้อหา ไม่ให้มีข้อมูลที่ซ้ำซ้อนกันมากเกินไป การใช้เอกสารที่มีความหลากหลายจะช่วยให้ LLM ได้รับมุมมองที่หลากหลาย

3. ความยาก (Difficulty)

เลือกเอกสารที่มีระดับความยากที่เหมาะสมกับ LLM หากเอกสารยากเกินไป อาจทำให้ LLM ไม่สามารถตอบคำถามได้ตามที่ต้องการ

4. ความยาว (Length)

พิจารณาความยาวของเอกสาร หากเอกสารยาวมาก อาจต้องตัดสั้นลงเพื่อให้พอดีกับ Context Window ของ LLM โดยการเลือกเอกสารที่เหมาะสมสำหรับ LLM ต้องพิจารณาความสำคัญ ความหลากหลาย

ความยาก และความยาวให้ดี เพื่อให้ LLM สามารถสร้างข้อความที่มีความถูกต้องและครอบคลุมได้

2.3 การออกแบบคำสั่งที่ใช้ในการสื่อสารกับโมเดล (Prompt Engineering)

ในระบบ Artificial Intelligence (AI) ที่เน้นในสาขา Natural Language Processing (NLP) เป็นการพัฒนาและปรับปรุงขั้นตอนการสร้าง Prompt เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการสั่งการโมเดล LLM ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดย Prompt Engineering เกี่ยวข้องกับการเพิ่มทักษะและเทคนิคในการทำความเข้าใจ การจำกัดความสามารถ และการเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดล LLM การเขียนคำอธิบายกับสิ่งที่เราต้องการ เพื่อสั่งการให้กับ AI โดยรายละเอียดทั้งหมดจะถูกบรรจุอยู่ใน Prompt ทั้งคำสั่ง บริบท ตัวอย่าง วิธีการ รูปแบบของผลลัพธ์ และข้อความ Input ในรูปแบบคำถาม

ส่งให้ AI ฟัง LLM เป็นผู้ตอบคำถามโดยทั่วไป Prompt Engineering จะเป็นการแปลงรายละเอียดของงานต่าง ๆ ให้เป็น ชุดข้อมูล Prompt เตรียมไว้สำหรับการใช้ในการเทรนโมเดลทางภาษาให้มีความสามารถเฉพาะด้านเพิ่มขึ้นตามต้องการ เรียกว่า “Prompt-Based Learning” หรือ “Prompt Learning” โดยหัวข้อ Prompt Engineering ที่น่าสนใจ ได้แก่

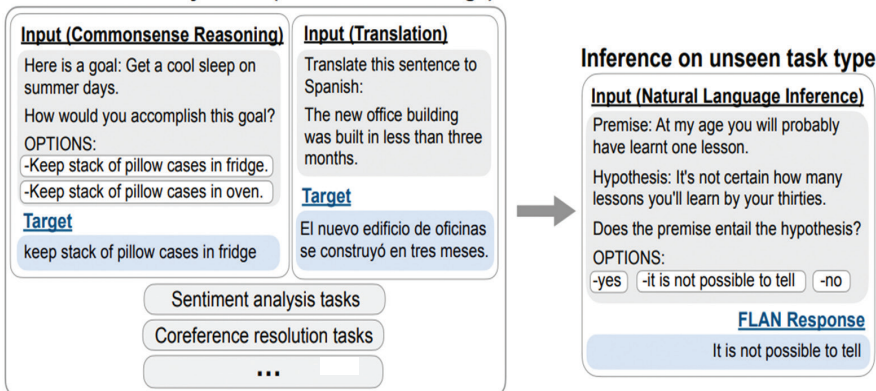
1) **Zero-shot** เป็นเทคนิคหนึ่งในขั้นตอน Prompt Engineering ที่ใช้ในการสร้าง Prompt ซึ่ง LLM

เรียนรู้และเข้าใจคำถามหรือคำสั่งที่ไม่เคยเห็นมาก่อน โดยไม่ต้องมีข้อมูลการเรียนรู้เพิ่มเติมในกระบวนการเทรน ในสถานการณ์ Zero-shot โมเดลจะต้องทำการเรียนรู้และเข้าใจจากคำถามหรือคำสั่งที่เข้ามาในขณะที่มีข้อมูลอยู่แค่ในรูปแบบของ Prompt เท่านั้น

โมเดลจะพยายามอธิบายหรือตอบโดยใช้ความเข้าใจจาก Prompt เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีข้อมูลการเรียนรู้เพิ่มเติมที่เข้ามาช่วยในกระบวนการเรียนรู้หรือเทรน (Train) [13] ตัวอย่างเช่น กรณีของ Sentiment Analysis สามารถใช้หลาย ๆ ย่อหน้า (Paragraphs) ที่มีความคิดเห็นต่างกัน และ Label ในแต่ละ Classes จากนั้น Train Model (เช่น RNN "Recurrent Neural Network" กับข้อมูลข้อความเหล่านี้) เพื่อรับข้อความ Input ให้ผลลัพธ์การ Classify เป็น Output ซึ่งจะพบว่าโมเดลดังกล่าวไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ หากเราเพิ่ม Class ใหม่ ซึ่งกรณีนี้โมเดลจะต้องถูกเทรนใหม่ โดยตัวอย่างการปรับคำสั่งของ Zero-shot แสดงดังรูปที่ 1

2) **Few-shot** หมายถึง การฝึกโมเดลหรือระบบด้วยข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยมาก ๆ เพื่อทดสอบความสามารถของโมเดลในการเรียนรู้และสร้างความเข้าใจใหม่ต่อข้อมูลใหม่ของการฝึกโมเดลภาษา [14] ตัวอย่างเช่น GPT-3 หรือ FLAN การฝึกแบบ Few-shot จะใช้ข้อมูลตัวอย่างเพียงไม่กี่ตัวอย่างเท่านั้นในแต่ละกลุ่มงานหรือชุดข้อมูล ซึ่งอาจเป็นเพียงหลายตัวอย่าง

Finetune on many tasks (“instruction-tuning”)



รูปที่ 1 การปรับคำสั่งโดยใช้ FLAN Zero-shot [13]

ถึงสองตัวอย่างต่อกลุ่มงาน โดยปกติแล้วข้อมูลตัวอย่างที่มีจำนวนน้อยนี้อาจไม่เพียงพอสำหรับโมเดลที่ฝึกในการเรียนรู้แบบจำลองทั่วไป แต่การฝึกโมเดลแบบ Few-shot ช่วยให้โมเดลเรียนรู้ได้โดยความสามารถในการทำงานบางอย่าง ใช้ข้อมูลน้อยกว่าการฝึกแบบปกติโดยส่วนมาก ซึ่งจะต่างจาก Zero-shot ตรงที่ Zero-shot จะไม่มีข้อมูลตัวอย่างแต่ Few-shot จะมีข้อมูลตัวอย่างมากกว่า Zero-shot ดังตัวอย่างรูปที่ 2

Zero-shot

The model predicts the answer given only a natural language description of the task. No gradient updates are performed.

1	Translate English to French:	← task description
2	cheese =>	← prompt

Few-shot

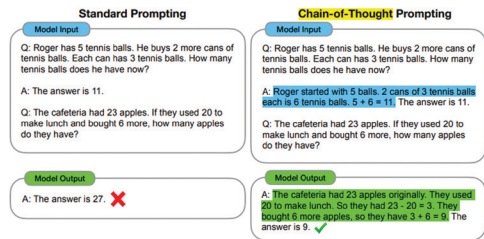
In addition to the task description, the model sees a few examples of the task. No gradient updates are performed.

1	Translate English to French:	← task description
2	sea otter => loutre de mer	← examples
3	peppermint => menthe poivrée	←
4	plush girafe => girafe peluche	←
5	cheese =>	← prompt

รูปที่ 2 การทำงานของ Few-shot เมื่อเทียบกับ Zero-shot [14]

3) Chain-of-Thought (CoT) เป็นวิธีที่ให้โมเดลนั้นเข้าใจในภาพรวมของวัตถุประสงค์ในคำถามมากขึ้น ก่อนที่จะไปถึงผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยที่วิธี CoT จะทำการแตกงานเป็นขั้นย่อย ๆ แต่ละขั้นจะทำต่อจากขั้นตอนก่อนหน้า ในการที่จะช่วยให้โมเดลเข้าใจภาพรวมวัตถุประสงค์ของงานและเชื่อมโยงความเข้าใจระหว่างข้อมูลหลายข้อมูลในลำดับของคำถามจนสามารถทำนายหรือตอบคำถามต่อไปตามลำดับของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ด้วยการให้โมเดลมีเวลาประมวลผลมากขึ้น และการใช้ CoT Prompt สามารถช่วยให้โมเดลเข้าใจงานได้ดีขึ้น และสร้างคำตอบที่แม่นยำ ตรงประเด็น

มากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของ LLM ทำให้เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย [15] โดยหลักการการทำงานของ CoT Prompt ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทำงานของ CoT Prompt เมื่อเทียบกับวิธี Prompt โดยทั่วไป [15]

3. วิธีการดำเนินการ

3.1 Data Collection

Data Collection คือ กระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ประมวลผล หรือจัดเก็บเพื่อใช้ในการตัดสินใจ การเก็บข้อมูลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้อง การสำรวจแบบสอบถาม การเก็บข้อมูลจากฐานข้อมูลออนไลน์ หรือการเก็บข้อมูลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่แล้ว การเก็บข้อมูลที่ถูกต้องและเพียงพอเป็นสิ่งสำคัญในการใช้ข้อมูลให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการทำงานต่อไป สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลบทความในวารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศ หรือ DTech (Thailand Defence Technology Journal) จำนวน 5 เล่ม แต่ละเล่มจะคัดทั้งบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกันประเทศ รวมแล้วได้ 22 บทความ ซึ่งข้อมูลบทความอยู่ในรูปแบบไฟล์ pdf เพื่อนำมาแปลงเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของ Plain Text ก่อนที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

โดย Plain Text คือ ความหมายทางวิทยาการคอมพิวเตอร์ เป็นข้อความที่มีลักษณะของตัวอักษรธรรมดา ตัวอักษรแบบปกติทั่วไปที่ไม่มีการจัดรูปแบบใด ๆ เช่น ตัวเอียง ตัวหนา การขีดเส้นใต้ หรือการจัดหน้าแบบพิเศษ เป็นต้น

3.2 Data Preprocessing

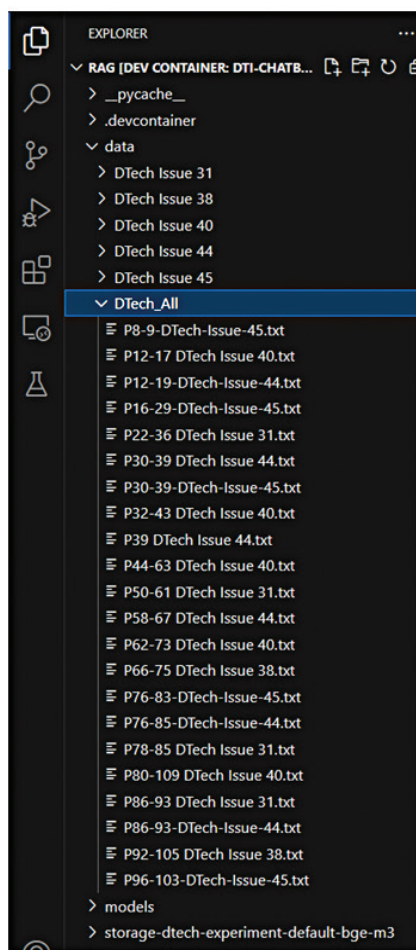
ก่อนที่จะนำข้อมูล Plain Text ที่ได้ไปใช้งาน จะต้องดำเนินการในขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing) เสียก่อน ซึ่งการเตรียมข้อมูลหมายถึง การทำความสะอาดและตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล ทำข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้อง หรือปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อให้ข้อมูลอยู่ในลักษณะ หรือรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานต่อในขั้นตอนอื่น อย่างมีประสิทธิภาพ หากเตรียมข้อมูลไม่ดีพอจะส่งผล ให้ผลการวิเคราะห์หรือการตีความจากการนำข้อมูล ไปใช้ผิดไปจากที่ควรจะเป็น ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ดำเนินการ เตรียมข้อมูลตามขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และการสะกดคำ
2. ตรวจสอบและทำความสะอาดข้อความ โดยการลบเครื่องหมาย หรือสัญลักษณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องหมายคำสั่งที่ใช้ในการเขียนภาษาโปรแกรมมิ่งต่าง ๆ หรือการแสดงผล HTML เป็นต้น
3. จะต้องไม่มีการแบ่งบรรทัดระหว่างข้อความที่อยู่ในย่อหน้า (Paragraph) เดียวกัน
4. ระหว่างย่อหน้าให้คั่นด้วยการขึ้นบรรทัดใหม่ โดยตัวอย่างการเตรียมข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อเตรียมข้อมูลของบทความทั้งหมดที่คัดเลือกเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลส่วนนี้จะกลายเป็นคลังข้อมูลเอกสารสำหรับการสร้างคำตอบด้วยเทคนิค RAG ต่อไป

การสร้าง Prompts

Prompts เป็นข้อความที่ถูกส่งให้กับโมเดล โดยคาดหวังให้โมเดลตอบกลับหรือทำอะไรบางอย่างตามที่เราร้องขอ ซึ่ง Prompt อาจจะประกอบไปด้วยคำสั่ง คำถาม หรือแม้แต่ว่าการบอกเล่าด้วยข้อมูล เป็น Prompts จากวารสารเกี่ยวกับเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่จัดทำโดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) แบ่งลักษณะของ Prompts ออกเป็น 5 ลักษณะ ดังนี้

1. คำถามมีคำตอบระบุในเอกสาร (Extraction Test) ตัวอย่างคำถาม เช่น “หุ่นยนต์ตัวแรกของประเทศไทย



รูปที่ 4 ตำแหน่งที่อยู่ของไฟล์เดอร์ (Folder Path) ที่จัดเก็บไฟล์ Plain Text ในการทำ Data Preprocessing

สร้างขึ้นในปี พ.ศ. อะไร และมีชื่อว่าอะไร โดยบรรยาย คุณลักษณะของหุ่นยนต์ตัวดังกล่าวด้วย” “ยกตัวอย่างภารกิจทางการทหารของระบบยานไร้คนขับ”

2. คำถามมีคำตอบระบุในเอกสารแต่ต้องใช้ ข้อมูลหลาย ๆ ส่วนในเอกสารมาช่วยตอบ (Logic Test) ตัวอย่างคำถาม เช่น “หุ่นยนต์แสนดีสามารถบรรทุก สิ่งของที่หนัก 81 กิโลกรัม ได้หรือไม่ และสามารถทำงาน ต่อเนื่องนาน 11 ชั่วโมงได้หรือไม่” “ฉากฝึกแบบรู้ระยะ สามารถสร้างฉากให้เป็นสภาพแวดล้อมของป่าที่มีศัตรู (ฉากสนามฝึกสนามรบเสมือนจริง) ได้หรือไม่”

3. คำถามที่ไม่มีคำตอบระบุอยู่ในเอกสาร (Hallucination Test) ตัวอย่างคำถามเช่น “ระบบในการจ่ายไฟฟ้าผ่านรางสำหรับหุ่นยนต์น้องแมงมุม หรือ Sevy Bot มีหลักการอย่างไร” “5 อันดับประเทศที่มีจำนวนและขีดความสามารถของดาวเทียมมากที่สุดในโลก”

4. คำถามที่ต้องการคำตอบแบบเดิมแต่เปลี่ยนรูปประโยคคำถาม (Robustness Test) ตัวอย่างคำถามเช่น “หุ่นยนต์ตัวแรกของประเทศไทยถูกสร้างขึ้นในปีใดและมีชื่อเรียกว่าอะไร พร้อมทั้งอธิบายลักษณะเด่นของหุ่นยนต์ตัวนั้นด้วย” “สพ. ได้พัฒนาและสร้างต้นแบบหุ่นยนต์ที่ใช้สำหรับงานกู้ภัยและกู้วัตถุระเบิดขึ้นมาทั้งหมดกี่รุ่น รุ่นใดบ้างที่ได้รับการพัฒนา”

5. คำถามที่มีคำตอบระบุในเอกสารแต่ต้องการคำตอบตามคำแนะนำที่กำหนด เช่น ให้ตอบเป็นภาษาอังกฤษ ให้หาค่าเฉลี่ยของคำตอบ (Instruction Test) ตัวอย่างคำถาม เช่น “แนะนำสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถนำไปใช้ในการสำรวจแนวท่อเดินน้ำมันและก๊าซธรรมชาติที่วางทอดเป็นแนวยาวใต้ท้องทะเลได้” “กรุณาเลือกคุณลักษณะเด่นของหุ่นยนต์ตรวจการณ์ขนาดเล็ก รุ่น NOONAR Version 4 มา 3 ข้อ”

3.3 Data Testing

ในวิธีการทดสอบผลของโมเดลนั้นจะมีการวัดผลดังนี้

1. หากมีการตอบคำถามถูกต้องทั้งหมดจะได้คะแนน 1 คะแนน ต่อ 1 คำถาม
2. หากมีการตอบคำถามผิดบางส่วนหรือตอบคำถามไม่ครบถ้วนจะได้คะแนน 0.5 คะแนน ต่อ 1 คำถาม
3. หากมีการตอบคำถามผิดทั้งหมดจะได้คะแนน 0 คะแนน ต่อ 1 คำถาม

***หมายเหตุ** คำถามประเภทไม่มีคำตอบระบุอยู่ในเอกสาร (Hallucination Test) หากมีการตอบในเชิงความหมายว่า ไม่พบคำตอบในเอกสาร จะได้ 1 คะแนน หากตอบนอกเหนือจากนี้ จะได้ 0 คะแนน ส่วนคะแนน 0.5 จะไม่เกิดในคำถามประเภทนี้

สมการ Accuracy เขียนได้ดังนี้

$$\%Accuracy = 100 \times \frac{TS}{AQ} \quad (1)$$

เมื่อ

Total score of answers (TS) = ผลคะแนนรวมของคำตอบ
All questions (AQ) = คำถามทั้งหมด

จากนั้นการคำนวณ %Accuracy จะคำนวณดังสมการที่ (1) คือนำคะแนนในแต่ละข้อมารวมกันเทียบกับคำถามทั้งหมดโดยโมเดลที่ใช้นั้นโมเดลที่ใช้กำหนด Chunking เป็น Default และ Semantic

3.4 Model Testing

การทดสอบจะใช้ LlamaIndex ซึ่งเป็น Data Framework สำหรับสร้าง LLM แอปพลิเคชัน Llama Index มีเครื่องมือสำหรับการนำเข้าสู่ข้อมูล การทำดัชนี และการสืบค้นสำหรับ LLM รวมถึง RAG โดยทำการติดตั้ง LlamaIndex เป็นไลบรารีใน Python และในการทดสอบจะมีการกำหนดพารามิเตอร์ ดังนี้

1. Chunking

เป็นกระบวนการแบ่งข้อมูลของข้อความขนาดใหญ่หรือเอกสารออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่า "Chunks" เพื่อให้สามารถจัดการและประมวลผลได้ง่ายขึ้น ในขั้นตอนการค้นคืนข้อมูล (Retrieval) ระบบจะค้นหา Chunk ที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลเพื่อใช้เป็นบริบทในการสร้างข้อความและในขั้นตอนการสร้างข้อความ (Generation) ระบบจะใช้ข้อมูลจาก Chunk ที่ค้นคืนมาเพื่อช่วยในการสร้างข้อความที่สมบูรณ์และสอดคล้องกับข้อมูลที่มีอยู่ ขนาดของ Chunk กำหนดโดยจำนวนคำหรือโทเคนที่อยู่ในแต่ละส่วนย่อยของข้อมูล เช่น การแบ่งบทความเป็นหลาย ๆ ส่วนย่อยที่มีขนาด 100 คำต่อส่วน

ในการทดสอบนี้จะสามารถกำหนด Chunking ได้ 2 แบบ คือ 1) Default หรือ Fixed Size แบ่ง Chunk ให้มีขนาดตัวอักษรที่แน่นอน 2) Semantic แบ่ง Chunk โดยพิจารณาจากความหมายหรือบริบทของข้อความ

เพื่อให้แต่ละ Chunk มีเนื้อหาที่มีความหมายสัมพันธ์กันหรือมีบริบทที่ชัดเจน

2. Embedding Model

เป็นโมเดลที่ใช้ในการแปลงข้อความหรือข้อมูลเป็นเวกเตอร์เชิงความหมาย (Semantic Vectors) เพื่อให้สามารถประมวลผลและใช้งานได้ง่ายขึ้นในการค้นคืนข้อมูล (Retrieval) และการสร้างข้อความ (Generation)

ในการทดสอบนี้จะสามารถกำหนด Embed Model ได้ 2 แบบ คือ

1) bge - m3 [16] เป็น Embedding Model ที่พัฒนาโดย BAAI ซึ่งมีความโดดเด่นใน 3 ด้านหลัก (M3) คือ Multi-Linguality (รองรับหลายภาษา) Multi-Functionality (ทำงานได้หลากหลาย) Multi-Granularity (รองรับขนาดข้อมูล)

2) Text-embedding-3-large [17] เป็น Embedding Model พัฒนาโดย OpenAI มีจุดเด่นคือ มีประสิทธิภาพสูง มีขนาดเวกเตอร์ใหญ่

3. Generator Model

เป็นโมเดลภาษาทำหน้าที่สร้างข้อความเพื่อเป็นคำตอบของคำถามโดยอาศัยข้อมูลที่ดึงมาจากรฐานข้อมูลหรือ Knowledge Base ในการทดสอบนี้คือข้อมูลจากวารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ประกอบกับ Prompt ที่สร้างจากคำถามและข้อมูลที่ดึงมา

ในการทดสอบนี้จะสามารถกำหนด Generator ได้ 2 แบบ คือ 1) claude-3-sonnet-20240229 [18] เป็นโมเดลภาษาขนาดกลางจากตระกูล Claude-3 พัฒนาโดยบริษัท Anthropic มีจุดเด่นคือ รองรับข้อมูลภาษาไทย มีขนาดกะทัดรัด ใช้งานบนอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพจำกัดได้ 2) gpt-4-turbo-preview เป็นโมเดลภาษาขนาดใหญ่ พัฒนาโดย OpenAI มีจุดเด่นคือ รองรับข้อมูลภาษาไทย มีประสิทธิภาพสูง

ในการทดสอบจะแบ่งเป็น 4 โมเดล โดยแต่ละโมเดลจะกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

แบบที่ 1: Chunking เป็น Default, Embedding Model เป็น bge - m3 และ Generator Model เป็น claude-3-sonnet-20240229

แบบที่ 2: Chunking เป็น Semantic, Embedding Model เป็น bge - m3 และ Generator Model เป็น claude-3-sonnet-20240229

แบบที่ 3: Chunking เป็น Default, Embedding Model เป็น Text - embedding-3-large และ Generator Model เป็น gpt-4-turbo-preview

แบบที่ 4: Chunking เป็น Semantic, Embedding Model เป็น bge - m3 และ Generator Model เป็น gpt-4-turbo-preview

4. ผลการทดลอง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองทั้ง 4 โมเดล ดังแสดงในตารางที่ 2 มีดังนี้

การตอบคำถามประเภทที่มีคำตอบระบุในเอกสาร (Extraction Test) แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ 1, 2 และ 4 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้องทั้งหมด ส่วนโมเดลที่ 3 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้อง 92%

คำถามที่มีคำตอบระบุในเอกสารแต่ต้องใช้ข้อมูลหลาย ๆ ส่วนในเอกสารมาช่วยตอบ (Logic Test) แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ 1, 2 และ 4 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้องเท่ากันที่ 90% ส่วนโมเดลที่ 3 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้อง 80%

คำถามที่ไม่มีคำตอบระบุอยู่ในเอกสาร (Hallucination Test) แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ 2 มีประสิทธิภาพในการตอบคำถามดีที่สุด ซึ่งสามารถตอบคำถามได้ถูกต้องทั้งหมด ส่วนโมเดลที่ 1 และ 4 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้องเท่ากันที่ 80% ส่วนโมเดลที่ 3 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้อง 60%

คำถามที่ต้องการคำตอบแบบเดิมแต่เปลี่ยนรูปประโยคคำถาม (Robustness Test) แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ 1 มีประสิทธิภาพในการตอบคำถามดีที่สุด ซึ่งสามารถตอบคำถามได้ถูกต้องทั้งหมด ส่วนโมเดลที่ 4, 2 และ 3 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้อง 91%, 86% และ 82% ตามลำดับ

คำถามที่มีคำตอบระบุในเอกสารแต่ต้องการคำตอบตามคำแนะนำที่กำหนด (Instruction Test) โมเดลที่ 1 มีประสิทธิภาพในการตอบคำถามดีที่สุด

ซึ่งสามารถตอบคำถามได้ถูกต้อง 85% โมเดลที่ 2 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้อง 80% ส่วนโมเดลที่ 3 และ 4 สามารถตอบคำถามได้ถูกต้องเท่ากันที่ 70%

ตัวอย่างคำตอบที่ได้ 1 คะแนน กับคำตอบที่ได้ 0 คะแนน

คำถาม: หุ่นยนต์ตัวใดบ้างที่ได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับ 2 ในการแข่งขันหุ่นยนต์นวัตกรรมทางการแพทย์ TCELS IMEDBOT 2021 Innovation Contest หรือการแข่งขัน “The Next Normal of Healthcare Robotics” ในปี 2564

คำตอบที่คาดหวัง: หุ่นยนต์ขนส่งอาหารและยาสำหรับปฏิบัติงานในโรงพยาบาล CARVER พัฒนาโดยสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

คำตอบที่ถูก (ได้ 1 คะแนน): จากข้อมูลที่ให้มาระบุว่าหุ่นยนต์ขนส่งอาหารและยาสำหรับปฏิบัติงานในโรงพยาบาล CARVER ที่พัฒนาโดยสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับ 2 ในการแข่งขัน TCELS IMEDBOT 2021 Innovation Contest 2021 - The Next Normal of Healthcare Robotics ซึ่งเป็นการแข่งขันหุ่นยนต์เพื่อสร้างนวัตกรรมทางการแพทย์ในปี พ.ศ. 2564

คำตอบที่ผิด (ได้ 0 คะแนน): หุ่นยนต์ที่ได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับ 2 ในการแข่งขันหุ่นยนต์นวัตกรรมทางการแพทย์ TCELS IMEDBOT 2021 Innovation Contest หรือการแข่งขัน “The Next Normal of Healthcare Robotics” ในปี 2564 คือ หุ่นยนต์เดิน 2 ขาคัลยมนุชย์พัฒนาโดยสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ตัวอย่างคำตอบที่ได้ 0.5 คะแนน

คำถาม: กรุณาเลือกคุณลักษณะเด่นของหุ่นยนต์ตรวจการณ์ขนาดเล็ก รุ่น NOONAR version 4 มา 3 ข้อ

คำตอบที่คาดหวัง: มีคำตอบ 3 ข้อ จาก 11 ข้อต่อไป

1. ประเภท (ไม่รวม Payload) 7.6 กิโลกรัม
2. โหมดการทำงาน Remote Controlled
3. ความเร็วสูงสุด 1.3 เมตร/วินาที
4. ระยะปฏิบัติการ (Operation Range) (LOS) 300 เมตร
5. ระยะเวลาปฏิบัติการ (Operation Time) 2 ชั่วโมง 30 นาที
6. กล้อง 3 กล้อง
7. ระบบสื่อสาร สามารถเพิ่มระยะได้โดยใช้ชุดขยายสัญญาณ (Repeater) 4.9 - 6.2 GHz (สามารถเลือกใช้งานได้ในย่านความถี่ที่กำหนด)
8. การป้องกันและฝุ่น IP54
9. อุปกรณ์บรรทุก Track Wheel, PTZ (Option: Disruptor, Track Extension)
10. ความสามารถในการรับน้ำหนัก 10 กิโลกรัม
11. การซ่อมบำรุง ดำเนินการได้เองภายในประเทศ

คำตอบที่ได้ 0.5 คะแนน: จากข้อมูลที่ให้มาสามารถสรุปคุณลักษณะเด่นของหุ่นยนต์ตรวจการณ์ขนาดเล็ก รุ่น NOONAR Version 4 ได้ดังนี้

1. มีขนาดเล็ก สะดวกต่อการพกพา มีความคล่องตัวและทนทานสูง เนื่องจากผลิตด้วยวัสดุคอมโพสิตที่รองรับแรงกระแทกจากการตกได้ดี
2. สามารถควบคุมและสั่งการแบบไร้สายระยะไกล 300 เมตร และใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง 2 ชั่วโมง 30 นาที
3. ผ่านการรับรองมาตรฐานจากกระทรวงกลาโหมว่าด้วยระบบยานภาคพื้นไร่น้ำขึ้นสำหรับภารกิจตรวจการณ์ และ/หรือ การเก็บกู้/ทำลายวัตถุระเบิด

เหตุผลการให้คะแนน: เพราะมีคำตอบที่ถูกเพียง 1 ข้อ จากคำตอบที่คาดหวัง 11 ข้อ คือ คำตอบข้อ 2 ส่วนคำตอบข้อ 1 และ 3 ไม่ได้อยู่ในคุณลักษณะเด่นของหุ่นยนต์ตรวจการณ์ขนาดเล็ก รุ่น NOONAR Version 4 ที่ระบุในเอกสาร คำตอบนี้จึงได้คะแนน 0.5 คะแนน

ตัวอย่างคำตอบที่ได้ 1 คะแนนจากคำถามประเภท ไม่มีคำตอบระบุอยู่ในเอกสาร (Hallucination Test)

คำถาม: ชื่อหุ่นยนต์ที่ได้รับรางวัลชนะเลิศในการแข่งขัน TCELS IMEDBOT 2021 Innovation Contest 2021 - The Next Normal of Healthcare Robotics การแข่งขันหุ่นยนต์เพื่อสร้างนวัตกรรมทางการแพทย์ เมื่อปี พ.ศ. 2564 คือ

คำตอบที่คาดหวัง: ไม่มีคำตอบในเอกสาร คำตอบที่ถูก (ได้ 1 คะแนน): ขออภัยครับ จากข้อมูลที่ให้มานั้นไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับหุ่นยนต์ที่ได้รับรางวัลชนะเลิศในการแข่งขัน TCELS IMEDBOT 2021 Innovation Contest 2021

5. สรุปและอภิปรายผล

สรุปผลการทดลองระบบจักรกลสนทนากับข้อมูลบทความในวารสารป้องกันประเทศ โมเดลแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการตอบคำถามได้อย่างถูกต้องถึง 93% ถ้าพิจารณาถึงความแม่นยำในการตอบคำถามแต่ละประเภท พบว่า คำถามที่มีคำตอบระบุในเอกสาร โมเดลที่ใช้ทดสอบทั้ง 4 แบบ มีความแม่นยำในการตอบดีมากที่ 92-100% ส่วนคำถามที่ต้องการคำแนะนำในการตอบมีความแม่นยำในการตอบน้อยสุดในทั้ง 5 ประเภทคำถาม โดยมีความแม่นยำที่ 70-85% อาจเป็นเพราะคำแนะนำที่ใส่ไปในคำถามทำให้คำถามยาวและซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าคำถามประเภทอื่น

