

Defence Technology Academic Journal : DTAJ



รายชื่อผู้จัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

คณะที่ปรึกษา

พลอากาศเอก ดร.ปรีชา ประดับมุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พลอากาศตรี ดร.สุธี จันทพันธ์

พันเอก วิทวัส สุขยางค์

นาวาอากาศเอก คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์

พลตรี ดร.ชรัติ อุ่มสัมฤทธิ์

บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

กองบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์

Professor Dr. Peter Haddawy

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ จิรวินิจ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ

รองศาสตราจารย์ ดร.ระดม พงษ์วุฒิธรรม

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.ทศพล บุญเกิน

รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ธาริบุญ

รองศาสตราจารย์ ดร.นิภาพร ชุตินันต์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ฉิมพาลี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ กฤษเจริญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ สกุลเสริมสุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรประภา ภูมิภานุจนะ โรแบร์

พันเอก ดร.อรรคเดช ประทีปอุษานนท์

นาวาอากาศเอกหญิง ดร.คณินิจ อนุโรจน์

ดร.เกียรติอนันท์ ล้วนแก้ว

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มหาวิทยาลัยมหิดล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ

สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ประจำกองบรรณาธิการ

นางสาวอินทิรา จุลชาติ

นางสาวสวดี ธีระพงษ์

นางสาวบุญญาภรณ์ วาณิชชาติ

นางสาวสุนันทา ไทวระ

สารบัญ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
ปีที่ 2 ฉบับที่ 5 พฤษภาคม – สิงหาคม 2563

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ 4
ศาสตราจารย์เกษียร
- บทเรียนเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงินต่อการพัฒนา 16
เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกในประเทศไทย
สัญญา ภาตะนันท์

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Articles)

- การขับเคลื่อนผลงานวิจัยด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ 36
วิชญ์ มั่งคั่ง

บทความวิจัย (Research Articles)

- การทดสอบภาคพลวัตระบบเซ็นเซอร์และระบบสื่อสารสำหรับจรวดนำวิถี 46
นิธิ อนุกุลสัมพันธ์, ปัทพงษ์ ศรีโพธิ์, สรภพ สุภชัยพานิชพงศ์ และ มาลินดา หงษ์ทอง
- อุปกรณ์บริหารจัดการพลังงานสำหรับ Tethered Drone 60
ธีรยศ เวียงทอง, ประสูตร เดชสุวรรณ และ ภาณุวิทย์ โกโคยอุดม
- การศึกษาการแก้มการเชิงตัวเลขด้วยวิธีของรุ่งและคุดตาสำหรับสมการการเคลื่อนที่ 78
แบบไม่เป็นเชิงเส้นของแนววิถีกระสุน
ภูมเรศ แสงราม, ฤทธิยา พาอิม และ ชนะ รักษศิริ
- การวิเคราะห์การกั้นกระสุนของต้นแบบยางทางทหารด้วยโครงสร้างวัสดุผสมแบบ 90
แซนวิชของเคพลาร์ และยางพาราด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดสอบ
นัตตา จงไฟโรจน์โฆษิต, อชิรฤกษ์ จุลนิพัทธ์วงศ์, อรรถพล เจริญผล, ชานนท์ เล็กอัมรงค์,
นิรมล หุตะเจริญ และ อาทิตย์ ฤทธิเลื่อน
- ระบบขนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทรวด 100
พุกจิภา สุขศิริมัท และ ธนัช ชันเงิน
- การทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของ $\text{LiSi}/\text{LiCl-KCl-MgO}/\text{FeS}_2$ เซลล์เดียว 110
สำหรับต้นแบบแบตเตอรี่ความร้อน
ถัณฐิตา รัตนพันธุ์ และ สมัญญา สงวนพรรค

บทบรรณาธิการ

สวัสดีท่านผู้อ่านทุกท่าน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศฉบับที่ 2 ปีที่ 2 ประกอบไปด้วยเนื้อหาด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ และบทวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ ซึ่งยังคงรูปแบบเป้าหมาย และขอบเขตของวารสารอย่างครบครัน โดยบทความวิเคราะห์เทคโนโลยีทำการอภิปรายเชิงวิเคราะห์แนวทางในการขับเคลื่อนงานวิจัยเข้าสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ ในการนำเสนอหลักการและอภิปรายเชิงทฤษฎีและวิชาการนั้น มีเนื้อหาของเขตเศรษฐกิจพิเศษของประเทศจีนและผลต่อการพัฒนาเขตเศรษฐกิจของประเทศไทย อีกทั้งเนื้อหาหลากหลายจากบทความวิจัยที่ครอบคลุมเทคโนโลยีป้องกันประเทศทั้งในด้านคณิตศาสตร์ประยุกต์ อันเป็นพื้นฐานของวิทยาการคอมพิวเตอร์ การประยุกต์ความรู้ด้านฐานข้อมูลเพื่อประโยชน์ด้านการป้องกันประเทศ การทดสอบปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพื่อผลลัพธ์ด้านพลังงานทดแทน และผลงานวิจัยต้นแบบทางทหาร เป็นต้น ซึ่งกองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การเผยแพร่องค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศด้วยกิจกรรมย่อยซึ่งนำไปสู่อุตสาหกรรมป้องกันประเทศในวารสารฉบับนี้ ตามคำจำกัดความในพระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562 จะเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศของไทย ให้มีขีดความสามารถทางการแข่งขันด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในภูมิภาค

บรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

สาคร เมษรักษาวิช ^{1*}

วันที่รับ 29 กรกฎาคม 2563 วันที่แก้ไข 31 สิงหาคม 2563 วันที่ตอบรับ 31 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีสารสนเทศนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทต่อการพัฒนาและส่งเสริมความมั่นคงของประเทศในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างมาก ทั้งในด้านการทหาร ด้านการปกครอง ด้านภัยพิบัติ และด้านภัยคุกคาม เป็นต้น การมีความมั่นคงในพื้นที่ย่อมนำมาซึ่งการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมต่อไป ประเทศไทยนับว่าเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีความมั่นคงในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ทั้งในยุทธโธปกรณ์อาวุธและกำลังคน อย่างไรก็ตาม การนำเอาเทคโนโลยีสารสนเทศในการรวบรวมข้อมูลมาใช้จัดเก็บและบริหารจัดการข้อมูลยุทธโธปกรณ์อาวุธป้องกันประเทศในทางบก ทางทะเล และทางอากาศ ยังเป็นประเด็นที่เป็นที่ต้องการในความมั่นคงของประเทศ โดยเหตุนี้เอง บทความวิชาการนี้จึงได้นำเสนอระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยได้แสดงถึงการวิเคราะห์และออกแบบระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลยุทธโธปกรณ์อาวุธ รวมถึงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลขึ้นในรูปแบบแอปพลิเคชันทางเว็บ เพื่อเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สำคัญในรวบรวมข้อมูลและการบริหารจัดการข้อมูลในรูปแบบภูมิสารสนเทศ ในการแสดงรายละเอียดข้อมูลยุทธโธปกรณ์อาวุธในระดับประเทศ เพื่อเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยเสริมศักยภาพในความมั่นคงในประเทศ อีกทั้งยังเสนอแนะการนำฐานข้อมูลไปบูรณาการร่วมกับระบบการฝึกจำลองยุทธ์ของกองทัพในระดับโรงเรียนเสนาธิการ วิทยาลัยการทัพ และวิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร

คำสำคัญ : ฐานข้อมูล, โปรแกรมประยุกต์บนเว็บ, เทคโนโลยีป้องกันประเทศ

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา

* ผู้แต่ง, อีเมล: Sakorn.me@up.ac.th

Defense Technology Database

Sakorn Mekruksavanich ^{1*}

Received 29 July 2020, Revised 31 August 2020, Accepted 31 August 2020

Abstract

An information technology is regarded globally as the technology that has a role in the development and promotion of national security in many fields such as military, governing, disaster, threats, etc. Reinforced security will lead to further economic and social development. Thailand is considered as one country in Southeast Asia that is stable in national security given the advancement of weaponry and manpower. Nevertheless, the utilization of the information technology for data collection, data storage and management of defense weapons — land, sea, and air defense weapons — remains a vital issue for national security. For this reason, this academic article has proposed the database system of national defense technology. The system architecture demonstrates the analysis and design of the national defense technology database to collect weaponry data in terms of database development in web-based applications. Data collection and data management in the system are also supported by the capable geographic information system for displaying detailed information of weaponry at the national level. This tool will help to enhance further the security potential of the country. Further studies were suggested for the integration of the proposed database with the simulation and training at the Staff College, War College and National Defence College levels.

Keywords : Database, web - based application, defense technology

¹ Department of Computer Engineering, School of Information and Communication Technology, University of Phayao

* Corresponding author, E-mail: sakorn.me@up.ac.th

1. บทนำ

ความมั่นคงของประเทศไทยได้ถูกกำหนดให้เป็นประเด็นสำคัญหนึ่งในยุทธศาสตร์ชาติในช่วงปี พ.ศ. 2561 - 2580 โดยมีเป้าหมายสำคัญในการสร้างความมั่นคงปลอดภัยพร้อมรับมือกับภัยพิบัติ และภัยคุกคามในทุกรูปแบบ อีกทั้งรัฐบาลมีนโยบายในการผลักดันให้อุตสาหกรรมเทคโนโลยีป้องกันประเทศเป็น S-Curve ที่ 11 โดยกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม รับผิดชอบในการส่งเสริมและวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีสองทาง (Dual-use) ที่สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งในการกิจด้านความมั่นคงและภาคพลเรือนทั่วไปในเชิงพาณิชย์

ปัจจุบัน เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology) หรือ IT นับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญต่อการพัฒนาความมั่นคงของประเทศไทยในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างมาก [1] ดังเช่น ในด้านกฎหมายและการปกครอง ที่ใช้งานในด้านการสรุปและการตัดสินใจคดี หรือในด้านการทหารที่มีการนำเอาระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ มาใช้กับเครื่องตรวจจับอาวุธสงคราม [2] รวมถึงเครื่องบินที่รุกร้าเข้ามาในเขตน่านฟ้าของประเทศ หรือมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการจัดเก็บข้อมูลด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับข้อมูลผู้ไม่ประสงค์ดีต่อประเทศไทยมาสร้างเป็นแบบจำลองการป้องกันประเทศ [3, 4] เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การนำเอาเทคโนโลยีสารสนเทศ ซึ่งมีศักยภาพในการรวบรวมข้อมูลมาใช้ในการจัดเก็บและบริหารจัดการข้อมูลยุทธโปกรณ์อาวุธเทคโนโลยีป้องกันประเทศทางบก ทะเล และอากาศ ยังเป็นประเด็นที่เป็นที่ต้องการในความมั่นคงของประเทศไทย เพื่อการนำวิทยาการด้านนี้มาประยุกต์ใช้

ให้เกิดประโยชน์ต่อการป้องกันประเทศตามความหมายของเทคโนโลยีป้องกันประเทศใน [5] ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของจัดตั้งให้เป็นศูนย์ข้อมูลความรู้ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ด้วยเหตุนี้เอง บทความวิภาครณฉบับนี้จึงได้นำเสนอระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยได้แสดงถึงการวิเคราะห์และออกแบบระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศเพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลยุทธโปกรณ์อาวุธรวมถึงการพัฒนา ระบบฐานข้อมูลขึ้นในรูปแบบโปรแกรมประยุกต์ทางเว็บ (Web-based Application) เพื่อเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สำคัญในรวบรวมข้อมูลและการบริหารจัดการข้อมูลและแสดงผลในรูปแบบภูมิสารสนเทศ (Geographic Information Systems: GIS) ในการแสดงรายละเอียดข้อมูลยุทธโปกรณ์อาวุธในระดับประเทศเชื่อมโยงเข้ากับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ในรูปแบบภูมิสารสนเทศ

2. การวิเคราะห์และออกแบบระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

2.1 สถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture)

ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defense Technology Database: DTD) เป็นระบบฐานข้อมูลที่ทำหน้าที่เก็บรวบรวมข้อมูลของอาวุธทั้งหมดที่ใช้ในกองทัพไทย ทั้งในส่วนของอาวุธทางบก อาวุธทางน้ำ และอาวุธทางอากาศ โดยประกอบด้วยรายละเอียดอาวุธทั้งหมด 8 ประเภท ดังนี้

- 1) อาวุธทหารราบ (Infantry Weapons) ซึ่งรวบรวมตามหนังสือฐานข้อมูลอาวุธทหารราบ [6] ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานอย่างสังเขปด้านประวัติความเป็นมา คุณลักษณะ และประโยชน์ใช้สอยตามภารกิจของทหารราบ

2) ยานรบภาคพื้นดิน (Land Fighting Platforms) ได้ถูกรวบรวมรายละเอียดแบบต่าง ๆ จากข้อมูลยานรบภาคพื้นดิน [7] ที่มีประโยชน์และองค์ความรู้ในเนื้อหาที่ครอบคลุมและทันสมัยของยานรบภาคพื้นดินต่าง ๆ

3) ยานรบทางทะเล (Maritime Fighting Platform) ประกอบด้วยข้อมูล ประเภทการใช้งาน และภารกิจหน้าที่ของยานรบ [8] เนื่องจากเรือรบแบบต่าง ๆ ในกองทัพเรือนานาประเทศมีการแบ่งประเภทคล้ายคลึงกันและเป็นสากล โดยมีความแตกต่างกันในแง่ของระดับเทคโนโลยีในเรือ และระบบย่อยต่าง ๆ ภายในประเภทของเรือ นั้น ๆ

4) จรวดและอาวุธนำวิถี (Rockets and Missiles) ได้ทำการกำหนดและรวบรวมรายละเอียดจรวดและอาวุธนำวิถีตามภารกิจหรือคุณลักษณะเฉพาะของจรวดนั้น ๆ [9] คือ จรวดขีปนาวุธข้ามทวีป จรวดต่อต้านเรือผิวน้ำ จรวดต่อสู้อากาศยาน จรวดนำวิถีอากาศสู่อากาศ จรวดพื้นสู่อากาศ และจรวดหลายลำกล้อง

5) ยานรบของกองทัพไทย (Royal Thai Armed Forces Platform) เก็บรวบรวมข้อมูลความรู้สำคัญในการปฏิบัติการทางทหาร รวมถึงการปฏิบัติการอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ทหาร เช่น การช่วยเหลือผู้ประสบภัย เป็นต้น บทความนี้ ได้รวบรวมคุณลักษณะทั่วไปที่กองทัพ [10] ได้เผยแพร่แก่สาธารณะซึ่งเกี่ยวข้องกับการค้นหาและใช้งาน

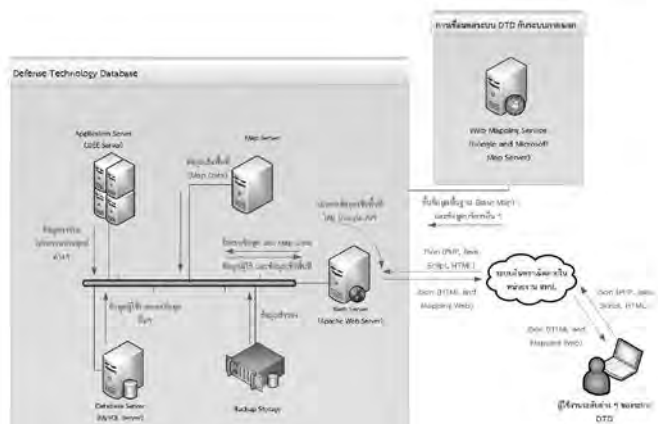
6) อาวุธนำวิถีและจรวด (Missiles and Rockets) เป็นข้อมูลยุทธโศภนที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการปฏิบัติ

การรบของกำลังรบทั้งกองทัพบก กองทัพเรือ และกองทัพอากาศ [11] เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการติดตามเทคโนโลยีของยุทธโศภนประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

7) ยุทธโศภนของกองทัพในภูมิภาคอาเซียน (ASEAN Armed Forces Inventory) รวบรวมข้อมูลจาก [12] เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงและแหล่งความรู้ยุทธโศภนที่ชาติสมาชิกอาเซียนมีใช้ในราชการในปัจจุบัน

8) อากาศยานทางทหาร (Military Aircrafts) ประกอบด้วยข้อมูล เครื่องบินทิ้งระเบิด ความสามารถในการปล่อยอาวุธ สมรรถนะ และคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องบิน [13] ซึ่งเครื่องบินทิ้งระเบิดเป็นยุทธโศภนขนาดใหญ่ที่มีคุณค่าทางยุทธศาสตร์และยุทธการสูง หากประเทศหนึ่งใดในอาเซียนมีในครอบครองประเทศเพื่อนบ้านต้องเตรียมการศึกษาดุลด้านขีดความสามารถกำลังรบครั้งใหม่ในทันที

ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศสามารถแสดงแนวคิดและกรอบงานของตัวระบบได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างการทำงานของระบบ DTD

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศหรือระบบ Defense Technology Database (DTD) ในรูปแบบระบบภูมิสารสนเทศแบบศูนย์กลาง (Central Geographic Information System) ซึ่งพัฒนาตามรูปแบบโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ (Web-based Application) พัฒนาขึ้นภายใต้กรอบงานของราลาเวล (Laravel Framework) เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและความปลอดภัยอย่างสูงสุดรวมถึงการพัฒนาเว็บแสดงผลจะอยู่ในรูปของเพจเดียว (One Page) เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงข้อมูลต่อผู้ใช้งาน และระบบนำเสนอข้อมูลในรูปแบบของการออกแบบเว็บไซต์ที่สามารถรองรับการทำงานบนหน้าจออุปกรณ์เครือข่ายได้ (Responsive Web Design) [15] เพื่อรองรับการแสดงผลในอุปกรณ์เคลื่อนที่ทั้งแท็บเล็ต และสมาร์ตโฟนต่าง ๆ

เมื่อผู้ใช้งานต้องการใช้งานระบบ DTD เพื่อเรียกดูข้อมูลต่าง ๆ กระบวนการจะเริ่มจากผู้ใช้งานเรียกใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser) โดยข้อมูลจากหน้าเว็บจะถูกส่งไปยังเครื่องเว็บเซิร์ฟเวอร์ (Web Server) ในรูปแบบของ JSON ที่เป็นรูปแบบมาตรฐานในการรับส่งข้อมูลของจาวาสคริปต์ ส่งผลให้เวลาในการร้องขอข้อมูลระหว่างผู้ใช้กับเครื่องแม่ข่ายเว็บลดลงไปกว่าระบบโดยทั่วไปประมาณ 3 - 5 เท่า โดยข้อมูลจะถูกร้องขอไปยังเครื่องเว็บเซิร์ฟเวอร์ จากนั้นเครื่องเว็บเซิร์ฟเวอร์จะทำการตีความการร้องขอนั้น ถ้าการร้องขอเป็นการร้องขอข้อมูลทั่วไป ข้อมูลจะถูกดึงจากเครื่องแม่ข่ายฐานข้อมูล (Database Server) แล้วส่งข้อมูลที่ต้องการกลับไปยังผู้ใช้งานในรูปแบบ JSON เช่นเดียวกัน ถ้าในส่วนของข้อมูลที่ร้องขอเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ ข้อมูลร้องขอนั้นจะถูกส่งไปยังเครื่องแม่ข่ายแผนที่ (Map Server) [15] ซึ่งเครื่อง

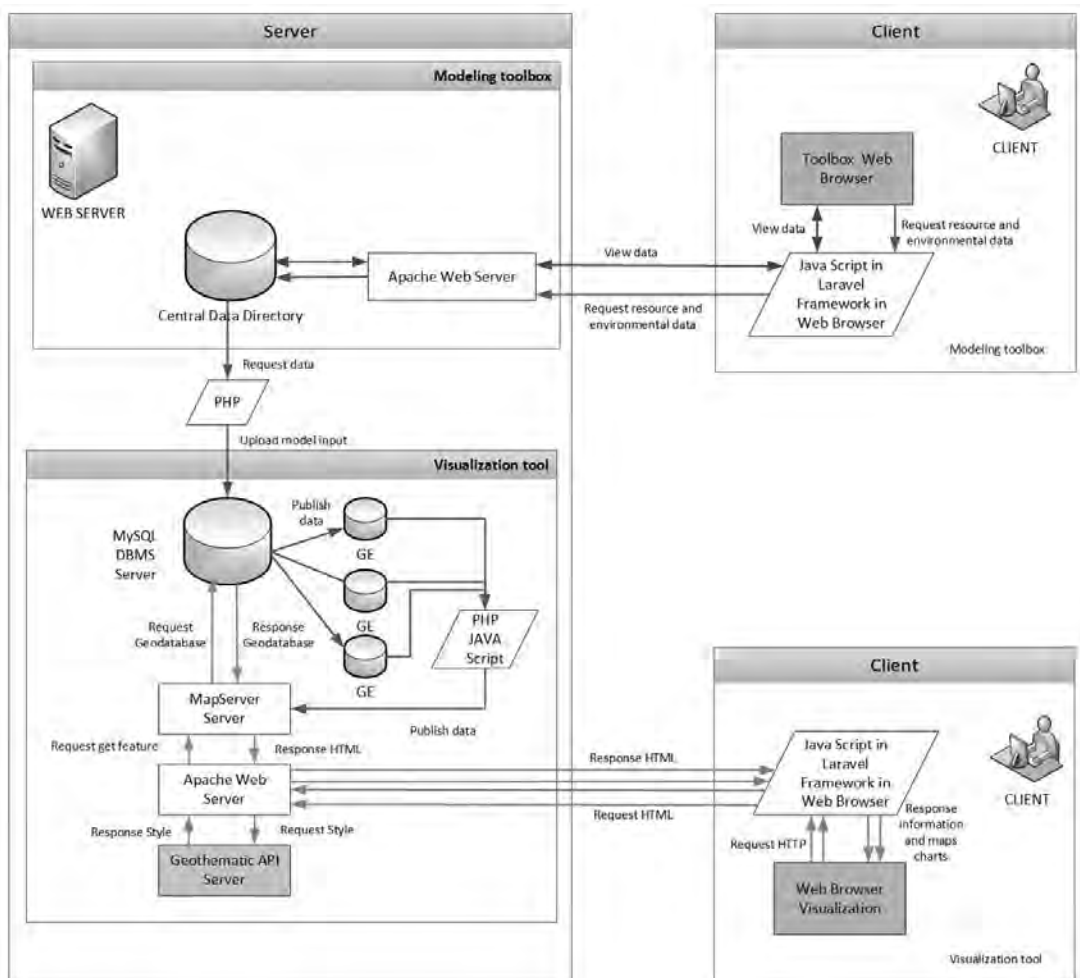
แม่ข่ายแผนที่จะทำการประมวลผลข้อมูลร้องขอแล้วทำการโหลดไฟล์แผนที่ (Map File) ที่ใช้ในการกำหนดคุณลักษณะเชิงพื้นที่ที่ต้องการแสดงขึ้นมาพร้อมทั้งโหลดข้อมูลเชิงพื้นที่จากเครื่องแม่ข่ายฐานข้อมูล จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังเครื่องเว็บเซิร์ฟเวอร์ โดยอาศัยแอปพลิเคชัน Google Map API ทำการแปลความหมายเพื่อแสดงเป็นข้อมูลแผนที่ รวมถึงการดึงข้อมูลการประมวลผลเว็บเซอร์วิสต่าง ๆ ลงบนแผนที่ของ Google Map หรือ Microsoft ในเว็บอีกครั้ง แล้วส่งไปยังผู้ใช้เพื่อแสดงข้อมูลเชิงพื้นที่เหล่านั้น การทำงานในลักษณะนี้จะส่งผลให้การประมวลผลข้อมูลเชิงพื้นที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น 2 - 3 เท่าจากระบบโดยทั่วไป โดยในส่วนของเครื่องแม่ข่ายโปรแกรมประยุกต์จะทำการรันโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูลด้านต่าง ๆ เชิงพื้นที่ในลักษณะอื่น ๆ ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ

รูปที่ 2 แสดงผังงานโปรแกรมและความเชื่อมโยงของระบบฐานข้อมูลส่วนกลางและการเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยผู้ใช้งานในส่วนต่าง ๆ ทำการเลือกข้อมูลที่ต้องการของแถบเครื่องของโปรแกรมของระบบ DTD โดยใช้กลไกของจาวาสคริปต์ ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ จากนั้นเว็บเบราว์เซอร์จะทำการร้องขอข้อมูลที่ต้องการผ่านระบบอินเทอร์เน็ตหรือเครือข่ายภายใน ในกรณีที่ผู้ใช้งานอยู่ภายในหน่วยงาน ข้อมูลที่ร้องขอจะถูกส่งมายังระบบ DTD ที่ตั้งอยู่ที่ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศในรูปแบบของ JSON โดยข้อมูลร้องขอจะถูกส่งมาที่เครื่องเว็บเซิร์ฟเวอร์ของตัวระบบ ซึ่งเครื่องเซิร์ฟเวอร์นี้จะตีความถึงข้อมูลที่ผู้ร้องขอต้องการ จากนั้นจะส่งข้อมูลที่ร้องขอไปยังหน่วยควบคุมข้อมูลหลัก (Central Data Directory) เพื่อร้องขอข้อมูลที่ต้องการ

ไปยังฐานข้อมูลหลักของระบบผ่านภาษาพีเอชพี เมื่อระบบฐานข้อมูลหลักได้รับข้อมูลที่ร้องขอจะทำงานดังนี้ คือ

- 1) ติดต่อกับเครื่องแม่ข่ายแผนที่ในการประมวลข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่ต้องการแสดง
- 2) ติดต่อกับฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ (General Elements: GE) เพื่อจะนำข้อมูลเหล่านั้นมาแสดงตรงตามข้อมูลทางภูมิศาสตร์ของฐานข้อมูลแผนที่

จากนั้นข้อมูลจากฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ จะถูกนำมาประมวลผลให้สัมพันธ์กันกับข้อมูลทางด้านภูมิศาสตร์ทางฐานข้อมูลแผนที่ พร้อมทั้งแสดงข้อมูลเหล่านี้ไปยังเครื่องเว็บเซิร์ฟเวอร์ เพื่อแสดงข้อมูลที่ต้องการให้กับผู้ใช้งาน โดยที่รูปแบบของการแสดงผลทางภูมิศาสตร์จะมีการเชื่อมโยงข้อมูลไปยังฐานข้อมูลทางภูมิศาสตร์อื่น ๆ เช่น Google Map หรือ Microsoft Bing เพื่อแสดงผลให้มีความชัดเจนและเสมือนจริง และตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน



รูปที่ 2 แผนผังการทำงานของระบบ DTD

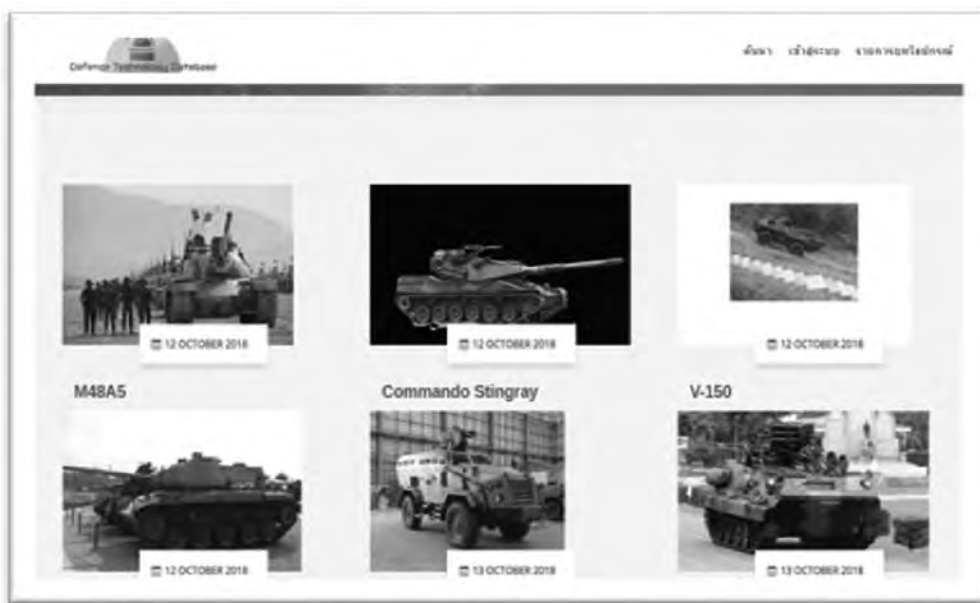
ตารางที่ 1 โครงสร้างข้อมูลอาวุธทางอากาศทั้งหมดของเครื่องบิน

Table: airborns						
Table Comments	เก็บข้อมูลอาวุธทางอากาศทั้งหมดของเครื่องบิน (รวมทั้งข้อมูลรูปภาพด้วย)					
Columns						
Name	Data Type	Nullable	PK	FK	Default	Comment
id	INT(10)	Yes	Yes	No		
name	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
company	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
country	INT(11)	No	No	No	NULL	
countryUse1	INT(11)	No	No	No	NULL	
long	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
weight	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
diameter	TEXT	No	No	No	NULL	
system	TEXT	No	No	No	NULL	
hight	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
maxAbove	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
engine	TEXT	No	No	No	NULL	
images	TEXT	No	No	No	NULL	
equipment	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
maxFar	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
maxNear	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
maxSpeed	VARCHAR(255)	No	No	No	NULL	
createdAt	TIMESTAMP	No	No	No	NULL	
updatedAt	TIMESTAMP	No	No	No	NULL	
countryUse2	INT(11)	No	No	No	NULL	
countryUse3	INT(11)	No	No	No	NULL	

3. การพัฒนาระบบฐานข้อมูล

ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ จะถูกพัฒนาขึ้นภายใต้รูปแบบโปรแกรมประยุกต์ทางเว็บ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงหน้าแรกของระบบให้เห็นถึงรายละเอียดของยุทธโศปกรณ์แต่ละประเภทที่มีอยู่ในระบบ และรูปที่ 5 แสดงตัวอย่างรายละเอียดรถถังรุ่น M48A5 ของบริษัท Chrysler

ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศยังสามารถแสดงสถานที่และจำนวนของยุทธโศปกรณ์อาวุธในที่ต่าง ๆ ของประเทศในรูปแบบของสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 รวมถึงการค้นหาตำแหน่งที่ตั้งของยุทธโศปกรณ์อาวุธนั้น ๆ ได้



รูปที่ 4 หน้าแสดงยุทธโศปกรณ์ของระบบ



รูปที่ 5 หน้าแสดงรายละเอียดถถังรุ่น M48A5



รูปที่ 6 หน้าเว็บเพจแสดงรายละเอียดที่ตั้งและจำนวนของ ยุทโธปกรณ์แต่ละประเภท

4. ข้อเสนอแนะ

การนำรายละเอียดข้อมูลยุทธโศภณ์มาจัดทำเป็นฐานข้อมูลในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความง่ายในการวิเคราะห์ข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศโดยอาศัยหลักการออกแบบระบบฐานข้อมูลที่ทำให้ง่ายต่อการเข้าถึงและการสืบค้นข้อมูล อีกทั้งการเก็บรวบรวมข้อมูลยุทธโศภณ์อาวุธให้สามารถเข้าถึงและเปรียบเทียบกันได้ทั้งกำลังทางบก ทางเรือ และทางอากาศ ของประเทศและต่างประเทศ เมื่อพัฒนาร่วมกับระบบฐานข้อมูลขึ้นในรูปแบบโปรแกรมประยุกต์ทางเว็บจะเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สำคัญในรวบรวมข้อมูลและการบริหารจัดการข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในระบบจำลองยุทธ์ ซึ่งในปัจจุบันกองทัพไทยยังไม่มีระบบจำลองยุทธ์นี้ ดังนั้น บทความวิชาการฉบับนี้สามารถนำไปขยายผลเพื่อใช้ในระบบการจำลองยุทธ์ การจำลองการปฏิบัติทางทหาร ระบบจำลองการบริหารทรัพยากรทางทหาร อีกทั้งเมื่อแสดงผลในรูปแบบภูมิสารสนเทศในการแสดงรายละเอียดข้อมูลยุทธโศภณ์อาวุธในระดับประเทศเชื่อมโยงกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ในรูปแบบภูมิสารสนเทศจะสามารถต่อยอดไปเป็นฐานข้อมูลเพื่อการพัฒนาการซ้อมรบ (War game) สำหรับการฝึกในกรมฝ่ายอำนวยการ โรงเรียนเสนาธิการเหล่าทัพ วิทยาการทัพ รวมไปถึงการวางแผนและกำหนดยุทธศาสตร์การป้องกันประเทศในระดับวิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร

5. บทสรุป

การนำเอาเทคโนโลยีสารสนเทศมาประยุกต์ใช้ในด้านความมั่นคงของประเทศนับได้ว่าเป็นประเด็นที่สำคัญต่อการพัฒนาความมั่นคง บทความวิชาการนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบระบบฐานข้อมูล

เทคโนโลยีป้องกันประเทศ เพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลยุทธโศภณ์อาวุธ รวมถึงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลขึ้นในรูปแบบโปรแกรมประยุกต์บนเว็บเพื่อเป็นกลไกตัวหนึ่งที่สำคัญต่อการบริหารจัดการข้อมูลยุทธโศภณ์อาวุธของประเทศ รวมถึงเสนอแนะการพัฒนาเพื่อต่อยอดการจัดทำข้อมูลพื้นฐานในระบบการจำลองยุทธ์ซึ่งยังไม่สามารถพัฒนาขึ้นใช้ในห้องทัพไทยได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการฝึกในกรมฝ่ายอำนวยการ โรงเรียนเสนาธิการเหล่าทัพ วิทยาการทัพ รวมไปถึงการวางแผนและกำหนดยุทธศาสตร์การป้องกันประเทศในระดับวิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบรรณาธิการและทีมงานในการเพิ่มเติมข้อมูลและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ก่อให้เกิดความสมบูรณ์และยกระดับการนำไปประยุกต์ใช้ของแนวคิดการจัดทำระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ อีกทั้งต้องขอขอบคุณนักวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศในการเข้าถึงข้อมูล DTI'S Weapon Systems Handbook Series ของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ซึ่งเป็นข้อมูลอันเป็นประโยชน์และนำไปสู่แนวคิดตามบทความวิชาการฉบับนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. P. Durišić, Z. Tafa, G. Dimić and V. Milutinović, "A survey of military applications of wireless sensor networks," 2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Bar, 2012, pp. 196-199.
- [2] R. Mahajan and D. Padha, "Detection Of Concealed Weapons Using Image Processing Techniques: A Review," 2018 First International Conference on Secure Cyber

Computing and Communication (ICSCCC), Jalandhar, India, 2018, pp. 375-378, doi: 10.1109/ICSCCC.2018.8703346.

[3] L. Dali, A. Bentajer, E. Abdelmajid, K. Abouelmehdi, H. Elsayed, E. Fatiha and B. Abder, "A survey of intrusion detection system," 2015 2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN), Sousse, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/WSWAN.2015.7210351.

[4] C. Lee, Y. Su, Y. Lin and S. Lee, "Machine learning based network intrusion detection," 2017 2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA), Beijing, 2017, pp. 79-83, doi: 10.1109/CIAPP.2017.8167184.

[5] R. K. Sharma, B. Issac and H. K. Kalita, "Intrusion Detection and Response System Inspired by the Defense Mechanism of Plants," in IEEE Access, vol. 7, pp. 52427-52439, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912114.

[6] ราชกิจจานุเบกษา (2562) พระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ.2562. เล่ม 136 ตอนที่ 56 ก. หน้า 17 – 38.

[7] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). 2557. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: Infantry Weapons. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 132 หน้า.

[8] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). 2557. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: Land Fighting Platforms. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 132 หน้า.

[9] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). 2558. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: Maritime Fighting Platforms. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 132 หน้า.

[10] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การ

มหาชน). 2559. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: Rockets and Missiles. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 132 หน้า.

[11] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). 2555. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: Royal Thai Armed Forces Platform. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 132 หน้า.

[12] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). 2555. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: Missiles and Rockets. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 132 หน้า.

[13] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). 2556. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: ASEAN Armed Forces Inventory. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 129 หน้า.

[14] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). 2560. DTI'S Weapon Systems Handbook Series: Military aircrafts. บริษัท ฐานการพิมพ์ จำกัด. จำนวน 132 หน้า.

[15] N. Li and B. Zhang, "The Design and Implementation of Responsive Web Page Based on HTML5 and CSS3," 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI), Taiyuan, China, 2019, pp. 373-376, doi: 10.1109/MLBDBI.48998.2019.00084.

[16] H. Lee and L. Hyunah, "Design and implementation of integrated MapServer in Web mapping environments," Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05., Seoul, 2005, pp. 4 pp.-, doi: 10.1109/IGARSS.2005.1525263.

บทเรียนเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงินต่อการพัฒนา เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกในประเทศไทย

ลัญญณ์ฐ ภาตะนันท์^{1*}

วันที่รับ 18 มิถุนายน 2563 วันที่แก้ไข 27 กรกฎาคม 2563 วันที่ตอบรับ 29 กรกฎาคม 2563

บทคัดย่อ

เขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงินในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ได้เริ่มจัดตั้งในปี 2522 ซึ่งในปัจจุบันเมืองเส้นเงินได้ชื่อว่าเป็น “Silicon Valley of Asia” และเป็นต้นแบบในการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษสำหรับประเทศอื่น ๆ ด้วย บทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลทฤษฎีภูมิและประมวลผลจากงานเอกสารวิชาการ รายงานการวิจัย เพื่อศึกษาการบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงิน ประเด็นศึกษาประกอบด้วย 3 ประเด็น ได้แก่ 1. การบริหารจัดการ 2. นโยบายของรัฐบาลในการสนับสนุนการลงทุนจากนักลงทุนต่างชาติ 3. รูปแบบการลงทุน และปัจจัยความสำเร็จ นำมาเปรียบเทียบกับการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ในประเทศไทย และนำมาเป็นบทเรียนในการพัฒนาเศรษฐกิจภาคตะวันออกของไทยให้มีขีดความสามารถแข่งขันเดียวกับเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงิน และจากการศึกษาพบว่าปัจจัยสำคัญของการพัฒนาเขตเศรษฐกิจภาคตะวันออกของไทยให้ประสบความสำเร็จ คือ การบริหารจัดการที่ต้องมีส่วนร่วมของภาคท้องถิ่น ภาคประชาสังคม และภาคเอกชนเข้ามามีส่วนร่วมด้วย เพื่อให้การดำเนินการต่าง ๆ เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ : เขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงิน, เมืองเส้นเงิน, เขตเศรษฐกิจภาคตะวันออก

¹ ฝ่ายบริการวิชาการและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

นักศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต คณะรัฐประศาสนศาสตร์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

* ผู้แต่ง, อีเมลล์: lanyanat.p@dti.or.th

Lesson of the Shenzhen Special Economic Zone on the development of the Eastern Special Economic Zone in Thailand

Lanyanat Patanan ^{1*}

Received 18 June 2020, Revised 27 July 2020, Accepted 29 July 2020

Abstract

Special Economic Zones or SEZ's in the People's Republic of China were established in 1979 and known as the "Silicon Valley of Asia" which's a prototype for developing special economic zones in other countries as well. This article explores a secondary data analysis and evaluates of academic papers and research reports for studying the Administration of the Shenzhen Special Economic Zone. Study issues consist of 3 topics which're as follows: 1. Management 2. Government policies to support an investment from foreign investors 3. Investment and the success factors. Moreover, comparing it with the establishment of the Eastern Economic Corridor (EEC) in Thailand, and bring it as a lesson to develop the Eastern Economic Corridor of Thailand to have the same potentialities as the Shenzhen Special Economic Zone. In addition, the study found that the management of a local sector, civil society and private sector played major roles in accomplishment for the Eastern Economic Corridor of Thailand development to achieve the most efficient.

Keywords : Special Economic Zones (SEZs), Shenzhen, Eastern Economic Corridor (EEC)

¹ Defence Technology Service Center (TSC) Defence Technology Institute.

PhD Students Graduate School of Public Administration National Institute of Development Administration

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

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในยุคดิจิทัล ทำให้ทุกประเทศปรับตัวให้มีความพร้อมทั้งด้านเศรษฐกิจ โครงสร้างพื้นฐาน และอุตสาหกรรมที่จะส่งเสริมต่อการพัฒนาประเทศ เพื่อแก้ปัญหาความเหลื่อมล้ำ อีกทั้งเพื่อให้สามารถแข่งขันในระดับภูมิภาคอาเซียนและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางการค้ากับต่างประเทศ ยกกระดับเศรษฐกิจให้สามารถขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม ดังนั้นรัฐบาลจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญดังกล่าว ได้จัดตั้งโครงการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกในประเทศไทย (EEC) ขึ้น

อย่างไรก็ตาม การที่ประเทศไทยจะสามารถจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษให้ประสบความสำเร็จได้นั้นต้องประกอบด้วยปัจจัยหลายด้าน บทความนี้จึงได้ศึกษารูปแบบและแนวทางของประเทศจีนในการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษเสิ่นเจิ้นที่ปัจจุบันประสบความสำเร็จอย่างมากจนเป็นที่รู้จักในนาม “Silicon Valley of Asia” เพื่อศึกษาปัจจัยความสำเร็จและนำมาเป็นแนวทางในการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกในบริบทที่เหมาะสมกับประเทศไทย เพื่อนำไปสู่การขับเคลื่อนวิสัยทัศน์ “ประเทศไทย 4.0”

1.2 แนวคิดเกี่ยวกับเขตเศรษฐกิจพิเศษ

เขตเศรษฐกิจพิเศษ หมายถึง เขตพื้นที่ที่รัฐบาลได้จัดตั้งขึ้นเพื่อมอบสิทธิประโยชน์บางประการ เช่น มาตรการทางภาษีสำหรับการลงทุนในเขตเศรษฐกิจโดยเอื้อประโยชน์ต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการลงทุนจากต่างชาติ อีกทั้งมีการกำหนดนโยบาย

และมาตรการทางกฎหมายเฉพาะเขตเศรษฐกิจเพื่อให้มีความคล่องตัวมีประสิทธิภาพ ส่งเสริมการแข่งขันทั้งภายในและภายนอกประเทศได้ [1]

วัตถุประสงค์ของการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษเพื่อเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในระเทศให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้ อีกทั้งเพื่อเป็นการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศให้มีความยั่งยืน พัฒนาประเทศให้เป็นฐานการผลิตทั้งในและต่างประเทศ รวมถึงการสร้างงานสร้างรายได้ให้เกิดขึ้นกับประเทศ ส่งผลให้ GDP ของประเทศมากขึ้น และประชาชนมีคุณภาพชีวิตและสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น [2]

1.3 ความเป็นมาของเสิ่นเจิ้น

เมืองเสิ่นเจิ้นเป็นหมู่บ้านชาวประมงที่ตั้งอยู่ในมณฑลกลว่งต้ง เป็นเมืองที่มีฝั่งตรงข้ามติดกับเกาะฮ่องกง อีกด้านหนึ่งติดกับทะเลจีนใต้ มีพื้นที่ 2,020 ตร.กม. มีประชากรประมาณ 30,000 คน จากที่ตั้งของเสิ่นเจิ้นเป็นจุดยุทธศาสตร์ที่สำคัญในด้านการขนส่ง เนื่องจากมีพื้นที่ติดทะเล สามารถที่จะพัฒนาให้เป็นเขตเศรษฐกิจที่นำร่องของประเทศจีนได้ [4]

1.4 เขตเศรษฐกิจพิเศษในเสิ่นเจิ้น

ในปี 2521 Deng Xiaoping ได้ประกาศใช้ “นโยบายสี่ทันสมัย” (Four Modernization) โดยมุ่งพัฒนา 4 ด้าน คือ การเกษตร อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และการทหาร เพื่อพัฒนาจีนให้ทัดเทียมกับประเทศตะวันตกภายในปี 2542 โดยมีเป้าหมายเพื่อแก้ไขปัญหาทางเศรษฐกิจของประเทศ นอกจากนี้ รัฐบาลจีนยังตระหนักถึงความสำคัญของการลงทุนและการถ่ายทอดเทคโนโลยีจาก



รูปที่ 1 แผนที่เขตเศรษฐกิจเส้นเงิน ที่มา : [5]

นักลงทุนต่างชาติ รัฐบาลจีนได้จัดทำแผนปฏิรูปเศรษฐกิจ (Readjustment Economy) ขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการผลักดันให้นโยบายที่ทันสมัยประสบความสำเร็จ สำคัญประการหนึ่งของแผนดังกล่าว คือ การถ่ายโอนอำนาจด้านเศรษฐกิจของรัฐบาลกลางให้แก่รัฐบาลท้องถิ่น [4]

ดังนั้นเพื่อให้การถ่ายโอนอำนาจด้านเศรษฐกิจของรัฐบาลกลางให้แก่รัฐบาลท้องถิ่นเป็นรูปธรรม เติ่งเสี่ยวผิงเสนอให้จัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงิน (Special Economic Zone: SEZ) เพื่อเป็นต้นแบบในการดำเนินการ และให้รัฐบาลกลางมอบอำนาจในการจัดตั้งและกำกับดูแลเขตเศรษฐกิจพิเศษแก่รัฐบาลท้องถิ่น ทั้งนี้คุณลักษณะในการเลือกเมืองเส้นเงินเป็นต้นแบบของเขตเศรษฐกิจพิเศษ [5] มีคุณลักษณะดังนี้ [4]

1. มีแนวโน้มของเศรษฐกิจในการพัฒนา ด้านวิทยาศาสตร์การตลาดและเทคโนโลยีการจัดการเปรียบเสมือน “หน้าต่าง” ในการเฝ้าสังเกตทั่วโลก

2. เป็นเมืองที่เป็นแหล่งรวมของบุคลากรที่มีความสามารถเปรียบเสมือน “เมืองทดลอง” (Training Ground) ของผู้ที่มีความสามารถในพื้นที่แผ่นดินใหญ่

3. เป็นเมืองที่มีการทดลองปฏิรูปด้านเศรษฐกิจ ระบบการบริการจัดการ มีมาตรการที่ยืดหยุ่น เพื่อส่งเสริมความร่วมมือของนักลงทุนต่างชาติและนักลงทุนชาวจีน เปรียบเสมือน “พื้นที่ทดลอง” ของจีน

จากคุณลักษณะดังกล่าวจึงทำให้เขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงินนับเป็นเขตเศรษฐกิจพิเศษแห่งแรกของจีนที่ตั้งขึ้นตามกฎหมายของมณฑลกว่างตง [4]

1.5 การพัฒนาเมืองเส้นเงินหลังการจัดตั้งเป็นเขตเศรษฐกิจพิเศษ

ปี 2523 – 2528 ขั้นตอนการสร้างเมืองเส้นเงิน มีนโยบายด้านภาษีที่พิเศษให้กับ SEZ ค่าแรงมีราคาถูกและที่ดินมีราคาที่ดินดุนกลทงทุนจากฮ่องกง นอกจากนี้ ยังมีการวางแผนเพื่อพัฒนาให้มีกลุ่มอุตสาหกรรมที่ทันสมัย เพื่อดึงดูดการลงทุนจากต่างประเทศและส่งเสริมการเชื่อมโยงเศรษฐกิจในประเทศ แต่โครงสร้างพื้นฐานและกฎหมายยังไม่รองรับการลงทุนจากต่างชาติมากนัก ดังนั้นในช่วงแรกของการพัฒนาจึงเป็นการลงทุนจากภายในประเทศมากกว่าการลงทุนจากต่างประเทศ [6]

ปี 2528 - 2535 คลัสเตอร์อุตสาหกรรมที่เน้นการส่งออก หลังจากปี 2529 รัฐบาลเทศบาลเส้นเงินมีการส่งเสริมการส่งออกเพื่อดึงดูดการลงทุนจากต่างประเทศ เพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของเส้นเงินมากขึ้น จึงได้ออกนโยบายการตลาดต่างประเทศ การเลือกผู้ประกอบการที่จะส่งออกอย่างน้อย 70% ของสินค้าที่จะส่งออก และกำหนดเป้าหมายการลงทุนโดยวิสาหกิจขนาดใหญ่ เทคโนโลยีขั้นสูง มีเงินลงทุนในประเทศประมาณ 10 พันล้านหยวน มีบริษัทมากกว่า 6,600 แห่ง มีความโดดเด่นทางด้านอุตสาหกรรมไฮเทคโนโลยีและเทคโนโลยีสมัยใหม่ ส่งผลให้ผลผลิตในผลิตภัณฑ์ใหม่และเทคโนโลยีขั้นสูงของเส้นเงิน เพิ่มขึ้นในปี 2534 ถึง 180 พันล้านหยวน [6]

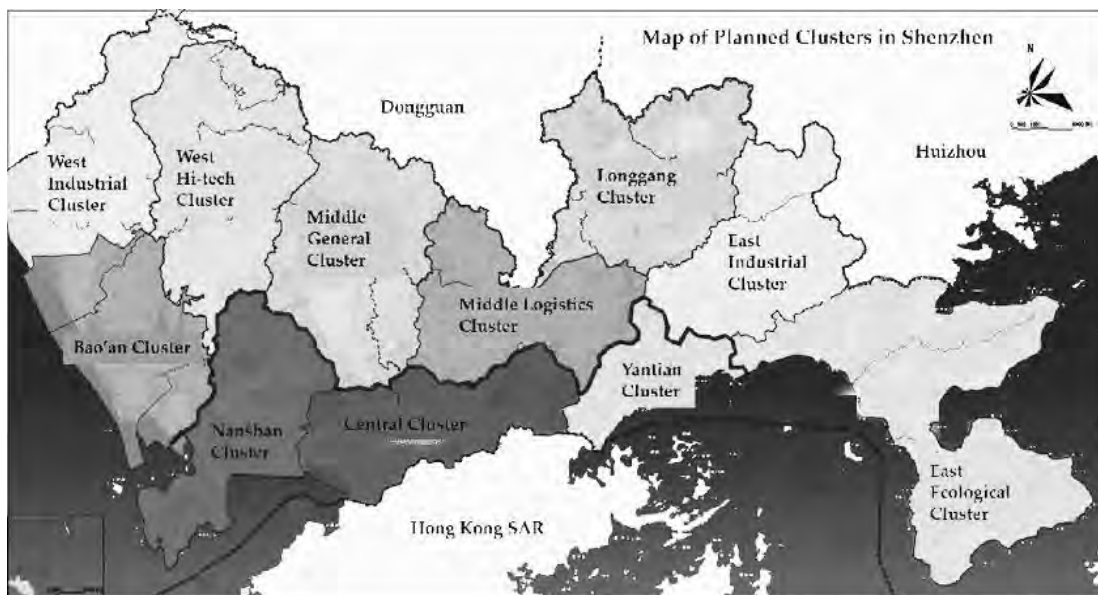
ปี 2535 - 2550 เส้นเงินมีการพัฒนาให้เป็นกลุ่มบริการที่ทันสมัยและกลุ่มเทคโนโลยีขั้นสูง เน้นการพัฒนาโครงสร้างอุตสาหกรรมโดยรัฐบาลเมืองเส้นเงินใช้ยุทธศาสตร์การพัฒนาสู่การเป็นระบบ

เศรษฐกิจจาก “Headquarter” ด้วยการเชิญชวนบริษัทข้ามชาติย้ายบริษัทแม่ให้มาอยู่ในเส้นเงิน โดยให้การจูงใจ ภาษี และวิธีการต่าง ๆ เช่น [7]

1. นโยบายสำหรับการดำเนินธุรกิจที่ให้ความมั่นใจแก่บริษัทจากต่างประเทศทั้งมาตรการที่สนับสนุนการดำเนินงานของบริษัทข้ามชาติและพัฒนาระบบการบริหารและบริการภาครัฐที่เป็นพิเศษสำหรับบริษัทที่เลือกจะตั้ง Headquarter ที่เมืองเส้นเงิน เป็นต้น

