

การไหลของแก๊สและการเสียดกร่อนในปลายท่อจรวด ตรวจสอบด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์

จตุพร ทองศรี^{1*} และ อุดลยศศักดิ์ บุญพันธ์²

วันที่รับ 24 มิถุนายน 2564 วันที่แก้ไข 22 กรกฎาคม 2564 วันที่ตอบรับ 25 กรกฎาคม 2564

บทคัดย่อ

การออกแบบจรวดสมรรถนะสูงจำเป็นต้องมีองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบป้องกันความร้อน ซึ่งบริเวณปลายท่อจรวด (Nozzle) จะมีชั้นของฉนวน (Insulation layer) ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ (Combustion) ไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปจนทำให้ชั้นโครงสร้างโลหะเกิดความเสียหายซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของจรวดลดลง เมื่อเชื้อเพลิงจรวดเผาไหม้ ความร้อนที่เกิดจากการไหลของแก๊ส (Gas flow) จะทำให้ผิวของฉนวนดังกล่าวเกิดการเสียดกร่อน (Ablation) และเสื่อมสภาพ (Deteriorate) ในต่างประเทศแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ง่าย ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยพื้นฐานของทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer), ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) และพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics) เพื่อใช้อธิบายการเสียดกร่อน การไหลของแก๊ส และอุณหภูมิภายในชั้นฉนวนกันความร้อนซึ่งได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางและสามารถนำไปใช้ได้จริง ปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยทำให้จรวดถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัด การจำลองคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) ได้แก่ การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) และพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) ได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหา การไหลของแก๊ส การเสียดกร่อน โครงสร้าง และปัญหาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนในปลายท่อจรวดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในเอกสารนี้จึงเป็นการทบทวนและการรวบรวมเชิงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบจรวดสมรรถนะสูงด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการตรวจสอบการไหลของแก๊สและการเสียดกร่อนที่เกิดขึ้นในปลายท่อจรวดสำหรับประยุกต์ใช้พัฒนาระบบขับเคลื่อนต่อไป โดยผลการตรวจสอบจะรายงานในเอกสารของ สทป. ฉบับถัดไป

คำสำคัญ : การจำลองคอมพิวเตอร์, การถ่ายเทความร้อน, การเสียดกร่อน, การไหลแก๊ส, ปลายท่อจรวด

¹ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² ส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: Jatuporn.th@kmit.ac.th

Gas Flow and Ablation in a Rocket Nozzle Investigated by Computer Simulation

Jatuporn Thongsri ^{1*} and Adulyasak Boonpan ²

Received 24 June 2021, Revised 22 July 2021, Accepted 25 July 2021

Abstract

The design of high-performance rockets requires knowledge of a Thermal Protection System (TPS). In the TPS, a nozzle has an insulation layer to prevent the heat generated by combustion from too high a temperature, resulting in damage on a metal layer that may degrade rockets' performance. When the propellant burns, the heat generated by the gas flow will cause the insulation surface to be ablated and deteriorated. Overseas, simple mathematical models were developed based on heat transfer, chemical reaction, and fluid dynamics theories to describe ablation, gas flow, and temperature within the insulation layer, widely accepted and applied in practical applications. However, with modern technology, rockets have been developed rapidly, so the mentioned mathematical models have limitations in their uses. To avoid the limitations, computer simulation such as finite element analysis and computational fluid dynamics have been effectively employed to solve gas flow, ablation, structure, and other problems related to heat transfer in the nozzle. Therefore, this article is a theoretical review and compilation of high-performance rocket design with computer simulation to investigate gas flow and ablation in the nozzle to further develop a propulsion system. Results of investigation will be reported in the next article of Defence Technology Academic Journal.

Keywords : Computer simulation, Heat transfer, Ablation, Gas flow, Rocket nozzle

¹ College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

² Propulsion Systems Division, Defence Technology Institute.

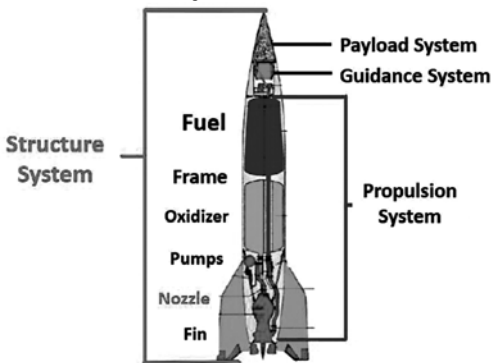
* Corresponding author, E-mail: Jatuporn.th@kmitl.ac.th

1. บทนำ

ในปี ค.ศ. 1898 Konstantin Tsiolkovsky (1857-1935) [1] ครูสอนวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้เสนอแนวคิดเรื่องการสำรวจอวกาศด้วยจรวด ในรายงานที่เขาตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1903 เขาได้แนะนำให้ใช้ประโยชน์จากสารขับเคลื่อนของเหลวเพื่อทำให้แรงขับสูงขึ้นซึ่งจะทำให้จรวดบินได้เร็วขึ้นและเคลื่อนไปในระยะทางที่ไกลขึ้นด้วย คำแนะนำของเขาได้รับการพิสูจน์หลายครั้งจนได้รับการยอมรับว่าเป็นรากฐานของวิทยาศาสตร์การบินสมัยใหม่ (Modern astronautics) ต่อมาวิศวกรยังพบอีกว่า นอกจากสารขับเคลื่อนแล้วการออกแบบรูปร่างลักษณะของปลายท่อจรวดก็มีผลต่อแรงขับด้วยเช่นกัน

1.1 ปลายท่อจรวด

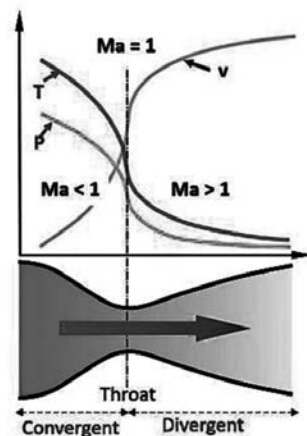
ปลายท่อจรวด (Nozzle) คือส่วนประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญของระบบขับเคลื่อน (Propulsion system) มันทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของแก๊สซึ่งออกมาจากการเผาไหม้ และช่วยให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานเทอร์โม-เคมี (Thermo-chemical energy) ให้กลายเป็นพลังงานจลน์ที่เหมาะสมเพื่อขับเคลื่อนจรวด รูปที่ 1 แสดงปลายท่อจรวดและส่วนประกอบอื่นที่สำคัญ [2]



รูปที่ 1 ปลายท่อจรวดและส่วนประกอบที่สำคัญ [1]

1.1.1 การเปลี่ยนพลังงานเทอร์โม-เคมี

โดยทั่วไปปลายท่อจรวดจะถูกออกแบบให้มีลักษณะแบบ “ลู่เข้า แล้ว ลู่ออก” (Convergent – divergent nozzle) หรือที่คุ้นเคยกันดีในชื่อ “De Laval nozzle” ดังรูปที่ 2 [3] โดยรูปทางด้านบนแสดงพฤติกรรมของความดัน (P), อุณหภูมิ (T) และความเร็วแก๊ส (v) กับตำแหน่งในปลายท่อจรวด เมื่อแก๊สซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ผ่านออกมาจากซ้ายไปขวาของปลายท่อจรวด ในบริเวณคอนเวอร์เจนท์ แก๊สจะมีความดันสูง, อุณหภูมิสูง และมีความเร็วต่ำกว่าเสียง (Subsonic) นั่นคือมีเลขมัค (Mach number, Ma) น้อยกว่า 1 ($Ma < 1$) เมื่อเคลื่อนที่ไปทางขวามากขึ้น ทั้งอุณหภูมิและความดันจะลดลงแต่เลขมัคจะสูงขึ้นจนเมื่อแก๊สเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณคอ (Throat) ความเร็วของแก๊สจะเท่ากับความเร็วเสียง (Sonic, $Ma = 1$) และเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณไดเวอร์เจนท์ทางด้านขวา อุณหภูมิ และความดันของแก๊สจะลดลงเป็นอย่างมาก แต่ความเร็วแก๊สจะเพิ่มขึ้นจนเร็วกว่าเสียง (Supersonic, $Ma > 1$) ซึ่งจะทำให้จรวดเกิดแรงขับไปข้างหน้าตามกฎข้อที่ 3 ของนิวตันที่กล่าวว่า “แรงกิริยาทุกแรงย่อมมีแรงปฏิกิริยาซึ่งมีขนาดเท่ากันแต่ทิศตรงกันข้ามเสมอ”