ส่วนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันสามารถสรุปได้ดังนี้

1. Chunking

จากผลการทดลอง โมเดลแบบที่ 1 ที่กำหนด Chunking เป็น Fixed Size เทียบกับโมเดลแบบที่ 2 ที่กำหนด Chunking เป็น Semantic ส่วนพารามิเตอร์ค่าอื่นของโมเดลทั้ง 2 เหมือนกัน พบว่า การกำหนด Chunking เป็น Fixed Size ให้คำตอบที่มีความแม่นยำมากกว่าที่กำหนด Chunking เป็น Semantic อาจเป็นเพราะสาเหตุดังนี้

ภาษาไทยมีความซับซ้อนทางไวยากรณ์

ประโยคเดียวอาจตีความได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างประโยคและบริบท Semantic Chunking อาจมีปัญหาในการระบุกลุ่มคำที่ต้องตามไวยากรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประโยคที่ซับซ้อนหรือคลุมเครือ

Semantic Chunking จำเป็นต้องได้รับการฝึกฝนเกี่ยวกับข้อมูลตัวอย่างจำนวนมากที่มีกลุ่มคำที่ต้องตามไวยากรณ์และความหมาย ถ้าข้อมูลที่ให้เรียนรู้ไม่มากพอ อาจไม่สามารถแบ่งกลุ่มคำได้ถูกต้อง

สรุปได้ว่าขนาดของ Chunking มีผลต่อประสิทธิภาพของการค้นคืนข้อมูลเพราะ Chunking ที่เล็กเกินไป อาจไม่สามารถให้บริบทที่เพียงพอ แต่ Chunking ที่ใหญ่เกินไปอาจทำให้ระบบประมวลผลช้าลงและใช้ทรัพยากรมากขึ้น จึงควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของข้อมูลและภารกิจที่ต้องการ Chunk Size ที่เล็กลงหมายความว่า การ Embeddings จะมีความแม่นยำมากขึ้น ในขณะที่ขนาด Chunk Size ที่ใหญ่ขึ้นหมายความว่า การ Embeddings อาจจะกว้างกว่า แต่อาจพลาดรายละเอียดเล็กน้อยได้

2. Embedding Model

จากผลการทดลอง โมเดลแบบที่ 3 ที่กำหนด Embedding เป็น Text-embedding-3-large เทียบกับโมเดลแบบที่ 4 ที่กำหนด Embedding เป็น bge-m3 พบว่า การกำหนด Embedding เป็น bge-m3 ให้คำตอบที่มีความแม่นยำมากกว่าที่กำหนด Embedding เป็น Text-embedding-3-large เพราะ bge-m3 รองรับภาษาได้หลากหลายภาษามากกว่า และมีประสิทธิภาพดีกว่าในงานคำถามคำตอบ ส่วน Text-embedding-3-large มีประสิทธิภาพดีสำหรับงานบางประเภท เช่น การแปลภาษาอัตโนมัติ

สรุปได้ว่าการเลือก Embedding Model ให้เหมาะสมกับภาษาและงานที่ใช้จะมีผลให้ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ดีขึ้น

3. Generator Model

จากผลการทดลอง โมเดลแบบที่ 1 และ 2 ที่กำหนด Generator เป็น Claude-3-sonnet-20240229

เทียบกับโมเดลแบบที่ 3 และ 4 ที่กำหนด Generator เป็น gpt-4-turbo-preview พบว่า การกำหนด Generator เป็น Claude-3-sonnet-20240229 ให้คำตอบที่มีความแม่นยำมากกว่าที่กำหนด Generator เป็น gpt-4-turbo-preview เพราะ claude-3-sonnet มีประสิทธิภาพดีสำหรับการตอบคำถาม แต่ gpt-4-turbo-preview มีประสิทธิภาพดีสำหรับงานบางประเภท เช่น การสร้างข้อความ

สรุปได้ว่าการเลือก Generator Model ให้เหมาะสมกับภาษาและงานที่ใช้จะมีผลให้ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ดีขึ้น

โดยจักรกลสนทนา (Chatbot) มีส่วนช่วยนำเทคโนโลยีป้องกันประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้หลายวิธีในการพัฒนาต่อยอดในอนาคต ตัวอย่างเช่น

1. การสนับสนุนด้านการฝึกอบรม จักรกลสนทนาสามารถช่วยให้ทหารเข้าถึงข้อมูลการฝึกอบรมหรือคู่มือการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย

2. การให้คำแนะนำและคำตอบ จักรกลสนทนาสามารถตอบคำถามเกี่ยวกับขั้นตอนการปฏิบัติในสถานการณ์ฉุกเฉินหรือการใช้งานอุปกรณ์ทางทหาร

3. การให้บริการลูกค้า สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการขายหรือการจัดซื้ออาวุธ จักรกลสนทนาสามารถตอบคำถามและให้ข้อมูลแก่ลูกค้าอย่างมีประสิทธิภาพ

การนำเทคโนโลยี LLM และ RAG มาใช้ในด้านความมั่นคงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลข่าวกรอง: LLM สามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลข่าวกรองจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น รายงานข่าวบทความ หรือข้อมูลโซเชียลมีเดีย เพื่อสกัดข้อมูล

ที่สำคัญและเกี่ยวข้อง ด้วยความสามารถของ RAG ในการดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ และสรุปข้อมูล LLM สามารถสร้างรายงานที่สั้นกระชับ และมีความหมาย

2. การตรวจจับและป้องกันภัยคุกคามทางไซเบอร์: LLM สามารถใช้ในการวิเคราะห์ Log Files และข้อมูลการใช้งานระบบเพื่อตรวจจับกิจกรรมที่ผิดปกติหรือมีความเสี่ยง วิเคราะห์ตัวอย่างมัลแวร์และสร้างรายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมและลักษณะของมัลแวร์

3. การสนับสนุนการตัดสินใจในสถานการณ์ฉุกเฉิน: LLM และ RAG สามารถใช้ในการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ในเวลาจริง เพื่อให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่ผู้ตัดสินใจ สามารถใช้ LLM ในการสร้างแบบจำลองและจำลองสถานการณ์เพื่อประเมินผลกระทบและความเสี่ยงจากการตัดสินใจต่าง ๆ

4. การฝึกอบรมและพัฒนาทักษะ: LLM สามารถสร้างเนื้อหาการฝึกอบรมที่มีคุณภาพสูงและครอบคลุมหลายด้าน เช่น การฝึกอบรมด้านความมั่นคงทางไซเบอร์ การป้องกันและตอบโต้ภัยคุกคาม RAG สามารถดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และ LLM สามารถตอบคำถามและให้คำปรึกษาแก่เจ้าหน้าที่ในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้

5. การสื่อสารและการจัดการข้อมูลภายในองค์กร: LLM สามารถใช้ในการจัดการและจัดระเบียบเอกสารสำคัญ รวมถึงการค้นหาและดึงข้อมูลที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วช่วยสร้างข้อความและรายงานที่ชัดเจนและถูกต้อง เพื่อใช้ในการสื่อสารภายในองค์กร

การนำเทคโนโลยี LLM และ RAG มาใช้ในด้านความมั่นคงมีศักยภาพสูงในการเพิ่มประสิทธิภาพ ลดข้อผิดพลาด และเสริมสร้างความมั่นคงให้กับองค์กร การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้

ควรคำนึงถึงความเป็นส่วนตัวและความปลอดภัยของข้อมูล เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด LLM และ RAG สามารถประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลจากแหล่งข้อมูลหลายแหล่งในเวลาอันสั้น ซึ่งช่วยให้เจ้าหน้าที่สามารถตอบสนองต่อภัยคุกคามได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น RAG ช่วยให้สามารถดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องและทันสมัยจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ ซึ่งช่วยเสริมสร้างการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การนำ LLM และ RAG มาใช้ต้องคำนึงถึงความเป็นส่วนตัวของข้อมูลส่วนบุคคล เพื่อป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต ต้องมีการใช้เทคโนโลยีและวิธีการที่ช่วยปกป้องข้อมูลส่วนบุคคล เช่น การเข้ารหัสข้อมูลและการควบคุมการเข้าถึงข้อมูล ต้องมีการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลอย่างเข้มงวด เพื่อป้องกันการโจมตีทางไซเบอร์และการรั่วไหลของข้อมูล ต้องมีการทดสอบและประเมินความปลอดภัยของระบบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้แน่ใจว่าข้อมูลและระบบขององค์กรมีความปลอดภัยสูงสุด

ตารางที่ 1 จำนวนข้อที่ตอบถูกทั้งหมด ตอบผิดทั้งหมด และตอบผิดบางส่วนของระบบจักรกลสนทนา โดยใช้โมเดลในการทดลอง 4 โมเดล

รายการผลลัพธ์	ประเภทของโมเดล			
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
จำนวนข้อที่ตอบถูกทั้งหมด	45	44	39	43
จำนวนข้อที่ตอบผิดทั้งหมด	3	4	10	6
จำนวนข้อที่ตอบผิดบางส่วน	1	1	0	0

ตารางที่ 2 % Accuracy ของการตอบคำถามของระบบจักรกลสนทนา โดยใช้โมเดลในการทดลอง 4 โมเดล แบ่งตามชุดคำถามแต่ละประเภท

ประเภทของคำถาม	ประเภทของโมเดล			
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Extraction Test 13 ข้อ	100 %	100 %	92 %	100 %
Logic Test 10 ข้อ	90 %	90 %	80 %	90 %
Hallucination Test 5 ข้อ	80 %	100 %	60 %	80 %
Robustness Test 11 ข้อ	100 %	86 %	82 %	91 %
Instruction Test 10 ข้อ	85 %	80 %	70 %	70 %
รวมทั้งหมด 49 ข้อ	93 %	91 %	80 %	88 %

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Ouyang *et al.*, “Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback,” 2022, arXiv:2203.02155.
- [2] X. Ma, Y. Gong, P. He, H. Zhao, and N. Duan, “Query Rewriting for Retrieval-augmented Large Language Models,” 2023, arXiv:2305.14283.
- [3] A. Vaswani *et al.*, “Attention is all you need,” in *31st Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NIPS 2017)*, Long Beach, CA, USA, 2017, pp. 6000-6010.
- [4] C. C. H. Chan, Y. - C. Lin, and P. - C. Shih, “Natural Language Processing for Supply Chain with Chat GPT,” in *2023 IEEE 5th Int. Conf. Architecture, Construction, Environ. and Hydraul. (ICACEH)*, Taichung, Taiwan, 2023, pp. 28 - 31, doi: 10.1109/ICACEH59552.2023.10452639.
- [5] M. Chen *et al.*, “Evaluating Large Language Models Trained on Code,” 2021, arXiv:2107.03374.
- [6] A. Chowdhery *et al.*, “PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways. *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 24, pp. 1 – 113, 2023.
- [7] W. Yu *et al.*, “Generate rather than Retrieve: Large Language Models are Strong Context Generators,” 2022, arXiv:2209.10063.
- [8] S. Yao *et al.*, “ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models,” 2023, arXiv:2210.03629.
- [9] O. Press, M. Zhang, S. Min, L. Schmidt, N. A. Smith, and M. Lewis, “Measuring and Narrowing the Compositionality Gap in Language Models,” 2022, arXiv:2210.03350.
- [10] O. Khattab *et al.*, “Demonstrate-Search-Predict: Composing Retrieval and Language Models for Knowledge-intensive NLP,” 2022, arXiv:2212.14024.
- [11] W. Shi *et al.*, “RePlug: Retrieval-augmented Black-box Language Models,” 2023, arXiv:2301.12652.
- [12] Z. Li, B. Peng, P. He, M. Galley, J. Gao, and X. Yan, “Guiding Large Language Models via Directional Stimulus Prompting,” in *37th Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS 2023)*, New Orleans, Louisiana, USA, 2023, pp. 1 - 27.
- [13] J. Wei *et al.*, “Finetuned Language Models are Zero-shot Learners,” 2022, arXiv:2109.01652.
- [14] T. B. Brown *et al.*, “Language Models are Few-shot Learners,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, H. Larochelle, M. Ranzato, R. Hadsell, M. F. Balcan, and H. Lin, Eds., Curran Associates, Inc., 2020, vol. 33, pp. 1877 - 1901.

- [15] J. Wei *et al.*, “Chain-of-thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models,” in *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, S. Koyejo, S. Mohamed, A. Agarwal, D. Belgrave, K. Cho, and A. Oh, Eds., Curran Associates, Inc., 2022, vol. 35, pp. 24824 - 24837.
- [16] J. Chen *et al.*, “M3-Embedding: Multi-lingual, Multi-functionality, Multi-granularity Text Embeddings through Self-knowledge Distillation,” 2024, arXiv:2402.03216.
- [17] L. Merrick, D. Xu, G. Nuti, and D. Campos, “D. Arctic-Embed: Scalable, Efficient, and Accurate Text Embedding Models,” 2024, arXiv:2405.05374.
- [18] M. Enis and M. Hopkins, “From LLM to NMT: Advancing Low-Resource Machine Translation with Claude,” 2024, arXiv:2404.13813.

การศึกษาและออกแบบขั้นต้นระบบป็นเล็กยาวอัตโนมัติ

นิวัฒน์ ใจคำ¹ เพียงเพ็ญ สุวรรณศิริ¹ อรรถพล เจริญผล¹

ปริสร์ สมุทรसार² และ วรณชพัฒน์ ฤทธิ์เลื่อน^{1*}

วันที่รับ 5 เมษายน 2567 วันที่แก้ไข 31 ตุลาคม 2567 วันตอบรับ 31 ตุลาคม 2567

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและพัฒนาป็นเล็กยาวอัตโนมัติแบบระบบก้านกระทุ้ง (Gas Piston) เพื่อให้ทราบถึงการออกแบบที่สามารถนำไปต่อยอดได้ในอนาคต โดยการใช้ทฤษฎีร่วมกับกระบวนการจำลองการเคลื่อนที่ของป็น Emtan M4A1 เป็นตัวตั้งต้นในการกำหนดตัวแปรสำหรับการออกแบบและศึกษาความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งต่ออัตราการยิง ค่าคงที่ของสปริง แรงในก้านกระทุ้ง ขนาดของรูดักแก๊ส จากผลการศึกษาพบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งมีผลต่อตัวแปรอื่นในแบบไม่เชิงเส้น ในช่วงระยะชักที่กว้างและสามารถประมาณเป็นเชิงเส้นได้ในช่วงระยะชักที่สั้น เพื่อให้ป็นมีคุณลักษณะเป็นไปตามความต้องการเบื้องต้น โดยมีอัตราการยิงเท่ากับ 950 นัดต่อนาที ระยะก้านกระทุ้งที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1.3 - 1.5 นิ้ว ตามค่าการออกแบบที่ต้องการ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ได้นำไปออกแบบในเบื้องต้นและทำการจำลองการเคลื่อนที่พบว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องไปตามทฤษฎี แต่ยังมีข้อแตกต่างที่ยังต้องแก้ไขและพัฒนาต่อไป

คำสำคัญ : ป็นเล็กยาวอัตโนมัติ, ก้านกระทุ้ง, อัตราการยิง, รูดักแก๊ส, ค่าคงที่สปริง

¹ ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² บริษัท อุตสาหกรรมผลิตอาวุธ จำกัด

* ผู้แต่ง, อีเมล: watchaphat@dti.or.th

A Study and Initial Design of Automatic Small Firearm

Niwat Jaikam ¹ Piangpen Suwankeeree ¹ Attapon Charoenpon ¹
Pris Samutsarn ² and Watchaphat Ridluan ^{1*}

Received 5 April 2024, Revised 31 October 2024, Accepted 31 October 2024

Abstract

The purpose of this study is to research and develop a gas piston automatic rifle to understand the design that can be further developed in the future. This is achieved by using theory alongside the motion simulation of the Emtan M4A1 rifle as a starting point for determining variables for design and studying the relationship between the motion distance of the piston rod, firing rate, spring constant, force in the piston rod, and the size of the gas port. The study found that the motion distance of the piston rod has a nonlinear effect on other variables over a wide stroke range, but it can be approximated linearly over a shorter stroke range. To ensure that the rifle meets the initial requirements with a firing rate of 950 rounds per minute, the suitable piston rod length should be between 1.3 to 1.5 inches according to the desired design specifications. The results from this analysis have been used for preliminary design and motion simulation, showing that the obtained values are consistent with theory, although there are still discrepancies that need to be addressed and further developed.

Keywords : Automatic rifles, Piston rod, Firing rate, Gas port, Spring constant

¹ Military Vehicle Division, Defence Technology Institute

² Weapons Manufacture Industries Company Limited (WMI)

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

1. บทนำ

อาวุธปืนในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบและมีเทคโนโลยีที่มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาตลอดช่วง 200 ปี ที่ผ่านมา ถือได้ว่าอาวุธปืนเป็นอาวุธประจำกายทหารราบที่ทรงประสิทธิภาพประเภทหนึ่งอย่างเห็นได้ชัดตลอดการมีอยู่ของมนุษยชาติ อาวุธปืนนั้นมีระบบการทำงานที่หลากหลาย นับตั้งแต่ยุคสมัยของการประจุปากกล้างและยิงด้วยไฟ (Match Lock) หรือหินประกายไฟ (Flint Lock) มาจนถึงปัจจุบันระบบอาวุธปืนได้มีวิวัฒนาการตามยุคสมัยไปอย่างมาก จากปืนบรรจุเดี่ยวสู่ปืนแบบยิงซ้ำได้ (Repeating Arms) เช่น ปืนไรเฟิลแบบคานเหวี่ยง (Lever Action) ปืนไรเฟิลแบบลูกเลื่อน (Bolt Action) กระโຈ้มลำเลื่อน (Pump Action) หรือระบบลูกม่ [1] ซึ่งระบบที่กล่าวมาข้างต้นเป็นระบบอาวุธปืนที่ได้นำใช้งานมาอย่างยาวนาน นับร้อยปีตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 จนถึงต้นศตวรรษที่ 20 อย่างไรก็ตาม ระบบอาวุธปืนทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วมีจุดอ่อน คือ ต้องบริหารกลไกด้วยมือเท่านั้น เมื่อยิงออกไปแล้วผู้ใช้งานต้องดึงกลไกส่วนใดส่วนหนึ่งของตัวปืนเพื่อคัดปลอกกระสุนออกจากตัวปืนด้วยตัวเอง ทำให้มีอัตราการยิงต่ำหรือต้องทำการกระหน่ำยิงพร้อมกันด้วยกำลังพลจำนวนมาก เพื่อให้มีอำนาจการยิงสูงขึ้น จนกระทั่งการมาถึงของอาวุธปืนในระบบอัตโนมัติ (Automatic) ทำให้การใช้งานของอาวุธปืนนั้นมีความง่ายขึ้นและสามารถยิงต่อเนื่องได้อย่างรวดเร็ว [2]

ปืนเล็กยาวหรือไรเฟิล (Rifle) [3] เป็นอาวุธปืนที่มีขนาดยาว ถูกออกแบบมาเพื่อการยิงทำลายเป้าหมายที่อยู่ในระยะไกลโดยเฉพาะ โดยมีพานท้ายสำหรับใช้ประทับร่องไหล่ เพื่อช่วยในการเล็งหาเป้าหมายภายในลำกล้องมีการเจาะให้เป็นสันและร่องเกลียวที่ผนังลำกล้องซึ่งสันเกลียวเรียกว่า "Land" ส่วนร่องเกลียว

เรียกว่า "Groove" โดยสันเกลียวนี้จะสัมผัสกับหัวกระสุนและรีดหัวกระสุนไปตามสันเกลียวและหมุนควงรอบตัวเอง เพื่อรักษาการเคลื่อนที่ของหัวกระสุนไม่ให้ดิ่งลงในอากาศและเพื่อเพิ่มความแม่นยำตลอดจนอำนาจพัสหาร คำว่าปืนเล็กยาวหรือปืนไรเฟิลจะหมายถึงอาวุธที่มีพานท้ายและต้องประทับปาก่อนยิง ถึงแม้ว่าอาวุธดังกล่าวจะไม่ได้ทำร่องในลำกล้องหรือไม่ได้ยิงกระสุนก็ตาม เพื่อเพิ่มอำนาจการยิงให้สูงขึ้นจึงมีการพัฒนาปืนเล็กยาวอัตโนมัติ โดยระบบอาวุธแบบอัตโนมัติที่เป็นที่รู้จักและใช้ในปืนเล็กยาวในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบโบลวแบ็ก (Blowback) ระบบปฏิบัติการด้วยแก๊ส (Gas-operated) และระบบปฏิบัติการด้วยรีคอยล์ (Recoil-operated) [4]

ระบบโบลวแบ็ก คือ ระบบที่ใช้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของดินปืนมาดันลูกเลื่อน (Bolt) โดยตรง ลูกเลื่อนจะเคลื่อนที่ถอยหลัง

ระบบปฏิบัติการด้วยแก๊ส คือ ระบบที่ใช้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของดินปืนมาดันลูกสูบ และลูกสูบนั่นก็ไปปลดล็อกลูกเลื่อนและดันลูกเลื่อนให้ถอยหลัง

ระบบปฏิบัติการด้วยรีคอยล์ คือ ระบบที่ใช้พลังงานของรีคอยล์ในการดันชุดลูกเลื่อนให้ถอยหลัง

จากระบบปฏิบัติการที่กล่าวมานั้นจะเห็นว่าระบบปฏิบัติการด้วยรีคอยล์สามารถทำงานได้ที่ระบบมีแรงเฉื่อยต่ำ กล่าวคือ หากระบบปืนมีน้ำหนักมากขนาดใหญ่มากแล้วระบบนี้จะทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากพลังงานรีคอยล์ที่ไม่เพียงพอ ส่วนระบบโบลวแบ็กนั้น เนื่องจากความดันของแก๊สเผาไหม้กระทำโดยตรงที่หน้าลูกเลื่อน ทำให้ลูกเลื่อนเคลื่อนที่ถอยกลับด้วยความเร็วสูง ซึ่งด้านท้ายของระบบปืนนั้นจะต้องออกแบบรองรับพลังงานจำนวนมากที่เกิดขึ้นนี้ เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย

ต่อตัวปืน ส่วนระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สนั้น เป็นการจำกัดปริมาณความดันของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ให้เพียงพอ ไม่มากจนเกินไปในการดันลูกเลื่อนให้ถอยหลังด้วยการปรับขนาดของรูตักแก๊สที่อยู่บริเวณกึ่งกลางหรือปากลำกล้อง ทำให้ระบบปฏิบัติการแบบแก๊สเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน การทำงานด้วยแก๊สนั้นถูกแบ่งออกเป็น 4 แบบ ด้วยกัน [5] ได้แก่

1) ก้านกระทุ้งระยะชักสั้น (Short-Stroke Gas Piston) เช่น FN FAL, HK G-36, HK416

2) ก้านกระทุ้งระยะชักยาว (Long-Stroke Gas Piston) เช่น AK-47, FN FNC

3) แก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อน (Direct Impingement) เช่น AR-15 หรือ M16

4) แบบตักแก๊สท้ายลำกล้อง (Gas Trap) ซึ่งปัจจุบันไม่มีปืนในรูปแบบนี้แล้ว

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบระบบก้านกระทุ้ง (Gas Piston: GP) เพื่อให้ทราบถึงการออกแบบซึ่งสามารถนำไปต่อยอดได้ในอนาคต โดยนำเอาปืนเล็กยาวอัตโนมัติตระกูล M4 ใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาและประยุกต์ใช้ทางทฤษฎีทางด้านการออกแบบปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบปฏิบัติการด้วยแก๊สเพื่อศึกษาค้นคว้าระบบปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบระบบแก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อนและแบบระบบก้านกระทุ้ง นำไปสู่การพัฒนาศักยภาพอาวุธปืนเล็กยาวในประเทศ ตลอดจนการพัฒนาขีดความสามารถและองค์ความรู้เชิงลึกในการเข้าใจถึงระบบอาวุธปืนเล็กยาวอัตโนมัติ และสามารถใช้อ้างอิงที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลสนับสนุนและต่อยอดตามนโยบายของรัฐบาลที่มุ่งหมายจะส่งเสริมอุตสาหกรรมอาวุธในประเทศต่อไป อย่างเป็นรูปธรรมในการต่อยอดองค์ความรู้ทางด้านการออกแบบที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

2. การทบทวนวรรณกรรม

AR หรือ Armalite Rifle ออกแบบขึ้นในปี 1955 โดยยูจีน สโตนอร์ (Eugene Stoner) [6] โดยเริ่มออกแบบในรหัส AR-10 รองรับกระสุนขนาด 7.62 x 51 มม. มาตรฐาน NATO ต่อมาได้มีการเปลี่ยนแบบให้เป็นอาวุธปืนน้ำหนักรเบาสำหรับภารกิจทางการทหารในสงครามเวียดนามและได้ใช้งานอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

AR-15/M16/M4 เป็นปืนเล็กยาวแบบอัตโนมัติบรรจุเอง (Self-loading) [7] และมีขีดความสามารถในการทำงานได้ด้วยตนเอง กล่าวคือเมื่อเหนี่ยวไกปืนแล้วปืนสามารถทำงานได้ครบวงจร ตั้งแต่ลั่นกระสุนออกไป คัดปลอกกระสุนเก่าออก ลูกเลื่อนพากระสุนเต็มนัดเข้าสู่ห้องเพลิง และยิงนัดต่อไปโดยอัตโนมัติ

AR-15/M16 ดังแสดงในรูปที่ 1 [8] ใช้ระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบแก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อนที่ต้องส่งแก๊สผ่านท่อแก๊สที่เชื่อมต่อจากรูตักแก๊สที่อยู่ใต้ศูนย์หน้าเพื่อย้อนกลับมาขับเคลื่อนลูกเลื่อนที่ด้านหลังท่อแก๊สดังกล่าวเป็นที่สังเกตว่าไม่สามารถใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมโคลนตม อย่างไรก็ตาม AR-15/M16 ก็ได้รับการพัฒนาและวิวัฒนาการอย่างต่อเนื่องและจำหน่ายให้กับกองกำลังทั่วโลก ตลอดช่วงระยะเวลาการประจำการ



รูปที่ 1 แสดงปืนแบบ AR-15/M16 ที่ใช้ระบบแก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อน

ในปี 2001 A. Feickert [9] ระบุว่าลำกล้องที่สั้นของ M4 และระบบท่อแก๊สเป็นการออกแบบที่ต้องได้รับการแก้ไขและพบว่าอาวุธปืนมีการติดขัดขณะทำการยิง ไม่สามารถคัดปลอกได้อย่างสมบูรณ์

ระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบแก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อนในปืน AR-15 นั้นประสบปัญหาการติดขัดบ่อยและมีอาการท่อแก๊สตันในบางสภาพแวดล้อม เช่นในที่ป่าร้อนชื้นในสงครามเวียดนาม อันเนื่องมาจากช่องว่างอากาศในท่อส่งแก๊สที่ค่อนข้างยาวทำให้มีน้ำและโคลนเข้าไปกั้นทางเดินของแก๊สและทำให้กลไกปืนติดขัดได้ อีกทั้งแก๊สร้อนที่ย้อนกลับมาสู่โครงปืนตลอดเวลาที่ทำการยิงทำให้ตัวปืนสะสมความร้อน อีกทั้งยังมีคราบเขม่าที่ย้อนกลับมาตามแก๊สทำให้หน้าลูกเลื่อนและโครงปืนต้องคอยทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ และหากปืนติดขัดหรือจำเป็นต้องถอดเพื่อเปลี่ยนอะไหล่ต้องพักปืนให้เย็นก่อน เพราะลูกเลื่อนมีการสะสมความร้อนค่อนข้างสูง

ในปี 2005 หน่วยเดลต้าของสหรัฐอเมริกาได้เปลี่ยนปืนจาก M4 ไปใช้ HK416 ซึ่งเป็นแบบระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบก้านกระทุ้งระยะชักสั้นซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าและมีความผิดพลาดที่น้อยกว่า [10]

เทคโนโลยีระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบก้านกระทุ้งนั้นถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดยมีฮาอิลคาลาซนิคอฟ (Mikhail Kalashnikov) ในปืนรุ่น AK-47 ดังแสดงในรูปที่ 2 [11] แม้ว่าในหลักการ



รูปที่ 2 แสดงปืนแบบ AK-47 ที่ใช้ระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบก้านกระทุ้งระยะชักยาว

ทำงานแล้วไม่ต่างกับระบบแก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อน แต่มีจุดแตกต่างคือ เมื่อยิงกระสุนออกไปแก๊สจะถูกกักไว้ที่รูตักแก๊สที่ด้านหน้า ซึ่งจะต่อเข้ากับก้านกระทุ้งแก๊สนี้จะทำการผลักก้านกระทุ้งให้เคลื่อนที่ถอยหลัง ก้านกระทุ้งนี้จะต่อกับลูกเลื่อนทำให้ลูกเลื่อนเคลื่อนที่ถอยกลับและดันย้อนกลับไปผลักลูกเลื่อนให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อคัดปลอกกระสุนและนำกระสุนใหม่เข้าสู่รูังเพลิง เนื่องด้วยแก๊สนี้จะอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของก้านกระทุ้ง ด้วยเหตุนี้ ระบบนี้จึงทำให้ปืนไม่เกิดความร้อนสะสมที่หน้าลูกเลื่อนและไม่มีเขม่า จึงทำให้ตัวปืนสะอาดกว่าและเย็นกว่าแม้จะยิงต่อเนื่องเป็นเวลานาน หากเกิดความเสียหายที่ต้องเปลี่ยนอะไหล่ก็สามารถเปิดออกและถอดลูกเลื่อนออกได้โดยไม่ต้องพักปืนให้เย็นลง

อย่างไรก็ดี ระบบก้านกระทุ้งทำให้ปืนมีน้ำหนักมากขึ้นจากก้านกระทุ้งที่เพิ่มเข้ามาและแรงสะท้อนที่สูงเนื่องจากแรงกระแทกของก้านกระทุ้งที่กระทำต่อชุดลูกเลื่อน ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในนัดถัดไป

ระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบแก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อนใช้ในในกลุ่มประเทศโลกตะวันตกอย่างยาวนานเนื่องจากน้ำหนักที่เบา ความแม่นยำสูง ผลิตและดูแล

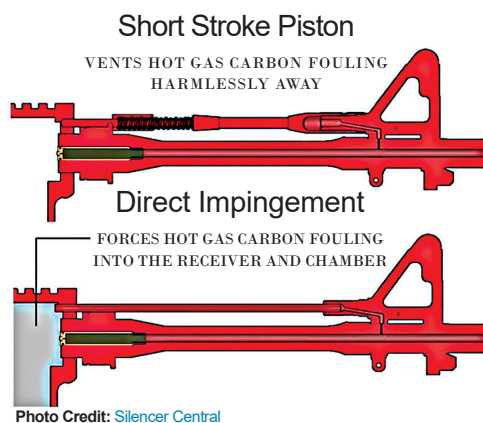


Photo Credit: Silencer Central

รูปที่ 3 การเปรียบเทียบปืน AR-15 (บน) ก้านกระทุ้งระยะชักสั้น (ล่าง) แก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อน

รักษาได้ง่าย การวิวัฒนาการจึงมุ่งเน้นในด้านของการลดมิติเพื่อความสะดวกต่อตัวและล้ากล้องแบบเกลียวสั้นลงเพื่อรับกระสุนที่ความเร็วสูงขึ้น ในปี 2001 [12] หน่วยบัญชาการสงครามพิเศษ USSOCOM ได้พบว่า อาวุธปืนมีความไม่น่าเชื่อถือในบางสภาพแวดล้อม จึงกลายเป็นจุดเปลี่ยนในการพัฒนาระบบปืน AR-15 เป็นระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบก้านกระทุ้งดังแสดงในรูปที่ 3 [5] และมีการผลิตใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก เพราะได้รับการพิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่า AR-15 ในระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบแก๊สพุ่งหน้าลูกเลื่อน