2. การรวมเขตอุตสาหกรรม (Industrial Parks) ต่าง ๆ กว่า 100 แห่ง ที่อยู่ในเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงิน (ซึ่งกว่าร้อยละ 90 อยู่นอกตัวเมืองเส้นเงิน) เข้าไว้ด้วยกัน เพื่อให้ง่ายต่อการระบบการขนส่งวัตถุดิบและส่งออก

3. การส่งเสริมการรวมกลุ่มคลัสเตอร์ของธุรกิจและการรวมกลุ่มของอุตสาหกรรมที่มีลักษณะเชื่อมโยงส่งเสริมกิจกรรมซึ่งกันและกัน มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารความรู้ตลอดจนทรัพยากรต่าง ๆ ระหว่างกันเพื่อร่วมสร้างนวัตกรรมและดำเนินงานให้บรรลุเป้าหมายอีกทั้งเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันด้วยพื้นที่และการรวมกลุ่มของอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดการพึ่งพาทรัพยากรร่วมกันเพื่อเชื่อมโยงกับผู้ผลิต ต้นน้ำ กลางน้ำ ปลายน้ำ อุตสาหกรรมสนับสนุน สถาบันการศึกษา สถาบันเฉพาะทางหน่วยงานรัฐ องค์กรเอกชน ตัวอย่างการรวมกลุ่มคลัสเตอร์ในเมืองเส้นเงิน เช่น อุตสาหกรรมไฮเทคโนโลยี เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (รูปที่2)



รูปที่ 2 แผนที่แสดงการรวมกลุ่มของอุตสาหกรรมในเมืองเซินเจิ้น ที่มา: [8]

ปี 2550 การส่งออกใหม่ของเซินเจิ้นเน้นผลิตภัณฑ์ไฮเทค คิดเป็นร้อยละ 23.2 ของยอดรวมของประเทศ (จีน) บริษัทต่างประเทศได้เข้ามาลงทุนจัดตั้งบริษัทในเซินเจิ้น เช่น Intel IBM Toshiba Sanyo Seagate ISTC Phillips Compaq Samsung Emerson Olympus Epson Alcatel-Lucent และ Thomson เป็นต้น อุตสาหกรรมโทรคมนาคมคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ คิดเป็นสัดส่วนทั้งหมดประมาณ 50% ของอุตสาหกรรมทั้งหมดในเมืองเซินเจิ้น [9]

ปี 2551 - 2558 เซินเจิ้นได้รับการพิจารณาให้เป็นเมืองนำร่องด้านนวัตกรรมแห่งชาติ (National Innovation City) โดยเน้นการพัฒนา 6 อุตสาหกรรมหลัก ได้แก่ ด้านอุตสาหกรรมชีวภาพ ด้านอินเทอร์เน็ต ด้านแหล่งพลังงานใหม่ ด้านวัสดุใหม่ ด้านนวัตกรรมเชิงวัฒนธรรม และด้านเทคโนโลยีข้อมูลข่าวสารยุคใหม่ ปัจจุบันเซินเจิ้น ของจีนจะมีบริษัท FinTech ยูนิคอร์น (กิจการที่มีมูลค่ามากกว่า 1 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ)

ถึง 8 แห่ง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสหรัฐอเมริกา ที่มียูนิคอร์น 12 แห่ง แต่มูลค่าบริษัท FinTech ยูนิคอร์นของจีนขณะนี้ได้เพิ่มขึ้นมากกว่า เก้าแสนหกหมื่นสี่พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ทำให้เวลานี้ บริษัท FinTech ยูนิคอร์น ของจีนมีมูลค่าสูงที่สุดในโลก [10]

ปี 2559 มีขนาดเศรษฐกิจเป็นอันดับที่ 4 ของจีน เป็นเมืองที่มีมูลค่าการส่งออกเป็นอันดับ 1 ของประเทศเป็นเวลากว่า 15 ปีติดต่อกันและเป็นฐานส่งออกที่ใหญ่ที่สุด โดยเซินเจิ้นเป็นผู้นำและผู้ผลิตที่สำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารที่สำคัญที่สุดของจีน เช่น [3]

- Huawei Technologies เป็นบริษัทผลิตและจัดหาอุปกรณ์ทางด้านเครือข่ายและโทรคมนาคมที่ใหญ่ที่สุดของจีน และให้บริการมากกว่า 100 ประเทศทั่วโลกโดยมีผลิตภัณฑ์และบริการที่หลากหลายครอบคลุมกลุ่มผลิตภัณฑ์ไร้สาย (Wireless Products) ผลิตภัณฑ์เครือข่าย (Network Products) รวมถึง

แอปพลิเคชัน และโปรแกรมซอฟต์แวร์ต่าง ๆ

- ZTE Corporation เป็นบริษัทผู้ให้บริการระดับโลกทางด้านอุปกรณ์การสื่อสารจำพวกผลิตภัณฑ์เครือข่าย (Products) และผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโทรศัพท์มือถือ ปัจจุบันให้บริการกว่า 140 ประเทศทั่วโลก

- Konka Group เป็นผู้ผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม โทรศัพท์ ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ และโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

- TCL เป็นผู้ผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์รายใหญ่ โดยมีความชำนาญด้านอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ประเภทโทรทัศน์ เครื่องปรับอากาศ โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงสื่ออิเล็กทรอนิกส์

1.6 ผลจากการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษเลิ่นเจิ้น [3]

1. ขยายผลและนำระบบเศรษฐกิจโดยใช้กลไกตลาดที่เรียกว่า “เศรษฐกิจกลไกตลาดแบบจีน” (Socialist Market Economy with Chinese Characteristic) ซึ่งประสบผลสำเร็จในเขตเศรษฐกิจพิเศษเลิ่นเจิ้นไปในภูมิภาคอื่นของประเทศ

2. จากสภาพทางภูมิศาสตร์และสถานที่ตั้งของเขตเศรษฐกิจพิเศษเลิ่นเจิ้นที่มีพื้นที่อยู่ใกล้กับฮ่องกงและมาเก๊า ส่งผลให้เป็นศูนย์กลางในการติดต่อกับนานาชาติเนื่องจากทั้งสองแห่งเป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจการเงินและเป็นที่ตั้งของตลาดหลักทรัพย์แห่งที่ 2 ของจีน มีระบบคมนาคมที่สำคัญของภูมิภาค และประเทศจีนมีท่าเรือที่มีปริมาณขนส่งสินค้ามาก

เป็นอันดับ 2 ของประเทศ และเป็นอันดับ 4 ของโลก ทำอากาศยานขนาดใหญ่ติดอันดับ 1 ใน 4 ของสนามบินใหญ่ของประเทศ ถือว่าเขตเศรษฐกิจพิเศษเลิ่นเจิ้นเป็นเมืองที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดในบรรดาเขตเศรษฐกิจพิเศษของจีน

3. จากผลการพัฒนาทั้งโครงสร้างพื้นฐาน กฎหมายต่าง ๆ ที่สนับสนุนการลงทุนของทั้งชาวจีนและชาวต่างชาติ ส่งผลให้ในปี 2557 มณฑลกว่างตุงมีอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจสูงถึงร้อยละ 9 ของมูลค่า GDP ทั้งหมดของจีนหรือคิดเป็นมูลค่าสูงถึง 6.78 ล้านล้านหยวน โดยมีอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจสูงกว่าร้อยละ 10 เป็นเวลานานติดต่อกันหลายปี

2. ประเด็นศึกษาเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเลิ่นเจิ้น

2.1 การบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเลิ่นเจิ้น [4]

การบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ดังนี้

ระยะแรก (พ.ศ. 2523-2534) เขตเศรษฐกิจพิเศษเลิ่นเจิ้นตั้งขึ้นตามกฎหมายของมณฑลกว่างตุง (Regulations on Special Economic Zones in Guangdong Province) ประสงค์ให้เขตเศรษฐกิจพิเศษเลิ่นเจิ้นเป็นแม่แบบในการเปิดประเทศเพื่อการพัฒนา เรียกว่า “The Testing Bed of Deng Xiaoping’s Reform and Opening Up” ซึ่งต่อมากฎหมายนี้ได้รับความเห็นชอบจากสภาประชาชนจีน ซึ่งมาจากการเลือกตั้งครั้งที่ 5 (The Fifth National People’s Congress) ในสมัยการประชุมครั้งที่ 15 เมื่อวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2523

เพื่อให้การจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษดำเนินไปอย่างเป็นระบบและเอื้อต่อการลงทุนของนักลงทุนรัฐบาลกลางถ่ายโอนอำนาจให้แก่รัฐบาลมณฑลกว่างตุงและได้จัดตั้งให้มืองค์รณเฉพาะขึ้น ได้แก่ “คณะกรรมการมณฑลกว่างตุงเพื่อการบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษ” (Guangdong Province Committee for Administering Special Economic Zones: GPC) เพื่อทำหน้าที่บริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษในนามรัฐบาลมณฑลกว่างตุง (มาตรา 3) มีฐานะเป็นหน่วยงานของรัฐ กฎหมายกำหนดให้คณะกรรมการบริหารมณฑลกว่างตุงเป็นผู้แต่งตั้ง GPC

GPC เป็นองค์กรที่มีอำนาจบริหารจัดการเบ็ดเสร็จเหนือพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษ โดยมาตรา 5 มาตรา 7 และมาตรา 23 ของกฎหมายจัดตั้ง SEZ กำหนดให้ GPC มีอำนาจหน้าที่ดังนี้

1. จัดทำและดำเนินการตามแผนพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษ
2. ตรวจสอบและอนุมัติโครงการของผู้ประกอบการในเขตเศรษฐกิจพิเศษ
3. ควบคุมการจดทะเบียนพาณิชย์ และอุตสาหกรรมในเขตเศรษฐกิจพิเศษ
4. ควบคุมการใช้ที่ดินในเขตเศรษฐกิจพิเศษ
5. ประสานความร่วมมือของผู้ประกอบการและหน่วยงานเกี่ยวกับการธนาคาร การประกันภัย การจัดเก็บภาษีอากร การศุลกากร การตรวจคนเข้าเมือง การไปรษณีย์และการสื่อสารและหน่วยงานอื่นที่ตั้งอยู่ในเขตเศรษฐกิจพิเศษ

6. จัดหาพนักงานและคนงานให้แก่ผู้ประกอบการภายในเขตเศรษฐกิจพิเศษและคุ้มครองสิทธิประโยชน์ของพนักงานและคนงาน

7. จัดหาและก่อสร้างบรรดาสาธารณูปโภคต่าง ๆ ในเขตเศรษฐกิจพิเศษ

8. อนุมัติจดทะเบียนและออกใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบการในเขตเศรษฐกิจพิเศษ

9. จัดตั้งสถาบันการศึกษาและวัฒนธรรม

10. จัดหา Health Facilities และบริการสาธารณะในเขตเศรษฐกิจพิเศษ

11. รักษาความสงบเรียบร้อยและศีลธรรมอันดีในเขตเศรษฐกิจพิเศษ

GPC เป็นองค์กรที่มีอำนาจบริหารจัดการเบ็ดเสร็จภายในเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงินปกครองพื้นที่ 4 อำเภอ ที่อยู่ในเขตเศรษฐกิจพิเศษเดิม จึงคงเหลือเพียงอำนาจในการบริหารจัดการ 2 อำเภอ ที่อยู่นอกเขตเศรษฐกิจพิเศษเท่านั้น นอกจากนี้ องค์กรปกครองท้องถิ่นระดับอำเภอ แขวง และหมู่บ้านภายในเขต 4 อำเภอ ที่เป็นเขตเศรษฐกิจพิเศษก็เปลี่ยนมาขึ้นตรงต่อ GPC

ระยะที่สอง (2535 - ปัจจุบัน) เนื่องจากการดำเนินงานของเขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงินเป็นระบบแล้วสามารถบริหารจัดการเองได้ ดังนั้นเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 มติคณะรัฐมนตรีจาก

สภาประชาชนซึ่งมาจากการเลือกตั้งครั้งที่ 7 (The Seventh National People's Congress) ให้เมืองเสิ่นเจิ้น มีอำนาจตรากฎหมายและระเบียบต่าง ๆ ภายในเขตเศรษฐกิจพิเศษเสิ่นเจิ้นแทน GPC จึงเป็นองค์กรบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษเสิ่นเจิ้นในปัจจุบัน และองค์กรปกครองท้องถิ่นระดับอำเภอ แขวง และหมู่บ้านภายในเขต 4 อำเภอที่เป็นเขตเศรษฐกิจพิเศษก็กลับมาขึ้นตรงต่อเมืองเสิ่นเจิ้นเช่นเดิม

2.2 นโยบายของรัฐบาลที่สนับสนุนการลงทุนจากนักลงทุนต่างชาติ [3]

1) การลดภาษีนิติบุคคลแก่บริษัทต่างชาติ กล่าวคือ บริษัทต่างประเทศจะเสียภาษีในอัตราร้อยละ 15 ในขณะที่ผู้ประกอบการจีนเสียภาษีถึงร้อยละ 33 ทั้งนี้ ตั้งแต่ปี 2551 ได้ปรับอัตราภาษีนิติบุคคลเป็นร้อยละ 25 เท่ากันทั้งสองประเภท ยกเว้นกิจการในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงและบริษัทขนาดเล็กในเมืองของบริษัทต่างชาติจะยังคงได้รับสิทธิพิเศษเช่นเดิม [7]

2) กิจการที่เริ่มดำเนินการก่อนปี 2528 หรือลงทุนตั้งแต่ 5 ล้านเหรียญสหรัฐขึ้นไป (ประมาณ 200 ล้านบาท) หรือผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีระดับสูงได้รับการยกเว้นภาษีอัตราภาษีเงินได้อยู่ที่ ร้อยละ 15 หากมีผลประกอบการดีจะได้รับการพิจารณาลดหย่อนภาษีเป็นกรณีพิเศษ (มาตรา 14)

3) ผู้ประกอบการมีอิสระที่จะประกอบกิจการภายในเขตเศรษฐกิจพิเศษและการจ้างชาวต่างประเทศเฉพาะงานด้านเทคนิคและบริหารจัดการ (มาตรา 10)

4) เครื่องจักร ชิ้นส่วน วัตถุดิบ และสิ่งอื่นที่นำเข้าจากต่างประเทศเพื่อใช้ในการประกอบการภายในเขตเศรษฐกิจพิเศษได้รับการยกเว้นอากรขาเข้า (มาตรา 13)

5) ค่าเช่าที่ดินในเขตเศรษฐกิจพิเศษต่ำมากเมื่อเทียบกับอัตราค่าเช่านอกเขตเศรษฐกิจพิเศษ นักลงทุนจะต้องส่งสินค้าที่ผลิตได้ออกขายนอกสาธารณรัฐประชาชนจีนทั้งหมดหากนักลงทุนประสงค์ที่จะขายสินค้าที่ผลิตได้ภายในสาธารณรัฐประชาชนจีนต้องได้รับอนุญาตจากเมืองเสิ่นเจิ้นก่อน

6) สามารถให้นักลงทุนเข้าถึงทุนทางที่ดินและโครงสร้างพื้นฐานได้ด้วยการให้เช่า 99 ปี

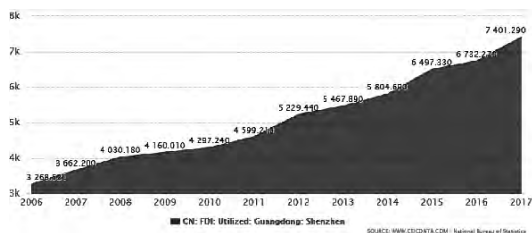
7) การอนุญาตให้บริษัทต่างชาติสามารถส่งกำไรกลับประเทศได้

8) มีการส่งเสริมนโยบายการนำเข้าและส่งออกสินค้าที่มุ่งใจการลงทุนของทั้งนักลงทุนชาวจีนและชาวต่างชาติ

2.3 รูปแบบการลงทุนในเขตเศรษฐกิจพิเศษเสิ่นเจิ้น

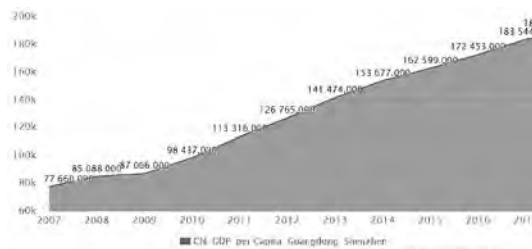
การลงทุนเริ่มแรกประกอบด้วย 3 แบบ คือ รูปแบบกิจการร่วมค้า (joint venture) กิจการร่วมค้าที่มีการลงทุนโดยต่างชาติและชาวจีนในรูปแบบทุน (Chinese-foreign equity joint ventures) และบริษัทต่างประเทศที่เป็นเจ้าของทั้งหมด (solely foreign-owned enterprises) [11] ในเดือนธันวาคม 2529 ได้อนุมัติโครงการลงทุนจำนวน 37 โครงการ ซึ่งเป็นการลงทุนจากต่างประเทศเพื่อสร้างกองทุนจากต่างประเทศ โดยในช่วงแรกการลงทุนจากต่างประเทศส่วนใหญ่ เป็นการส่งออกกิจการแปรรูปบริษัทจัดหาวัสดุ (รวมถึงชิ้นส่วนและส่วนประกอบ) และการออกแบบหรือประกอบงาน ทำให้เสิ่นเจิ้นมีการขยายตัวทางการค้า การผลิตและการแปรรูป การบริการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการลงทุนจากต่างประเทศ (Foreign Direct Investment : FDI) เข้ามาลงทุนในเสิ่นเจิ้น เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [4]

ต่อมาในปี 2530 เส้นเงิน ได้จัดตั้งสำนักงาน การลงทุนต่างประเทศ การส่งเสริมให้รับผิดชอบการ วางแผนการประสานงานการอนุมัติการจัดการและ การให้บริการสำหรับโครงการที่เกี่ยวข้องกับการ ลงทุนต่างประเทศ [12] การลงทุนสำหรับการค้า การลงทุนจากต่างประเทศ คืออนุญาตให้ลงทุนใน กิจการที่ถือหุ้นร้อยละ 100 ส่งผลให้มีเงินลงทุนจาก ต่างประเทศเพิ่มขึ้นทุกปี (รูปที่ 3) และในปี 2550 มีมูลค่าการส่งออก 168.49 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ และมูลค่าการนำเข้า 119.04 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ

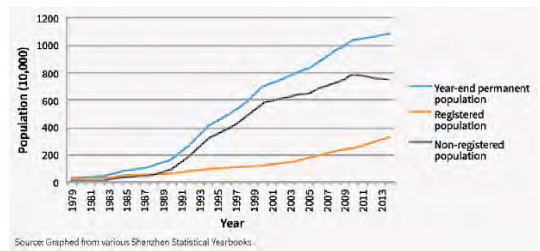


รูปที่ 3 การลงทุนจากต่างประเทศ ที่มา : [13]

จากการลงทุนของของชาวต่างชาติส่งผลให้ อัตราการเติบโตของ GDP ที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นเมืองอันดับ 4 ที่มี GDP สูงด้านการส่งออก GDP ของเส้นเงิน ปี 2018 อยู่ที่ 189,568 พันล้านหยวน (รูปที่ 4) อุตสาหกรรมที่สำคัญ ได้แก่ การสื่อสาร คอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ และด้านธุรกิจการเงิน [13] โดยมีมูลค่าเพิ่มด้านอุตสาหกรรมถึง 719,000 ล้านหยวน



รูปที่ 4 GDP เส้นเงิน ที่มา: [13]



รูปที่ 5 จำนวนประชากรในเมืองเส้นเงิน ที่มา: [15]

2.4 ปัจจัยความสำเร็จของการเป็นเขตเศรษฐกิจ พิเศษเส้นเงิน [14]

1. สภาพแวดล้อมทางการเงิน รัฐบาลจีน กลางได้สร้างที่ดึงดูดต่อการลงทุนของต่างชาติ จนทำให้ตั้งแต่เริ่มจัดตั้งเขตเศรษฐกิจขึ้นมีการ ลงทุนเพิ่มขึ้นจากต่างชาติ 10% ทุกปี ทำให้เส้นเงินมี ศักยภาพในการแข่งขันมากขึ้น รวมถึงการลด ความเสี่ยงในการประกอบธุรกิจของสถาบันการเงิน และเพิ่มศักยภาพทางการแข่งขันอีกด้วย

2. ระบบภาษี ปฏิรูปเพื่อดึงดูดให้ผู้ประกอบการ ต่างชาติสนใจลงทุน เช่น ผู้ประกอบการต่างชาติ ที่มาลงทุนในเขตเศรษฐกิจพิเศษจะเสียภาษีใน อัตราร้อยละ 15 ต่างจากผู้ประกอบการจีนที่ ต้องเสียภาษีอัตราร้อยละ 33

3. สนับสนุนให้มีสัญชาติจีน เส้นเงินได้เปิด โอกาสให้ชาวต่างชาติคนรุ่นใหม่ ที่มีความรู้ความ สามารถเข้ามาอาศัยโดยให้สัญชาติจีนแก่ชาวต่างชาติ ปัจจุบันเป็นการสร้างรากฐานองค์ความรู้ที่สำคัญให้ กับเส้นเงินอย่างมาก เนื่องจากบุคลากรเหล่านี้จะนำ ความรู้ ทักษะ และประสบการณ์มาพัฒนาเศรษฐกิจ เส้นเงินให้รุดหน้ามากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 5 จะเห็นว่า จำนวนประชากรที่ได้รับสัญชาติจีนได้เพิ่มขึ้นอย่าง ต่อเนื่องตั้งแต่ปี 2522 เป็นต้นมา

4. โครงสร้างพื้นฐาน ระบบสาธารณูปโภค

ระบบไฟฟ้า น้ำประปา โทรคมนาคม เส้นเงินมี
ความพร้อมที่จะรองรับการเติบโตทางเศรษฐกิจ
และการจัดตั้งเขตอุตสาหกรรม หรือธุรกิจต่าง ๆ

5. การบริหารจัดการ รัฐบาลของเส้นเงินเน้นการทำงานที่มีความคล่องตัว รวดเร็ว มีประสิทธิภาพ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีกระบวนการที่ได้รับอนุมัติ รวดเร็ว ซึ่งเป็นรูปแบบ “One-stop service” บริการแบบเบ็ดเสร็จจุดเดียว สามารถตรวจสอบให้เกิดความโปร่งใสและเพื่อให้เป็นมิตรต่อการดำเนินธุรกิจ

6. มีการส่งเสริมการรวมตัวของกลุ่มธุรกิจ
รัฐบาลส่งเสริมให้มีการรวมกลุ่มกันเป็นคลัสเตอร์
ของภาคธุรกิจเพื่อให้เกิดประหยัดต่อขนาดธุรกิจ

7. กฎหมายและมาตรการทางกฎหมาย เช่น กฎหมายแรงงานที่มีความยืดหยุ่นสูง และการอนุญาตให้นักลงทุนต่างชาติสามารถถือหุ้นในกิจการบางประเภทได้ 100%, อนุญาตให้มีการเช่าที่ดินและโครงสร้างพื้นฐานได้นานถึง 99 ปีที่เอื้อต่อการให้ผู้ประกอบการเข้ามาลงทุนในเส้นเงินอย่างมาก

8. การเชื่อมโยง รัฐบาลเชื่อมโยงเศรษฐกิจภาพรวมของจีนให้สอดคล้องและเป็นไปในทิศทางที่ส่งเสริมกับเศรษฐกิจภายในเส้นเงิน

9. นโยบายทางการคลัง มีนโยบายที่สามารถ
ตอบสนองต่อความต้องการของธุรกิจและ
อุตสาหกรรม

3. การพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกในประเทศไทย

3.1 การพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก [15]



รูปที่ 6 พื้นที่ของ EEC ที่มา : [16]

การจัดตั้งระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก เพื่อส่งเสริมการค้าและการลงทุน และการอำนวยความสะดวกในการประกอบกิจการอันเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ และเพื่อกระจายการพัฒนาไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ภาคตะวันออกของไทยยังมีความสำคัญในแง่ของการเป็น ‘จุดยุทธศาสตร์’ ทางเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ที่สามารถเชื่อมการค้าไปยังประเทศอื่น ๆ ในภูมิภาคทั้งจีน และอินเดีย ได้ระเบียงเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor (EEC) เป็นแผนยุทธศาสตร์ภายใต้ไทยแลนด์ 4.0

วิสัยทัศน์ เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก
เป็นต้นแบบพัฒนาเชิงพื้นที่ที่สมบูรณ์แบบช่วย
ผลักดันการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมภายใต้
นโยบายไทยแลนด์ 4.0 และให้ประเทศไทยก้าวขึ้น
สู่ระดับประเทศพัฒนาโดยเร็วที่สุด

วัตถุประสงค์ในการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจ
พิเศษภาคตะวันออก

(1) พัฒนากิจกรรมทางเศรษฐกิจที่ทันสมัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ

(2) จัดให้มีการให้บริการภาครัฐแบบเปิดเสรีจากรบวงจร เพื่อลดอุปสรรคและต้นทุนในการประกอบกิจการ

(3) จัดทำโครงสร้างพื้นฐานและระบบสาธารณูปโภคที่มีประสิทธิภาพ มีความต่อเนื่อง ประชาชนสามารถเข้าถึงได้โดยสะดวก และเชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบโดยสมบูรณ์

(4) กำหนดการใช้ประโยชน์ในที่ดินอย่างเหมาะสมกับสภาพและศักยภาพของพื้นที่โดยสอดคล้องกับหลักการพัฒนาอย่างยั่งยืน

(5) พัฒนาเมืองให้มีความทันสมัยระดับนานาชาติที่เหมาะสมต่อการอยู่อาศัยอย่างสะดวกปลอดภัย เข้าถึงได้โดยถ้วนหน้าและการประกอบกิจการอย่างมีคุณภาพ มีเป้าหมายหลักในการเติมเต็มภาพรวมในการส่งเสริมการลงทุน ซึ่งจะเป็นการยกระดับอุตสาหกรรมของประเทศเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน และทำให้เศรษฐกิจของไทยเติบโตได้ในระยะยาว

(6) การยกระดับพื้นที่ในเขต 3 จังหวัด คือ ชลบุรี ระยอง และฉะเชิงเทรา โดยมีการประกาศเขตส่งเสริมใน 5 พื้นที่ ประกอบด้วย [17]

1. เขตส่งเสริมระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก : เมืองการบินภาคตะวันออก (Special EEC Zone : Eastern Airport City) ตั้งอยู่บนพื้นที่ 6,500 ไร่ บริเวณสนามบินนานาชาติอู่ตะเภา เพื่อยกระดับสนามบินอู่ตะเภาให้เป็นศูนย์กลางการบิน

2. เขตส่งเสริมนวัตกรรมระเบียงเศรษฐกิจพิเศษ

ภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor of Innovation : EECi) ตั้งอยู่ในบริเวณวังจันทร์วัลเลย์ จ.ระยอง พื้นที่ 3,000 ไร่ และบริเวณอุทยานรังสรรค์นวัตกรรมอวกาศ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี พื้นที่ 120 ไร่ เพื่อยกระดับอุตสาหกรรม และชุมชนด้วยการพัฒนาวิจัยและนวัตกรรม

3. เขตส่งเสริมอุตสาหกรรมและนวัตกรรมดิจิทัล (Digital Park Thailand : EECd) ตั้งอยู่ที่ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี บนพื้นที่ 709 ไร่ เพื่อขยายและปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานด้านดิจิทัลรองรับการเป็นศูนย์กลางข้อมูล (Data Hub) ของอาเซียน

4. นิคมอุตสาหกรรม Smart Park อยู่ที่ จ.ระยอง ครอบคลุมพื้นที่ 1,466 ไร่

5. นิคมอุตสาหกรรมเหมราช อีสเทิร์นซีบอร์ด 4 อยู่ที่ จ.ระยอง ครอบคลุมพื้นที่ 1,900 ไร่

3.2 เป้าหมายของการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก [17]

โครงการ EEC มีเป้าหมายยกระดับพื้นที่เขตเศรษฐกิจภาคตะวันออกให้กลายเป็น “World-Class Economic Zone” เพื่อดึงดูดการลงทุนในอุตสาหกรรม Super Cluster และอุตสาหกรรมเป้าหมายของประเทศ เพื่อเป็นกลไกขับเคลื่อนเศรษฐกิจในอีก 20 ปีข้างหน้า แทนที่ Eastern Seaboard เดิม โดยคาดการณ์ว่าการลงทุนใน EEC จะกระตุ้นให้เศรษฐกิจขยายตัวเฉลี่ย 5% ต่อปี สร้างการจ้างงานในภาคอุตสาหกรรมและบริการ 100,000 อัตราต่อปี สร้างฐานภาษีใหม่ไม่ต่ำกว่า 1 แสนล้านบาทต่อปี รวมทั้งสามารถดึงดูดนักท่องเที่ยวกว่า 10 ล้านคนต่อปีและสร้างฐานรายได้เพิ่มไม่น้อยกว่า 4.5 แสนล้านบาทต่อปี

4. ประเด็นการศึกษาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

4.1 การบริหารจัดการระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก [18]

เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกมีการบริหารจัดการโดยให้มีคณะกรรมการนโยบายการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก ประกอบด้วยนายกรัฐมนตรีเป็นประธาน รองนายกรัฐมนตรีเป็นรองประธาน มีรัฐมนตรี ภาคราชการ เอกชน ผู้ทรงคุณวุฒิ เป็นกรรมการ รวมทั้งสิ้น 28 คน มีรัฐมนตรีว่าการ จำนวน 14 คน ได้แก่

1. ด้านความมั่นคง จำนวน 2 ท่าน ได้แก่ กระทรวงกลาโหม กระทรวงมหาดไทย

2. ด้านเศรษฐกิจ จำนวน 9 ท่าน ได้แก่ กระทรวงการคลัง กระทรวงพาณิชย์ กระทรวงคมนาคม กระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม กระทรวงพลังงาน กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

3. ด้านสังคมจำนวน 3 ท่าน ได้แก่ กระทรวงแรงงาน กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงสาธารณสุข

- ข้าราชการประจำ จำนวน 3 คน ได้แก่ เลขาธิการ ศสช. เลขาธิการ BOI และผู้อำนวยการสำนักงานงบประมาณ

- ภาคเอกชนจำนวน 3 คน ได้แก่ ประธานกรรมการสภาหอการค้าแห่งประเทศไทย ประธานสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยและประธานสมาคมธนาคารไทย

- ผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวนไม่เกิน 5 คน

คณะกรรมการนโยบายมีหน้าที่และอำนาจดังต่อไปนี้

1) กำหนดนโยบายและอนุมัติแผนการพัฒนาพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

2) อนุมัติแนวทาง หลักเกณฑ์ และวิธีการดำเนินการพัฒนาพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก รวมตลอดทั้งการดำเนินงานของหน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การพัฒนาพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกเป็นไปอย่างเหมาะสม และต่อเนื่องเชื่อมโยงกันอย่างสมบูรณ์

3) กำหนดภารกิจและหน่วยงานของรัฐที่มีหน้าที่ต้องดำเนินการเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกเป็นไปตามนโยบายและแผน ทั้งภายในและภายนอกกระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

4) กำหนดเขตส่งเสริมและสิทธิประโยชน์ที่ผู้ประกอบการ ผู้อยู่อาศัย หรือผู้พำนักในเขตส่งเสริมแต่ละแห่งจะได้รับตามความเหมาะสม รวมทั้งหลักเกณฑ์และเงื่อนไขในการได้รับสิทธิประโยชน์ดังกล่าว

5) อนุมัติหลักเกณฑ์และวิธีการดำเนินงานของ สกรศ. ตลอดจนกำหนดโครงสร้างการบริหารงาน และอัตราค่าตอบแทนของเลขาธิการและผู้ปฏิบัติงานใน สกรศ.

6) กำกับดูแลและติดตามการดำเนินการของ กรศ. และ สกรศ.

7) ดำเนินการอื่นใดตามที่กำหนดไว้ในคำสั่งนี้

8) ดำเนินการอื่นใดที่จำเป็นเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

4.2 กฎหมายเพื่อการจัดตั้งระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก [19]

สำนักงานคณะกรรมการนโยบาย EEC กำหนดให้มีกฎหมายแยกออกมาจากกฎหมายปกติเพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการดำเนินการต่าง ๆ ประกอบด้วย 8 ฉบับ ได้แก่ 1. กฎหมายว่าด้วยการขุดดินและถมดิน 2. กฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร 3. กฎหมายว่าด้วยการจดทะเบียนเครื่องจักร 4. กฎหมายว่าด้วยการสาธารณสุข 5. กฎหมายว่าด้วยคนเข้าเมือง เฉพาะเพื่อการอนุญาตให้คนต่างด้าวตามมาตรา 45 (1) หรือ (2) อยู่ต่อในราชอาณาจักร 6. กฎหมายว่าด้วยทะเบียนพาณิชย์ 7. กฎหมายว่าด้วยโรงงาน 8. กฎหมายว่าด้วยการจัดสรรที่ดิน หากกฎหมายกำหนดให้ผู้ดำเนินการหรือผู้กระทำได้ รับอนุมัติใบอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการนโยบาย EEC เป็นผู้ที่มีอำนาจอนุมัติ

นอกจากนี้ยังมี พ.ร.บ.ส่งเสริมการลงทุน และร่าง พ.ร.บ.เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศสำหรับอุตสาหกรรมเป้าหมาย พ.ศ. 2560 ซึ่งเน้นการลงทุนในอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีเป้าหมาย (Core Technologies) ซึ่งจะสนับสนุนการลงทุนในอุตสาหกรรมบนพื้นที่ EEC ของประเทศสำหรับอุตสาหกรรมเป้าหมาย พ.ศ.2560 เพื่อเร่งการลงทุนจากต่างชาติและภาคเอกชนในพื้นที่ EEC [21]

การปรับปรุง พ.ร.บ. ส่งเสริมการลงทุน [20]

รัฐบาลได้ปรับปรุง พ.ร.บ.ส่งเสริมการลงทุน ฉบับใหม่ ปี 2562 โดยการให้สิทธิประโยชน์การลงทุนจะให้กับผู้ที่ลงทุนผลิตเป็นสำคัญ ให้ประชาชนมีส่วนร่วมและสามารถตรวจสอบการทำงานของภาครัฐได้มากขึ้น และได้กำหนดให้มีคณะกรรมการจากภาคเอกชนเข้ามามีส่วนร่วมในการพิจารณาการลงทุนเพิ่มขึ้น และให้ความเห็นในการลงทุนของภาครัฐ รวมถึงสิทธิประโยชน์ครอบคลุมผู้ใช้-ผู้ผลิต-

ผู้สนับสนุน การให้สิทธิประโยชน์กับผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ที่รัฐบาลสนับสนุนนั้นก็เพื่อให้แน่ใจว่าผลิตภัณฑ์นั้นมีความต้องการรองรับในจำนวนที่เพียงพอ ยกตัวอย่างเช่น การผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Bioplastic) จะเกิดขึ้นในขนาดที่ลงทุนได้ในต้นทุนที่ถูกก็จำเป็นต้องมีการสนับสนุนให้มีการใช้พลาสติกเหล่านั้นภายในประเทศ การทำรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งเป็นรถยนต์อนาคตจำเป็นต้องสนับสนุนให้ภาครัฐและประชาชนใช้เป็นตัวอย่าง เพื่อให้ขนาดของการผลิตชิ้นส่วนและบริการหลังการขายที่มีประสิทธิภาพ การให้สิทธิประโยชน์กับผู้สนับสนุนโดยเฉพาะสถาบันการศึกษา สถาบันเทคโนโลยี และสถาบันมาตรฐานต่าง ๆ ก็เพื่อให้สถาบันเหล่านั้นเข้ามาร่วมในกระบวนการถ่ายทอดและพัฒนาเทคโนโลยี โดยได้มีการกำหนดในเงื่อนไขส่งเสริมการลงทุนว่า ทุกโครงการลงทุนต้องมีส่วนเชื่อมโยงกับสถาบันการศึกษา หรือสถาบันเทคโนโลยี เพื่อให้คนไทยสามารถรับรู้และนำเทคโนโลยีเหล่านั้นไปขยายผลต่อไปในอนาคต

4.3 นโยบายภาครัฐในการสนับสนุนการลงทุนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก [20]

1. การยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคล สำหรับบางกิจกรรมได้นานสูงสุด 13 ปี (อาศัยอำนาจตาม พ.ร.บ. ส่งเสริมการลงทุน) โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเป้าหมาย การแพทย์ครบวงจร บีโตร์เคมี อากาศยาน และเขตนวัตกรรมเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EECi) ด้วยการให้สิทธิประโยชน์ตามร่าง พ.ร.บ. จำนวน 2 ฉบับ จะได้รับยกเว้นภาษีนิติบุคคลถึง 13 ปี

2. ได้รับการยกเว้นอากรขาเข้าสำหรับเครื่องจักรวัตถุดิบที่นำเข้ามาผลิตเพื่อส่งออก และของที่นำเข้ามาเพื่อการวิจัยและพัฒนา

3. การให้เงินสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการลงทุน การวิจัยและพัฒนา การส่งเสริมนวัตกรรม หรือการพัฒนาบุคลากรเฉพาะด้านของกิจการในอุตสาหกรรมเป้าหมาย

4. อนุญาตให้ถือกรรมสิทธิ์ที่ดินเพื่อประกอบกิจการที่ได้รับการส่งเสริม

5. สิทธิการเช่าที่ดินราชพัสดุถึง 50 ปี และสามารถพิจารณาต่ออายุอีก 49 ปี

6. จัดเก็บอัตราภาษีรายได้บุคคลธรรมดาที่เป็นผู้เชี่ยวชาญและระดับนานาชาติอยู่ในระดับไม่เกินร้อยละ 17 และสำหรับผู้เชี่ยวชาญระดับสูงและผู้บริหารระดับสูงที่จำเป็นในโครงการลงทุนและสามารถสร้างประโยชน์ให้ประเทศอัตราภาษีรายได้ไม่เกินร้อยละ 15

7. มีการจัดตั้งระบบ One-stop Service อำนวยความสะดวกให้กับนักลงทุน ให้บริการข้อมูลข่าวสาร การขออนุญาต ที่เกี่ยวข้องกับการประกอบการ การค้า การส่งออก นำเข้า ในจุดเดียว

8. ให้สิทธิประโยชน์การส่งออก และการทำงานของผู้เชี่ยวชาญและเจ้าหน้าที่ระดับสูงจากต่างประเทศ เทียบเท่ากับคนไทยครึ่งละ 5 ปี ตลอดช่วงอายุการส่งเสริมการลงทุน

9. เครื่องมือสนับสนุน – ส่งเสริม – อำนวยความสะดวกในการลงทุนแบบครบวงจร

10. สนับสนุนอุตสาหกรรมเป้าหมายที่ลงทุนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกโดยการลดหย่อนภาษีเงินได้นิติบุคคลร้อยละ 50 ของอัตราปกติเป็นระยะเวลาอีก 5 ปี สำหรับ 5 กิจการ คือ กิจการโครงสร้างพื้นฐาน กิจการพัฒนแหล่งท่องเที่ยวในพื้นที่ กิจการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและพัฒนา

และเทคโนโลยีชีวภาพ กิจการบริการมูลค่าสูง (High Value Services) กิจการที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ รัฐยังสนับสนุนอุตสาหกรรมเป้าหมายที่มีศักยภาพจะเป็นปัจจัยขับเคลื่อนเศรษฐกิจ (New - Growth Engine) ของไทย เพื่อให้เกิดการลงทุนพัฒนาและขับเคลื่อน 10 อุตสาหกรรมเป้าหมายของไทย ภายใต้ยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมไทย 4.0 (Thailand 4.0) ในระยะ 20 ปี (2560-2579) อันจะมีส่วนช่วยเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันของประเทศในระยะยาว [19] โดยสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1) อุตสาหกรรมเป้าหมาย (First S - Curve) ประกอบด้วยอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ (Next Generation Automotive) อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (Smart Electronics) อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวกลุ่มรายได้ดีและการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ (Affluent, Medical and Wellness Tourism) การเกษตรและเทคโนโลยีชีวภาพ (Agriculture and Biotechnology) และอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร (Food for the Future)

2) อุตสาหกรรมเป้าหมายพิเศษ (New S - Curve) ประกอบไปด้วย อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ (Robotics) อุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ (Aviation and Logistics) อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพและเคมีชีวภาพ (Bio-Fuels and Biochemicals) อุตสาหกรรมดิจิทัล (Digital) และอุตสาหกรรมการแพทย์ครบวงจร (Medical Hub)

4.4 การลงทุนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก [20]

การร่วมลงทุนกับเอกชนหรือให้เอกชนเป็นผู้ลงทุนในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก มีโครงสร้างพื้นฐานสำคัญ 6 โครงการระหว่างภาครัฐและเอกชน (Public Private Partnerships : PPP) ประกอบด้วย

1. สนามบินอู่ตะเภาและเมืองการบินภาคตะวันออก

2. ศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยานอุตะเถา
3. รถไฟฟ้าความเร็วสูง
4. สนามบิน
5. ท่าเรือแหลมฉบังระยะที่ 3
6. ท่าเรืออุตสาหกรรมมาบตาพุด ระยะที่ 3
7. เขตส่งเสริมอุตสาหกรรมและนวัตกรรมดิจิทัล (EECd)

การลงทุนดังกล่าว เป็นโครงการที่ต้องการเงินลงทุนจำนวนมาก โดยเฉพาะการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่ต้องได้รับการลงทุนจากภาคเอกชน ตามประกาศคณะกรรมการนโยบายการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก ที่ได้กำหนดเรื่องหลักเกณฑ์วิธีการ เงื่อนไข และกระบวนการ ในการร่วมลงทุนกับเอกชนหรือให้เอกชนเป็นผู้ลงทุน พ.ศ. 2560 และมีการจัดตั้ง “กองทุนเพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการแข่งขัน” เพื่อใช้สนับสนุนในการเจรจา ดึงดูดนักลงทุนที่เป็นเป้าหมายเฉพาะ เพื่อทำหน้าที่ให้เงินสนับสนุนสำหรับโครงการการลงทุนพิเศษที่เป็นที่ต้องการอย่างสูงที่สามารถทำให้อุตสาหกรรมเป้าหมายนั้น ๆ ประสบความสำเร็จ

จากการรวบรวมข้อมูลของศูนย์วิจัยกสิกรไทยพบว่า

การลงทุนภาคเอกชน ในระยะแรกของการพัฒนาพื้นที่ EEC อาจมุ่งเน้นการลงทุนในธุรกิจหรือบริการที่มีส่วนช่วยสนับสนุนการลงทุนในอุตสาหกรรมแห่งอนาคตในพื้นที่คาดว่าจะมีมูลค่าการลงทุนเฉลี่ยราว 26,800 ล้านบาทต่อปี (2561-2565) ซึ่งประกอบไปด้วย [19]

1. การลงทุนในนิคมอุตสาหกรรม ทั้งการลงทุนใหม่และการลงทุนต่อยอดเพื่อรองรับการผลิตและบริการของอุตสาหกรรมแห่งอนาคต (High-Technology Industrial Estate)
2. การลงทุนที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการโลจิสติกส์ อาทิ คลังสินค้า
3. การลงทุนเพื่อสนับสนุนความต้องการสินค้าและบริการที่เพิ่มขึ้นในพื้นที่ EEC อาทิ ธุรกิจโรงแรมธุรกิจการบริหารจัดการน้ำครบวงจร
4. การลงทุนร่วมพัฒนาเมืองใหม่ในระยะเบื้องต้น เพื่อมุ่งยกระดับการท่องเที่ยวเชิงคุณภาพ ธุรกิจพาณิชย์การศึกษา รวมถึงสาธารณสุขที่จำเป็น
5. การลงทุนโครงสร้างพื้นฐานด้านดิจิทัล เพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมดิจิทัลของไทยให้สอดคล้องกับธุรกิจอื่น ๆ ในประเทศและภายในภูมิภาคอินโดจีน



รูปที่ 6 อุตสาหกรรมเป้าหมาย 10 ด้าน ที่มา : [22]

4.5 ตารางที่ 1 เปรียบเทียบเขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงินกับเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

หัวข้อ	เขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงิน	เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก
1. ด้านการบริหารจัดการ	ระยะแรก: รัฐบาลกลางถ่ายโอนอำนาจดังกล่าวให้แก่รัฐบาลมณฑลกว่างตุ้งและจัดตั้งคณะกรรมการมณฑลกว่างตุ้ง เพื่อบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษ มีอำนาจบริหารจัดการเบ็ดเสร็จเป็นรูปแบบของการบริหารจัดการเบ็ดเสร็จ (single command) ระยะที่สอง: คณะกรรมการมณฑลกว่างตุ้งเพื่อการบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษถ่ายโอนอำนาจคืนให้แก่เมืองเส้นเงินและองค์กรปกครองท้องถิ่นระดับอำเภอแขวง และหมู่บ้านภายในเขต 4 อำเภอ	บริหารจัดการอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ประกอบด้วย นายกรัฐมนตรีเป็นประธาน รองนายกรัฐมนตรีเป็นรองประธานรัฐมนตรี ภาคราชการ เอกชน ผู้ทรงคุณวุฒิ เป็นกรรมการ รวมทั้งสิ้น 28 คน มีรัฐมนตรีว่าการ จำนวน 14 คน
2. ด้านนโยบายของรัฐบาลที่สนับสนุนการลงทุนจากนักลงทุนต่างชาติ	1. ภาษีนิติบุคคลแก่บริษัทต่างชาติในอัตราร้อยละ 15 2. ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีระดับสูงหรือมีการลงทุนตั้งแต่ 5 ล้านดอลลาร์สหรัฐขึ้นไปได้รับการยกเว้นภาษี อัตราภาษีเงินได้อยู่ที่ร้อยละ 15 3. ผู้ประกอบการมีอิสระที่จะประกอบกิจการภายในเขตเศรษฐกิจพิเศษและการจ้างชาวต่างประเทศ 4. เครื่องจักร ชิ้นส่วน วัตถุดิบ ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศได้รับการยกเว้นอากรขาเข้า 5. ค่าเช่าที่ดินมีราคาถูก 6. สิทธิเช่าที่ดินได้สูงสุด 99 ปี 7. การอนุญาตให้บริษัทต่างชาติสามารถส่งกำไรกลับประเทศได้ 8. ส่งเสริมนโยบายการนำเข้าและส่งออก	1. การยกเว้นภาษีเงินได้นิติบุคคล สำหรับบางกิจกรรมได้นานสูงสุด 13 ปี 2. จัดเก็บภาษียาได้บุคคลธรรมดาที่เป็นผู้เชี่ยวชาญ/ระดับนานาชาติ และผู้เชี่ยวชาญระดับสูง อัตรา 15 และ 17% ตามลำดับ 3. การยกเว้นอากรขาเข้า สำหรับเครื่องจักรที่นำเข้ามาเพื่อการวิจัยและพัฒนา 4. การให้เงินสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการลงทุน การวิจัยและพัฒนากิจการในอุตสาหกรรมเป้าหมาย 5. อนุญาตให้ถือกรรมสิทธิ์ที่ดินเพื่อประกอบกิจการที่ได้รับการส่งเสริม 6. สิทธิการเช่าที่ดินราชพัสดุถึง 50 ปี และสามารถพิจารณาต่ออายุอีก 49 ปี 7. ให้สิทธิประโยชน์การเข้าออกของผู้เชี่ยวชาญและเจ้าหน้าที่ระดับสูงจากต่างประเทศ เทียบเท่าคนไทยครึ่งละ 5 ปี 8. มีการจัดตั้งระบบ One-stop Service 9. ให้สิทธิประโยชน์การเข้าออกของผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ เทียบเท่าคนไทยครึ่งละ 5 ปี 10. เครื่องมือสนับสนุน-ส่งเสริม-อำนวยความสะดวกในการลงทุนแบบครบวงจร 11. สนับสนุนอุตสาหกรรมเป้าหมายที่ลงทุนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกโดยการลดหย่อนภาษีเงินได้นิติบุคคล 50%

4.5 ตารางที่ 1 เปรียบเทียบเขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงินกับเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (ต่อ)

หัวข้อ	เขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงิน	เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก
3. ด้านกฎหมายการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษ	ตั้งขึ้นตามกฎหมายของมณฑลกว่างตุง (Regulations on Special Economic Zones in Guangdong Province)	มี พรบ.จัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก พ.ศ. 2560 และมีกฎหมายจำนวน 8 ฉบับที่แยกออกมาจากกฎหมายฉบับปกติ เพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการดำเนินการ
4. ด้านรูปแบบการลงทุน	1. มีกฎหมาย Joint Venture Law ประกอบด้วย 3 รูปแบบดังนี้ 1.1 รูปแบบกิจการร่วมค้า (Joint Venture) กิจการร่วมค้าที่มีการลงทุนโดยต่างชาติ 1.2 ชาวจีนในรูปแบบทุน (Chinese-foreign Equity Joint Ventures) 1.3 บริษัทต่างประเทศที่เป็นเจ้าของทั้งหมด (solely foreign-owned enterprises) 2. เน้นการส่งเสริมการลงทุนจากภายในประเทศเป็นหลัก ส่งเสริมอุตสาหกรรมภายในประเทศ สร้างแบรนด์ที่เป็นของคนจีน เช่น Huawei Tencent ที่มีสำนักงานใหญ่อยู่ที่เส้นเงิน เป็นต้น 3. เป้าหมายเน้นการพัฒนา 6 อุตสาหกรรมหลัก ทั้งอุตสาหกรรมด้านชีวภาพ อินเทอร์เน็ต แหล่งพลังงาน-วัสดุใหม่ นวัตกรรมเชิงวัฒนธรรม และด้านเทคโนโลยี	1. มี พ.ร.บ.ส่งเสริมการลงทุน และร่าง พ.ร.บ. เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน 1.1 การลงทุนร่วมระหว่างภาครัฐและเอกชน (Public Private Partnerships: PPP) 2. เน้นการลงทุนจากนักลงทุนต่างชาติเป็นหลัก นโยบายต่าง ๆ ที่เอื้อประโยชน์แก่ชาวต่างชาติ มากกว่าคนไทย เช่น การให้ชาวต่างชาติสามารถเช่าที่ดินได้มากกว่า 100 ไร่ ในระยะเวลา 99 ปี เป็นต้น 3. เป้าหมายเน้นการพัฒนา 12 อุตสาหกรรม S - Curve และ New S - Curve

5 .บทสรุป

เขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงินประสบความสำเร็จได้นั้น ปัจจัยสำคัญคือ การถ่ายเทอำนาจให้รัฐบาลท้องถิ่นในการบริหารจัดการ ซึ่งในระยะแรกช่วงเริ่มต้นรัฐบาลได้จัดตั้ง "คณะกรรมการมณฑลกว่างตุงเพื่อการบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษ" (Guangdong Province Committee for Administering Special Economic Zones: GPC) เพื่อเป็นเสมือนทีมพี่เลี้ยงที่เข้ามาช่วยบริหารจัดการ ต่อมาเมื่อการดำเนินการมีการพัฒนาอย่างมีระบบและมีแนวทางที่ชัดเจนคณะกรรมการ GPC จึงได้มอบอำนาจให้เมืองเส้นเงินบริหารจัดการได้ด้วยตนเอง และรัฐบาลกลางได้นับพริเยณ ปัจจัยความสำเร็จ ปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ ที่ได้จากเขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเงิน

ไปพัฒนาเขตเศรษฐกิจอื่นในประเทศต่อไป การทำเช่นนี้จะทำให้รัฐบาลท้องถิ่นมีความมั่นใจในการบริหารจัดการ อีกทั้งสามารถเข้าถึงชุมชนและเกิดการพัฒนาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การที่ประเทศไทยได้จัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกนี้ การบริหารจัดการเขตเศรษฐกิจพิเศษเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว ซึ่งรัฐจะต้องให้การสนับสนุนและร่วมลงทุนในการพัฒนาเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ประชาชนหน่วยงานภาครัฐ และตอบสนองความต้องการของผู้เข้ารับบริการ เพื่อให้การพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกเกิดประสิทธิภาพ สามารถพัฒนาประเทศให้แข่งขันกับเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นในปัจจุบันได้ [21]

ด้านการสนับสนุนสิทธิประโยชน์ในการลงทุน ไม่ว่าจะเป็นมาตรการลดภาษีต่าง ๆ หรือ พ.ร.บ.ส่งเสริมการลงทุน ไม่มีการระบุอย่างชัดเจนว่าต้องใช้ในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกเท่านั้น ซึ่งทำให้ขาดแรงจูงใจจากนักลงทุน เพราะอาจจะให้นักลงทุนสามารถเลือกพื้นที่อื่นที่เหมาะสมต่ออุตสาหกรรมมากกว่าการมาจัดตั้งในเขตเศรษฐกิจพิเศษเส้นเจ็ญ นอกจากนี้ยังเน้นการลงทุนจากต่างชาติมากกว่า นักลงทุนภายในประเทศ ถึงแม้ว่ารัฐบาลจะมีนโยบายในการพัฒนา 12 อุตสาหกรรม S - Curve และ New S - Curve ในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก แต่ก็ยังไม่มียุทธศาสตร์หลักที่เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานของคนไทย ทำให้ไม่เกิดการลงทุนจากภายในประเทศ จึงต้องพึ่งการลงทุนจากต่างชาติเป็นหลัก ซึ่งอาจทำให้มีแนวโน้มที่ไม่แตกต่างจากการจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรมที่มีอยู่แล้วในประเทศไทย

6. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ถือได้ว่าเป็นนโยบายเศรษฐกิจที่ดีที่สุดของรัฐบาลนี้ ที่จะทำให้ประเทศไทยตอบสนองยุทธศาสตร์ของชาติไทยแลนด์ 4.0 ได้อย่างเป็นรูปธรรมดังนี้

1. ภาครัฐต้องบูรณาการบริหารพื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ทั้งของภาครัฐส่วนกลาง ส่วนภูมิภาค และส่วนปกครองท้องถิ่น ให้มีการกระจายอำนาจสู่ภาคท้องถิ่น เพื่อเอื้อต่อการบริหารจัดการและกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมที่มาลงทุนในโครงการให้ได้รับผลประโยชน์สูงสุด ขณะเดียวกันภาครัฐทุกระดับก็ไม่เสียผลประโยชน์ที่ควรจะได้รับ [22] รวมถึงควรมีภาคเอกชนเข้ามามีส่วนร่วมในการกำหนดนโยบายต่าง ๆ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของนักลงทุนได้ตรงกับความต้องการ

2. จากนโยบายภาครัฐที่ให้กรรมสิทธิ์ชาวต่างชาติในการครอบครองอสังหาริมทรัพย์สูงสุดถึง 99 ปี และ

สามารถเช่าที่ดินได้มากกว่า 100 ไร่ นั้น ควรกำหนดอัตราการจัดเก็บภาษีและการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปลูกสร้างอย่างชัดเจน เพื่อให้สามารถนํานาฬิกาขึ้นสู่ท้องถิ่นและนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างสูงสุด

3. ภาครัฐส่งเสริมนโยบายในการลงทุน เพื่อดึงดูดนักลงทุนทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติเพิ่มขึ้น อีกทั้งต้องส่งเสริมผู้ลงทุนรายเดิมให้ขยายการลงทุนเพิ่มมากขึ้น การให้สิทธิพิเศษในการลงทุนอุตสาหกรรมศักยภาพ ทั้งกลุ่มอุตสาหกรรมปัจจุบัน (First S - Curve) และกลุ่มอุตสาหกรรมอนาคต (New S - Curve) [21]

4. การจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก อยู่ภายใต้แผนกลยุทธ์ไทยแลนด์ 4.0 และจากการต่อยอดความสำเร็จของ Eastern Seaboard ทำให้เราได้เรียนรู้ถึงอุปสรรค ซึ่งถูกนำมาปรับปรุงและวางกลยุทธ์อย่างครอบคลุมทั้งในด้านโครงสร้างพื้นฐานทางกายภาพ สังคม สิทธิประโยชน์นักลงทุน และการพัฒนาชุมชน เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนงานที่รับผิดชอบ หากมองภาพจากยุทธศาสตร์ชาติ อาจทำให้เราใช้เวลาอย่างมากและอาจกลายเป็นเพียงจินตนาการของภาครัฐ หรือทำได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นเราควรจะต้องแบ่งเฟสการออกแบบ การจัดการ การดำเนินการให้มีความชัดเจนมั่นคง และทำได้จริงในแต่ละเฟส เพื่อให้มีการพัฒนาต่อยอดได้อย่างสมบูรณ์แบบและมั่นคงในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา. (2548). รายงานของคณะกรรมการการเศรษฐกิจ การพาณิชย์ และอุตสาหกรรม วุฒิสภา “ร่างพระราชบัญญัติเขตเศรษฐกิจพิเศษ”. กรุงเทพฯ, หน้า 3.
- [2] สิริวิชา สิทธิชัย, “สิทธิประโยชน์ทางภาษีเพื่อประโยชน์ในการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษ”. วิทยานิพนธ์นิติศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [3] โครงการฝึกอบรมหลักสูตรการพัฒนาผู้นำคนรุ่นใหม่ ในราชการไทย, “รายงานการศึกษาดูงานต่างประเทศ ณ เขต

บริหารพิเศษฮ่องกงและเมืองเซินเจิ้นมณฑลกว่างต้ง สาธารณรัฐประชาชนจีน”, 2560 ที่มา https://www.ocsc.go.th/sites/default/files/attachment/page/raayngaanklum_tpth_part_2.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2563

[4] สรุป Special Economic Zone Laws ของต่างประเทศโดยฝ่ายพัฒนากฎหมายสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา ธันวาคม 2546 ที่มา <http://web.krisdika.go.th/data/news/news123.pdf> สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2563.