รูปที่ 2 Convergent – divergent nozzle [3]

1.1.2 แรงขับ

เมื่อพิจารณาว่าเป็นการไหลของแก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) ความเร็วไอเสีย (Exhaust velocity, \mathbf{v}_e) ของแก๊สซึ่งผลักดันให้จรวดไปข้างหน้าในหัวข้อที่แล้ว สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (1) [4]

$$\mathbf{v}_e = \sqrt{\frac{TR}{M} \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left(1 - \left(\frac{P_e}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} \quad (1)$$

เมื่อ \mathbf{v}_e คือ ความเร็วไอเสียที่ปลายท่อจรวด (m/s)
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สที่ไหลเข้า ($^{\circ}\text{C}$)
 R คือ ค่าคงที่แก๊สสากล (Jol/kmol.K)
 M คือ น้ำหนักโมเลกุล (kg/mol)
 γ คือ ปัจจัยการขยายตัวไอเซนทรอปิก
 P_e คือ ความดันสัมบูรณ์แก๊สที่ทางออก (Pa)
 P คือ ความดันสัมบูรณ์แก๊สที่ทางเข้า (Pa)

สำหรับใน 1 มิติ อัตราการไหลของแก๊สมีค่าเท่ากันตลอดโดยไม่คำนึงถึงรูปร่างพื้นที่หน้าตัด อัตราการไหลของมวล (Mass flow rate) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (2)

$$\dot{m} = \frac{AP_{tot}}{\sqrt{T_{tot}}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} Ma \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \quad (2)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลของมวล (kg/s)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณคอ (m^2)
 P_{tot} คือ ความดันรวม (Pa)
 T_{tot} คือ อุณหภูมิรวม ($^{\circ}\text{C}$)
 Ma คือ เลขมัค

จากสมการ (1) และ (2) อาศัยกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน แรงที่ทำให้จรวดเคลื่อนที่ (Thrust force, F) คือ

$$F = \dot{m} \mathbf{v}_e \quad (3)$$

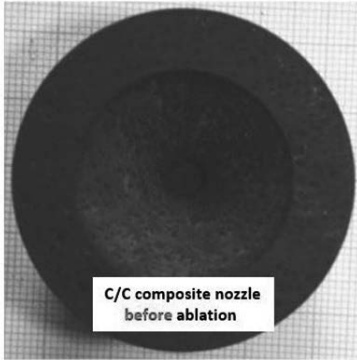
โดยทั่วไปสมการ (1) - (3) คือสมการอย่างง่ายเพื่อช่วยในการออกแบบจรวดให้มีประสิทธิภาพสูงและตรงกับจุดประสงค์การใช้งาน

ความเร็วไอเสียจะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ หากเป็นเชื้อเพลิงเหลวชนิดเดียว (Liquid monopropellant) จะมีความเร็วประมาณ 1.7-2.9 km/s หากเป็นของเหลวเชื้อเพลิงคู่ (Liquid bipropellant) และเชื้อเพลิงแข็ง (Solid propellant) จะมีความเร็วประมาณ 2.9-4.5 km/s และ 2.1-3.2 km/s ตามลำดับ ด้วยอุณหภูมิที่สูงเกือบ $3,200^{\circ}\text{C}$ และมีความเร็วเหนือเสียงจะทำให้ชั้นผิวโลหะของปลายท่อจรวดเกิดการเสียดกร่อน (Ablation) ดังนั้นจรวดจึงจำเป็นต้องมีการระบบป้องกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพ

1.1.3 การเสียดกร่อน

มาจากภาษาละตินคำว่า “Auferre” แปลว่า “เอาออก” เกิดขึ้นจากการที่เนื้อวัสดุได้รับปริมาณความร้อนในปริมาณที่มากจนทำให้เกิดการแปรสภาพไปเป็นวัสดุอย่างอื่นที่ไม่ต้องการ โดยมากคือ ถ่าน (Char) จึงจำเป็นต้องเอาออก การเสียดกร่อนเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนจรวด เนื่องจากเมื่อเนื้อวัสดุของฉนวนกันความร้อนเกิดการเสียดกร่อนจนเสียหาย (Deteriorate) ไปจากเดิมซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของจรวดลดลง เช่น ระยะเวลาการทำงานสั้นลง ความแม่นยำลดลง ฯลฯ ดังนั้นการออกแบบ และทำความเข้าใจการเสียดกร่อนที่เกิดขึ้นจึงมีความสำคัญ รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างปลายท่อจรวด (ก)

ไม่มีการเสียดกร่อน และ (ข) มีการเสียดกร่อน [5] ความร้อนที่สูงและระยะเวลาที่โดนความร้อนที่นานขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดการเสียดกร่อนสูงขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ปลายท่อจรวด (ก) ไม่มีการเสียดกร่อน (ข) มีการเสียดกร่อน [5]

เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของจรวดในปี ค.ศ. 1957 Bartz [6] ได้พัฒนาแบบจำลองกึ่งประจักษ์ (Semi empirical model) ใช้สำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของจรวดซึ่งปัจจุบันก็ยังใช้อยู่สำหรับการพัฒนาจรวดพิสัยไกล ปฏิบัติงานในความสูงไม่มากนัก และฟังก์ชันการปฏิบัติงานไม่ซับซ้อน

ต่อมาในปี ค.ศ. 1965-1999 [7,8] องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) ได้ร่วมกับ

เอกชนพัฒนาโปรแกรมสำหรับจำลองการเสียดกร่อนใน 1 มิติของชั้นฉนวนกันความร้อนอย่างง่ายซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อได้รับความร้อนปริมาณที่มากเป็นเวลานาน ชั้นเสียดกร่อนบางส่วนจะเสียดสภาพกลายเป็นถ่านดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความหนาชั้นต่าง ๆ ได้ดัง (4)

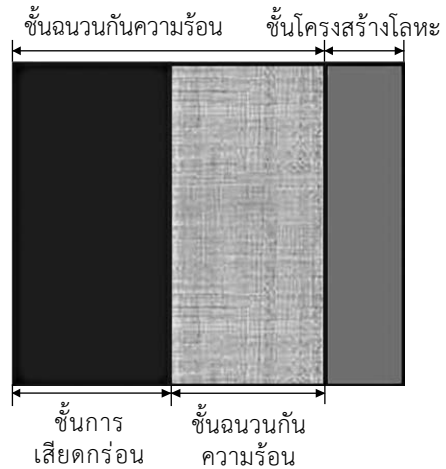
$$d_{tot} = d_{ab} + d_{ch} + d_{in} \quad (4)$$

โดย d_{tot} คือความหนารวมชั้นฉนวนกันความร้อน (mm)

d_{ab} คือ ความหนาของชั้นเสียดกร่อน (mm)

d_{ch} คือ ความหนาของชั้นถ่าน (mm)

d_{in} คือ ความหนาของชั้นฉนวน (mm)



รูปที่ 4 แบบจำลองอย่างง่ายของฉนวนกันความร้อน

สำหรับความหนาของชั้นเสียดกร่อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

$$d_{ab} = rt \quad (5)$$

เมื่อ r คือ อัตราการเกิดการเสียดกร่อน

t คือ ระยะเวลาเผาไหม้ของจรวด

ความหนาของชั้นถ่านจะขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อวัสดุ ตามรายงานของ NASA [8] สำหรับวัสดุประเภท Carbon cloth phenolic สามารถเขียนได้ดังสมการ (6) และสำหรับ Silica reinforced phenolic สามารถเขียนได้ดังสมการ (7) ตามลำดับ

$$d_{ch} = 0.036t^{0.68} \text{Exp}(-66.5/Q) \quad (6)$$

$$d_{ch} = 0.031t^{0.68} \text{Exp}(-90.4/Q) \quad (7)$$

เมื่อ Q คือ ฟลักซ์ความร้อน (Heat flux)