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ดำเนินการวิจัยและพัฒนาต้นแบบปืนสั้นและปืนยาวฝึกทางยุทธวิธีกึ่งอัตโนมัติ สำหรับระบบเครื่องช่วยฝึกใช้อาวุธเสมือนจริง (โครงการวิจัยพื้นฐานปี 2562 เรื่อง การวิเคราะห์การออกแบบระบบปืนฝึกทางยุทธวิธีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) [13] ซึ่งได้นำปืน EMTAN M4A1 ที่ได้รับอนุญาตจากความร่วมมือและร่วมทุนระหว่างสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ บริษัท สหพิพัฒน์กิจ จำกัด และบริษัท เอ็มตันคาร์เมิล จำกัด (ผู้ผลิตปืน EMTAN) มาทำการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างภายในให้มีการแทนที่ด้วยระบบลม ซึ่งมีวาล์วสำหรับปล่อยลมเมื่อทำการลั่นไกเพื่อกระตุ้นการทำงานของระบบเซนเซอร์ที่ใช้แทนกระสุนจริงทำให้เหมือนยิงโดนเป้าหมายที่อยู่ในจอสำหรับช่วยฝึก ดังนั้น การออกแบบระบบภายในตัวปืนให้มีความทนทานต่อการใช้งานด้วยระบบลมจึงมีความสำคัญ

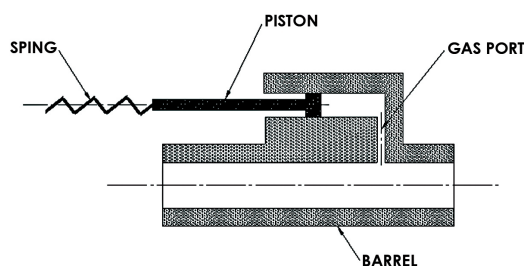
3. การออกแบบขั้นต้น

สำหรับระบบอาวุธแบบอัตโนมัติที่ใช้ปืนเล็กยาวแบบระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สนั้น แก๊สที่แรงดันและอุณหภูมิหนึ่งจะถูกนำมาใช้งานสำหรับการขับเคลื่อนระบบเชิงกลของปืนเล็กยาวอัตโนมัติ

โดยความดันของแก๊สจะต้องมีความสอดคล้องต่อแรงที่เพียงพอในการขับเคลื่อนระบบเชิงกลของปืนเล็กยาวอัตโนมัติ เช่น การคัดปลอกกระสุน (Cartridge Extraction) และส่งถ่ายโมเมนตัมให้เพียงพอต่อการขับเคลื่อนลูกเลื่อน (Bolt) เพื่อป้อนกระสุนเข้าลำเพลิง เป็นต้น

ขนาดของแรงดันส่งผลกระทบต่อวงจรการทำงานของปืนเล็กยาวอัตโนมัติ ซึ่งการออกแบบค่าความดันต้องไม่ก่อให้เกิดการคัดปลอกกระสุนก่อนขณะที่ปลอกกระสุนยังคงติดอยู่ที่ผนังของรังเพลิง ดังนั้น การออกแบบค่าความดันที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการส่งถ่ายโมเมนตัมที่เพียงพอต่อการขับเคลื่อน เพื่อให้ระบบปืนเล็กยาวสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมและถูกจังหวะ

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาระบบอาวุธอัตโนมัติแบบระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สก้านกระทุ้งดังภาพที่ 4 ซึ่งจะประกอบไปด้วยลำกล้อง (Barrel)



รูปที่ 4 แสดงไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบก้านกระทุ้ง

ที่เจาะรูดักแก๊ส (Gas Port) ทำให้แก๊สไหลเข้าไปยังก้านกระทุ้ง (Piston) ซึ่งก้านกระทุ้งก็จะไปดันส่วนของชิ้นงานรื้อคอยล์ที่อยู่ด้านท้ายต่อไป โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของ J. H. Spurk [14] โดยเวลาของวงจรการยิง (Firing Cycle) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$t_c = \frac{60}{f_r} \quad (1)$$

โดยที่ f_r คือ อัตราการยิง (นัด/นาที)

ระยะเวลาการถอยกลับ (Recoil: t_r) และ

ระยะเวลาการต้านการถอยกลับ (Counter Recoil: t_{cr})

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3)

$$t_r = \frac{2\epsilon L}{v_{cr}} \quad (2)$$

และ

$$t_{cr} = \frac{2L}{v_{cr}} \quad (3)$$

โดยที่

v_{cr} คือ ความเร็วของการต้านทานการถอยกลับ

L คือ ระยะการถอยกลับหรือระยะที่ชุดลูกเลื่อนเคลื่อนที่

ϵ คือ ประสิทธิภาพของระบบ

จัดรูปสมการที่ (2) และ (3) จะได้สมการที่ (4)

$$t_r = \epsilon t_{cr} \quad (4)$$

โดยความเร็วการถอย (Recoil Velocity: v_r)

และการต้านการถอย (Counter-recoil Velocity: v_{cr})

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6)

$$v_r = \frac{2L}{t_r} \quad (5)$$

และ

$$v_{cr} = \frac{2L}{t_{cr}} \quad (6)$$

ดังนั้น พลังงานจลน์ (E_r) ของชิ้นส่วนรีคอยล์

(Recoiling Part) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$E_r = \frac{1}{2} M_r v_r^2 \quad (7)$$

M_r คือมวลของชิ้นส่วนรีคอยล์

ดังนั้น สามารถคำนวณแรงที่กระทำกับก้านกระทุ้ง (F_a) ได้จากสมการที่ (8)

$$F_a = \frac{E_r}{L} \quad (8)$$

ดังนั้น ความดันที่เกิดกับก้านกระทุ้ง (P_c)

สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

$$P_c = \frac{F_a}{A_t} \quad (9)$$

A_t คือ พื้นที่หน้าตัดก้านกระทุ้ง

อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบสามารถประเมิน

ความดันในรูตักแก๊สให้เป็นความดันค่าวิกฤติ (P_c) ดังนั้น

ความดันที่เกิดในลำกล้อง (P_b) จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10)

$$P_b = \frac{P_c}{0.53} \quad (10)$$

ดังนั้น ผลคูณระหว่างความดันและเวลาซึ่ง

แสดงพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ของความดัน

และเวลาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (11)

$$A_{pt} = P_b t \quad (11)$$

โดยที่ $t = M \frac{v_r}{F_a}$,

M คือ มวลของระบบถอยกลับ

น้ำหนักของแก๊ส (W_c) ที่ไหลเข้าไปในช่อง

ของก้านกระทุ้งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (12)

$$W_c = W_g \left(\frac{V_c}{V_b} \right) \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (12)$$

โดย V_c และ V_b คือ ปริมาตรก้านกระทุ้ง

และปริมาตรลำกล้องตามลำดับ

W_g คือ น้ำหนักทั้งหมดของแก๊ส

ดังนั้น พื้นที่ของช่องแก๊สสามารถคำนวณได้

ดังสมการที่ (13)

$$A_o = \frac{W_c}{K_w A_{pt}} \quad (13)$$

โดยค่า K_w สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (14)

$$K_w = C \sqrt{\frac{gk}{RT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (14)$$

โดย C คือ สัมประสิทธิ์ช่องแก๊ส

k คือ ค่าสัดส่วนความร้อนจำเพาะของแก๊ส
ในอุดมคติ

g คือ แรงโน้มถ่วงโลก

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิของแก๊ส

ในส่วนของสปริงนั้น พลังงานที่ดูดซับโดยสปริง
(E_r) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (15)

$$E_r = \frac{1}{2} M_b v_r^2 \quad (15)$$

โดยที่ M_b คือ มวลของลูกเลื่อน

และค่าคงที่สปริง (K) สามารถคำนวณได้จาก
สมการที่ (16)

$$K = \frac{2Fa}{2074T - L_d} \quad (16)$$

โดยที่ T คือ เวลาการคืนตัวของสปริง
ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (17)

$$T = \frac{T_c}{3.8} \quad (17)$$

ที่ซึ่ง T_c สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (18)

$$T_c = t_r - t \quad (18)$$

และแรงสปริงเฉลี่ย (F_a) สามารถคำนวณได้
ดังสมการที่ (19)

$$F_a = \epsilon \frac{E_r}{L_d} \quad (19)$$

ที่ซึ่ง L_d สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (20)

$$L_d = L - L_t \quad (20)$$

โดย L คือ ระยะการเคลื่อนที่ของลูกเลื่อน

L_t คือ ระยะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้ง

แรงสปริงที่ใช้ขับเคลื่อนลูกเลื่อนหดตัว (F_m)
คำนวณได้จากสมการ (21)

$$F_m = F_a + \frac{1}{2} KL_d \quad (21)$$

แรงการขับสปริงเมื่อก้านสัมผัสลูกเลื่อน
(F_o) คำนวณได้จากสมการ (22)

$$F_o = F_m - KL \quad (22)$$

ระยะเวลาที่ลูกเลื่อนเคลื่อนที่ถอย (t_r)
คำนวณได้จากสมการ (23)

$$t_r = \sqrt{\epsilon \frac{M_b}{K}} \cos^{-1} \left(\frac{F_o}{F_m} \right) \quad (23)$$

ระยะเวลาการต้านการถอย (t_{cr}) คำนวณได้
จากสมการ (24)

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{M_b \cos^{-1} \left(\frac{F_o}{F_m} \right)}{\epsilon K}} \quad (24)$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดทำสปริง (d)
คำนวณได้จากสมการ (25)

$$d = 0.27 \sqrt[3]{DKT} \quad (25)$$

โดยที่ (D) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ
คอยล์สปริง

จำนวนของเกลียวของสปริง (N) คำนวณได้
จากสมการ (26)

$$N = \frac{Gd^4}{8D^3K} \quad (26)$$

โดยที่ G คือ ค่าโมดูลัสความเฉือนของวัสดุที่
ใช้ทำสปริง

ระยะความยาวของคอยล์สปริง (H_s) คำนวณ
ได้จากสมการ (27)

$$H_s = Nd \quad (27)$$

อัตราการยิงใหม่ (f_r') คำนวณได้จากสมการ (28)

$$f_r' = \frac{60}{t_c'} \quad (28)$$

โดยที่ t_c' คือ ผลรวมของเวลาครบรอบการยิงใหม่
ซึ่งหาได้จากสมการ (29)

$$t_c' = t + t_r' + t_{cr}' \quad (29)$$

ที่ซึ่ง t_r' สามารถคำนวณได้จากสมการ (30)

$$t_r' = \sqrt{\epsilon \frac{M_b}{K}} \cos^{-1} \left(\frac{F_o}{F_m} \right) \quad (30)$$

และ t_{cr}' สามารถคำนวณได้จากสมการ (31)

$$t'_{cr} = \sqrt{\frac{M_b}{eK} \cos^{-1} \left(\frac{F_o}{F_m} \right)} \quad (31)$$

จากสมการที่ 28 นั้น สามารถที่จะคำนวณค่าอัตราการยิงออกมาได้เพื่อเทียบกับค่าที่ต้องการโดยการคำนวณนั้นอาจต้องใช้การทำซ้ำเพื่อให้ค่าอัตราการยิงทั้งสองนั้นมีค่าแตกต่างกันในปริมาณที่ยอมรับได้

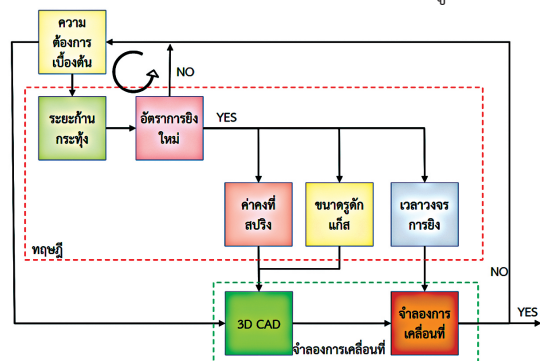
การวิจัยและพัฒนา นั้น เป็นการศึกษา วิจัย การออกแบบระบบโครงสร้างของปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบก้านกระทุ้ง พบว่า ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการผลักดันลูกเลื่อนในการขับเคลื่อนระบบเชิงกลต้องสอดคล้องกับแรงดันของแก๊ส เนื่องจากแรงดันแก๊สส่งผลต่อวงจรการทำงานของปืนเล็กยาวอัตโนมัติ ดังนั้น การพัฒนาความเชื่อมโยงระหว่างการออกแบบมิติก้านกระทุ้งและความดันแก๊สที่ต้องการจึงเป็นหัวใจสำคัญในการวิจัย ออกแบบ และพัฒนาระบบปืนเล็กยาวอัตโนมัติ

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบระบบอัตโนมัติของปืนเล็กยาวปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบก้านกระทุ้งระยะสั้นที่ได้กล่าวข้างต้น โดยใช้ปืนเล็กยาวอัตโนมัติตระกูล M4A1 เป็นตัวตั้งต้น โดยมีคุณลักษณะและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรและคุณลักษณะปืนเล็กยาวอัตโนมัติ

คุณลักษณะ	ตัวแปร	ค่า
กระสุน	-	5.56x45
พื้นที่หน้าตัดลำกล้อง	A_b	0.03955 in ²
อัตราการยิง	f_r	950 นัดต่อนาที
ความยาวลำกล้อง	L_{bt}	14.5 นิ้ว
ปริมาตรรังเพลิง	V_{ch}	0.14688 in ³
เส้นผ่านศูนย์กลางก้านกระทุ้ง	d_t	0.174 in
ระยะเคลื่อนที่ของลูกเลื่อน	L	3.7528 in
น้ำหนักชุดลูกเลื่อน	W_r	0.4686 ปอนด์
ค่าประสิทธิภาพของกลไก	ϵ	0.4

ในการวิจัยนี้มีขอบเขตของการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของปืน โดยมุ่งเน้นไปยังระยะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้ง (L_t) ที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการผลักดันลูกเลื่อนในการขับเคลื่อน (F_d) แรงดันของแก๊ส (P_c) ขนาดของสปริง (D) ขนาดของรูตักแก๊ส (D_o) และเวลาของวงจรการยิง (f_r) ระยะการทำงานของก้านกระทุ้งที่เหมาะสมจะทำให้ปืนมีการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นไปตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 โดยระยะการเปลี่ยนแปลงของระยะเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้ง (L_t) ที่ศึกษานั้น มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 – 4 นิ้ว และผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นแบบสามมิติและทำการจำลองการเคลื่อนที่เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี โดยแผนผังของวิธีการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5

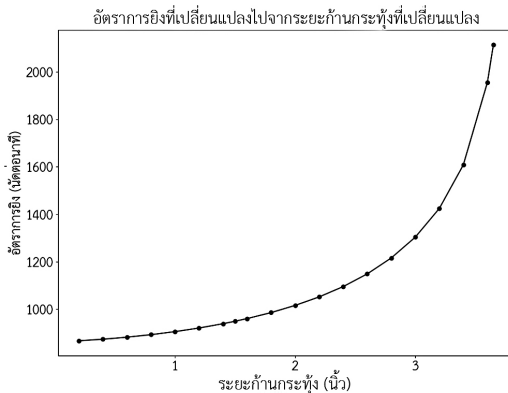


รูปที่ 5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

4. ผลการศึกษา

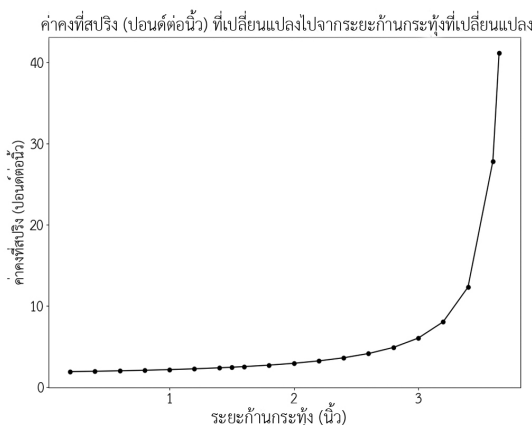
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระยะก้านกระทุ้งพบว่า การเปลี่ยนแปลงของการกระทุ้งมีผลต่อแรงที่ใช้ในการผลักดันลูกเลื่อน แรงดันของแก๊ส ขนาดของสปริง ขนาดของรูตักแก๊ส และเวลาของวงจรการยิงอย่างมีนัยสำคัญ รูปที่ 6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการยิงแปรผันตามระยะก้านกระทุ้ง ซึ่งได้จากการคำนวณสมการที่ (28) ยิ่งระยะก้านกระทุ้งเพิ่มมากขึ้นอัตราการยิงก็จะเพิ่มมากขึ้นตามแบบทวีคูณในช่วงระยะการเปลี่ยนแปลงของระยะเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งระยะสั้น ๆ นั้น สามารถประมาณได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของเชิงเส้น ซึ่งในการออกแบบ

ควรเลือกช่วงที่ระยะก้านกระทุ้งเปลี่ยนแปลงมาก แต่ส่งผลน้อยต่ออัตราการยิง ซึ่งทำให้ระบบการทำงาน ไม่มีผลกระทบต่อก้านกระทุ้งที่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าระยะก้านกระทุ้งที่ดีไม่ควรเกิน 2 นิ้ว



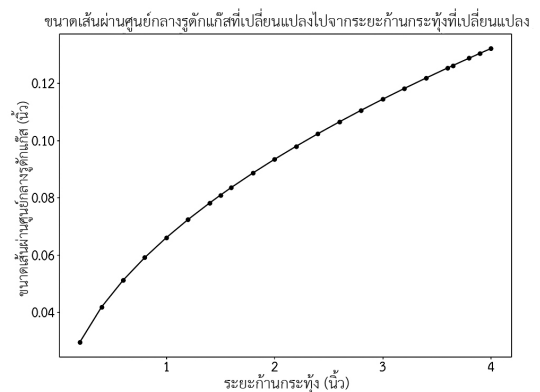
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้ง (L_t) ต่ออัตราการยิง (f_r)

รูปที่ 7 แสดงถึงระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งต่อค่าคงที่ของสปริง ซึ่งได้จากการคำนวณสมการที่ (16) จะเห็นว่าในช่วงระยะก้านกระทุ้งไม่เกิน 2 นิ้ว ค่าคงที่สปริง จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และจะเข้าสู่ค่าอนันต์ เมื่อระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งเข้าใกล้ค่า 3.65 นิ้ว ซึ่งในการออกแบบจะเลือกช่วงที่ก้านกระทุ้งมีผลต่อค่าคงที่ของสปริงที่น้อย ซึ่งคือระยะก้านกระทุ้งไม่ควรเกิน 2 นิ้ว



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้ง (L_t) ต่อค่าคงที่ของสปริง

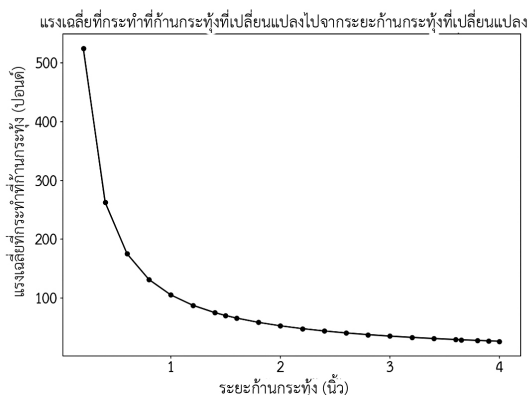
เมื่อระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งเปลี่ยนจะส่งผลให้พื้นที่ของขนาดช่องแก๊สเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (13) จะมีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นเล็กน้อยในช่วงระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งต่ำกว่า 1 นิ้ว และที่ระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งมากกว่า 1 นิ้ว ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งและขนาดช่องแก๊สเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นโดยประมาณ โดยในการออกแบบนั้นขนาดของรูตักแก๊สจะเป็นไปตามระยะของก้านกระทุ้งที่เลือกใช้



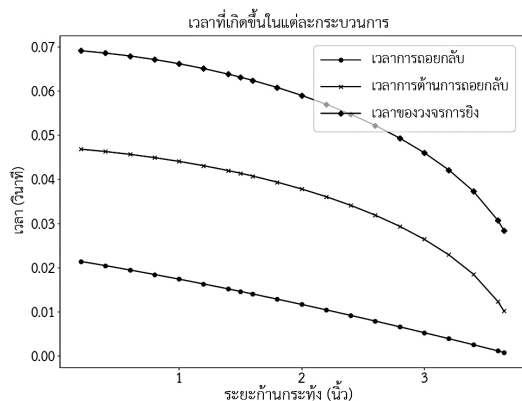
รูปที่ 8 การเปลี่ยนระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้ง (L_t) ต่อขนาดช่องแก๊ส (Orifice Diameter)

รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระยะก้านกระทุ้งต่อแรงที่กระทำที่ก้านกระทุ้ง ซึ่งได้จากการคำนวณสมการที่ (8) พบว่า ยิ่งระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งสูงขึ้นแรงที่กระทำที่ก้านกระทุ้งมีค่าลดลง และความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งและแรงที่กระทำที่ก้านกระทุ้งเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่ระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งสั้น ซึ่งหากเลือกระยะก้านกระทุ้งที่ต่ำกว่า 1 นิ้ว พบว่า แรงที่กระทำต่อก้านกระทุ้งจะมีค่าสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อขนาดของโครงสร้างที่ต้องมีขนาดใหญ่ และนำมาด้วยน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาแรงเฉื่อยที่กระทำต่อก้านกระทุ้งแล้วพบว่า ระยะก้านกระทุ้งที่ควรเลือกใช้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว

โดยสรุปรวมจากรูปที่ 6 - 9 แสดงให้เห็นว่า ระยะก้านกระทุ้งที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 1 - 2 นิ้ว



รูปที่ 9 การเปลี่ยนระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้ง (L_t) ต่อแรงที่กระทำที่ก้านกระทุ้ง



รูปที่ 10 การเปลี่ยนระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้ง (L_t) ต่อเวลาของวงจรการยิง

รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระยะก้านกระทุ้งต่อเวลาของวงจรการยิง ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (29), (30) และ (31) พบว่า เวลาของวงจรการยิงจะลดลงเมื่อระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้งเพิ่มขึ้น กล่าวคือ สามารถยิงได้เร็วขึ้นถ้าเพิ่มระยะเคลื่อนที่ก้านกระทุ้ง

จากรูปที่ 10 พบว่า หากต้องการระยะก้านกระทุ้งให้มีผลลัพธ์เป็นตามข้อมูลในตารางที่ 1 โดยพิจารณาตัวแปรอัตราการยิงเป็นหลัก ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักของอาวุธปืนที่ต้องทำให้ได้ จะได้ว่าระยะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งนั้นต้องมีค่าอยู่ในช่วง 1.3 - 1.5 นิ้ว

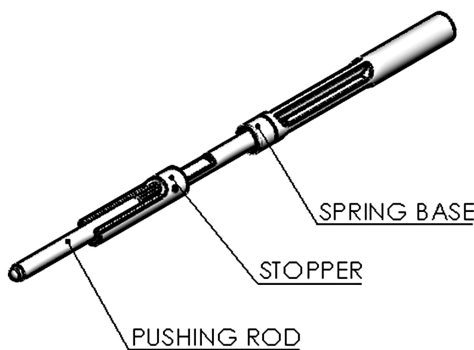
ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ว่าระยะก้านกระทุ้งที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 1 - 2 นิ้ว

โดยเงื่อนไขข้อตรรกการยิงที่ต้องทำให้ได้เท่ากับ 950 นัดต่อนาที จากรูปที่ 3 จะได้ว่าต้องการระยะก้านกระทุ้งที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.3 - 1.5 นิ้ว โดยจากระยะก้านกระทุ้งนี้สามารถคำนวณตัวแปรอื่นได้จากสมการที่ (11), (17), (28), (29), (30) และจากรูปที่ 4 - 7 ซึ่งจะได้ค่าการออกแบบของตัวแปรอื่นดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้เพียงพอต่อการนำไปออกแบบเฉพาะส่วนระบบก้านกระทุ้งต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าของตัวแปรอื่นเมื่อระยะการกระทุ้งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.3 - 1.5 นิ้ว

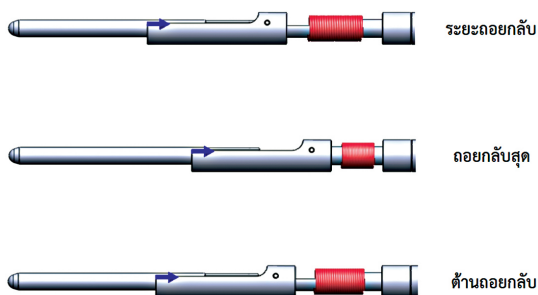
ตัวแปร	ค่า
อัตราการยิง f_r	950 นัดต่อนาที
เวลาของวงจรการยิง t_c	0.063 วินาที
รูตักแก๊ส D_o	0.08 นิ้ว
ระยะเวลาลอยกลับ t_r	0.0119 วินาที
ระยะเวลาด้านการลอยกลับ t_{cr}	0.0338 วินาที
ระยะเวลาสปริงยุบตัว t	0.0137 วินาที
ระยะเวลาสปริงคืนตัว T_C	0.0036 วินาที
ค่าคงที่สปริง K	2.2 ปอนด์ต่อนิ้ว

ในเบื้องต้นได้นำค่าที่ได้จากตารางที่ 2 มาใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเบื้องต้นด้วยโปรแกรม CAD 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยชิ้นส่วนที่ได้นี้เป็นชิ้นส่วนเฉพาะบริเวณก้านกระทุ้งเท่านั้น โดยในบริเวณส่วนกลางระหว่าง Stopper และ Spring Base จะมีสปริงใส่อยู่ (ไม่ได้แสดงไว้ในรูป) โดยสปริงนี้จะทำให้เกิดการดันการลอยกลับโดยค่าคงที่ของสปริงจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 11 แสดงแบบสามมิติของระบบก้านกระทุ้งที่พัฒนาขึ้นมา

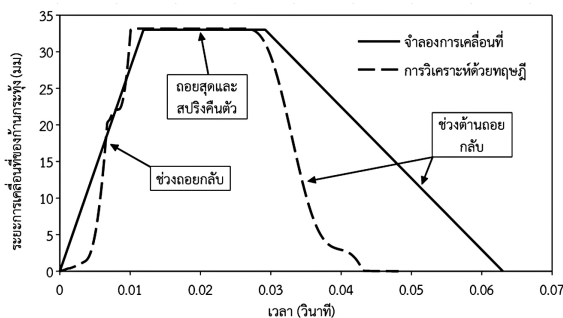
โดยชิ้นงานที่ได้ (แสดงในรูปที่ 11) นำมาทำการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปด้วยการกำหนดมวลให้กับชิ้นงาน การกำหนดแรงกระทำที่ได้จากรูปที่ 9 ระยะเวลาในช่วงต่าง ๆ และค่าคงที่ของสปริงที่ได้จากตารางที่ 2 ทำให้สามารถทำการจำลองการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งได้ ดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นถึงก้านกระทุ้งที่เคลื่อนที่ถอยหลัง (ไปทางขวา) พร้อมกับสปริงที่ถูกกดลงไปจนสุด และคืนตัวกลับมาจากแรงกระทำที่ก้านกระทุ้งนี้



รูปที่ 12 แสดงการเคลื่อนที่ของระบบก้านกระทุ้ง

ในการตรวจสอบการออกแบบเบื้องต้นนี้จะใช้การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลตัวแปรที่ได้จากทฤษฎีในหัวข้อที่ 3 (แสดงดังตารางที่ 2) เทียบกับผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งเทียบกับเวลาที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ที่แสดงในรูปที่ 13 จะเห็นถึงกระบวนการช่วงถอยกลับ ถอยสุด และสปริงคืนตัว

และช่วงด้านการถอยกลับ โดยทฤษฎีและการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ยังมีข้อแตกต่างที่ยังต้องปรับปรุง ซึ่งจะพัฒนาในขั้นต่อไป



รูปที่ 13 แสดงผลของการเคลื่อนที่ของระยะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่และจากทฤษฎี

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการวิจัยในลักษณะการศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้รับการทบทวนวรรณกรรม วิทยานิพนธ์ และบทวิจารณ์ที่ได้รับ การตีพิมพ์และวิเคราะห์เชิงข้อมูล เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของอาวุธปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบระบบแก๊สพุงหน้าลูกเลื่อนและระบบก้านกระทุ้ง การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของอาวุธปืนเล็กยาวอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไปจากระบบปืนอัตโนมัติจากระบบแก๊สพุงหน้าลูกเลื่อน เป็นระบบก้านกระทุ้งช่วงชักสั้นตลอดจนการวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงระบบโครงสร้างของปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบแก๊สพุงหน้าลูกเลื่อนและแบบก้านกระทุ้ง

ผลการทบทวนวรรณกรรมระบบปืน AR15/M4/M16 ซึ่งเป็นปืนเล็กยาวอัตโนมัติที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายและได้มีวิวัฒนาการอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าระบบปืนอัตโนมัติด้วยระบบปฏิบัติการด้วยแก๊สแบบแก๊สพุงหน้าลูกเลื่อน (Direct Impingement) และแบบก้านกระทุ้ง (Gas Piston) เป็นระบบอัตโนมัติ

ที่นิยมใช้ และจากรายงานการใช้งาน พบว่า ระบบปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบก้านกระทุ้งมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าแก๊สปั่นหน้าลูกเลื่อน

นอกเหนือจากนี้งานวิจัยในส่วนของ การวิจัยพัฒนาเชิงประยุกต์ ซึ่งเป็นการวิจัยและออกแบบระบบโครงสร้างของปืนเล็กยาวอัตโนมัติแบบแก๊สปั่นหน้าลูกเลื่อนและแบบก้านกระทุ้งพบว่า ความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่ของก้านกระทุ้งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีทั้งแบบที่สัมพันธ์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น โดยค่าที่เหมาะสมของการออกแบบเบื้องต้นอยู่ที่ 1.3 - 15 นิ้ว ตามค่าการออกแบบที่ต้องการ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ได้นำไปออกแบบในเบื้องต้นและทำการจำลองการเคลื่อนที่ พบว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องไปตามทฤษฎี แต่ยังมีข้อแตกต่างที่ยังต้องแก้ไขและพัฒนาต่อไป การต่อยอดงานวิจัยนี้ในอนาคตจะมุ่งเน้นไปในการจำลองการเคลื่อนที่โดยประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ของไหลแบบพลศาสตร์ในการสร้างแก๊สที่ผลักดันชุดลูกเลื่อนให้เคลื่อนที่ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) บริษัท สหพัฒน์กิจ จำกัด และบริษัท เอ็มดันคาร์เมียล จำกัด ในการร่วมวิจัยเพื่อนำไปสู่การร่วมทุน (WMI) สำหรับการสร้างขีดความสามารถในการผลิตอาวุธปืนภายในประเทศ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] History Detectives. "Gun Timeline." PBS.org. <https://www.pbs.org/opb/historydetectives/technique/gun-timeline/> (accessed Mar. 3, 2024).
- [2] The Editors of Encyclopaedia Britannica. "Machine Gun." BRITANNICA.com. <https://www.britannica.com/technology/machine-gun> (accessed Mar. 3, 2024).
- [3] R. C. Rattenbury. "Rifle." BRITANNICA.com. <https://www.britannica.com/technology/rifle> (accessed Mar. 3, 2024).
- [4] C. Baker. "Blowback Versus Recoil Operated Pistols." LUCKYGUNNER.com. <https://www.luckygunner.com/lounge/blowback-versus-recoil/> (accessed Mar. 5, 2024).
- [5] E. Shelton. "How Gas-Operated Rifles Do Their Job." GUNDIGEST.com. <https://gundigest.com/more/how-to/gas-operated-rifles-job> (accessed Mar. 5, 2024).
- [6] S. Jacobs. "Eugene Stoner: The Forgotten History of the Man Who Created 'America's Rifle' - the AR-15." AMMO.com. <https://ammo.com/articles/eugene-stoner-creator-ar-15-americas-rifle-forgotten-history> (accessed Mar. 5, 2024).
- [7] M. Lutes. "Best M16 Lower Receivers

- Rated & Reviewed.” GUNMANN.com. <https://gunmann.com/m16-lower-receivers/> (accessed Mar. 12, 2024).
- [8] K. Scribner. “A Comparison Between AR-15 and M16. Which is Better?.” STAR2.org. <https://www.star2.org/ar-15-and-m16-comparison/> (accessed Mar. 12, 2024).
- [9] A. Feickert, “The Army’s M-4 Carbine: Background and Issues for Congress,” Congressional Research Service, Washington, D.C., USA, Rep. RS22888, 2009.
- [10] M. Cox. “Newer Carbines Outperform M4 in Dust Test.” FNFORUM.net. <https://www.fnforum.net/threads/newer-carbines-outperform-m4-in-dust-test.2323/> (accessed Mar.18, 2024).
- [11] G. L. Rottman, *The AK-47: Kalashnikov-series Assault Rifles (Weapon)*. Oxford, UK: Osprey Publishing, 2011.
- [12] “Posture Statement of Admiral Eric T. Olson, USN Commander United States Special Operations Command Before The 112th Congress House Armed Services Committee March 3, 2011.” IRP.FAS.org. https://irp.fas.org/congress/2011_hr/030311olson.pdf (accessed Mar. 12, 2024).
- [13] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, “โครงการวิจัยพื้นฐานปี 2562 เรื่อง การวิเคราะห์การออกแบบระบบปืนฝักทางยุทธวิธีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” สทป., ปากเกร็ด, นนทบุรี, ไทย, 2562.
- [14] J. H. Spurk, “The Gas Flow in Gas-operated Weapons,” U.S. Army Aberdeen Research and Development Center, MD, USA, Rep. 1475, 1970.