[5] ที่มา <http://www.absolutechinatours.com/news/Shenzhen-economic-zone-4714.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2563

[6] Ren Lu, Chinese Special Economic Zones as Clusters A Case Study of Shenzhen's Modern Service Clusters Master of Science in Business Mastergradsoppgave i bedriftsøkonomi - Høgskolen i Bodø, 2008.

[7] กรณีศึกษาเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเซินเจิ้นกับทางเลือกในการพัฒนาเศรษฐกิจประเทศไทย, ที่มา <https://thaibizchina.com/กรณีศึกษาเขตเศรษฐกิจพิเศษ>, สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2563

[8] Meng Zhou and et.al Zhou, M., Yue, Y., Li, Q., & Wang, D. (2016). “Portraying temporal dynamics of urban spatial divisions with mobile phone positioning data: A complex network approach”. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016 5(12), 240.

[9] Enright, M. J., “Developing China: The Remarkable Impact of Foreign Direct Investment”. New York: Routledge. 2017.

[10] สารสังเขปประเด็นการปฏิรูปประเทศไทยด้านเศรษฐกิจ ปี 2557 สำนักวิชาการและสำนักกฎหมาย สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร ที่มา https://library2.parliament.go.th/giventake/content_nrcinf/nrc2557-issue6-abst01.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2563

[11] Zeng,D.Z., “Building Engines for Growth: Building Engines for Growth and Competitiveness in China: Experience with Special Economic Zones and Industrial Clusters”. The International Bank for Reconstruction and Development. The world Bank, 2010.

[12] Zou Erkang, “Special Economic Zone Typifies Open Policy, Chinese Economic Studies” 19:2, pp79-85, 1985.

[13] ที่มา <https://www.ceicdata.com/en> สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2563

[14] กรณีศึกษา: เขตเศรษฐกิจพิเศษกับทางเลือกในการพัฒนาเศรษฐกิจประเทศไทย ที่มา http://www.wiangphangkham.go.th/images/column_1431354069/158.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2563

[15] พระราชบัญญัติเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก พ.ศ. 2561, ที่มา <https://www.eeco.or.th/sites/default/files/EEC%20ACT%202561.pdf>, สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มีนาคม 2563.

[16] ปณตดา ภูหอม, หน่วยวิเคราะห์เศรษฐกิจมหภาคในประเทศ ส่วนเศรษฐกิจมหภาค ศูนย์วิจัยเศรษฐกิจธุรกิจและเศรษฐกิจ “ฐานราก EEC ภาคต่อ Eastern Seaboard ก้าวสำคัญการลงทุนไทย”, 2561.

[17] สุทธิเกตุดี ทัดพิทักษ์กุล “รัฐบาลกับการสนับสนุนระเบียบเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก” วารสารส่งเสริมการลงทุน สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน ปีที่ 28 ฉบับที่ 7 กรกฎาคม 2560

[18] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.) ที่มา <https://www.eeco.or.th> สืบค้นเมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2563

[19] EEC ตัวช่วยสำคัญดัน SME ไทยโต ศูนย์วิจัยกสิกรไทย เมษายน 2561 ที่มา <https://www.kasikornbank.com/th/business/sme/KSMEknowledge/article/KSMEAnalysis/Documents/EEC-SME.pdf> สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2563

[20] วรณวนิช สว่างแจ้ง “บทความวิทยุกฎหมายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก” ที่มา https://www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/elaw_parcy/ewt_dl_link.php?nid=1891 สืบค้นเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2563

[21] นพดล วิทยาภรณ์ และเอกพร รักความสุข การบริหารการพัฒนาโครงการพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษศึกษากรณี: พื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก EEC วารสารมหาวิทยาลัยวิชาการ ปีที่ 6 ฉบับที่ 2, 2563

[22] ณัฏพล จรุงพิพัฒน์กุล, “โครงการ EEC: ความหวังใหม่ในการพลิกฟื้นวัฏจักรการลงทุน” FOCUSED AND QUICK (FAQ) Issue 155, 2561.

การขับเคลื่อนผลงานวิจัยด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สู่การผลิตเชิงพาณิชย์

วิชณ มั่งคั่ง^{1*}

วันที่รับ 20 กรกฎาคม 2563 วันที่แก้ไข 3 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 31 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

หน่วยงานวิจัยของรัฐและหน่วยงานวิจัยของเอกชนต้องใช้ทรัพยากรและงบประมาณจำนวนมากในการสร้างผลงานวิจัย ซึ่งในแต่ละปีมีผลงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ผ่านการจดสิทธิบัตร แต่อัตราของผลงานวิจัยที่สามารถนำไปขยายผลเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ยังไม่สูงพอ หากเทียบกับจำนวนงบประมาณวิจัยที่หน่วยงานได้ลงทุนไป ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่หน่วยงานวิจัยจะต้องพิจารณาถึงหลักการผลิตภัณฑ์ใหม่ การสร้างความเชื่อมโยงกับแผนกลยุทธ์องค์กร การสังเคราะห์ความต้องการที่ชัดเจน การประสานงานกับผู้ถือผลประโยชน์ร่วม การกำหนดเป้าหมายที่ชัดเจนของงานวิจัย แผนการลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนา การจัดทำแผนที่นำทางการวิจัยเทคโนโลยีและการพิจารณาคัดเลือกการลงทุนวิจัย เพื่อขับเคลื่อนผลงานวิจัยด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : การวิจัยและพัฒนาของภาคอุตสาหกรรม, เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, นวัตกรรม

¹ ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: vissanu.m@dti.or.th

Driven Research in Defence Technology to Commercialization

Vissanu Mungkung^{1*}

Received 20 July 2020, Revised 3 August 2020, Accepted 31 August 2020

Abstract

National laboratories within government, industry and academies invest heavily in resources and funding in research and development. Despite numerous discoveries that have been granted, the ratio of researches have been transformed to military capability still limited. In order to utilize resources effectively, research agencies must consider adopting New Product Development concept, alignment with organization's strategy, clarify requirements, communicate with stakeholders, define practical research objective, develop R&D investment plan and technological roadmap, refine project selection criteria.

Keywords : Research and Development (R&D), Defence technologies, Innovation

¹ Defence Technology Analysis Department - TTA, Defence Technology Institute.

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

บทนำ

การวิจัยและพัฒนาของภาคอุตสาหกรรมเป็นดัชนีสำคัญดัชนีหนึ่งที่สะท้อนให้เห็นถึงความเข้มแข็งด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมของประเทศ เนื่องจากการวิจัยและพัฒนาเป็นรากฐานของการสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถพัฒนาประเทศให้มีความเจริญก้าวหน้า [1] และยังเป็นกระบวนการเริ่มต้นของการสร้างเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะเทคโนโลยีป้องกันประเทศเพื่อมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการป้องกันประเทศและด้านการทหารอื่น ๆ รวมถึงการประยุกต์ใช้ประโยชน์แก่ประเทศเป็นส่วนรวม [2] กองทัพพึ่งพาการวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีป้องกันประเทศจากหน่วยงานของรัฐ อุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษา ในการค้นพบและสร้างนวัตกรรมด้านความมั่นคง อย่างไรก็ตาม ยังมีผลงานวิจัยจำนวนมากที่ประสบกับอุปสรรคและข้อจำกัด ในการถูกเปลี่ยนผ่านไปเป็นผลิตภัณฑ์หรือก้าวข้ามไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ ดังที่ปรากฏในสหรัฐอเมริกา ที่ถึงแม้ว่าจะมีการจดสิทธิบัตรและทรัพย์สินทางปัญญาเป็นจำนวนมาก แต่อัตราเฉลี่ยของผลงานวิจัยที่จะถูกนำไปใช้งานได้จริงนั้นอยู่ที่เพียงร้อยละ 42 เท่านั้น หรือในประเทศเกาหลีใต้ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1996 ถึง ค.ศ. 2006 รัฐบาลเกาหลีได้จัดสรรงบประมาณกว่า 9 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือเกือบ 3 แสนล้านบาท เพื่อขับเคลื่อนการวิจัยและพัฒนา ถึงแม้ว่าจะมีการค้นพบและพัฒนาเทคโนโลยีออกมามากกว่า 4,000 รายการ แต่มีเพียงร้อยละ 20 เท่านั้น [3] ที่ถูกนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์หรือมีการถูกนำไปใช้เป็นรูปธรรม [4] ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการหาแนวทางในการขับเคลื่อนผลงานวิจัยด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ หรือส่งมอบให้กับหน่วยผู้ใช้ให้เพิ่มสูงขึ้น เพื่อให้

เกิดการสร้างนวัตกรรมและการใช้งบประมาณภาครัฐให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งในบทความวิเคราะห์ฯ นี้ นำเสนอกระบวนการที่เกี่ยวข้องที่ได้ผ่านการถอดบทเรียนในองค์กรภาครัฐและภาคเอกชนมาแล้ว โดยเริ่มตั้งแต่การใช้หลักการผลิตภัณฑ์ใหม่ การสร้างความเชื่อมโยงกับแผนกลยุทธ์องค์กร การสังเคราะห์ความต้องการที่ชัดเจน การประสานงานกับผู้ถือผลประโยชน์ร่วม การกำหนดเป้าหมายที่ชัดเจนของงานวิจัย แผนการลงทุนด้านการวิจัยและการจัดทำแผนที่นำทางการวิจัยเทคโนโลยีและการพิจารณาคัดเลือกการลงทุนวิจัย

1. กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่

ผลงานวิจัยจะประสบความสำเร็จและได้รับการนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่จะสามารถนำไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้นั้น นอกจากจะต้องดำเนินงานตามกระบวนการวิจัยแล้ว ยังจำเป็นต้องพิจารณาในมิติทางด้านการตลาดและการพาณิชย์ด้วยหลักการผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือ New Product Development ซึ่งกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่มีหลายแนวคิด แต่โดยรวมแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน [5] ดังนี้

ขั้นที่ 1 การสร้างแนวความคิดเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ใหม่ (Idea Generation) เป็นการคิดค้นแสวงหาความคิดใหม่ ๆ ในการสร้างสินค้า และช่องทางจำหน่ายผลิตภัณฑ์นั้น โดยการคิดค้นผลิตภัณฑ์ใหม่แบ่งออกเป็น 2 แพล่งด้วยกันคือ ความคิดริเริ่มที่เกิดขึ้นภายในองค์กร ยกตัวอย่างเช่น พนักงานฝ่ายบริการ ผู้ถือเป็นบุคคลที่อยู่ใกล้ชิดกับผู้บริโภคและทราบถึงความต้องการของผู้บริโภคมากที่สุด นักวิจัยและนักพัฒนา เป็นกลุ่มบุคคลที่ใกล้ชิดกับเทคโนโลยีใหม่ ๆ ผู้บริหารระดับสูง เป็นบุคคลที่ทราบถึงจุดอ่อน

จุดแข็งของบริษัทและเป็นผู้กำหนดทิศทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งตัวอย่างขององค์กรที่มีการส่งเสริมให้มีการเสนอผลิตภัณฑ์ใหม่ ได้แก่ บริษัท Boeing ซึ่งเป็นบริษัทในอุตสาหกรรมการบินและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศมีกระบวนการการสร้างแนวความคิดใหม่โดยเปิดโอกาสให้เจ้าหน้าที่ในองค์กรได้ระดมสมองเพื่อนำเสนอ วิเคราะห์ และสังเคราะห์เทคโนโลยีใหม่ที่บริษัทสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสู่การสร้างสินค้าให้กับองค์กรได้ หรือองค์กรจะกำหนดโจทย์หรือความต้องการของลูกค้า เพื่อให้เจ้าหน้าที่ได้ช่วยกันระดมความคิดหาแนวทางในการตอบสนองต่อความต้องการเหล่านั้น นอกจากนี้ การสร้างความคิดใหม่ยังสามารถเกิดจากภายนอกองค์กร เช่น ลูกค้าหรือหน่วยผู้ใช้ ซึ่งถือเป็นแหล่งข้อมูลที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่บริษัทจะเสนอขายนั้นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องตอบสนองความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก นอกจากนี้ การติดตามแนวโน้มของเทคโนโลยีการแข่งขัน รวมถึงกลยุทธ์ของคู่แข่ง ก็เป็นอีกแหล่งข้อมูลหนึ่งที่จะช่วยในการคิดค้นผลิตภัณฑ์ใหม่

ขั้นที่ 2 การประเมินและคัดเลือกแนวความคิด (Idea Screening) หลังจากได้แนวความคิดเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ใหม่แล้ว จะต้องมีการนำแนวความคิดเหล่านั้น มาประเมินถึงความเป็นไปได้ เพื่อคัดเลือกแนวความคิดที่ดีและเหมาะสมที่สุดมาพัฒนาและทดสอบแนวความคิดต่อไป พร้อมกับทำการศึกษาอย่างละเอียดด้วยเกณฑ์ประกอบการพิจารณาจัดลำดับความสำคัญและความเร่งด่วน

ขั้นที่ 3 การพัฒนาและทดสอบแนวความคิด (Concept Development and Testing) เมื่อได้แนวความคิดที่ดีและเหมาะสมที่สุดในขั้นตอนที่สองแล้ว ต่อไปก็เป็นการนำความคิดที่ผ่านการคัดเลือกแล้วมาจัดทำรายละเอียดให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น เพื่อนำไปสำรวจกับลูกค้าหรือหน่วยผู้ใช้ ซึ่งจะมีกลไกที่ทำหน้าที่ในการบริหารจัดการและดูภาพรวม

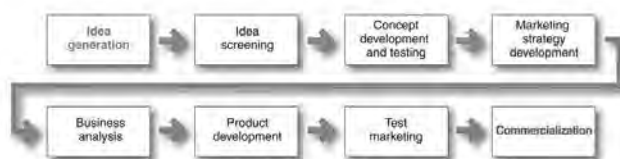
ความคืบหน้าของโครงการและการเปลี่ยนผ่านไปสู่ผลิตภัณฑ์ โดยจะมีการกำหนดตักติลาที่เป็นเงื่อนไขหรือเกณฑ์ที่โครงการจะต้องส่งมอบผลผลิตหรือตัวบ่งชี้ความสำเร็จในแต่ละช่วง เพื่อเป็นเครื่องยืนยันว่าโครงการมีความพร้อมที่จะดำเนินการต่อในขั้นถัดไปได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นการวัดที่ผลการทดลองและองค์ความรู้ที่ได้ [6]

ขั้นที่ 4 การพัฒนากลยุทธ์การตลาด (Marketing Strategy Development) เป็นการพัฒนาเครื่องมือทางการตลาด เพื่อใช้ในการแนะนำผลิตภัณฑ์ใหม่เข้าสู่ตลาด ให้สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดเป้าหมาย ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

- ส่วนที่ 1 ขนาด โครงสร้าง และพฤติกรรมของตลาดเป้าหมาย เป็นการวางแผนกำหนดตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ ยอดขาย ส่วนแบ่งตลาด (Market Share) และเป้าหมายกำไร (Profit) ในระยะ 2-3 ปีแรก
- ส่วนที่ 2 การพัฒนากลยุทธ์การตลาด ประกอบด้วย กลยุทธ์ด้านผลิตภัณฑ์ กลยุทธ์ด้านราคา กลยุทธ์ด้านการจัดจำหน่าย และกลยุทธ์ด้านการส่งเสริมการตลาด
- ส่วนที่ 3 ยอดขายและกำไรตามเป้าหมายและกลยุทธ์ทางการตลาดในระยะยาว เป็นการวางแผนกิจกรรมทางการตลาดในระยะยาว ซึ่งเป็นกิจกรรมในอนาคตที่จะทำให้บริษัทสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่วางแผนไว้

ขั้นที่ 5 การวิเคราะห์ทางธุรกิจเป็นการตรวจสอบยอดขาย ต้นทุน และกำไร จากการวางแผนโครงการสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งเป็นการประมาณความต้องการของตลาดหรือยอดขาย ประมาณการต้นทุนหรือกำไรที่จะเกิดขึ้นจากแนวความคิดผลิตภัณฑ์ใหม่ว่าเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดไว้หรือไม่ หากผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพึงพอใจ ผู้บริหารจะนำผลิตภัณฑ์นั้นเข้าสู่ขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่

ขั้นที่ 6 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Product Development) ทางธุรกิจมาเข้าสู่กระบวนการวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างต้นแบบ ในขั้นตอนนี้จะใช้เงินลงทุนมากและค่าใช้จ่ายในอัตราส่วนที่สูงที่สุดของงบประมาณโครงการ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการผลิตภัณฑ์ใหม่
หรือ New Product Development [7]

ขั้นที่ 7 การทดสอบตลาด (Market Testing) เป็นการนำผลิตภัณฑ์ใหม่ que พัฒนาแล้วไปทดสอบกับตลาดเป้าหมาย โดยสินค้าที่นำไปทดสอบต้องมีตราสินค้า มีการบรรจุหีบห่อ และดำเนินกิจกรรมทางการตลาดสำหรับสินค้าดังกล่าวด้วยวัตถุประสงค์ในการทดสอบตลาดคือ ศึกษาการตอบรับของผู้บริโภค และหาข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไข ตลอดจนทำให้ทราบถึงขนาดของตลาดว่า ถ้าสินค้าเป็นที่ยอมรับในกลุ่มผู้บริโภคที่ทดสอบแล้วขนาดของตลาดจะมากน้อยเพียงใด

ขั้นที่ 8 การดำเนินธุรกิจ (Commercialization) เป็นการตัดสินใจนำผลิตภัณฑ์ใหม่ออกสู่ตลาดจริงหลังจากทดสอบผลิตภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนนี้บริษัทจะใช้ต้นทุนมากที่สุด เพราะต้องผลิตสินค้าเต็มที่ และต้องตัดสินใจเกี่ยวกับจำนวนการผลิตที่เหมาะสม

2. แผนกลยุทธ์องค์กร

แผนกลยุทธ์องค์กรเป็นเครื่องมือในการระบุเทคโนโลยีเป้าหมายและการจัดลำดับความเร่งด่วนให้สอดคล้องกับทรัพยากรที่มีอยู่ องค์กรชั้นนำ

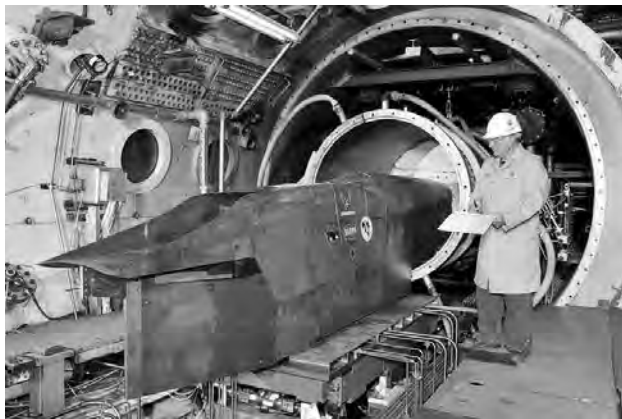
จะมีการจัดลำดับความเร่งด่วนของเทคโนโลยีเป้าหมาย โดยมี R&D เป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนองค์กรซึ่งแผนกลยุทธ์ควรมีการทบทวนยุทธศาสตร์องค์กรอย่างสม่ำเสมออย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง เพื่อวิเคราะห์และคาดการณ์ความต้องการของตลาดในระยะยาว

จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับสินค้าและบริการของบริษัท แล้วจึงศึกษาว่าสินค้าตัวใดตรงตามความต้องการและมีความเป็นไปได้ที่จะให้ผลตอบแทนสูงสุด พร้อมกับกำหนดช่วงเวลาในการส่งสินค้าออกสู่ตลาด และถือเป็นการทบทวนแผนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ถูกพิจารณาว่ามีความเป็นไปได้ต่ำหรือความต้องการของตลาดที่เปลี่ยนไป วิธีนี้จะช่วยให้องค์กรมั่นใจว่าเทคโนโลยีที่เหมาะสมจะผ่านเข้าสู่กระบวนการพัฒนาไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและในเวลาที่เหมาะสม หนึ่งในปัจจัยที่จะเป็นเกณฑ์ในการกำหนดเทคโนโลยีเป้าหมายและการลงทุนวิจัยที่นิยมใช้กันคือการประเมินแนวโน้มของเทคโนโลยีในระยะยาว ดังตัวอย่างของบริษัท Siemens [8] ซึ่งมีการทบทวนเทคโนโลยีของบริษัทเป็นประจำทุกปี เพื่อแจ้งให้ผู้บริหารได้รับทราบและประเมินขีดความสามารถด้านการแข่งขันของบริษัทตลอดจนการจัดสรรทรัพยากรและการกำหนดกลยุทธ์องค์กรในระยะยาว โดยมีการพิจารณาถึงการจัดสรรทรัพยากรที่เหมาะสมด้านการวิจัยและพัฒนา รวมถึงการประเมินความนิยมและการตอบรับสินค้าของบริษัท และการพิจารณาการลงทุนเพื่อดำรงสภาพการเป็นผู้นำหรือความ

สามารถในการแข่งขัน รวมถึงแผนกลยุทธ์ด้านการลงทุนสร้างความยั่งยืนให้กับองค์กร และที่สำคัญคือการกำหนดกลยุทธ์ในการยกระดับเทคโนโลยีให้กลายเป็นสินค้าใหม่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อการเติบโตของบริษัทและผลประกอบการ โดยที่บริษัทจะมีความสามารถในการแข่งขันด้านเทคโนโลยี ในการกำหนดการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ นอกจากนี้ บริษัทได้ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Pictures of the Future เพื่อแสดงให้เห็นความต้องการของตลาดในระยะ 5 - 15 ปี ข้างหน้า โดยพิจารณาจากกระแสและแนวโน้มของสังคมและเทคโนโลยี ในการกำหนดแนวคิดเพื่อใช้ในการสร้างสินค้าใหม่ให้กับผู้บริโภค

วิจัยด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศพบว่า โครงการที่มีความต้องการที่ชัดเจนของหน่วยผู้ใช้จะมีโอกาสประสบความสำเร็จที่จะได้รับการนำไปพัฒนาเป็นยุทธโธปกรณ์และบรรจุเข้าประจำการได้มากกว่า เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีที่มีขีดความสามารถพอจะถูกนำมาใช้งานทางทหาร แต่หากไม่มีความต้องการมารองรับและมีส่วนร่วมในการทดสอบและทดลอง ก็จะไม่ถูกส่งต่อให้เกิดการพัฒนาไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการพัฒนาได้

นอกจากนี้ โครงการจำเป็นต้องมีความเชื่อมโยงกับเทคโนโลยีเป้าหมายของหน่วยงานที่เป็นเจ้าของงบประมาณหรือทุนวิจัย ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างของ



รูปที่ 2 โครงการ Falcon Combined-cycle Engine Technology (FaCET) [9]

3. ความต้องการที่ชัดเจน

ปัจจัยสำคัญอีกประการคือความต้องการของหน่วยผู้ใช้หรือของลูกค้า เทคโนโลยีเป้าหมายควรเชื่อมโยงกับยุทธศาสตร์หรือแผนพัฒนาขีดความสามารถของหน่วยงานผู้ใช้ โดยมีการยืนยันหรือรับรองความต้องการในรูปแบบของเอกสารหรือรายงานทั้งในด้านของคุณลักษณะและวิธีการทำงาน วิธีนี้จะช่วยให้นักวิจัยเข้าใจถึงความต้องการของหน่วยผู้ใช้ได้อย่างชัดเจน จากผลการสำรวจผลงาน

องค์กร DARPA ที่มีการวิจัยด้าน Hypersonics Capability ซึ่งดำเนินการต่อเนื่องมานับตั้งแต่ช่วงปี 1980 ในโครงการ Falcon Combined-cycle Engine Technology (FaCET) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งการวิจัยนี้สอดคล้องกับเป้าหมายทางยุทธศาสตร์ของกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกาส่งผลให้เทคโนโลยีนี้ได้รับการขยายผลไปสู่ความร่วมมือกับกองทัพอากาศ รวมถึงความสำเร็จที่เทคโนโลยีถูกเปลี่ยนผ่านนำไปสู่องค์กร NASA ในระยะต่อไป

4. การประสานงานกับผู้ถือผลประโยชน์ร่วม

ส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยได้รับการนำไปทดสอบและทดลองใช้คือการทำงานร่วมกับผู้ถือผลประโยชน์ร่วมอย่างใกล้ชิดและต่อเนื่อง ยกตัวอย่างได้จากองค์กร DARPA มีการวิจัยเรื่อง Architecture for Diode High Energy Laser Systems (ADHELs) ซึ่งจะมีเจ้าหน้าที่ประจำโครงการวิจัยทำหน้าที่ในการติดต่อและประสานงานกับหน่วยผู้ใช้และผู้ที่เกี่ยวข้อง ตลอดทั้งระยะเวลาของการพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่ต้นแบบยุทธโธปกรณ์ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะช่วยให้การดำเนินงานในแต่ละระยะเป็นไปในทิศทางที่ทุกฝ่ายคาดหวังไว้ ในขณะเดียวกันจะมีการติดต่อกับภาคเอกชน ที่สามารถนำเทคโนโลยีไปใช้ในการพัฒนาสินค้าที่สามารถใช้ในทางพาณิชย์ได้เช่นกัน

5. การกำหนดเป้าหมายที่ชัดเจนของงานวิจัย

การกำหนดเป้าหมายของเทคโนโลยีช่วยให้การเปลี่ยนผ่านไปสู่ยุทธโธปกรณ์มีโอกาสสำเร็จได้สูง โดยกำหนดถึงคุณลักษณะเฉพาะทางเทคนิคและขีดความสามารถของต้นแบบอย่างชัดเจน รวมทั้งรายละเอียดด้านงบประมาณและระยะเวลาดำเนินงาน ตลอดจนทรัพยากรอื่น ๆ ที่จำเป็น ซึ่งทางองค์กร DARPA มีการจัดทำรูปแบบที่เป็นเอกสาร ที่จะช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องเข้าใจในรายละเอียดของต้นแบบที่จะมีการส่งมอบ ยกตัวอย่างเช่น โครงการพัฒนา Data Link แบบ QUINT Networking Technology (QNT) ที่ใช้ในการสื่อสารทางยุทธวิธีและการควบคุมระบบอาวุธ ซึ่งมีกองทัพอากาศและกองทัพเรือของสหรัฐอเมริกาเป็นคณะทำงานในการร่วมกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิคของต้นแบบอุปกรณ์ เช่น ขนาดน้ำหนัก คุณลักษณะ การถ่ายทอดสัญญาณ ตลอดจนรายละเอียดอื่น ๆ การกำหนดเป้าหมายในระยะ

ที่เริ่มต้นโครงการจะช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องยึดถือเป้าหมาย

6. แผนการลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนา

องค์กรชั้นนำในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศมีกลยุทธ์ด้านการลงทุนหรือการจัดสรรงบประมาณเพื่อการวิจัยที่แบ่งงบประมาณเป็นสองส่วน ได้แก่ 1) การลงทุนกับเทคโนโลยีในระยะใกล้ หรือการต่อยอดเทคโนโลยีเดิมที่มีอยู่แล้ว งานวิจัยแบบต่อยอดซึ่งจะมีความเสี่ยงต่ำ เพราะพัฒนาจากองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่ผ่านการพิสูจน์และยืนยันมาแล้ว ซึ่งส่วนพัฒนาธุรกิจจะเป็นหน่วยงานที่เข้ามาร่วมวางแผนทางการวิจัยและพัฒนาแบบต่อยอด เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าปัจจุบัน ซึ่งโดยทั่วไปแผนการวิจัยต่อยอดจะเป็นแผนระยะ 5 ปี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตลาดที่มีความเป็นพลวัตสูง และ 2) การลงทุนกับเทคโนโลยีใหม่ ที่ส่งเสริมการเติบโตและความสามารถในการแข่งขันขององค์กรในระยะยาว ซึ่งงานวิจัยในลักษณะนี้มีความเสี่ยงสูง แต่จะให้ผลตอบแทนในระยะยาว หากประสบผลสำเร็จ จะกลายเป็นสินค้าใหม่หรือสินค้าที่จะมาทดแทนสินค้าประเภทเดิม โดยทั่วไปบริษัทชั้นนำจัดสรรงบประมาณ 80% สำหรับงานวิจัยต่อยอด และอีก 20% ใช้สำหรับงานวิจัยเทคโนโลยีใหม่ โดยสัดส่วนนี้พิจารณาจากการประเมินความเสี่ยงและการคาดคะเนผลประโยชน์ นอกจากนี้นี้ยังมีการจัดสรรงบประมาณบางส่วนเพื่อใช้ในโครงการศึกษาและค้นคว้าที่เป็นโครงการขนาดเล็กในรูปแบบของการศึกษาความเป็นไปได้ ซึ่งหากประสบผลสำเร็จจะถูกนำไปผนวกเข้าสู่โครงการหลักได้

7. แผนที่นำทางการวิจัยเทคโนโลยี

การวางแผนที่นำทางการวิจัยเทคโนโลยีมี

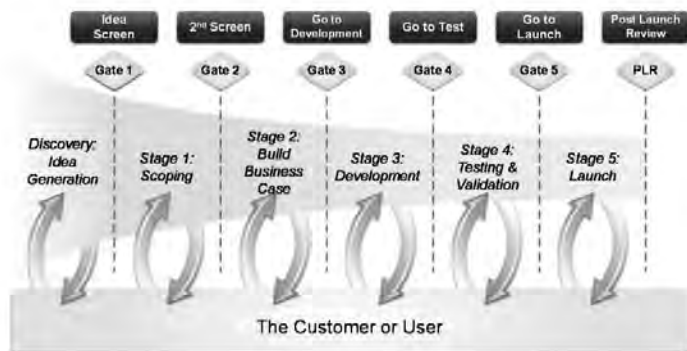
ความสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของต้นแบบ ยุทธโธปกรณ์ โดยแผนที่นำทางจะระบุถึงเทคโนโลยี เป้าหมายที่จะวิจัยและพัฒนา ผ่านการพิจารณา ของคณะทำงานศึกษาและวิเคราะห์ความต้องการ ทางด้านเทคโนโลยี เพื่อเข้าสู่กระบวนการกลั่น กรองคัดเลือก โครงการที่ผ่านการคัดเลือกจะด้ รับการจัดสรรงบประมาณ ทั้งนี้ กระบวนการ พิจารณาคัดเลือกโครงการมีความแตกต่างกันใน แต่ละองค์กร โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาจากกลยุทธ์ องค์กรและความต้องการของตลาดโดยที่นักวิจัย และนักเทคโนโลยีจะวางแผนเทคโนโลยีเป้าหมายที่ จะพัฒนา โดยจะเป็นผู้นิยามว่า เทคโนโลยีนั้น พร้อมแล้วที่จะนำไปใช้งาน ยกตัวอย่างจากบริษัท Honeywell Aerospace จะมีการจัดทำแผนที่นำทาง รายปีเพื่อต่อยอดเทคโนโลยีอย่างมีความสอดคล้อง กับผลิตภัณฑ์เป้าหมายของบริษัท ในขณะที่ส่วนธุรกิจ จะเป็นผู้ระบุกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย โดยมีการวิเคราะห์ ตลาด ทบทวนแนวโน้มของตลาด กำหนดสินค้าใหม่ ที่จะผลิตและห้วงเวลาที่จะออกจำหน่าย และส่วน งานวิจัยจะติดตามแนวโน้มของเทคโนโลยี สำหรับ ใช้ในการออกแบบแผนที่นำทางเทคโนโลยีขององค์กร

บริษัท Honeywell Aerospace จัดทำแผนที่ นำทางโดยการนำข้อมูลจากส่วนธุรกิจและส่วนวิจัย มาผนวกรวมเป็นแผนแม่บทขององค์กร โดยจัดทำ เป็นแผนระยะ 10 ปี เพราะเป็นห้วงระยะเวลาที่ เหมาะสมสำหรับการประเมินแนวโน้ม ที่มีความ แม่นยำในระดับที่น่าไปใช้ประกอบการตัดสินใจด้าน การลงทุนในการพัฒนาแบบต่อยอด นอกจากนี้ ทางบริษัทมีการเก็บข้อมูลจากหลายแหล่งเพื่อใช้ ประกอบการพิจารณาเพื่อให้แน่ใจว่าเทคโนโลยี เป้าหมายของบริษัทมีความเป็นไปได้ในการพัฒนา ให้สำเร็จตรงตามความต้องการของตลาด ถึงแม้ว่า แผนที่นำทางจะสำเร็จแล้ว แต่ยังคงมีความจำเป็นที่ จะต้องมีการทบทวนและเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสม

กับสภาพแวดล้อมของตลาดหรือความต้องการของ ลูกค้า และที่สำคัญคือ ผลของการสร้างต้นแบบที่ได้รับ หรือการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยประกอบอื่น ๆ อันจะ ส่งผลต่อสินค้าที่จะส่งออกสู่ตลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เรื่องของการรับฟังข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะจาก หน่วยผู้ใช้

8. การพิจารณาคัดเลือกการลงทุนวิจัย

องค์กรควรมีเกณฑ์การพิจารณาคัดเลือกการ ลงทุนในโครงการวิจัย โดยที่เกณฑ์การคัดเลือกมี ความยืดหยุ่นและเข้มงวดตามความเหมาะสมกับ มูลค่าของโครงการ หลายองค์กรชั้นนำ เช่น บริษัท Lockheed Martin ผู้ผลิตเครื่องบินขับไล่แบบ F-22 และ F-35 ใช้ Stage Gate ดังรูปที่ 3 ในการพิจารณา คัดเลือกและกลั่นกรองข้อเสนอโครงการ รวมถึงการ ใช้เป็นเครื่องมือการปรับปรุงข้อเสนอโครงการให้ มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนการใช้ติดตาม และประเมินความคืบหน้าด้านการดำเนินงาน อีกหนึ่ง เครื่องมือที่กระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกาใช้ในการ คัดเลือกข้อเสนอโครงการวิจัยที่จะขอรับทุน คือ Technology Readiness Level (TRL) หรือระดับ ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยี โดยแบ่งออกเป็น ระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 9 ซึ่งในระดับที่ 9 เป็นระดับ ที่มีความพร้อมสูงสุดที่ผ่านการใช้งานในปฏิบัติการ จริงมาแล้ว โครงการที่มีระดับความพร้อมระหว่าง ระดับที่ 6 – 9 จะได้รับการพิจารณาเป็นอันดับแรก ส่วนโครงการที่มีความพร้อมในระดับที่รองลงมา จะผ่านการคัดเลือกหากเป็นเทคโนโลยีที่เป็น นวัตกรรมใหม่เท่านั้น



รูปที่ 3 การพิจารณาคัดเลือกและกลั่นกรองข้อเสนอโครงการ
แบบ Stage Gate [10]

9. บทสรุป

การขับเคลื่อนผลงานวิจัยด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ให้สำเร็จเป็นรูปธรรม ควรมีการศึกษาถึงกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งประกอบไปด้วย 8 ขั้นตอนสำคัญ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีกิจกรรมสำคัญที่ต้องพิจารณาและวางแผนอย่างรัดกุม จึงจะเป็นการยืนยันได้ว่าผลงานวิจัยสามารถก้าวผ่านไปสู่ความสำเร็จในการผลิตจำหน่ายหรือส่งมอบให้หน่วยนำไปใช้ ทั้งนี้ ปัจจัยสู่ความสำเร็จนั้นประกอบไปด้วยแผนกลยุทธ์องค์กรที่เป็นเครื่องมือในการระบุเทคโนโลยีเป้าหมายและการจัดลำดับความเร่งด่วน เป็นสิ่งสำคัญที่ควรเริ่มต้นทำในระยะแรก องค์กรชั้นนำจัดลำดับความเร่งด่วนของเทคโนโลยีเป้าหมายเชื่อมโยงกับยุทธศาสตร์ นโยบายและความต้องการของหน่วยงานผู้ใช้ที่กำหนดรายละเอียดอย่างชัดเจน โดยที่มีการทำงานร่วมกับผู้ถือผลประโยชน์ร่วมอย่างใกล้ชิดและสม่ำเสมอ ในด้านการลงทุนหรือการจัดสรรงบประมาณนั้น ควรจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การลงทุนกับเทคโนโลยีในระยะใกล้หรือการต่อยอดเทคโนโลยีเดิมที่มีอยู่แล้ว และ

การลงทุนกับเทคโนโลยีใหม่ จัดสรรงบประมาณ 80 % สำหรับงานวิจัยต่อยอด และอีก 20 % ใช้สำหรับงานวิจัยเทคโนโลยีใหม่ ไว้สำหรับการสร้างนวัตกรรมที่มีความแตกต่างจากสายของผลิตภัณฑ์เดิมเพื่อดำรงขีดความสามารถด้านการแข่งขัน โดยสัดส่วนนี้พิจารณาจากการประเมินความเสี่ยงและการคาดคะเนผลประกอบการภายใต้การวางแผนที่นำทางการวิจัยเทคโนโลยีและแผนการวิจัยต่อยอดระยะ 5 ปี โดยมีคณะทำงานที่ศึกษาความต้องการทางด้านเทคโนโลยีเพื่อเข้าสู่กระบวนการกลั่นกรองและคัดเลือก องค์กรมีการพิจารณาคัดเลือกการลงทุนในโครงการ โดยที่ระดับของการคัดเลือกมีความเข้มงวดมากขึ้นอยู่กับมูลค่าของโครงการหลายองค์กรใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Stage Gate และ Technology Readiness Level ในการคัดเลือกประเมินและติดตามเพื่อเพิ่มโอกาสที่จะขับเคลื่อนงานวิจัยไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้อย่างเป็นรูปธรรม

10. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.).

[2] พระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562

[3] Vidita Choudhry and Todd A. Ponzio, “Modernizing federal technology transfer metrics”, The Journal of Technology Transfer (2020) 45, pp.544–559.

[4] Mijung Jung, Yi-beck Lee and Heesang Lee, “Classifying and prioritizing the success and failure factors of technology commercialization of public R&D in South Korea: using classification tree analysis”, The Journal of Technology Transfer, 2015 (40), No. 5, pp.877.

[5] Department Of Industrial Promotion, <https://bsc.dip.go.th/th/category/quality-control/qs-newproductdevelopment>, 23 January 2020.

[6] Michael Sullivan (au), “Best Practices: Stronger Practices Needed to Improve DoD Technology Transition Processes”, DIANE Publishing, 2006.

[7] Armstrong, G. & Kotler, P., “Marketing: An Introduction”, 10th Edition. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2011.

[8] Highlights of GAO-17-499, a report to Congressional committees, “DEFENSE SCIENCE AND TECHNOLOGY Adopting Best Practices Can Improve Innovation Investments and Management”, June 2017.

[9] Rob Coppinge, “Hot-flow test complete for Falcon ram/scramjet engine”, 28 April

2009.

[10] Robert G. Cooper, “Winning at New Products: Creating Value Through Innovation Revised, Updated Edition”, Basic Books; Revised, Updated edition September, 2017.

การทดสอบภาคพลวัตระบบเซ็นเซอร์ และระบบสื่อสารสำหรับจรวดนำวิถี

นิธิ อนุกุลสัมพันธ์^{1*} ปัทพงษ์ ศรีโพธิ¹ สรภพ สุภชัยพานิชพงศ์¹ และ มาลินดา หงษ์ทอง¹

วันที่รับ 29 กรกฎาคม 2563 วันที่แก้ไข 24 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 31 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นการแสดงผลทดสอบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเซ็นเซอร์และระบบสื่อสารที่เตรียมการสำหรับเทคโนโลยีจรวดนำวิถีของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยอาศัยการทดสอบเบื้องต้นกับจรวดดัดแปรสภาพอากาศที่มีสมรรถนะน้อยกว่าจรวดนำวิถี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบ Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) ที่มีจำหน่าย 2 ชนิด ของระบบโทรมาตรที่นำมาติดตั้งกับลูกจรวด รวมถึงตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์ ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ Inertial Measurement Unit (IMU) และค่า Inertial Navigation System (INS) ที่คำนวณจากไมโครโปรเซสเซอร์ ที่ติดตั้งบนลูกจรวด จะถูกส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สาย มาบันทึกข้อมูลไว้เพื่อให้นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการยิงทดสอบกับค่าจากการออกแบบลูกจรวดต่อไปและนำไปพัฒนาต่อยอดไปสู่ระบบนำวิถีของลูกจรวด

ผลการทดสอบปรากฏว่าระบบสื่อสารที่ใช้ทั้ง 2 ชนิด สามารถรับส่งข้อมูลได้ตลอดแนวซิปนวิถีและบันทึกค่าเก็บไว้ได้ ค่าความเร่งและความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ IMU มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองที่เวลาเดียวกัน แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์ที่ทำการติดตั้งไปกับจรวดมีย่านการวัดไม่สูงพอกับค่าสมรรถนะของจรวด ทำให้ค่าที่แสดงผลมีค่าแค่ค่าสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้ ซึ่งค่าความเร่งสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้มีค่า 30g และความเร็วเชิงมุมสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้มีค่า 4,000 องศาต่อวินาที โดยเมื่อทำการยิงทดสอบเมื่อจรวดมีค่ามากเกินกว่าค่าสูงสุดของเซ็นเซอร์ค่าต่าง ๆ จะถูกบันทึกได้แค่ค่าสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้ เมื่อนำค่าที่วัดได้มาคำนวณเทียบกับค่าจากการจำลอง พบว่าในช่วงต้นคาระยะทางของจรวดและค่ามุมต่าง ๆ มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจากการจำลอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนบางส่วนมีผลมาจากการติดตั้งเซ็นเซอร์ภายในลูกจรวดมีความแออัดและเซ็นเซอร์ยังไม่ได้ทำการปรับเทียบครบถ้วน และหลังจากค่าของจรวดมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดของเซ็นเซอร์ การนำค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์มาคำนวณจะทำให้ผลไม่ถูกต้อง

คำสำคัญ: จรวดดัดแปรสภาพอากาศ, ระบบนำวิถีแบบเฉื่อย, โทรมาตร

¹ ส่วนงานวิศวกรรมระบบควบคุมและการสื่อสาร สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

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

Dynamic Test of Rocket's Sensor and Communication Subsystems

Nithi Anukulsumpan ^{1*} Pattapong Sripho ¹ Soraphob Suparchaiparnitchapong ¹
and Marinda Hongthong ¹

Received 29 July 2020 Revised 24 August 2020 Accepted 31 August 2020

Abstract

This paper presents the test results of hardware and software for sensor and communication subsystems of Defence Technology Institute's guided rocket. The whole system was initially tested on a smaller and less capable weather-modification rocket platform. Performance of two Frequency Hopping Spread Spectrum COTS telemetry modules were compared and verified for their suitability in harsh environmental operation, especially their sensors and communication electronics. Telemetry data from the Inertial Measurement Unit (IMU) was logged and the Inertial Navigation System (INS) data was calculated from guidance processor before being transmitted wirelessly to a ground station. These empirical data were recorded for further analysis and compared against those from the simulation as part of rocket guidance system development.

It was found that both COTS telemetry modules had comparable performance and could acquire all data through most of the flights. The recorded IMU inflight data, the acceleration and the angular velocity of the same instance, showed similar trends to the simulated values and some saturation were found at the upper range limit of the component, i.e. 30g for the acceleration and 4000 degrees/sec for the angular velocity. After some calculations of the measured data, the calculated values of the displacement and various angle data were found relatively closed to simulated values. However, at later time, the errors were escalated due to the fact that the fixation of the sensors were not well centered and the sensors were not thoroughly calibrated, which led to incorrect calculation at the later phase.

Keywords: Weather-modification Rocket, Inertial Measurement Unit, Inertial Navigation System, Telemetry

¹ Control and Communication Division - RCC, Defence Technology Institute.