สำหรับความหนาของชั้นถ่านความหนาแน่นความร้อนสามารถประมาณได้จากการแก้สมการการนำความร้อน ภาวะไม่คงที่ (Unsteady state heat conduction) โดยพิจารณาว่าเป็นกรณีเกิดการเสียดความร้อนสูงสุด (Worst case) ที่เกิดจากผิวหน้าของชั้นถ่านสัมผัสกับแก๊สที่มีการไหลสถิตย์แบบอิสระและอุณหภูมิคงที่ (Free stream static temperature) ณ ตำแหน่งที่พิจารณา (x) เป็นเวลานานเท่ากับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของจรวด โดยความหนาของถ่านความหนาแน่นความร้อนจะเท่ากับระยะทางถึงจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึงระดับที่มีผลต่อความแข็งแรงของโลหะโครงสร้างของปลายท่อจรวด ซึ่งสมการดังกล่าวเขียนได้ดังสมการ (8) [9]

$$\frac{T(x,t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \text{Exp}\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2at}{k^2}\right) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h\sqrt{at}}{k}\right) \quad (8)$$

เมื่อ erfc คือ ฟังก์ชันเสริมข้อผิดพลาด

(complementary error function)

$T(x,t)$ คือ อุณหภูมิที่มีผลต่อความแข็งแรงของโลหะโครงสร้างปลายท่อจรวด

T_∞ คือ อุณหภูมิของแก๊สที่ไหลสถิตย์แบบอิสระ และอุณหภูมิคงที่ ณ ตำแหน่งที่พิจารณา
 α คือ ค่าการกระจายความร้อน (m^2/s)
 k คือ ค่าการนำความร้อน ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
 h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)

ตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมาสมการ (1) - (8) ได้รับการยอมรับและถูกใช้ช่วยพัฒนาการออกแบบปลายท่อจรวดเรื่อยมา เนื่องจากให้ผลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงเป็นอย่างดี แต่ในปัจจุบันจรวดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยรูปลักษณะและฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ซับซ้อนมากขึ้น ทำให้สมการดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะอธิบายการถ่ายเทความร้อน การเสียดความร้อน รวมถึงสิ่งที่เกิดขึ้นจริงขณะปฏิบัติงานได้อย่างเพียงพอ ปัจจุบันการจำลองคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) ได้แก่ การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis, FEA) และพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) ได้เข้ามามีบทบาทในการศึกษาเรื่องดังกล่าว ในประเทศไทยยังไม่พบว่ามีมีการใช้การจำลองคอมพิวเตอร์ช่วยในการศึกษาและพัฒนา ระบบขับเคลื่อนของปลายท่อจรวดมาก่อน ดังนั้นในเอกสารนี้ ผู้เขียนจึงมีจุดมุ่งหวังร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ที่จะใช้บททวนและรวบรวมเชิงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ตรวจสอบการไหลของแก๊สและการเสียดความร้อน จนมีองค์ความรู้สามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนสำหรับปลายท่อจรวดได้ต่อไป

1.2 การจำลองคอมพิวเตอร์

การจำลองคอมพิวเตอร์ เป็นการจำลองในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ศึกษาเหตุการณ์ที่มีอยู่จริง

ทั้งในอดีต ปัจจุบัน หรืออนาคตโดยการกำหนดเงื่อนไขตัวแปร ค่าเฉพาะ ฯลฯ ของสถานการณ์ที่ต้องการศึกษาให้ใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด ซอฟต์แวร์จะแก้สมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์นั้น และแสดงคำตอบเชิงตัวเลข (Numerical results) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ และตอบคำถามจากเหตุการณ์ที่สนใจ ในงานวิจัยนี้การจำลองคอมพิวเตอร์ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ใช้สำหรับศึกษาการเผาไหม้ตลอดจนการไหลของแก๊ส ส่วนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนในชั้นฉนวนกันความร้อน

1.2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

รูปแบบการไหลของแก๊ส ตลอดจนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปลายท่อจรวดสามารถคำนวณด้วยการแก้สมการอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นของสมการอนุรักษ์ (Conservation equation) และสมการความปั่นป่วน (Turbulence equation) สมการอนุรักษ์ ได้แก่ อนุรักษ์มวล (9), อนุรักษ์โมเมนตัม (10) และอนุรักษ์พลังงาน (11) ซึ่งเขียนได้ดังนี้ [10,11]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_m \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho E U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu U_j \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (11)$$

เมื่อ i, j คือ 1, 2 และ 3 ในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ

U_i คือ ความเร็วเฉลี่ยในทิศทาง i (m/s)

S_m คือ แหล่งกำเนิดโมเมนตัม (N/m^3)

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดไดนามิกของโมเลกุล ($kg/m.s$)

x_j คือ พิกัดในคาร์ทีเซียน (m)

E คือ พลังงานภายใน (J)

การหาคำตอบคอมพิวเตอร์ต้องแก้สมการอนุรักษ์ (9) - (11) และแก้สมการของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) โดยอาศัยวิธีการไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) ซึ่งสมการความปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ SST $k-\omega$ ซึ่งใช้ดีสำหรับของไหลที่มีการบีบอัดและความเร็วสูง [10-12] สมการความปั่นป่วน 2 สมการนี้ประกอบไปด้วยตัวแปรสำคัญ คือ พลังงานจลน์ศาสตร์ปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k) และ อัตราการกระจายเฉพาะ (Specific dissipation rate, ω) รูปสมบูรณ์ของสมการความปั่นป่วนนี้ ผู้สนใจสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ใน [10,12] ไม่สามารถแสดงได้ในเอกสารนี้ เนื่องจากพื้นที่จำกัด รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณไปใช้ตรวจสอบ (ก) ความเร็ว และ (ข) ความดันสัมบูรณ์ในการวิเคราะห์การไหลของแก๊สในปลายท่อจรวด [13] โดยแถบสีแสดงระดับของปริมาณที่แสดงผล น้ำเงินคือ ระดับต่ำไปจนถึงแดงในระดับสูง ในรูป (ก) จะเห็นได้ว่าทางด้านซ้ายความเร็วต่ำกว่าเสียง บริเวณคอขวดความเร็วเท่าเสียง และทางด้านขวาความเร็วสูงกว่าเสียง ในรูป (ข) ด้านซ้ายความดันสูง ส่วนด้านขวาความดันต่ำกว่า ความดันจะลดลงจากซ้ายไปขวา ซึ่งพฤติกรรมของความเร็วและความดันสัมบูรณ์ในรูปนี้สอดคล้องกับที่รายงานไว้ในหัวข้อ 1.1 ดังนั้นพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้ผลการจำลองที่มีความน่าเชื่อถือ และสอดคล้องกับปัญหาที่เราสนใจ

1.2.2 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อของแข็งบริเวณฉนวนกันความร้อน ตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการทราบค่าสามารถคำนวณได้จากการแก้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในสถานะขึ้นกับเวลาดังสมการ (12) [14]

$$[C]\{\dot{T}\} + ([K_c] + [K_h] + [K_r])\{T\} = \{Q\} \quad (12)$$

เมื่อ $[C]$ คือ เมทริกซ์ความจุความร้อน

$\{T\}$, $\{\dot{T}\}$ คือ เวกเตอร์ของอุณหภูมิและอนุพันธ์ของมันตามลำดับ

$[K_c]$ คือ เมทริกซ์ของการนำความร้อน

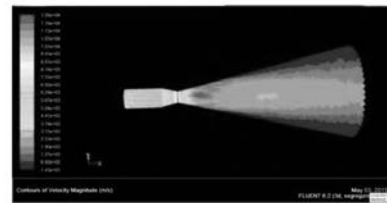
$[K_h]$ คือ เมทริกซ์ของการพาความร้อน

$[K_r]$ คือ เมทริกซ์ของการแผ่รังสีความร้อน

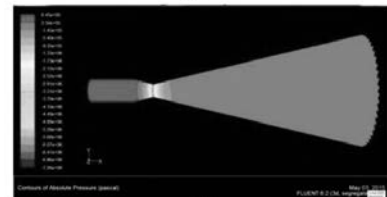
$\{Q\}$ คือ ผลรวมของเวกเตอร์ความร้อนทั้งหมด