การปรับปรุงสมบัติทางกลที่รับแรงดันด้วยการชุบแข็งแบบกระแสเหนี่ยวนำ

สุรเดช เกลิมบุญ^{1*} สิทธิธา สายดาราสุมุท¹

สาวิตรี ผาวจันดา¹ อภิรัฐ โกสิดานนท์¹ และ กฤษณะ ธรรมิกานนท์¹

วันที่รับ 1 พฤษภาคม 2567 วันที่แก้ไข 1 สิงหาคม 2567 วันที่ตอบรับ 20 กันยายน 2567

บทคัดย่อ

ความเสียหายของท่อรับแรงดันระหว่างการใช้งานเกิดจากบริเวณปลายท่อทั้งสองด้านได้รับการกระทบที่มากกว่าค่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุ แต่ด้วยข้อจำกัดของรูปร่างท่อรับแรงดัน จึงไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการชุบแข็งด้วยเตาไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้ จึงต้องการศึกษาวิธีการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ ที่สามารถทำกรรมวิธีทางความร้อนเฉพาะบริเวณได้งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ ที่มีต่อคุณสมบัติของท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยการไหล (Flow Forming) เพื่อเป็นแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ท่อรับแรงดัน การทดลองเริ่มจากนำข้อมูล และตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คาดการณ์ผลที่จะเกิดกับชิ้นงาน จากนั้นจึงนำท่อตัวอย่างมาทำการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำความร้อนชนิดความถี่กลาง 15 kHz ในลักษณะการทำให้เป็นออสเทนไนต์ แล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวดด้วยการฉีดยาน้ำบริเวณผิวชิ้นงานโดยรอบ หลังการชุบแข็งนำชิ้นงานมาตัดเป็นชิ้นตัวอย่างทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็งแรงจุลภาค และทดสอบความต้านทานแรงดึง ระหว่างบริเวณที่ไม่ได้ทำการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Non-Hardening Zone: NHZ) กับบริเวณที่ทำการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Hardening Zone: HZ) ก่อนการอบชุบท่อมีค่าความแข็งแรง 284.65 วิกเกอร์ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความเค้น ณ จุดคราก เท่ากับ 749.39 และ 685.17 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากโครงสร้างงานรีดเป็นมาร์เทนไซต์แบบแฟงที่มีออสเทนไนต์เหลือค้างผสมอยู่สำหรับความแข็งแรงจุลภาคและความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 2 เท่า ในส่วนของผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4130 มีโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงที่เปลี่ยนไป สามารถนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับท่อรับแรงดันให้มีความแข็งแรงตอบสนองต่อการใช้งานได้ อีกทั้งเป็นการยืนยันได้ว่าสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการออกแบบกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การชุบแข็งแบบเหนี่ยวนำ, การเย็นตัวอย่างยิ่งยวด, เหล็กกล้าผสม 4130

¹ ส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: suradet.c@dti.or.th

The Improvement Mechanical Properties of Pressure Tube by Induction Hardening Process

Suradet Chalermboon ^{1*} Sittha Saidarasamoot ¹

Sawitri Phabjanda ¹ Apirath Gositanon ¹ and Kritsana Thummikanonth ¹

Received 1 May 2024, Revised 1 August 2024, Accepted 20 September 2024

Abstract

The aim of this study was to explore the impact of induction hardening on the microstructure and mechanical properties of AISI 4130 steel improvement strength of pressure tube application. The primary objective is to enhance the strength of the tube ends, which are susceptible to failure due to excessive loads during service. However, due to the shape limitations of the pressure tube, traditional electric furnace hardening methods cannot be used to increase its strength. Therefore, there is a need to study induction hardening methods that can apply localized heat treatment. The investigation commenced use of finite element analysis to predict the result of the process. In experiments the samples were heated with a 15 kHz medium frequency induction hardening process, followed by water quenching. Subsequently, the samples underwent metallographic preparation, microstructural analysis, hardness testing and tensile testing. The findings revealed that the microstructure of Hardening Zone, HZ exhibited lath martensite and retained austenite in their microstructures. The average as-rolled was mechanical properties measured at 284.65 HV for hardness and ultimate and yield strength 749.39 MPa, 685.17 MPa respectively for tensile properties. In contrast, Hardening Zone, HZ containing lath martensite, experienced an approximately two-fold increase in mechanical properties compared to the as-rolled state. The finite element analysis results are closely align with experimental findings. Conclusion, induction hardening proved to be an effective heat treatment method for enhancing the mechanical properties of the AISI 4130 steel, as evidenced by the observed changes in microstructure and mechanical properties. The above method can be applied to improve the mechanical properties of pressure tube to application more responsive to usage. Furthermore, it confirms the usefulness of finite element methods in the design process.

Keywords : Induction hardening, Quenching, AISI 4130 Steel

¹ Metallurgical and Materials Engineering Division, Research and development Department, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: suradet.c@dti.or.th

1. บทนำ

ท่อรับแรงดัน (Pressure Tube) คือ ท่อที่ออกแบบมาเพื่อใช้รับแรงดันของของเหลวหรือก๊าซภายในโดยที่สามารถทนทานและป้องกันการรั่วไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การผลิตท่อรับแรงดันด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยการไหล (Flow Forming) ทำให้ได้ท่อที่มีความหนา ลดลง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จากการใช้งานพบว่าเมื่อท่อได้รับแรงดันเพิ่มขึ้น บริเวณปลายท่อทั้ง 2 ด้านที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือระบบอื่น ๆ มีค่าการกระรุมมากระทำ 1,056 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุเป็นเท่าตัว ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวได้รับความเสียหาย [1] ดังนั้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องทำการเพิ่มความแข็งแรงให้กับบริเวณดังกล่าว การเพิ่มความแข็งแรงของท่อสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนชนิดของวัสดุ การเพิ่มความหนา การออกแบบ และการปรับปรุงการผลิตซึ่งในกรณีดังกล่าว การปรับปรุงการผลิตในลักษณะการทำการกรรมวิธีทางความร้อนมีความสอดคล้องกับทรัพยากรที่มีอยู่ในปัจจุบัน แต่เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างและขนาดชิ้นงานสำเร็จของท่อรับแรงดันหลังกระบวนการผลิตแล้วนั้นพบว่าไม่สามารถทำการการชุบแข็งด้วยเตาไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้จึงมีความต้องการศึกษากรรมวิธีการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำที่สามารถทำการกรรมวิธีทางความร้อนเฉพาะบริเวณได้

คุณสมบัติของเหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) สามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการทำการกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) การปรับคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน คือ การนำชิ้นงานมาทำการให้ความร้อนในระดับต่าง ๆ จนได้อุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นทำให้เกิดการเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวตามความต้องการเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ หากพิจารณาตามลักษณะการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนจะพบว่า มี 2 รูปแบบ คือ การทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และการทำให้ชิ้นงาน

อ่อนตัวลง วิธีในการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การอบอ่อน (Annealing) การอบปกติ (Normalizing) การชุบแข็ง (Hardening) การอบคืนไฟ (Tempering) และการชุบผิวแข็ง (Surface Hardening) โดยวิธีที่กล่าวมานั้นสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกันเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมต่อการผลิตและการใช้งาน เช่น การชุบแข็งและการอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) เพื่อให้ได้ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียวหรือความยืดหยุ่น (Ductility) หรือผ่านการอบอ่อน (Annealing) เพื่อทำให้สามารถนำไปตกแต่งทางกลได้ง่ายขึ้น การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนทั้ง 2 รูปแบบ จะบรรลุผลได้จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนภาพสมดุลของเหล็กคาร์ไบด์ แผนภาพการเย็นตัวของโลหะชนิดนั้น ๆ [2]

การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Induction Hardening) เป็นวิธีการในการชุบแข็งชิ้นงานที่อาศัยหลักการทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการใช้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว นิยมใช้กับเหล็กกลุ่มที่มีคาร์บอนปานกลางเป็นต้นไป ในปัจจุบันวิธีการดังกล่าวได้นำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือ ชิ้นส่วนต่าง ๆ อุตสาหกรรมหล่อโลหะ รวมถึงการขึ้นรูปโลหะ [3] เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องต้นทุนต่อเวลาทำให้มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำการกรรมวิธีทางความร้อนแบบดั้งเดิมด้วยการใช้เตาอบ อีกทั้งยังสามารถเลือกใช้ปรับสมบัติเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการได้ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีบริเวณผิวชิ้นงาน การเสียรูปร่างหลังกระบวนการค่อนข้างต่ำ รวมถึงมีคุณภาพผิวหลังกระบวนการที่น่าพอใจ เนื่องจากเกิดออกไซด์บริเวณผิวที่น้อย [4]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130

ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยการไหล เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับท่อรับแรงดันต่อไป

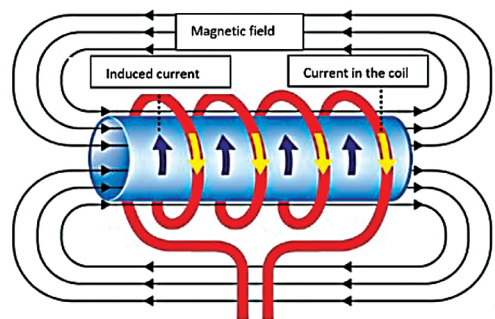
2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เหล็กกล้าผสม AISI 4130 จัดอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy Steel) ที่มีคาร์บอน และธาตุอื่น ๆ รวมกันไม่เกิน 10% โดยทั่วไปมักเรียกกันว่าเหล็กโครเมียม (Chromium Steel) หรือเหล็กกล้าโครเมียมโมลิบดีนัม (Chromium-molybdenum Steel) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน ร้อยละ 0.28 - 0.33, โครเมียม ร้อยละ 0.8 - 1.1 และโมลิบดีนัม ร้อยละ 0.15 - 0.25 เป็นหลัก มีโครงสร้างคล้ายเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steel) แต่มีคุณสมบัติที่ดีกว่า สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นิยมนำมาใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และเครื่องมือเครื่องจักร อุตสาหกรรมน้ำมัน และก๊าซ อุตสาหกรรมการบิน และอวกาศ อุตสาหกรรมโครงสร้างและการก่อสร้าง รวมถึงอุตสาหกรรมการเกษตร

การขึ้นรูปโดยการไหล เป็นวิธีการขึ้นรูปเย็นแบบหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรง (Strengthening) ของโลหะเพิ่มมากขึ้น เหมาะสำหรับการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงเฉือนจนเกินกว่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Point) จะเกิดการไหล (Slip) ทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) กระบวนการรีดเย็นจะทำให้ปริมาณดิสโลเคชันในชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณดิสโลเคชันในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การไหลของอะตอมทำได้ยากขึ้น ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น การขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้นอกจากช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะแล้วยังมีข้อดีอื่น ๆ อีก เช่น สามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ตามต้องการ และมีความละเอียดสูง มีการสูญเสียวัสดุน้อยกว่าการขึ้นรูปทางกล (Machining) และใช้ระยะเวลาไม่มากสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน [5]

การเหนี่ยวนำความร้อนเป็นวิธีการถ่ายเทพลังงาน

จากการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปตามหลักการของแมกซ์เวลล์ที่เกิดกับวัตถุกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก และมีหลักการทำงานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการให้กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านขดลวดและก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากรูปที่ 1 เมื่อนำชิ้นวัสดุโลหะเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุนั้น โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด เนื่องจากโลหะทุกชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในโลหะจึงทำให้เกิดความร้อนขึ้น ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้น คือ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกถ่ายทอดออกไปเป็นความร้อนในชิ้นโลหะ โดยที่ไม่มีการสัมผัสทางกลเกิดขึ้น [6]



รูปที่ 1 โครงสร้างอย่างง่ายของการเหนี่ยวนำความร้อน [6]

จากหลักการดังกล่าวกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของชิ้นงาน เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางพื้นผิว (Skin Effect) ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสลดลงโดยประมาณร้อยละ 37 คงเหลือความหนาแน่นของกระแสโดยประมาณร้อยละ 63 ที่มีผลต่อการซึมลึกของความร้อนที่เกิดขึ้นงาน หรือที่เรียกว่า ความร้อนลึกผิว (Skin Depth) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [6]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{el}}{\pi \mu_o \mu_r f}} \quad (1)$$

δ คือ ความลึกผิว (m)

ρ_{el} คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ($\Omega \cdot m$)

μ_o คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ (H/m)

μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กในสภาพแวดล้อม (-)

f คือ ความถี่ของกระแส (Hz)

จากสมการ (1) แสดงให้เห็นว่าค่าความลึกผิวขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) และความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน (Resistivity) สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับผลของ Skin Effect คือ การเลือกใช้ช่วงความถี่ให้เหมาะสมกับชิ้นงาน โดยช่วงความถี่กับการประยุกต์ใช้งานด้วยระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้มีการจำแนกไว้ตามชนิดของแหล่งจ่ายกำลัง [7] ในทางปฏิบัติการเหนี่ยวนำความร้อนชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อ (Tubular Products) จะเลือกใช้ย่านความถี่กลางหรือความถี่ต่ำนำมาใช้งาน เนื่องจากมีความเสถียรของระบบและมีความคุ้มค่างบต้นทุนการผลิตมากกว่าการใช้ความถี่สูง สำหรับความถี่ที่เหมาะสมกับชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [8]

$$F_{optimal} = 8.65 \cdot \frac{\rho \cdot 10^5}{A_m h} \quad (2)$$

โดย

$F_{optimal}$ คือ ความถี่ที่เหมาะสมกับชิ้นงานท่อ (Hz)

ρ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะเมื่อได้รับความร้อน ($\mu\Omega \cdot m$)

A_m คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของท่อ (m)

h คือ ความหนาของท่อ (m)

การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำเริ่มจากนำชิ้นงานไปวางในขดลวด แล้วจึงปล่อยกระแสไฟความถี่สูงเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ผิวของตัวชิ้นงาน ความต้านทานกระแสไฟฟ้า

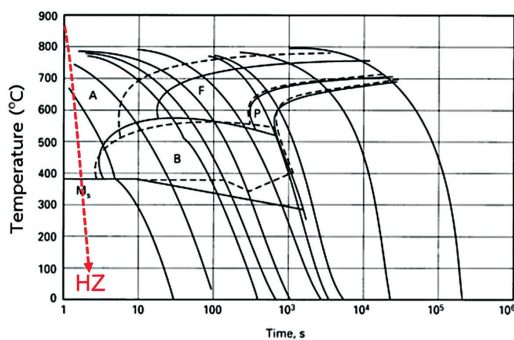
ของชิ้นงานนี้จะทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤตภายในเวลา 3 - 5 วินาที จากนั้นทำให้เย็นตัวโดยการพ่นละอองน้ำ ซึ่งองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น เช่น ขดลวดเหนี่ยวนำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน กระแสในการเหนี่ยวนำ ช่วงความถี่ของชุดแหล่งจ่าย เวลาที่ใช้ในกระบวนการ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน อัตราการชุบแข็ง [9]

อุณหภูมิในการอบละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) ของเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ในการชุบแข็ง (Hardening) ด้วยเตาอบ (Furnace Heating) มีอุณหภูมิในช่วง 830 - 870 องศาเซลเซียส สำหรับในกระบวนการชุบแข็งแบบกระแสเหนี่ยวนำจะต้องใช้อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อเป็นการชดเชยให้มีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นงาน เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 900 องศาเซลเซียสขึ้นไป [2], [10]

ในการปรับคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ข้อมูลสำคัญที่ใช้พิจารณาเลือกกระบวนการที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน คือ แผนภาพการเย็นตัว (Cooling Diagram) โดยในบทความนี้จะขอกล่าวเพียงแผนภาพการเย็นตัวต่อเนื่อง ซึ่งเป็นลักษณะการเย็นตัวของชิ้นงานในงานวิจัยนี้

แผนภาพการเย็นตัวต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation Diagram: CCT) เป็นลักษณะเฉพาะตัวของเหล็กกล้าผสมแต่ละชนิดที่หารายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลังการเย็นตัวจากเฟสออสเทนไนต์ (Austenite) ที่อัตราการเย็นตัวต่างกัน ช่วยให้สามารถคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นได้ โดยมีเส้นโค้งต่าง ๆ เป็นตัวแทนลักษณะการเย็นตัวที่อัตราการเย็นตัวแตกต่างกัน ลักษณะการเย็นตัวจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างที่เกิดขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของเหล็กกล้าผสม แผนภาพการเย็นตัวต่อเนื่องสำหรับเหล็กกล้าผสม AISI 4130 แสดงดังรูปที่ 2 ในงานวิจัยนี้

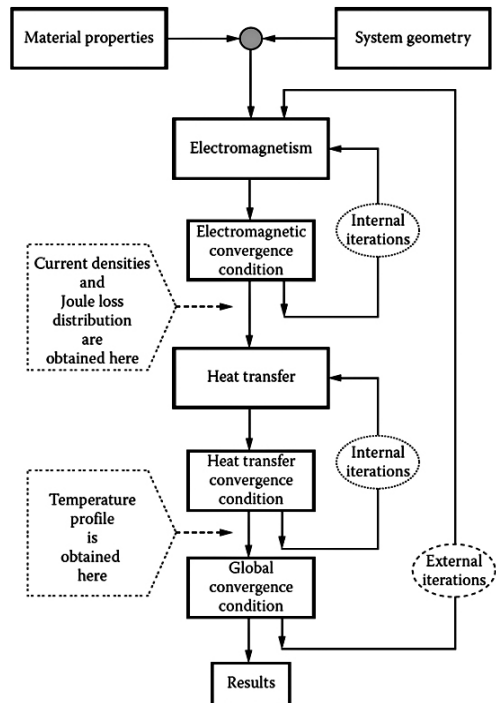
ใช้ลักษณะการเย็นตัวตามแนวเส้นประ (Hardening Zone: HZ) ซึ่งเป็นลักษณะการทำกรรมวิธีทางความร้อนในรูปแบบการชุบแข็ง (Hardening) โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) แล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวด (Quenching) ในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงวิกฤต (Critical Cooling Rate) สำหรับเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มีค่าอยู่ในช่วง 170 - 200 องศาเซลเซียสต่อวินาที [2] จะได้โครงสร้างจุลภาคที่มีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งสามารถรับภาระกรรมได้ดีกว่าโครงสร้างหลังการรีด



รูปที่ 2 รูปแบบการเย็นตัวในการทำ Hardening ชิ้นงาน เหล็กกล้าผสม AISI 4130 (ดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [2])

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ และทำนายความเป็นไปได้ของพฤติกรรมวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติไปสู่สภาวะใหม่ จุดเด่นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ลดต้นทุนและเวลาในขั้นตอนของการออกแบบ โดยแสดงรูปร่างของแบบจำลองสองมิติและสามมิติบนคอมพิวเตอร์แทนการสร้างต้นแบบจริง การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน ใช้การวิเคราะห์ผลจากการเชื่อมโยงข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3 เริ่มจากการนำเข้าข้อมูลเกี่ยวกับการขึ้นรูปแบบจำลองและการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ จากนั้นทำการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบ (Electromagnetism) และต่อมาทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในระบบ (Heat

Transfer) โดยสร้างความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการบรรจบกันแบบรวม (Global Convergence Condition) การวิเคราะห์แต่ละขั้นตอนจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการทำซ้ำ (Iteration Process) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากกระบวนการทั้งหมด นำไปใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเฟสและโครงสร้างภายหลังจากการชุบ หลังจากนั้นจึงนำผลลัพธ์ในขั้นที่สองไปคำนวณค่าความแข็งต่อไป [3], [11]



รูปที่ 3 ภาพขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน [3]

สำหรับสมการในการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชิ้นงานและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในกระบวนการเหนี่ยวนำความร้อน เป็นการประยุกต์ใช้สมการฟูเรียร์ - เคอร์ชอฟฟ์ (Fourier-Kirchhoff's) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) - (6) [12] พิจารณาตามลำดับของกระบวนการที่เกิดขึ้นเพื่อหาผลเฉลยต่อไป ดังนี้

กระบวนการให้ความร้อน (Heating) ;
ภายในชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + Q_{ind} \quad (3)$$

ผิวชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + Q_{ind} - S \cdot \sigma \cdot \varepsilon(T^4 - T_{air}^4) - S \cdot \alpha(T - T_{air}) \quad (4)$$

กระบวนการชุบแข็ง (Hardening) ;
ภายในชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T \quad (5)$$

ผิวชิ้นงาน :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + S \cdot \alpha(T_{water} - T) \quad (6)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าความหนาแน่น, c คือ ค่าความร้อนจำเพาะ, T คือ อุณหภูมิของชิ้นงาน, T_{air} คือ อุณหภูมิของอากาศ, T_{water} คือ อุณหภูมิของน้ำ, S คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน, σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์, α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, ε คือ อัตราการแผ่รังสี, λ คือ ค่าการนำความร้อน และ Q_{ind} คือ ค่าความหนาแน่นพลังงานความร้อน

การวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นหลังการเย็นตัวจากเฟสออสเทนไนต์ใช้สมการคำนวณแฟร็กชันเชิงปริมาตร (Volume Fraction) ของอ็ฟราไม และ จอห์นสัน-เมห์ล (Avrami and Johnson-Mehl's) ดังสมการที่ (7) และ (8) [12]

แฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) :

$$y_P(T, t) = y_A(1 - \exp(-b(T) t^{n(T)})) \quad (7)$$

แฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟสเบนไนต์ (Bainite) :

$$y_B(T, t) = y_A(1 - y_P)(1 - \exp(-b(T) t^{n(T)})) \quad (8)$$

สำหรับแฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟสมาร์เทนไซต์ ใช้การคำนวณด้วยสมการของคอยส์ตีเนนและ

มาร์เบอร์เกอร์ (Koistinen and Marburger's) ดังสมการที่ 9 [12]

$$y_M = y_A(1 - y_B - y_P)(1 - \exp(-k(M_s - T)^m)) \quad (9)$$

โดยที่ y_A, y_P, y_B, y_M คือ แฟร็กชันเชิงปริมาตรของเฟส, $b(T), n(T)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ และ k, m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กัชิ้นงาน

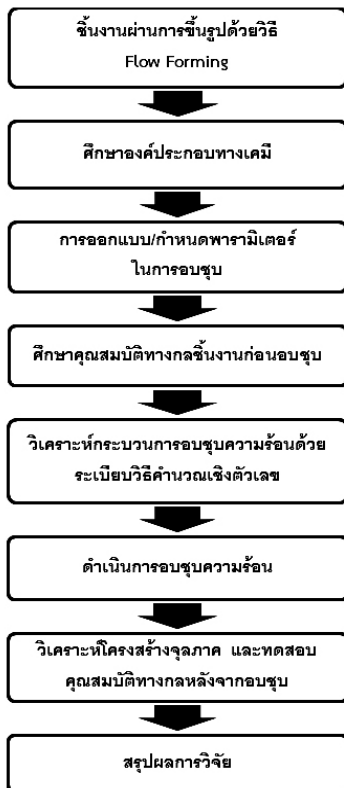
การทำนายค่าความแข็งแบบวิกเกอร์จะใช้การวิเคราะห์ความถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ดังสมการที่ (10) [12]

$$HV = C_o + \sum(C_{1i} \cdot c_i \cdot Fe) + \sum(C_{2i} \cdot c_i \cdot Pe) + \sum(C_{3i} \cdot c_i \cdot Ba) + \sum(C_{4i} \cdot c_i \cdot Ma) \quad (10)$$

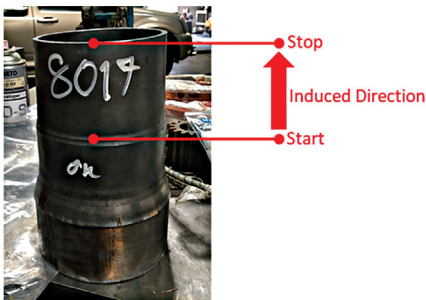
C_o, C_1, C_2, C_3, C_4 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย, C_i คือ ร้อยละของธาตุผสม, Fe, Pe, Ba, Ma คือ ร้อยละของเฟสเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ เบนไนต์ และมาร์เทนไซต์

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยดำเนินการตามแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4 โดยนำชิ้นส่วนท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ที่ผ่านการรีดขึ้นโดยการไหล มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 125 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 115 มิลลิเมตร สูง 220 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 5 มาดำเนินการวิเคราะห์ห้องประกอบทางเคมีโดยเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีมาตรฐาน จากนั้นจึงทำการออกแบบ/กำหนดพารามิเตอร์ในการอบชุบทดสอบคุณสมบัติทางกลก่อนการดำเนินการมวธิ์อบชุบและทำการวิเคราะห์กระบวนการอบชุบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วจึงนำชิ้นส่วนท่อเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มาทำการอบชุบตามพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และทดสอบคุณสมบัติทางกลจะดำเนินการอีกครั้งหลังจากขึ้นงานผ่านการอบชุบแล้ว จากนั้นนำผลการวิเคราะห์และทดสอบที่ได้หลังจากอบชุบ



รูปที่ 4 แผนภาพวิธีดำเนินการวิจัย



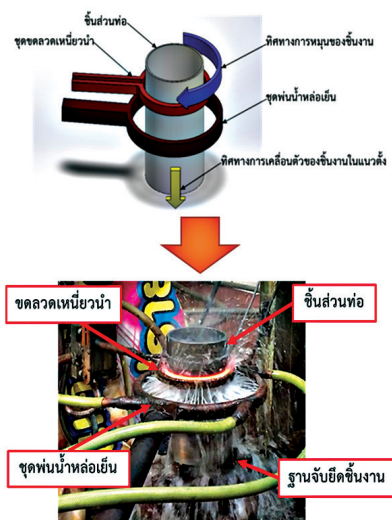
รูปที่ 5 ชิ้นส่วนท่อที่ใช้ทำการทดลอง

มาเปรียบเทียบกับก่อนการอบชุบ อภิปรายผล และสรุปผลการวิจัย

3.1 การดำเนินการอบชุบ

การอบชุบความร้อนด้วยกระแสเหนี่ยวนำ เริ่มจากนำชิ้นส่วนท่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยการไหลมาทำการเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อละลาย

เฟสเดิมให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) ด้วยเครื่องอบชุบ ความร้อนแบบกระแสเหนี่ยวนำความถี่กลาง (~15 kHz) ซึ่งได้มาจากการคำนวณตามสมการที่ (2) ตัวเครื่องมีกำลังไฟฟ้า 160 กิโลวัตต์ หมุนชิ้นงานด้วยความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที อัตราเร็วในการเคลื่อนชิ้นงานผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที ช่วงความยาวในการเหนี่ยวนำความร้อนเท่ากับ 80 มิลลิเมตร (Start-Stop) อบชุบ ณ บริเวณตามรูปที่ 5 ทำการเหนี่ยวนำความร้อนชิ้นงานจนกระทั่งอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ตรวจสอบและบันทึกอุณหภูมิบริเวณผิวชิ้นงานด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ Fluke รุ่น Ti400 จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวดด้วยน้ำ (Water Quenching) รอบบริเวณผิวด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 6

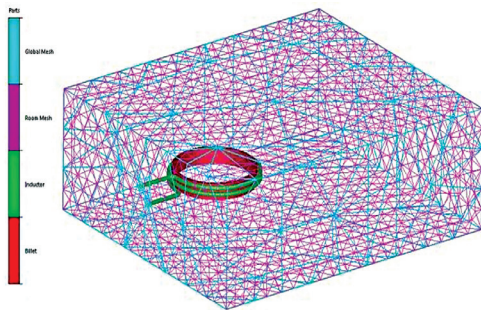


รูปที่ 6 การอบชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำชิ้นส่วนท่อที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การทำนายและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม FORGE® NXt 3.2 เพื่อทำนายและวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนท่อในระหว่างการเหนี่ยวนำ

ความร้อน ปริมาณของเฟสที่ปรากฏหลังการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด รวมถึงค่าความแข็งที่ได้จากกระบวนการอบชุบ ขั้นตอนเริ่มจากการทำโครงสร้างแบบจำลองของชิ้นงาน ต่อมาจึงนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (FE Model) แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่เป็นข้อมูลของชิ้นงาน (Billet) ข้อมูลชุดจ่ายกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Inductor) สภาวะแวดล้อมในการทดสอบ (Room Mesh) จากนั้นทำการเชื่อมโยงข้อมูลทั้งหมดเข้าด้วยกัน เพื่อทำการวิเคราะห์ให้ครอบคลุมพารามิเตอร์ที่กำหนด (Global Mesh) แล้วจึงทำการวิเคราะห์สำหรับจำนวนเอลิเมนต์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (FE Model) ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 โหนด (Node) และเอลิเมนต์ (Element) ที่ใช้กับพารามิเตอร์ในวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พารามิเตอร์	โหนด	เอลิเมนต์
Billet	3545	7090
Inductor	14314	28624
Room Mesh	1423	2842
Global Mesh	19267	111930

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น Q4 TASMAN ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2 จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

กับองค์ประกอบทางเคมีมาตรฐานของเหล็กกล้า AISI 4130 พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเหล็กกล้า AISI 4130 [13]

องค์ประกอบทางเคมี	ค่ามาตรฐาน (%wt.)		ชิ้นส่วนท่อที่ใช้ทำการทดลอง (%wt.)
	Min.	Max.	
คาร์บอน	0.28	0.33	0.318
ซิลิกอน	0.15	0.35	0.250
แมงกานีส	0.40	0.60	0.531
โครเมียม	0.80	1.10	1.071
โมลิบดีนัม	0.15	0.25	0.231
ฟอสฟอรัส	-	0.035	0.0047
กำมะถัน	-	0.040	<0.0050