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

1. ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศได้ให้ความร่วมมือกับกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ในการดำเนินโครงการพระราชดำริฝนหลวงมาอย่างต่อเนื่องตามวัตถุประสงค์การจัดตั้งสถาบัน [1] ในการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีป้องกันประเทศด้วยการประสานความร่วมมือด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศกับหน่วยงานของรัฐ ดังนั้นจึงมีความเชี่ยวชาญด้านการวิจัยเทคโนโลยีทางด้านจรวด มีความพร้อมทั้งด้านเครื่องมือเครื่องจักร และบุคลากรที่มีประสบการณ์ และมีขีดความสามารถในการพัฒนาระบบจรวดดัดแปรสภาพอากาศที่บรรจุสารซิลเวอร์ไอโอไดด์เพื่อใช้อย่างปลอดภัยในสภาพอากาศของประเทศไทยได้

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดในการสร้างความร่วมมือระหว่างสามหน่วยงานคือ กรมฝนหลวงและการบินเกษตร สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ โดยกรมฝนหลวงและการบินเกษตร กำหนดความต้องการทางเทคนิคให้สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศออกแบบและผลิตจรวด เพื่อบรรจุสารซิลเวอร์ไอโอไดด์สำหรับทำฝนจากเมฆเย็นที่ได้รับการวิจัยพัฒนาจากศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ ซึ่งเป็นการบูรณาการจุดแข็ง ทั้งด้านกำลังพล ความรู้เทคโนโลยี และประสบการณ์ ในการพัฒนาจรวดและอุปกรณ์ไฟโรเทคนิคสำหรับใช้เสริมในการกิจปฏิบัติการฝนหลวง

วัตถุประสงค์หลักของความร่วมมือดังกล่าวข้างต้นคือ เพื่อเสริมสร้างองค์ความรู้และพัฒนาระบบจรวดดัดแปรสภาพอากาศที่มีสมรรถนะสูงเพียงพอสำหรับการใช้ในการกิจยับยั้งพายุลูกเห็บหรือทดลองทำฝนจากเมฆเย็น ในสภาพอากาศของประเทศไทย การดำเนินการภายใต้โครงการวิจัยและพัฒนาจรวดดัดแปรสภาพอากาศจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับตรวจวัดการ

ทำงานของลูกจรวด เพื่อยืนยันความถูกต้องสมบูรณ์ของระบบส่งจุดพลุส่องสว่าง (Flare) และปล่อยระบบร่มนิรภัยสำหรับจรวดดัดแปรสภาพอากาศ จึงดำเนินการออกแบบวิจัยและพัฒนาระบบโทรมาตร (Telemetry) หรือ TM สำหรับตรวจวัดการทำงานของลูกจรวดขึ้น เพื่อทำการส่งข้อมูลต่าง ๆ จากลูกจรวดมาบันทึกไว้ และนำมาใช้วิเคราะห์และแสดงผลการทำงานของลูกจรวดต่อไป

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นารายงานผลทดสอบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเซ็นเซอร์และระบบสื่อสาร ที่เตรียมการสำหรับเทคโนโลยีจรวดนำวิถีของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยอาศัยการทดสอบเบื้องต้นกับจรวดดัดแปรสภาพอากาศที่มีสมรรถนะน้อยกว่าจรวดนำวิถี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบ Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) ที่มีจำนวน 2 ชนิด ของระบบโทรมาตรที่นำมาติดตั้งกับลูกจรวดว่าสามารถทำการรับส่งและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ จากลูกจรวดเมื่อทำการยิงทดสอบได้ตลอดแนวซิปนวิถีได้หรือไม่ รวมถึงตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์ IMU และค่า INS ที่คำนวณจากไมโครโพรเซสเซอร์ที่ติดตั้งบนลูกจรวด ซึ่งจะถูกส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สายมาบันทึกข้อมูลไว้เพื่อให้นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการยิงทดสอบกับค่าจากการออกแบบลูกจรวดต่อไปและนำไปพัฒนาต่อยอดไปสู่ระบบนำวิถีของลูกจรวด

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบเซ็นเซอร์ และระบบสื่อสารสำหรับลูกจรวด

การออกแบบ Guidance, Navigation and Control Module ใน [2] รายงานผลการทดสอบทั้งภาคพื้นและภาคอากาศของจรวดนำวิถีซึ่งได้เลือกแนวคิดการออกแบบที่นำระบบย่อยต่าง ๆ ที่จำเป็นของซิปนาวิจมาประกอบรวมกันโดยยังแยกออกเป็นส่วน ๆ ทั้งนี้ ต้อง

ให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำหนักของหัวรบและน้ำหนักรวมของตัวจรวด ซึ่งรวมระบบนำวิถี ระบบนำร่อง และส่วนควบคุมตัวจรวด การพัฒนาเซ็นเซอร์ และระบบสื่อสารสำหรับลูกจรวดตามรายงานใน [3] อธิบายการออกแบบวิจัยและพัฒนาระบบ TM - CAM สำหรับตรวจวัดการทำงานของลูกจรวดขึ้น เพื่อทำการส่งสัญญาณภาพบนตัวจรวดลงสู่ภาคพื้น เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์และแสดงผลการทำงานของลูกจรวด และใน [4] รายงานผลการทดสอบความสมบูรณ์ของระบบ TM ที่ติดตั้งกับลูกจรวดจรวดดัดแปรสภาพอากาศ และผลการทดสอบภาคพลวัตสำหรับตรวจวัดการทำงานของระบบส่งจุดพลุส่องสว่างและปล่อยระบบร่มนิรภัย

2.1 วรรณกรรมด้านการติดตามการนำวิถีของลูกจรวด

ในงาน [5] มุ่งเน้นการศึกษา Rocket - towed Net System (RTNS) ผ่านการจำลองใน MATLAB และได้มาซึ่งกระบวนการปรับใช้เชิงตัวเลขของ RTNS นอกจากนี้ยังได้ออกแบบต้นแบบและทดสอบการบินในสนามใช้อาวุธการวิเคราะห์เส้นโค้งขีปนาวุธ และพารามิเตอร์พลวัตสำคัญ 4 อย่าง ใช้การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและข้อมูลการทดสอบ การจำลองมีความถูกต้องระดับดีเมื่อใช้อธิบายพฤติกรรมโดยเฉลี่ยของพารามิเตอร์พลวัตที่วัดได้ด้วยอัตราความผิดพลาดที่ยอมรับได้ในส่วนหลักของเที่ยวบิน และจัดการจัดการกว้างในช่วงการไหลพลวัตรุนแรง ในขณะเดียวกันแบบจำลองนี้ทำงานได้ดีโดยเป็นคำแนะนำเชิงทฤษฎีสำหรับการออกแบบการทดลอง และประสบความสำเร็จในการทำนายปัจจัยทางวิศวกรรมที่สำคัญในระหว่างกระบวนการปรับใช้ RTNS เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงทางวิศวกรรมโดยประมาณ

ระยะยิ่งที่ไกลขึ้นของจรวดหลายลำกล้องทำได้โดยการลดน้ำหนักและเพิ่มมอเตอร์จรวดให้ไปได้ไกลยิ่งขึ้น การคงสภาพประสิทธิภาพด้านความถูกต้องของระบบที่ระยะยิ่งไกล ๆ ต้องเพิ่มชุดควบคุมและ

นำวิถีด้วย GPS/INS เข้าไปยังส่วนปลายของจรวด เกิดส่วนปลายโค้งคล้ายหลังคาของจรวด ระบบนำร่องด้วยความแม่นยำที่อธิบายในรายงาน [6] ประกอบด้วย Guidance Set (GS) ที่ประกอบไปด้วย Honeywell IMU แบบ HG1700 Ring Laser Gyro (RLG) ของ Honeywell เครื่องรับสัญญาณ GPS แบบ Rockwell Collins SAASM - based NavStrikeTM และคอมพิวเตอร์และแหล่งพลังงานสำรองพัฒนาขึ้นโดย Honeywell

บทความ [7] เสนอการประมาณการเชิงวิเคราะห์การเคลื่อนที่วิถีโค้งแบบโปรเจกต์ไลในรูปแบบ 2D และ 3D คร่าว ๆ โดยใช้แบบจำลอง Linear Drag และค้นหาลักษณะที่ชี้แจงแผนต่างกันสำหรับแต่ละวิถีโค้งนั้น ๆ ถึงแม้เส้นโค้งที่ได้จะเป็นเพียงแค่ประมาณการ แต่ยังสามารถแสดงถึงคุณลักษณะเฉพาะของเส้นโค้งจริงได้ขณะการตกอิสระภายใต้อิทธิพลของตัวแปรลม แรงดึงดูดศูนย์กลาง และความเร็วสุดท้าย ขณะที่สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับแสดงค่าเส้นโค้งและการวางแผนก็ง่ายพอที่จะรันในอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สมัยใหม่ได้ทั้งหมด รวมทั้งคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้แนวทางที่เสนอไว้นี้มีประโยชน์มากสำหรับการประยุกต์ใช้ในเวลาจริง

การนำร่องของยูทโรปกรณณ์แม่นยำปล่อยด้วยปืนโดยใช้เทคโนโลยีที่พอจัดหาได้ถูกนำมาศึกษาใน [8] อัลกอริทึมประกอบด้วยการใช้แผนเซ็นเซอร์ความเฉื่อยราคาถูกลงและ GPS ที่มีอยู่ทั่วไป การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดในการนำร่อง อันเป็นผลมาจากอัลกอริทึมปริมาณงานในช่วงหนึ่งต่ำ โดยใช้เซ็นเซอร์ด้านความเฉื่อยที่จัดหาได้ก็เพียงพอที่จะเพิ่มความถูกต้องของระบบยูทโรปกรณณ์ บทความ [9] อธิบายความคืบหน้าจากรุ่นที่หนึ่ง SiIMU01/spl trade/ ซึ่งอยู่ระหว่างการผลิต ไปยังรุ่นที่สอง SiIMU02/spl trade/ เป็นขั้นตอนถัดมาตามแผนที่นำทางการพัฒนาให้ได้ MEMS IMU ขนาดเล็กและสมรรถนะดีขึ้นในอนาคต สถาปัตยกรรม IMU ถูกนำเสนอไว้รวมทั้งผลสมรรถนะของต้นแบบแรกสำหรับ

IMU ความต้องการเฉพาะและการแก้ไขปัญหาโดยการ
ประกอบรวมเทคโนโลยีเซ็นเซอร์และสถาปัตยกรรมของ
IMU ที่ใช้ใน SiIMU02/spl Trade/ ฤกษ์กมาอธิบาย

2.2 วรรณกรรมด้านการสื่อสารระหว่างลูกจรวดกับสถานี ควบคุมภาคพื้น

การอภิปรายผลการวิจัยใน [10] นำเสนอการออกแบบ
และติดตั้งระบบโทรมาตรที่ใช้จริง ประหยัด และง่าย
เพื่อรวบรวมและถ่ายทอดพารามิเตอร์ด้านสิ่งแวดล้อม
เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น จากที่ตั้ง
ในชนบทไกลกลับมายังหน่วยประมวลผลและแสดงผล
การถ่ายโอนข้อมูลใช้ 3 กรรมวิธี คือ วิธีแรกใช้การเชื่อมต่อ
สายสัญญาณวิทยุ ซึ่งนำไปใช้กับงานนอกภาคสนาม
และพื้นที่ห่างไกลได้ และอีกสองวิธีใช้เครือข่าย GPRS
และเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อถ่ายโอนข้อมูลที่รวบรวม
ไว้กลับไปยังเป้าหมายที่ต้องการ

บทความ [11] นำเสนอแบบจำลองพลวัตความแม่นยำ
สูง ซึ่งกระบวนการพลวัตทั้งหมดหากทำให้เข้าใจได้ง่าย
ลงไปถึงรายละเอียดจะช่วยเพิ่มสมรรถนะของจรวดได้
กระบวนการชดเชยความเร็วลมจึงนำไปตรวจสอบ
เพื่อให้ได้พารามิเตอร์การปล่อยจรวดอย่างรวดเร็วและ
ถูกต้อง กรรมวิธีนี้หาค่าได้จากการถ่วงน้ำหนักของลม
และกรรมวิธีการค้นหารูปแบบ เมื่อใช้ผลการจำลอง
ดังกล่าวนี้แนวทางที่เสนอไว้จะประเมินได้ว่ามีประสิทธิภาพ

ใน [12] MEMS IMU โครงสร้างกลวงความแม่นยำ
สูงราคาต่ำได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อวัดอัตราเชิงมุมม้วน
ของกระสุนปืนหมุนรอบสูง MEMS แบบกลวงได้รับการ
ออกแบบโครงสร้างของการกำหนดค่าที่ไม่ใช่เซนทรอยด์
ของมาตรวัดความเร่งหลายตัว ความเป็นไปได้ของวิธีการ
ตรวจสอบโดยการจำลองเชิงตัวเลข ด้วยการใช้อุปกรณ์
MEMS IMU เพื่อสร้างแพลตฟอร์มการจำลองแบบ
กึ่งกายภาพความแม่นยำของการแก้ปัญหาของอัตรา
เชิงมุมจะถูกวิเคราะห์โดยการจำลองความเร็วการหมุน

ที่แตกต่างกันของกระสุน ทำการทดสอบโปรเจ็คไคโรด้วย
MEMS IMU โครงสร้างกลวง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า
MEMS IMU โครงสร้างกลวง เหมาะสมและ
เป็นไปได้และสามารถคำนวณอัตราเชิงมุมม้วนในเวลา
จริง ดังนั้น MEMS IMU โครงสร้างกลวงที่ออกแบบมา
ในบทความนี้มีค่าทางวิศวกรรมบางอย่างสำหรับ
โปรเจ็คไคโรหมุนรอบสูง

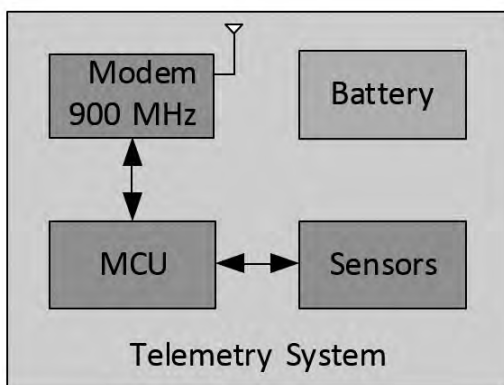
รายงาน [13] นำเสนอวิธีการตรวจสอบความสมบูรณ์
และบูรณาการสำหรับ IMU และ GPS วิธีการที่ใช้กับ
ข้อมูลจาก Maxus Sounding Rocket ที่ใช้สำหรับการ
การวิจัย Microgravity สิ่งสำคัญในการกำหนดตำแหน่ง
จรวดในระหว่างการปล่อยจรวดคือเพื่อให้แน่ใจว่า
ตำแหน่งลงจอดที่ปลอดภัย ตอนนี้นำร่องขึ้นอยู่กับการ
บูรณาการ IMU เท่านั้น การนำ GPS เข้ามาใช้ช่วยเพิ่ม
ความแม่นยำของตำแหน่ง แต่มีความจำเป็นในการป้องกันการ
วัดระยะของดาวเทียมผิดปกติ การตรวจสอบลำดับ
การวัดค่าดังกล่าวช่วยให้มั่นใจในการทดสอบมากขึ้น
และงานวิจัย [14] ได้นำเสนอระบบโทรมาตรโดยใช้
กระบวนการทัศน์ IoT ซึ่งอ้างอิงสถาปัตยกรรม IoT 5 ชั้น
จากการทบทวนวรรณกรรม ระบบที่เสนอนั้นมีต้นทุนต่ำ
และสามารถผนวกและปรับขนาดได้ในระบบ
ตรวจสอบอื่น ๆ

3. การทำงานและส่วนประกอบของระบบโทรมาตร ของลูกจรวด

การทำงานของระบบ TM มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน
ทำงานร่วมกันคือ ระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวดซึ่งจะ
ทำหน้าที่ในการอ่านค่าพารามิเตอร์จากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ
ที่ถูกติดตั้งไว้บนลูกจรวดและส่งข้อมูลดังกล่าวลงไปยัง
สถานีรับส่งภาคพื้น ซึ่งจะทำหน้าที่นำข้อมูลดังกล่าวมา
แสดงผลและทำการเก็บบันทึกผลเพื่อนำไปวิเคราะห์
ต่อไป อุปกรณ์และการทำงานเป็นดังต่อไปนี้

3.1 ระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวด

หลักการทำงานคือ หน่วยประมวลผลหลักของระบบ จะทำการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ Barometric Pressure Sensor และ IMU จากนั้นหน่วยประมวลผลหลัก (Micro Processor Unit) จะนำค่าดังกล่าวมาคำนวณเป็นค่า การนำวิถีด้วยความเฉื่อย (Inertial Navigation System) หรือ INS และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผ่านทางสัญญาณ คลื่นความถี่ที่ 900 MHz ทุก ๆ 60 มิลลิวินาที ซึ่งระบบ จะมีการเชื่อมต่อดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังแสดงระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวด

เนื่องจากจรวดที่ใช้แตกต่างกัน 2 ลูก จึงจัดทำอุปกรณ์ รับส่งสัญญาณบนลูกจรวดเป็น 2 แบบ โดย Communication Modem แบบที่ 1 สำหรับจรวดลูกที่ 1 ใช้ XTend 900 MHz 1 วัตต์ กับ Dipole Antenna ส่วน Communication Modem แบบที่ 2 สำหรับจรวดลูกที่ 2 ใช้ RFD900 1 วัตต์ กับ Dipole Antenna ส่วน Flight Telemetry Controller & Sensors ใช้ MCU STM32F7 พร้อมเซ็นเซอร์ IMU และ Barometric แบตเตอรี่รุ่น Li-on 2-Cell (7.4V) 5200 mAh

3.2 สถานีรับส่งภาคพื้น

การทำงานของโปรแกรมในสถานีรับส่งภาคพื้น ทำการอ่านข้อมูลที่รับได้จากลูกจรวดทางสัญญาณคลื่น ความถี่ที่ 900 MHz ทุก ๆ 60 มิลลิวินาที และนำมา

แสดงผลผ่านทาง GUI ของโปรแกรมพร้อมทำการบันทึก ข้อมูลดังกล่าวเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบจะมีการ



รูปที่ 2 แผงผังแสดงระบบรับส่งสัญญาณภาคพื้น

อุปกรณ์รับสัญญาณจากลูกจรวดบนสถานีรับส่งภาคพื้น สำหรับรับสัญญาณจรวดลูกที่ 1 ใช้ Communication Modem แบบที่ 1 ประกอบด้วย XTend 900 MHz 1 วัตต์ และ Patch Antenna ส่วนอุปกรณ์สำหรับรับ สัญญาณจรวดลูกที่ 2 ใช้ Communication Modem แบบที่ 2 เป็น RFD900 1 วัตต์ และ Patch Antenna เช่นเดียวกัน คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ภาคพื้น

4. การทดสอบระบบโทรมาตรของลูกจรวด

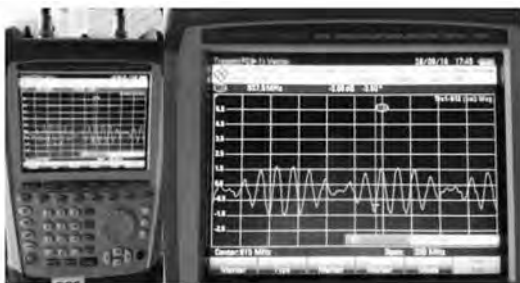
4.1 ออกแบบชิ้นส่วนชุดระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวด

ทำการออกแบบและจำลองการวาง Layout ก่อนทำชิ้นงานจริงจากคอมพิวเตอร์ เพื่อประเมินขนาดว่าจะนำเข้าไปประกอบในจรวดได้ ตามผลการออกแบบในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงการออกแบบ Layout ของระบบ TM

ทำการทดสอบสายสัญญาณวิทยุ (RF) ด้วยเครื่อง Spectrum Network Analyzer ตรวจสอบประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ และทำการทดสอบกำลังสัญญาณวิทยุที่ออกมาจาก Modem ว่าสามารถใช้งานได้ แสดงการทดสอบสายสัญญาณความถี่วิทยุและโมเด็มในรูปที่ 5



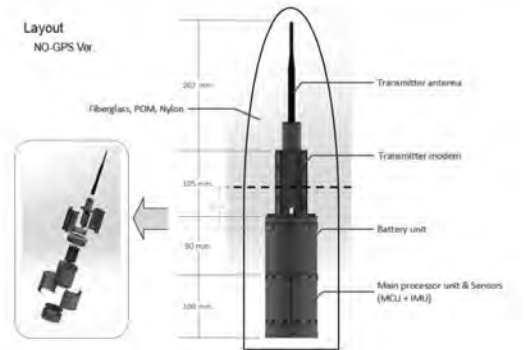
รูปที่ 4 แสดงการออกแบบ Layout ของระบบ TM

ทำการทดสอบประสิทธิภาพแบตเตอรี่ตามข้อกำหนดและกำลังไฟฟ้าว่าสามารถจ่ายได้เพียงพอหรือไม่ แสดงการทดสอบแบตเตอรี่โดยทดสอบความสมบูรณ์ของแบตเตอรี่ทั้งแบบครึ่งละ 1 เซลล์ และแบบครึ่งละ 2 เซลล์ ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดสอบแบตเตอรี่ทั้ง 2 แบบ

แสดงการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนชุดระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวดในรูปที่ 7



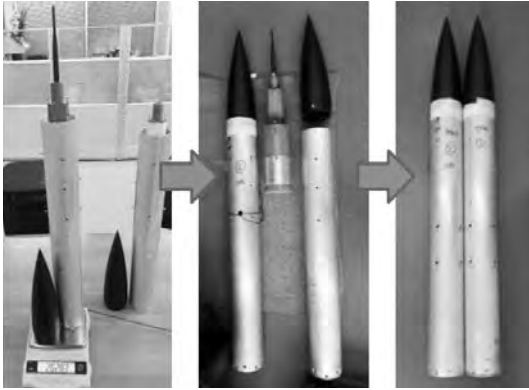
รูปที่ 7 แบบและชิ้นส่วนระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวด

แสดงการประกอบชุดระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวดในรูปที่ 8



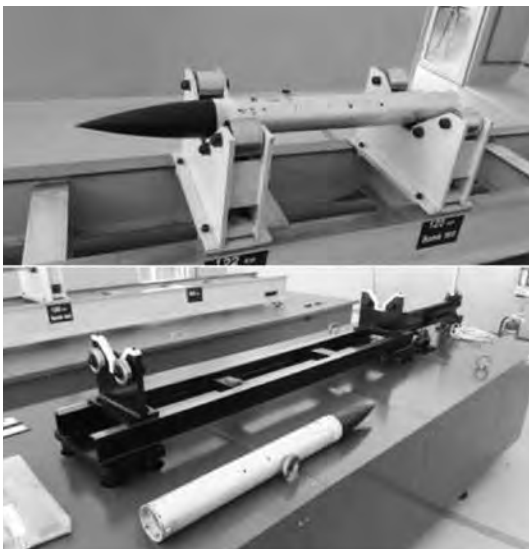
รูปที่ 8 ระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวด

แสดงการประกอบรวมชุดระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวดเข้ากับลูกจรวดในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ระบบรับส่งสัญญาณประกอบเข้ากับลูกจรวด

แสดงการถ่วงน้ำหนักและวัดหาค่าศูนย์ถ่วงน้ำหนักของลูกจรวดในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การถ่วงน้ำหนักและจุดศูนย์ถ่วงน้ำหนัก

4.2 การออกแบบและทดสอบชุดสถานีรับส่งภาคพื้น

ชุดสถานีรับส่งภาคพื้นตามแบบจำลองในรูปที่ 11 มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) สำหรับใช้ติดตั้งเสาอากาศแบบ Patch 2 จาน

2) ผลิตจากวัสดุที่ไม่เป็นโลหะเพื่อลดการรบกวนสายสัญญาณวิทยุ

3) มีช่วงการปรับตั้งมุมเสาอากาศตั้งแต่ -20 ถึง 20 องศา

4) มีชุดแสดงมุมสำหรับการปรับตั้งมุมด้านหน้าเครื่อง

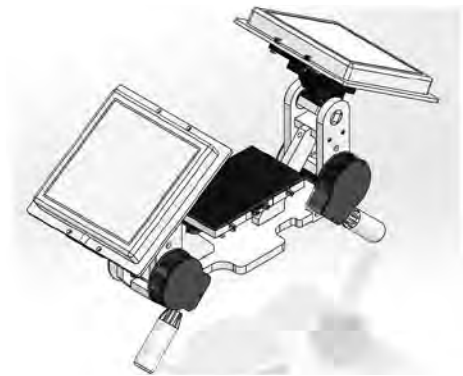
5) มีชุดระบบสื่อสารไร้สายความถี่ย่าน 900 MHz แบบ RFD900 1 ชุด

6) มีชุดระบบสื่อสารไร้สายความถี่ย่าน 900 MHz แบบ XTend 900 2 ชุด

7) เชื่อมต่อระบบสื่อสารเข้ากับชุดคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB

8) มีแบตเตอรี่สำหรับระบบสื่อสาร เปิด/ปิด ผ่านสวิตช์

9) สามารถติดตั้งกับ Tripod ได้ง่าย



รูปที่ 11 ชุดสถานีรับส่งภาคพื้นติดตั้งบน Tripod

4.3 การทดสอบ

4.3.1 แนวความคิดในการทดสอบ

1) การทดสอบทำได้โดยการติดตั้งสถานีรับภาคพื้นไว้ที่จุดตั้งยิงและปรับตั้งทิศทางของเสาอากาศให้ครอบคลุมแนวซิปนวิถี

2) การเก็บข้อมูลการทดสอบใช้ซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์ โดยพัฒนาขึ้นสำหรับรับข้อมูลจากลูกจรวดและบันทึกค่าในรูปแบบ log file ในคอมพิวเตอร์

4.3.2 การทดสอบ

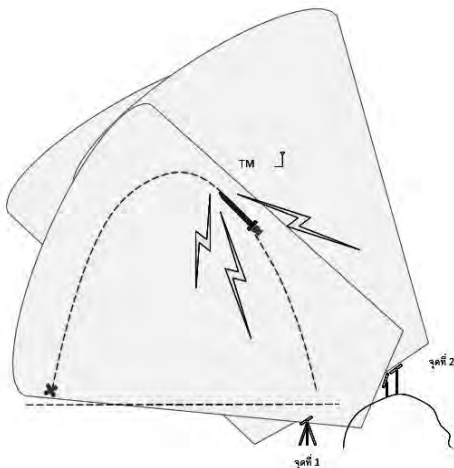
1) ทดสอบระบบโดยรวมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบก่อนนำจรวดประกอบเข้ากับมอเตอร์จรวดตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 ทดสอบจรวดก่อนประกอบเข้ากับมอเตอร์

2) ติดตั้งสถานีรับส่งภาคพื้น 2 จุด เพื่อให้การรับสัญญาณครอบคลุมตลอดเส้นทางขึ้นวิถีของลูกจรวด ดังนี้

จุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่งหลังจุดยิงและปรับเล็งเสาอากาศไปในทิศทางและมุมของเสาอากาศให้ตรงกับทิศและมุมยิงแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 สถานีรับส่งภาคพื้นจุดที่ 1 และจุดที่ 2

จุดที่ 2 ติดตั้งที่ตำแหน่งจุดสังเกตการณ์ด้านหลังแนวขึ้นวิถีบนยอดเขาสูง จำนวน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ปรับเล็งเสาอากาศไปที่ทิศทางแนวขึ้นวิถีช่วงและตั้งมุมเสาอากาศหงายขึ้น 30 องศา และชุดที่ 2 ปรับเล็งเสาอากาศไปที่ทิศทางแนวขึ้นวิถีช่วงและตั้งมุมเสาอากาศหงายขึ้น 50 องศา แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 สถานีรับส่งภาคพื้นจุดที่ 2

3) ประกอบและเปิดระบบรับส่งสัญญาณบนลูกจรวดเข้ากับมอเตอร์จรวด

4) ยิงทดสอบและบันทึกผล

5. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

ผลการยิงทดสอบระบบโทรมาตรของลูกจรวดดัดแปรสภาพอากาศ สถานีรับส่งภาคพื้นจุดที่ 1 และจุดที่ 2 สามารถรับสัญญาณข้อมูลจากลูกจรวดได้ดีทั้ง 2 จุด ครอบคลุมตลอดแนวขึ้นวิถีและทำการเก็บบันทึกผลได้ดังนี้

5.1 จรวดลูกที่ 1 ด้วยระบบสื่อสารแบบ XTend 900

ผลการทดสอบอุปกรณ์รับสัญญาณจรวดลูกที่ 1 ใช้ Communication Modem แบบที่ 1 ประกอบด้วย XTend 900 MHz 1 วัดต์ และ Patch Antenna ดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 15 จากกราฟ Gyro จะเห็นว่าจรวดลูกที่ 1 เป็นแบบ Spinning Rocket ค่า Gyro มี 3 แกน ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของจรวดคือ Gx

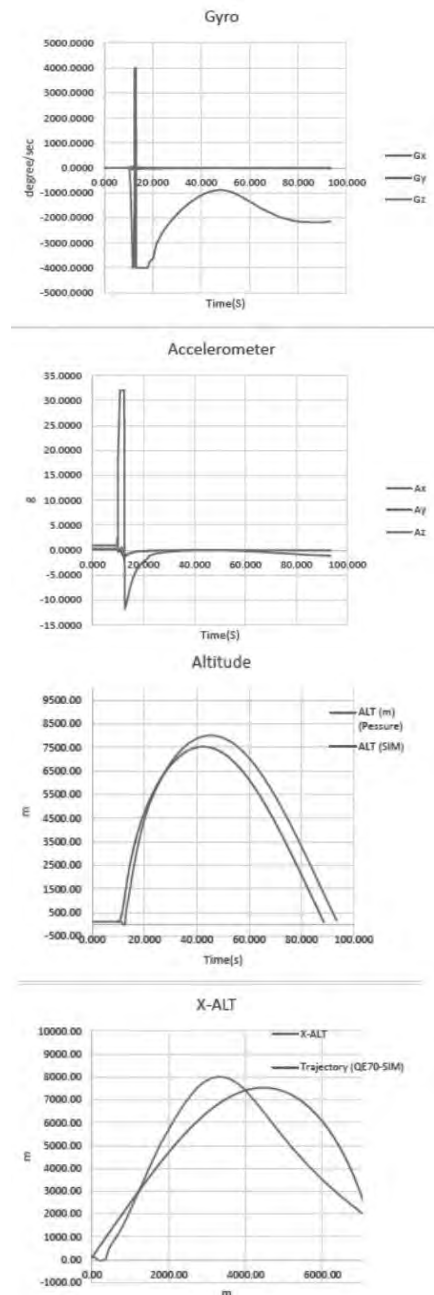
เป็นการหมุนแนว roll, Gy เป็นการหมุนแนว pitch และ Gz เป็นการหมุนแนว yaw โดยที่ Gx การหมุนของแกนนี้ทำให้จรวดเอียงไปทางใดทางหนึ่งแกนนี้ควบคุมการหมุนควง หรือ Roll Movement ของจรวด, Gy การหมุนของแกนนี้จะทำให้หัวจรวดยกขึ้น (Pitch Up) หรือกดลง (Pitch Down) เป็นผลให้จรวดได้ระดับขึ้นหรือลดระดับลง แกนนี้ควบคุมการเชิดหัวขึ้นลงของจรวด และ Gz การหมุนของแกนนี้จะทำให้หัวจรวดหันไปทางซ้ายหรือขวา แกนนี้ควบคุมการส่ายหัวของจรวด หรือ Yaw Movement ซึ่งจะเห็นว่าจรวดลูกที่ 1 ค่า Gx จรวดมีการหมุนควงอ้อมตัวที่ 4,000 องศา/วินาที ซึ่งผลดังกล่าวเป็นค่าสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้ ส่วนค่า Gy เกิดขึ้นน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าจรวดลูกที่ 1 มีเสถียรภาพสูง และค่า Gz มีค่า 0 องศา/วินาที จรวดเคลื่อนที่ด้วยความเสถียรไม่มีการเบี่ยงซ้ายหรือขวา

จากกราฟรูปที่ 15 กราฟ Accelerometer ค่าความเร่ง มี 3 แกน คือ Ax เป็นความเร่งในแนวแกน x ของลำตัวจรวด, Ay เป็นความเร่งในแนวแกน y ของลำตัวจรวด และ Az เป็นความเร่งในแนวแกน z ของลำตัวจรวด ซึ่งจะเห็นว่าจรวดลูกที่ 1 ค่า Ax จรวดมีค่าความเร่งอ้อมตัวที่ประมาณ 30 g ซึ่งผลดังกล่าวเป็นค่าสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้ ส่วนค่า Ay และ Az เกิดขึ้นน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าจรวดลูกที่ 1 มีเสถียรภาพสูง จรวดเคลื่อนที่ไปในแนวด้านหน้าของจรวด

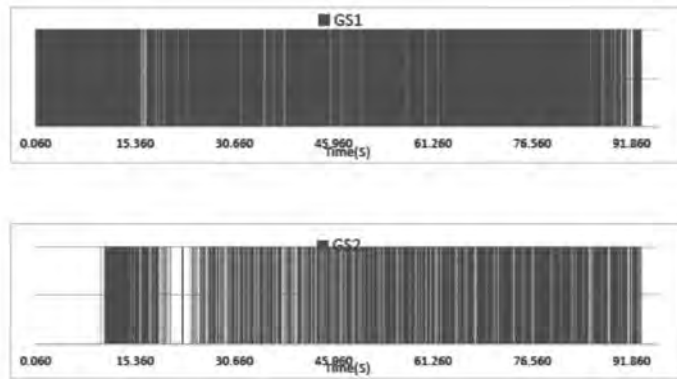
ค่าที่วัดได้จาก IMU มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองที่เวลาเดียวกัน และค่าความสูงที่วัดและคำนวณได้จากเซ็นเซอร์แบบ Barometric Pressure มีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองที่เวลาเดียวกัน และจากจุดเริ่มต้นของกราฟมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการออกตัวของจรวด (Initial Error)

จากรูปที่ 16 เป็นการแสดงจำนวนครั้งที่สถานีรับส่งภาคพื้นจุดที่ 1 และ 2 ได้จากการรับสัญญาณที่ส่ง

มาจากลูกจรวด โดยเทียบกับเวลาตั้งแต่ระบบเริ่มทำงานตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถบอกได้ว่า ระบบสื่อสารแบบ XTend 900 มีประสิทธิภาพที่ดี และมีความสามารถรับส่งข้อมูลได้ตลอดแนวซิปนวิถีดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 15 กราฟแสดงผลการยิงทดสอบจรวดลูกที่ 1



รูปที่ 16 แสดงค่าจำนวนข้อมูลที่ได้รับจากจรวดลูกที่ 1

5.2 จรวดลูกที่ 2 ด้วยระบบสื่อสารแบบ RFD900

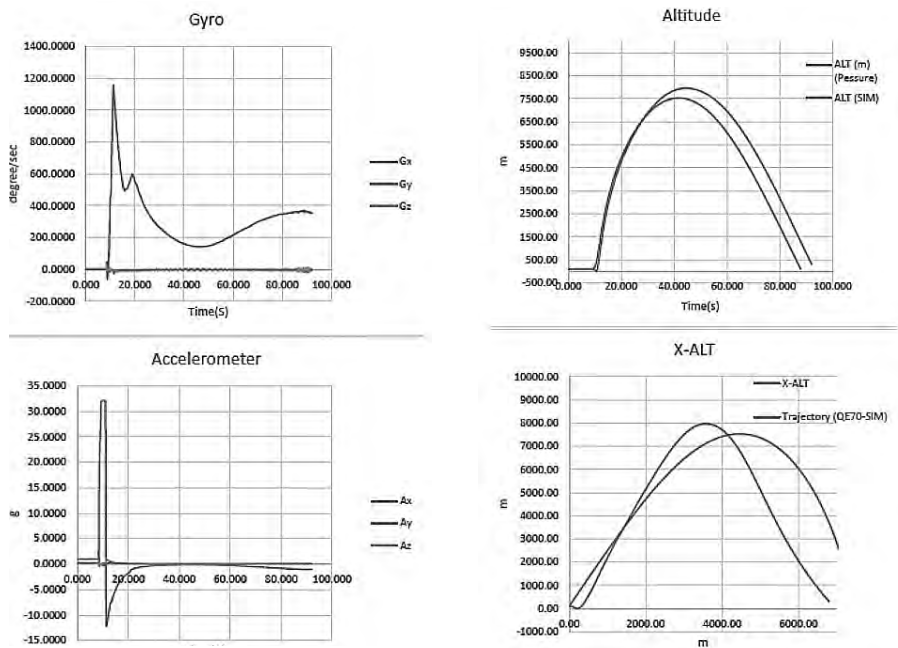
ผลการทดสอบอุปกรณ์รับสัญญาณจรวดลูกที่ 2 ใช้ Communication Modem แบบที่ 1 ประกอบด้วย RFD 900 MHz 1 วัดได้ และ Patch Antenna ดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 17 จากกราฟ Gyro โดยจรวดลูกที่ 2 เป็นแบบ Non-spinning Rocket จะเห็นว่าจรวดลูกที่ 2 มีค่า Gx จรวดมีการหมุนควงอ้อมตัวที่ 1,200 องศา/วินาที ซึ่งต่ำกว่าค่าของจรวดลูกที่ 1 ส่วนค่า Gy เกิดขึ้นน้อยมากแสดงให้เห็นว่าจรวดลูกที่ 2 มีเสถียรภาพสูง และค่า Gz มีค่า 0 องศา/วินาที จรวดเคลื่อนที่ด้วยความเสถียรไม่มีการเบี่ยงเบนเช่นกัน

จากกราฟรูปที่ 17 กราฟ Accelerometer จะเห็นว่าจรวดลูกที่ 2 ค่า Ax จรวดมีความเร่งอ้อมตัวที่ประมาณ 30 g ซึ่งผลดังกล่าวเป็นค่าสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้ ส่วนค่า Ay และ Az เกิดขึ้นน้อยมาก แสดงให้เห็นว่า

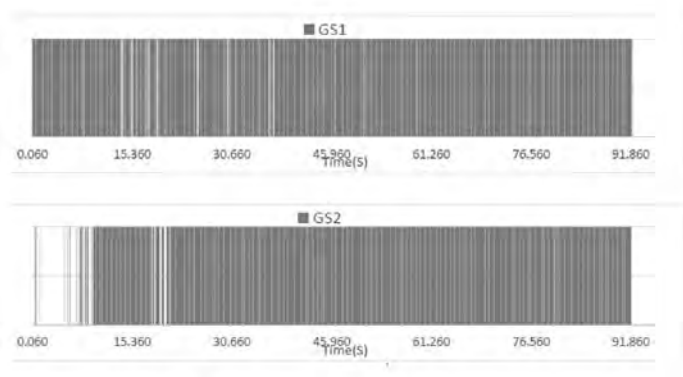
จรวดลูกที่ 2 มีเสถียรภาพสูง จรวดเคลื่อนที่ไปในแนวด้านหน้าของจรวด

ค่าที่วัดได้จาก IMU มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองที่เวลาเดียวกัน และค่าความสูงที่วัดและคำนวณได้จากเซ็นเซอร์แบบ Barometric Pressure มีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองที่เวลาเดียวกัน และจากจุดเริ่มต้นของกราฟมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการออกตัวของจรวด (Initial Error)

จากรูปที่ 18 เป็นการแสดงจำนวนครั้งที่สถานีรับส่งภาคพื้นจุดที่ 1 และ 2 ได้จากการรับสัญญาณที่ส่งมาจากลูกจรวด โดยเทียบกับเวลาตั้งแต่ระบบเริ่มทำงานตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถบอกได้ว่า ระบบสื่อสารแบบ RFD900 มีประสิทธิภาพที่ดี และมีความสามารถรับส่งข้อมูลได้ตลอดแนวซิปนวิถีดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 17 กราฟแสดงผลการยิงทดสอบจรวดลูกที่ 2



รูปที่ 18 แสดงค่าจำนวนข้อมูลที่ได้รับจากจรวดลูกที่ 2

6. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

การรับส่งข้อมูลของระบบสื่อสารทั้ง 2 แบบ สามารถรับส่งข้อมูลได้ตลอดแนวขีปนาวุธและบันทึกค่าเก็บไว้ได้ โดยแบบ RFD900 พบว่า มีจำนวนสูญเสียข้อมูลขณะรับส่งมากกว่าแบบ Xtend900 และค่าที่วัดได้จาก IMU ของจรวดทั้ง 2 นัด มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองที่เวลาเดียวกัน แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์ที่ทำการติดตั้งไปมีย่านการวัดไม่สูงพอกับค่าสมรรถนะของจรวด ทำให้ค่าที่แสดงผลมีแค่ค่าสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้ โดยเมื่อนำค่าที่วัดได้มาคำนวณเทียบกับค่าจากการจำลองพบว่า ค่าระยะทางของจรวดเมื่อคำนวณจากความเร่งในแนวแกน X มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองและค่ามุม Roll Pitch และ Yaw ซึ่งคำนวณได้ตรงในตอนแรก ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเป็นผลมาจากการติดตั้งเซ็นเซอร์ภายในลูกจรวดมีความเยื้องศูนย์และเซ็นเซอร์ยังไม่ได้ทำการปรับเทียบที่ครบถ้วน จากนั้นเมื่อจรวดเคลื่อนที่ไปเกินกว่าย่านการวัดของเซ็นเซอร์ ทำให้เมื่อนำค่าที่วัดได้มาคำนวณจะมีความผิดพลาดสูงและได้ผลที่ไม่ถูกต้อง

ค่าความสูงที่วัดและคำนวณได้จากเซ็นเซอร์ Barometric Pressure มีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกับค่าจากการจำลองที่เวลาเดียวกัน โดยค่าที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าจากการคำนวณ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสภาพภูมิอากาศจริงและความกดอากาศขณะทำการยิงทดสอบ

ปัญหาและอุปสรรคในการติดตั้งเซ็นเซอร์ให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของจรวดพอดีเป็นไปได้ยากจึงมีข้อเสนอแนะให้วางแผนการทดสอบระบบโทรมาตร ในครั้งต่อไปควรติดตั้งเซ็นเซอร์ที่มีย่านการวัดสูงและทำการสอบเทียบค่าลดความผิดพลาด อีกทั้งคำนึงถึงค่าชดเชยต่าง ๆ ของเซ็นเซอร์เพื่อให้สามารถวัดค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในการสนับสนุนจรวดดัดแปรสภาพอากาศสำหรับการทดสอบโครงการวิจัยและพัฒนาจรวดดัดแปรสภาพอากาศของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศสำหรับโอกาสในการทดสอบระบบเซ็นเซอร์และระบบสื่อสารสำหรับจรวดนำวิถี อันเกิดเป็นบทความวิจัยฉบับนี้ อีกทั้งคำอธิบายเพิ่มเติมในส่วนที่ 5.1 และ 5.2 จาก นาวาอากาศโท นวพันธ์ นุตคำแหง นักวิจัยอาวุโส สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมอื่น ๆ จากนาวาอากาศโท พิระยุทธ สารตายน ผู้อำนวยการส่วนงานวิศวกรรมระบบควบคุมและการสื่อสาร สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ทำให้บทความวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ราชกิจจานุเบกษา (2562) พระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562. เล่ม 136 ตอนที่ 56 ก. หน้า 17 – 38.
- [2] Blagojević, Đ. and Miloš, M. 2006. Outline design of compact GNC module for missile flight control purposes. FME Transactions (2006) 34, 137-143.
- [3] โครงการพัฒนาจรวดดัดแปรสภาพอากาศ. 2562. การพัฒนาระบบ TM-CAM สำหรับตรวจสอบการทำงานของจรวด. เอกสารออนไลน์ <http://society.dti.or.th/DTIKMRocket1/Lists/K5/AllItems.aspx> เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 63
- [4] โครงการพัฒนาจรวดดัดแปรสภาพอากาศ. 2562. การพัฒนาระบบ TM สำหรับตรวจสอบการทำงานของจรวด. เอกสารออนไลน์ <http://society.dti.or.th/DTIKMRocket1/Lists/K5/AllItems.aspx> เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 63

- [5] Han, F., Zhou, Q. and Chen, F. 2019. Dynamic modeling, simulation, and flight test of a rocket-towed net system. *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2019, Article ID 1523828, 21p. doi.org/10.1155/2019/1523828.
- [6] King, B., Eckert, C. and Minor, R. 2002. The International GMLRS Development Program - A GPS/INS application to extend the range and effectiveness of the basic multiple launch rocket system (MLRS). *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002)* September 24 - 27, 2002 Oregon Convention Center, Portland, Oregon.
- [7] de Carpentier, G. J. P. 2014. Analytical ballistic trajectories with approximately linear drag. *International Journal of Computer Games Technology*. Volume 2014, 13p. doi.org/10.1155/2014/463489.
- [8] Fairfax, L. D. and Fresconi, F. E. 2012. Position estimation for projectiles using low-cost sensors and flight dynamics. *U.S. Army Research Laboratory. Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066*.
- [9] Scaysbrook, I. W., Cooper, S. J. and Whitley, E. T. 2004. A miniature, gun-hard MEMS IMU for guided projectiles, rockets and missiles. *Position Location and Navigation Symposium. (IEEE Cat. No.04CH37556)*, Monterey, CA, USA, 2004, pp. 26-34. doi: 10.1109/PLANS.2004.1308970.
- [10] Aziz, J. S. and Hussein, O. A. 2009. Design and Implementation of a Telemetry System for Environmental Applications. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 39-50.
- [11] Peng, W., Zhang, Q., Yang, T. and Feng, Z. 2017. A high-precision dynamic model of a sounding rocket and rapid wind compensation method research. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 9(7) 1–11. Vol. 9(7) 1–11.
- [12] Liu, F., Su, Z., Zhao, H., Li, Q. and Li, C. 2019. Attitude measurement for high-spinning projectile with a hollow MEMS IMU consisting of multiple accelerometers and gyros. *Sensors* 2019, 19, 1799; doi:10.3390/s19081799.
- [13] Törnqvist, D., Helmersson, A. and Gustafsson, F. 2020. Tight integration between IMU and GPS for sounding rockets. Technical report from Automatic Control at Linköpings universitet. Report no.: LiTH-ISY-R-2929. Department of Electrical Engineering, Linköpings universitet, SE-581 83 Linköping, Sweden. 30p.
- [14] Albayrak, A. 2017. IoT-based Real-Time Telemetry System Design: An Approach. 2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud). DOI: 10.1109/FiCloud.2017.40.

อุปกรณ์บริหารจัดการพลังงานสำหรับ Tethered Drone

ธีรยศ เวียงทอง ^{1*} ประสูตร เดชสุวรรณ ² และ ภาณุวิทย์ โกโดยอุดม ²

วันที่รับ 26 พฤษภาคม 2563 วันที่แก้ไข 5 สิงหาคม 2563 วันที่ตอบรับ 31 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนองานวิจัยเชิงปฏิบัติการ (Action Research) มุ่งเน้นการแก้ปัญหาและพัฒนาต้นแบบระบบบริหารจัดการพลังงาน (Power Management Unit: PMU) ในระบบของ Tethered Drone ขนาดใหญ่ โดยอาศัยพลังงานจากภาคพื้นดินส่งผ่านสายไฟที่มีน้ำหนักเบาส่งไปยังส่วนของตัวโดรนซึ่งบินนิ่งอยู่ในอากาศ เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานได้ตลอดเวลา สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นจุดกระจายสัญญาณสื่อสารที่สามารถติดตั้งดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว หรือใช้ในการถ่ายภาพทางอากาศในบริเวณที่มีสถานการณ์ฉุกเฉิน เป็นต้น มีการพัฒนาต้นแบบเพื่อทำการทดสอบและทดลองใช้งานจริง เนื่องจาก PMU ที่สามารถจัดหาได้ในท้องตลาดมีราคาค่อนข้างแพง และกำลังงานที่จ่ายได้ไม่เพียงพอกับที่ต้องการในการใช้งานของโดรนที่มีน้ำหนักรวมทั้งหมดที่ 20 กิโลกรัม และต้องการกำลังงานในการจ่ายทั้งมอเตอร์ และอุปกรณ์ Payloads ต่าง ๆ ไม่ต่ำกว่า 4000 วัตต์ ขอบเขตงานวิจัยและพัฒนาในโครงการดังกล่าวนี้ประกอบด้วย การออกแบบและพัฒนา ระบบบริหารจัดการพลังงานสำหรับ Tethered Drone โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบบริหารจัดการพลังงานภาคพื้นดิน เรียกว่า PMU-Ground ที่อยู่บนภาคพื้นดินทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับโดรน และระบบบริหารจัดการพลังงานของโดรน เรียกว่า PMU-Air โดยเป็นระบบที่ถูกติดตั้งอยู่บนโดรนทำหน้าที่บริหารและจัดการพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโดรน ผู้ใช้งานสามารถมอนิเตอร์ค่าแรงดัน และกระแสต่าง ๆ รวมทั้งสามารถควบคุมการจ่ายไฟให้กับโหลดที่แรงดันต่าง ๆ โดยนำระบบ Internet of Things (IoT) มาใช้งาน

คำสำคัญ: Power management unit, Tethered drone, Internet of Things, MQTT

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

² ศูนย์วิจัย MASI คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

* ผู้แต่ง, อีเมล: theerayod.wi@kmit.ac.th

Power Management Unit for Tethered Drone

Theerayod Wiangtong ^{1*} Prasoot Dechsuwan ² and Panvee Pokaiyaudom ²

Received 26 May 2020, Revised 5 August 2020, Accepted 31 August 2020

Abstract

This article focuses on problem solving and development of a Power Management Unit (PMU) in a large Tethered Drone system. Electrical source located on the ground is transmitted through a lightweight power cable to the drone, which is intentionally retained in the air and perform the work at all time. This can be applied to a variety of applications such as using as a communication point that can be installed quickly or using for aerial photography in areas of emergency situations etc. Since PMU systems in the market are rather expensive and not fully support all requirements from the user, this prototype is then developed for real application. In this work, the power required to lift off the drone with a total weight of 20 kilograms and various onboard payloads is at least 4KW. The scope consists of the design and development of PMU for energy management system in a large tethered drone. Generally, it is divided into 2 systems. The first is the ground power management unit called PMU-Ground, which is on the ground, acting as a power source of the drone. The second is the airborne power management unit, called PMU-Air, which is on the drone. It is used to manage the energy of the drone's devices. Users can monitor voltages and currents as well as control switches for various payloads from the ground using Internet of Things (IoT) technology.