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนของปลายท่อจรวดด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ [14] ในรูป (ก) แสดงภาพแบบจำลองแข็ง (Solid model) และ (ข) แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในปลายท่อจรวด จะเห็นได้ว่าไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้ตรวจสอบอุณหภูมิบนปลายท่อจรวดได้ อุณหภูมิ, พลิกซ์ความร้อน, ความเร็วการไหลของแก๊ส, ความดัน ฯลฯ สามารถคำนวณได้จากสมการ (9) - (12) ร่วมกับสมการความปั่นป่วนทั้ง 2 สมการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้คอมพิวเตอร์จะต้องแก้สมการ 6 สมการในแต่ละเอลิเมนต์ ทำให้เกิดสมการคณิตศาสตร์ที่ต้องแก้หลายล้านสมการ โดยอาศัยซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ สมการเหล่านั้นสามารถหาคำตอบได้

เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่เหมาะสม และครบถ้วน ผลที่ได้จากการคำนวณจะอยู่ในเทอมของตัวเลข ซึ่งซอฟต์แวร์จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแถบสีเพื่อให้ง่ายแก่การวิเคราะห์ ดังที่แสดงเป็นแถบสีในรูปที่ 5 และ 6 เมื่อวิเคราะห์ผลร่วมกับการทดลอง หรือผลเทียบเคียงกับงานวิจัยอื่นจะทำให้เราได้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

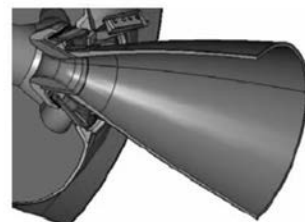


(ก)

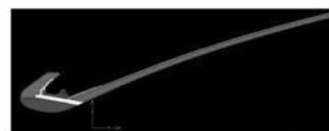


(ข)

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการจำลองการไหลของแก๊สด้วยผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ก) ความเร็ว และ (ข) ความดันสัมบูรณ์ [13]



(ก)



(ข)

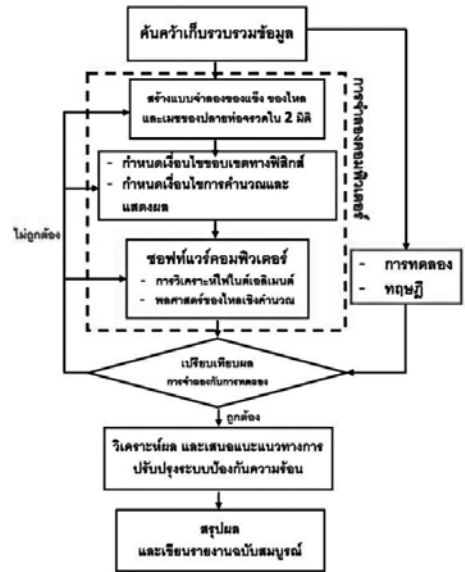
รูปที่ 6 (ก) แบบจำลองของแข็งของปลายท่อจรวด และ (ข) อุณหภูมิที่คำนวณได้ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ [15]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทบทวนและการรวบรวมเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบจรวดสมรรถนะสูงด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบการถ่ายเทความร้อน และการไหลของแก๊สในปลายท่อจรวดด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์ และหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพระบบป้องกันความร้อน โดยเราจะใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์จำลองภายใต้เงื่อนไขที่สนใจได้แก่ เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งในสภาวะขึ้นกับเวลาในช่วง 0 - 4 วินาทีแรก และเป็นการจำลองใน 2 มิติ ผลที่ต้องการคือ อุณหภูมิ, พลั๊กความร้อน, การเสียดร่อน, การสั่นพ้อง (Resonance), และคลื่นกระแทก (Shock wave) ที่เกิดขึ้นของปลายท่อจรวดกลุ่ม 122 มม. สำหรับระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้แสดงดังแผนผังในรูปที่ 7 จากรูปในเส้นประคือ ขั้นตอนการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งจะถูกนำมาช่วยในการศึกษาเรื่องนี้ ผลการจำลองจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 1 ด้วยสมการ (1) - (8) จนมั่นใจว่าผลการจำลองมีความถูกต้อง หลังจากนั้น ผลทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางปรับปรุงระบบป้องกันความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ในระยะสั้นสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบป้องกันความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับปลายท่อจรวดกลุ่ม 122 มม ได้อย่างทันที ส่วนในระยะยาวการจำลองคอมพิวเตอร์ และระเบียบวิธีวิจัยสามารถนำไปใช้ออกแบบปลายท่อจรวดในกลุ่มอื่น ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ต่อไป

3. บทสรุป

เอกสารวิชาการนี้เป็นการทบทวนและการรวบรวมเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบจรวดสมรรถนะสูง



รูปที่ 7 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

ด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์โดยได้กล่าวถึงลักษณะการทำงาน แรงขับ และการเสียดร่อนของปลายท่อจรวดรวมถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องเบื้องต้น นอกจากนี้ยังได้ยกตัวอย่างการใช้การจำลองคอมพิวเตอร์ ได้แก่ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประสบความสำเร็จในการพัฒนาปลายท่อจรวดของนักวิจัยในประเทศเพื่อชี้ให้เห็นประโยชน์ในการใช้แก้ปัญหาและพัฒนาปลายท่อจรวด สำหรับในต่างประเทศการจำลองคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาระบบป้องกันความร้อนถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายมากนัก ดังนั้นในท้ายเอกสารนี้จึงได้นำเสนอการจำลองคอมพิวเตอร์และระเบียบวิธีวิจัยของงานวิจัยพอสังเขป ต่อไปคือ การนำการจำลองคอมพิวเตอร์ไปใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของแก๊สในปลายท่อจรวด เพื่อที่จะนำผลที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุง และพัฒนาระบบขับเคลื่อนจรวดต่อไป ซึ่งความรู้ที่ได้จะถูกนำมารายงานในวารสารวิชาการของ สทป. ในฉบับต่อไป

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

5. เอกสารอ้างอิง

[1] L.C., Susan. 2008. The Red Stuff: A History of the Public and Material Culture of Early Human Spaceflight in the U.S.S.R. Ann Arbor, Mich: ProQuest LLC. pp. 57–59.

[2] T., Benson. Rocket Parts. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rockpart.html>. 05 March 2021.

[3] Wikipedia contributors. De Laval nozzle. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/De_Laval_nozzle. 05 March 2021.

[4] G.P., Sutton. 1992. Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineer of Rocket (6th ed.). Wiley-Interscience.

[5] X.T., Shen, L., Liu, W., Li, & K.Z., Li. 2015. Ablation behavior of C/C-ZrC in a solid rocket motor environment. *Ceram. Int.* 41 (9). pp. 11793-11803.

[6] D.R., Bartz. 1957. A simple equation for rapid estimation of rocket nozzle convection heat transfer coefficients. *Jet Propulsion*. 27 (1). pp. 49-51.

[7] NASA. 1965. Couple chemically reacting boundary layer and charring ablator Part II CR-1061.

[8] NASA. 1975. Space Vehicle Design Criteria. SP8115. Solid Rocket Motor Nozzle.

[9] Robert H., Perry, & Don W., Green. 2008. Perry's Chemical Engineers's Handbook. 8ed. New York : McGraw-Hil.

[10] L., Puangburee, W., Busayaporn, M., Kaewbumrung, & J., Thongsri. 2020. Evaluation and improvement of ventilation system inside Low-Cost Automation Line to reduce particle contamination. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 18 (1). pp. 35-44.

[11] Ansys, Inc. 2016. Turbulence, Fluent Theory Guide 17.1. Ansys Inc. Southpointe. FL. USA.