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงยี่ห้อ Olympus รุ่น DSX510 และวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Sigma 500 VP การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E407 เริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำ ขัดละเอียดด้วยผงลูมินา และกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายไนตอล (Nital) มีอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค จะดำเนินการเปรียบเทียบระหว่างบริเวณที่ไม่ได้อบชุบ (Non-Hardening Zone: NHZ) และบริเวณที่ผ่านการอบชุบ (Hardening Zone: HZ)

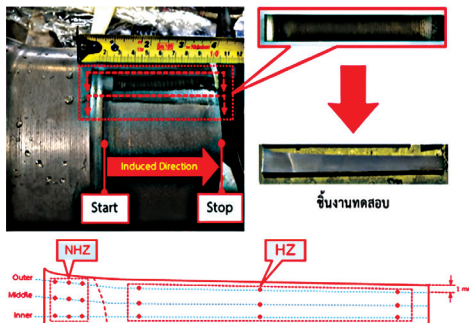
3.5 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบคุณสมบัติทางกลแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ ดังนี้

3.5.1 การทดสอบความแข็งจุลภาค

การทดสอบค่าความแข็งได้นำชิ้นส่วนท่อที่ผ่าน

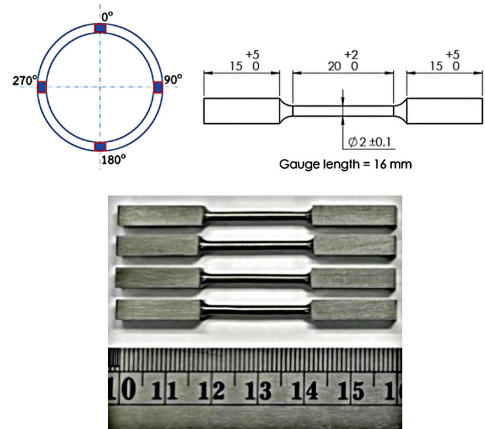
การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมาตัดเป็นชิ้นงาน ตัวอย่างลักษณะดังรูปที่ 8 การทดสอบชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E384 ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness Tester ยี่ห้อ INNOVATEST รุ่น FALCON 400 ใช้น้ำหนักกดทดสอบ 1 กิโลกรัมแรง เวลาทดสอบ 10 วินาที ทำการทดสอบตามรูปแบบดังรูปที่ 8 แบ่งเป็นบริเวณที่ไม่ได้ทำการอบชุบ (NHZ) และบริเวณที่ทำการอบชุบ (HZ) ซึ่งในแต่ละบริเวณจะทดสอบตามตำแหน่งหน้าตัดของชิ้นทดสอบ คือ ผิวด้านนอกชิ้นงาน (Outer) กึ่งกลางชิ้นงาน (Middle) และผิวด้านในชิ้นงาน (Inner) ตำแหน่งละ 3 จุด แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 8 ตำแหน่งการตัดชิ้นทดสอบ และรูปแบบการทดสอบค่าความแข็งจุลภาค

3.5.2 การทดสอบความแข็งแรง

การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อตำแหน่งที่ไม่ได้อบชุบ (NHZ) และชิ้นส่วนต่อตำแหน่งที่ผ่านการอบชุบ (HZ) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Test รุ่น 113 อัตราเร็วในการดึงทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Strength) ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Strength) และร้อยละอัตราการยืดตัว (Percent Elongation) โดยแต่ละข้อได้เตรียมเป็นชิ้นทดสอบอย่างละ 4 ชิ้น หลังการทดสอบนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงตัดเตรียมจากชิ้นส่วนก่อนและหลังการชุบ ท่อละ 4 ชิ้น จากตำแหน่ง 0°, 90°, 180° และ 270° ตามลำดับ ได้ชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 9

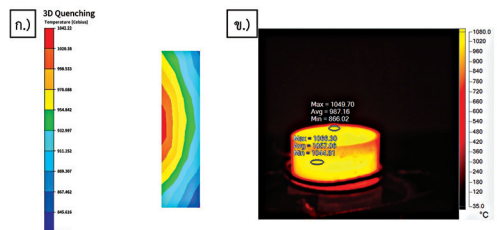


รูปที่ 9 ตำแหน่งการเตรียมชิ้นทดสอบ และลักษณะของชิ้นทดสอบความแข็งแรง

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

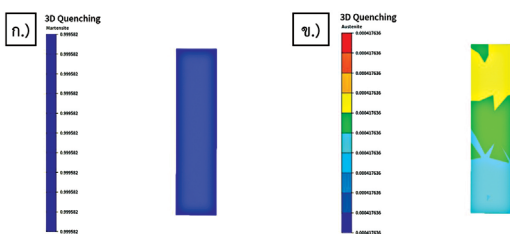
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นส่วนต่อจากการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 10 (ก) พบว่า บริเวณผิวนอกโดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ใกล้กับขดลวดมีอุณหภูมิที่สูงสุดโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,020 - 1,042 องศาเซลเซียส บริเวณผิวด้านในมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 911 - 933 องศาเซลเซียส โดยทั้งสองตำแหน่งมีความแตกต่างคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 10.4 - 10.6 ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์นี้เพียงพอต่อการละลายเฟสเดิมให้เป็นออสเทนไนต์สำหรับเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ที่มีค่าอยู่ในช่วง 830 - 870 องศาเซลเซียส [2] และยังพบอีกว่ามีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดอุณหภูมิบนชิ้นงานที่บันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นส่วนต่อมีค่าอยู่ระหว่าง 866 - 1,066 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข)

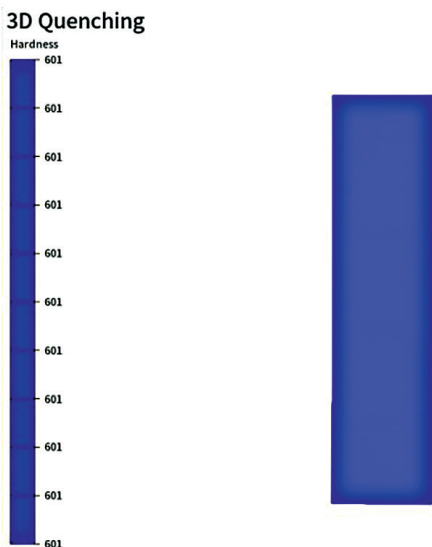


รูปที่ 10 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นงานในการทดลอง (ก) ผลการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ข) อุณหภูมิบนชิ้นงานที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน

การทำนายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นส่วนท่อเมื่อทำการเหนี่ยวนำความร้อน พบว่า การเหนี่ยวนำความร้อนทำให้ชิ้นส่วนท่อมีโครงสร้างที่เป็นออสเทนไนต์ได้ทั้งหมด และเมื่อทำให้เย็นตัวอย่างยิ่งยวด ชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ร้อยละ 99.96) แสดงดังรูปที่ 11 (ก) ผสมกับเฟสออสเทนไนต์เหลือค้าง (Retained Austenite) อยู่ในปริมาณเล็กน้อย (ร้อยละ 0.04) แสดงดังรูปที่ 11 (ข) ในส่วนของการทำนายค่าความแข็งหลังการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดของชิ้นงาน หลังการชุบแข็งชิ้นส่วนท่อมีค่าความแข็งเท่ากับ 601 วิกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ผลการทำนายเฟสที่เกิดขึ้นงานหลังการอบชุบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) ผลการทำนายเฟสมาร์เทนไซต์หลังการอบชุบ (ข) ผลการทำนายเฟสออสเทนไนต์หลังการอบชุบ



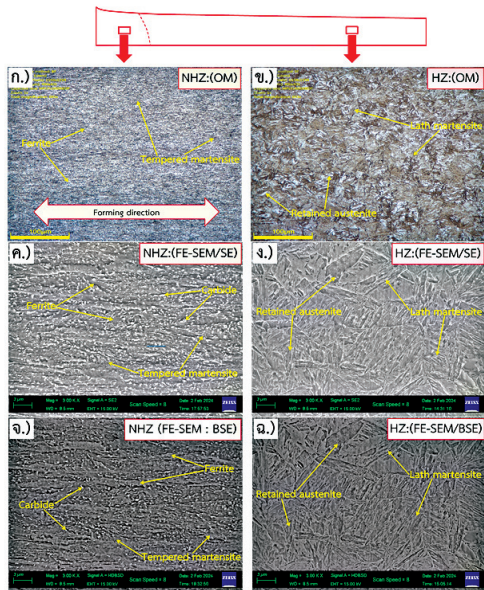
รูปที่ 12 ผลการทำนายค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ไม่ได้อบชุบ (NHZ) เป็นโครงสร้างหลังการรีดที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered martensite) ที่มีการยึดตัวของเกรนตามทิศทางการรีดจากกระบวนการขึ้นรูปโดยการไหล แสดงดังรูปที่ 13 (ก) เมื่อพิจารณาสัญญาณวิทยาที่กล้องขยาย 3,000 เท่า ทั้งในสัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI) และสัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image: BEI) แสดงดังรูปที่ 13 (ค) และ 13 (จ) สามารถเห็นลักษณะเกรนที่รียาวจากการขึ้นรูปได้ชัดเจนมากขึ้น ภาพจาก SEI สามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวของคาร์ไบด์ทั่วโครงสร้าง ซึ่งคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการชุบแข็ง (Quenched and Tempered) ท่อ Preform ก่อนการรีดขึ้นรูป [14] ต่อมาเมื่อนำมารีดขึ้นรูปทำให้คาร์ไบด์สามารถกระจายตัวได้มากขึ้น ซึ่งความหนาแน่นในการกระจายตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาณการรีดขึ้นรูป [15]

โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ผ่านการอบชุบ (HZ) มีโครงสร้างหลักเป็นมาร์เทนไซต์แบบแฝง (Lath Martensite) ที่มีออสเทนไนต์เหลือค้างผสมอยู่ แสดงดังรูปที่ 13 (ข), 13 (ง) และ 13 (ฉ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) เนื่องจากชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่มากกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต โดยเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มีอัตราการเย็นตัววิกฤตประมาณ 170 - 200 องศาเซลเซียสต่อวินาที [2] มาร์เทนไซต์แบบแฝงที่เกิดขึ้นนี้ สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นจากภาพ SEI และ BEI แสดงดังรูปที่ 13 (ง) และ 13 (ฉ) ตามลำดับ มาร์เทนไซต์แบบแฝงมีลักษณะเฉพาะตัวที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้ากลุ่มที่มีปริมาณของคาร์บอนผสมอยู่ในระดับปานกลาง ทั้งนี้ ไม่ปรากฏอนุภาคของคาร์ไบด์เนื่องจากเกิดการสลายตัวในระหว่างการละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ [16] สำหรับปริมาณของเฟสออสเทนไนต์เหลือค้าง (Retained Austenite) ที่พบนั้นมีสาเหตุมาจากเหล็กกล้าผสม AISI 4130 มีอุณหภูมิมาร์เทนไซต์

เสร็จสิ้น (Martensite Finish Temperature: M_f) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงไม่สามารถเกิดมาร์เทนไซต์ได้ 100%



รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างในบริเวณ NHZ และ HZ

- (ก) - (ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (OM)
- (ค) - (ง) ภาพ SEI จาก FE-SEM
- (จ) - (ฉ) ภาพ BEI จาก FE-SEM

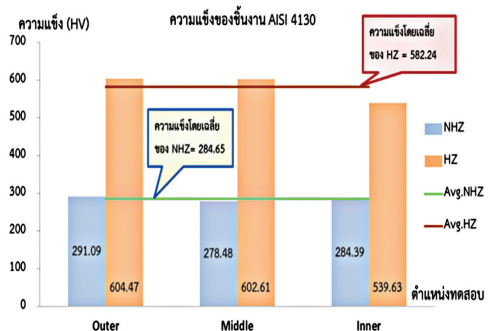
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกล

4.3.1 ความแข็งจุลภาค

ผลการทดสอบความแข็งจุลภาคได้ค่าความแข็งเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 14 พบว่า บริเวณที่ไม่ได้ออบชุบ (NHZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 284.65 วิกเกอร์ โดยในแต่ละตำแหน่งมีค่าความแข็งที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลจากกลไกการจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอมภายในผลึกหลังกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานท่อตัวอย่าง หลังการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่ได้ออบชุบ (NHZ) พบว่า บริเวณที่ผ่านการอบชุบ (HZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2 เท่า โดยประมาณ โดยมีค่าเท่ากับ 582.24 วิกเกอร์ ในบริเวณนี้ตำแหน่งผิวนอก (Outer) มีค่าความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สัมผัสกับสารชุบจึงมีอัตราการเย็นตัวสูงที่สุด

ส่วนตำแหน่งผิวใน (Inner) มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำกว่าตำแหน่งผิวนอก ซึ่งความแตกต่างของค่าความแข็งที่พบในบริเวณนี้คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 10.7

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบกับการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 12 พบว่า ค่าความแข็งเฉลี่ยมีความแตกต่างคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 3.12 บริเวณผิวนอก (Outer) และบริเวณกึ่งกลาง (Middle) มีค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด ส่วนบริเวณผิวใน (Inner) มีความแตกต่างมากที่สุดคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 10.2 เนื่องจากในทางปฏิบัติการหล่อเย็นเพียงด้านเดียวไม่สามารถทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างยิ่งยวดเท่ากันได้ทั้งชิ้นงาน

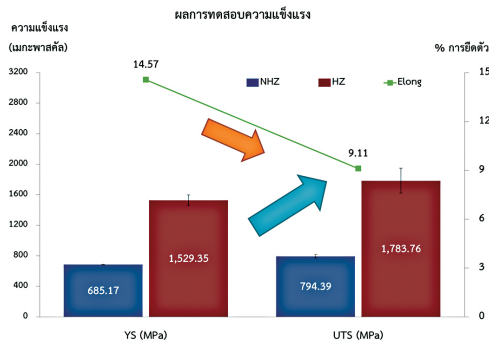


รูปที่ 14 แผนภาพผลการวัดค่าความแข็งจุลภาค

4.3.2 ความแข็งแรง

ผลการทดสอบความแข็งแรงขึ้นทดสอบที่ไม่ได้ทำการอบชุบ (NHZ) และขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบ (HZ) แสดงดังรูปที่ 15 พบว่า บริเวณที่ไม่ได้ออบชุบ (NHZ) ขึ้นทดสอบมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 749.39 เมกะปาสกาล ค่าความเค้นฉุดคราก 685.17 เมกะปาสกาล และอัตราการยืดตัวร้อยละ 14.56 บริเวณที่ผ่านการอบชุบ (HZ) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความเค้นฉุดคราก มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า โดยมีค่าเท่ากับ 1,783.75 และ 1,529.35 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ส่วนอัตราการยืดตัวมีค่าที่ลดลงโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.11

ดังนั้น เห็นได้ว่าขึ้นทดสอบหลังการชุบแข็งมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการอบชุบที่ปรากฏโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ทั้งนี้ ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอบชุบเพียงพอต่อการรับภาระกรรมที่เกิดขึ้นบริเวณปลายท่อรับแรงดันทั้ง 2 ด้าน



รูปที่ 15 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน NHZ และ HZ

5. สรุปผลการทดลอง

การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำส่งผลให้เหล็กกล้า AISI 4130 มีโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ในการทดลองการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งในส่วนของอุณหภูมิ โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งแรงมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ชิ้นส่วนท่อบริเวณที่ทำชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์แบบผสม และมีออสเทนไนต์เหลือค้างผสมอยู่ สำหรับค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ดังนั้น การชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลให้กับชิ้นงานเหล็กกล้าผสม AISI 4130 ได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อรับแรงดันเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานตามวัตถุประสงค์

6. ข้อเสนอแนะ

1. ในกระบวนการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำ ควรควบคุมเวลาในการละลายเฟสให้เป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) ให้มีความสอดคล้องกับความหนาและ

ชนิดของวัสดุ เพื่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลที่ได้

2. การเหนี่ยวนำความร้อนให้กับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับคุณสมบัติให้มีความเหมาะสมต่อการตกแต่งทางกลหรือเป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานอื่นได้

3. ในทางปฏิบัติกระบวนการชุบแข็งด้วยกระแสเหนี่ยวนำมีข้อจำกัดสำคัญ คือ การเลือกใช้ชนิดของชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำให้เหมาะสมกับชิ้นงาน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาร่วม เช่น ปัจจัยทางด้านวัสดุ ซึ่งเกี่ยวข้องกับชนิดและมิติของชิ้นงาน ปัจจัยทางด้านกระบวนการ ซึ่งเกี่ยวข้องกับต้นทุนในกระบวนการ ความซับซ้อน และความสามารถในการควบคุมกระบวนการ รวมถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงาน

4. การศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างในรายละเอียดถึงการกระจายตัวของเฟสต่าง ๆ ที่ปรากฏควรศึกษาด้วยเทคนิค Electron Backscatter Diffraction (EBSD) และวิเคราะห์หาปริมาณของเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction Analysis (XRD) เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โครงการวิจัยและพัฒนากระบวนการตรวจสอบระดับสูง แบบ DTI-2 (D2) สำหรับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย และส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ในการสนับสนุนอุปกรณ์การวิจัย รวมทั้งอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Thummikanonth, T. Boonluang, T. Pornyungyuen, and S. Saidarasamutr, "A Study of Trapezoidal Thread for Thin-Wall Tube Application," in *AMMSE 2015*, Jeju Island, South Korea, 2015.

- [2] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook Volume 4: Heat Treatment*, 10th ed. Ohio, USA: ASM Int., 1991.
- [3] V. Rudnev, D. Loveless, and R. L. Cook, *Handbook of Induction Heating*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [4] J. J. Coryell, D. K. Matlock, and J. G. Speer, "The Effect of Induction Hardening on the Mechanical Properties of Steel with Controlled Prior Microstructures," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 2, p. 8, 2005.
- [5] S. Saidarasamutr, T. Suriyea, and T. Pornyungyuen, "A Study of Property of Materials for Rocket Motor Case Prototype," in *IE Netw. Conf. 2012*, Pethchaburi, Thailand, 2012.
- [6] R. Lenhard, M. Malcho, and K. Kaduchová, "Numerical Simulation of Induction Heating Thick-Walled Tubes," in *MATEC Web Conf.*, vol. 168, 2018, p. 02004.
- [7] V. Hathairathsiri, S. Chudjuarjeen, and S. Koomsap, "A High Frequency Induction Heater by using Pulse Density Modulation for Surface Hardening Application," Office of the Higher Education Commission, Bangkok, Thailand, Rep. 2554A16662006, 2012.
- [8] V. Rudnev, "A Fresh Look at Induction Heating of Tubular Products: Part 1," *Heat Treating Prog.*, pp. 17-19, 2004.
- [9] R. Ismail, D. I. Prasetyo, M. Tauviqirrahman, E. Yohana, and A. P. Bayuseno, "Induction Hardening of Carbon Steel Material: The Effect of Specimen Diameter," *Adv. Mater. Res.*, vol. 911, pp. 210 - 214, 2014.
- [10] L. Semiatin, "Induction Heat Treatment," Techcommentary: EPRI Center for Materials Fabrication, vol. 2, no. 2, 1985. (Reprinted March, 1990).
- [11] R. Choteborsky and M. Linda, "FEM based Numerical Simulation for Heat Treatment of The Agricultural Tools," *Agronomy Res.*, vol. 13, no.3, 629 - 638, 2015.
- [12] K. Kurek and D. Dolega, "Modeling of Induction Hardening," in *Proc. Int. Sci. Colloq.: Model. Electromagn. Process.*, Hannover, Germany, 2003, pp. 125 - 130.
- [13] Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought, ASTM A29/A29M-20, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2020.
- [14] D. Vysochinskiy and D. Rybakov, "On the Effect of Various Heat Treatments on Microstructure of AISI 4130 Steel Used in Sour Service Pipes," in *Proc. 39th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, Fort Lauderdale, FL, USA, 2020.
- [15] O. Poyraz and B. Ogel, "Recrystallization, Grain Growth and Austenite Formation in Cold Rolled Steels during Intercritical Annealing," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 11263 - 11277, 2020, pp. 1 - 6.
- [16] S. Papaefthymiou, M. Bouzouni, and R. H. Petrov, "Study of Carbide Dissolution and Austenite Formation during Ultra - Fast Heating in Medium Carbon Chromium Molybdenum Steel," *Met.*, vol. 8, no. 8, p. 646, 2018.

การศึกษาผลของความหนาไมเนอร์ ของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยการจำลองเชิงตัวเลข

ทัศนีย์ ทับเจริญ^{1*} ธนัช ชันทอง¹ และ วีระชาติ กุลศิริเกษม¹

วันที่รับ 5 สิงหาคม 2567 วันที่แก้ไข 13 ธันวาคม 2567 วันตอบรับ 8 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

เมื่อหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงเกิดการจุดระเบิด การปฏิกิริยาเคมีในวัตถุระเบิดแรงสูงทำให้เกิดแก๊สและความดันอย่างยิ่งยวด ความดันที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลให้โครงสร้างภายในหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ปลอกหักเกิดสะเก็ดและเคลื่อนที่ไปตามแรงระเบิดที่เกิดขึ้นทุกทิศทาง ไมเนอร์เกิดการเสียรูปจนเกิดเจท์ เป็นต้น ทั้งนี้ หากการศึกษาระบบการระเบิดของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยวิธีทดสอบทดลอง มีค่าใช้จ่ายที่สูงและอันตรายเมื่อเทียบกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ การจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงจึงได้รับความนิยมแพร่หลายมากขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงขนาด 36 มม. ด้วยการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีสมูทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์เพื่อศึกษาผลของความหนาไมเนอร์ต่อกระบวนการเกิดเจท์และความสามารถในการเจาะเป้าหมายของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง จากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุระเบิดต่อน้ำหนักของทองแดงแตกต่างกัน ส่งผลให้ไมเนอร์มีความหนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. และกำหนดระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมายไว้ที่ 108 มม. จากการศึกษาค้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงความดันเพิ่มขึ้นหลังจากการจุดระเบิดและเคลื่อนตัวถึงไมเนอร์ในเวลาที 4 ไมโครวินาที หลังจากนั้นไมเนอร์เริ่มเกิดการเสียรูปและเกิดเจท์ ความเร็วสูงสุดของเจท์มีค่า 10,780 9,070 และ 6,520 เมตรต่อวินาที สำหรับไมเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. ตามลำดับ เมื่อไมเนอร์มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดเจท์และความยาวเจท์มีค่าลดลง นอกจากนี้ สลักมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความหนาไมเนอร์และไมเนอร์เริ่มเจาะเป้าหมาย เกิดขึ้นหลังจากเวลาที่ 30 ไมโครวินาที เมื่อไมเนอร์เริ่มเจาะเป้าหมาย เป้าหมายเกิดการเสียรูปและยึดตัวตามทิศทางการระเบิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งฉีกขาด จากผลการจำลองพบว่า ไมเนอร์ทั้ง 3 ความหนาสามารถเจาะเป้าหมายที่มีความหนา 10 มม. ได้สำเร็จ แต่เมื่อเพิ่มความหนาของเป้าหมาย พบว่า หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไมเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. สามารถเจาะเป้าหมายได้ 7, 10 และ 50 มม. ดังนั้น หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงมีความสามารถในการเจาะเป้าหมายเพิ่มขึ้นตามความหนาของไมเนอร์ เนื่องจากสมดุลโมเมนตัมและพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ขนาดของรูเล็กลงตามความหนาไมเนอร์ที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง, ไมเนอร์, การจำลองเชิงตัวเลข, การเจาะ, วัตถุระเบิดแรงสูง

¹ ส่วนงานวิศวกรรมวัตถุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: tassanee.t@dti.or.th

3D Numerical Simulation of the Effect of Shaped Charge Liner Thickness on Penetration into a Steel Target

Tassanee Tubchareon ^{1*} Thanach Khantong ¹ and Weerachart Kulsirikasem ¹

Received 5 August 2024, Revised 13 December 2024, Accepted 8 January 2025

Abstract

The explosion of a high-explosive charge in a shaped charge warhead rapidly converts the explosive material into gaseous products with extremely high pressure through a chemical reaction. This high pressure can damage the shaped charge warhead's structure, causing natural fragmentation of the casing and collapse of the liner, which leads to the formation of a jet. Generally, experimental testing of shaped charge detonation processes is more expensive and dangerous than computer simulations. This work presents three-dimensional (3D) numerical simulations of shaped charges based on the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. The effect of liner thickness on jet formation and penetration depth into a steel target was investigated. The charge had a diameter of 36 mm (CD), and the stand-off distance was set to 3CD. The copper liners had uniform wall thicknesses of 0.5, 1.0, and 2.3 mm, based on the explosive-to-copper weight ratio, with a cone angle of 45°. The results showed that pressure increased after detonation and reached the liner within 4 microseconds. The maximum jet velocities observed were 10,780, 9,070, and 6,520 m/s for liner thicknesses of 0.5, 1.0, and 2.3 mm, respectively. Increasing the liner's thickness resulted in a decrease in the maximum jet tip velocity and jet length. Additionally, the slug size increased with liner thickness. Regarding the penetration performance of the shaped charge, all liner thicknesses successfully penetrated a 10 mm thick steel target. The effect of increasing the target thickness was also investigated. The liner thicknesses of 0.5, 1.0, and 2.3 mm were able to penetrate steel targets up to 7 mm, 10 mm, and 50 mm, respectively. The results demonstrated that the ability to penetrate the target increased with liner thickness due to the increased momentum balance and kinetic energy. However, as liner thickness increased, the borehole size decreased.

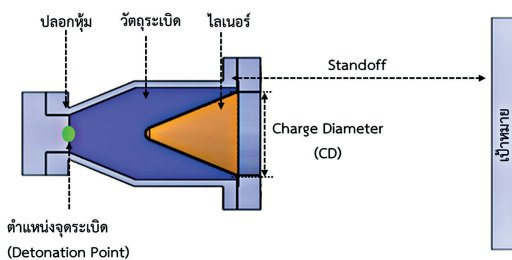
Keywords : Shaped charge, Liner, Numerical simulation, Penetration, High explosive

¹ NBC and Explosive Engineering Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: tassanee.t@dti.or.th

1. บทนำ

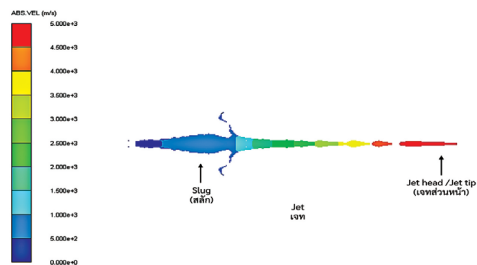
หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง (Shaped Charge) คือ หัวรบระเบิดแรงสูง มีลักษณะเป็นโพรงภายในมีไลเนอร์ (Liner) ทางทหารนิยมใช้หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงในจรวดต่อสู้รถถัง (Anti-Tank Missiles) [1] หรืออาวุธที่ใช้ทำลายยานรบ ยานลำเลียงหรือที่กำบัง [2] - [3] เป็นต้น โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงประกอบด้วยปลอกหุ้ม (Casing) ไลเนอร์ (Liner) วัตถุระเบิดแรงสูง (Explosive Charge) และ ตัวจุดวัตถุระเบิด (Detonator) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง (Shaped Charge)

หลักการทำงานของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงนั้น เมื่อตัวจุดวัตถุระเบิดเกิดการจุดระเบิด คลื่นการระเบิดที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายในหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง เกิดการยุบตัว (Collapse) ของไลเนอร์ เมื่อการยุบตัวดังกล่าวดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ไลเนอร์ที่ยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจะยึดตัวออกด้วยความเร็วสูง เรียกว่า เจต แสดงดังรูปที่ 2 มีส่วนด้านหน้าเรียกว่า เจตส่วนหน้า (Jet) ส่วนด้านหลังที่เรียกว่า สลัก (Slug) โดยปกติเจตส่วนหน้ามีความเร็วสูงกว่าสลัก [4] เมื่อเจตยึดตัวจนถึงเป้าหมาย (Target) ด้วยพลังงานและความเร็วที่สูงของเจต ทำให้สามารถเจาะเป้าหมายได้สำเร็จ [5] - [6]

M. G. Vigil [7] ทำการศึกษาออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงโดยใช้ Shaped Charge



รูปที่ 2 ลักษณะเจตประกอบด้วยเจตส่วนหน้าและสลัก

Analysis Program (SCAP) มีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง โดยทำการศึกษานาตเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย (Conical Liner Inside Diameter-D) ในหัว 1.75 – 23.18 ซม. ชนิดของไลเนอร์ทั้งทองแดงและเหล็ก และวัตถุระเบิดแรงสูงชนิดต่าง ๆ เช่น Octol, Composition B, และ PBX-9501 จากการศึกษาดังกล่าว มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมในการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง (Optimized Conical Shaped Charge Configuration) ดังนั้น มุมไลเนอร์ของกรวยควรมีขนาด 45 องศา ความหนาไลเนอร์มีค่า 0.01 ของเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย (D) ระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมาย (Stand-off) อยู่ในหัว 2D – 6D โดยไลเนอร์ที่ทำจากทองแดงมีความสามารถเจาะเป้าหมายได้มากกว่าเหล็ก วัตถุระเบิด PBX-9501 ให้ความเร็วของเจต (Jet Tip Velocity) สูงถึง 8,120 เมตรต่อวินาที

ส่วนมากนักวิจัยจึงนิยมการศึกษาความสามารถในการเจาะเกราะของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง โดยทั่วไปแบ่งการศึกษาวิจัยความสามารถในการเจาะเกราะของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงออกเป็น 3 วิธี คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Methods) การทดสอบทดลอง (Experimental Tests) และวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Simulations) [8] เมื่อเปรียบเทียบวิธีการดังกล่าว นั้น จะเห็นได้ว่าการจำลองเชิงตัวเลขมีข้อดีกว่าวิธีการอื่น ๆ ทั้งด้านต้นทุน ระยะเวลา และความปลอดภัย [3] นอกจากนี้ การศึกษาหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ มีผลสอดคล้องกับผลการทดสอบทดลองทั้งในด้าน

ความเป็นไปได้(Feasibility) และประสิทธิผล (Effectiveness) [9] ยิ่งไปกว่านั้นสามารถอธิบายการศึกษากระบวนการเกิดเจต [10] - [11] และการเจาะเป้าหมายของเจต [11] ได้เป็นอย่างดี

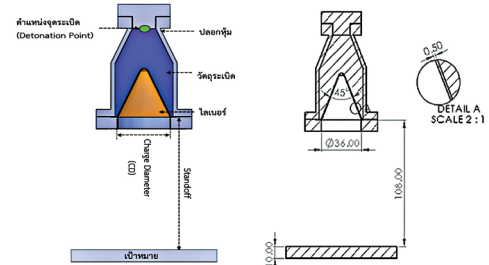
ก่อนหน้านี้การจำลองหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงนิยมจำลองเชิงตัวเลขโดยการใช้โครงร่างตาข่ายด้วยเทคนิคลากรางจ์ (Lagrange Mesh) และเทคนิคออยเลอร์ (Euler Mesh) ทั้ง 2 เทคนิคนี้มีข้อจำกัดทางด้านการบิดเบี้ยวของโครงร่างตาข่าย(Disordered Mesh) อันเนื่องจากการเสียรูปขนาดใหญ่ (Large Deformations) การเคลื่อนที่ของพื้นผิววัสดุ (Moving Material Interfaces) การเปลี่ยนรูปร่างของขอบเขต (Deformable Boundaries) และพื้นผิวอิสระ (Free Surface) [11] - [12] ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างรวดเร็วและคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูงทำให้การจำลองหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงโดยใช้วิธีสมุทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์ (Smoothed Particle Hydrodynamics : SPH) ได้รับความนิยมมากขึ้น วิธีการนี้สามารถลดข้อจำกัดข้างต้นได้ดี ดังนั้น วิธีการดังกล่าวจึงเหมาะสมกับการจำลองวัตถุระเบิดแรงสูง [12] - [15]