Keywords: Power management unit, Tethered drone, Internet of Things, MQTT

¹ Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

² Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, 10530

* Corresponding author, E-mail: theerayod.wi@kmitl.ac.th

1. บทนำ

Tethered Drone เป็นโดรนที่ใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับระบบหนึ่งเฟสที่ได้จากบ้านเรือนหรือจากเครื่องให้กำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ส่งขึ้นมาจากภาคพื้น ตัวโดรนจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งกระแสไฟฟ้าจากภาคพื้นตลอดเวลาในขณะที่ทำการบินอยู่ในอากาศตามความสูงที่กำหนดไว้ โดยในทางทฤษฎีถ้าสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโดรนตลอดเวลาโดรนก็จะสามารถทำการบินอยู่ในอากาศได้ตลอดเวลาเช่นกัน

Tethered Drone นั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น นำไปใช้กับโครงการจำลองสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยใช้เป็นจุดกระจายสัญญาณสื่อสาร เป็นต้น ในปัจจุบันการจัดหา Tethered Drone สามารถนำเข้าจากต่างประเทศได้ แต่มีราคาสูง รวมทั้งขีดความสามารถในการแบกรับน้ำหนัก (Payload) ได้จำกัด อาทิเช่น ระบบสื่อสาร (Telemetry) มีน้ำหนัก 5-7 กิโลกรัม นอกจากนั้นจะมี Payload ที่เป็นทั้งกล่องควบคุมชุดสูง รวมทั้งอุปกรณ์อื่น ๆ (นอกเหนือจากมอเตอร์ แบตเตอรี่ สายไฟ และระบบควบคุมการบิน) ที่สามารถบรรจุขึ้นไปใช้งานสำหรับภารกิจต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยความต้องการในเบื้องต้น ต้องการให้ตัวโดรน สามารถแบกรับน้ำหนักได้ทั้งหมดรวมกันไม่ต่ำกว่า 20 กิโลกรัม

อีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญนอกเหนือจากตัวโดรนคือ แหล่งจ่ายพลังงานจากภาคพื้นดินที่ส่งผ่านสายไฟเชื่อมโยงจากด้านล่างไปยังตัวโดรนที่อยู่ด้านบนอากาศสำหรับตัวโดรนที่ต้องรับน้ำหนักมากนั้น จำเป็นต้องใช้กำลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC (Brush less DC motor) มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในท้องตลาดตัวที่มีจำหน่าย เช่น SAFE-T Smart

Tethering Station for Drones [1] หรือ FOXTECH T3500 Tethered Power System for Drones สามารถจ่ายได้เพียง 2500 และ 3500 วัตต์ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าความต้องการของหน่วยงานที่ต้องการใช้ สำหรับตัว Tether drone ที่มีน้ำหนักรวม Payload แล้วทั้งหมด 20 กิโลกรัม ต้องใช้ระบบที่สามารถจ่ายและบริหารจัดการพลังงาน หรือ Power Management Unit (PMU) ที่พิกัดกำลังไฟมากถึง 4000 วัตต์ ผ่านทางแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันสูงเกือบ 400VDC จ่ายพลังงานขึ้นไปให้กับตัวโดรน เนื่องด้วยต้องการลดปริมาณของกระแสที่จ่ายเข้าสู่สายส่งกำลัง ทำให้สามารถลดขนาดและน้ำหนักของสายส่งลงได้ ทำให้ไม่เป็นภาระกับโดรนขณะบิน

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดการพลังงานให้กับโดรนมีอย่างกว้างขวาง เพื่อขยายขีดจำกัดของระยะเวลาบินให้นานขึ้น แทนที่จะใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว บทความ [3] มุ่งเน้นไปที่การสืบค้นเชิงวิชาการเกี่ยวกับแหล่งจ่ายไฟของตัวโดรน มีการประเมินถึงข้อได้เปรียบเสียเปรียบของโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ ที่สำคัญของแหล่งจ่ายไฟที่พร้อมให้โดรน ศึกษาข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับทางเลือกของระบบจ่ายไฟ เช่น Hot Swapping Battery, Laser-beam Inflight Recharging, Tethered Drone, Hybrid Power Sources ในตอนท้ายของบทความมีคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบได้

บทความ [4] นำเสนอการออกแบบใช้งาน Falconer ที่เป็น Tethered Drone ขนาดเล็ก มีพิกัดกำลังไฟเท่ากับ 480W แรงดันจากภาคพื้นดิน 48VDC จะถูกป้อนผ่านสายไฟขนาด 20AWG ไปยัง

ตัวโดรนที่มีตัวแปลงไฟกลับมาเป็น 12VDC สำหรับป้อนให้กับมอเตอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ บนตัวโดรน เพิ่มการควบคุมโดยกล้องจับท่าทาง Gesture Control แต่ไม่ได้เน้นถึงการออกแบบระบบบริหารจัดการพลังงานที่สามารถมอนิเตอร์และควบคุมได้

ในการใช้งานของ Tethered Drone ในรูปแบบอื่น ๆ นำเสนอในบทความ [5] [6] [7] เช่นการตรวจจับประเิน ESD ของกังหันลมไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และสูง ตรวจจับ Light Pollution สำหรับงานทางด้านดาราศาสตร์ หรือการใช้งานเป็นโครงข่าย 4G/5G ขั้วคราวได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์หายนะทางธรรมชาติต่าง ๆ

การใช้งาน Tethered Drone ที่ต้องมีสายไฟโยงนั้น ในหลายบทความได้นำเสนอโมเดลและการจำลองการทำงานของระบบทางกล [8] [9] นำเสนอโมเดลที่เป็นสองมิติ เพื่อรักษาความตึง และสามารถควบคุมการบินภายใต้ข้อสมมติฐานที่ตั้งขึ้นมาบทความ [10] นำเสนอระบบที่ประกอบด้วย Pulley และ Gimbal ที่สามารถโยงใช้งานได้กับตัวโดรนหลาย ๆ ตัว ต่อเนื่องกันไปกับภาคพื้นดิน ทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบและทดสอบระบบ PMU สำหรับการมอนิเตอร์และควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับตัว Tethered Drone รวมทั้งอุปกรณ์ Payloads ต่าง ๆ ที่ต้องการ โดยออกแบบให้สอดคล้องเหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้งานให้มากที่สุด สามารถจ่ายกำลังงานได้มากที่สุดถึง 4800 วัตต์ และนำเทคโนโลยี IoTs มาใช้ในการมอนิเตอร์และควบคุม ในระยะ 100 เมตร จากภาคพื้นดินตัวโดรน

3. ความต้องการของระบบ

ขอบเขตงานวิจัยและพัฒนาในโครงการดังกล่าวนี้ประกอบด้วย การออกแบบและพัฒนาระบบบริหารจัดการพลังงานสำหรับ Tethered Drone ซึ่งเรียกว่า Power Management Unit หรือ PMU ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบบริหารจัดการพลังงานภาคพื้น เรียกว่า PMU-Ground (รหัสเรียก PMU1) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนภาคพื้นทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับโดรน และระบบบริหารจัดการพลังงานของโดรน เรียกว่า PMU-Air (รหัสเรียก PMU2) เป็นระบบที่ถูกติดตั้งอยู่บนโดรน ทำหน้าที่บริหารและจัดการพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโดรน ตัวอย่างดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างโดยรวมของระบบ

คุณสมบัติโดยรวมของระบบ แสดงได้ในตารางที่ 1 โดยจะต้องส่งกำลังงานอย่างน้อย 4000 วัตต์ ขึ้นไปยังตัวโดรน เพื่อจ่ายไปยังมอเตอร์จำนวน 8 ตัว และโหลดต่าง ๆ บน Payload ผ่านทางสายไฟในระยะความสูง 100 เมตร ในการคำนวณคร่าว ๆ กระแสที่จะต้องส่งผ่านขึ้นไปจะต้องมีประมาณ 12 แอมป์ หากส่งที่แรงดันไฟฟ้า 380VDC จะได้กำลังงานไฟฟ้าที่ 4200 Watts แต่ในความเป็นจริงนั้นจะต้อง

คำนวณค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในสายส่งจากความต้านทานแรงดันที่ตกคร่อมสาย และขนาดของสายส่ง รวมทั้งน้ำหนักที่กำหนดไว้ที่ประมาณ 3 กิโลกรัม

ตารางที่ 1 ความต้องการของระบบ

Parts	Min	Mean	Max	Qty	Power (Watt)
FCC + GPS + Datalink	4.8	5	5.2	1	5
Servo x 2 (Futaba 3010)	4.8	5	5.2	2	10
EOIR or DSLR camera	4.8	5	5.2	1	10-50W
Brushless motor for Gimbal	11.8	12	12.2	3	100
Brushless motor (main motor)	20	24	25.2	8	481x8 = 3850 @ 100% Throttle 230x8 = 1840 @ 65% Throttle
Telemetry (Range 150 km)	30	33	36	1	50
Lidar	4.8	5	5.2	1	5
IRLock camera	4.8	5	5.2	1	5
LED light	4.8	5	5.2	2	20

3.1 ระบบบริหารจัดการพลังงานภาคพื้นดิน (PMU-Ground)

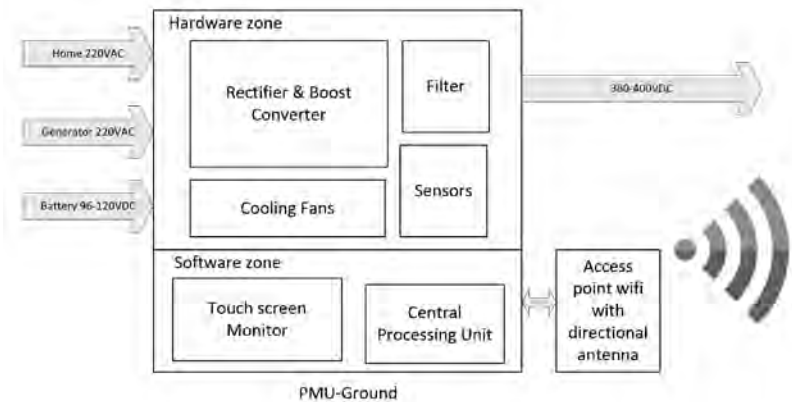
ในส่วนนี้ จะมีแหล่งพลังงานหลักที่รับมาจากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปขนาด 220 VAC และมีแหล่งพลังงานสำรองจากแบตเตอรี่ ใช้ในกรณีที่จำเป็น โดย PMU-Ground ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากขนาด 220 VAC ให้มีขนาดสูงขึ้นที่ประมาณ 380VDC ที่ 4000 วัตต์ (ทำให้สามารถลดกระแสลงได้ที่กำลังงานเท่า ๆ กัน และไม่ต้องใช้สายไฟที่ขนาดใหญ่และหนัก) เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ PMU-Air ผ่านสายไฟฟ้าแบบ Ultralight Weight ความยาวไม่เกิน 300 ฟุต

ส่วนประกอบของระบบในส่วนนี้ หลัก ๆ จะประกอบด้วย

1) ส่วนที่เป็นอุปกรณ์ทางด้าน Hardware ที่จะเป็นตัวแปลงไฟจาก 220VAC ไปยัง 380VDC

พร้อมส่วนของ Housing ที่เน้นถึงความสะดวกในการใช้งาน และการเคลื่อนที่ไปยังจุดปฏิบัติการ ส่วนเชื่อมต่อกับแหล่งพลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เป็น Single Phase 220VAC ที่มาจากบ้าน หรือจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Generator หรือจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบตเตอรี่

2) จะเป็นส่วนของ Software ที่สามารถควบคุมการทำงานในการจ่ายกระแสไฟให้กับโหลดต่าง ๆ รวมทั้งมอนิเตอร์การทำงาน เช่น ค่าอุณหภูมิ ความชื้น และการใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ ทั้ง PMU-Ground และ PMU-Air โดยผ่านจอมอนิเตอร์ หรือผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือ โดยข้อมูลต่าง ๆ ระหว่างส่วนภาคพื้นดินและอากาศจะถูกส่งสัญญาณผ่าน Access Point Wifi ที่ PMU-Ground ด้านล่าง

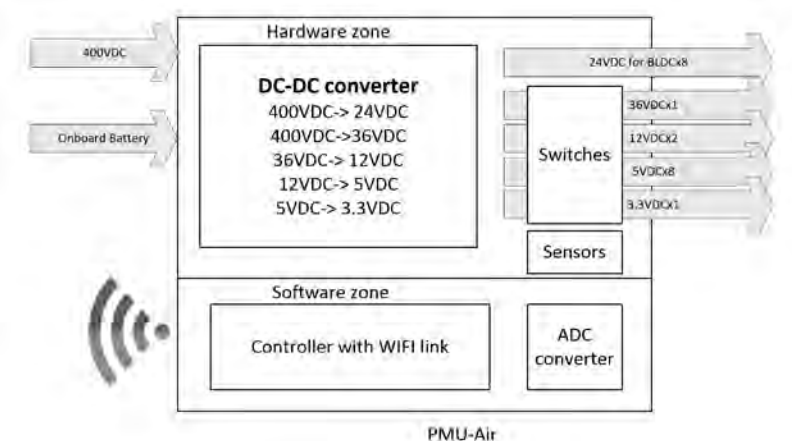


รูปที่ 2 ส่วนประกอบของ PMU-Ground

3.2 ระบบบริหารจัดการพลังงานของโดรน (PMU-Air)

ทำหน้าที่บริหารและจัดการกระแสไฟฟ้าที่รับมาจาก PMU-Ground ที่มีขนาด 380-400VDC แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ขนาด 3.3, 5, 12, 24 และ 36 โวลต์ สำหรับจ่ายไปยังภาระโหลดต่าง ๆ ที่อยู่ใน Payload รวมทั้งตัวมอเตอร์ใบพัดที่เป็น Brushless DC Motor (BLDC) และชุดควบคุมการบิน Flight Control Computer (FCC)

จำนวนช่องของแต่ละแรงดันเป็นดังต่อไปนี้ ขนาด 5 โวลต์ จำนวน 8 ช่อง, 12 โวลต์ จำนวน 2 ช่อง, 24 โวลต์ จำนวน 8 ช่อง, 36 โวลต์ จำนวน 1 ช่อง, 3.3 โวลต์ จำนวน 1 ช่อง และตัว PMU-Air สามารถดึงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ติดตั้งไว้บนโดรนในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้จากการเลือกใช้งานด้วยค่าแรงดันที่มากกว่า



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของ PMU-Air

4. การออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ (Hardware and Software Design)

ในหัวข้อนี้ จะอธิบายการออกแบบวงจรทั้งในส่วนของ PMU-Ground และ PMU-Air เพื่อให้ได้ข้อกำหนดของการทำงานตามที่ต้องการ โดยในการออกแบบได้เลือกนำโมดูลอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสมประกอบกันขึ้นมาเป็นระบบ ซึ่งมีข้อดีต่าง ๆ ที่ได้ผ่านการทดสอบและใช้งานมาแล้ว รวมทั้งด้วยขนาด น้ำหนัก มีความเป็นไปได้สำหรับข้อจำกัดต่าง ๆ ของระบบนี้ รวมทั้งเวลาที่จำกัดในการออกแบบและทดสอบ

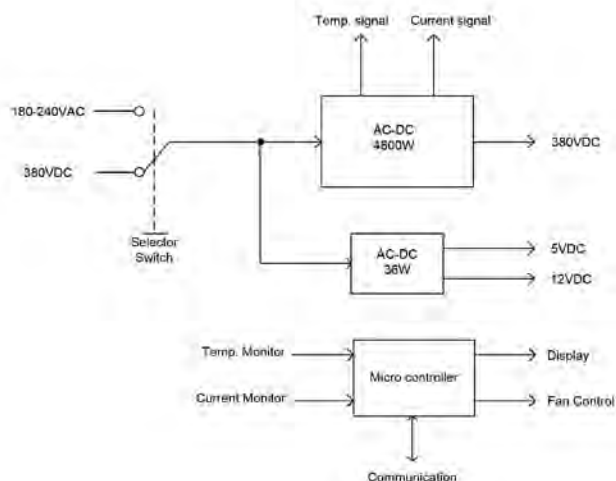
4.1 วงจร PMU-Ground

ในส่วนของ PMU-Ground แสดง Diagram ของระบบดังรูปที่ 4 โดยเลือกใช้ AC-DC Converter Module AIF04ZPFC-02NTL ของบริษัท Artesyn ซึ่งจะทำหน้าที่หลักคือการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220Vac (มี input range 85-264Vac) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 380VDC สามารถนำโมดูลมาต่อขนานกันได้ เพื่อเพิ่มพิกัดกำลังจ่ายโหลด ซึ่งใน

การออกแบบนี้ได้ใช้ทั้งหมด 3 ตัว รวม 4800 วัตต์ ในระบบยังมีส่วนของวงจรภาคจ่ายไฟตรงอีกสองชุด ขนาดแรงดัน 5VDC และ 12VDC เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรเซสเซอร์ วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล วงจรวัดอุณหภูมิ และวงจรควบคุมพัดลมระบายความร้อน

ในส่วนของ PMU-Ground นั้นจะมีตัวโปรเซสเซอร์ที่ทำหน้าที่ในการมอนิเตอร์ และควบคุมส่วนต่าง ๆ ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกใช้ Raspberry Pi 4 เนื่องด้วยมีความพร้อมทั้งในด้านของบอร์ดที่เป็น processor แบบ 64-bit, RAM ความจุ 4GB, Wi-Fi, Bluetooth Communication และขา GPIOs ต่าง ๆ เป็นบอร์ดที่มีความนิยมใช้งานกันในปัจจุบันพัฒนาต่อไป สามารถพัฒนาได้โดยใช้ภาษาขั้นสูงต่าง ๆ เช่น ภาษาซี หรือ Python โดยจะทำหน้าที่หลักเป็น IoT Server ของระบบ

นอกจากนี้ ยังมีตัว NodeMCU คอนโทรลเลอร์ที่จะทำหน้าที่ในการติดต่อกับเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น กระแส รวมทั้งตัวสวิตช์ที่คอยเปิดปิดพัดลม เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามที่ตั้งค่าไว้ เป็นต้น



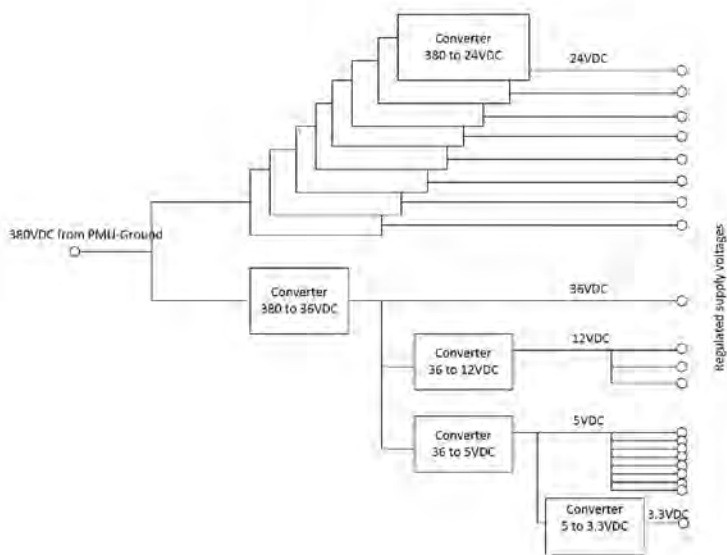
รูปที่ 4 Circuit Diagram of PMU-Ground

4.2 วงจร PMU-Air

เนื่องด้วย PMU-Air มีการใช้แรงดันหลายระดับและถูกติดตั้งบนตัวโดรนทำให้ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพประสิทธิภาพ และน้ำหนัก ในการออกแบบจะเลือกใช้ DC-DC Converter Module ของบริษัท Vicor ได้แก่ DCM4623TD2H26, DCM4623TD2H53, DCM3623T50M13 และ DCM3623T50M06 เนื่องด้วยขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่โมดูลมีขนาดเล็กสูง ในการออกแบบได้เลือกใช้โมดูลหลากหลายเบอร์ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันและจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าตามที่ออกแบบไว้ โดยแสดงวงจรในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันแรงดัน Converter แปลงจากแรงดันสูง 380VDC มาเป็นแรงดัน 24VDC

จำนวน 8 ตัว ตัวละ 500W สำหรับจ่ายให้กับมอเตอร์ใบพัดชนิด BLDC โดยตัวโมดูลสามารถขนานเอาต์พุตเข้าด้วยกันเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าวรวมได้มากขึ้นในกรณีที่โหลดต้องการกำลังงานสูงกว่า 500W

นอกจากนี้ยังมีตัวที่แปลงแรงดันเอาต์พุตที่ 36VDC 500W จำนวน 1 ช่อง สำหรับโหลดที่เป็น Telemetry รวมทั้งแบ่งมาให้วงจรแปลงผันแรงดันที่ให้อาต์พุต 12VDC 320W จำนวน 3 ช่อง สำหรับโหลดที่เป็นมอเตอร์ของตัว Gimbal แบ่งมายังวงจรแปลงผันแรงดันที่ให้อาต์พุต 5VDC 180W จำนวน 8 ช่อง สำหรับโหลดต่าง ๆ ที่เป็นกล้อง เซ็นเซอร์ต่าง ๆ เซอร์โวมอเตอร์ บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ และยังมีวงจรแปลงผันแรงดันเอาต์พุต 3.3VDC 10W จำนวน 1 ช่อง



รูปที่ 5 Circuit Diagram of PMU-Air

ในการควบคุมการเปิดปิดโหลดต่าง ๆ ที่อยู่บนตัวโดรนนั้น ทำได้ด้วยวงจรสวิตช์ โดยใช้ไอซี TPS27S100 Single-Channel High-Side Switch ของบริษัท Texas Instrument ซึ่งมีข้อดีหลาย ๆ อย่าง อาทิเช่น ความต้านทานต่ำ มีตัวเซ็นเซอร์กระแสในตัว มีวงจรป้องกัน

กระแสเกิน รับแรงดันได้อินพุตสูงสุดที่ 40VDC เป็นต้น ส่วนแรงดัน 24VDC ที่จ่ายให้มอเตอร์ใบพัดไม่ได้มีการควบคุมเปิดปิดผ่านสวิตช์ เนื่องจากต้องใช้งานตลอดเวลาขณะที่บินอยู่แล้ว และลดความเสี่ยงของการเปิดปิดที่อาจเกิดขึ้นได้ จากทั้งตัวอุปกรณ์ และการปฏิบัติงาน

ค่ากระแสที่ได้จากตัวสวิตช์ที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกจะนำมาผ่านตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ขนาด 16 บิต เบอร์ ACS1115 จำนวนทั้งหมด 8 ตัว ตัวละ 4 ช่อง เพื่อนำไปแสดงผลให้ทั้งค่าแรงดันและกระแสตามความเหมาะสมโดยการควบคุมผ่านทางพอร์ต I2C ของตัวคอนโทรลเลอร์ NodeMCU จำนวน 2 ตัว เท่า ๆ กัน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แผนผังการต่อ A/D จำนวน 8 ตัว เข้ากับ NodeMCU#0 และ NodeMCU#1

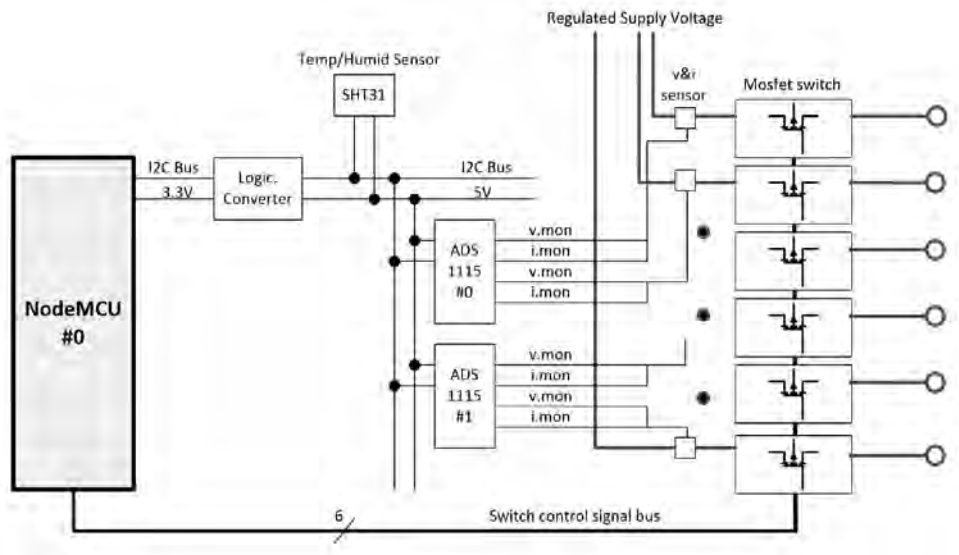
NodeMCU	ADC	Analog	Measuring Parameter
#0	0x48	A0	I0 (24V)
		A1	I1 (24V)
		A2	I2 (24V)
		A3	I3 (24V)
	0x49	A0	V0 (24V)
		A1	V1 (24V)
		A2	V2 (24V)
		A3	V3 (24V)
	0x4A	A0	I0 (5V)
		A1	I1 (5V)
		A2	I2 (5V)
		A3	I3 (5V)
	0x4B	A0	V (36V)
		A1	V (12V)
		A2	V (5V)
		A3	V (3.6V)
#1	0x48	A0	I4 (24V)
		A1	I5 (24V)
		A2	I6 (24V)
		A3	I7 (24V)
	0x49	A0	V4 (24V)
		A1	V5 (24V)
		A2	V6 (24V)
		A3	V7 (24V)
	0x4A	A0	I4 (5V)
		A1	I5 (5V)
		A2	I6 (5V)
		A3	I7 (5V)
	0x4B	A0	I (36V)
		A1	I (12V)
		A2	I (12V)
		A3	I (12V)

NodeMCU นอกจากจะทำหน้าที่ในการติดต่ออ่านค่ากระแสและแรงดันจากตัว ADC แล้ว ยังสามารถทำการควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ที่โหลดต่าง ๆ จำนวนทั้งสิ้น 12 จุด โดยทำผ่านโปรโตคอลที่เรียกว่า MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) ซึ่งจะอธิบายต่อไปในส่วนของซอฟต์แวร์ ดังนั้น NodeMCU จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่าง ๆ มาถึง Raspberry Pi

ในส่วนของการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่าน BLDC 24VDC ในส่วนนี้ผู้วิจัยใช้ตัว Hall Current Sensors ACS714 30A มาทำการวัดกระแสที่ช่องต่าง ๆ สามารถวัดได้ทั้งไฟลบและไฟบวก โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเซ็นเซอร์ หรือค่า Sensitivity ที่ 66mV/1A

ที่อยู่ใน PMU-Ground ผ่านทาง Wifi 2.4GHz วงจรของ NodeMCU สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6

ในการออกแบบ PCB ของวงจรทั้งใน PMU - Ground และ PMU-Air นั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบด้วยโปรแกรม EasyEDA ที่สามารถใช้งานในลักษณะกลุ่ม มีการจัดการเรื่องไลบรารี และแชร์ข้อมูลร่วมกันได้ และสะดวกในการสั่งทำแผ่น PCB จากประเทศจีนได้ในระยะเวลาสั้น



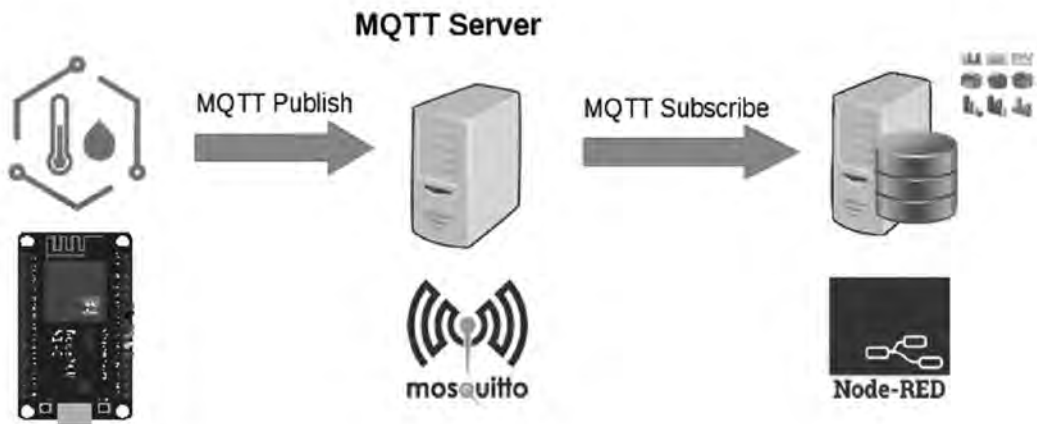
รูปที่ 6 Circuit diagram ของ NodeMCU ที่ PMU-Air

4.3 การทำงานของซอฟต์แวร์

ระบบในส่วนของการซอฟต์แวร์ในโครงการนี้การมอนิเตอร์และรายงานค่าต่าง ๆ จากตัวเซ็นเซอร์วัดค่าที่จำเป็นในระบบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าในจุดต่าง ๆ จะถูกออกแบบเป็นลักษณะของ IoT (Internet of Things) โดยใช้โครงสร้างแพลตฟอร์มที่เรียกว่า MQTT หรือที่เรียกว่า Message Queuing Telemetry Transport ซึ่งเป็น Protocol ที่ออกแบบมาเพื่อการเชื่อมต่อแบบ M2M (Machine-to-machine) คืออุปกรณ์กับอุปกรณ์ ทำให้สามารถเชื่อมโยงสื่อสารกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ โดยผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งจะทำให้มนุษย์สามารถดูข้อมูลต่าง ๆ ที่ส่งมาที่เซิร์ฟเวอร์ MQTT รวมทั้งส่งการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านทางเซิร์ฟเวอร์นี้ได้ เช่น การสั่งปิดเปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านมือถือ รวมทั้งสามารถกำหนด QoS (Quality of Services) ได้ถึง 3 ระดับ ตามการรับประกันในการจัดส่งข้อมูล และการ

ตอบรับ Handshake จากปลายทางสามารถกำหนดรหัสผ่านความปลอดภัยสำหรับการเข้าใช้งานทั้ง NodeRED และ Mosquitto ได้

เนื่องจากโปรโตคอลตัวนี้ใช้ทรัพยากรน้อย ออกแบบมาเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ในระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) การรับส่งข้อมูลในเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก แบนด์วิดท์ต่ำ ใช้หลักการแบบ Publisher/Subscriber คล้ายกับหลักการที่ใช้ใน Web Service ที่ต้องใช้ Web Server เป็นตัวกลางระหว่างคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้ แต่ MQTT จะใช้ตัวกลางที่เรียกว่า Broker เพื่อทำหน้าที่จัดการคิวรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ ทั้งในส่วนที่เป็น Publisher และ Subscriber ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 MQTT Protocol

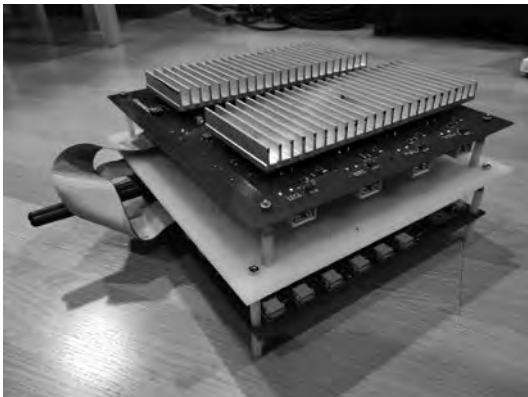
ระบบจะประกอบไปด้วย Broker (หรือ Server) Publisher และ Subscriber แต่ละอย่างก็จะทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป โดย Broker ทำหน้าที่เป็นตัวกลางคอยจัดการกับข้อมูลโดยอ้างอิงจาก Topic หรือหัวข้อที่ตั้งไว้ ส่วน Publisher จะทำหน้าที่คอยส่งข้อมูลไปยังหัวข้อนั้น ๆ Subscriber จะทำหน้าที่คอยดูการเปลี่ยนแปลงของ Message ที่อ้างอิงด้วย Topic เช่น ถ้าข้อมูลที่หัวข้อที่เฝ้าดูอยู่ (Subscribed) และมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำการดึงข้อมูลนั้น ๆ มาใช้งาน ทั้งการใช้งานในการแสดงผลข้อมูลตามปกติหรือการนำเอาข้อมูลนั้นมาเป็นคำสั่งในการสั่งการให้อุปกรณ์บางอย่างทำงาน เช่นการเปิดปิดสวิตช์รีเลย์ สามารถถูกสั่งการด้วยคำสั่งที่เป็นข้อความ “SWON” หรือ “SWOFF” จากทางฝั่ง Publisher ทำการ Publish มาที่ MQTT Server ในหัวข้อ Tdrone/Switch หลังจากนั้นทางฝั่งของตัว Subscriber ที่ถูกกำหนดให้เฝ้าดูหัวข้อ Tdrone/Switch นี้ก็จะได้เห็นการ

เปลี่ยนแปลงข้อมูล และนำไปเป็นคำสั่งในการเปิดปิดสวิตช์ได้

Raspberry Pi 4 ในระบบนี้ที่อยู่ในส่วนของ PMU-Ground จะถูกนำมาใช้ในการสร้าง MQTT Server ที่มีชื่อว่า Mosquitto ในส่วนของการแสดงผลผ่านทาง Dashboard นั้น จะใช้ NodeRED ในการทำงานของ Raspberry Pi นั้น จึงถูกกำหนดให้เป็น

- MQTT Broker เป็นเซิร์ฟเวอร์สำหรับการรับส่งข้อมูลจากตัวเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ในระบบ ผ่านมาจากตัว NodeMCU

- NodeRED เป็นเซิร์ฟเวอร์สำหรับการแสดงผลผ่านทาง Web Browser โดยรับข้อมูลจาก MQTT Broker มาแสดงผลทาง Dashboard ที่เป็นลักษณะของ Graphic User Interface (GUI)



รูปที่ 9 PMU-Ground และ PMU-Air

5.2 การทดสอบระบบซอฟต์แวร์

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการทำงานของซอฟต์แวร์ในระบบ จะเป็นลักษณะของ IoT โดยใช้โปรแกรม Mosquitto และ NodeRED ใน Raspberry Pi ร่วมกับตัวเซ็นเซอร์และสวิตช์รีเลย์ต่าง ๆ ที่ถูกอ่านหรือควบคุมผ่านทาง NodeMCU คอลโทรลเลอร์

ผู้ใช้งานสามารถมอนิเตอร์ค่าแรงดันและกระแสรวมทั้งการควบคุมการจ่ายพลังงานให้โหลดต่าง ๆ ที่อยู่บนตัวโดรนจากภาคพื้นดินผ่านทางโปรแกรม NodeRED ซึ่งมีหน้าจอตั้งรูปที่ 11 โดยในที่นี้กำหนดให้ส่งมาทุก ๆ 10 วินาที จะได้ไม่เป็นภาระกับโปรเซสเซอร์มากเกินไป และเพียงพอสำหรับมอนิเตอร์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ

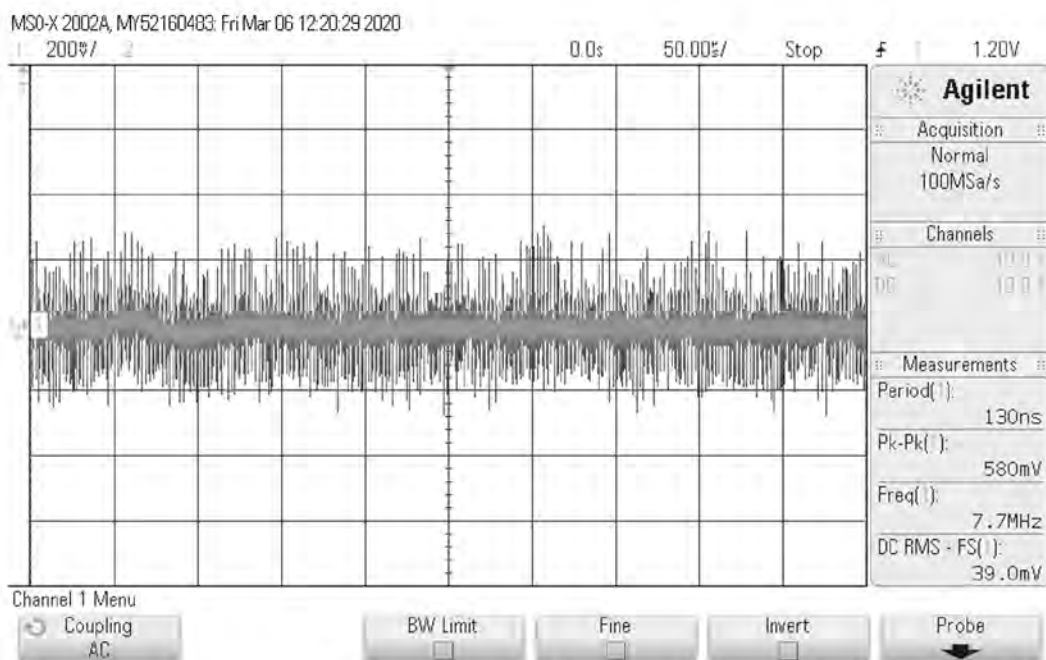
ในการเปิดเครื่องแต่ละครั้ง โปรแกรมจะถูกตั้งให้มาที่หน้าจอหลัก หรือที่ TD-Ground ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกดูข้อมูลในแต่ละหน้าได้ โดยคลิกที่แถบเมนูมุมบนซ้ายมือ แต่ละหน้าจะประกอบด้วย TD-Ground, TD-AirMon, TD-Air36V, TD-Air24V, TD-Air12V, TD-Air5V, TD-Air3.3V

ส่วน TD-Ground จะเป็นการมอนิเตอร์และควบคุม PMU-Ground ที่อยู่ภาคพื้นดิน โดยจะมีกราฟและเกจที่แสดงค่าของกระแสที่อ่านได้จากตัว AIF Converter ทั้ง 3 ตัว ทางด้านขวามือ จะเป็นการควบคุมการเปิดปิดของพัดลมระบายความร้อน ซึ่งสามารถเปิดปิดได้แบบ Manual หรือเปิดปิดด้วยค่า Threshold ที่ตั้งไว้ หากมีอุณหภูมิสูงเกินค่าที่ตั้งพัดลมก็จะทำงานอัตโนมัติ

ส่วน TD-AirMon จะแสดงภาพรวมของสถานะเกจวัดแรงดันต่าง ๆ ของโหลด ทั้ง 36VDC, 12VDC,

5VDC, และ 3.3VDC ที่ PMU-Air รวมทั้งค่าอุณหภูมิ และความขึ้นบนบอร์ดที่อยู่บนตัวไดรอน ส่วนของค่า กระแสสำหรับโหลดต่าง ๆ รวมทั้งการควบคุมการ

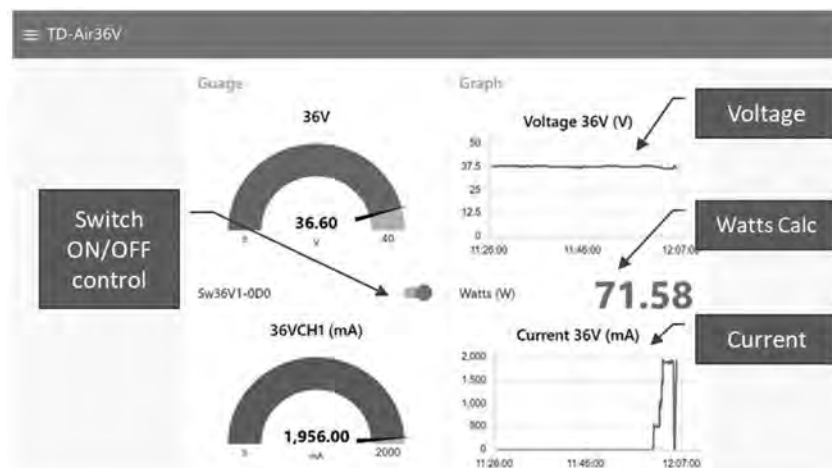
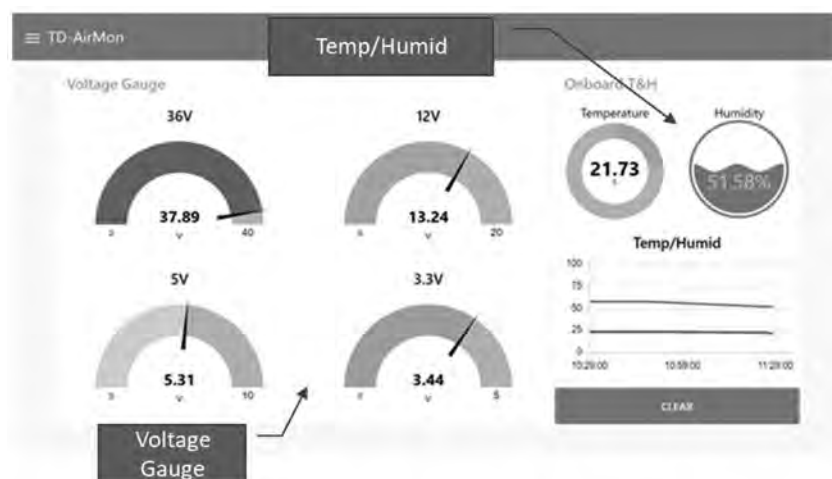
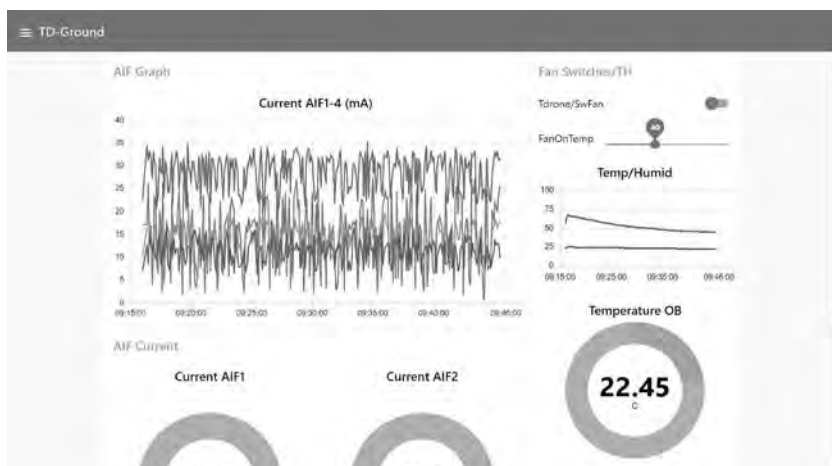
สวิตช์เปิดปิด (36VDC, 12VDC, 5VDC, 3.3VDC) จะอยู่ในแต่ละ Tab แต่ละอันถัดไป



รูปที่ 10 ตัวอย่างลักษณะแรงดันริปเปิลที่โหลด

ตารางที่ 3 ค่าแรงดันริปเปิล Peak-to-peak ที่โหลด

กระแส (A) (Load) current)	36VDC		12VDC		5VDC		3.3VDC	
	Voltage (V)	Pk-Pk. Ripples (mV)	Voltage (V)	Pk-Pk. Ripples (mV)	Voltage (V)	Pk-Pk. Ripples (mV)	Voltage (V)	Pk-Pk. Ripples (mV)
0	37.78	500mV	13.08	700mV	5.27	400mV	3.60	360mV
0.5	37.18	500mV	12.56	400mV	5.18	430mV	3.58	400mV
1	36.93	500mV	12.47	400mV	5.10	500mV	3.56	440mV
1.5	36.66	500mV	12.39	440mV	5.02	530mV	3.53	540mV
2	36.38	590mV	12.31	540mV	4.93	550mV	3.51	580mV



รูปที่ 11 ตัวอย่างหน้าจอมอนิเตอร์ และควบคุม

5.3 การทดสอบภาคสนามเบื้องต้น

การทดสอบภาคสนามจำลองจะเป็นการทดสอบที่จะมีการจำลองการใช้งานจริง ได้รับไฟฟ้า 220VAC ป้อนให้กับ PMU-Ground และส่งกำลังไฟผ่านสายไฟ 1.5mm² x 2 ที่ลากไปบนพื้นดิน ในระยะทาง 100 เมตร ไปยัง PMU-Air โดยยังไม่ใช้สายและตัวไดรอนจริง รวมทั้งมีการทดสอบการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน โดยมีการทดสอบในการเปิดปิดการจ่ายไฟให้กับตัวโหลดต่าง ๆ และมีการสังเกตการณ์บันทึกผล ซึ่งสามารถเปิดปิดได้ทุกช่องตามที่กำหนดไว้

ปัจจุบันระบบได้มีการทดสอบการจ่ายไฟด้วยโหลดที่เป็น Resistive loads โดยการนำหลอดความร้อนมาติดกระแสที่แรงดัน 380VDC 4000W ซึ่ง PMU-Ground สามารถจ่ายได้ รวมทั้งมอเตอร์ 24VDC BLDC 500W ที่ PMU-Air งานที่จะทำต่อไปจะเป็นส่วนการทดสอบกับตัวไดรอนจริงที่มีโหลดมอเตอร์ BLDC ของใบพัดไดรอนที่ใช้งานจริง รวมทั้งการควบคุมการจ่ายไฟให้กับตัว Payload ต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 12 การทดสอบภาคสนามแนวราบเบื้องต้น

5.4 การทดสอบภาคสนามที่ สทป. กับตัวไดรอน

ในการทดสอบนี้ ได้ทำการติดตั้งกับตัวไดรอนจริงที่จะนำไปใช้งาน โดยให้ทดสอบความสามารถในการจ่ายไฟให้กับตัวมอเตอร์ (BLDC) ทั้ง 4 ตัว ให้ได้ตามที่กำหนด ทั้งนี้ ในการออกแบบ PMU Air ได้ใช้งาน DCM converter ของ Vicor จำนวน 8 ตัว ในการจ่ายเอาต์พุตให้กับตัวมอเตอร์ โดยได้นำเอาต์พุตของตัว Converter ทั้งหมดแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดละ 4 ตัว แต่ละชุดจะมีหน้าที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์ 2 ตัว ตามความต้องการของไดรอนที่ใช้งาน ผ่านทางวงจร Oring

Diode ขนาด 120A ต่อชุด จำนวน 2 ชุด สำหรับการเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ของตัวไดรอนที่มี 2 ชุด เช่นกัน โดยมีขั้นตอนและผลการทดสอบดังนี้

- การทดสอบกับมอเตอร์ตัวเดียว จากชุดหนึ่งของโมดูล Converters ใน PMU-Air โดยการบังคับด้วยรีโมท ผ่านตัว ESC Control โดยเริ่มจากความเร็วต่ำ ๆ จนถึงความเร็วสูงสุด (7 ระดับ) สามารถทำได้โดยกระแสมีการรายงานผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ตามปกติ ผ่านทางตัวโมดูล Converter ในชุดที่มี 4 ตัว แบ่งจ่ายกันออกมาได้รวมกันทั้งสิ้นประมาณ 30A ที่ Full Throttle หรือที่ประมาณ 700W

- การทดสอบการหยุดจ่ายไฟจากภาคพื้นดิน PMU-Ground และสลับให้มอเตอร์ใช้ไฟจากแบตเตอรี่แทน สามารถทำได้ผ่านทางชุดวงจร Oring Diode โดยมีความเร็วตกลงมาบ้าง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่โดยปกติแล้วจะต่ำกว่าจากชุด Converter ทั้งนี้ หากสลับกลับมาใช้ไฟจาก PMU ก็ยังสามารถทำได้เช่นกัน
- การทดสอบการบินกับตัวโดรน โดยยึดกับโครงเหล็กวางไว้ที่พื้นบริเวณลาดฟ้าของ สทป. เป็นการทดสอบการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว ของตัวโดรน ที่ Half-throttle และ Full-throttle ทั้งนี้ ได้เกิดปัญหาในการส่งสัญญาณข้อมูลกระแสจากตัว Converter ที่ขับมอเตอร์แต่ละตัวในช่วงประมาณ 60% ของการขับ มีลักษณะที่เป็นกระเพื่อมขึ้นลงซึ่งอาจเกิดจาก

ซอฟต์แวร์หรือตัวเซ็นเซอร์ซึ่งทางผู้วิจัยจะได้หาสาเหตุและดำเนินการแก้ไขต่อไป ส่วนการจ่ายกำลังไฟนั้นสามารถทำได้ตามปกติ โดยจ่ายต่อเนื่อง 50% ค้างไว้ที่ 10 นาที หลังจากนั้นมีการเพิ่มการขับมอเตอร์เป็น 70% ต่อเนื่องที่ 10 นาที ระบบสามารถจ่ายได้ปกติ ส่วนการขับที่ 100% สังเกตได้ว่าขนาดของแรงดัน AC ที่จ่ายเข้ามามีค่าตกลงประมาณ 10% ตัวสายที่จ่ายเข้า PMU-Ground มีความร้อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูง และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 นาที Thermal Circuit Breaker Switch ของปลั๊กพ่วงได้ทำงาน เนื่องจากเกินพิกัดของปลั๊ก ทำให้ต้องหยุดและวางแผนการทดสอบ Full-throttle อีกครั้ง

ในส่วนของค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ กลางแจ้ง หลังจากการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4 ถือว่าเป็นปกติ

ตารางที่ 4 ค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ

จุดที่วัดค่าอุณหภูมิ	% Throttle (for 10 mins)	
	50%	70%
Converter Modules	44 °C	48 °C
Converter Heatsink	38 °C	43 °C
Oring Diode	38 °C	48 °C
Electronic Speed Control	42 °C	56 °C
BLDC Motor	47 °C	51 °C

6. สรุปผล

งานวิจัยชิ้นนี้ได้พัฒนาต้นแบบระบบบริหารจัดการพลังงาน (Power Management Unit: PMU) ในระบบของ Tethered Drone ขนาดใหญ่ที่สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงถึง 4000W เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานได้ตลอดเวลา โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบบริหารจัดการพลังงานภาคพื้นดิน เรียกว่า PMU-Ground ที่

อยู่บนภาคพื้นทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับตัวโดรน และระบบบริหารจัดการพลังงานของโดรน เรียกว่า PMU-Air โดยเป็นระบบที่ถูกติดตั้งอยู่บนโดรนทำหน้าที่บริหารและจัดการพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโดรนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ผู้ใช้งานสามารถมอนิเตอร์ค่าแรงดันและกระแสต่าง ๆ รวมทั้งสามารถควบคุมการจ่ายไฟให้กับโหลดที่แรงดันต่าง ๆ โดยนำระบบ Internet of Things (IoT) มาใช้งาน



รูปที่ 13 การทดสอบกับตัวโดรนที่ สทป.

7. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์บริหารจัดการพลังงานสำหรับ Tethered Drone สัญญารับทุนเลขที่ 620204 นี้ได้รับทุนจาก สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) โดยความร่วมมือกับทางศูนย์ MASI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Elistair, "SAFE-T Smart Tethering Station for Drones", Available [https://elistair.com/
- [2] Foxtech, "T3500 Tethered Power System for Drones", Available: https://www.foxtechfpv.com/
- [3] M. N. Boukoberine, Z. Zhou and M. Benbouzid, "Power Supply Architectures for Drones - A Review," IECON 2019 - 45th Annual

Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 5826-5831

[4] R. Nith and J. Rekimoto, "Falconer: A Tethered Aerial Companion for Enhancing Personal Space," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Osaka, Japan, 2019, pp. 1550-1553

[5] J. Montanyà, J. A. López, P. Fontanes, M. Urbani, O. van der Velde and D. Romero, "Using tethered drones to investigate ESD in wind turbine blades during fair and thunderstorm weather," 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, 2018, pp. 1-4

[6] P. Fiorentin et al., "MINLU: An Instrumental Suite for Monitoring Light Pollution from Drones or Airballoons," 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Rome, 2018, pp. 274-278

[7] M. Y. Selim and A. E. Kamal, "Post-Disaster 4G/5G Network Rehabilitation Using Drones: Solving Battery and Backhaul Issues," 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6

[8] Marco M. Nicotra, Roberto Naldi, Emanuele Garone, "Taut Cable Control of a Tethered UAV", IFAC Proceedings Volumes, Volume 47, Issue 3, 2014, pp. 3190-3195

[9] T. Glick and S. Arogeti, "Control of Tethered Drones with state and input Constraints - a Unified Model Approach," 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dallas, TX, 2018, pp. 995-1002

[10] B. Kosamovsky and S. Arogeti, "A String of Tethered Drones - System Dynamics and Control," 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR), Prague, Czech Republic, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109

การศึกษาการแก้สมการเชิงตัวเลขด้วยวิธีของรุงเงและคุตดา สำหรับสมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นของแนววิถีกระสุน

ภูมิเรศ แสงราม¹ กฤติยา พาอิม² และ ชนะ รัชศิริ^{2*}

วันที่รับ 23 มิถุนายน 2563 วันที่แก้ไข 17 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 19 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

เมื่อกระสุนเคลื่อนที่ออกจากปากกระบอกปืนจะผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศไปยังพื้นที่เป้าหมายตามแนวการเคลื่อนที่ที่ได้ออกแบบไว้ แต่เนื่องจากมีปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุนเบี่ยงเบนไปจากทิศทางปกติที่ได้ออกแบบไว้และมีลักษณะของสมการเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษา ออกแบบ และแก้ปัญหการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้ เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของความแม่นยำของการยิงต่อไป การแก้ปัญหสมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยในบทความนี้นำเสนอวิธีการหาผลเฉลยของสมการด้วยวิธีการของรุงเงและคุตดาอันดับที่ 4 โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุนอ้างอิงจากแบบจำลองของ Modified Point Mass Trajectory Model ซึ่งได้ทดลองเปลี่ยนค่าความเร็วของกระสุนขณะออกจากปากกระบอกปืนจำนวน 5 ค่า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแนววิถีกระสุนที่ความเร็วต้นต่างกันจะเบี่ยงเบนไปจากแนวปากกระบอกปืนเดิม นอกจากนั้นแล้วจะส่งผลให้ตำแหน่งของกระสุน ณ เวลาใด ๆ มีค่าที่แตกต่างกันโดยจะเห็นได้ชัดเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น วิธีรุงเงและคุตดาที่ใช้ในบทความนี้เป็นวิธีที่มีความสะดวกรวดเร็วให้ผลเฉลยที่ค่อนข้างแม่นยำในทางทฤษฎี สามารถประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาระบบสมองกลฝังตัวเฉพาะงานต่อไปได้อีกด้วย

คำสำคัญ: สมการวิถีกระสุน, การเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้น, ระเบียบวิธีรุงเง-คุตดา

¹ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

The Study of Runge-Kutta Numerical Solution for Non-Linear Ballistic Differential Equation.

Phumaret Saengram ¹ Krittiya Pa-im ² and Chana Raksiri ^{2*}

Received 23 June 2020 Revised 17 August 2020 Accepted 19 August 2020

Abstract

When the ballistic moves out of the muzzle through the air to the target area followed by the trajectory that has been designed. However, there are many factors that cause a ballistic trajectory to deviate and become a non-linear equation. Therefore, it is necessary to study, design and solve motion problems to reduce errors. There are many ways to solve non-linear differential equations. In this article, presented a method of Runge-Kutta 4th order solution by using the equation of the ballistic trajectory based on the Modified Point Mass Trajectory Model. The experiment will vary the speed of the ballistic while leaving the muzzle. As a result, the ballistic trajectory at different initial velocity will deviate from the regular muzzle. In addition, the position of the ballistic will be different at various times. The Runge-Kutta method obtains an accurate solution which can be applied to develop embedded specialized systems.

Keywords: Non-linear, Ballistic, Runge-Kutta, Modified Point Mass Trajectory Model

¹ Electrical-Mechanical Manufacturing Engineering Program, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University.