[12] J., Khongsin, & J., Thongsri. 2020. Numerical investigation on the performance of suction head in a cleaning process of hard disk drive factory. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 18 (1). pp. 28-34.

[13] B. A., Belega, & T. D., Nguyen. 2015. Analysis of flow in convergent - divergent rocket engine nozzle using computational fluid dynamics. in *Proceedings of AFASES conference.*, Brasov. Romania.

[14] Ansys, Inc. 2016. Nonlinear and transient thermal analysis, Ansys Mechanical Heat Transfer. Ansys Inc. Southpointe. FL. USA.

[15] M.E., Ewing, G.H., Richards, & et al. 2012. Ablation Modeling of a solid rocket nozzle. in *Proceedings of the 5th Ablation Workshop*. Feb 28-Mar 1. Lexington. KY. USA.

การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วยแบบจำลองกระบวนการ ลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ไพศาล จีฟู^{1*} วัชรภรณ์ ปริดาภิรมย์² และ ชัชชฎาวัลล์ ชิลศิริ³

วันที่รับ 19 กรกฎาคม 2564 วันที่แก้ไข 6 สิงหาคม 2564 วันตอบรับ 6 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

น้ำท่วมเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน บทความวิชาการฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศ วิธีเชิงปริมาณทางภูมิศาสตร์เบื้องต้นสำหรับนำไปวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำท่วมพื้นที่ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน วิจัยดำเนินการวิจัยได้ใช้การวิเคราะห์ปัจจัยด้วยแบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ โดยผู้เชี่ยวชาญด้านภัยพิบัติน้ำท่วมเป็นผู้ให้คะแนนน้ำหนักปัจจัยและแบบสำรวจข้อมูลที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง ผลการศึกษาพบว่ามี 6 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดภัยน้ำท่วม ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ความลาดชัน ลักษณะพื้นที่และความสูง ระยะห่างจากลำน้ำ การใช้ประโยชน์ที่ดิน และชุดดิน ตามลำดับ ข้อเสนอแนะจากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ควรจะนำปัจจัยความลึกของดิน ปัจจัยความสามารถในการระบายน้ำของดินในแต่ละหมู่บ้าน และการสำรวจพื้นที่กลุ่มเปราะบางระดับครัวเรือนสำหรับจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่มาร่วมศึกษา ทั้งนี้เจ้าหน้าที่ปกครองส่วนท้องถิ่นหรือหน่วยงานด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยสามารถนำหลักการขั้นตอนการศึกษานี้ไปใช้งานในการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมในอนาคตได้อย่างถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม, แบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, การป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย, ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่

¹ หน่วยวิจัยเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่, สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, มหาวิทยาลัยพะเยา

² สาขาวิชาสรีรวิทยา, คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์, มหาวิทยาลัยพะเยา

³ สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, มหาวิทยาลัยพะเยา

* ผู้แต่ง, อีเมล: phaisarn.je@up.ac.th / p.jeefoo@gmail.com

Flood Risk Assessment using Analytical Hierarchy Process and Geographic Information Systems

Phaisarn Jeefoo ^{1*} Watcharaporn Preedapirom ² and Chatchadawan Chinkeeree ³

Received 19 July 2021 Revised 6 August 2021 Accepted 6 August 2021

Abstract

Floods are natural disasters that damage lives and properties. This academic paper aims to review the literature on geospatial technology, introduction to geographical quantitative methods for analysis of factors affecting flooding in Pua Subdistrict, Pua District, Nan province. The research method was based on factor analysis using an analytical hierarchy process (AHP) model which the flood disaster experts rate the factor weight and land and building information survey. The results of the study revealed that there were 6 factors affecting flood risk consist of rainfall, slope, elevation, land use, and soil series respectively. Local government officials or disaster prevention and mitigation agencies can apply the principles of this study to more precisely and accurate assess areas at risk of future flooding.

Keywords : Flood risk areas, Analytical Hierarchy Process, Geographic Information Systems, Disaster Prevention and Mitigation, Spatial Database

¹ Research Unit of Spatial Innovation Development (RUSID), Geographic Information Science, School of Information and Communication Technology, University of Phayao

² Physiology, School of Medical Sciences, University of Phayao

³ Geographic Information Science, School of Information and Communication Technology, University of Phayao

* Corresponding author, E-mail: phaisarn.je@up.ac.th / p.jeefoo@gmail.com

1. บทนำ

ภัยธรรมชาติหรือปรากฏการณ์รุนแรงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีผลกระทบทำให้มนุษย์ไม่สามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติสุข ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิต และทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้สังคมเสื่อมโทรมลง [1] หนึ่งในภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยคือ อุทกภัยหรือน้ำท่วม ซึ่งเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุด คิดเป็น 41.4% ตามมาด้วยแผ่นดินไหว และพายุโดยทวีปเอเชียได้รับผลกระทบสูงสุด [2] สำหรับประเทศไทยพบว่าตัวเลขความเสียหายจากน้ำท่วมได้เพิ่มขึ้นจาก 6,000 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2533 เป็น 40,000 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2543 และ 1.44 ล้านล้านบาทในปี พ.ศ. 2554 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี พ.ศ. 2554 [3] นี้ ถูกจัดให้เป็นภัยพิบัติครั้งสร้างความเสียหายมากที่สุดเป็นอันดับสี่ของโลกรองจากแผ่นดินไหวและสึนามิที่ญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2554 แผ่นดินไหวที่ญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2538 และพายุเฮอริเคนแคทเธรีนาที่เกิดในสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ. 2548 ตามลำดับ [4]

ประเทศไทยมีพื้นที่ 513,115 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ใจกลางคาบสมุทรอินโดจีนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยที่ผ่านมาประเทศไทยประสบกับปัญหาน้ำท่วมเป็นประจำทุกปีและเกิดในทั่วทุกภาคของประเทศอันเนื่องมาจากปัจจัยทางด้านภูมิศาสตร์ที่ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นซึ่งทำให้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตลอดจนมีพายุพัดผ่านตลอดปี [5] โดยสิ่งจำเป็นเร่งด่วนที่ขาดไม่ได้สำหรับการประเมินระดับความเสียหายและระดับความรุนแรงของน้ำท่วมก็คือข้อมูลสารสนเทศหรือแผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่ที่ประสบภัยพิบัติ [6,7] ทั้งนี้วิธีการแบบเดิม ๆ ในอดีต

ที่ใช้กันมา เช่น การทำแผนที่น้ำท่วมได้ใช้วิธีการทำสำรวจจริงวัดภาคสนามนั้นทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงและใช้ระยะเวลานาน อีกทั้งบางบริเวณพื้นที่มีขนาดใหญ่ตลอดจนการเข้าถึงพื้นที่ยากลำบาก

ปัจจัยการเกิดน้ำท่วมนั้น มีหลายปัจจัยที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาปัจจัยการเกิดน้ำท่วม เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และแนวทางป้องกันบรรเทา ในบริเวณลุ่มน้ำย่อยทะเลสาบสงขลาฝั่งตะวันตก จังหวัดพัทลุง ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำท่วม โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาคือ ข้อมูลสถิติ ข้อมูลปัจจัย และความสัมพันธ์ของชุมชนจากการเก็บข้อมูลภาคสนาม และแบบสัมภาษณ์ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ [8] นอกจากนี้ฐานข้อมูลภูมิศาสตร์ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม นั้น ได้คำนึงถึงกิจกรรมการใช้ที่ดินอยู่ 5 ประเภท ได้แก่ พื้นที่นา พื้นที่ชุมชน พื้นที่พืชไร่ พื้นที่ว่างเปล่า พื้นที่ป่าเสื่อมโทรม และพื้นที่ป่าไม้ โดยสามารถแบ่งระดับความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม ออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับมากที่สุด ระดับมาก ระดับปานกลาง ระดับต่ำ และระดับต่ำมาก โดยได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดน้ำท่วม โดยพบว่า มีตัวแปรทั้งหมด 5 ตัวแปร คือ ความลาดชัน ความสูงของพื้นที่ ลักษณะการใช้ที่ดิน คุณสมบัติในการระบายน้ำของดิน และความหนาแน่นของลำน้ำที่มีความสัมพันธ์กับความสูงของพื้นที่ โดยให้ค่าน้ำหนักตัวแปรลดหลั่นตามลำดับโดยเรียงจากความสำคัญของตัวแปรจากมากไปหาน้อยคือ 5, 4, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ [9] หรือกรณีศึกษาหาพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในเขตลุ่มน้ำแม่กวัง ซึ่งได้ใช้หลักการซ้อนทับข้อมูล (Overlay) พบว่ามีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนทั้งสิ้น 8