คณะผู้วิจัยจึงนำข้อดีของการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีสมุทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงตามค่าที่เหมาะสมในการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงของ M. G. Vigil [7] ในลำดับแรกคณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลของความหนาโลหะของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงขนาด 36 มม. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจตและความสามารถในการเจาะเป้าหมายของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและนำองค์ความรู้ไปต่อยอดพัฒนาสู่การสร้างต้นแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและการทดสอบทดลองในอนาคตต่อไป

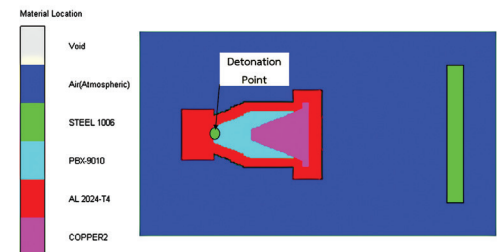
2. วิธีดำเนินงานวิจัย

ลักษณะทางมิติของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงดังแสดงในรูปที่ 3 จากภาพตัดขวางของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

วัตถุระเบิด (Charge Diameter – CD) 36 มม. มุมโลเนอร์ของกรวยขนาด 45 องศา (Liner Angle of Cone) และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุระเบิดต่อน้ำหนักของทองแดงเท่ากับ 6.80, 3.40 และ 1.77 ส่งผลให้โลหะมีความหนา 0.5 1.0 และ 2.3 มม. ตามลำดับ นอกจากนี้มีการกำหนดระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมาย (Stand-off) ไว้ที่ 108 มม. (3CD) และกำหนดพิกัดจุดของการจุดระเบิด (Detonation Point) ที่ (x, y, z) เท่ากับ (0, 71.7, 0) มม. สำหรับภาพตัดขวางการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางของแผนภาพหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

การจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีสมุทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์นี้ ดำเนินการแบ่งการจำลองออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากและมีฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel Function) กำหนดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาค การกำหนดคุณลักษณะทางวัสดุและสมการต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุระเบิดต่อน้ำหนักของทองแดงและจำนวน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติและวัสดุของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

ชิ้นส่วน	วัสดุ	ความหนาแน่น (Density) Kg/m3	สมการ (Equation of State)	สมการทางวัสดุ (Material Model)
ไลเนอร์ (Liner)	ทองแดง (Copper2)	8930	Shock	None
วัตถุระเบิด (Explosive)	PBX-9010	1787	JWL	-
ปลอกหุ้ม (Casing)	อะลูมิเนียม (Al 2024-T4)	2785	Shock	Steinberg Guinean
เป้าหมาย (Targets)	เหล็ก (Steel 1006)	7896	Shock	Johnson-Cook

ตารางที่ 2 น้ำหนักและจำนวนอนุภาคของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

ความหนา Liner (มม.)	น้ำหนัก (กรัม)					จำนวนอนุภาค (Number of particles)			
	ทองแดง	PBX-9010	อะลูมิเนียม	เหล็ก	PBX-9010/ ทองแดง	ทองแดง	PBX-9010	อะลูมิเนียม	เหล็ก
0.5	14.7	100	215	950	6.80	13126	55683	80872	10800
1.0	29.4				3.40	26120			
2.3	56.4				1.77	50349			

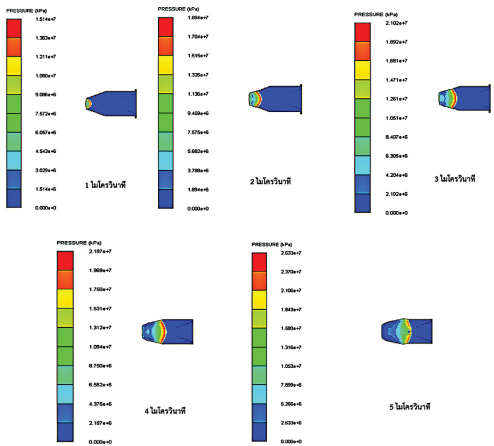
อนุภาคของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง ดังแสดงในตารางที่ 2

3. ผลการจำลองเชิงตัวเลขและอภิปรายผล

3.1 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจต

หลังจากจุดระเบิด คือเป็นการระเบิด (Detonation Wave) เริ่มเคลื่อนตัวจากจากจุดเริ่มต้นการจุดระเบิด (Point Detonation) ผ่านวัตถุระเบิดแรงสูง (High Explosive – PBX9010) และไลเนอร์ตามลำดับ ณ เวลา 1 ไมโครวินาที ความดันสูงสุดภายในวัตถุระเบิดแรงสูงมีค่า 1.51×10^7 กิโลปาสกาล (kPa) ความดันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมีค่า 2.19×10^7 กิโลปาสกาล และเคลื่อนที่ไปถึงไลเนอร์ ณ เวลา 4 ไมโครวินาที แสดงดังรูปที่ 5

การเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิอย่างยิ่งยวดส่งผลให้ไลเนอร์เริ่มเกิดการเสียรูป (Deformation)



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความดันของวัตถุระเบิดภายในหัวรบเจาะเกราะแบบดินโพรงโดยไลเนอร์หนา 0.5 มม. ณ เวลาต่าง ๆ

การเสียรูปของไลเนอร์นั้น ทำให้เกิดการยุบตัวและ/หรือการบีบตัวของไลเนอร์ โดยไลเนอร์มีพฤติกรรมคล้ายของไหลพลาสติก (Plastic Fluid) เมื่อการยุบตัวและ/หรือการบีบตัวดังกล่าวดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ไลเนอร์ที่ยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจะยืดตัวออกด้วยความเร็วสูงกว่า เจท สำหรับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม การเกิดเจทแสดงดังตารางที่ 3

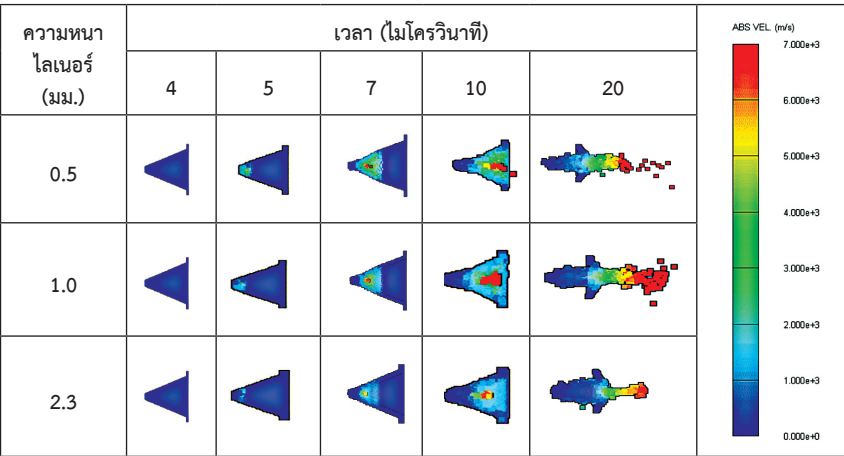
เมื่อพิจารณาที่เวลา 20 ไมโครวินาที ก่อนที่ไลเนอร์เจทเจาะเป้าหมาย พบว่า เมื่อความหนาไลเนอร์เพิ่มขึ้น ความเร็วเจทสูงสุด (Maximum Absolute Velocity of Jet Tip) มีค่าลดลง [16] - [17] เช่น ไลเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. มีความเร็วสูงสุดของเจท 10,780 9,070 และ 6,520 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ (แสดงดังตารางที่ 4) นอกจากนี้ ความยาวเจท (Jet Length) มีค่าลดลงเมื่อ

ความหนาของไลเนอร์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม สลักมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความหนาไลเนอร์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพของการเจาะเกราะนั้น ขึ้นอยู่กับเจทส่วนหน้า (Jet Head หรือ Jet Tip) [10]

3.2 การศึกษาความสามารถในการเจาะเป้าหมายของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงไลเนอร์ทั้ง 3 ความหนา มีภาพรวมของการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการเจาะเป้าหมายในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ณ เวลา 10 ไมโครวินาที เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (Absolute velocity) ของไลเนอร์และสะสมจนเกิดเจท หลังจากนั้น ณ เวลา 20 ไมโครวินาที ความดันที่เกิดขึ้นส่งผลให้ปลอกหุ้ม (Casing) เริ่มฉีกขาด (Cracking) และเกิดสะเก็ด (Fragmentation) ตามลำดับ ณ เวลา

ตารางที่ 3 การเกิดเจทของไลเนอร์ที่ความหนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. ณ เวลาต่าง ๆ



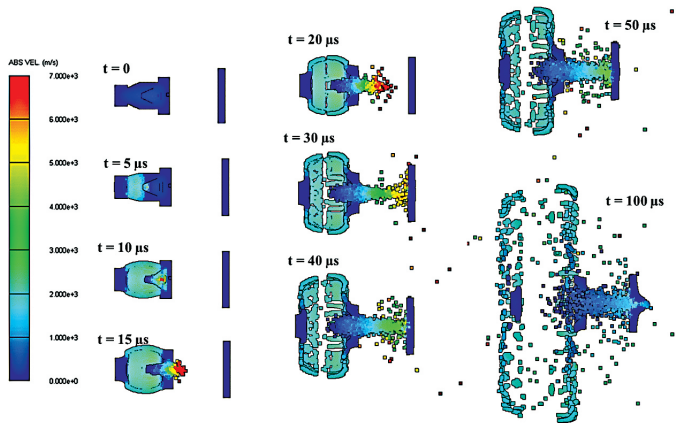
ตารางที่ 4 ความเร็วสูงสุดของเจท ความลึกของการเจาะ และเส้นผ่านศูนย์กลางขาเข้าของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

ความหนาไลเนอร์ (มม.)	ความเร็วสูงสุดของเจท (เมตรต่อวินาที)	ความลึกของการเจาะเป้าหมาย (Target Penetration) (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางขาเข้า (Opening Inlet Diameter) (มม.)
0.5	10,780	7	41
1.0	9,070	10	30
2.3	6,520	50	23

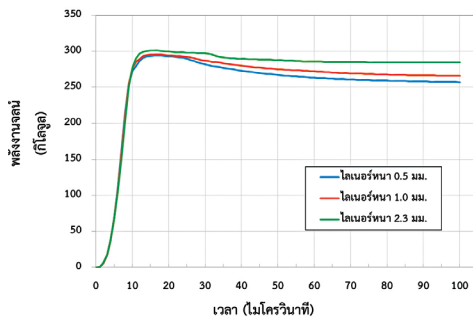
30 ไมโครวินาที เจทที่เกิดขึ้นเริ่มเจาะเป้าหมาย (Pit Opening Stage) [18] หลังจากนั้นเกิดการเจาะอย่างต่อเนื่องและคงที่ (Quasi Steady Penetration Stage) และสุดท้ายสามารถเจาะเป้าหมายได้ทะลุ (Termination Penetration Stage) แสดงดังรูปที่ 6

อย่างไรก็ตาม แม้ไลเนอร์ทั้ง 3 ความหนา มีกระบวนการการเจาะเป้าหมายเหมือนกัน แต่ความหนาของไลเนอร์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพร่ง ดังแสดงในรูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 ไมโครวินาทีแรก เมื่อเจทเริ่มเจาะเป้าหมาย พลังงานจลน์ลดลงเล็กน้อย จนกระทั่งพลังงานจลน์เริ่มคงที่ [13] จากการศึกษาพบว่า พลังงานจลน์เพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์

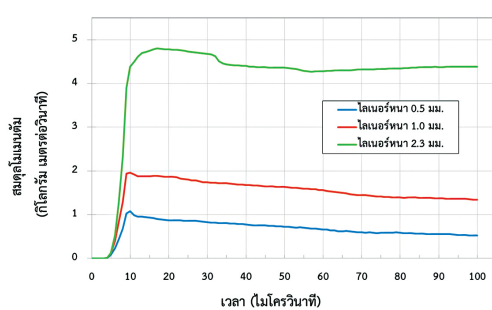
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมดุลโมเมนตัม (Momentum Balance) สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพร่งแสดงดังรูปที่ 8 พบว่า ความหนาของไลเนอร์ส่งผลอย่างมากกับสมดุลโมเมนตัม โดยที่สมดุลโมเมนตัมเพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์ การเพิ่มขึ้นของสมดุลโมเมนตัมส่งผลให้มวล (Mass) และความเร็ว (Velocity) เพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลการเจาะเป้าหมายความหนา 10 มม. สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพร่งที่ไลเนอร์มีความหนาต่างกัน ที่เวลา 100 ไมโครวินาที แสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ความหนาไลเนอร์ทั้ง 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. สามารถเจาะทะลุเป้าหมายได้สำเร็จ อย่างไรก็ตาม ความหนาของไลเนอร์ส่งผลต่อการเสียรูปของเป้าหมาย เป้าหมายเกิดการยึดตามทิศทางการระเบิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งฉีกขาด



รูปที่ 6 ภาพตัดขวางหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพร่งไลเนอร์หนา 0.5 มม. สำหรับเจาะเป้าหมายความหนา 10 มม. ณ เวลาต่าง ๆ



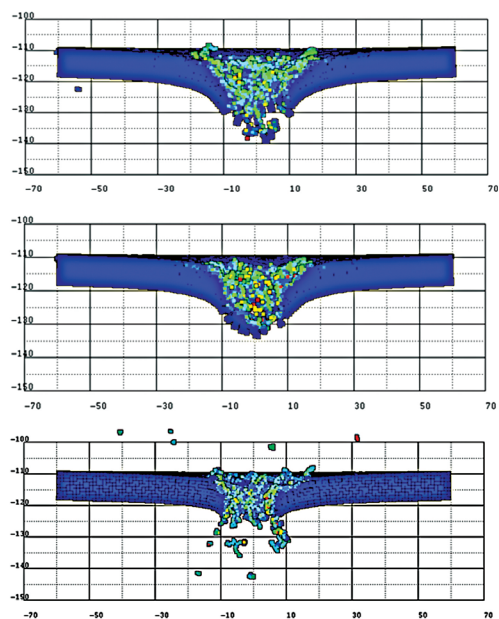
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพร่งที่ไลเนอร์มีความหนาต่าง ๆ



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงสมดุลโมเมนตัมสำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพร่งที่ไลเนอร์มีความหนาต่าง ๆ

จะเห็นได้ว่า โลเนอร์ที่มีความหนาน้อยส่งผลให้เป้าหมายเกิดการยึดตัวได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลเนอร์ที่มีความหนามาก อันเนื่องมาจากสมดุลโมเมนตัมและพลังงานจลน์

นอกจากนี้ ได้ศึกษาความหนาของเป้าหมายจาก 10 มม. เป็น 50 มม. แสดงดังรูปที่ 10 จากรูปพบว่าความสามารถในการเจาะเป้าหมายเพิ่มขึ้นตามความหนาโลเนอร์ หัวรบเจาะกระาะดินระเบิดโพรงโลเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. มีความสามารถในการเจาะ

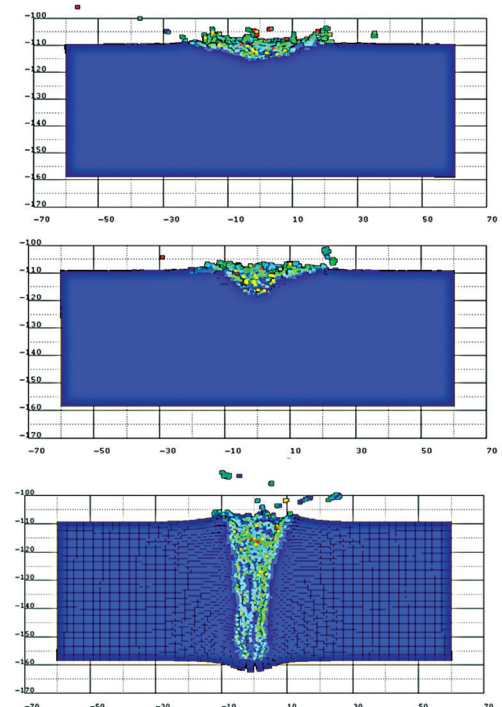


รูปที่ 9 ภาพตัดขวางแสดงการเปรียบเทียบการเจาะเป้าหมาย ความหนา 10 มม. สำหรับหัวรบเจาะกระาะดินระเบิดโพรงที่โลเนอร์มีความหนา (บน) 0.5 (กลาง) 1.0 และ (ล่าง) 2.3 มม. ณ เวลา 100 ไมโครวินาที

เป้าหมายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาลักษณะของรูเจาะ (Borehole) ที่เกิดขึ้น พบว่า รู (Hole Size) มีขนาดเล็กลงตามความหนาโลเนอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่หัวรบเจาะกระาะดินระเบิดโพรงที่โลเนอร์หนา 2.3 มม. สามารถเจาะทะลุเป้าหมายได้ 50 มม. โดยลักษณะรูเจาะคล้ายรูปแตร (Trumpet Shape) เมื่อเจทกระทบเป้าหมาย ความเร็วของเจทจะลดลงอย่างรวดเร็ว เจทบางส่วนเกิดการการกัดกร่อน (Jet Erosion) ส่งผลให้พลังงานจลน์และความร้อนของเจทลดลง จากเหตุผล

ดังกล่าวทำให้เป้าหมายบางส่วนหลอมละลาย อันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน (Friction) และการบีบอัด (Compression) ทำให้รูเจาะเปลี่ยนรูปร่าง [18] - [19]

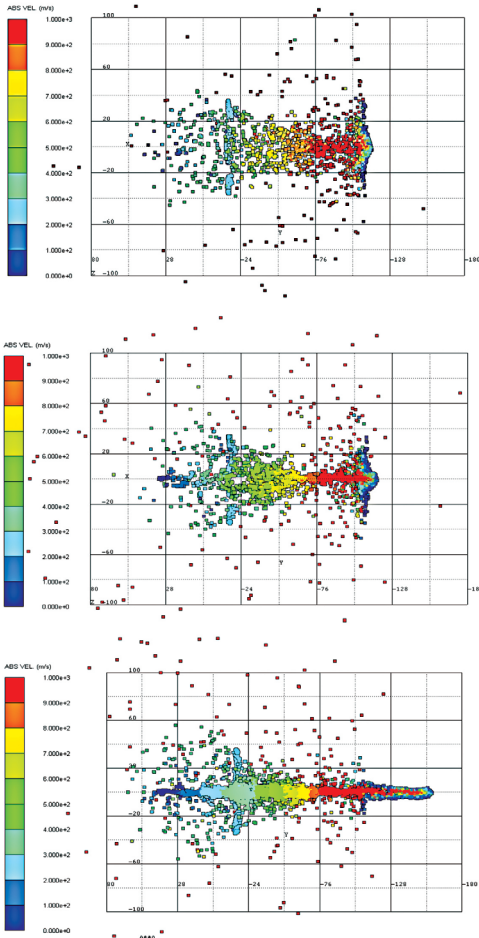
เมื่อพิจารณาความเร็วเจทจากรูปที่ 11 พบว่า ณ เวลา 100 ไมโครวินาที ความเร็วเจทส่วนหน้า (Jet Tip Velocity) มีค่าประมาณ 500 เมตรต่อวินาที สำหรับการเจาะกระาะทั่วไบนั้น ความเร็วเจทส่วนหน้าควรมีความเร็วมากกว่า 3000 เมตรต่อวินาที ถือเป็นส่วนที่มีประสิทธิภาพของเจทและใช้อย่างยิ่งสำหรับความเร็วเจาะทะลุวิกฤติ (Critical Penetration) [15]



รูปที่ 10 ภาพตัดขวางการเปรียบเทียบการเจาะเป้าหมาย ความหนา 50 มม. สำหรับหัวรบเจาะกระาะดินระเบิดโพรงที่โลเนอร์มีความหนา (บน) 0.5 (กลาง) 1.0 และ (ล่าง) 2.3 มม. ณ เวลา 100 ไมโครวินาที

4. สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลข

การจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ ของหัวรบเจาะกระาะดินระเบิดโพรงขนาด 36 มม. เมื่อกำหนดระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะกระาะดินระเบิดโพรงและเป้าหมายไว้ที่ 108 มม. สามารถศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจทและความสามารถในการเจาะกระาะของหัวรบ



รูปที่ 11 ความเร็วเจต เมื่อเจาะเป้าหมายหนา 50 มม. สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ความหนาไลเนอร์ (บน) 0.5 (กลาง) 1.0 และ (ล่าง) 2.3 มม.

เจาะเกราะดินระเบิดโพรงได้เป็นอย่างดี จากการศึกษพบว่า ความหนาของไลเนอร์ต่างกัน มีผลต่อความเร็วสูงสุดของเจตและความยาวของเจต กล่าวคือ เมื่อไลเนอร์มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดของเจตและความยาวของเจตมีค่าลดลง นอกจากนี้ สลักมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์

เมื่อไลเนอร์เสียรูปและยึดตัวตามทิศทางการระเบิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเริ่มเจาะเป้าหมาย ด้วยความเร็วเจตที่สูงเกิดการเจาะอย่างต่อเนื่องและคงที่ สุดท้ายสามารถเจาะเป้าหมายได้สำเร็จ จากการศึกษพบว่า หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ความหนาไลเนอร์ทั้ง 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. สามารถเจาะเป้าหมายพบว่า หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงสามารถเจาะเป้

หมายเพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์ เนื่องจากสมดุลโมเมนตัมและพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามขนาดของรูเล็กลงตามความหนาไลเนอร์ นอกจากนี้ ที่เวลา 100 ไมโครวินาที หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์หนา 2.3 มม. สามารถเจาะเป้าหมายได้ 50 มม.

จากผลการศึกษาส่งผลให้คณะผู้วิจัยทราบถึงความสำคัญของความหนาไลเนอร์ต่อพฤติกรรมการเกิดเจตและความสามารถในการเจาะเกราะของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง เพื่อต่อยอดการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลในการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง เช่น รูปร่างของไลเนอร์ ระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมาย (Stand-off) ชนิดของวัสดุระเบิด และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องนำไปสู่การพัฒนาสร้างต้นแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง การทดสอบทดลอง และผลิตสู่อุตสาหกรรมป้องกันประเทศในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โครงการวิจัยพื้นฐานของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ประจำปีงบประมาณ 2567 ได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือจากนักวิจัยส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี ตลอดจนเจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Du, G. He, Y. Liu, Z. Guo, and Z. Qiao, "Study on Penetration Performance of Rear Shaped Charge Warhead," *Materials*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216526.
- [2] P. Zochowski and R. Warchot, "Experimental and Numerical Study on The Influence of Shaped Charge Liner Cavity Filing on Jet Penetration Characteristics in Steel Targets," *Def. Technol.*, vol. 23, pp. 60 - 74, 2023, doi: 10.1016/j.dt.2022.09.007.
- [3] L.-Y. Xu, Y. Tian, X.-B. Liu, and S.-P. Wang, "Numerical Investigation on Jet Penetration Capacity of Hypervelocity Shaped Charge in Underwater Explosion," *Ocean Eng.*, vol. 281, p. 114668, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114668.
- [4] T. Elshenawy, "Criteria of Design Improvement of Shaped Charges used as Oil Well Perforators," Ph.D. dissertation, Dept. Eng. Phys. Sci., Univ.

- Manchester, Manchester, UK, 2012. [Online]. Available: https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/54527511/FULL_TEXT.PDF
- [5] H. Shekhar, "Theoretical Modelling of Shaped Charges in the Last Two Decades (1990-2010): A Review," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 9, no. 2, pp. 155 – 185, Jan. 2012.
 - [6] C. Poole, "Penetration of a Shaped Charge," Ph.D. dissertation, Dept. Philos., Corpus Christi College, Univ. Oxford, Oxford, UK, 2005.
 - [7] M. G. Vigil, "Optimized Conical Shaped Charge Design using The SCAP Code," Sandia Nat. Lab., Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep. SAND 88-1790, Sep. 1988.
 - [8] A. Catovic, "Research of Influence of Different Shaped Charge Liner Materials on Penetration Depth using Numerical Simulations," *Period. Eng. Nat. Sci. (PEN)*, vol. 11, no. 4, pp. 1 - 26, Jul. 2023, doi: 10.21533/pen.v11i4.3500.g1307.
 - [9] Z. Zhifan, W. Longkan, and V. V. Silberschmidt, "Damage Response of Steel Plate to Underwater Explosion: Effect of Shaped Charge Liner," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 103, pp. 38 - 49, 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.01.008.
 - [10] J. Yi, Z. Wang, J. Yin, and Z. Zhang, "Simulation Study on Expansive Jet Formation Characteristics of Polymer Liner," *Materials*, vol. 12, no. 5, 2019, doi: 10.3390/ma12050744.
 - [11] Z. Zhang, L. Wang, V. V. Silberschmidt, and S. Wang, "SPH-FEM Simulation of Shaped -charge Jet Penetration into Double Hull: A Comparison Study for Steel and SPS," *Compos. Struct.*, vol. 155, pp. 135 - 144, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.08.002.
 - [12] M. B. Liu and G. R. Liu, "Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 25 - 76, Mar. 2010, doi: 10.1007/s11831-010-9040-7.
 - [13] D. L. Feng, M. B. Liu, H. Q. Li, and G. R. Liu, "Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Linear Shaped Charge with Jet Formation and Penetration Effects," *Comput. Fluids*, vol. 86, pp. 77 - 85, 2013, doi: 10.1016/j.compfluid.2013.06.033.
 - [14] Z. Zhang, L. Wang, F. Ming, V. V. Silberschmidt, and H. Chen, "Application of Smoothed Particle Hydrodynamics in Analysis of Shaped-charge Jet Penetration Caused by Underwater Explosion," *Ocean Eng.*, vol. 145, pp. 177 - 187, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.08.057.
 - [15] J.-Y. Chen, D.-L. Feng, S.-X. Deng, C. Peng, and F.-S. Lien, "GPU-accelerated Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Jet Formation and Penetration Capability of Shaped Charges," *J. Fluids Struct.*, vol. 99, p. 103171, 2020, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.103171.
 - [16] Y. Gu, J. Wang, H. Li, K. Tang, and L. Liu, "Formation Characteristics and Penetration Performance of an Underwater Shaped Charge Jet," *Ocean Eng.*, vol. 258, p. 111695, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111695.
 - [17] T. Elshenawy, E. Ezzat, A. M. Riad, and M. A. Elkader, "Influence of Liner Wall Thickness on the Penetration Performance of PETN-HTPB PBX-based Shaped Charges into Steel Targets," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 19, no. 1, pp. 63 - 90, 2022, doi: 10.22211/cejem/147682.
 - [18] Y. Han *et al.*, "Study on the Penetration Performance of Micro-shaped Charge with Different Liner Materials," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1855, no. 1, p. 012013, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1855/1/012013.
 - [19] B. Hong, W. Li, Y. Li, Z. Guo, and B. Yan, "Jet Formation and Penetration Performance of a Double-layer Charge Liner with Chemically -deposited Tungsten as The Inner Liner," *Def. Technol.*, vol. 33, pp. 374 - 385, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.08.016>.

การพัฒนาฟีนอลิกเรซินดัดแปลงด้วยไซเลน ทนความร้อนสูงสำหรับผลิตฉนวนกันความร้อนในท่อท้ายจรวด

ชัชพล แซ่โจ้ว^{1*} ไพศาล อภินิหารพัฒน์¹
พิมพ์รภัส งามสันติวงศ์² และ เจษฎา ศิริรัฐนิคม³

วันที่รับ 13 กันยายน 2567 วันที่แก้ไข 17 ตุลาคม 2567 วันที่ตอบรับ 21 ตุลาคม 2567

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวัสดุคอมโพสิตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอวกาศ วัตถุประสงค์หลักเพื่อการพัฒนาวัสดุฉนวนกันความร้อนสำหรับท่อท้ายจรวด คุณสมบัติหลักคือต้องทนทานต่ออุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในมอเตอร์จรวด การใช้วัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกเป็นแนวทางหลักในการพัฒนาฉนวนกันความร้อนเนื่องจากวัสดุนี้มีคุณสมบัติในการทนความร้อน ทนทานต่อการเสียดร่อนที่อุณหภูมิ 3000 °C และทนการสลายตัวได้ดี ในการศึกษาครั้งนี้ทำการสังเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติของฟีนอลิกเรซินที่ดัดแปลงด้วยไซเลน (PR-S) เพื่อปรับปรุงความต้านทานการเสียดร่อน และทำการวิเคราะห์หาชนิดและองค์ประกอบหลักทางเคมีของฟีนอลิกเรซินที่ดัดแปลง โดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared : FT-IR) และใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน เพื่อทดสอบคุณสมบัติการเสียดร่อนของวัสดุคอมโพสิต คุณสมบัติทางกลทดสอบด้วยภาพรังสี และทดสอบภาคสถิติของวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกถูกกำหนดโดยใช้วิธีการทดลองมาตรฐานผลการดำเนินงานวิจัยด้วยการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FTIR อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM: E1252-98 พบการดูดกลืนพลังงานของการยืดของพันธะโพลีไซลอกเซน (Si-O-Si) และไซเลน Si-O-C ในช่วงของคลื่น 1184.19 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการดัดแปลงด้วยไซเลนในวัสดุฟีนอลิกเรซิน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิต PR-S ที่ได้รับการดัดแปลงเพิ่มความต้านทานการเสียดร่อนอย่างมีนัยสำคัญตามการทดสอบมาตรฐาน ASTM E285-08 ซึ่งใช้ก๊าซออกซิเจน-อะเซทิลีนเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิความร้อนสูง คุณสมบัติทางกลของวัสดุฟีนอลิกเรซินชนิดดัดแปลงยังคงเสริมความแข็งแรงของวัสดุให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานได้ ผลการทดสอบด้วยภาพรังสีพบว่า เนื้อฉนวนที่อัดขึ้นรูปนั้น มีความสม่ำเสมอและผลการทดสอบภาคสถิติพบว่า วัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกที่ได้รับการดัดแปลงสามารถทนรับภาระความร้อนจากการทำงานของจรวดได้อย่างสมบูรณ์ และมีระดับความมั่นใจไม่น้อยกว่า 90%

คำสำคัญ : วัสดุคอมโพสิต, ท่อท้ายจรวด, การทนทานต่อการเสียดร่อน

¹ ส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ส่วนบริหารองค์ความรู้, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

³ ปฏิบัติงานด้านงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับจรวดและอาวุธนำวิถี, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: chatchaphon.s@dit.or.th

The Improvement of High-temperature Silane Modified Phenolic Resins for Rocket Nozzle Insulation

Chatchaphon Sae-ngow ^{1*} Paisan Apinhapat ¹
Phimraphas Ngamsantivongsa ² and Chesda Kiratnikom ³

Received 13 September 2024, Revised 17 October 2024, Accepted 21 October 2024

Abstract

In this research, composite materials were studied and developed for application in the aerospace industry. This project aims to develop thermal insulation materials for rocket motor nozzles. Solid rocket motors are designed to withstand the high temperatures produced by combustion. Thermal insulation materials based on phenolic composite materials have the properties of heat resistance, ablation resistance at temperatures up to 3000°C, and good decomposition resistance, which are the most commonly used. The properties of silane-modified phenolic resin (PR-S) were studied in this study to improve ablation resistance, and the types and main chemical components of the modified phenolic resin have been investigated using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and hot compression molding techniques, respectively, to assess the ablation properties of these composite materials. Standard experimental methods were employed to determine the mechanical properties, radiographic tests, and static tests of the phenolic composite materials. According to the FTIR analysis based on ASTM E1252-98, the energy absorption of polysiloxane (Si-O-Si) and silane Si-O-C bonds was 1184.19 cm⁻¹, which indicates the modification of silane in phenolic resins. Results showed that the modified PR-S composites significantly increased ablation resistance based on ASTM E285-08 test using oxyacetylene gas as a high temperature source. Modified phenolic resin materials still possessed sufficient mechanical properties to meet the standard requirements. The radiographic test results confirm the uniformity of the extruded insulation, and the static test results confirm the ability of the modified phenolic composite materials to withstand the heat load generated by rocket operation, with a confidence level of not less than 90%. Thus, the results of this research can be used to confirm the potential for domestic production of parts and thereby to achieve true self-reliance.