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

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

1. บทนำ

ซิปนวิธ (Ballistic) คือการศึกษาการเคลื่อนที่ของกระสุน ตั้งแต่เมื่อกระสุนอยู่ภายในลำกล้อง ผ่านปากลำกล้อง และเคลื่อนที่ไปในตัวกลาง และตกยังพื้นที่เป้าหมาย โดยที่ความแม่นยำและอำนาจของการยิงนั้นจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการศึกษาและออกแบบการเคลื่อนที่ของกระสุนในทุกระยะ ซึ่งสามารถย่อยออกเป็น 3 ชนิด อันได้แก่ (1) ซิปนวิธภายใน (Internal Ballistic) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการขับเคลื่อนภายในลูกกระสุน เช่น การเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้ที่เหมาะสม แรงขับ ดินขับ แก๊ส หรือเชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ (2) ซิปนวิธภายนอก (External Ballistic) เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของกระสุนตั้งแต่หลังจากออกจากปากลำกล้องจนถึงเป้าหมาย และ (3) ซิปนวิธเมื่อกระสุนตกเป้าหมาย (Terminal Ballistic) เป็นการศึกษาพฤติกรรมขั้นสุดท้าย เมื่อกระสุนกระแทกเป้าหมาย โดยเมื่อพิจารณาจากซิปนวิธทั้ง 3 ชนิดข้างต้นแล้วพบว่า ซิปนวิธภายนอกนั้นมีความน่าสนใจอยู่หลายประเด็น โดยประเด็นแรกเป็นช่วงการเคลื่อนที่ของกระสุนที่ใช้เวลาค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการศึกษาซิปนวิธชนิดอื่น ๆ เนื่องจากนับตั้งแต่วินาทีที่กระสุนออกจากกระบอกปืน จนถึงถึงตำแหน่งตำบลเป้าหมาย ประเด็นที่สองเป็นช่วงที่กระสุนต้องเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งมีความผันผวนของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการยิงค่อนข้างมาก

เมื่อกระสุนซึ่งมีมวลและแรงขับเคลื่อนที่ออกจากปากกระบอกปืนด้วยความเร็วปากกระบอกปืน (Muzzle Velocity) กระสุนจะหมุน (Spin) รอบแนวการเคลื่อนที่ (Ballistic Axis) ด้วยความเร็วเชิงมุม (Spin Velocity) ที่เกิดจากลำกล้องปืน ผ่านตัวกลาง (Medium) ซึ่งเป็นอากาศ ไปยังพื้นที่เป้าหมายตามแนวการเคลื่อนที่ที่ได้ออกแบบไว้ (Desired Trajectory) แต่เนื่องจากปัจจัยจากแรงโน้มถ่วงของโลก ความหนาแน่นของอากาศ ปัจจัยจากธรรมชาติอื่น ๆ เช่น ลม อุณหภูมิ และ ฝน ซึ่งสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลให้เกิดแรงต้านการ

เคลื่อนที่ของกระสุน อันได้แก่ แรงต้านอากาศ (Drag force) แรงยกตัว (Lift force), แรงโคริออริส (Coriolis force) แรงแมกนัส (Magnus force) และ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) ซึ่งแรงต่าง ๆ ที่ไม่พึงประสงค์เหล่านี้ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุนเบี่ยงเบนไปจากทิศทางปกติที่ออกแบบไว้และมีลักษณะของสมการเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษา ออกแบบ และแก้ปัญหการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้ให้ดีกว่าวิธีอื่นที่จะทำการพัฒนาขึ้นมาใช้งานจริง ๆ เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพของความแม่นยำของการยิงต่อไป

การแก้ปัญหสมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วิธีหาผลเฉลยทางตรงนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างสูง ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อลดเวลาและเพิ่มความสะดวกในทางปฏิบัติ การหาผลเฉลยสามารถทำหลายวิธี [1] เช่น ประยุกต์ใช้กฎของนิวตันมาสร้างสมการการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุนทั้งในกรณีที่มีและไม่มีผลกระทบจากความเร็วลม แล้วใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์ (Euler's method) หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและทิศทางของการยิงกับแนวการเคลื่อนที่ของกระสุน ระเบียบวิธีของออยเลอร์ถือเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน แต่เนื่องจากวิธีนี้ให้ความถูกต้องของผลเฉลยไม่สูงมาก [2] จึงได้มีการปรับปรุงระเบียบวิธีของออยเลอร์ (Improved Euler's method) ขึ้นมาเพื่อช่วยเพื่อลดความผิดพลาดของผลเฉลยนี้ นอกจากนั้นแล้วยังมีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น วิธีของรุงเงและคุตตา (Runge-Kutta: RK) และการปรับปรุงระเบียบวิธีอื่น ๆ โดยใช้พื้นฐานของรุงเงและคุตตาเพื่อให้ผลเฉลยมีความถูกต้องแม่นยำเพิ่มขึ้น

ระเบียบวิธีของรุงเงและคุตตาเป็นเทคนิคการประมาณคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่ได้รับคามนิยมอย่างมากในการคำนวณซิปนวิธในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่เหนือกว่าวิธีอื่นเมื่อพิจารณาในเรื่องความถูกต้องแม่นยำในทุกระยะการคำนวณภายใต้ความกว้างช่วงคำนวณ (Step Size) เดียวกัน [3] ซึ่งมี

ประสิทธิภาพและมีความสะดวกในการประยุกต์ใช้ โดยเฉพาะมีความง่ายในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาผลเฉลย วิธีการนี้ได้ถูกปรับปรุงขึ้นมาในหลากหลายแบบ

สมการเร่งและคุดตาอันดับ 1 (RK1) มีลักษณะคล้ายกับสมการในระเบียบวิธีของออยเลอร์ โดยในวิธีนี้ ค่าของผลเฉลยของเวลาถัดไปจะขึ้นอยู่กับผลรวมของค่าของผลเฉลย ณ ปัจจุบันกับความชันของช่วงเวลาปัจจุบัน (k_1) ทำให้ผลเฉลยของวิธีนี้ไม่เสถียรและไม่ถูกต้องแม่นยำเท่าที่ควร [4] RK2 เป็นสมการที่ปรับปรุงขึ้นมาจากวิธีของออยเลอร์โดยได้เพิ่มพจน์ของความชัน (k_2) ณ ตำแหน่งตรงกลางของผลเฉลยในปัจจุบันกับ k_1 เข้าไปด้วย ทำให้ผลเฉลยมีความถูกต้องแม่นยำดีขึ้นจากเดิม RK3 [5] ได้เพิ่มพจน์ของความชัน (k_3) เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำ ส่วน RK4 นั้นจะถูกนำมาใช้ค่อนข้างมากในทางปฏิบัติ (de facto) สามารถคำนวณหาผลเฉลยโดยคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้โปรแกรมภาษาต่าง ๆ ซึ่งมีไลบรารีที่นักพัฒนาทั่วโลกได้ทำไว้มากมาย สามารถเข้าถึงได้จากสื่ออินเทอร์เน็ตทั่วไป ทั้งยังสามารถนำเอาหลักการอื่นมารวมเพื่อประยุกต์ใช้ต่อได้อีกหลากหลายแนวทาง [3] เช่น ประยุกต์เพิ่มเติมโดยการนำเอา Unscented Kalman Filter มาใช้ร่วมกับ RK4 ในการประมาณหามุม Pitch และ Yaw ของกระสุนขณะเคลื่อนที่ นอกจากนี้แล้ว ยังมีสมการเร่งและคุดตาในอันดับที่สูงขึ้นไปอีก เช่น RK5 [6], RK8 [7, 8] และ RK10 [9]

บทความนี้จะนำเสนอวิธีการการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของแนววิถีกระสุน โดยจะเริ่มจากนำเสนอสมการการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุนโดยอ้างอิงจากแบบจำลองของ Modified Point Mass Trajectory Model ที่อยู่ในข้อตกลงมาตรฐาน STANAG 4355 ขององค์การสนธิสัญญาแอตแลนติกเหนือ แล้วหาผลเฉลยของสมการนี้ด้วยวิธีการของเร่งและคุดตาอันดับที่ 4 จากนั้นได้ทำการแสดงแนววิถีกระสุนเพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าตัวแปรในสมการมีค่าไม่เท่ากัน

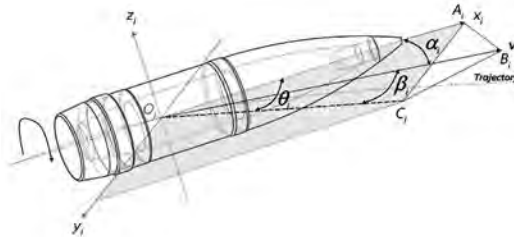
โดยในบทความนี้จะนำเสนอเฉพาะค่าความเร็วต้นของกระสุนที่ปลายกระบอกปืนจำนวน 5 ค่า

2. สมการการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุน

เมื่อกระสุนเคลื่อนที่ออกจากปากกระบอกปืนผ่านตัวกลาง (ในบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะตัวกลางที่เป็นอากาศ) ด้วยความเร็ว V ณ เวลาใดๆ แนววิถีกระสุนจะเบี่ยงเบนไปจากที่ออกแบบไว้เป็นมุม α เนื่องจากแรงและโมเมนต์ต่าง ๆ ที่กระทำต่อกระสุน โดยจะประกอบด้วย แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force: F_G) กระทำในทิศทางพุ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของโลก โดยขนาดของแรงนี้จะขึ้นอยู่กับมวลและตำแหน่งของกระสุน ณ เวลานั้น ๆ แรงต้านอากาศ (Drag Force: F_D) เกิดจากการเคลื่อนที่ของกระสุนผ่านอากาศที่มีความหนาแน่นและมีทิศทางตรงกันข้ามกับเวกเตอร์ความเร็ว V ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะกระทำต่อกระสุนในสองรูปแบบหลักคือ แรงต้านเนื่องจากความดัน (Pressure Drag) แรงต้านจากผิว (Skin Friction Drag) โดยขนาดของแรงต้านนี้จะแปรผันกับ ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับกระสุน (V) พื้นที่ผิวที่ถูกกระทำ (S) และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient, C_D), แรงยกตัว (Lift Force: F_L) กระทำในทิศทางตั้งฉากกับ V , แรงแมกนัส (Magnus Force: F_M) เกิดจากการที่กระสุนเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนด้วยความเร็วเชิงมุมของกระสุน (Angular Velocity: ω) ผ่านกระแสอากาศที่มีความเร็วและทิศทางตั้งฉากกับ V เป็นผลทำให้ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของกระสุนมีความเร็วสัมพัทธ์ไม่เท่ากัน เกิดเป็นแรงแมกนัสทำให้กระสุนเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม, แรงหน่วงในทิศทางพิทช์ (Pitch Damping Force: F_P) เป็นแรงที่เกิดจากความหนืดของอากาศ ทำให้กระสุนเคลื่อนที่ช้าลงในทิศทางพิทช์ [10] นอกจากนั้นแล้วยังมีแรงที่เกิดจากผลกระทบของคอรียอลิส (Coriolis Force: F_C) และโมเมนต์แบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะกระสุนเคลื่อนที่อยู่ในอากาศ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

แรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นกับกระสุนดังกล่าวข้างต้นนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุน โดยสามารถทำหลายวิธี เช่น ประยุกต์ใช้แบบจำลอง Rigid Body Trajectory Model (RBTM) [11], Point-Mass Trajectory Model

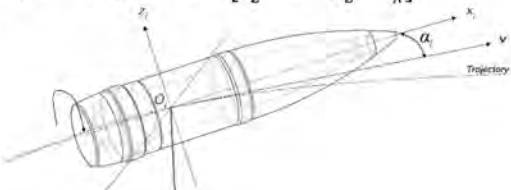
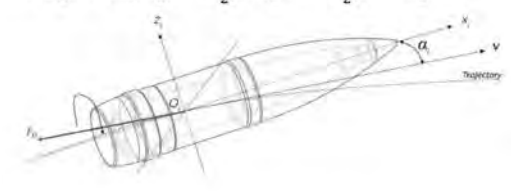
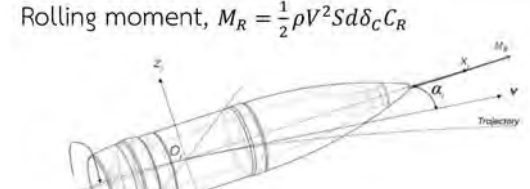
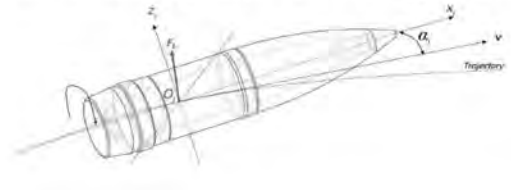
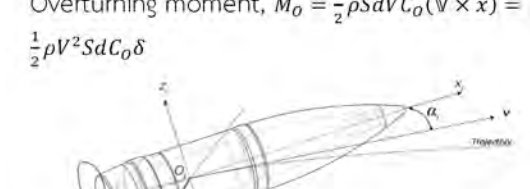
(PMTM) [11-13] หรือ Modified Point Mass Trajectory Model (MPMTM) [14, 15] ซึ่งในบทความนี้จะใช้แบบจำลอง MPMTM เนื่องจากมีองศาอิสระน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลอง PMTM โดยมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ (1)



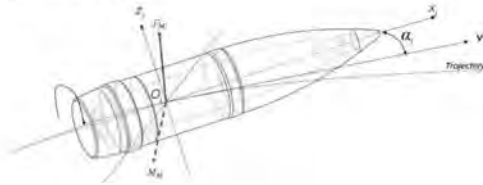
รูปที่ 1 แผนภาพของกระสุนเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลาง ณ เวลาใด ๆ

$$m\ddot{x} = \vec{F}_C + \vec{F}_G + \vec{F}_D + \vec{F}_L + \vec{F}_M \quad (1)$$

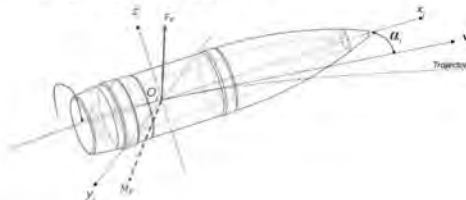
ตารางที่ 1 แรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระสุนเคลื่อนที่ในอากาศ

แรง	โมเมนต์
Gravity force, $F_G = -mg_0(lat, AZ) \begin{bmatrix} \frac{x}{R_Z} & 1 - \frac{2y}{R_Z} & \frac{z}{R_X} \end{bmatrix}^T$ 	Spin-damping moment, $M_S = \frac{1}{2} \rho V^2 S d \left(\frac{pd}{V} \right) C_S$ 
Drag force, $F_D = -\frac{1}{2} \rho S C_D V V = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$ 	Rolling moment, $M_R = \frac{1}{2} \rho V^2 S d \delta C_R$ 
Lift force, $F_L = \frac{1}{2} \rho S C_L [V \times (x \times V)] = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \delta$ 	Overturning moment, $M_O = \frac{1}{2} \rho S d V C_O (V \times x) = \frac{1}{2} \rho V^2 S d C_O \delta$ 

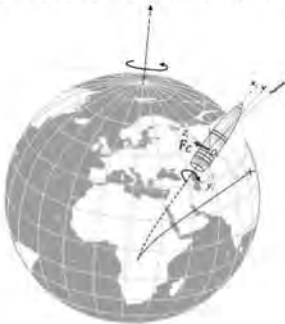
$$\text{Magnus force, } F_M = \frac{1}{2} \rho S V \left(\frac{\omega d}{V} \right) C_M = \frac{1}{2} \rho V^2 S \left(\frac{\omega d}{V} \right) C_M \delta$$



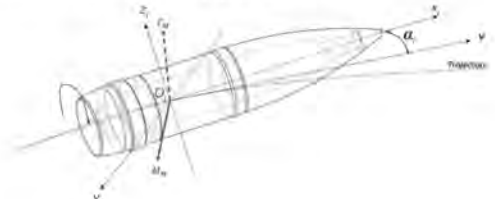
$$\text{Pitch damping force, } F_p = \frac{1}{2} \rho S V d (C_{pFq} + C_{pFa}) \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho V^2 S \left(\frac{\omega d}{V} \right) C_M \delta$$



$$\text{Coriolis force, } F_c = 2m(\vec{\omega} \times \vec{x})$$

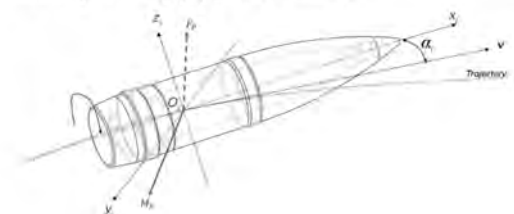


$$\text{Magnus moment, } M_M = \frac{1}{2} \rho S V S d \left(\frac{\omega d}{V} \right) C_M [x \times (\nabla \times x)] = \frac{1}{2} \rho V^2 S d \left(\frac{\omega d}{V} \right) C_M \delta$$



$$\text{Pitch damping moment,}$$

$$M_p = \frac{1}{2} \rho V^2 S d \left(\frac{q_{td}}{V} \right) [C_{pMq} + C_{pMa}]$$



$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} \Omega \cos(\text{lat}) \cos(\text{az}) \\ \Omega \sin(\text{lat}) \\ -\Omega \cos(\text{lat}) \sin(\text{az}) \end{pmatrix}$$

โดยที่ $\vec{F}_C, \vec{F}_G, \vec{F}_D, \vec{F}_L$ และ $\vec{F}_M$ คือ แรงเสียดทานอันเนื่องมาจากผลกระทบของคอริโอลิส แรงโน้มถ่วงของโลก แรงดูดอันเนื่องมาจากแรงต้านอากาศ แรงยกตัว และแรงแมกนัส ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบสมการของแรงแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยในบทความนี้จะนำเสนอสมการข้างต้นมาประยุกต์ใช้ในการหาผลเฉลยของวิถีกระสุนด้วยวิธีรุงเง - คุดตา

3. ระเบียบวิธีของรุงเง-คุดตา

ระเบียบวิธีของรุงเง-คุดตา (Runge-Kutta Method: RK) เป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดใน การแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) รูปแบบสมการ โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h)h \quad (2)$$

โดยที่ $\phi(x_i, y_i, h)$ คือฟังก์ชันส่วนเพิ่ม สามารถเขียนกระจายได้เป็น

$$\phi(x_i, y_i, h) = a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n \quad (3)$$

a_i คือ ค่าคงที่ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), n คือ อันดับของ R_K , k_i คือ ฟังก์ชันของระเบียบวิธี R_K โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f(x_i + p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h) \\ k_3 &= f(x_i + p_2 h, y_i + q_{21} k_1 h + q_{22} k_2 h) \\ &\dots \\ k_n &= f(x_i + p_{n-1} h, y_i + q_{n-1,1} k_1 h + q_{n-1,2} k_2 h + \dots + q_{n-1,n-1} k_{n-1} h) \end{aligned} \quad (4)$$

บทความนี้จะใช้ระเบียบวิธีของรุงเง-คุตตาอันดับที่สี่ (RK4) มาประยุกต์ใช้การแก้สมการ เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่ให้คำตอบได้แม่นยำมากที่สุด จากสมการที่ (2) – (4) เมื่อกำหนดให้ $n=4$ จะได้สมการ RK4 สำหรับ

ใช้คำนวณหาแนววิถีกระสุนดังสมการที่ (5) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเขียนในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาต่าง ๆ เช่น C++, Python, Lua เพื่อหาผลเฉลยต่อไป

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h \\ k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1 h\right) \\ k_3 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2 h\right) \\ k_4 &= f(x_i + h, y_i + h k_3) \end{aligned} \quad (5)$$

4. วิธีการ

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบคุณสมบัติของกระสุนที่ใช้ตลอดจนตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดโดยละเอียด เนื่องจากค่าต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้นั้นจะต้องอาศัยการวิจัยศึกษา และทดลองของกระสุนชนิดนั้น ๆ มาเป็นอย่างดี ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้เวลาเป็นอย่างมากกว่าจะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ และความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรโดยละเอียด

เพื่อลดความซับซ้อนและเพื่อแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการคำนวณแนววิถีกระสุนด้วยวิธีการเชิงตัวเลข บทความนี้จึงได้ทำการกำหนดให้ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยการประยุกต์และอ้างอิงจากงานวิจัยของ [16, 17] โดยมีค่าดังตารางที่ 2

จากสมการที่ (1) และตารางที่ (1) – (2) สามารถสร้างสมการการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุนตามพิกัดแกนต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\frac{\pi d^2 \rho}{8} C_L v v_1 + \frac{\pi d^2 \rho}{8} C_L v^2 \alpha_{\phi_1} + \frac{\pi d^3 \rho}{8} C_M (\alpha_{\phi_3} v_3 - \alpha_{\phi_2} v_2) \\ &\quad - 2\Omega \left[\sin(lat) \frac{dz}{dt} + \cos(lat) \sin(az) \frac{dy}{dt} \right] - g_0 \frac{x}{R} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{\pi d^2 \rho}{8} C_{D_h} v v_2 + \frac{\pi d^2 \rho}{8} C_{L_v} v^2 \alpha_{c_2} + \frac{\pi d^3 \rho}{8} C_{M_{\alpha}} (\alpha_{c_1} v_1 - \alpha_{c_1} v_3) - 2\Omega \left[\cos(lat) \sin(az) \frac{dx}{dt} + \cos(lat) \cos(az) \frac{dz}{dt} \right] - g_0 \left(1 - \frac{2y}{R} \right) \quad (7)$$

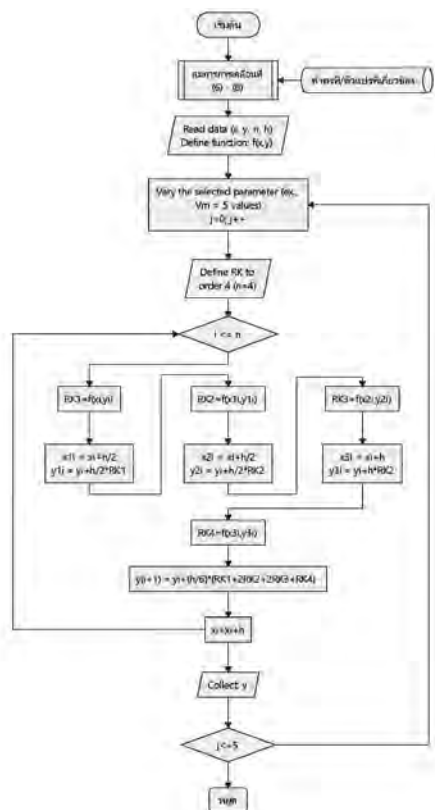
$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{\pi d^2 \rho}{8} C_{D_h} v v_3 + \frac{\pi d^2 \rho}{8} C_{L_v} v^2 \alpha_{c_3} + \frac{\pi d^3 \rho}{8} C_{M_{\alpha}} (\alpha_{c_1} v_2 - \alpha_{c_2} v_1) - 2\Omega \left[\cos(lat) \cos(az) \frac{dy}{dt} - \sin(az) \frac{dx}{dt} \right] - g \frac{z}{R} \quad (8)$$

สมการที่ (6) – (8) จะสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายและสามารถนำไปใช้หาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบของสมการที่ (5) ซึ่งสามารถดูวิธีการแปลงรูปสมการโดยละเอียดได้ใน [18] โดยบทความนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยภาษา C++ และนำเอาผลเฉลยมาแสดงผลแนววิถีกระสุนด้วย Matlab ทั้งนี้ได้ทำการทดลองปรับตัวแปรความเร็วของกระสุนเมื่อออกจากปากกระบอกปืนจำนวน 5 ค่าที่แตกต่างกัน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของแนววิถีกระสุน โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังแผนภาพในรูปที่ 2

5. ผลการจำลอง

ในบทความนี้ได้ทดลองเปลี่ยนค่าความเร็วของกระสุนขณะออกจากปากกระบอกปืนจำนวน 5 ค่า คือ 920, 980, 1,070, 1,540, และ 1,800 เมตรต่อวินาที และได้กำหนดให้มุมทางสูงและมุมทางทิศของกระบอกปืนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 45 และ 60 องศาตามลำดับ ผลเฉลยของการจำลองแนววิถีกระสุนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 และแสดงแนววิถีกระสุนได้ในรูปที่ 3 - 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิถีกระสุนที่ความเร็วต้นแต่ละค่าจะเบี่ยงเบนไปจากแนวปากกระบอกปืนเดิม ณ เวลาที่แตกต่างกัน โดยกระสุนที่มีความเร็วปากกระบอกปืนต่ำกว่า จะเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิมได้เร็วกว่ากระสุนที่มีความเร็วปากกระบอกปืนสูงกว่า และจะส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ของกระสุนต่ำกว่าในทุก ๆ พิกัดแกนอ้างอิง นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าตำแหน่งของกระสุน ณ เวลาใด ๆ จะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในการจำลองวิธีนี้หากทราบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ละเอียดยิ่งขึ้น หรือทราบ

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ณ เวลาใด ๆ ก็จะสามารถปรับเปลี่ยนค่าเพิ่มเติมเพื่อหาผลเฉลยที่แม่นยำยิ่งขึ้นได้ตลอดเวลา ซึ่งจะส่งผลให้ผลเฉลยหรือแนววิถีกระสุนที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งในจุดนี้บังคับให้เห็นว่าในการออกแบบระบบปืนต่อสู้อากาศยานหรือระบบจรวดต่อสู้อากาศยานแบบต่าง ๆ นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการคำนวณแนววิถีกระสุนนี้โดยละเอียดและครอบคลุมทุกด้านเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยิงให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2 แผนผังการจำลองแนววิถีกระสุนด้วย RK4

6. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอวิธีประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของรุงเง-คุตตามาแก้สมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นของกระสุน วิธีนี้มีความสะดวกรวดเร็ว ให้ผลเฉลยที่ค่อนข้างแม่นยำในทางทฤษฎี สามารถประยุกต์ใช้ในดิจิทัลคอมพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นแล้วการแก้สมการการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแนววิถีกระสุนด้วยระเบียบวิธีของรุงเง-คุตตานี้ ยังมีจุดที่น่าสนใจอีกหลายประการ เช่น สามารถนำไปประยุกต์ใส่ในไอซีชิป เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ FPGA ต่าง ๆ เพื่อพัฒนาระบบสมองกลฝังตัวเฉพาะงานต่อไปได้ หรือสามารถทดลองปรับลดหรือเพิ่มอันดับของสมการเพื่อเปรียบเทียบหาอันดับที่ดีที่สุดได้ง่ายกว่าวิธีการอื่น ๆ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในบทความนี้ยังคงมีประเด็นที่ควรเพิ่มเติมอยู่หลายประการ อาทิเช่น

- 1. การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ แบบไดนามิกส์ ณ เวลาใด ๆ

- 2. ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปรต่าง ๆ ณ เวลาใด ๆ

3. ขณะทำการศึกษา ทีมผู้วิจัยยังขาดข้อมูล Firing table ของกระสุนจริง โดย Firing table จะบอกรายละเอียดต่าง ๆ รวมทั้งตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระสุนที่ผลิตในล็อตนั้นๆ ซึ่งสามารถช่วยให้ผู้พัฒนาออกแบบระบบการยิง รวมไปถึงผู้ยิงสามารถปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการยิง เพื่อให้การยิงนั้นมีประสิทธิภาพและความแม่นยำมากยิ่งขึ้น [19] ซึ่งหากมีข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ ก็จะสามารถใช้เป็นตัวช่วยในการเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของผลเฉลยในงานนี้ได้ดียิ่งขึ้น

ทั้งนี้ ทีมผู้วิจัยกำลังอยู่ระหว่างการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูล พัฒนาวีการ และหาวิธีการทดสอบเพิ่มเติม โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ผลงานที่มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น และเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในอนาคตอันใกล้ต่อไป

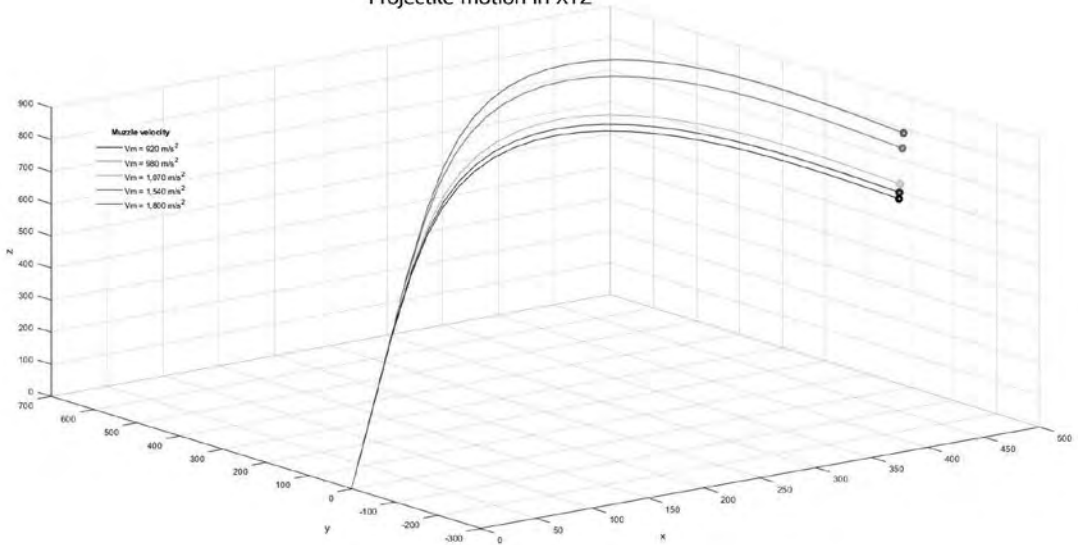
ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแนววิถีกระสุน

ตัวแปร	ความหมาย	ค่าที่เลือกใช้	หน่วย	ตัวแปร	ความหมาย	ค่าที่เลือกใช้	หน่วย
C_d	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงฉุดอันเนื่องมาจากแรงต้านอากาศ	0.29		R	ขนาดรัศมีของโลก	6,371	m
C_L	ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าแรงลอยตัวอันเนื่องมาจากแรงต้านอากาศ	1.490		q_a	Yaw drag factor	1.2	
C_M	ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าแรงแมกนัส	-0.665		q_m	Magnus force factor	1.0	
C_{sp}	Spin coefficient factor	-0.01150		ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	1.2	kg/m^3
Ω	ความเร็วในการหมุนรอบตัวเองของโลก	7.26×10^{-5}	rad/s	p	spin angular velocity	1654.3	rad/s
lat	มุมทางสูงเริ่มต้น	0.785	rad	m	มวลของลูกกระสุน	47.5	kg
az	มุมทางทิศเริ่มต้น	1.047	rad	d	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกระสุน	0.155	m

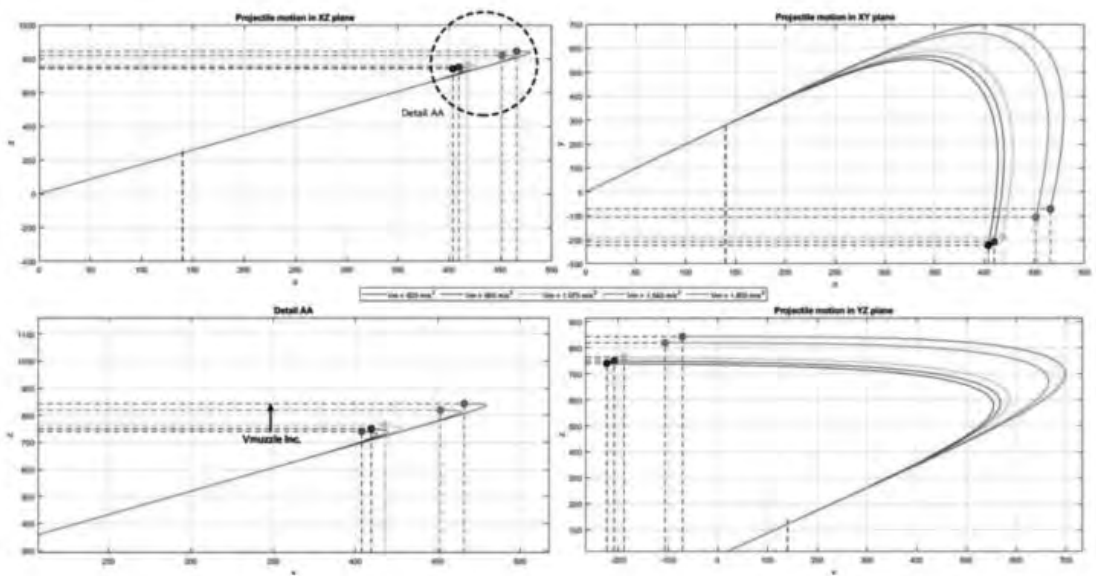
ตารางที่ 3 แนววิถีกระสุนที่ความเร็วปากกระบอกปืนต่าง ๆ

V _{muzzle}	920			980			1070			1540			1800		
	x(k)	y(k)	z(k)	x(k)	y(k)	z(k)	x(k)	y(k)	z(k)	x(k)	y(k)	z(k)	x(k)	y(k)	z(k)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	149.983	296.917	259.800	155.133	307.259	268.721	162.424	321.897	281.349	194.084	385.437	336.189	208.281	413.917	360.780
2	210.795	410.495	365.132	216.650	422.331	375.274	224.876	438.948	389.519	259.863	509.545	450.114	275.230	540.514	476.728
3	249.951	476.033	432.919	256.079	488.517	443.531	264.659	505.981	458.385	300.863	579.514	521.072	316.641	611.488	548.390
4	279.140	516.867	483.409	285.402	529.740	494.247	294.157	547.717	509.401	330.943	623.000	573.070	346.914	655.576	600.711
5	302.578	541.313	523.917	308.915	554.472	534.878	317.765	572.821	550.187	354.855	649.377	614.347	370.919	682.388	642.134
6	322.244	553.187	557.891	328.623	566.581	568.916	337.525	585.234	584.304	374.769	662.832	648.681	390.870	696.194	676.512
7	339.174	554.476	587.152	345.575	568.074	598.206	354.504	586.994	613.625	391.808	665.502	678.045	407.914	699.171	705.858
8	353.913	546.352	612.682	360.325	560.134	623.741	369.264	579.293	639.161	406.572	658.618	703.510	422.662	692.563	731.262
9	366.727	529.706	634.983	373.142	543.652	646.032	382.083	563.023	661.431	419.355	643.071	725.628	435.413	677.261	753.288
10	377.737	505.434	654.309	384.149	519.522	665.335	393.084	539.074	680.697	430.289	619.741	744.675	446.304	654.138	772.216
11	387.016	474.540	670.830	393.020	488.740	681.822	402.340	508.442	697.131	439.451	589.616	760.829	455.411	624.174	788.225
12	394.646	438.085	684.732	401.038	452.376	695.677	409.934	472.198	710.914	446.923	553.760	774.274	462.817	588.442	801.503
13	400.740	397.124	696.241	407.113	411.483	707.129	415.980	431.410	722.283	452.818	513.243	785.246	468.633	548.015	812.283
14	405.035	352.616	705.624	411.783	367.021	716.046	420.619	387.033	731.509	457.274	469.048	794.015	473.002	503.882	820.840
15	408.883	305.379	713.169	415.202	319.825	723.914	423.994	339.872	738.866	460.448	422.030	800.877	476.078	456.900	827.471
16	411.237	256.086	719.162	417.524	270.559	729.824	426.274	290.650	744.665	462.501	372.889	806.129	478.026	407.786	832.480
17	412.653	205.292	723.885	418.900	219.772	734.449	427.597	239.891	749.160	463.586	322.181	810.058	478.999	357.081	836.149
18	413.262	153.386	727.580	419.472	167.879	738.051	428.110	187.999	752.621	463.848	270.330	812.924	479.147	305.240	838.750
19	413.196	100.677	730.483	419.363	115.182	740.850	427.939	135.299	755.272	463.415	217.654	814.957	478.597	252.566	840.515
20	412.558	47.401	732.781	418.680	61.906	743.041	427.193	82.023	757.312	462.397	164.390	816.361	477.459	199.303	841.642
21	411.441	-6.290	734.645	417.517	8.222	744.794	425.965	28.334	758.910	460.892	110.709	817.310	475.832	145.622	842.307
22	409.926	-60.264	736.216	415.956	-45.752	746.255	424.337	-25.644	760.211	458.983	56.735	817.951	473.799	91.652	842.663
23	408.082	-114.440	737.622	414.064	-99.931	747.544	422.377	-79.826	761.339	456.739	2.556	818.411	471.430	37.474	842.833
24	405.966	-168.760	738.962	411.898	-154.252	748.767	420.143	-134.149	762.399	454.219	-51.767	818.795	468.786	-16.846	842.926
25	403.625	-223.179	740.323	409.508	-208.673	750.010	417.684	-188.571	763.476	451.473	-106.188	819.191	465.915	-71.265	843.030

Projectile motion in XYZ



รูปที่ 3 แนววิถีกระสุนบนปริภูมิ 3 มิติ



รูปที่ 4 แนววิถีกระสุนบนระนาบต่างๆ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Cumin, J., B. Grizelj, and R. Scitovski, Numerical solving of ballistic flight equations for big bore air rifle. Tehnicki Vjesnik, 2009. 16: p. 41-46.
- [2] Klimi, G., Improved Euler's Method Applied in Exterior Ballistics. 2016.
- [3] An, L., et al., A Novel Method for Estimating Pitch and Yaw of Rotating Projectiles Based on Dynamic Constraints. Sensors (Basel, Switzerland), 2019. 19(23): p. 5096.
- [4] Anidu, A., et al., Dynamic Computation of Runge Kutta Fourth Order Algorithm for First and Second Order Ordinary Differential Equation Using Java. International Journal of Computer Science Issues, 2015. 12.
- [5] Thomsen, P.G., A Generalized Runge-Kutta Method of order three. 2002.
- [6] Rabiei, F., Fifth-Order Improved Runge-Kutta Method With Reduced Number of Function Evaluations. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2012. 6: p. 97-105.
- [7] Séka, H. and K. Assui, Order of the Runge-Kutta method and evolution of the stability region. Ural Mathematical Journal, 2019. 5: p. 64.
- [8] Seka, H. and R. Assui Kouassi, A New Eighth Order Runge-Kutta Family Method. Journal of Mathematics Research, 2019. 11(2): p. 190-199.
- [9] Feagin, T. A Tenth-Order Runge-Kutta Method with Error Estimate. 2007.
- [10] Carlucci, D.E. and S.S. Jacobson, Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition. 2 ed. 2013, Florida, USA: CRC Press.
- [11] McCoy, R.L., Modern Exterior Ballistics. The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles. 1999, Atglen: Schiffer Publishing.
- [12] Baranowski, L., Equations of motion of a spin-stabilized projectile for flight stability testing. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013. 51: p. 235-246.
- [13] Baranowski, L., Effect of the mathematical model and integration step on the accuracy of the results of computation of artillery projectile flight parameters. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 2013. 61: p. 475-484.
- [14] Baranowski, L., Feasibility analysis of the modified point mass trajectory model for the need of ground artillery fire control systems. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013. 51: p. 511-522.
- [15] Lieske, R.F. and M.L. Reiter. Equations of motion for a modified point mass trajectory. 1966.
- [16] Balon, R. and J. Komenda, Analysis of the 155 mm ERFB/BB projectile trajectory. 2006. 1: p. 91-114.
- [17] Skande, M., Numerical Solution to a Nonlinear External Ballistics Model for a Direct Fire Control System, in KTH Industrial Engineering and Management. 2014, KTH: Stockholm, Sweden.
- [18] Hussain, K., F. Ismail, and N. Senu, Runge-Kutta Type Methods for Directly Solving Special Fourth-Order Ordinary Differential Equations. Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- [19] Elizabeth R. D., The production of firing tables for cannon artillery. 1967.

การวิเคราะห์การกันกระสุนของต้นแบบทางทหาร ด้วยโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิชของเคฟลาร์ และยางพารา ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดสอบ

นิตดา จงไฟโรจน์โมษิต¹ อชิรกฤษฎ์ จุลนิพิฐวรัช อรรถพล เจริญผล ชานนท์ เล็กอึ้งรงค์
นิรมล หุตะเจริญ และ อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน^{2*}

วันที่รับ 21 กรกฎาคม 2563 วันที่แก้ไข 11 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 13 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

ปัจจุบันยางพาราในประเทศมีผลผลิตสูงแต่ราคาถูกลง เพื่อเป็นการสนับสนุนการใช้ยางพาราที่สามารถผลิตเองภายในประเทศ จึงมีแนวคิดการวิจัยและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ยางพารากับงานทางทหารและเพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ การวิจัยพื้นฐานสำหรับยานรบและระบบอาวุธของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยในการประยุกต์ใช้ยางพารา ทางทหารนั้นเป็นการวิจัยและพัฒนาที่ยังมีศักยภาพในการป้องกันกระสุนทำให้ยานรบ อาวุธ ยานเกราะล้อย่างประเภทต่าง ๆ และยานรบลาดตระเวน สามารถปฏิบัติการทางทหารได้อย่างต่อเนื่อง ลดการพึ่งพาการติดตั้งเทคโนโลยีอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ยางแบบ Run Flat หรือการติดตั้งระบบเติมลมอัตโนมัติ เป็นต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบเชิงพฤติกรรมการป้องกันกระสุนโดยแผ่นยางพาราและยางพาราเสริมเส้นใยเคฟลาร์ ในลักษณะโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช (Sandwich Composite Structure) โดยการจำลองการวิเคราะห์ยางและการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยระเบียบข้อเขตมูลฐานจำกัด โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกด้วยการอ้างอิงสมการมูนี - ริฟลิน สมการฮ็อกเคน และสมการโย ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยาง และแบบจำลองวัสดุประเภทเคฟลาร์

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองของยางได้จากการทำ Curve Fitting จากผลการทดสอบ โดยทำการทดสอบการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มิลลิเมตร พบว่ากระสุนสามารถทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและก่อความเสียหายอย่างมาก และการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกระหว่างกลางในลักษณะโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช พบว่ากระสุนสามารถทะลุขึ้นงานได้โดยง่ายและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจน จากผลการวิจัยครั้งนี้ได้ข้อเสนอแนะในประเด็นเกี่ยวกับการเพิ่มความสมบูรณ์ของข้อมูลจากการทดสอบเพื่อให้การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองยางและเคฟลาร์มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ลดความคลาดเคลื่อนของการทำ Curve Fitting จากข้อมูลผลการทดลองที่น้อยเกินไป และในการทำวิจัยในครั้งต่อไปควรนำพฤติกรรมตามธรรมชาติของยางที่มีความยืดหยุ่น มีการคืนตัวหรือหดตัวกลับได้ มาใช้ในการพิจารณาในการทำแบบจำลองของยาง เพื่อให้ได้ผลจากการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมากขึ้น

คำสำคัญ: ยางพารา, ขอบเขตมูลฐานจำกัด, ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์, ยางป้องกันกระสุน

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

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

The Analysis of Military Tire Concept using Sandwich Composite Structure made from Kevlar and Natural Rubber Using Finite Element Method and Experiment

Nadda Jongpairjcosit ¹ Achirakris Julniphitwong Attapon Charoenpon
Chanaon Lekthamrong Niramol Hutacharoen and Artit Ridluan ^{2*}

Received 21 July 2020 Revised 11 August 2020 Accepted 13 August 2020

Abstract

Currently, the domestic use of rubber currently has high productivity but price is very low. To encourage the use of domestic rubber, this research is aimed at the application of the natural rubber for military work and applications as well as the development of basic research to support the research and development of combat vehicles and weapon systems of Defence Technology Institute. The natural rubber application is emphasized on the basic knowledge in research and development of bullet proof rubber to enhance the military vehicle potential such as wheeled armored vehicles and combat patrol vehicles. In addition, the bullet proof rubber can reduce the other technology installation such as run-flat tire and CTIS system.

This research studied the behavioral impact of bullet proof on the rubber sheets and sandwich composite structure of natural rubber and Kevlar using experiment and Finite Element Method (FEM). The experimental and numerical conditions of bullet proof rubber are under shocks with boundary regulations. A series of FEM analysis and comparison against the test results were performed by using basic boundary regulations and the mechanical behavior model of hyperbolic materials based on Mooney-Rivlin, Ogden, and Yeoh equations together with the experiment data.

The coefficient of the rubber model equation was obtained by curve fitting of the experiment data. The experiment of the M193 bullet fired into the rubber sheet with 30 mm thickness showed that the bullet penetrated the tire concept made from natural rubber easily and caused great damage to the rubber. For the experiment of firing the M193 bullet on the rubber with Kevlar inserted in the middle (Sandwich Composite Structure), it was found that the bullet also penetrates the samples, making the rubber and Kevlar clearly separated. In addition, there are the suggestions concerning increase of the experiment to ensure integrity of test results for prediction of the reliable coefficient of rubber and Kevlar models, thus reducing errors in curve fitting due to small experimental data. For future research, the flexibility behavior of rubber is taken into account to accurately predict the behavior of natural rubber.