ตัวแปร ได้แก่ ความหนาแน่นของลำน้ำ ความหนาแน่นเส้นทางคมนาคม การใช้ประโยชน์ที่ดิน ความสูงจากระดับน้ำทะเล ความลาดชันของพื้นที่ ความสามารถในการระบายน้ำของดิน ระดับน้ำใต้ดิน และปริมาณน้ำฝน ตามลำดับ [10] การประยุกต์หลักการรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information Systems: GIS) เพื่อการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมนั้น สามารถนำมาตรวจสอบร่วมกับแบบจำลองน้ำท่วม HEC-HMS และ HEC-RAS โดยสามารถวิเคราะห์ลักษณะการไหลของน้ำและขอบเขตของน้ำที่ท่วม [11]

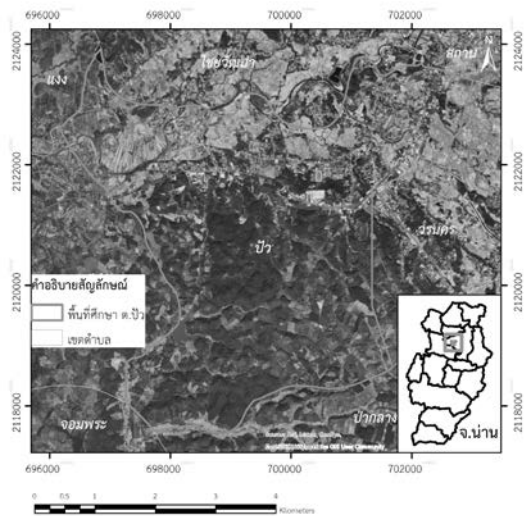
ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน เป็นอีกหนึ่งพื้นที่ที่ประสบปัญหาน้ำท่วมมาอย่างต่อเนื่อง ที่อยู่อาศัยของประชาชนได้มีการสร้างใหม่ รวมถึงได้ทำการปรับปรุงซ่อมแซมให้กลับมามีสภาพเหมือนเดิมทุกครั้งหลังเกิดภัยน้ำท่วม ซึ่งช่วงระยะเวลาที่เกิดน้ำท่วมนั้น สิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ถูกตัดขาด ทำให้การเข้าไปให้ความช่วยเหลือของเจ้าหน้าที่เป็นไปอย่างยากลำบาก การเดินทางต้องอาศัยเรือท้องแบนเท่านั้น นอกจากนี้เจ้าหน้าที่ด้านบรรเทาสาธารณภัยไม่ชำนาญเส้นทางและไม่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับจำนวนผู้ที่ติดอยู่ในบ้านแต่ละหลัง รวมถึงทรัพย์สินมีค่าต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน จึงทำให้ยากต่อการประเมินความเสียหายได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

ดังนั้นบทความวิชาการฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดน้ำท่วมด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดน้ำท่วมพื้นที่ ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน โดยได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ หรือแบบจำลอง AHP

2. พื้นที่ศึกษาและข้อมูล

2.1 ขอบเขตของการวิจัย

1) พื้นที่ศึกษา คือ ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน (รูปที่ 1) จำนวน 8 หมู่บ้าน และ 3,063 ครัวเรือน โดยมีจำนวนประชากรทั้งสิ้น 7,302 คน [12] ครอบคลุมพื้นที่ 23.15 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 14,469 ไร่ มีที่ตั้งในระบบพิกัดกริด UTM ระหว่าง 2118000 ทางเหนือ ถึง 2124000 ทางเหนือ และ 696000 ทางตะวันออก ถึง 702000 ทางตะวันออก



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา

ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปด้านทิศตะวันออกเป็นเทือกเขาและลาดลงมาทางทิศตะวันตก มีแม่น้ำปัวไหลผ่านทางด้านทิศเหนือ พื้นที่ที่อยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 310 เมตร

2) แบบสำรวจข้อมูลที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง และเครื่องกำหนดตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ภาคพื้นดิน (Global Positioning System: GPS) ยี่ห้อ GARMIN รุ่น GPS Map60csx

3) สํารวจข้อมูลภาคสนามพร้อมซักถามประชาชนในชุมชน / หมู่บ้านที่เคยประสบภัยพิบัติ

4) ออกแบบและจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial database) โดยยึดหลักการออกแบบฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานโครงสร้าง เนื้อหา คุณลักษณะ คุณภาพของชุดข้อมูลภูมิศาสตร์พื้นฐาน (Fundamental Geographic Data Set: FGDS) [13]

5) วิเคราะห์/ประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วยแบบจำลอง AHP โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 คน เป็นผู้ให้ค่าคะแนนน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย

2.2 ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม WorldView-3 รายละเอียดจุดภาพ 31 เซนติเมตร เป็นแผนที่ฐาน (Base map) บันทึกข้อมูลในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แบบ UTM WGS 1984 zone47n (รูปที่ 2)



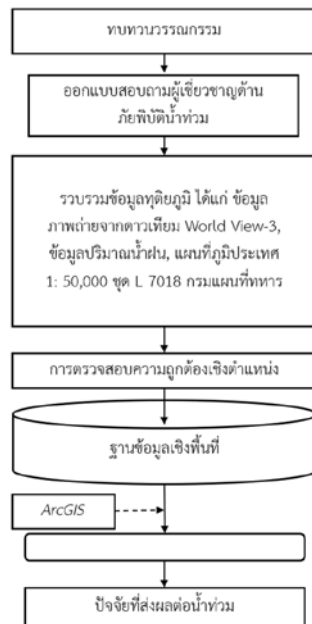
รูปที่ 2 ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม WorldView-3

2.3 ซอฟต์แวร์และเครื่องมือ

การสำรวจพื้นที่ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน คณะผู้วิจัยได้ทำการใช้แบบสำรวจข้อมูลที่ดินและสิ่งปลูกสร้างที่ได้รับจากเทศบาลตำบลปัว พร้อมทั้งใช้เครื่อง GPS โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 เมตร และใช้โปรแกรมสำเร็จรูประบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcGIS เวอร์ชัน 10.8 สำหรับการวิเคราะห์สำหรับคอมพิวเตอร์ฮาร์ดแวร์นั้น ได้ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 Enterprise, Inter(R) Core(TM) i5-6400T, CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz, RAM 8.00GB 64-bit operating system และเครื่อง Printer สี

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยครั้งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมข้อมูล

คณะผู้วิจัยได้ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่จากสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดน่าน (ทสจ.น่าน) ที่ได้มอบข้อมูลเชิงพื้นที่มาให้ในรูปแบบดิจิทัลไฟล์ อีเอสอาร์ไอ เซฟไฟล์ (ESRI Shapefile) ประกอบด้วย ชั้นข้อมูลเขตการปกครอง และชั้นข้อมูลชุดดิน

ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ได้ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยา จำนวน 3 สถานี ได้แก่ (1) สถานีอำเภอปัว จังหวัดน่าน รหัส 28042 (2) สถานีอำเภอท่าวังผา รหัส 28073 และ (3) สถานีอำเภอเชียงกลาง รหัส 28102

ข้อมูลความลาดชันและชั้นข้อมูลลักษณะภูมิประเทศและความสูง คณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างขึ้นจากการ Digitization เส้นชั้นความสูง (Contour) ช่วงชั้น 20 เมตร จากแผนที่ภูมิประเทศ 1:50,000 ชุด L7018 กรมแผนที่ทหาร ครอบคลุมพื้นที่ตำบลปัว