Keywords : Composite materials, Nozzle insulation, Ablation resistance

¹ Propulsion Systems Division, Defence Technology Institute

² Knowledge Management Division, Defence Technology Institute

³ Working on research and development for rockets and guided weapons, Defence Technology Institute

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

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอวกาศในปัจจุบันพัฒนาการใช้ดาวเทียมขนาดเล็กจำนวนมากในวงโคจรต่ำของโลก (Low Earth Orbit: LEO) เชื่อมโยงเป็นเครือข่าย Constellation เพื่อให้บริการการสื่อสารข้อมูลหรือการเฝ้าตรวจในเวลาจริง เป็นผลให้เกิดความต้องการการนำส่งดาวเทียมขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก การใช้จรวดนำส่งชนิดเชื้อเพลิงแข็งมีความเหมาะสมกับการนำส่งดาวเทียมขนาดเล็กดังกล่าว เนื่องจากการปล่อยจรวดไม่ต้องเตรียมการมากและไม่ต้องอาศัยสิ่งอำนวยความสะดวกที่ฐานปล่อยมากเท่ากับจรวดนำส่งชนิดเชื้อเพลิงเหลว เป็นผลให้ผู้ให้บริการนำส่งดาวเทียมหลักพัฒนาระบบจรวดนำส่งดาวเทียมชนิดเชื้อเพลิงแข็งใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เช่น จรวด Minotaur ของบริษัท Northrop Grumman ประเทศสหรัฐอเมริกา [1] จรวด Vega ของบริษัท Arianespace สหภาพยุโรป [2] และจรวด Long March 11 ของบริษัท China Aerospace Science and Technology Corporation ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน [3] เป็นต้น นอกจากนั้นยังได้เกิดโครงการสาธิตเทคโนโลยีการใช้จรวดเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก นำส่งดาวเทียมขนาดเล็ก CubeSat เข้าสู่วงโคจร LEO เช่น จรวด SS-520 ขององค์การสำรวจอวกาศญี่ปุ่น (JAXA) ซึ่งใช้จรวดเชื้อเพลิงแข็ง 3 ตอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 520 มม. น้ำหนักรวมของจรวด 2.6 ตัน น้ำหนักดินขับจรวดรวม 1.99 ตัน ส่งดาวเทียม CubeSat ขนาด 3U เข้าสู่วงโคจร LEO ที่ระยะสูง 180 กม. ได้ เมื่อวันที่ 3 ก.พ. 61 [4]

เพื่อให้การวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีจรวดของประเทศไทยมีความสมบูรณ์และสามารถต่อยอดไปสู่อุตสาหกรรมอวกาศในอนาคตได้นั้น จะต้องมียุทธศาสตร์การผลิตวัสดุที่สำคัญขั้นวิกฤตประเภทหนึ่งคือ ฉนวนในมอเตอร์จรวดทำหน้าที่ป้องกันความร้อนจากการเผาไหม้ของดินขับเชื้อเพลิงแข็งและป้องกันการส่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงมากไปยังท่อจรวด

ซึ่งมักสร้างจากวัสดุประเภทโลหะ

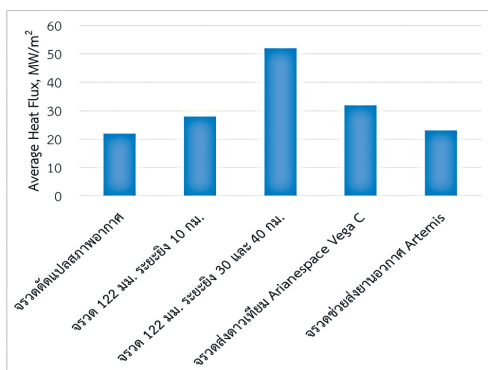
สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ได้มีความพยายามในการศึกษาวิจัยโดยจ้างผู้ประกอบการขึ้นรูปฉนวนท่อท้ายจรวด โดยใช้วัตถุดิบวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกเกรดอุตสาหกรรมทั่วไปที่มีผลิตในประเทศ แต่คุณลักษณะของวัสดุยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องรับฟลักซ์ความร้อนสูงมาก ดังเช่นกรณีท่อท้ายจรวดของจรวดสมรรถนะสูง ทำให้ยังไม่ประสบผลสำเร็จ และแนวทางการใช้วัตถุดิบวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกอุตสาหกรรมทั่วไป ผลิตฉนวนท่อท้ายจรวดของจรวดสมรรถนะสูง ไม่น่าจะเป็นแนวทางพัฒนาที่ดำเนินการให้เกิดผลสำเร็จได้ หากรับถ่ายทอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศจะต้องใช้งบประมาณที่สูงมาก แนวทางที่จะได้เทคโนโลยีนี้มาภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณ จึงจำเป็นต้องดำเนินการศึกษาวิจัยวัสดุคอมโพสิตผสมระหว่างเส้นใยที่มีจุดหลอมเหลวสูงเข้ากับเรซินพอลิเมอร์ประเภทฟีนอลิก พัฒนาวัสดุฉนวนท่อท้ายจรวดสมรรถนะสูงเนื่องจากใช้เรซินประเภทฟีนอลิก ซึ่งมีคุณสมบัติการทนความร้อนที่ดีเมื่อเทียบกับเรซินชนิดอื่น ๆ และสาเหตุที่สำคัญอีกประการ คือ ฟีนอลิกเรซินที่มีคุณภาพสูงเป็นวัสดุที่ประเทศผู้ผลิตควบคุมการส่งออก ตามระบอบควบคุมเทคโนโลยีซีปนาวุธ (Missile Technology Control Regime: MTCR) งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดและวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกที่สามารถทนความร้อนสูงสำหรับเป็นฉนวนกันความร้อนสูงในท่อท้ายจรวด โดยการพัฒนาฟีนอลิกเรซินที่มีคุณภาพสูงทดสอบร่วมกับมอเตอร์จรวดให้เกิดความมั่นใจว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง ส่งเสริมให้เกิดการพึ่งพาตนเองได้อย่างแท้จริง

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) ของท่อท้ายจรวด

ท่อท้ายจรวดสมรรถนะสูง ต้องรับภาระกรรมจากก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงและฟลักซ์ความร้อนที่สูงมาก โดยฟลักซ์ความร้อน คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านเข้าชิ้นงานหนึ่งหน่วยพื้นที่ในหน่วยเวลา

หากสามารถผลิตท่อท้ายจรวดสำหรับจรวดสมรรถนะสูงได้ ก็จะสามารถผลิตท่อท้ายจรวดของจรวดเชื้อเพลิงแข็ง แบบอื่น ๆ รวมถึงจรวดนำส่งดาวเทียม หรือจรวดที่ใช้งาน ทางด้านกิจการการบินและอวกาศได้ด้วย เพราะจรวด ประเภทหลังนี้รับฟลักซ์ความร้อนในระดับต่ำกว่าได้ ทั้งนี้ อาจเปรียบเทียบระดับของฟลักซ์ความร้อน ที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้ ปริมาณฟลักซ์ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ในเวลาเที่ยงในกรุงเทพมหานคร มีค่าเฉลี่ยประมาณ 800 วัตต์/ตร.ม. (0.0008 เมกะวัตต์/ตร.ม.) ปริมาณ ฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อมก๊าซออกซิเจน-อะเซทิลีน (Oxygen-Acetylene) จ่อชิ้นงานที่ระยะ 19 มม. มีค่า 8.35 เมกะวัตต์/ตร.ม. ในขณะที่ปริมาณฟลักซ์ความร้อน ท่อท้ายจรวดทั่วไปมีค่าประมาณ 20-30 เมกะวัตต์/ตร.ม. และปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ท่อท้ายจรวดสมรรถนะ สูงอาจมีค่ามากกว่า 50 เมกะวัตต์/ตร.ม. แสดงดังรูปที่ 1 ส่วนอุณหภูมิก๊าซจากการเผาไหม้ของดินขับเชื้อเพลิงแข็ง ที่ไหลผ่านท่อท้ายจรวดนั้นมีค่าสูงประมาณ 3,300 เคลวิน ซึ่งคิดเป็นประมาณ 2 ใน 3 เท่าของอุณหภูมิพื้นผิวของ ดวงอาทิตย์ [5]



รูปที่ 1 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยที่ถ่ายเทสู่ท่อ ท้ายจรวดแบบต่าง ๆ

2.2 ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resins)

ฟีนอลิกเรซินนั้นนับเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ แบบแรกที่มีการพัฒนาขึ้น โดยในปี ค.ศ. 1907 Leo Hendrik Baekeland ได้ค้นพบวิธีการผลิตพลาสติก ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอล (Phenol)

กับฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) วัสดุพลาสติกนี้ เมื่อนำไปผสมกับสารตัวเติม (Filler) สามารถนำไปอัด ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีความแข็งแรง เรียกพลาสติกชนิด นี้ว่าเบเคไลต์ (Bakelite) และมีการใช้งานแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์และวิทยุที่มีการ เติบโตอย่างรวดเร็วในเวลานั้น [6] วัสดุฟีนอลิกมี คุณสมบัติเด่นในด้านการทนอุณหภูมิสูง ดังนั้น ในช่วงเวลา ต่อมา วัสดุฟีนอลิกจึงได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมด้าน อื่น ๆ ที่ต้องการคุณสมบัติดังกล่าว เช่น อุตสาหกรรมการผลิต เบรกยานยนต์และชิ้นส่วนความฝืดอื่น ๆ (Friction) อุตสาหกรรมการผลิตใบเจียรและอุปกรณ์การขัดอื่น ๆ (Abrasives) อุตสาหกรรมการผลิตทรายทำแบบหล่อ โลหะ (Foundry) เป็นต้น [7]

ในช่วงปลายทศวรรษ ค.ศ. 1950 บริษัทผู้ผลิต ต่าง ๆ ได้พัฒนาฟีนอลิกเรซินให้มีคุณสมบัติการทน ความร้อนสูงยิ่งขึ้น เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนจรวดและซิปนารู โดยในปี ค.ศ. 1959 บริษัท Monsanto ได้ยื่นจดสิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา สำหรับวิธีการผลิต Phenol-Formaldehyde Resin ที่ปรับปรุงโดยการทำปฏิกิริยากับสาร Methoxysilane และ Glycidyl Polyether ของ Bisphenol-A ซึ่งได้ รับสิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา หมายเลข 3,704,904 ในปี ค.ศ. 1963 [8]

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟีนอลิก เรซินใช้การวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ตรวจพบการดูดกลืน พลังงานการสั่นของคลื่นในช่วง $3400 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่พันธะ OH [9] - [11] และ การดูดกลืน พลังงานในช่วง 1075 แสดงถึงหมู่พันธะ Si-O-Si [9], [12] - [13] ทั้งนี้ การตรวจพบหมู่พันธะ Si-O-C จะสามารถบ่งชี้ถึงการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิคอนและ ฟีนอลิกเรซิน โดยสามารถตรวจพบการดูดกลืน พลังงานในช่วง 1100 cm^{-1} [14]

2.3 วัสดุคอมโพสิตฟีนอลิก

พลาสติกเสริมแรงด้วยไฟเบอร์หรือที่เรียกกัน

ทั่วไปว่า Fiber Reinforced Plastics (FRP) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยเส้นใย (เช่น ใยแก้ว ใยคาร์บอน หรือเส้นใยอื่น ๆ) ที่ผสมกับเรซินหรือเมทริกซ์พอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานในการใช้งานของวัสดุนี้ ในกระบวนการผลิตมักจะมีขั้นตอนการเลือกใช้เส้นใยที่เหมาะสมกับแต่ละงาน เช่น ใยแก้วซึ่งมีน้ำหนักเบาและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี ใยคาร์บอน ซึ่งมีความแข็งแรงและทนทานสูง เป็นต้น และมักจะใช้พอลิเมอร์ เช่น อะคริลิกเรซิน (Acrylic Resins) หรืออีพ็อกซี (Epoxy) เป็นตัวประสาน ทำให้ได้ลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับแต่ละงาน

วัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกมีประโยชน์ในการใช้งานในอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น ในการผลิตยานยนต์และเครื่องบิน การก่อสร้างเรือ การทำท่อ และอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยมีการปรับแต่งคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุได้ตามความต้องการของแต่ละงาน วัสดุนี้มีคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่ง คือ เมื่อได้รับความร้อนสูงจะสลายตัวเกิดปฏิกิริยาแบบดูดกลืนความร้อนแล้วสลายตัวเกิดก๊าซ ซึ่งจะพาพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งออกจากชิ้นวัสดุไปเหลือเป็นชั้นถ่าน (Char) ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนที่มีความแข็งแรง [15] ดังนั้น วัสดุนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ผลิตฉนวนกันความร้อนสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน โดยป้องกันความร้อนด้วยกระบวนการเสียดกร่อน (Ablation) จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้มีการนำวัสดุฟีนอลิกเรซินมาใช้ร่วมกับวัสดุเส้นใยทนความร้อนแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใยซิลิกา (Silica) ผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกนำไปใช้งานทางด้านจรวดและยานอวกาศเป็นครั้งแรกในปีค.ศ. 1956 โดยใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนสำหรับแคปซูลบันทึกข้อมูลของจรวดอวกาศ Atlas ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะต้องป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่แคปซูลถูกปล่อยออกจากจรวด Atlas แล้วเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลก [16] ต่อมาได้เริ่มนำวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกไปใช้ผลิตชิ้นส่วนท่อท้ายจรวด โดยจรวดสหรัฐอเมริกาแบบแรกที่มีท่อท้ายจรวดผลิตด้วยวัสดุคอมโพสิต

ฟีนอลิกเป็นหลัก ได้แก่ ชีปนาธ Pershing 1 [17] ซึ่งเริ่มพัฒนาในปี ค.ศ. 1958 และเข้าประจำการในปี ค.ศ. 1960 และหลังจากนั้นเรื่อยมาก็มีการใช้วัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกเป็นหลักในการผลิตฉนวนกันความร้อนสำหรับเกราะป้องกันความร้อนของยานอวกาศที่กลับเข้าสู่บรรยากาศ และฉนวนกันความร้อนของท่อท้ายจรวดจรวดเชื้อเพลิงแข็งแบบต่าง ๆ

2.4 การใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นฉนวนในท่อท้ายจรวด

การทำวัสดุคอมโพสิตจะใช้ฟีนอลิกเรซินสังเคราะห์ตามกระบวนการในเอกสาร US Patent 3,074,904 เคลือบบนพื้นเส้นใยที่ทำการปรับปรุงคุณภาพตามกระบวนการในเอกสาร US Patent 3,454,453 [18] จากนั้นนำไปอบด้วยอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เพื่อทำปฏิกิริยาขั้นต้น ซึ่งเรียกว่า B-Stage หมายถึง เรซินที่ได้จะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อน [19] จากนั้นนำชิ้นงาน B-Stage ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปใส่ในแม่พิมพ์ ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดภายใต้ความดันในการอัดไม่น้อยกว่า 4,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (310 บาร์) อ้างอิงตามข้อกำหนดสำหรับการผลิตมอเตอร์จรวดนำวิถีแบบ Sidewinder ของสหรัฐอเมริกาตามมาตรฐาน MIL-STD-2126

การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานควรมีการทดสอบอัตราการเสียดกร่อน (Ablation) ควรมีค่าต่ำ ตรวจสอบเนื้อวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตรวจสอบหารอยร้าวที่ผิวด้วยการขีดแอลกอฮอล์เพื่อตรวจหารอยร้าวภายในเนื้อวัสดุด้วยการถ่ายภาพรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) เนื้อวัสดุภายในมีความสม่ำเสมอตามมาตรฐาน MIL-STD-2126

มีการทดสอบเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุคอมโพสิตเกรดทั่วไป พบว่า เนื้อวัสดุภายในมีความสม่ำเสมอไม่น้อยกว่า เมื่อนำไปประกอบกับมอเตอร์จรวดเพื่อจุดทดสอบภาคสถิติและตรวจสอบการเสียดกร่อนของฉนวนจากวัสดุคอมโพสิตในท่อท้ายจรวดเปรียบเทียบกับพบว่า ฉนวนในท่อท้ายจรวดที่ใช้ฟีนอลิกเรซิน

ที่สังเคราะห์ขึ้นมามีระยะเสียดกร่อนน้อยกว่าฉนวนจากวัสดุคอมโพสิตเกรดทั่วไปทุกตำแหน่ง [20]

2.5 ระดับความมั่นใจ (Confidence Level)

ระดับความมั่นใจ (Confidence Level) เป็นค่าที่ระบุ “คุณภาพ” ของแผนการทดสอบและเกณฑ์ยอมรับที่ใช้ในการตรวจสอบอุปกรณ์ ในที่นี้หมายถึงความน่าจะเป็นที่จะไม่ยอมรับอุปกรณ์ซึ่งประชากรมีระดับความไว้วางใจได้ต่ำกว่าเกณฑ์ยอมรับ โดยตัดสินใจจากผลการทดสอบอุปกรณ์ที่สุ่มตัวอย่างมาเป็นจำนวนจำกัด [21] สำหรับอุปกรณ์ใช้ครั้งเดียว ความน่าจะเป็น $P(r)$ ที่จะสุ่มตัวอย่างอุปกรณ์มา n ชิ้น แล้วสุ่มได้อุปกรณ์ Defective r ชิ้น เป็นไปตามค่าสถิติการกระจายแบบ Binomial [22]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาฟีนอลิกเรซินทนความร้อนสูงสำหรับผลิตฉนวนกันความร้อนในท่อท้ายจรวด ดำเนินการโดยสังเคราะห์น้ำยาฟีนอลิกเรซินทนความร้อนสูงด้วยวิธีการการดัดแปลงโดยการเติมอีพอกซีเรซินและไซเลนผลิตเป็นวัสดุฉนวนแบบคอมโพสิตสำหรับท่อท้ายของจรวด จุดทดสอบภาคสถิติโดยใช้โมเดลจรวดขนาด 122 มม. ระยะยิง 30 กม. ทำให้เกิดการกระกรรมต่อฉนวนท่อท้ายจรวดที่ผลิตขึ้น เพื่อวัดขนาดและมิติความเสียหายของฉนวนและใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำขนาดและรูปร่างของฉนวนไปใช้ในจรวดขนาด 122 มม. ระยะยิง 40 กม. ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2

3.1 การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซิน

การสังเคราะห์ฟีนอลิกเรซินอ้างอิงจาก สิทธิบัตร US 3,074,904 ทำการผสม Paraformaldehyde และ Hexamine เข้าด้วยกัน แล้วทำปฏิกิริยาด้วย Phenol กำจัดสารระเหยและผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากการเกิดปฏิกิริยาโดยการดำเนินการภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม Bisphenol

การสังเคราะห์น้ำยาฟีนอลิกเรซิน

- วิเคราะห์การปรับปรุงคุณสมบัติฟีนอลิกเรซินด้วยเทคนิค FT-IR
- เตรียมชิ้นงานทดสอบทางกลโดยใช้สไลด์เสริมแรง

การผลิตฉนวนสำหรับท่อท้ายจรวด

- การทดสอบการเสียดกร่อนของวัสดุคอมโพสิต
- การทดสอบด้วยภาพรังสี

การทดสอบภาคสถิติ

- การทดสอบภาคสถิติ
- การคำนวณระดับความมั่นใจ

การประยุกต์ใช้จรวดระยะยิง 40 กม.

- การคำนวณขนาดท่อท้ายจรวด ด้วยกำลังมอเตอร์จรวด 122 มม. ระยะยิง 40 กม.

รูปที่ 2 วิธีกรดำเนินการงานวิจัย

Epoxy ปลอ่ยให้สารทำปฏิกิริยาภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิสูง จากนั้นจึงเติม Phenyltrimethylsilane (PTMS) และทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ต่อไปจนกระทั่งได้ฟีนอลิกเรซินที่มีสีเหลืองอ่อน

การวิเคราะห์หาชนิดและองค์ประกอบหลักทางเคมีของฟีนอลิกเรซินที่ดัดแปลงด้วยไซเลน (PR-S) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared : FT-IR) ด้วยเครื่อง FT-IR (Spectrum One, Perkin Elmer) โดยพบผสมผงตัวอย่างกับ Potassium Bromide (KBr) จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นบางใสแล้วทำการทดสอบต่อด้วยเครื่องมือดังกล่าว สภาวะในการวิเคราะห์ใช้แหล่งกำเนิดแสงช่วง Middle Range Infrared ($4000-600\text{ cm}^{-1}$) Resolution: 4 cm^{-1} Detector คือ ไตรกลีซีนซิลิเกต (TGS) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM: E1252-98 โดยจ้างทดสอบตัวอย่างที่งานวิเคราะห์เชิงเคมีและชีวภาพ ฝ่ายสนับสนุนเทคนิคด้านวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ด้วยเครื่อง FT-IR Spectrometer (ยี่ห้อ : Perkin Elmer, รุ่น : Spectrum One)

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกเรซินเสริมแรงด้วยวัสดุชนิดเส้นใยแก้ว เบอร์ 200 นำมาเรียงซ้อนทับให้ไปในทิศทางเดียวกัน จำนวน 24 ชั้น

และอัดขึ้นรูปโดยให้ความร้อน 170 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดัน 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ประกอบด้วย การทดสอบความต้านทานการดัดงอ และความต้านทานการดึงโดยส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ฝ่ายวิจัยและพัฒนาสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ TEST BAND รุ่น 112.100 ขนาด 100 กิโลนิวตัน ที่อุณหภูมิห้อง

3.2 การผลิตชิ้นงานฉนวนสำหรับท่อท้ายจรวด

พินอลิกเรซินที่สังเคราะห์ได้จะนำมาผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO₂) จำนวน 8% ของน้ำหนักรวม และนำไปชุบเคลือบกับแผ่นเส้นใยแก้วเบอร์ 600 และอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แผ่นที่ได้เรียกว่าพรีเพร็ก (Prepreg) หลังจากนั้นตัดให้มีขนาดประมาณ 1.5x1.5 ซม. เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการอัดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ของฉนวนสำหรับท่อท้ายจรวด ซึ่งใช้กับมอเตอร์จรวดขนาด 122 มม. ระยะยิง 30 กม. ของสหป. โดยให้ความร้อน 170 องศาเซลเซียส และอัดที่ความดัน 4,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (310 บาร์) ต่อเนื่องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ชิ้นงานฉนวนสำหรับท่อท้ายจรวดแบ่งเป็น 2 ชิ้นส่วน ได้แก่ ส่วนท่อท้ายจรวดส่วนหน้า (Front Nozzle) และส่วนท่อท้ายจรวดส่วนหลัง (Rear Nozzle) นำชิ้นงานทั้งสองไปทำการเอ็กซ์เรย์เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นงานจะไม่มีรอยร้าวหรือมีฟองอยู่ในเนื้อชิ้นงาน จากนั้นจึงนำไปประกอบให้เป็นฉนวนท่อท้ายจรวดต่อไป การประกอบระหว่างชิ้นส่วนสองชิ้นนี้จะมีชิ้นส่วนที่เรียกว่า คอท่อท้ายจรวด (Nozzle Throat) ทำจากกราไฟต์และเป็นส่วนที่คอดมากที่สุดของท่อท้ายจรวด ชิ้นงานนี้จะนำไปประกอบกับมอเตอร์จรวด เพื่อนำไปทดสอบภาคสถิติในขั้นตอนสุดท้าย

3.3 การทดสอบภาคสถิติ

มอเตอร์จรวด 122 มม. ระยะยิง 30 กม. ถูกนำมาใช้ร่วมกับชิ้นส่วนท่อท้ายจรวดที่ผลิตจากฉนวนจาก

วัสดุคอมโพสิตพินอลิก เนื่องจาก สหป. มีข้อมูลในการทดสอบภาคสถิติมอเตอร์จรวดนี้จึงมีข้อมูลกราฟแรงขับและความดันเพื่อใช้คำนวณฟลักซ์ความร้อน และทำการคำนวณการเสียดสร่อนของฉนวนท่อท้ายจรวด โดยใช้คุณสมบัติของฉนวนพินอลิกชนิดนี้

จากนั้นทำการทดสอบภาคสถิติมอเตอร์จรวดขนาดดังกล่าวที่อุณหภูมิห้องโดยวัดค่าแรงขับ ความดันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ และนำกราฟที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการออกแบบ

ทำการถอดชิ้นส่วนท่อท้ายจรวดนำไปผ่าครึ่ง และทำการวัดระยะเสียดสร่อนที่เกิดขึ้นจริง และนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณ

3.4 การประยุกต์ใช้ฉนวนท่อท้ายจรวดกับมอเตอร์จรวด 122 มม. ระยะยิง 40 กม.

สำหรับมอเตอร์จรวด 122 มม. ระยะยิง 40 กม. สหป. มีข้อมูลผลการทดสอบภาคสถิติ จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณ การเสียดสร่อนจากการเผาไหม้ของมอเตอร์จรวดชนิดนี้ ตามสมการ (1)

$$d_{ablation} = r_{ablation\ rate} \times t_{burn} \quad (1)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} r_{ablation\ rate} &= \text{อัตราการเสียดสร่อน} \\ t_{burn} &= \text{ระยะเวลาเผาไหม้ของจรวด} \end{aligned}$$

ซึ่งตั้งข้อสมมุติว่า $r_{ablation\ rate} \propto \dot{q}_{total}$

ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการเสียดสร่อน [23] เพราะฉะนั้นการเสียดสร่อนที่เกิดขึ้นจริงของฉนวนจะคำนวณได้ดังสมการ (2)

$$r_{ablation\ rate} = r_{ablation\ test} \times \frac{\dot{q}_{total}}{\dot{q}_{test}} \quad (2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} r_{ablation\ test} &= \text{อัตราการเสียดสร่อนทดสอบ} \\ \dot{q}_{total} &= \text{ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นจริง} \end{aligned}$$

$\dot{q}'_{test}$ = พลังค์ความร้อนการทดสอบ
(8.25 MW/m²)

พลังค์ความร้อนที่เกิดขึ้นจริงของท่อไอพ่น
จรวดเกิดจากผลรวมระหว่างพลังค์ความร้อนจาก
การแผ่รังสี (Radiation) และพลังค์ความร้อนจาก
การพาความร้อน (Convection) ของก๊าซร้อน
สามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$\dot{q}_{total} = \dot{q}_{convection} + \dot{q}_{radiation} \quad (3)$$

พลังค์ความร้อนจากการแผ่รังสีสามารถ
คำนวณได้จากสมการการแผ่รังสีความร้อน (4)

$$\dot{q}_{radiation} = \epsilon \sigma (T^4 - T_w^4) \quad (4)$$

โดยที่

ϵ = Emissivity Coefficient แทนค่าเป็น 1

σ = Stefan-Boltzmann Constant แทน
ค่าเป็น $5.6703 \cdot 10^{-8}$ (W/m² K⁴)

Bartz ได้พัฒนาแบบจำลอง Semi Empirical
สำหรับคำนวณหา Heat Transfer Coefficient
ในท่อท้ายจรวด [24] ในปัจจุบันยังคงใช้แบบจำลองนี้
ในการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน
ภายในท่อท้ายจรวด (5)

$$\dot{q}_{convection} = h_g (T_{aw} - T_w) \quad (5)$$

เมื่อ

h_g = Heat Transfer Coefficient
(BTU/in.² sec°F)

T_w = อุณหภูมิผิวฉนวนกันความร้อน

T_{aw} = อุณหภูมิผิวฉนวนกันความร้อนกรณี
พลังค์ความร้อนเป็นศูนย์

โดย

$$\frac{T_{aw}}{T_0} = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} RM^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \quad (6)$$

γ = Heat Capacity Ratio ของก๊าซที่ไหลใน
ท่อท้ายจรวด

R = Adiabatic Recovery Factor ซึ่งตาม
วิธีของ Bartz ใช้ค่า = 0.89

M = Mach Number ของก๊าซที่ไหลภายใน
ท่อท้ายจรวด ณ จุดที่พิจารณา คำนวณได้จากสมการ (7)

$$\frac{A}{A_*} = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{\{1 + [(\gamma-1)/2] M^2\}^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}{1 + [(\gamma-1)/2]}} \quad (7)$$

เมื่อ

A = พื้นที่หน้าตัดการไหล ณ จุดที่พิจารณา
(in.²)

A_* = พื้นที่หน้าตัด Throat (in.²)

T_0 = Stagnation Temperature ของก๊าซ
ที่ไหลภายในท่อท้ายจรวด สัมพันธ์กับอุณหภูมิของก๊าซ
ณ ตำแหน่งที่พิจารณา T (Free Stream Static
Temperature) ดังสมการ (8) และ (9)

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (8)$$

$$\frac{A_*}{A} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \frac{T}{T_1} \right)^{1/(\gamma-1)} \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \left[1 - \frac{T}{T_1} \right]} \quad (9)$$

เมื่อ

T_1 = Adiabatic Flame Temperature
ของก๊าซจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ของจรวด

ตามวิธีแบบจำลองของ Bartz หาค่า Heat
Transfer Coefficient ได้ตามสมการ (10)

$$h_g = [D_{0.2}^{0.026} (\frac{\mu^{0.2} C_p}{P_r^{0.6}}) (\frac{P_{cg}}{C^*})^{0.8} (\frac{P_*}{P_c})^{0.1} (\frac{A_*}{A})^{0.9} \sigma] \quad (10)$$

โดยที่

D_* = Throat Diameter (in.)

μ = Gas Viscosity (lb/in.sec) สำหรับก๊าซ
จากการเผาไหม้ ประมวลค่าได้ด้วยสมการ (11)

C_p = Specific Heat at Constant Pressure (Btu/lb °F) แทนค่าด้วย 0.339

P_r = Prandtl Number = $\mu C_p / k$
ประมาณค่าโดยใช้ Kinetic Theory of Gas ได้เป็น
 $P_r = \frac{4Y}{9\gamma - 5}$

P_c = Chamber Pressure (psi)

g = Gravitational Acceleration (32 ft/sec²)

C^* = Characteristic Velocity (ft/sec)

r_c = ท่อท้ายจรวด Throat Radius of Curvature (in.)