Keywords : Natural rubber, Finite element method, Bullet proof rubber

¹ Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Military Vehicle Division - RMV, Defence Technology Institute

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

1. ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

จากรายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราภายใต้เครือข่ายความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบการและหน่วยงานวิจัยสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม [1] แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีการสร้างมูลค่าเพิ่มจากยางพาราเพียงร้อยละ 12.5 ของปริมาณยางพาราที่ผลิตในแต่ละปีหรือเพียง 520,628 ตันเท่านั้น (ข้อมูล พ.ศ. 2556) ยางพาราอีก 3,664,941 ตัน หรือร้อยละ 87.5 ส่งออกในรูปแบบวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรม ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่งมาตรฐาน และน้ำยางข้น การสร้างมูลค่าเพิ่มของยางพาราโดยการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้ 4-10 เท่าของมูลค่ายางพารา ดังนั้นจะเห็นได้ว่ารายได้ของประเทศจากการส่งออกยางพาราและผลิตภัณฑ์ยางพาราไม้ยางพาราในปี พ.ศ. 2556 กล่าวคือประเทศไทยส่งออกยางพารา 3,664,941 ตัน สร้างรายได้ 249,296 ล้านบาท แต่ส่งออกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการใช้ยางพาราประมาณ 520,628 ตัน สามารถ สร้างมูลค่าได้ถึง 257,204 ล้านบาท

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากยางสำหรับการประยุกต์ใช้ทางทหาร ซึ่งเป็นการสนับสนุนการใช้ยางพาราในประเทศ ปัจจุบันมีผลผลิตสูงแต่มูลค่าเพิ่มค่อนข้างต่ำ การวิจัยและพัฒนาทางทหารนี้รวมถึงการออกแบบยางให้มีคุณลักษณะพิเศษ เช่น ยางที่มีความสามารถในการป้องกันกระสุน ซึ่งความรู้ที่ได้รับจากโครงการนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการขยายขอบเขตองค์ความรู้ด้านการออกแบบด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกันประเทศให้มีศักยภาพมากยิ่งขึ้นและเพื่อเป็นกำลังหลักให้กับ การวิจัยและพัฒนา ยานรบและระบบอาวุธ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของยางในงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการพัฒนาสูตรยางทั้งแบบคอมพาวนด์ (Compound) และผสมเส้นใยเพิ่มความสามารถในการป้องกันแรงดันจากกระสุนแต่ยังไม่เพียงพอที่จะ

ยับยั้งกระสุนได้ นั่นคือกระสุนทะลุแผ่นยางได้ทุกแผ่น ทั้งพลังงานที่ลดลงยังมีค่าเพียงเล็กน้อยซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาล้อกันกระสุนโดยการพัฒนาแต่เพียงสูตรยางหรือการเพิ่มเส้นใยลงในเนื้อยางไม่สามารถต้านทานแรงจากกระสุนได้

ในการดำเนินงานต่อมาจึงได้นำผลการทดสอบข้างต้นมาทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) [2] รวมทั้งการหาคุณสมบัติของวัสดุเพิ่มเติม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อจำลองพฤติกรรม การเสียหายของยางและเก็บเป็นองค์ความรู้ในการวิเคราะห์ยางภายใต้แรงกระแทกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านยานรบและระบบอาวุธ [3] อีกทั้งเพื่อลดข้อจำกัดของการขับเคลื่อนยานรบคือ ยางรถเดิมที่ไม่สามารถทนทานต่อกระสุนปืนได้เนื่องจากเมื่อถูกกระสุนปืนยิงทะลุผ่านจะเกิดรูรั่วส่งผลให้ลมยางรั่ว

ปัจจุบันได้มีการพัฒนายางขึ้นมามากหลายแบบเพื่อแก้ไขจุดอ่อนดังกล่าวข้างต้น ทั้งมีการใส่ยาง Run-Flat ซึ่งเป็นยางตันอยู่ภายในยางรถยนต์หรือพัฒนายางประเภทไมล์เลส (Airless Tire) ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดการวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างนวัตกรรมการป้องกันยางรถจากกระสุนปืนที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตได้ง่าย โดยได้พัฒนายางแบบโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช (Sandwich Composite Structure) ที่ประกอบด้วยชั้นของยางและชั้นของเคพลาร์ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการจำลองยิงกระสุนปืนขนาด 5.56 มม. ใส่โครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิชแล้วทำการบันทึกพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการเริ่มต้นเชิงแนวคิดในการพัฒนายางกันกระสุนและเป็นการพัฒนาความรู้ด้านการวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) ทางด้านการทำยางป้องกันกระสุนที่เป็นองค์ความรู้ในการวิเคราะห์ยางภายใต้แรงกระแทกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการออกแบบยางทางทหาร

2.1 นโยบายและการสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาทางทหาร

สาเหตุและปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ผลงานวิจัยทางทหารไปสู่การผลิตเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม [4] คือ ปรับเปลี่ยนแนวทางการวิจัยและพัฒนาจากการมุ่งวิจัยเพื่อซ่อมหรือทดแทนเป็นการวิจัยเพื่อสร้างนวัตกรรม เอกสารวิจัยฉบับนี้ค้นพบว่าผลผลิตของโครงการวิจัยและพัฒนาที่รับผิดชอบสามารถเป็นต้นแบบผลงานวิจัยทางทหารของไทยได้ทั้งสิ้น เพราะผ่านกระบวนการทดสอบและมาตรฐานต่าง ๆ จนสามารถใช้งานจริงได้ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดได้แก่เมื่อ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2537 ศูนย์สงครามพิเศษได้วิจัยและพัฒนารองเท้าสำหรับทหารหน่วยรบพิเศษและได้ซื้อสรุปารองเท้าที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงและได้มีการปรับปรุงรองเท้าต้นแบบดังกล่าวแล้ว

ส่วนการพัฒนายางทางทหารนั้น กองทัพให้ความสำคัญในการนำผลิตภัณฑ์ยางพารามาวิจัยและพัฒนาเพื่อการประยุกต์ใช้กับยุทธโศปกรณ์ทางทหาร ดังจะเห็นได้จากการayangแห่งประเทศไทยและกองทัพบกได้ตระหนักถึงความสำคัญในนโยบายด้านยางพาราของรัฐบาลที่เน้นดำเนินการแปรรูปยางพาราเพื่อเพิ่มมูลค่าและสนับสนุนการใช้ยางพาราภายในประเทศ รวมทั้งนโยบายด้านความมั่นคงและการป้องกันประเทศ จึงได้ร่วมลงนามบันทึกความเข้าใจด้วยความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาและนำศักยภาพของแต่ละหน่วยงานมาร่วมกันเสริมสร้างความมั่นคงและศักยภาพในการป้องกันประเทศผ่านการนำผลผลิตยางพารามาวิจัยและพัฒนาเพื่อนำไปสู่การแปรรูปเป็นนวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ที่มีมาตรฐานและประสิทธิภาพในการนำไปใช้ได้จริงในอนาคต [5]

2.2 การวิจัยและพัฒนาทางทหาร

หลักการพื้นฐานของงานโดย Cole et al. [6] คือ การหาความแตกต่างในขนาดของวัสดุที่บรรจุไว้ในถุงทราย (ทรายและยางบด) ที่มีผลต่อการทะลุทะลวงของกระสุนที่ยิงแบบโปรเจกไทล์ขนาด 7.62x39 มม. (308-short) และ 9 มม. จากลำกล้อง Luger ผลที่ได้นำไปประยุกต์ใช้ได้กับทั้งด้านทหารและพลเรือน ถุงทรายมีผลการสึกกร่อนจากโปรเจกไทล์โดยเกิดรอยหรือการแยกส่วนและเปลี่ยนรูปขณะที่ยางยังคงอยู่ในสภาพเดิม

จากงานวิจัยของ สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม et al. [7] ได้เสนอผลการทดสอบเนื่องจากโครงการทดสอบแผงคอนกรีตกันกระสุนหลายชั้น (Multilayer bulletproof concrete panel) รูปแบบความล้มเหลวและการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ความหนาต่างกันถูกนำมาทดสอบด้วยปืนที่กระสุนขนาด 9 และ 11 มม. ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ต่อไปในการออกแบบแผงคอนกรีตกันกระสุนหลายชั้นโดยอาศัยหลักการรวมกันดูดซับพลังงาน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนา

การศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัย [7] ใน [8] โดย Maho et al. ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการใส่แผ่นยางพาราที่มีในเชิงพฤติกรรมของแผงกันกระสุนหลายชั้นที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กไฟเบอร์ วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือการใส่ชั้นยางเข้าไปในชั้นกลางเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นกักเก็บเพื่อป้องกันกระสุนจากการสะท้อนออกจากแผง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแผงที่มีระดับการดูดซับพลังงานจากการกระแทกต่ำกว่าพลังงานจลน์ของกระสุนล้มเหลวจากการเจาะเป็นโพรง

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นได้ว่ายางพารามีส่วนสำคัญในการยับยั้งการเปลี่ยนรูป และมีส่วนสำคัญในการคงสภาพเดิมของวัสดุที่ใช้ยางช่วยเสริมมีส่วนช่วยในการดูดซับพลังงานของวัสดุที่นำยางพาราเข้าไปผสมและเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนา

สามารถใช้ทำหน้าที่เป็นชั้นกับดักเพื่อป้องกันกระสุนจากการสะท้อนออกจากแผงได้

3. การจำลองการวิเคราะห์ยางและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

จากผลการดำเนินการทดสอบในปี 2559 [2] พบว่าแนวคิดในการพัฒนาสูตรยางทั้งแบบคอมพาวนด์ (Compound) และผสมเส้นใยเพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันแรงต้านจากกระสุนไม่สามารถต้านทานแรงจากกระสุนได้ จึงทำให้มีความจำเป็นในการปรับเปลี่ยนแผนการดำเนินการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมาโดยเปลี่ยนจากการสร้างต้นแบบเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ในการวิเคราะห์ยางภายใต้แรงกระแทกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนายานรบและระบบอาวุธต่อไปในอนาคต

3.1 การพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ยาง เป็นการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ยางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก (Hyper-elastic Model) ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยาง

3.1.1 แบบจำลองของวัสดุประเภทยางประเภทไฮเปอร์อีลาสติก (Hyper-elastic Material Model)

แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทยางนั้นอยู่ในกลุ่มของวัสดุประเภท Hyper-elastic [9] ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยในการพัฒนาแบบจำลองนั้นเป็นการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแสดงพฤติกรรมของยางได้สอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งในปัจจุบันมีสมการที่ใช้อ้างอิงอยู่หลายรูปแบบ สำหรับในรายงานนี้จะมามีทั้งหมด 3 รูปแบบที่ทำการศึกษา ดังนี้

1) สมการมูนี-ริฟลิน (Mooney-Rivlin) เป็น

สมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัญหาพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้น ของวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) สมการของมูนี-ริฟลินนั้นจะแสดงถึงความสัมพันธ์ ระหว่างพลังงานความเค้นกับค่าคงที่ (Invariant) ซึ่งอยู่ในรูปของเมทริกแบบสมมาตรของสัดส่วนการยืด (Stretch Ratio) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$W = \sum_i \sum_j c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j D(J - 1)^2 \quad (1)$$

ทำการกระจายตัวแปรในสมการที่ (1) ออกมาจะได้

$$W = C_{10}(I_1 - 3)^1 + C_{01}(I_2 - 3)^1 + C_{11}(I_1 - 3)^1 + C_{20}(I_1 - 3)^2 + \dots + D(J - 1)^2$$

โดยที่ค่าตัวแปร C_{10} , C_{01} , C_{11} และ C_{20} คือ ค่าที่ได้จากการทำ Curve Fitting ของผลการทดสอบแรงดึง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ทั้งนี้สำหรับสมการมูนี-ริฟลินอย่างง่ายที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นจะทำการลดนิพจน์ของสมการออกเพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงลดรูปเหลือดังสมการที่ (2)

$$W = C_{10}(I_1 - 3)^1 + C_{01}(I_2 - 3)^1 + D(J - 1)^2 \quad (2)$$

2) สมการอ็อกเดน (Ogden) มีพื้นฐานจากความสัมพันธ์ของพลังงานความเครียดกับค่าการยืดตัวหลัก (Principal Stretch) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\psi = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n \frac{\mu_j}{\alpha_j} (\lambda_i^{\alpha_j} - 1) + K(J - 1) \quad (3)$$

3) สมการโย (Yeoh) เสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1993 โดยใช้หลักการของพหุนามดีกรี 3 ที่ว่าพลังงานความเครียดนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปร I_1 เพียงตัวเดียว ซึ่งสมการของโยนี้มีข้อดีตรงที่สามารถเข้ากับกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ในช่วงกว้างได้ดีโดยแสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{D_j} (J - 1)^{2j} \quad (4)$$

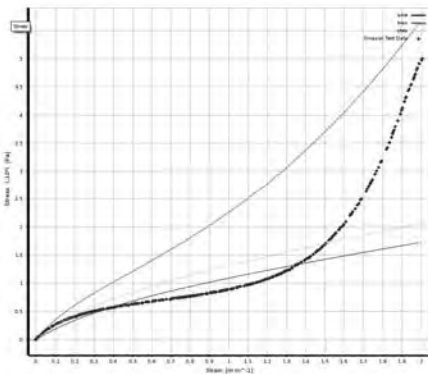
3.1.2 แบบจำลองวัสดุประเภทเคฟลาร์ (Kevlar Model)

ในการทดสอบการยิงแผ่นยางนั้น ใช้แผ่นยางที่ได้รับ การเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar) ซึ่งเป็น เส้นใยสังเคราะห์ประเภทพารา-อะรามิด (Para-aramid) สำหรับสมการแสดงคุณสมบัติของวัสดุประเภทเคฟลาร์ นั้นใช้สมการสถานะพัฟฟ์ (Puff EOS) ซึ่งสมการพัฟฟ์นี้ ถูกพัฒนาโดย Shark และ Sharp ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1958 เพื่อ อธิบายคลื่นความเครียด (Stress Wave) ที่เกิดจากการชน และการระเบิด โดยใช้หลักการของลากรางจ์ (Lagrange) และอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) เข้าช่วย

3.2 การเลือกเส้นกราฟที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบ (Curve Fitting)

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองของยางนั้นได้ จากการทำ Curve Fitting ของผลการทดสอบ ซึ่งแต่ละ แบบจำลองได้ผลดังนี้

3.2.1 แบบจำลองของสมการมูนิ-ริฟลิน

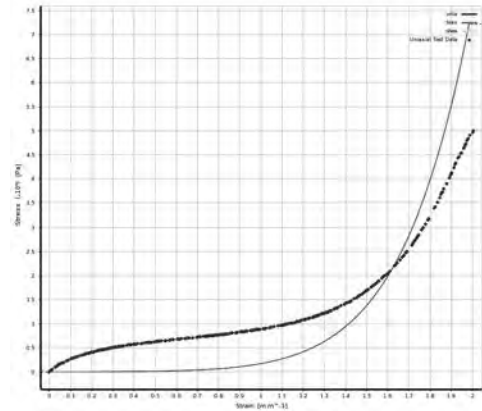


รูปที่ 1 Curve Fitting ด้วยสมการมูนิ-ริฟลิน

จากรูปที่ 1 แสดงการทดสอบ Curve Fitting ด้วยสมการมูนิ-ริฟลิน ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร $C_{10} = 0.27414$ MPa และ $C_{01} = 0.75052$ MPa

3.2.2 แบบจำลองของสมการอ็อกเดน

ผลการ Curve Fitting ด้วยสมการอ็อกเดน (รูปที่ 2) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรดังในตารางที่ 1

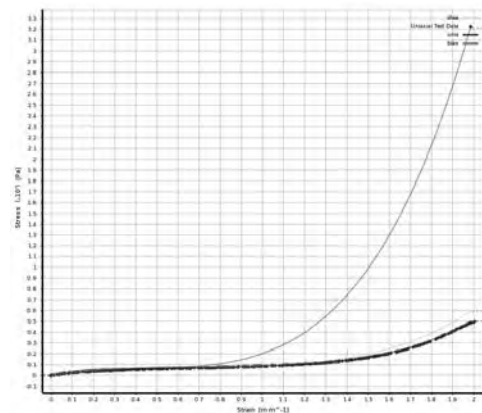


รูปที่ 2 Curve Fitting ด้วยสมการอ็อกเดน

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรของสมการอ็อกเดน

ตัวแปร	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3
หน่วย	Pa	Pa	-	-	-	-
ค่า	87.634	87.647	87.66	10.366	10.333	10.346

3.2.3 แบบจำลองของสมการโย



รูปที่ 3 Curve Fitting ด้วยสมการโย

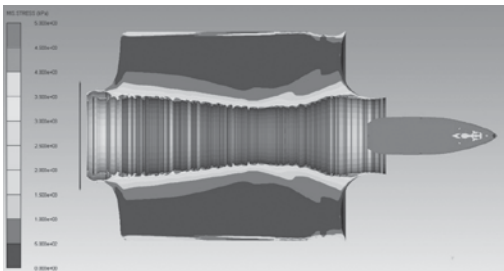
จากรูปที่ 3 แสดงการทดสอบ Curve Fitting ด้วย สมการโยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรดังนี้

$C_{10} = 0.4014$ MPa, $C_{20} = -0.700$ MPa และ $C_{30} = 0.107$ MPa

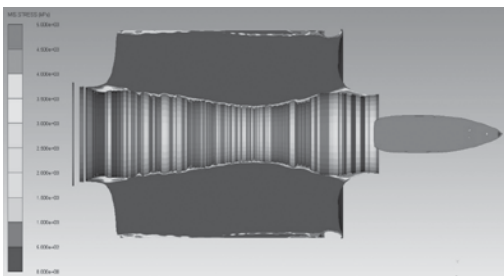
4. การวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มม.

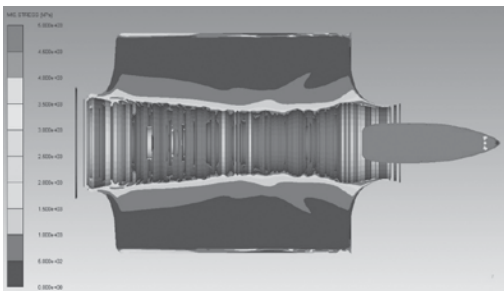
จากผลการทดสอบการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดสอบ Curve Fitting ผลที่ได้ดังในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงถึงความสามารถของกระสุนในการทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและมีความเสียหายเกิดขึ้นที่ยางอย่างมาก การกระจายตัวของความเครียดในเนื้อยางนั้นพบว่าแบบจำลองของมูนี-ริฟลิน (รูปที่ 4 ก) และโย (รูปที่ 4 ค) ให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกัน



ก) ยางที่ใช้แบบจำลองมูนี-ริฟลิน



ข) ยางที่ใช้แบบจำลองออกเคน

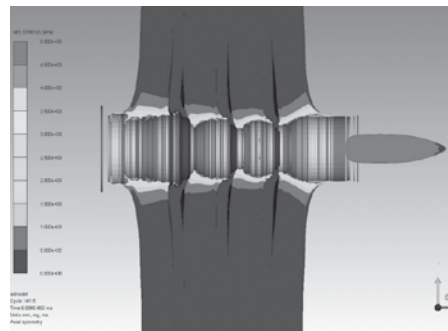


ค) ยางที่ใช้แบบจำลองโย

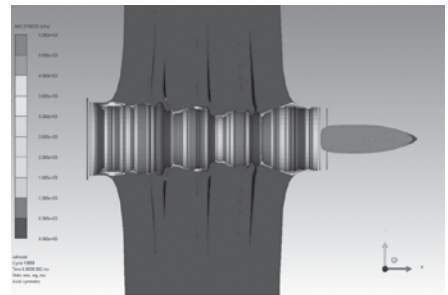
รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์การยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มม.

4.2 ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรก

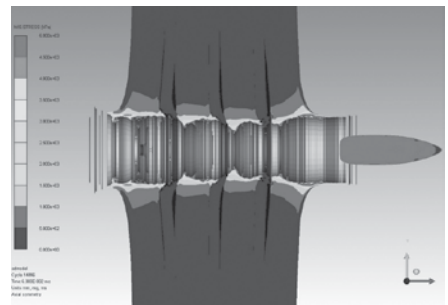
ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกเป็นชั้นระหว่างกลาง โดยใช้ยางที่มีความหนา 6 มม. จำนวน 4 ชั้น และชั้นเคฟลาร์มีความหนา 2 มม. จำนวน 3 ชั้น ถูกอัดให้รวมอยู่ด้วยกัน ผลของการจำลองแสดงให้เห็นว่ากระสุนสามารถทะลุชั้นงานได้โดยยางและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนและการกระจายตัวของความเครียดในเนื้อยางนั้นพบว่าแบบจำลองของมูนีและโยนั้นยังให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกัน



ก) ยางใช้แบบจำลองมูนี-ริฟลินและเคฟลาร์ใช้แบบจำลอง Puff



ข) ยางใช้แบบจำลองอ็อกเคนและเคฟลาร์ใช้แบบจำลอง Puff



ค) ยางใช้แบบจำลองโยและเคฟลาร์ใช้แบบจำลอง Puff

รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์การยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรก

5. การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง

ภายหลังการทดลองยิงกระสุนขนาด 5.56 มม. ใส่ยางปรากกว่ากระสุนสามารถทะลุผ่านยางไปได้โดยง่าย ทั้งนี้วัดค่าความเร็วของกระสุนก่อนเข้าและหลังออกจากแผ่นยางแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเร็วของกระสุนก่อนเข้าและหลังออกจากแผ่นยาง

ชิ้นงานทดสอบ	ความเร็วเข้า [m/s]	ความเร็วออก [m/s]	%ลด
ยางหนา 30 มม.	963	954	0.93
ยางเสริมเส้นใยเคพลาร์หนา 30 มม.	971	915	5.7

เมื่อศึกษาขนาดของรูขาเข้าและรูขาออกของกระสุนพบว่ามีความหนาเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณอยู่ที่ 3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 6



ก) แสดงรูกระสุนขาเข้าของแผ่นทดสอบยางเสริมเส้นใยเคพลาร์

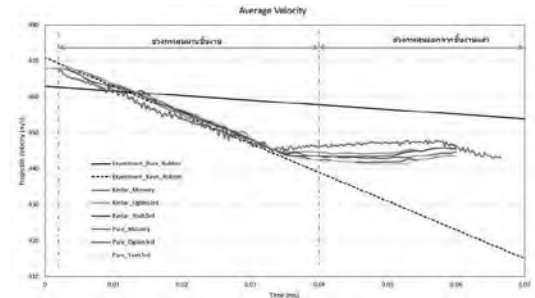


ข) แสดงรูกระสุนขาออกของแผ่นทดสอบยางเสริมเส้นใยเคพลาร์

รูปที่ 6 ผลวิเคราะห์การยิงกระสุนบนแผ่นยางทดลอง:

ก) รูกระสุนขาเข้า และ ข) รูกระสุนขาออก

ผลการจำลองนั้นสามารถวัดความเร็วเฉลี่ยของกระสุนขาออกได้อยู่ที่ประมาณ 945 m/s โดยที่แต่ละรูปแบบสมการของวัสดุนั้นให้ค่าที่ไม่ต่างกัน ดังแสดงในกราฟของรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความเร็วของกระสุนที่มีการเปลี่ยนแปลง

จากกราฟแสดงความเร็วของกระสุนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อวิ่งผ่านทะลุแผ่นยาง สามารถสรุปความเร็วของกระสุนโดยการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ของแผ่นยางได้ดังตารางที่ 3 และ สรุปความเร็วของกระสุนที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ของแผ่นยางและเคพลาร์ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 สรุปความเร็วกระสุนเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองของแผ่นยาง

ชิ้นงานทดสอบ	ความเร็วเข้า [m/s]	ความเร็วออก [m/s]	% ลด
ยาง 30 มม.	963	954	0.93
ผลการทดลอง	963	954	0.93
แบบจำลอง มูนนี่-ริฟลิน	968	942	2.68
แบบจำลอง อ็อกเดน	968	943	2.58
แบบจำลอง โย	968	942	2.68

เมื่อวัดร้อยละของความเร็วกระสุนที่ลดลงไปพบว่าข้อมูลที่ได้จากการใช้แบบจำลอง มีค่าค่อนข้างแตกต่างไปจากผลการทดลอง แต่รูปแบบของการลดลงของ

ความเร็วนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกแบบจำลองสาเหตุในเบื้องต้นมาจากความคลาดเคลื่อนในการคำนวณทางตัวเลข การขาดข้อมูลที่สมบูรณ์ของการทดสอบที่จะนำมาใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองยางและเคฟลาร์ ความคลาดเคลื่อนของการทำ Curve Fitting และข้อมูลผลการทดลองที่น้อยเกินไป จึงเป็นข้อเสนอนี้สำคัญเพื่อการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4 สรุปความเร็วกระสุนเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองของแผ่นยางเสริมแรงเคฟลาร์

ชิ้นงานทดสอบยางเสริมแรงเคฟลาร์หนา 30 มม.	ความเร็วขาเข้า [m/s]	ความเร็วขาออก [m/s]	% ลด
ผลการทดลอง	971	915	5.7
แบบจำลองมูนี่-ริฟลิน	968	945	2.37
แบบจำลองอ็อกเดน	968	943	2.53
แบบจำลองโย	968	942	2.68

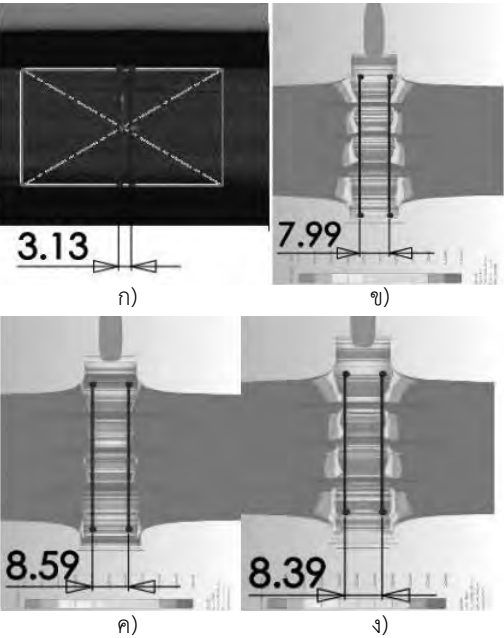
ผลการวัดขนาดของรูที่กระสุนปืนเจาะไว้ตามรูปที่ 8 พบว่า ค่าจากการจำลอง (รูปที่ 8 ข), ค) และ ง)) นั้นมีค่าสูงกว่าผลของการทดลอง (รูปที่ 8 ก)) เกินกว่า 2.5 เท่าเนื่องจากลักษณะธรรมชาติของยางที่มีความยืดหยุ่นจะมีการคืนตัวหรือหดตัวกลับได้ ทำให้นขนาดของรูเล็กกว่าขนาดของกระสุนคือ 5.56 มม. แต่ในแบบจำลองของยางที่ใช้นั้นไม่ได้นำพฤติกรรมนี้เข้าไปในแบบจำลองเนื่องจากการจำลองจะสามารถคำนวณได้ด้วยความรวดเร็วกว่า ดังนั้นจึงมีข้อเสนอนี้ให้มีการนำพฤติกรรมความยืดหยุ่นของยางเข้ามาจำลองเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงผลการทดลองมากขึ้น

6. สรุปผลและข้อเสนอนี้

6.1 สรุปผล

การวิจัยและพัฒนาทางทหารครั้งนี้ทำการศึกษาผลกระทบจากการใส่เส้นใยเสริมแรงเคฟลาร์ในยางพาราซึ่งมีพฤติกรรมในเชิงของแผ่นกันป้องกันกระสุนหลายชั้น ด้วยการจำลองการวิเคราะห์ยางและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยระเบิดไฟในต้อลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกด้วยการอ้างอิงสมการมูนี่-ริฟลิน สมการอ็อกเดน และสมการโยร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยาง และแบบจำลองวัสดุประเภทเคฟลาร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองของยางจาก Curve Fitting ของผลการทดสอบ

ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มม. แสดงให้เห็นว่ากระสุนทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและก่อความเสียหายต่ออย่างมาก แบบจำลองของมูนี่-ริฟลินและโยให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกันและผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกระหว่างกลาง แสดงให้เห็นว่ากระสุนสามารถทะลุชิ้นงานได้โดยยางและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนและพบว่าการกระจายตัวของความเครียดในเนื้อยางแบบจำลองของมูนี่-ริฟลินและโยยังคงให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกัน



รูปที่ 8 ผลการวัดขนาดรูที่กระสุนเจาะไว้ : ก) จากการทดลอง, ข) แบบจำลองมูนี่-ริฟลิน, ค) แบบจำลองอ็อกเดน, ง) แบบจำลองโย

6.2 ข้อเสนอแนะ

ประเด็นความเร็วกระสุนที่ลดลงจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองมีค่าค่อนข้างแตกต่างไปจากผลการทดลองขณะที่รูปแบบของการลดลงของความเร็วในแต่ละแบบจำลองนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน สืบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการคำนวณทางตัวเลข จึงเสนอให้เพิ่มเติมความสมบูรณ์ของข้อมูลจากการทดสอบเพื่อให้การหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองยางและเคพลาร์มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ลดความคลาดเคลื่อนของการทำ Curve Fitting เนื่องจากข้อมูลผลการทดลองที่น้อยเกินไป

อีกทั้งมีข้อเสนอแนะจากผลการวัดขนาดของรูที่กระสุนปืนเจาะไว้จากการใช้แบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลของการทดลองเกินกว่า 2.5 เท่า เนื่องจากลักษณะธรรมชาติของยางที่มีความยืดหยุ่น มีการคืนตัวหรือหดตัวกลับได้ ทำให้น้ำขนาดของรูเล็กกว่าขนาดของกระสุน แต่ในแบบจำลองของยางที่ใช้ไม่ได้ นำพฤติกรรมนี้เข้าไปในแบบจำลองเนื่องจากเหตุผลด้านการคำนวณได้เร็วกว่า ดังนั้นจึงเสนอแนะให้มีการนำพฤติกรรมความยืดหยุ่นเข้ามาจำลองเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษฎา สุชีวะ. 2557. โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราภายใต้เครือข่ายความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบการและหน่วยงานวิจัย. รายงานการศึกษาศัมบูรณ์. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. จำนวน 254 หน้า.
- [2] ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ. 2559. รายงานการดำเนินการโครงการวิจัยพื้นฐานยางทางทหาร ปี 2559. โครงการวิจัยพื้นฐานยางทางทหาร: รายงานการดำเนินงาน ต.ค. 2558 - ก.ย. 2559. Doc. No.: DTI-ORD-TP-2013: Rev.00. จำนวน 40 หน้า.
- [3] Editioral team. 2019. Armoured vehicles and weapon systems. Thailand Defence Technology Journal. Volume 9 Issue 35: July - September 2019. pp. 56 - 69.

[4] ศรัชย์ กาญจนสูตร. 2560. การวิจัยและพัฒนาต้นแบบผลงานวิจัยทางทหารไปสู่การผลิตเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม. เอกสารวิจัยส่วนบุคคล. วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร. จำนวน 92 หน้า.

[5] สำนักงานวิจัยและพัฒนาทางทหารกองทัพบก. 2560. ความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาในการใช้ยางพาราทางทหาร. บันทึกความเข้าใจระหว่างการยางแห่งประเทศไทยกับกองทัพบก. 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2560.

[6] Cole., R. P. (2010). Ballistic penetration of a sandbagged redoubt using silica sand and pulverized rubber of various grain sizes. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of South Florida. 22 October 2010. 120p.

[7] สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม, บุชิต มาห์ และปิติ สุนทรสุขกุล. (2561) การดูดซับพลังงานและรูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตแบบหลายชั้นจากเส้นใยเหล็กแผ่นโฟม และยางพารา. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 28 ฉบับที่ 3 ก.ค.-ก.ย.2561. หน้า 515 - 524.

[8] Maho, B., Jamnam, S., Sukontasukkul, P., Fujikak, K. and Banthia, N. (2017). Preliminary study on Multilayer bulletproof concrete panel: impact Energy absorption and failure pattern of fibre reinforced concrete, para-rubber and styrofoam sheets. 6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2017, 11-12 December 2017, Guangzhou (Canton), China.

[9] Miller, F. P., Vandome, A. F. and John, M. 2010. Hyperelastic material. VDM Publishing. 80p.

ระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทรวด

พฤกจิภา สุขศิริมัท ^{1*} และ ธนัช ชันเงิน ²

วันที่รับ 13 กรกฎาคม 2563 วันที่แก้ไข 28 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 31 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบชนวนหัวรบ (Fuze) ของการวิจัยนี้มีแนวคิดการออกแบบและขั้นตอนการทำงานตามเอกสาร MIL-STD-1316D ซึ่งระบุถึงเกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบชนวนหัวรบ โดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างกลไกทางไฟฟ้าและกลไกทางกล เพื่อให้สามารถรับรู้ถึงเป้าหมาย การตอบสนองต่อเงื่อนไขและคำสั่งต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ในการจัดชนวนวัตถุระเบิดได้อย่างแม่นยำและปลอดภัย อีกทั้งยังได้ศึกษาสิทธิบัตรต่าง ๆ เช่น Electro-mechanic Fuze เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาชนวนหัวรบ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในขั้นตอนการทำงาน และให้มีศักยภาพในการทำงานของระบบชนวนหัวรบที่ดียิ่งขึ้น โดยบทความวิจัยนี้เป็นรายงานผลการศึกษา การออกแบบ และการจำลองการทำงานของระบบชนวนหัวรบแบบ Electro-mechanic Fuze ที่ทำงานร่วมกันระหว่างกลไกทางไฟฟ้าและกลไกทางกล เพื่อเป็นขั้นพื้นฐานในการต่อยอดความคิดในขั้นต่อไป

คำสำคัญ: ชนวนหัวรบ, จรวด, กลไกทางไฟฟ้า, กลไกทางกล

^{1, 2} ส่วนงานวิศวกรรมวัตถุระเบิด และนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

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

Electro-mechanic fuze for rockets

Phulkjika Sooksirimuch ^{1*} and Thanach Khantong ²

Received 13 July 2020 Revised 28 August 2020 Accepted 31 August 2020

Abstract

The design of fuze in this research use the methodology and procedures indicated in MIL-STD-1316D which determined the safety qualifications need to be considered when designing fuze. This design incorporates both mechanical and electrical mechanisms for target perception, conditions and command responses that are pre-determined for safe and accurate detonation of the fuze. Also, patents are studied as guidelines for designing and developing of the fuze to further enhanced safety and potential of the fuze. This research article is a report of the design and simulation of Electri-mechanic fuze to use as a foundation for further studies in the future.

Keywords : Fuze, Rocket, Electro-mechanic fuze

^{1, 2} NBC and Explosive Engineering Division - RNE Defence Technology Institute.

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

1. ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

ในการออกแบบขบวนหัวรบ (Fuze) นั้นผู้เขียนได้ใช้ MIL-STD-1316D Safety Criteria for Fuze Design และ Safety and Arming Device Design Principles [1] เป็นแนวทางในการออกแบบ เพื่อให้ขบวนหัวรบที่ได้มีความปลอดภัยสูงและเป็นไปตามหลักการสากล โดย MIL-STD-1316D เป็นเอกสารที่จัดทำโดยกระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกา ซึ่งภายในเอกสารจะระบุถึงเกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่จะต้องคำนึงถึงเมื่อทำการออกแบบขบวนหัวรบ (Fuze) โดยเอกสารดังกล่าวให้คำจำกัดความหัวรบว่าเป็นระบบทางกายภาพที่ถูกออกแบบเพื่อให้รับรู้ถึงเป้าหมายหรือตอบสนองต่อเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดไว้ เช่น เวลา ความดัน หรือคำสั่ง และทำการเริ่มจุดขบวนวัตถุระเบิด (Explosive train) หรือจุดยุทธโศภรณ์นั้น ๆ ทันที ซึ่งตาม [2] การออกแบบขบวนหัวรบมีเงื่อนไขที่ต้องคำนึงถึง ดังนี้

1.1 ระบบความปลอดภัยของขบวนหัวรบ โดยในระบบเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- ไม่ทำให้เกิดขั้นตอนการพร้อมยิง (Arming sequence) จนกว่าผู้ใช้ตั้งใจให้เกิดการพร้อมยิง
- ไม่อ่อนไหวต่อความล้มเหลวร่วม (Common-mode failures) กล่าวคือ หากเกิดการผิดพลาดที่จุดใดจุดหนึ่งของระบบ ขบวนหัวรบจะต้องไม่ทำงาน
- จะต้องไม่มีโหมดความล้มเหลวจากจุดเดียว (Single-point failure mode) ก่อนหรือในช่วงจุดเริ่มต้นขั้นตอนการพร้อมยิง กล่าวคือจะต้องไม่มีการผิดพลาดใด ๆ เกิดขึ้นทั้งสิ้นก่อนหรือในช่วงจุดเริ่มต้นขั้นตอนการพร้อมยิง
- ต้องมีโหมดล้มเหลวแค่จุดเดียวระหว่างการพร้อมยิง ซึ่งควรจะเป็นช่วงใกล้กับช่วงสุดท้ายของการพร้อมยิง

ทั้งนี้การออกแบบขบวนหัวรบต้องป้องกันการพร้อมยิงก่อนกำหนด (Premature fuze arming) หรือการทำงานใด ๆ หากขบวนหัวรบนั้นเป็นขบวนหัวรบทางไฟฟ้าแล้วเกิดการ

ผิดพลาดภายในวงจรไฟฟ้าในช่วงก่อน ระหว่าง หรือภายหลังการนำไฟฟ้ามาใช้ในระบบของขบวนหัว

นอกจากนั้น ระบบความปลอดภัยของขบวนหัวรบยังจะต้องประกอบด้วยคุณลักษณะด้านความปลอดภัย (Safety features) ตั้งแต่ 2 แบบขึ้นไป โดยจำเป็นต้องทำงานอิสระจากกันและป้องกันการพร้อมยิงโดยไม่ตั้งใจ และเมื่อทำงานแล้วจะต้องไม่สามารถย้อนกลับสู่สภาวะเดิมได้ ต้องมีการหน่วงการพร้อมยิงเพื่อให้สามารถออกห่างจากขบวนหัวรบได้เมื่อปฏิบัติงาน ต้องไม่สามารถพร้อมยิงด้วยมือได้ และหากเป็นขบวนหัวรบชนิดไฟฟ้าโปรแกรมควบคุมการทำงาน (Firmware) จะต้องไม่สามารถถูกลบหรือปรับเปลี่ยนได้โดยสภาพแวดล้อม

1.2 อัตราความล้มเหลว จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ดังนี้

- ก่อนขั้นตอนการพร้อมยิง อัตราความล้มเหลวของการพร้อมยิงและการทำงานต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 1,000,000 ขบวนหัว
- ก่อนออกจากห้องยิง อัตราความล้มเหลวของการพร้อมยิงต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 10,000 ขบวนหัว และอัตราความล้มเหลวของการทำงานต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 1,000,000 ขบวนหัว
- ช่วงระหว่างขั้นตอนการพร้อมยิง และก่อนออกจากห้องยิง ต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 1,000 ขบวนหัว

โดยการวิเคราะห์เงื่อนไขความอันตราย มีดังนี้

- วิเคราะห์อันตรายเบื้องต้น ใช้ MIL-STD-882 [2]
- วิเคราะห์อันตรายของระบบและการวิเคราะห์อย่างละเอียด ใช้ Fault tree analysis และ Failure mode effects and criticality analysis
- ขบวนหัวรบที่มีการใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ หรืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์อื่น ๆ ให้มีการวิเคราะห์การมีส่วนร่วมของซอฟต์แวร์ต่อการทำงานของคุณลักษณะด้านความปลอดภัย
- หากพบว่าซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นการควบคุมลักษณะ

ด้านความปลอดภัยโดยตรง จะต้องมีการวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อเป็นการยืนยันว่าซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะไม่ล้มเหลวและส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะด้านความปลอดภัย

โดยในการวิจัยพื้นฐานครั้งนี้จะยึดเพียงหลักการออกแบบเบื้องต้นเหล่านี้ เนื่องจากจะยังไม่มี การนำวัตถุระเบิดมาใช้ทดสอบจริง และเป็นเพียงการพิสูจน์แนวความคิดเบื้องต้นเท่านั้น

Safety and Arming Device Design Principles เป็นเอกสารที่อ้างอิงเพิ่มเติมจาก MIL-STD-1316D [3] โดยจะเป็นการอธิบายหลักการต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น

ในการออกแบบระบบไฟฟ้าของขบวนหัวรบ ผู้เขียนได้ใช้สิทธิบัตรของขบวนหัวรบทางด้านไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วเป็นรากฐานในการต่อยอดความคิดและการออกแบบที่จะนำไปสู่การทำงานร่วมกันระหว่างระบบไฟฟ้าและระบบทางกล โดยสิทธิบัตรแรกที่ผู้เขียนได้นำแนวความคิดมาใช้คือ US 5, 271, 327 [4] ต่อมาได้มีการศึกษาสิทธิบัตร US 7, 213, 518 [5] เพิ่มเติม โดยระบบขบวนหัวรบในสิทธิบัตรดังกล่าวนั้น เป็นการต่อยอดโดยตรงจากสิทธิบัตรแรกด้วยการปรับปรุงการทำงาน เช่น ทำให้ขบวนหัวรบสามารถทำงานได้กับยุทธโศปกรณ์หลายๆ ชนิด และสามารถปรับแต่งให้ใช้กับยุทธโศปกรณ์อื่นๆ ในอนาคตได้ นอกจากนี้ยังออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแหล่งจ่ายพลังงานภายในตัวขบวนหัวรบเพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษาของขบวนหัวรบ รวมถึงการเพิ่มระบบทำลายตัวเองเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการไม่จุดตัวของยุทธโศปกรณ์

1.3 แนวคิดการออกแบบขบวนหัวรบ

แนวคิดในการออกแบบกลไกทางด้านเครื่องกล ผู้เขียนได้นำแนวคิดจากขบวนหัวชนิด M423 ซึ่งเป็นขบวนหัวชนิดเครื่องกลที่มีใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยรายละเอียดการทำงานนั้นได้ระบุไว้ในสิทธิบัตร US 3, 722, 419 [6] ซึ่งสรุปได้ว่า ขบวนหัวชนิดนี้จะใช้การหมุนของ

ใบพัดเพื่อกำหนดสถานะการพร้อมยิง/ไม่พร้อมยิงของขบวนหัว ซึ่งเมื่อใบพัดหมุนมาอยู่ในตำแหน่ง arm แล้วจะทำให้ขั้นตอนการพร้อมยิงนั้นสมบูรณ์ และเมื่อเกิดการตกกระทบอย่างรุนแรงจะทำให้ขบวนหัวนั้น ไปจุดระเบิดแรงสูงที่อยู่ภายในหัวรบได้

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

โครงการวิจัยพื้นฐานระบบขบวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวดมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อศึกษาการออกแบบระบบขบวนหัวรบโดยใช้แนวคิดการออกแบบและขั้นตอนตามตามเกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบขบวนหัวรบ
- เพื่อศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างกลไกทางไฟฟ้าและกลไกทางกล เพื่อให้สามารถรับรู้ถึงเป้าหมายการตอบสนองต่อเงื่อนไขและคำสั่งต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ใน การจุดขบวนหัวระเบิดได้อย่างแม่นยำและปลอดภัย
- เพื่อศึกษาสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับขบวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์และเชิงกลโดยใช้เป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาขบวนหัวรบ

2. การออกแบบระบบขบวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์-เชิงกล (Electro-mechanic fuze)

การออกแบบขบวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์และเชิงกลจากที่ได้ศึกษาตามสิทธิบัตร US5271327A Electro-Mechanical Base Element Fuze [4] นั้นได้สรุปแนวทางออกแบบออกเป็น 2 ส่วน ตามรูปที่ 1 โดยขั้นแรก (First Stage) เป็นขั้นตอนแห่งความปลอดภัยและอุปกรณ์พร้อมยิง (Safety and Arming Device: S&A1) โดยเป็นกลไกทางกลที่ทำงานเมื่อค่า G มากกว่า 25G และมีสัญญาณทางไฟฟ้ามาเชื่อมต่อเพื่อจุดแบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) โดยใช้วงจรแปลงแรงดันให้สูงขึ้น (DC Step-up) และในขั้นที่ 2 (Second stage) จะเป็นการทำงานหลังจากแบตเตอรี่ความร้อนจุดตัวแล้ว

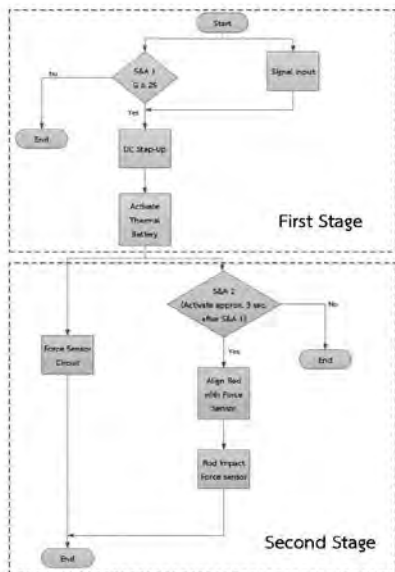
ซึ่งจะมีความปลอดภัยและอุปกรณ์พร้อมยี่งลำดับที่ 2 (S&A2) ซึ่งจะมีการทำงานภายหลังความปลอดภัยและอุปกรณ์พร้อมยี่งลำดับที่ 1 ทำงานแล้ว 3 วินาที โดยเป็นกลไกทางกล เพื่อเชื่อมต่อกับวงจร Force Sensor เพื่อทำการเริ่มจุดชนวนวัตถุระเบิด

3. ผลการออกแบบกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ขั้นต้น

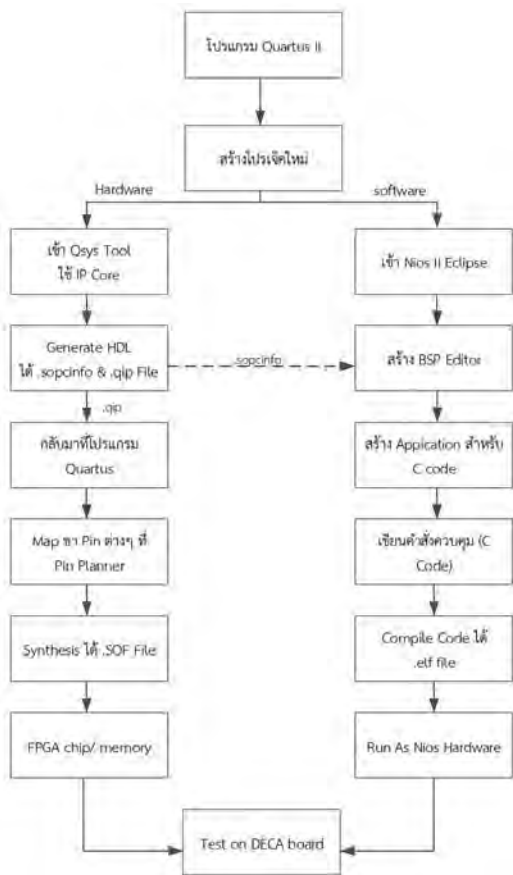
ระบบชนวนหัวรบถือเป็นระบบที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดจากการทำงานของกลไกภายในได้สูงมาก เช่น การเกิดการลัดวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สั่งการ ควบคุมการทำงานของระบบชนวนหัวรบ หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในสถานะที่ไม่พึงประสงค์ต่อการทำงาน จึงมีการศึกษาหลักการการทำงานของระบบชนวนหัวรบที่ใช้กลไกการจุดระเบิดด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Field Programmable Gate Array หรือ FPGA) ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการประมวลผลการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในระบบชนวนหัวรบ เพื่อลดข้อผิดพลาดดังกล่าว จึงใช้บอร์ด FPGA ทดลองในการศึกษาควบคุมการทำงานของระบบชนวนหัวรบหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยเริ่มศึกษาคุณลักษณะและการทำงานทั่วไปของบอร์ดการออกแบบวงจรดิจิทัล และ การศึกษาการออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ใน FPGA ขั้นต้น

FPGA เป็นวงจรรวมทางดิจิทัลที่สามารถโปรแกรมวงจรหรือฟังก์ชันการทำงานลงไปภายในตัวเอง เหมาะสำหรับการออกแบบวงจรไฟฟ้าและการออกแบบชิปต้นแบบของวงจรทางดิจิทัล ถ้าเปรียบเทียบการออกแบบวงจรดิจิทัลบน FPGA กับการออกแบบวงจรดิจิทัลโดยใช้ IC Gates หรือใช้ IC TTL หลายๆ ตัวบนแผ่น PCB การออกแบบวงจรดิจิทัลบน FPGA สามารถออกแบบวงจรดิจิทัลด้วยซอฟต์แวร์ได้ จากนั้นเมื่อทดลองจำลองได้ผลที่น่าพอใจแล้วจึงโปรแกรมข้อมูลลงบนชิป FPGA จะเห็นว่าการแก้ไขทำได้ง่าย เพียงแก้บนซอฟต์แวร์เปรียบเหมือนอุปกรณ์ดิจิทัลอยู่ในรูปของซอฟต์แวร์แก้ไขง่าย สามารถโปรแกรมข้อมูลใหม่หรือโปรแกรมข้อมูลซ้ำได้ ลดความยุ่งยากจากการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่และลดการเกิดสัญญาณรบกวนจากการออกแบบ PCB [7] แต่การนำ IC จำนวนมากมาต่อกัน เมื่อเกิดความผิดพลาดจะต้องทำการออกแบบ PCB หรือลายวงจรใหม่ ทำให้การแก้ไขยุ่งยากและสิ้นเปลือง IC อีกด้วย

ในการศึกษาการใช้งานและรายละเอียดของ FPGA นี้ได้เลือกใช้บอร์ดทดลองเนกประสงค์ DECA ซึ่งมีคุณสมบัติครบถ้วนพร้อมใช้งานอยู่ในตระกูล MAX 10 FPGA ของบริษัท Altera Electronic ซึ่งบอร์ด DECA นี้ เป็นบอร์ดทดลองที่เหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาการออกแบบวงจรดิจิทัลด้วย FPGA โดยบอร์ดนี้มีชิปที่ควบคุมการทำงานหรือการสั่งการเพียงชิปเดียวคือ ชิป 10M50DAF484C6G มีหน่วยความจำถาวร (Non-volatile) ที่สามารถโปรแกรมลอจิกเกตลงในชิปโดยข้อมูลไม่หายเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงได้ มีสัญญาณความถี่สูงสุดอยู่ที่ 50 MHz มีความจุเกตขนาด 50,000 เกตซึ่งจำนวนเกตยิ่งมกยิ่งสร้างวงจรที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนได้มากยิ่งขึ้น มี Instant-on ภายในตัวชิปและมี Boot-time ที่มีความรวดเร็วต่อการตอบสนองในการประมวลผลสูง เนื่องจากในระบบชนวนหัวไม่ต้องกรที่จะจ่ายไฟให้วงจรภายในตั้งแต่แรก ดังนั้นเมื่อระบบชนวนหัวที่ออกแบบได้รับสัญญาณทางไฟฟ้าจึงต้องเลือกชิปที่ประมวลผลได้รวดเร็วที่สุดเพื่อความพร้อมในการทำงาน



รูปที่ 1 การออกแบบระบบเชิงอิเล็กทรอนิกส์-เชิงกล

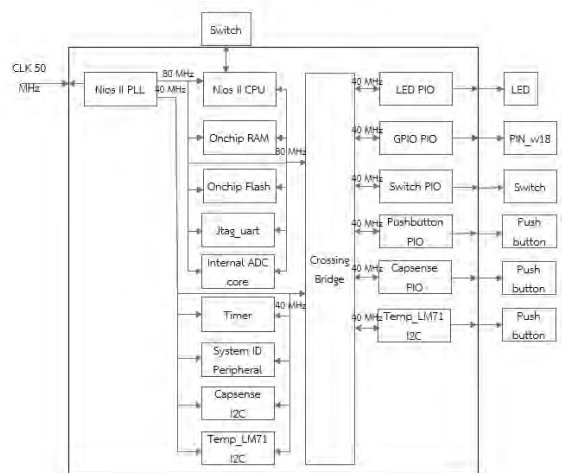


รูปที่ 2 การทำงานของโปรแกรมในการออกแบบวงจร

การออกแบบวงจรดิจิทัลที่ใช้กับบอร์ด DECA นี้สามารถออกแบบได้หลากหลายวิธี เช่น การนำเกตมาต่อกันใน FPGA เพื่อสร้างเป็นวงจรไฟฟ้า การเขียนภาษา HDL (Hardware Description Language) ซึ่งภาษาที่นิยมใช้คือ VHDL และ Verilog HDL การวาดผังวงจร (Schematic Capture) โดยเลือกองค์ประกอบจากไลบรารี เช่น ลอจิกเกต หรืออื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนสูงขึ้น แล้วนำมาต่อกันเป็นวงจรตามต้องการ และการสร้างฮาร์ดแวร์จำลองใน FPGA และใช้ซอฟต์แวร์ในการควบคุมการสั่งการเป็นต้น โดยผู้เขียนได้ศึกษาและออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ควบคู่กันไป เพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาระบบขนวนหัวรบในส่วนองฟังก์ชันสำหรับออกแบบ ส่วนของฮาร์ดแวร์เรียกว่า Qsys Tool จะเป็นการใช้ IP Core เข้ามาช่วยในการสร้าง Hardware โดย Generate file เป็นภาษา HDL

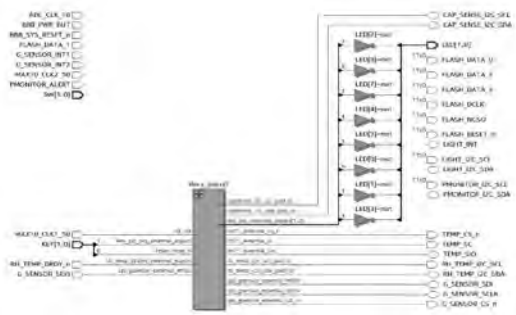
code เพื่อนำไปสร้าง Hardware จำลองสำหรับใช้ในการเขียนคำสั่งควบคุมต่อไป ส่วนฟังก์ชันสำหรับควบคุมและสั่งการทำงานเรียกว่า Nios II Software Build Tools for Eclipse จะเป็นส่วนเขียนโปรแกรมควบคุมส่วน Hardware ที่ได้สร้างขึ้นมาใน FPGA chip โดยมีขั้นตอนการออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ตามรูปที่ 2

จากการออกแบบและทดสอบระบบขนวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์-เชิงกล ในส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ได้พัฒนาและออกแบบฮาร์ดแวร์จำลองใน FPGA และออกแบบซอฟต์แวร์ในการควบคุมการสั่งการ โดยเป็นการจำลองการทำงานระหว่างส่วนเชิงกลและส่วนไฟฟ้าว่าสามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างไร เมื่อกระบวนการทางกลทำงานครบกระบวนการจะมีไม่มากที่สวิตซ์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้หลอดไฟ LED ติดทุกครั้งที่สวิตซ์ถูกกด เพื่อเป็นการนับรอบการทำงานครบของกระบวนการทางกลและการติดของหลอด LED เป็นการแสดงถึงการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ว่าสามารถทำงานตามคำสั่งได้โดยในส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้นได้ออกแบบฮาร์ดแวร์จำลองใน FPGA ตามรูปที่ 3 และออกแบบซอฟต์แวร์ในการควบคุมการสั่งการอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ บนบอร์ด DECA



รูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าสำหรับใช้งานบนบอร์ด DECA

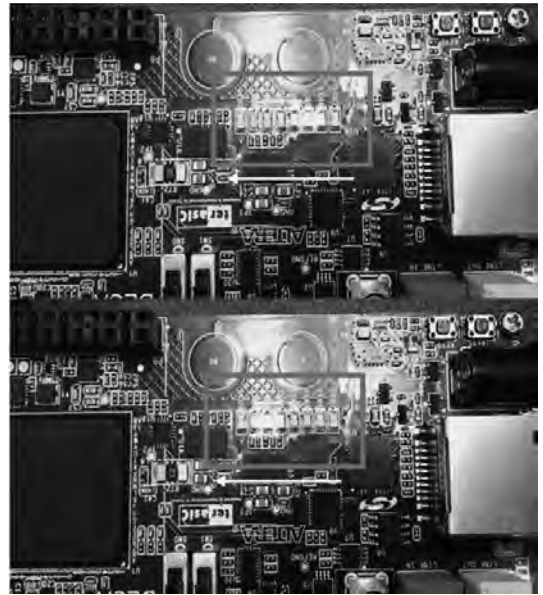
จากรูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าได้รับสัญญาณ Clock 50 MHz จากบอร์ดเข้ามาที่โมดูล PLL ซึ่งมีหน้าที่สร้างและจ่ายสัญญาณ Clock ให้แก่ Processor และอุปกรณ์ต่อพ่วง (Peripherals) ในที่นี้โมดูล PLL สร้างสัญญาณ Clock ใหม่ขนาด 80 MHz สำหรับจ่ายให้ Nios II CPU, Onchip RAM, Onchip Flash, Jtag_Uart และ Internal ADC Core เนื่องจากโมดูลเหล่านี้ต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูลและประมวลผลข้อมูลสัญญาณ Clock ใหม่ขนาด 40 MHz เพื่อจ่ายสัญญาณ Clock ให้แก่โมดูลของอุปกรณ์ต่อพ่วงหรือโมดูลที่ใช้ความเร็วในการทำงานน้อยลงมา จากข้างต้นจะเห็นว่าระบบที่ออกแบบมานี้มีสัญญาณ Clock ที่ทำงานในความเร็วที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องสร้างโมดูล Crossing Bridge เพื่อเชื่อมให้โมดูลและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบที่ทำงานที่ความเร็วต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้ เมื่อออกแบบระบบดิจิทัลใน Qsys Tool เสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการเชื่อมต่อขาสัญญาณต่าง ๆ ในระบบฮาร์ดแวร์เชื่อมกับอุปกรณ์ต่อพ่วงภายในบอร์ด DECA ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรไฟฟ้าออกแบบใน Qsys Tool

เมื่อได้ส่วนของฮาร์ดแวร์ที่พร้อมสำหรับการใช้งานแล้ว จึงเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานเป็นภาษา C (C Embedded) ใน Nios II Software Build Tools for Eclipse เพื่อควบคุมในส่วนของฮาร์ดแวร์ จากรูปที่ 5 แสดงผลการควบคุมการทำงานในซอฟต์แวร์โดยในส่วนการทำงานของชนวนทัวรบข้างต้น เป็นการจำลองการทำงานโดยกดสวิทช์ 1 ครั้งจะทำให้ LED ดวงที่ 1 ติดและเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ เมื่อถึงครั้งที่ 9 LED จะดับทุกดวงและเมื่อกดครั้งที่ 10 LED ดวงที่ 1 จะติดใหม่ เป็นแบบนี้

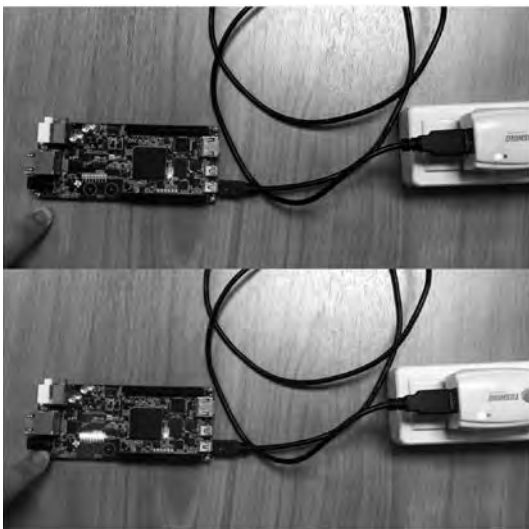
ไปเรื่อย ๆ และที่หน้าต่างโปรแกรมจะแสดงจำนวนครั้งที่กดสวิทช์ไปเรื่อย ๆ ซึ่งการกดสวิทช์นี้ เป็นการจำลองการเริ่มต้นการทำงานของระบบชนวนทัวรบอิเล็กทรอนิกส์ว่าเมื่อการทำงานในส่วน S&A ปลดล๊อคจะมีส่วนสัมผัสกับส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อสามารถเชื่อมต่อกันได้แล้วการที่ LED ติดจะเป็นตัวบอกว่าในส่วนของวงจรไฟฟ้าพร้อมทำงาน



รูปที่ 5 ผลจากการใช้ภาษา C ควบคุมการทำงาน

จากการออกแบบชนวนทัวรบอิเล็กทรอนิกส์ข้างต้นเป็นการโปรแกรมคำสั่งต่าง ๆ เข้าไปเก็บไว้ที่ RAM คือ เมื่อถอดสายไฟฟ้าออก ทำให้ข้อมูลที่โปรแกรมคำสั่งเข้าไปเสียหาย และต้องทำการเสียบสายไฟระหว่างบอร์ดกับคอมพิวเตอร์ตลอดเวลาเพื่อจ่ายไฟไปเลี้ยงอุปกรณ์ต่าง ๆ บนบอร์ดให้ทำงานได้ และเพื่อควบคุมการทำงานของคำสั่งที่ได้โปรแกรมข้อมูลลงในชิปจึงไม่สะดวกต่อการนำบอร์ดทดลองไปใช้งานจริง ดังนั้นจึงได้ศึกษาเรื่อง User Flash Memory โดยชิป MAX 10 นี้สามารถโปรแกรมคำสั่งและบันทึกวงจรไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีแบบ Non-Volatile เช่นเดียวกับโครงสร้างหน่วยความจำ RAM คือโปรแกรมแล้วต้องมีไฟเลี้ยงตัวชิปอยู่ตลอดเวลา หากไฟดับวงจรจะหายทันที ดังนั้นในการออกแบบใช้งานจึงต้องมี Flash Memory สำหรับเก็บ

ค่าสถานะของวงจรต่อพ่วงอยู่เสมอ โดยต้องโปรแกรมข้อมูลทั้งส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ลงใน Flash Memory ด้วย การทำงานคือ เมื่อเปิดไฟเลี้ยงชิปข้อมูลที่โปรแกรมคำสั่งเข้าไปเก็บใน Flash Memory จะถูกโหลดมาสร้างเป็นวงจรตามที่ได้โปรแกรมไว้และทำงานได้ทันที และที่สำคัญ PGA สามารถใช้โปรแกรมที่เป็นเครื่องมือในการพัฒนาออกแบบวงจรตัวเดียวกันได้ สิ่งที่ต้องระมัดระวังของ MAX 10 คือ สามารถโปรแกรมข้อมูลได้ไม่เกิน 10,000 ครั้ง จากนั้นต้องเปลี่ยนชิป FPGA ใหม่



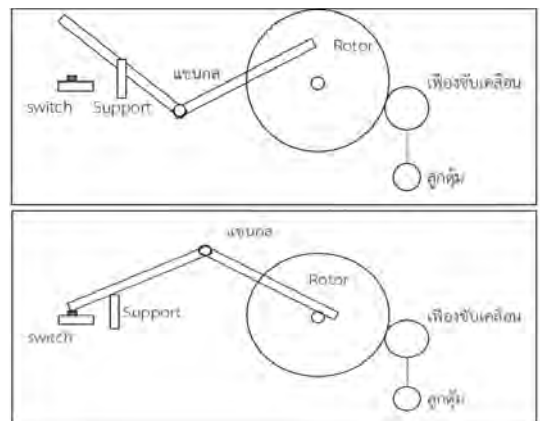
รูปที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาเรื่อง Flash Memory

จากรูปที่ 6 แสดงผลการทำงานของขบวนหัวรบอิเล็กทรอนิกส์ โดยเมื่อทำการกดสวิตซ์ถึงครั้งที่ 8 หลอด LED จะสว่างทุกดวง แต่เมื่อกดสวิตซ์ถึงครั้งที่ 9 หลอด LED จะดับทุกดวง จากรูปเห็นได้ว่า บอร์ด DECA เชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์ดัดแปลง (Adapter) เพื่อจ่ายไฟไปเลี้ยงบอร์ด ไม่ได้เชื่อมเข้าอยู่กับคอมพิวเตอร์ นั้นแสดงว่า ได้ทำการโปรแกรมในส่วนของฮาร์ดแวร์และคำสั่งควบคุมการทำงานภาษา C ลงไปใน Flash Memory เรียบร้อยแล้ว

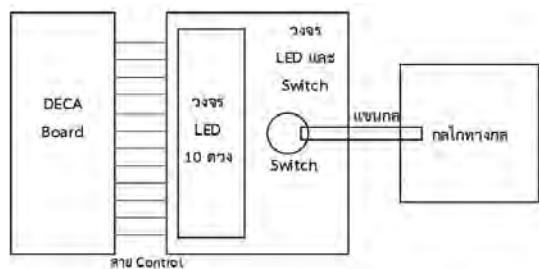
4. การอภิปรายผล

4.1 ผลการออกแบบขบวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวด

กลไกของระบบขบวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวดนั้น ได้นำกลไกทางกลจากขบวนหัว M423 มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อกลไกทางกลทำงานครบรอบการทำงานที่ตั้งค่าไว้ จากรูปที่ 7 จะมีแขนกลเป็นตัวเชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นตัวกำหนดการเริ่มทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์และเมื่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำงานครบรอบคำสั่งการที่ได้โปรแกรมลงไปจะแสดงผลการจุดระเบิดเป็นการสว่างของหลอด LED ซึ่งผลเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงกลไกการทำงานตามรูปที่ 8



รูปที่ 7 (บน) ลักษณะของกลไกทางกลก่อนการทำงาน
(ล่าง) ลักษณะของกลไกทางกลหลังการทำงาน



รูปที่ 8 การทำงานของกลไกด้าน electronics

4.2 ข้อขัดข้องระหว่างกระบวนการออกแบบ

ในการทำการวิจัยและพัฒนาขบวนขบวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวด ภายใต้โครงการวิจัยพื้นฐานของ สทป. มีความล่าช้าในการจัดซื้อจัดจ้าง ทำให้ไม่สามารถลงมือสร้างต้นแบบระบบเพื่อทดสอบ

แนวความคิดนี้ได้ ทำให้งานหยุดชะงักลง อย่างไรก็ตาม สหป. เป็นเพียงหน่วยงานเดียวในประเทศที่มีการวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ดังนั้นจึงยังมีโอกาสในการดำเนินการด้านนี้ต่อ ทั้งนี้จะเป็นไปตาม ยุทธศาสตร์ นโยบาย และทิศทางการวิจัยและพัฒนา ของ สหป.