ทำการแปลงไฟล์ข้อมูลทั้งหมดให้อยู่ในรูปแบบ ESRI Shapefile ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แบบ UTM WGS 1984 zone47n

3.2 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

การเก็บข้อมูลภาคสนามใช้แบบสำรวจที่ดินและสิ่งปลูกสร้างที่ได้รับจากเทศบาลตำบลปัวมาใช้ในการสำรวจ ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ลงสำรวจพื้นที่โดยการสังเกตจากวัตถุพยาน เช่น ร่องรอยระดับน้ำที่เคยท่วมเมื่อปีที่ผ่านมา ชักถามประชาชนในพื้นที่ กำนัน ผู้ใหญ่บ้าน และอาสาสมัครสาธารณสุขประจำหมู่บ้าน (อสม.) เป็นต้น รวมทั้งทำการเก็บพิกัดตำแหน่งที่เคยเกิดน้ำท่วมด้วยเครื่อง GPS

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ภูมิสารสนเทศ (Geoinformatic Data Analysis)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านสารสนเทศเข้ามา มีบทบาทในการวางแผนการบริหาร การวางนโยบาย รวมไปถึงการใช้เป็นข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision support) และเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ หรือ Geoinformatics Technology ก็เป็นสารสนเทศอีกประเภทหนึ่งที่เป็นที่รู้จักและใช้งานกันอย่างกว้างขวางมากขึ้น ทั้งในระดับองค์กรของรัฐและบริษัทเอกชน “ภูมิสารสนเทศ” เป็นข้อมูลเชิงตำแหน่งทุกชนิด ไม่ว่าจะอยู่ในลักษณะที่เป็นเอกสารหรือดิจิทัล (Digital) หรือจะได้อาจมาจากกระบวนการหรือกรรมวิธีใดตั้งนั้นหมายรวมถึงแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายจากดาวเทียม ข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) แบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข ตลอดจนข้อมูลจากการสำรวจรังวัดทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นการรังวัดแบบดั้งเดิม (Conventional survey) หรือจากการรังวัดสมัยใหม่ด้วยสัญญาณดาวเทียม GPS เป็นต้น [14]

ภูมิสารสนเทศ (Geoinformatics) ประกอบด้วย คำ 2 คำ คือ คำว่า Geo หมายถึง โลกหรือการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่เป็นอยู่บนโลก และคำว่า Informatics หมายถึง ข้อมูลข่าวสาร หรือ Information เป็นข้อมูล ที่ผ่านการประมวลผลและวิเคราะห์แล้วทำให้สืบค้น (Query) แก้ไข (Edit) ปรับปรุง (Manipulate) และแสดงผล (Visualize) ได้ ดังนั้นเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ จึงเกี่ยวข้องกับการได้มา (Capture) การบูรณาการ (Integrating) การวิเคราะห์ (Analyzing) การจัดการ (Managing) และการแปลตีความ (Depicting) ของข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูล 3 ด้าน ได้แก่ 1) ทำเลที่ตั้ง (Location) ที่บอกเป็นค่าพิกัดที่แม่นยำและแน่นอนได้ เช่น ระบบพิกัด

ภูมิศาสตร์ (Geographic coordinate) และระบบพิกัด UTM (Universal Transverse Mercator) ทำเลที่ตั้งนี้ ถือเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ (Spatial aspect) 2) สภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ (Environment) เป็นข้อมูลที่แสดงถึงสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ลักษณะภูมิประเทศ ชนิดดิน โครงสร้างทางธรณีสัณฐาน ลักษณะพืชพรรณป่าไม้ เป็นต้น และ 3) สภาพแวดล้อมทางวัฒนธรรม เป็นข้อมูลที่แสดงถึงสิ่งแวดล้อมที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้น เช่น เส้นทางคมนาคม อาคารสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เป็นต้น [15]

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information Systems: GIS)

GIS หมายถึง เทคโนโลยีสารสนเทศชนิดหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลที่สามารถอ้างอิงตำแหน่งได้บนพื้นผิวโลก (Geospatial data) โดยมีความสามารถในการรวบรวม จัดเก็บ จัดการ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเพื่อให้ได้มาซึ่งสารสนเทศเชิงพื้นที่ หรือภูมิสารสนเทศ (Geospatial information) ที่มีประโยชน์สำหรับประกอบการวางแผนและการตัดสินใจในการบริหารจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ [14]

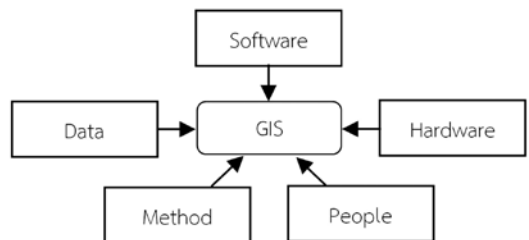
GIS สามารถประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลเชิงพื้นที่ได้หลากหลายในปัจจุบันสามารถกล่าวได้ว่าระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สามารถเลือกให้มีการประยุกต์ใช้ในแนวทางต่าง ๆ ได้อย่างเต็มรูปแบบในหลาย ๆ ด้านทางวิชาการ ธุรกิจ ภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และทางทหาร [16]

GIS หมายถึง กระบวนการของการใช้คอมพิวเตอร์ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ซอฟต์แวร์ (Software) ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (Geographic data) และการออกแบบ

(Personnel design) ในการเสริมสร้างประสิทธิภาพของการจัดเก็บข้อมูล การปรับปรุงข้อมูล การคำนวณ และการวิเคราะห์ข้อมูล ให้แสดงผลในรูปของข้อมูลที่สามารถอ้างอิงได้ในทางภูมิศาสตร์ หรือหมายถึงการใช้สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ ในการจัดเก็บ และการใช้ข้อมูลเพื่ออธิบายสภาพต่าง ๆ บนพื้นผิวโลก โดยอาศัยลักษณะทางภูมิศาสตร์ เป็นตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต่าง ๆ [17]

องค์ประกอบของ GIS

GIS มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 5 ส่วน คือ ข้อมูล/สารสนเทศ (Data/Information) เครื่องคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ต่าง ๆ (Hardware) โปรแกรม (Software) และบุคลากร (User/People) และขั้นตอนการทำงาน (Procedure) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 องค์ประกอบของ GIS [14,15]

ข้อมูล (Data/Information) ข้อมูลที่จะนำเข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ควรเป็นข้อมูลเฉพาะเรื่อง (Thematic data) และเป็นข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการตอบคำถามต่าง ๆ ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ เป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ และเป็นปัจจุบันมากที่สุด โดยข้อมูลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) และข้อมูลอรรถาธิบาย (Non-spatial data or attribute data) ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) เป็นข้อมูลที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์

(Geo-reference data) ของรูปลักษณะของพื้นที่ (Graphic feature) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ ข้อมูลเวกเตอร์ (Vector data) และข้อมูลแรสเตอร์ (Raster data) โดยข้อมูลเวกเตอร์ แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

1) ข้อมูลจุด (Point) มีคุณลักษณะที่แสดงตำแหน่งพิกัดที่ไม่มีขนาดและทิศทาง เช่น ที่ตั้งหมู่บ้าน โรงเรียน วัด

2) ข้อมูลเส้น (Line) มีระยะและทิศทางระหว่างจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดแต่ไม่มีความกว้าง เช่น ถนน แม่น้ำ

3) ข้อมูลพื้นที่ (Polygon) มีระยะและทิศทางระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดที่ประกอบกันเป็นรูปหลายเหลี่ยมมีขนาดพื้นที่ (Area) และเส้นรอบรูป (Perimeter) เช่น แหล่งน้ำผิวดิน [14-16]