σ = Dimensionless Factor Accounting for Variation of ρ and μ

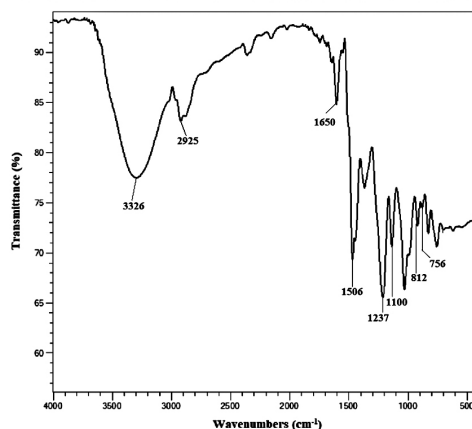
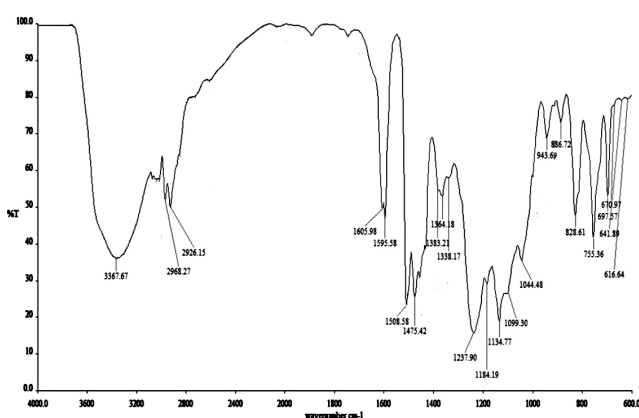
$$\mu = (46.6 \times 10^{-10})(\bar{m})^{1/2}(T^\circ R)^\omega \quad (11)$$

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์การปรับปรุงคุณสมบัติพีนอลิกเรซิน

จากการวิเคราะห์พีนอลิกเรซินดั้งเดิมเทียบกับวัสดุพีนอลิกเรซินชนิดดัดแปลงด้วยไซเลน ที่สังเคราะห์ขึ้น ด้วยเทคนิค FT-IR พีนอลิกเรซินดั้งเดิมตรวจพบการดูดกลืนพลังงานของการสั่นแบบยืดของกลุ่มไฮดรอกซิล (OH group) ในพีนอลที่ช่วงคลื่น 3326 cm⁻¹ พบการดูดกลืนพลังงานของคลื่นในช่วง 2925 cm⁻¹ แสดงถึงการยืดการสั่นสะเทือนของพันธะกลุ่ม C-H ในวงแหวนฟีนิล และพันธะ C-H แบบอะลิฟาติก พบการดูดกลืนพลังงานของคลื่นที่ 1506 cm⁻¹ แสดงถึงการยืดการสั่นสะเทือนของพันธะ C-C ในวงแหวนอะโรมาติกของโมเลกุลพีนอล การดูดกลืนพลังงานของคลื่นในช่วง 1237 cm⁻¹ บ่งชี้ถึงพันธะ C-O ของพีนอลไฮดรอกซิล และการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O สำหรับพีนอลไฮดรอกซิลที่เหลือ พบการดูดกลืนพลังงานของพันธะ C-O ของเบนซิลไฮดรอกซิลที่ช่วงคลื่น 1100 cm⁻¹ พบการดูดกลืนพลังงานของคลื่นที่ 812 และ 756 cm⁻¹ แสดงถึง Para-substituted

และ Ortho-substituted ของเบนซีน และวัสดุพีนอลิกเรซินชนิดดัดแปลงด้วยไซเลน พบการดูดกลืนพลังงานของการยืดของพันธะโพสิโซลอสซิล (Si-O-Si) และไซเลน Si-O-C ในช่วงของคลื่น 1184.19 cm⁻¹ พบการดูดกลืนพลังงานของคลื่นในช่วง 1044.48 cm⁻¹ บ่งชี้ถึงการดูดกลืนพลังงานของพันธะ Si-O-Si และพบการดูดกลืนพลังงานของพันธะ Si-O-C ในช่วงของคลื่น 1099.30 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการดัดแปลงด้วยไซเลนในวัสดุพีนอลิกเรซินดังรูปที่ 3 และตารางที่ 1



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ FT-IR พีนอลิกเรซินชนิดดัดแปลงด้วยไซเลน (บน) และพีนอลิกเรซินดั้งเดิม (ล่าง) [25]

ตารางที่ 1 หมู่ฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับสเปกตรัมการสั่นของโมเลกุลหลักของฟีนอลิกเรซินที่ดัดแปลง

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน (Possible Assignments)	อ้างอิง (References)
3367.67	Stretching vibrations of hydroxyl (OH) groups in phenol	A. H. Pullichola et al. [26], H. Jiang et al. [27]
3326	Stretching vibrations of hydroxyl (OH) groups in phenol	A. H. Pullichola et al. [26], H. Jiang et al. [27]
2925	Stretching vibrations of C-H group bonds in phenyl rings and aliphatic C-H	B. Erzen et al. [25]
1506	Stretching vibrations of C-C in the aromatic ring in phenol molecules	B. Erzen et al. [25]
1237	The C-O bond of phenolic hydroxyl, and stretching vibration peak of C-O bond for residual phenol hydroxyl	B. Erzen et al. [25]
1100	The C-O bond for benzyl hydroxyl in phenol formaldehyde	B. Erzen et al. [25], S. Wang et al. [28], J. Yun et al. [29]
812 and 756	para-substituted and ortho-substituted of benzene	B. Erzen et al. [25]
1184.19	Stretching of the polysiloxanes (Si-O-Si) and Si-O-C bonds	W. A. W. A. Rahman et al. [30]
1134.77	Si-O-Si bonds in a cage structure with a bond angle of approximately 150°	A. Grill et al. [31]
1099.30	The Si-O-C bond stretching	S. Y. Jing et al. [32] T. Lu et al. [33]
1044.48	The Si-O-Si asymmetric stretching	S. Y. Jing et al. [32], C. Arslan and M. Dogan [34]

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกเสริมแรงด้วยวัสดุชนิดเส้นใยแก้ว เบอร์ 200 ประกอบด้วยการทดสอบความต้านทานการดัดงอ และ ความต้านทานการดึง ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตฯ ที่ผลิตขึ้นมามีคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตฟีนอลิกเป็นไปตามมาตรฐาน MIL-C-81251 แม้ว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

คุณสมบัติทางกล	เกณฑ์ควบคุม MIL-C-81251	Glass Fiber+ Phenolic
ความต้านทานการดัดงอ (MPa)	131	205
ความต้านทานการดึงสูงสุด (MPa)	83	140

ดังกล่าวจะกำหนดให้ใช้เส้นใยเสริมแรงชนิดซิลิกา ซึ่งมีความสามารถในการเสริมความแข็งแรงดีกว่าเส้นใยแก้วซึ่งใช้ในงานวิจัย แต่การใช้วัสดุพีนอลิกเรซินชนิดดัดแปลงด้วยไซเลนยังคงเสริมความแข็งแรงของวัสดุให้เป็นไปเกณฑ์มาตรฐานได้



รูปที่ 4 ฟรียที่ทำการตัดให้เป็นชิ้นขนาดประมาณ 1.5 x 1.5 ซม.

4.3 ผลการทดสอบการเสียดร่อนของวัสดุคอมโพสิต

แผ่นฟรียที่ตัดเป็นชิ้นขนาดประมาณ 1.5 x 1.5 ซม. ถูกนำไปใช้เป็นวัตถุบิในการอัดขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบการเสียดร่อน ลักษณะของฟรียที่ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้ว แสดงดังรูปที่ 4

การทดสอบการเสียดร่อน ดำเนินการอัดขึ้นงานฉนวนตามขั้นตอนการอัดขึ้นรูปฉนวนส่วนต่อท้ายจรวด เตรียมขึ้นงานทดสอบแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 100 x 100 x 10 มม. จำนวน 3 ชิ้น ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 วัสดุที่มีอัตราการทนทานต่อการเสียดร่อนน้อยกว่า 0.200 มม./วินาที จึงจะถือว่าเป็นวัสดุทนการเสียดร่อน (Ablative Material) ที่สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในมอเตอร์จรวดได้ [35] จากผลที่ได้พบว่า วัสดุคอมโพสิตฯ นี้มีค่าอยู่ที่ 0.117 มม./วินาที ซึ่งผ่านตามเกณฑ์ข้างต้นสามารถนำไปเป็นวัสดุฉนวนส่วนต่อท้ายจรวดได้

4.4 ผลการทดสอบด้วยภาพรังสี

หลังจากทำการอัดขึ้นงานฉนวนสำหรับต่อท้ายจรวด ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชิ้น ได้แก่ ส่วนต่อท้ายจรวด

ตารางที่ 3 แสดงผลของการทดสอบการทนทานต่อการเสียดร่อนสำหรับวัสดุคอมโพสิต

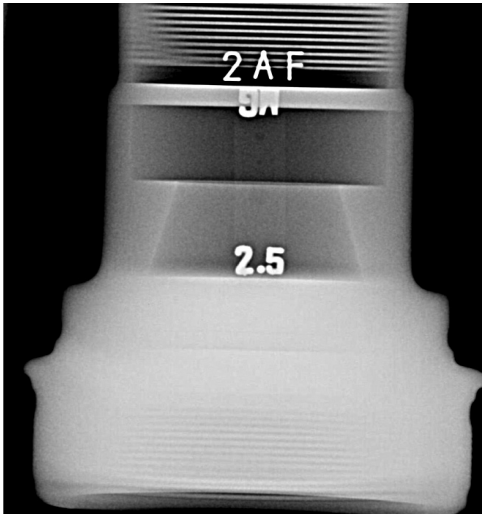
No.	ความหนา (mm)	ระยะเวลาการเผาไหม้ (s)	อัตราการทนทานต่อการเสียดร่อน (mm/s)
1	12.717	107.9	0.118
2	12.756	110.8	0.115
3	12.643	108.5	0.117
Average			0.117
STDEV			0.001



รูปที่ 5 ชิ้นงานฉนวนส่วนต่อท้ายจรวดส่วนหน้าและส่วนหลัง

ส่วนหน้าและส่วนต่อท้ายจรวดส่วนหลัง ลักษณะของชิ้นงานทั้งสองส่วนเป็นดังรูปที่ 5

ชิ้นงานทั้งสองส่วนถูกนำไปทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีการเช็คแอลกอฮอล์และทดสอบด้วยการฉายภาพรังสีเอกซ์ โดยเครื่องต้นกำเนิดรังสี YXLON Y.SMART 200 แผ่นรับภาพ VIDISCO FlashXPro 13.5 x 17 inch แรงดัน 130 - 170 kV กระแส 2.0 - 3.0 mA ผลการเอ็กซเรย์พบว่า เนื้อฉนวนฯ ที่อัดขึ้นรูปนั้นมีความสม่ำเสมอมีเพียงฉนวนหมายเลข Front Nozzle 2 ที่ตรวจพบว่ามีกรขึ้นรูปที่ไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 6) ซึ่งรอยความไม่สม่ำเสมอที่ตรวจพบสอดคล้องกับผลการตรวจสอบด้วยแอลกอฮอล์ ผลการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายทั้งสองวิธีรอยความไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน MIL-STD-2126 ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 6 ผลภาพฉายรังสีเอกซ์

ตารางที่ 4 แสดงผลวิเคราะห์ผลภาพ X-ray

ตัวอย่าง	รอยไม่สม่ำเสมอ	ผล
Front Nozzle 1	N/A	Pass
Front Nozzle 2	1 Defect, Area less than 0.12 inch ²	Pass
Front Nozzle 3	N/A	Pass
Front Nozzle 5	N/A	Pass
Front Nozzle 6	N/A	Pass
Rear Nozzle 1	N/A	Pass
Rear Nozzle 2	N/A	Pass
Rear Nozzle 3	N/A	Pass
Rear Nozzle 5	N/A	Pass
Rear Nozzle 6	N/A	Pass

4.5 ผลการทดสอบภาคสถิติ

การทดสอบภาคสถิติ (รูปที่ 7) แสดงให้เห็นว่าแรงขับสูงสุดของจรวดทั้ง 5 นัด มีค่าอยู่ระหว่าง 29 - 30 กิโลนิวตัน แรงดันสูงสุดอยู่ระหว่าง 180 - 190 เมกะปาสคาล และกราฟรูปร่างแรงขับและแรงดันของจรวดที่ทดสอบ มีแนวโน้มของรูปร่างเป็นไปในทิศทางเดียวกับการออกแบบเป็นข้อบ่งชี้ว่าท่อท้ายจรวดสามารถทำงานทดแทน



รูปที่ 7 การทดสอบภาคสถิติ



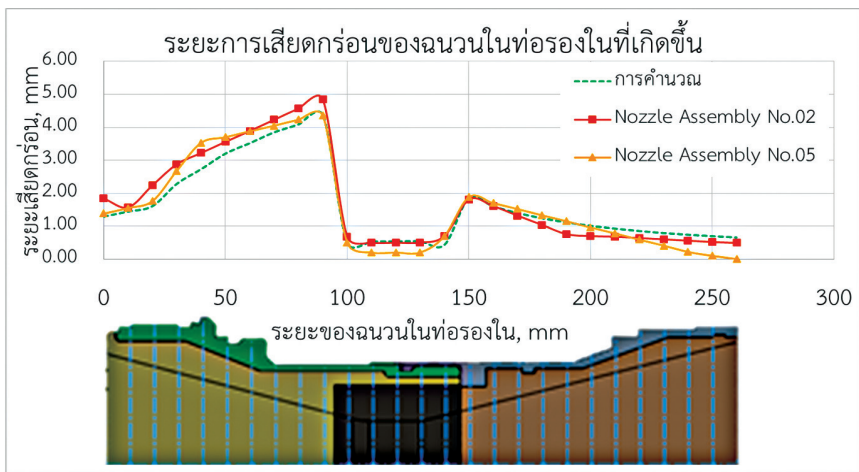
รูปที่ 8 ท่อท้ายจรวดหลังการทดสอบภาคสถิติ

การนำเข้าจากต่างประเทศได้

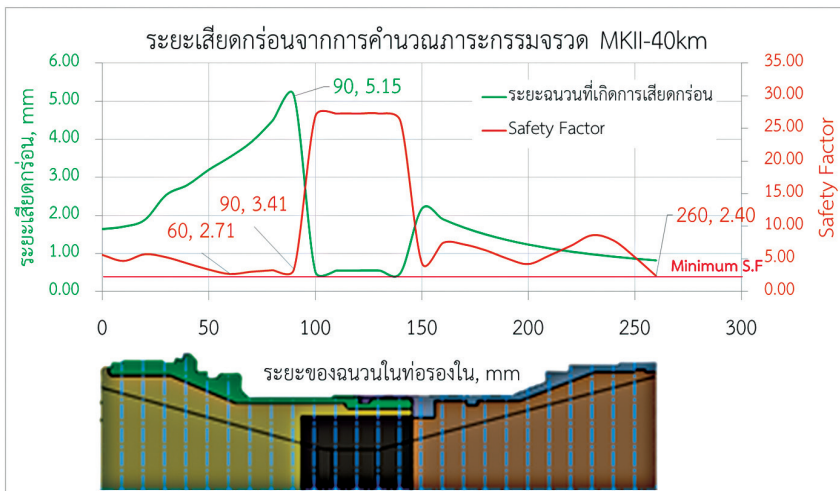
การตรวจเช็คผิวเปลือกนอกของท่อท้ายจรวด หลังการทดสอบภาคสถิติด้วยสายตา (รูปที่ 8) พบว่า ฉนวนกันความร้อนท่อท้ายจรวดที่ดำเนินการอัดขึ้นรูปจากพินอลิกเรซินที่ได้รับการดัดแปลงด้วยไซเลนภายใต้การวิจัยสามารถทนรับภาระความร้อนจากการทำงานของจรวดขนาด 122 มม. ระยะยิง 30 กม. ของ สทป. ได้อย่างสมบูรณ์ ผลการวัดขนาดและมิติฉนวนส่วนท่อท้ายจรวดแสดงให้เห็นแนวโน้มการเสียดร่อนที่เกิดขึ้น ในส่วนที่แคบจะเกิดการเสียดร่อนสูงกว่าส่วนที่กว้าง และด้านที่เป็นการบีบจะเกิดการเสียดร่อนมากกว่าด้านผาย โดยที่ระยะ 100 - 140 มิลลิเมตร จะเกิดการเสียดร่อนที่ไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากวัสดุที่อยู่ในช่วงดังกล่าวเป็นวัสดุคนละชนิดกัน แสดงดังรูปที่ 9

4.6 ผลการคำนวณระดับความมั่นใจ

จากผลการทดสอบภาคสถิติจำนวน 5 นัด ไม่พบผลการทดสอบที่เกิดการทำงานผิดพลาด โดยวัสดุฉนวนท่อท้ายจรวดตามกระบวนการที่พัฒนา มีความ



รูปที่ 9 ระยะการเสียดร่อนของฉนวนในท่อท้ายจรวดจากการทดสอบภาคสถิติ จรวดขนาด 122 มม. ระยะยิง 30 กม.



รูปที่ 10 ระยะการเสียดร่อนของฉนวนในท่อท้ายจรวดจากการคำนวณสำหรับมอเตอร์จรวด 122 มม. ระยะยิง 40 กม.

ตารางที่ 5 แสดงการคำนวณระดับความมั่นใจ

Reliability	สัดส่วนของ Defective	จำนวนตัวอย่าง	จำนวน Defective	Confidence Level
90.0%	10.0%	5	0	40.95%
90.0%	10.0%	9	0	61.26%
90.0%	10.0%	16	0	81.47%
90.0%	10.0%	22	0	90.15%
90.0%	10.0%	29	0	95.29%

ไว้วางใจได้ไม่น้อยกว่า 90% เมื่อคำนวณระดับความมั่นใจตามค่าสถิติการกระจายแบบ Binomial จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 5 ทั้งนี้ หากต้องการระดับความมั่นใจสูงขึ้นยังสามารถใช้ตารางประกอบการพิจารณาจำนวนตัวอย่างเพื่อให้ได้ระดับความมั่นใจที่ต้องการต่อไป

4.7 ผลการประยุกต์ใช้ฉนวนท่อท้ายจรวดกับมอเตอร์จรวด 122 มม. ระยะยิง 40 กม.

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณการเสียดร่อนของฉนวนทางคณิตศาสตร์ โดยใช้กำลังของจรวดขนาด 122 มม. ระยะยิง 40 กม. ของ สทป. พบว่า ด้วยรูปร่างและความหนาของฉนวนมีความสามารถเพียงพอที่จะทนรับภาระความร้อนจากการทำงานของจรวดได้อย่างสมบูรณ์ โดยบริเวณที่เป็นวัสดุฉนวนแบบคอมโพสิตมีค่าความปลอดภัย (Safety Factor) คงเหลือต่ำสุด 2.40 ซึ่งอยู่ที่ระยะ 260 มม. จากด้านหน้าของท่อท้ายจรวดแสดงดังรูปที่ 10

5. สรุปผลการวิจัย

พินอลิเกรซินเชิงพาณิชย์ได้รับการดัดแปลงด้วยอีพอกซีเรซินและไซเลน โดยกำหนดลักษณะเพื่อเพิ่มความต้านทานการเสียดร่อนของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยแก้ว การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น และการเชื่อมโยงในโครงสร้างของวัสดุพินอลิกิฟลูจันได้จากการวิเคราะห์ FT-IR พบการดูดกลืนพลังงานของหมู่พันธะ OH ในช่วง 3367 cm^{-1} และการยืดของพันธะซิลิโกลเซน (Si-O-Si) และไซเลน Si-O-C ในช่วงของคลื่น 1184.19 cm^{-1} การดูดกลืนพลังงานของหมู่ Si-O-Si ในช่วง 1044 cm^{-1} และพบการดูดกลืนพลังงานของพันธะ Si-O-C ซึ่งบ่งชี้ถึงการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและพินอลิกในช่วงของคลื่น 1099 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการดัดแปลงด้วยไซเลนในวัสดุพินอลิเกรซิน การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตพินอลิกโดยเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วเบอร์ 200 มีความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการดัดงอ เป็นไปตามมาตรฐาน MIL-C-81251 แม้ว่า

ใช้เส้นใยเสริมแรงชนิดเส้นใยแก้วที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยเสริมแรงที่กำหนดในมาตรฐาน แต่การใช้พินอลิเกรซินชนิดดัดแปลงด้วยไซเลน ยังคงเสริมความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานได้

ฉนวนท่อท้ายจรวดที่ใช้วัสดุคอมโพสิตพินอลิกที่ได้รับการดัดแปลงด้วยไซเลนมีอัตราการทำนายการเสียดร่อน 0.117 มม./วินาที ซึ่งมีค่าคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน MIL-I24768 แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตพินอลิกที่ได้รับการดัดแปลงด้วยไซเลนเพิ่มความต้านทานการเสียดร่อนอย่างมีนัยสำคัญ และในส่วนของภาพรังสีเอ็กซ์ พบว่า การอัดขึ้นรูปฉนวนท่อท้ายมีคุณภาพที่ดี รอยไม่สม่ำเสมอที่ตรวจพบสอดคล้องตามเกณฑ์มาตรฐาน MIL-STD-2126 ผลการทดสอบภาคสถิติพบว่า วัสดุคอมโพสิตพินอลิกที่ได้รับการดัดแปลงด้วยไซเลนสามารถทนรับภาระความร้อนจากการทำงานของจรวดได้อย่างสมบูรณ์ และมีระดับความมั่นใจไม่น้อยกว่า 90%

จากผลการคำนวณการเสียดร่อนของฉนวนด้วยกำลังจรวดขนาด 122 มม. ระยะยิง 40 กม. พบว่า ฉนวนท่อท้ายจรวดที่พัฒนาขึ้นสามารถรับภาระความร้อนจากการทำงานของจรวดได้อย่างสมบูรณ์ มีค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ต่ำสุด 2.40 ที่ระยะ 260 มม. จากด้านหน้าของท่อท้ายจรวด

6. ข้อเสนอแนะ

จากผลการคำนวณการเสียดร่อนของฉนวนท่อท้ายจรวด ส่งผลให้เกิดความเชื่อมั่นว่าจะสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ทดสอบด้วยจรวดต่อไปในอนาคตเพื่อยืนยันศักยภาพการผลิตชิ้นส่วนของจรวดเองภายในประเทศ และพึ่งพาตนเองได้อย่างแท้จริง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้อนุมัติทุนอุดหนุนการทำการวิจัยส่งเสริมและสนับสนุน

การวิจัยและนวัตกรรมประจำปีงบประมาณ 2566 ให้กับสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ภายใต้การกำกับดูแลของรัฐมนตรีกว่าการกระทรวงกลาโหม

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศ. วงศ์เจริญ. “Northrop Grumman จะปล่อยดาวเทียมสอดแนมของสหรัฐฯ ใน 15 มิ.ย..” BEARTAI.com. <https://www.beartai.com/tech/science/669108> (accessed Jun. 1, 2024).
- [2] ช. ชัยชื่นชอบ. “ทำความเข้าใจ Vega จรวดนำส่ง THEOS-2.” GISTDA.or.th. https://www.gistda.or.th/news_view.php?n_id=6918&lang=TH (accessed Jun. 1, 2024).
- [3] China Media Group. “คลิกคลิป: จีนส่งดาวเทียมขึ้นสู่อวกาศจากท้องทะเลพร้อมกันห้าดวง.” MGRONLINE.com. <https://mgronline.com/china/detail/9650000041906> (accessed Jun. 1, 2024).
- [4] Wikipedia. “S-Series (rocket family).” EN.WIKIPEDIA.org. [https://en.wikipedia.org/wiki/S-Series_\(rocket_family\)](https://en.wikipedia.org/wiki/S-Series_(rocket_family)) (accessed Jun. 1, 2024).
- [5] L. Pilato, *Phenolic Resins: A Century of Progress*. 1st ed., Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2010, pp. 263 - 306.
- [6] Science History Institute. “Leo Hendrik Baekeland.” SCIENCEHISTORY.org. <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/leo-hendrik-baekeland/> (accessed Feb. 1, 2023).
- [7] L. Pilato, *Phenolic Resins: A Century of Progress*. 1st ed., Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2010, pp. 154 - 437.
- [8] L. M. Higashi, “Laminate Structures,” US Patent 3,074,904, Jan. 16, 1963.
- [9] P. Ngamsantivongsa, S. Boonthalarath, B. Wong-ek, S. Nuanklai, and C. Kiriratnikom, “Development and Characterization of Ablative Materials Used for Rocket Motors,” in *2017 Third Asian Conf. Defence Technol. (ACDT)*, Phuket, Thailand, 2017, pp. 110 – 114, doi: 10.1109/ACDT.2017.7886168.
- [10] K. Kanimozhi, K. Sethuraman, V. Selvara, and M. Alagar, “Development of Ricehusk Ash Reinforced Bismaleimide Toughened Epoxy Nanocomposites,” *Front. Chem.*, vol. 2, no. 65, pp. 1 - 9, Jul. 2014, doi: 10.3389/fchem.2014.00065.
- [11] A. M. Kawamoto, L. C. Pardini, M. F. Diniz, V. L. Lourenco, and M. F. K. Takahashi, “Synthesis of a Boron Modified Phenolic Resin,” *J. Aerosp. Technol. Manage.*, vol. 2, no. 2, pp. 169 - 182, Aug. 2010, doi: 10.5028/jatm.2010.02027610.
- [12] Nanostructure Science and Technology, *Device Applications of Silicon Nanocrystals and Nanostructures*, New York, USA: Springer Science+Business Media, 2009, doi: 10.1007/978-0-387-78689-6.
- [13] J. Yun, C. Lixin, H. Zhao, Z. Xiaofei, W. Ye, and D. Zhu, “Boric Acid as a Coupling Agent for Preparation of Phenolic Resin Containing Boron and Silicon with Enhanced Char Yield,” *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 40, no. 17, p. 1800702, 2018, doi: 10.1002/marc.201800702.
- [14] A. Issa and A. S. Luyt, “Kinetics of Alkoxysilanes and Organoalkoxysilanes Polymerization: A Review,” *Polym.*, vol. 11, no. 3, pp. 1 - 41, Mar. 2019, doi: 10.3390/polym11030537.

- [15] G. F. Sykes, "Decomposition Characteristics of a Char-Forming Phenolic Polymer Used for Ablative Composites," NASA Technical Note D-3810, Feb. 1967. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670008814/downloads/19670008814.pdf>
- [16] G. W. Sutton, "The Initial Development of Ablation Heat Protection, An Historical Perspective," *J. Spacecraft*, vol. 19, no. 1, 1982, doi: 10.2514/3.62196.
- [17] L. H. Caveny, R. A. Ellis, R. L. Geisler, and T. L. Moore, "Solid Rocket Enabling Technologies and Milestones in the United States," *J. Propul. Power*, vol. 19, no. 6, 2003, doi: 10.2514/2.6944.
- [18] J. W. Ward and G. L. Squire, "Sodium Carbonate Treatment of High Silica Fiber Products," U.S. Patent 3,454,453, Jul. 8, 1969.
- [19] M. Thebault, A. Kandelbauer, U. Muller, E. Zikulnig Rusch, and H. Lammer, "Factors Influencing the Processing and Technological Properties of Laminates based on Phenolic Resin Impregnated Papers," *Eur. J. Wood Wood Products*, vol. 75, no. 45, pp. 785 - 806, 2017, doi: 10.1007/s00107-017-1205-8.
- [20] ช. แซ่ไฉ่, พ. งามสันติวงศ์ และ จ. ศิริรัฐนิคม, "การพัฒนาวัดคุณสมบัติทนทานต่อการเสียดร่อนสำหรับฉนวนท่อไอพ่นจรวด," ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 37*, โรงแรมเดอะเบต เวเคชั่น รามังคลา, สงขลา, ไทย, 2566.
- [21] U.S. Army Test and Evaluation command, Field Artillery Statistics, Materiel Test Procedure 3-1-005, Mar. 1972.
- [22] E. R. Sherwin, "Analysis of "One Shot" Devices," Reliability Analysis Center, New York, USA, Rep. AD1035817, 2000. Accessed: Nov. 25, 2022. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1035817.pdf>
- [23] D. Bianchi, A. Turchi, F. Nasuti, and M. Onofri, "Chemical Erosion of Carbon-Phenolic Rocket Nozzles with Finite-Rate Surface Chemistry," *J. Propul. Power*, vol. 29, no. 5, pp. 1220 - 1230, Sept. 2013, doi: 10.2514/1.B34791.
- [24] D. R. Bartz, "Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective Heat Transfer Coefficients," *J. Jet Propuls.*, vol. 27, Jan. 1957, doi: 10.2514/8.12572.
- [25] B. Erzen, M. Karatas, S. Deniz, and E. Aydogmus, "Advances in Synthesis, Characterization, and Industrial Applications of Phenol Formaldehyde Resins," *IJANSER*, vol. 8, no. 4, pp. 26 - 34, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://as-proceeding.com/index.php/ijanser/article/view/1817/1758>.
- [26] A. H. Pullichola, L. A. Varghese, U. Gopalakrishnapanicker, and K. M. Das, "Fourier Transform Infra-red Spectroscopy to Determine Formaldehyde to Phenol Ratio of Phenol Formaldehyde Resole," *J. Elastomers Plast.*, vol. 54, no. 4, pp. 593 - 604, Jan. 2022, doi: 10.1177/00952443211054197.
- [27] H. Jiang et al., "The Pyrolysis Mechanism of Phenol Formaldehyde Resin," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 97, no. 8, pp. 1527 - 1533, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.polymdegrad-stab.2012.04.016.

- [28] S. Wang, X. Jing, Y. Wang, and J. Si, "High Char Yield of Aryl Boron-containing Phenolic Resins: The Effect of Phenylboronic Acid on The Thermal Stability and Carbonization of Phenolic Resins," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 99, no. 1, pp. 1 - 11, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.011.
- [29] J. Yun, C. Lixin, H. Zhao, Z. Xiaofei, W. Ye, and D. Zhu, "Boric Acid as a Coupling Agent for Preparation of Phenolic Resin Containing Boron and Silicon with Enhanced Char Yield," *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 40, no. 17, Dec. 2018, doi: 10.1002/marc.201800702.
- [30] W. A. W. A. Rahman, N. Adenan, R. R. Ali, and H. Sulaiman, "Effect of Silane Crosslinker on the Thermal Properties of Rice Straw/HDPE Biocomposite," *J. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 17, pp. 3041-3047, 2009, doi: 10.3923/jas.2009.3041.3047.
- [31] A. Grill and D. Neumayer, "Structure of Low Dielectric Constant to Extreme Low Dielectric Constant SiCOH Films: Fourier Transform Infrared Spectroscopy Characterization," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no.10, pp. 6697 - 6707, Nov. 2003, doi: 10.1063/1.1618358.
- [32] S. Y. Jing, H. J. Lee, and C. K. Choi, "Chemical Bond Structure on Si-O-C Composite Films with a Low Dielectric Constant Deposited by Using Inductively Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition," *JKPS*, vol. 41, no. 5, pp. 769 - 773, Nov. 2002.
- [33] T. Lu *et al.*, "Effects of Modifications of Bamboo Cellulose Fibers on The Improved Mechanical Properties of Cellulose Reinforced Poly(Lactic Acid) Composites," *Compos. B Eng.*, vol. 62, pp. 191 - 197, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.02.030.
- [34] C. Arslan and M. Dogan, "The Effects of Silane Coupling Agents on The Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Poly (Butylene Terephthalate) Composites," *Compos. B Eng.*, vol. 146, pp. 145 - 154, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.04.023.
- [35] พ. อภินพพัฒน์ และ ส. นวลคล้าย, "ผลของการเติมเส้นใยและสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติของฉนวนกันความร้อนชนิดยางคอมพาวด์ในมอเตอร์จรวด," ใน *การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2564*, โรงแรมเดอะเบต เวเคชั่น ราชมั่งคณา, สงขลา, ไทย, 2564.