4.3 แผนงานในอนาคต

4.3.1 กลไกเชิงอิเล็กทรอนิกส์และเชิงกล

สำหรับแผนงานในอนาคตของกลไกด้านเครื่องกล ของระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทรวด ผู้เขียน ตั้งเป้าที่จะทำต้นแบบจำลองโดยมีหลักการการทำงานที่นำ แนวความคิดจากชนวนหัว M423 มาใช้ [8] โดย เพียงขับเคลื่อนจะถูกขับเคลื่อนด้วยการแกว่งของ ลูกตุ้ม ซึ่งจะทำหน้าที่ เป็น Timer delay ส่วนตัวเพียง ขับเคลื่อนจะใช้ในการหมุนใบพัดซึ่งภายในติดกับใบพัด จะเป็นแกนกล โดยเมื่อใบพัดหมุนครบรอบตามที่ ออกแบบไว้ แกนกลจะลงไปกระแทกกับสวิตช์ซึ่งจะ ทำให้อุปกรณ์กลไกด้านอิเล็กทรอนิกส์ทำงาน ทั้งนี้ส่วนที่ เชื่อมต่อระหว่างแกนกลและใบพัดจะมีร่องเพื่อให้ แกนกลนั้นวิ่งตามร่อง เมื่อสุดร่องแล้วก็จะครบรอบ ของใบพัด แล้วจะมีระบบล็อกเพื่อป้องกันการหมุนกลับ ของใบพัด

4.3.2 กลไกด้านไฟฟ้า

สำหรับแผนงานในอนาคตของกลไกด้านอิเล็กทรอนิกส์ ของระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทรวดนั้น ผู้เขียนตั้งเป้าที่จะทำวงจรต้นแบบเพื่อ Contact กับ ส่วน Mechanic โดยการออกแบบวงจรและอุปกรณ์ ต่อพ่วงภายนอกบอร์ด DECA และเป็นการศึกษา การอินเตอร์เฟสอุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอกเพื่อพัฒนา ศักยภาพการทำงานของระบบให้ดียิ่งขึ้น

5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาหลักการการทำงานของระบบ ชนวนหัวและการศึกษาสิทธิบัตร US5271327A Electro-Mechanical Base Element Fuze [4] ทำให้ทราบว่า ระบบชนวนหัวรบถือเป็นระบบที่มี โอกาสเกิดความผิดพลาดจากการทำงานของกลไก ภายในได้สูงมาก ดังนั้นการออกแบบระบบชนวนหัว จะต้องระมัดระวังและเพิ่มการทดสอบตามมาตรฐาน ต่าง ๆ เพื่อให้มั่นใจว่า ชนวนหัวจะทำงานตามคำสั่ง เวลา และค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ออกแบบไว้ เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพและความมั่นใจในการใช้งาน ทั้งนี้ในการ ศึกษาการออกแบบชนวนหัวขั้นแรกจึงต้องทดสอบ อุปกรณ์และเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมต่อการใช้งาน และความปลอดภัย และจะต้องใช้เวลาในการศึกษา ทดสอบทดลองวงจรไฟฟ้าและกลไกทางกลให้มีความ เสถียรภาพ เพื่อนำไปสร้างต้นแบบของระบบชนวนหัว ในอนาคตต่อไป

6. References

- [1] Department of Defense, (1991). Military Standard Fuze Design, Safety Criteria For. Available at <http://www.everyspec.com>
- [2] Military and Government Specs & Standards. 2012. Standard practical system safety. MIL-STD-882 Revision E, Naval Publications and Form Center (NPFC). 104p.
- [3] Department of Defense, 1991. MIL-STD-1316D, Military standard: fuze design, safety criteria for. 21p.
- [4] Filo, G. F., Kurschner, D. L. and Weber, P. L. (1993). Electro-mechanical base element fuze. United States Patent. US5271327. Date of Patent: 21 December 1993. 13p.
- [5] Sutcliffe, S. A. (2007). Modular electronic fuze. United States Patent.

US 7,213,518 B2. Date of Patent: 8 May 2007. 3p.

[6] James J.O., (1973). Arming Device for Missiles. United States Patent. US 3,722,419.

[7] ณรงค์ ทองฉิม และเจริญ วงษ์ชุ่มเย็น. (2552). ออกแบบไอซีดิจิทัลด้วย FPGA และ CPLD ภาคปฏิบัติ โดยใช้ภาษา VHDL. พิมพ์ครั้งที่ 1. ซีเอ็ดดูเคชั่น, บมจ. 440น.

[8] ธนัช ชันทอง (2559) รายงานความก้าวหน้าของเจ้าหน้าที่ทดลองงาน. กรุงเทพมหานคร. รายงาน. : สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ.

การทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของ LiSi/LiCl-KCl-MgO/FeS₂ เซลล์เดี่ยวสำหรับต้นแบบแบตเตอรี่ความร้อน

สันติธา รัตนพันธุ์^{1*} และ สมัญญา สงวนพรรค²

วันที่รับ 7 สิงหาคม 2563 วันที่แก้ไข 19 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 21 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

แบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อประยุกต์ใช้งานทางการทหารที่ต้องการความหนาแน่นเชิงกำลังสูง โดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน แบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) ถูกออกแบบมาให้ใช้ได้เพียงครั้งเดียว แต่สามารถเก็บได้เป็นระยะเวลานานโดยไม่เกิดการคายประจุ (Self-Discharge) ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่คือปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) และอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นอกจากนั้นส่วนประกอบของเซลล์ในแบตเตอรี่ถือเป็นส่วนที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บพลังงานขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทำขั้วแคโทด แอโนด และอิเล็กโทรไลต์ ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีโดยการทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ Half Cell ของขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งสังเคราะห์ด้วยสาร Li/Si, Half Cell ของขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งสังเคราะห์ด้วยสาร FeS₂ เป็นหลัก และ Single Cell ซึ่งเป็นการประกอบขั้วแอโนด อิเล็กโทรไลต์ และขั้วแคโทดวางซ้อนกัน โดยนำไปทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีด้วยเครื่องทดสอบ Charge-Discharge Test พบว่า มีค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่ขั้วแอโนดประมาณ 0.20 - 0.25 V ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่ขั้วแคโทดประมาณ 1.6 - 1.8 V และมีความต่างศักย์ของเซลล์แบตเตอรี่ (Single Cell) 2.66 V

คำสำคัญ : ครึ่งเซลล์, เซลล์เดี่ยว, ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี, แบตเตอรี่ความร้อน

¹ ส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี ฝ่ายวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

* ผู้แต่ง, อีเมล: Santita.r@dti.or.th

Test of Electrochemical Performance LiSi/LiCl-KCl-MgO/FeS₂ Single Cell for a Thermal Battery Prototypel

Santita Rattanaphan ^{1*} and Samunya Sanguanpak ²

Received 7 August 2020, Revised 19 August 2020, Accepted 21 August 2020

Abstract

Thermal batteries are specially designed according to the requirements for such military applications which present the need for a high power density battery. Thermal batteries rely on an electrochemical cell to produce an electric energy from the energy released by a chemical reaction with electron transfer. A thermal battery is a non-rechargeable, single use battery that can be stored for a long time without self-discharge. The key composition of the performance of thermal batteries is the chemical reaction between an electrode and an electrolyte. The materials selected for anode, cathode, and electrolyte are also important for energy-stored capacity. In this work, the performance of electrochemical cell was investigated. The experiment was divided into 3 parts to investigate; (1) a half-cell reaction on anode which was synthesized from Li/Si; (2) a half-cell reaction on cathode which was synthesized from FeS₂; and (3) a single cell which composed of the anode, cathode, and electrolyte. The charge-discharge test was used to investigate the performance of set-up electrochemical cell. The results showed voltage of 0.20 - 0.25 V on the anode, voltage of 1.6 - 1.8 V on the cathode, and the voltage of 2.66 V for the single Cell.

Keywords : Half cell, Single cell, Electrochemical, Performance, Thermal battery

¹ NBC and Explosive Engineering Division - RNE Research & Development Department – RRD Defence Technology Institute

² National Metal and Materials Technology Center - MTEC National Science and Technology Development Agency

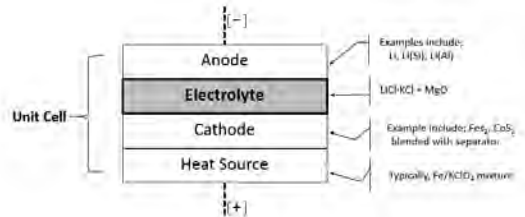
* Corresponding author, E-mail: santita.r@dti.or.th

1. บทนำและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานโดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนขณะเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ในทางการทหารก็ได้มีการนำแบตเตอรี่มาประยุกต์ใช้แต่ค่อนข้างมีการใช้งานที่จำเพาะกว่าแบตเตอรี่ทั่วไป เรียกว่า แบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) จัดเป็นแบตเตอรี่ปฐมภูมิพร้อมใช้งาน (Primary Reserve Battery) สามารถใช้ได้ครั้งเดียว [1]

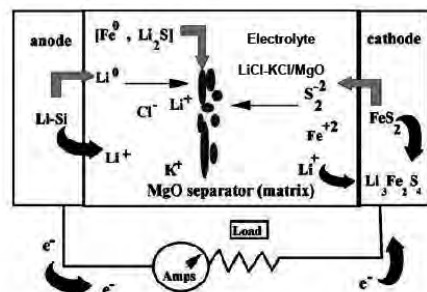
แบตเตอรี่ความร้อนได้นำมาประยุกต์ใช้งานทางการทหาร ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานให้กับอาวุธนิวเคลียร์ จรวดนำวิถีและนำไปประยุกต์ใช้กับทางการบิน เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดียเยี่ยม [2] เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้งานได้เพียงครั้งเดียว ให้ความหนาแน่นเชิงกำลังสูง เนื่องจากแบตเตอรี่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงที่ระยะเวลาสั้นภายในไม่เกิน 100s ความหนาแน่นเชิงกำลังสูงจึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ นอกจากนั้น ยังมีความแข็งแรงทนทาน เก็บได้ระยะเวลายาวนานโดยไม่ต้องมีการบำรุงรักษา แต่อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ความร้อนยังคงมีข้อเสียคือเนื่องจากใช้ความร้อนในการทำงานส่งผลให้อุณหภูมิที่พื้นผิวแบตเตอรี่สูงมาก ($>230^{\circ}\text{C}$) และความดัน (Voltage Output) ของแบตเตอรี่ไม่เสถียรลดลงตามระยะเวลาการใช้งานโดยแบตเตอรี่ถูกกระตุ้นการทำงานด้วยความร้อน (Thermally Activate Batteries) เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เฉื่อยต่อการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิบรรยากาศ จึงต้องมีการกระตุ้นโดยใช้ความร้อนให้เกิดการลุกไหม้ Heat Plate จะทำหน้าที่ให้การเก็บรักษาความร้อนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้การหลอมอิเล็กโทรไลต์เมื่ออุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมเหลวสารอิเล็กโทรไลต์ (mp. $\text{LiCl-KCl } 352^{\circ}\text{C}$) [3] ประมาณ 500°C [2] อิเล็กโทรไลต์เกิดการหลอมเหลวและเริ่มเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้พลังงานไฟฟ้า และถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนและควบคุมระบบต่อไป

ส่วนประกอบของเซลล์เดี่ยว (Single Cell) แบตเตอรี่ความร้อน ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ประกอบด้วยขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และ Heat Pellet ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เซลล์ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเซลล์แบตเตอรี่ [3]

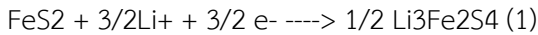
ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้นทำให้เลขออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้มีอะตอมของธาตุบางตัวสูญเสีย หรือได้รับอิเล็กตรอน เรียกปฏิกิริยาที่เกิดการเสียอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) จะเกิดที่ขั้วแอโนดของแบตเตอรี่ และเรียกปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) จะเกิดที่ขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่กล่าวไปข้างต้นถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าและถูกเก็บสะสมในแบตเตอรี่เพื่อจ่ายออกมาเป็นกระแสไฟฟ้า สำหรับปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่ชนิด Li/FeS_2 โดยใช้ LiCl-KCl เป็นอิเล็กโทรไลต์เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วแอโนดและแคโทดแสดงในรูปที่ 2



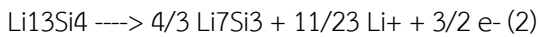
รูปที่ 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน แสดงด้วยสมการเคมี ดังนี้

Reduction Reaction:



Oxidation Reaction:



2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สารเคมี

1. Lithium, Li (99%, Aldrich) ขนาดอนุภาค 1-6 mm
2. Silicon, Si (99.5%, Alfa Aesar) ขนาดอนุภาค 45 μm (325 mesh)
3. Iron (II) Disulfide, FeS_2 (99.5%, Aldrich) ขนาดอนุภาค 45 μm (325 mesh)
4. Polyvinylidene Fluoride resin, PVDF (Aldrich) ความหนาแน่น 1.74 g/cm³
5. Lithium Chloride-Potassium Chloride, LiCl-KCl (Alfa Aesar) มีจุดหลอมเหลว 357 °C และขนาดอนุภาค 10 Mesh
6. Magnesium Oxide, MgO (99.95%, Alfa Aesar) ขนาดอนุภาค 45 μm (325 mesh)

2.2 เครื่องมืออุปกรณ์

1. Glove box ยี่ห้อ Inert รุ่น I-LAB 2GB
2. ตะแกรงร่อน ขนาด 149-44 μm (100-325 mesh)
3. เครื่องอัดโดรลิก แรงอัดสูงสุด 30 ตัน ยี่ห้อ MSK รุ่น YLJ-E30T
4. อลูมินาครุชีเบล
5. Hot Plate อุณหภูมิสูงสุด 300 °C ยี่ห้อ IKA

6. Charge-discharge Test ยี่ห้อ BK Precision รุ่น 8616 กำลัง 1200W ให้แรงดันไฟฟ้า (Operating Voltage) 0-500v และกระแสไฟฟ้า (Rated Current) 0-60A

2.3 ขั้นตอนการวิจัย

2.3.1 คำนวณเซลล์แบตเตอรี่

ประสิทธิภาพที่ต้องการของแบตเตอรี่ ต้องได้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 30A ในเวลา 100s สามารถคำนวณค่าความจุ (Capacity) ของเซลล์แบตเตอรี่ตาม Faraday's Law ได้ดังสมการที่ (3)

$$Q = \frac{nF}{3600 \times Mw} \quad (3)$$

Q = Capacity (Ah/g)

n = Number of reacting

F = Faraday constant = 96500

Mw = Molecular weight

คำนวณหา Mw ของสารในสมการเคมีที่ (1) และ (2) ได้ดังนี้

$$\text{Li}_3\text{Fe}_2\text{S}_4 = 260.773 \text{ g/mol}$$

$$\text{Li}_7\text{Si}_3 = 132.34 \text{ g/mol}$$

$$\text{Li}_{13}\text{Si}_4 = 202.575 \text{ g/mol}$$

จากสมการเคมีที่ (1) และ (2) สามารถคำนวณหาความจุ (Capacity) โดยใช้สมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$Q_{\text{Li}_3\text{Fe}_2\text{S}_4} = \frac{3 \times 96500}{3600 \times 260.773} = 0.308 \text{ Ah/g} \quad (4)$$

$$Q_{\text{Li}_{13}\text{Si}_4} = \frac{13 \times 96500}{3600 \times 202.575} = 1.72 \text{ Ah/g} \quad (5)$$

$$Q_{\text{Li}_7\text{Si}_3} = \frac{7 \times 96500}{3600 \times 132.84} = 1.41 \text{ Ah/g} \quad (6)$$

สามารถหาค่าความจุของ Oxidation Reaction (OX.) ได้ดังนี้

$$\Delta Q_{ox} = Q_{Li_{15}Si_4} - Q_{Li_7Si_3} \dots\dots\dots(7)$$

$$\Delta Q_{ox} = 1720 - 1410 = 310 \text{ mAh/g} \dots\dots\dots(8)$$

ประสิทธิภาพที่ต้องการของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 30 A ในเวลา 100 s สามารถคำนวณปริมาณสารที่ใช้ต่อเซลล์ได้จากสมการที่ (4) ปริมาณสาร LiSi สำหรับขั้วแอโนดดังนี้

$$LiSi = \frac{30 \text{ A} \cdot 100 \text{ s} \cdot 1 \text{ g}}{0.308 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s}} = 2.706 \text{ g} \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{และ... } LiSi = \frac{2.706 \text{ g}}{260.773} = 0.01 \text{ mol}$$

จาก Reduction Reaction ในสมการที่ (2) พบว่า 0.5 mol $Li_3Fe_2S_4$ ต้องใช้ FeS_2 1 mol และ 0.01 mol $Li_3Fe_2S_4$ ต้องใช้ FeS_2 ดังนี้

$$FeS_2 = \frac{1 \cdot 0.01}{0.5} = 0.02 \text{ mol}$$

$$FeS_2 = 0.02 \cdot 119.97 = 2.4 \text{ g}$$

2.3.2 การเตรียมเซลล์แบตเตอรี่

การเตรียมขั้วแอโนด (Anode) ผสมสาร Li/Si ในอัตราส่วน 44/56 โดยมวล [1] และผสมให้เข้ากัน ในอูลูมินาครุชชีเบล และเผาด้วยความร้อน 300°C บน Hot Plate ใน Glove Box เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นใช้ตะแกรงร่อนเพื่อไม่ให้อนุภาคจับตัวกันและทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเสร็จสมบูรณ์ และนำไปอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3,000 psi ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm แสดงในตารางที่ 1

การเตรียมขั้วแคโทด (Cathode) ผสมสาร $FeS_2/LiCl-KCl-MgO/PVDF$ อัตราส่วน 70/27/3 โดยมวล จากการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้งอัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ขั้วแคโทดสามารถอัดขึ้นรูปได้โดยไม่แตกและผสมให้เข้ากัน ในอูลูมินาครุชชีเบล จากนั้นบดผสมให้เข้ากันอีกครั้ง

แล้วใช้ตะแกรงร่อนและอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3,000 psi ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm แสดงในตารางที่ 1

การเตรียมอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ผสมสาร $LiCl-KCl/MgO$ ในอัตราส่วน 65/35 โดยมวล [1] และผสมให้เข้ากันในอูลูมินาครุชชีเบล และให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึง 125 °C ที่อัตรา 0.5 °C/min ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชม. เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นให้ความร้อนต่อจนถึง 500 °C ที่อัตรา 0.5 °C/min เป็นเวลา 15 ชั่วโมง เพื่อให้สารหลอมรวมตัวเข้ากัน และทิ้งไว้ให้เย็นใน Glove Box ก่อนเอาไปอัดขึ้นรูปเซลล์ด้วยแรงอัด 4,000 psi ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm แสดงในตารางที่ 1

2.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี

การทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี แสดงในรูปที่ 3 และ 4 มีขั้นตอน ดังนี้

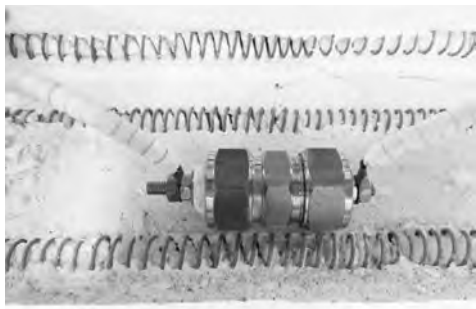
1. ประกอบเซลล์เทอร์มอลแบตเตอรี่ (Single Cell) ประกอบด้วยขั้วแอโนด อิเล็กโทรไลต์ และขั้วแคโทด เรียงซ้อนกันตามลำดับใน Single Cell Test
2. นำ Single Cell Test เข้าเตาเผา (Tube Furnace) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C เพื่อหลอมอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยทำการเชื่อมต่อขั้วแบตเตอรี่เข้ากับเครื่อง Charge-discharge Test
3. ประกอบ Half Cell ขั้วแอโนด หรือขั้วแคโทด ที่ได้จากการขึ้นรูปในเซลล์ Swagelok โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอีกฝั่งแทนด้วยขั้วมาตรฐาน และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์มาตรฐาน โดยจำลองในสภาวะอุณหภูมิห้อง และเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับเครื่องทดสอบ Charge-Discharge Test แสดงในรูปที่ 5 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมี

3. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบการอัดและคายประจุแบบใช้กระแสคงที่ด้วยเครื่อง Charge-discharge Test เพื่อดู

ตารางที่ 1 รายละเอียดการขึ้นรูปเซลล์

Cell	Composition (%wt)	Ø (mm)	นน./เซลล์ (g)	หนา (mm)	ρ (g/cm3)	แรงอัด (psi)
Cathode	FeS2/LiCl-KCl-MgO/PVDF=70/27/3	20	0.5	2.00	2.80	3000
Electrolyte	LiCl-KCl/MgO = 65/35	20	0.5	1.70	1.75	4000
Anode	Li/Si = 44/56	20	0.5	2.16	1.00	3000
Single cell	Cat.+ Elec.+ An.	20	0.5	5.86	-	1000



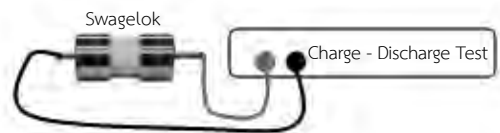
รูปที่ 3 การประกอบ Single Cell Test และการต่อวงจรการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์

การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Voltage) และความจุของแบตเตอรี่ (Capacity) แบ่งผลการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ Half Cell ของขั้วแอโนด (Anode), Half cell ของขั้วแคโทด (Cathode) และ Single cell ตามลำดับ

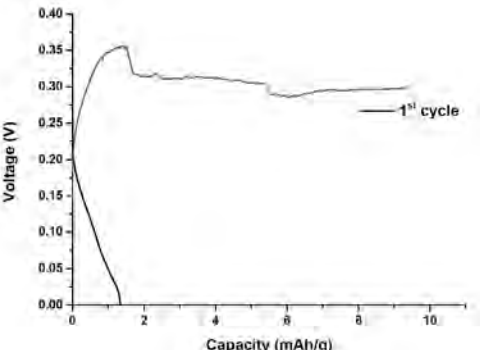
จากการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้า Half Cell ของขั้วแอโนด (Anode) ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยสาร $\text{LiSi}_3.18$ แสดงในรูปที่ 6 พบว่า สามารถวัดค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่ขั้วได้ประมาณ 0.20-0.25 V โดยเริ่มจากการอัดประจุ (Charge) ตั้งแต่ 0.1-0.35 V เมื่อถึงแรงดันไฟฟ้าที่ 0.35 V ค่าเริ่มลดลงแสดงว่าเซลล์เริ่มเสื่อม อาจเกิดจากไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit) กันของขั้วในส่วนคายประจุ (Discharge) สามารถวัดค่าได้โดยค่าจะลดลงต่ำกว่า 0.2 V และเป็น 0 V เท่ากับที่ชาร์จได้ 0.35V ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่อิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4 การให้ความร้อนเซลล์แบตเตอรี่ใน Tube Furnace

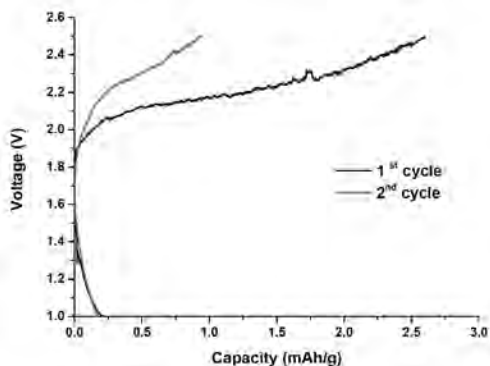


รูปที่ 5 การต่อวงจร Half Cell กับเครื่องทดสอบ Charge-discharge test



รูปที่ 6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ (Half Cell) ของขั้วแอโนด (Anode) $\text{LiSi}_3.18$

เริ่มกลับมาแข่งตัวอีกครั้งจึงไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีและศักย์ไฟฟ้าจึงลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นยังพบว่าค่าโวลต์ที่เก็บประจุและคายประจุมีค่าต่างกัน แสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานภายในเซลล์สูง อาจเกิดจากขั้นตอนการสังเคราะห์สารยังหลอมรวมตัวกันไม่ดี

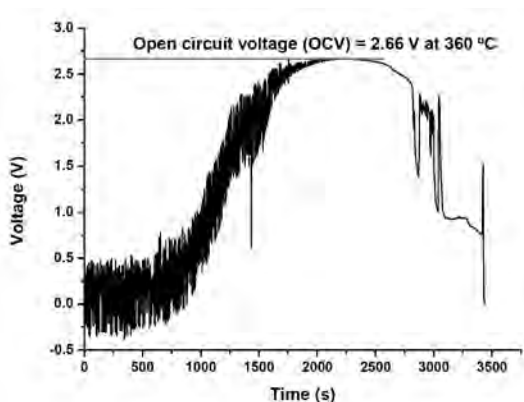


รูปที่ 7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ (Half Cell) ของขั้วแคโทด (Cathode)

จากการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้า Half Cell ของขั้วแคโทด (Cathode) ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วย $\text{FeS}_2/\text{LiCl-KCl-MgO/PVDF}$ แสดงในรูปที่ 7 พบว่าสามารถวัดค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่ขั้วได้ประมาณ 1.6-1.8 V โดยเริ่มจากการอัดประจุ (Charge) ตั้งแต่ 1.0-2.5 V และคายประจุ (Discharge) ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์ยังไม่ดี ผลอาจจะมีปัจจัยการสังเคราะห์สารที่อาจจะยังไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันและสภาวะการจำลองในอุณหภูมิห้องที่ต่างจากสภาวะการใช้งานจริงส่งผลให้ความต้านทานภายในเซลล์ยังคงมีค่าสูง

จากการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้า Full cell ของแบตเตอรี่ความร้อนในรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้า (Voltage) เทียบกับระยะเวลา

เนื่องจากการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ความร้อนมีความต้องการใช้งานอยู่ที่ระยะเวลา 100s เพื่อให้ได้กระแสสูงสุดที่ 30A เวลาจึงมีความสำคัญในการใช้งานเพื่อให้ฮีลิกโทรไลต์ยังคงหลอมเหลวและสามารถจ่ายกระแสได้ตามต้องการ พบว่าช่วงแรกของการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้ายังคงไม่สม่ำเสมอเกิดจากอุณหภูมิยัง



รูปที่ 8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยว (Full Cell) ของแบตเตอรี่ความร้อน (Thermal battery)

ไม่ถึงจุดหลอมเหลว (Melting Point) ของฮีลิกโทรไลต์ ปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์จึงไม่เกิดที่ ค่าที่ได้จึงยังไม่เสถียร และเมื่อผ่านไปช่วงเวลาประมาณ 2000s อุณหภูมิถึงจุดที่ฮีลิกโทรไลต์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ เส้นกราฟจึงเริ่มเรียบสม่ำเสมอ สามารถอ่านค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ได้ 2.66 V เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2750 s พบว่าค่าความต่างศักย์ (Voltage) ลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดจากไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit) เนื่องจากชั้นของฮีลิกโทรไลต์ที่หลอมเหลวบางเกินไปส่งผลทำให้ขั้วไฟฟ้าอาจเกิดการสัมผัสกันได้ หรืออาจเกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเซลล์ส่งผลให้วงจรทำงานได้ไม่เต็มที่ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้แปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมาก ส่งผลให้เข็มแอมมิเตอร์กระแสไฟฟ้าต่ำไปด้วย

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์แบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ Half Cell ของขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งสังเคราะห์ด้วยสาร Li/Si Half Cell ของขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งสังเคราะห์ด้วยสาร FeS_2 เป็นหลัก โดย การทดสอบทั้ง 2 ขั้วไฟฟ้า (Half Cell) จะจำลองการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิห้องและ Single cell ซึ่งเป็นการประกอบขั้วแอโนด ฮีลิกโทรไลต์ และขั้วแคโทดวางซ้อนกัน และนำไปทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีด้วยเครื่องทดสอบ

Charge - discharge Test โดยการจำลองสภาวะการหลอมเหลวอิเล็กโทรไลต์ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C ผลการทดสอบพบว่า ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่ขั้วแอโนดได้ประมาณ 0.20-0.25V ค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่ขั้วแคโทดได้ประมาณ 1.6-1.8V และความต่างศักย์ของเซลล์แบตเตอรี่ (Single Cell) ได้ 2.66V แสดงให้เห็นว่าเซลล์แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีต่ำอาจมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ซึ่งพบว่าความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่สูง อาจมีผลมาจากการสังเคราะห์เซลล์ที่สารไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันดีพอหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมอิเล็กโทรไลต์อาจจะยังไม่เพียงพอ จึงทำให้ปฏิกิริยาภายในเซลล์ที่เกิดขึ้นได้ไม่ดีและหากผู้วิจัยทำการทดลองมากกว่า 2 Cycle อาจจะช่วยให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

5. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

จากการวิจัยสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์แบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) ยังพบปัญหาและประเด็นทางวิชาการที่น่าสนใจในการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยในอนาคต ดังนี้

1. การเลือกวิธีการสังเคราะห์เซลล์แบตเตอรี่เป็นปัจจัยส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ เพื่อให้สารได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กและเป็นเนื้อเดียวกัน
2. หลังการสังเคราะห์สารควรทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้น เช่น ด้วยเทคนิค SEM, XRD เป็นต้น เพื่อตรวจสอบผลึกโครงสร้างของสารที่สังเคราะห์ และการกระจายตัวของเนื้อสาร
3. การหลอมอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) มีส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ ควรทำการทดสอบเบื้องต้นถึงช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาที่อิเล็กโทรไลต์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณนายสุวิชา จันทน์กะพ้อ ส่วนงานวิจัยพลังงานทดแทน สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ในการอำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำขณะทำการทดสอบ

ครั้งนี้ และขอขอบคุณ ผศ.ดร.นงลักษณ์ มีทอง อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น และทีม ในการให้คำแนะนำและแนวทางวิจัย รวมถึงให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบและการนำเสนอผลการทดสอบที่ทำให้บทความวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.A. Guidotti and P. Masset. "Thermal activated (thermal) battery technology Part I. Overview," Journal of Power Sources, vol. 161, pp. 1443-1449, July 2006.
- [2] I. Y. Kim, S. P. Woo et. al. "Binder-Free Cathode for Thermal Batteries Fabricated Using FeS₂ Treated Metal Foam," Front. Chem, January 2020.
- [3] A.S.Basin, A.B. Kaplun, A.B. Meshalkin and N.F.Uvarov, "The LiCl-KCl Binary System," Russian Journal of Inorganic Chemistry, vol. 53, No.9, pp. 1509-1511, July 2008.
- [4] Ronald A. Guidotti. "Thermally-Related Safety Issues Associated with Thermal Batteries," Sandia National Laboratories, June 2006.
- [5] Patrick Masset, Ronald A. Guidotti, "Thermal activated (thermal) battery technology Part II. Molten salt electrolytes," Journal of Power Sources, vol. 164, pp. 397-414, October 2006.
- [6] Patrick Masset, Ronald A. Guidotti, "Thermal activated ("thermal") battery technology Part III: FeS₂ Cathode material," Journal of Power Sources, vol. 177, pp. 595-609, November 2007.
- [7] CRC Handbook of Chemistry, and Physics, 70th Edition, Weast, R. C., Ed., CRC Press, Boca Raton, FL, p. D-221, 1989.
- [8] T. Yu, Z. Yu et. al. "Electrochemical Performances and Air Stability of Fe-doped CoS₂ Cathode Materials for Thermal Batteries," International Journal of Electrochemical Science, Vol. 13, pp. 7590 – 7597, July 2018.
- [9] C. F. Chen, H. Y. Li and C. W. Hong. "Molecular Dynamics Analysis of High-temperature Molten-salt Electrolytes in Thermal Batteries" Tech Science Press, Vol.46, no.3, pp.145-163, 2015

คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DTAJ)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เป็นวารสารของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เพื่อรับการรับพิจารณา การจัดการ ทางส่งเสริม การปรับปรุง และควรแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ และ บทปริทัศน์ การพิจารณา และการตีพิมพ์ บทความวิชาการ บทความปริทัศน์ การพิจารณา และการตีพิมพ์ บทความวิชาการ บทความปริทัศน์ และการบริหารจัดการ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งจัดพิมพ์เป็นราย ๖ เดือน ผู้สนใจเขียนบทความสามารถติดต่อขอข้อมูลพิมพ์ฉบับได้ที่ โทร. 02-9805688 ต่อ 2142 หรือ อีเมล: adthk@dtaj.doe.go.th

หลักเกณฑ์การพิจารณาค้นกรองบทความ

๑. บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ที่ไหนมาก่อนและต้องไม่อยู่ในกระบวนการพิจารณาของตีพิมพ์ในวารสารหรือสิ่งตีพิมพ์อื่นใด

๒. บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ ต้องเป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงคุณภาพทางวิชาการ และมีประโยชน์เชิงทฤษฎีหรือเชิงปฏิบัติ โดยผ่านการพิจารณาและให้คะแนนที่เหมาะสมจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) ซึ่งต้องมีคุณสมบัติอย่างต่ำตามเกณฑ์มาตรฐาน คือเป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขานั้นๆ ทำมาวิจัยและมีผลงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง จำนวน ๓ ชิ้นขึ้นไปโดยบทความ และปริทัศน์ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นรายการ

บทความที่รับพิจารณาตีพิมพ์

บทความวิจัย

มีโครงข่ายไม่เกิน ๑ หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows หรือไมโครซอฟท์ ๒,๐๐๐ คำ โดยการใช้คำสั่ง word count ใน MS Word พิมพ์คำ แต่ไม่ควรเกิน ๑ หน้ากระดาษ A4) ประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน (Full) สถานที่ทำงาน (Work place of author & co-authors) การติดต่อผู้เขียน (Contact address of Corresponding author) บทคัดย่อ (Abstract) และคำสำคัญ (Keywords) ไม่เกิน ๕ คำ โดยเนื้อหาทั้งหมดทั้งฉบับต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง โดยโครงข่ายไม่เกิน ๑ หน้ากระดาษ A4 (ถ้ามี) เอกสารอ้างอิงภาคผนวก (ถ้ามี)

เนื้อเรื่องจะประกอบด้วย บทนำ (Introduction), ขอบเขต (Scope) วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง (Materials and Methods), ผลการวิจัยทดลอง (Results), วิเคราะห์อภิปรายผล (Discussion) บทสรุป (Conclusion) กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement, ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง (References)

บทความวิชาการ

มีจำนวนอย่างน้อยกว่า ๑ หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows หรือไมโครซอฟท์ ๒,๕๐๐ คำ โดยการใช้คำสั่ง word count ใน MS Word เพื่อรับคำ (แต่ไม่ควรเกิน ๑ หน้ากระดาษ A4) เป็นบทความที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากหนังสือ เอกสาร ประเด็นการณ์ หรือเรื่องแปลเพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ เพื่อแสดงข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ทางวิชาการ

บทความวิชาการต้องประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน วิธีการทดลองผู้เขียน บทคัดย่อ (Abstract) และคำสำคัญ (Keywords) ไม่เกิน ๕ คำ ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง ซึ่งลักษณะของคำประกอบของเนื้อเรื่องควรจะคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของ วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลองและการวิจัยเหมือนบทความวิจัยฉบับอื่น



สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.)
Defence Technology Institute (DTI)

DTAJ
Defence Technology Academic Journal



เป้าประสงค์ (Aim)

- 1. สืบสานการของวิชาการสำหรับการบริหาร การจัดการ การเสริมสร้าง การแบ่งปัน และการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ซึ่งอยู่ในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ และบทวิเคราะห์ จากการศึกษา การค้นคว้า การวิจัย การพัฒนา และการวิเคราะห์ เทคโนโลยีป้องกันประเทศ
- 2. เพื่อไม่ให้เกิดการลดองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มีการบริหารจัดการ และส่งเสริมกระบวนการแลกเปลี่ยนความรู้ด้วยการนำเทคโนโลยีมาเพื่อประโยชน์ภาพ การปฏิบัติงาน และเกิดนวัตกรรมในการนำองค์ความรู้ด้านการจัดการมาสู่ฐานข้อมูล โครงการวิจัยและพัฒนายุทธศาสตร์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ
- 3. สามารถตอบสนองการศึกษาร่วมกันของภาคการให้บริการข้อมูลและสารสนเทศ ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ซึ่งเสริมให้เกิดความร่วมมือในการเชื่อมโยงแหล่งองค์ความรู้ ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศในแบบองค์การทั้งปวง

Call for Paper

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

ขอบเขต (Scope)

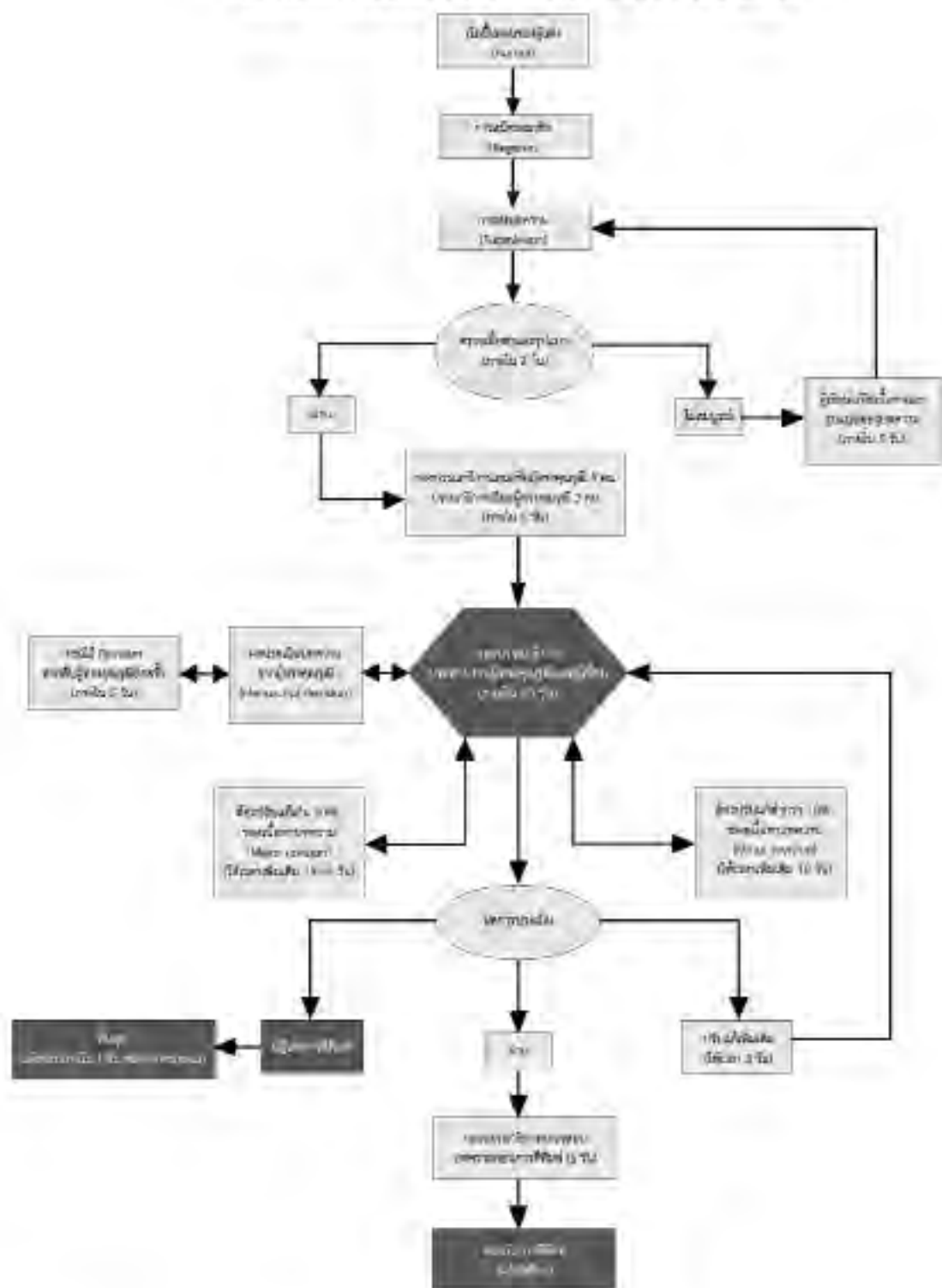
1. ครอบคลุมองค์ความรู้ด้านการศึกษา การค้นคว้า การวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี เศรษฐศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และศิลปวิทยา ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ
2. เป็นบทความวิชาการและบทวิเคราะห์ที่มีเจตนา การพัฒนา และการยกระดับการป้องกันประเทศ โดยด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ และการจัดการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และนวัตกรรมด้านการบริการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
3. มีเนื้อหาและการอภิปรายที่เผยแพร่ในบทความวิจัย มีความถูกต้อง แม่นยำ และเที่ยงตรง ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ และศิลปวิทยา และการจัดการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและนวัตกรรม การบริการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

2020

ระยะเวลาการเผยแพร่
และเนื้อหาของ DTAJ

1. การเผยแพร่แบ่งเป็น 3 ฉบับ/ปี ของปีปฏิทิน คือ ฉบับแรกออกปีปฏิทินในหัวเรื่องและศาสตร์ - เมษายน ฉบับที่สองออกปีปฏิทินในหัวเรื่องและศาสตร์ - สิงหาคม และฉบับสุดท้าย ออกปีปฏิทินในฉบับพิเศษ - ธันวาคม
2. เนื้อหาของ DTAJ แบ่งเป็น 4 ส่วนที่สำคัญประกอบด้วย
 - 1) บทความพิเศษ (Special Articles) เพื่อการรวบรวมงานวิจัยงานสำคัญของประเทศ
 - 2) บทวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Technology Analysis Articles) เพื่อส่งเสริม เศรษฐศาสตร์และธุรกิจกับเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ
 - 3) บทความวิชาการ (Academic Articles) เพื่อการบริหารจัดการข้อมูลภูมิสารสนเทศทางการศึกษา และการค้นคว้าวิชาการด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
 - 4) บทความวิจัย (Research Articles) เพื่อการบริหารจัดการข้อมูลภูมิสารสนเทศทางวิจัยและพัฒนา ที่เป็นนวัตกรรมและนำไปสู่อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ

ขั้นตอนการประเมินบทความของกองบรรณาธิการ DTAJ (2 เดือน)



วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ปีที่ 2 ฉบับที่ 5 พฤษภาคม – สิงหาคม 2563

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

สาคร เมฆรักษาวนิช

- บทเรียนเขตเศรษฐกิจพิเศษเมืองเส้นเงินต่อการพัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกในประเทศไทย

ลัญญณ์ฐ์ ภาตะนันท์

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- การขับเคลื่อนผลงานวิจัยด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

วิชญ มั่งคั่ง

บทความวิจัย (Research Articles)

- การทดสอบภาคพลวัตระบบเซ็นเซอร์และระบบสื่อสารสำหรับจรวดนำวิถี

นิธิ อนุกุลสัมพันธ์, ปัทพงษ์ ศรีโพธิ์, สรภพ สุภชัยพานิชพงศ์ และ มาลินดา หงส์ทอง

- อุปกรณ์บริหารจัดการพลังงานสำหรับ Tethered Drone

ธีรยศ เวียงทอง, ประสูตร เดชสุวรรณ, และ ภาณุวิทย์ โกโคยอุดม

- การศึกษาการแก้สมการเชิงตัวเลขด้วยวิธีของรุ่งเงและคูดตาสำหรับสมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นของแนววิถีกระสุน

ภูมเรศ แสงราม, กฤติยา พาวิม และ ชนะ รัชศิริ

- การวิเคราะห์การกั้นกระสุนของต้นแบบยางทางทหารด้วยโครงสร้างวัสดุผสมแบบแกนตัวขของเคฟลาร์และยางพาราด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดสอบ

นัคดา จงไฟโรจน์ไผ่ชนิด, อธิรฤกษ์ จุลนิพัทธ์วงศ์, อรรถพล เจริญผล, ชานนท์ เล็กธำรงค์,

นิรมล หุตะเจริญ และ อาทิตย์ ฤทธิเลื่อน

- ระบบขนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวด

พฤกจิภา สุขศิริมัย และ ธนัช ชันเงิน

- การทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของ $\text{LiSi/LiCl-KCl-MgO/FeS}_2$ เซลล์เดี่ยว

สำหรับต้นแบบแบตเตอรี่ความร้อน

สันธิธา รัตนพันธุ์ และ สมัญญา สงวนพรรค