วิธีเชิงปริมาณทางภูมิศาสตร์เบื้องต้น

ปัจจุบันการศึกษาด้านภูมิศาสตร์ได้มีการนำเอาสถิติพรรณนา (Descriptive statistics) สถิติอ้างอิง (Inferential statistics) และแบบจำลอง (Models) ซึ่งเป็นพื้นฐานของวิธีเชิงปริมาณทางภูมิศาสตร์ (Quantitative methods in geography) มาใช้ในการแก้ไขปัญหาหรือศึกษาปรากฏการณ์ทางด้านภูมิศาสตร์กายภาพและภูมิศาสตร์มนุษย์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่นักภูมิศาสตร์สามารถนำมาใช้ในการนำเสนอ อธิบาย วิเคราะห์ ประเมินค่า และสรุปลักษณะข้อมูลหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่สนใจ รวมถึงการสร้างแบบจำลองหรือสมการเพื่อทำนายหรือคาดการณ์ปรากฏการณ์เชิงพื้นที่ที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้า เช่น การคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม ภัยแล้ง โรคระบาด หรือแม้กระทั่งอุบัติเหตุ เป็นต้น นำมาซึ่งแนวคิดและทฤษฎีใหม่ทางการ

ศึกษาด้านภูมิศาสตร์อย่างต่อเนื่อง วิธีเชิงปริมาณทางภูมิศาสตร์ แบ่งสถิติออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ (1) สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) คือ การใช้สถิติเพื่อนำเสนอหรืออธิบายข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่มีอยู่ทั้งในรูปแบบของตัวเลข หรือกราฟ (Graphics) ค่าสถิติพื้นฐานที่มักพบในการนำเสนอข้อมูลเชิงปริมาณ ได้แก่ ค่าที่ได้จากการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง (Measures of central tendency) ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย (Mean) มัธยฐาน (Median) และ ฐานนิยม (Mode) แนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง หรือค่าที่ได้จากการวัดการกระจายตัวของข้อมูล (Measure of dispersion) ประกอบด้วย พิสัย (Range) ส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์ (Quartile deviation) ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean deviation) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เป็นต้น (2) สถิติอ้างอิง (Inferential statistics) คือ สถิติที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างเพื่อนำผลสรุปที่ได้ไปประมาณหรือคาดการณ์ลักษณะของประชากรหรือปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็น การประมาณค่าพารามิเตอร์ และการทดสอบสมมติฐาน (3) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) เป็นสถิติวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาความเชื่อมโยงระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร และตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอาจอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ทางเดียว (ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ) ความสัมพันธ์สองทาง หรือไม่มีความสัมพันธ์กัน และ (4) การวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) และการสร้างแบบจำลองเชิงพื้นที่ (Spatial modeling) เป็นสถิติวิเคราะห์ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของตัวแปรต่าง ๆ ตามกรอบแนวคิดเชิงทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้า ผลการวิเคราะห์ถดถอยสามารถสร้างสมการเพื่อการทำนายตัวแปรตาม (Dependent variable) ที่ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรอิสระ (Independent variable)

ตั้งแต่ 1 ตัวแปรขึ้นไป สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยสามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงพื้นที่เพื่อทำนายหรือทดสอบปรากฏการณ์ทางภูมิศาสตร์ โดยอาศัยข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis model) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่นิยมใช้ ได้แก่ แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis model) แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยโพลิโนเมียล (Polynomial regression analysis model) แบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณมีตัวแปรดัมมี่ (Multiple regression analysis model with dummy variables) และแบบจำลองการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณมีเทอมปฏิสัมพันธ์ (Multiple regression analysis model with interaction term) เป็นต้น [18]

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการ “วัดค่าระดับ” ของการตัดสินใจในเรื่องต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้ผลการตัดสินใจที่ถูกต้องตรงกับเป้าหมายของการตัดสินใจได้มากที่สุด กระบวนการนี้ได้รับการคิดค้นเมื่อปลายทศวรรษที่ 1970 โดยศาสตราจารย์ Thomas Saaty แห่งมหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนีย ซึ่งเป็นกระบวนการตัดสินใจที่มีเหตุผลในปัญหาที่มีหลายปัจจัย โดยใช้วิธีจับคู่เปรียบเทียบที่ละคู่ เพื่อเรียงลำดับความสำคัญและน้ำหนักที่ให้กับทางเลือกที่เป็นคำตอบของปัญหา โดยมีหลักการ คือ แบ่งโครงสร้างของปัญหาออกเป็นชั้น ๆ ชั้นแรกคือ การกำหนดเป้าหมาย (Goal) แล้วจึงกำหนดเกณฑ์ (Criteria) เกณฑ์ย่อย (Subcriteria) และทางเลือก (Alternatives) [19] แล้วจึงวิเคราะห์หาทางเลือกที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (Trade off) เกณฑ์ในการคัดเลือกทางเลือกที่ละคู่

(Pairwise) เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจว่าเกณฑ์ไหนสำคัญกว่ากัน โดยการให้คะแนนตามความสำคัญหรือความชอบ หลังจากให้คะแนนเพื่อจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์แล้วจึงค่อยพิจารณาวิเคราะห์ทางเลือกทีละคู่ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทีละเกณฑ์จนครบทุกเกณฑ์ถ้าการให้คะแนนความสำคัญหรือความชอบนั้นสมเหตุสมผล (Consistency) จะสามารถจัดลำดับทางเลือกเพื่อหาทางเลือกที่ดีที่สุดได้ วิธี AHP เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการหาพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น อุทกภัย วาดภัย ภัยแล้ง หรือแม้กระทั่งการเกิดโรคติดต่อ เป็นต้น ซึ่งต้องเลือกปัจจัยที่ดีที่สุดจากหลาย ๆ ปัจจัย และมีเกณฑ์ในการพิจารณาทางเลือกหลายเกณฑ์ AHP เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบของทีละคู่ จึงทำให้การเลือกทางเลือกทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น ปัจจุบัน AHP เป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision making) ซึ่งมีผู้นิยมใช้กันมากมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ตัดสินใจทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น

แบบจำลอง AHP นั้นมีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาอยู่ 3 ประการ ดังนี้ การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์ การหาลำดับความสำคัญ (Priority) และการวิเคราะห์ความสมเหตุสมผลของข้อมูล [19] โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์ (Structuring the hierarchy) ในการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจเลือกของหรือทางเลือกที่ดีที่สุด จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นลำดับชั้นดังนี้คือ เป้าหมาย (Goal) เกณฑ์ (Criteria) เกณฑ์ย่อย (Subcriteria) และทางเลือก (Alternatives) โดยในแต่ละชั้นอาจมีหลายเกณฑ์ และในแต่ละเกณฑ์อาจมีหลายเกณฑ์ย่อยได้

3.4.2 การคำนวณหาลำดับความสำคัญ (Calculation of relative priority) ในแต่ละขั้นผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญหรือผู้เกี่ยวข้องเป็นผู้ให้คะแนนความสำคัญหรือความชอบ โดยการเปรียบเทียบของ (เกณฑ์) ทีละคู่ (Pairwise comparison) โดยเริ่มจากขั้นบนลงสู่ขั้นล่างโดยแบ่งระดับความสำคัญหรือความชอบ (AHP measurement scale) ออกเป็น 9 ระดับ ดังแสดงในตาราง 1 หลังจากทีทราบความเห็นที่ผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญหรือผู้เกี่ยวข้องในรูปของคะแนนความสำคัญหรือความชอบจากการเปรียบเทียบของเป็นคู่ในขั้นนั้นแล้ว จะทำการคำนวณหาน้ำหนักความสำคัญ (Weight) หรือลำดับความสำคัญสัมพัทธ์ (Relative priority) ของในขั้นนั้น และทำการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกัน ทีละขั้นจากขั้นบนลงสู่ขั้นล่างจนครบทุกขั้น จะทราบคะแนนความสำคัญรวมของทางเลือกตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ได้ (ตาราง 1)

ตารางที่ 1 แสดงระดับความสำคัญหรือความชอบ

ระดับความสำคัญ (Preference level)	ค่าแสดงเป็นตัวเลข (Numerical value)
เท่ากัน	1
เท่ากันถึงปานกลาง	2
ปานกลาง	3
ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	4
ค่อนข้างมาก	5
ค่อนข้างมากถึงมากกว่า	6
มากกว่า	7
มากกว่าถึงมากที่สุด	8
มากที่สุด	9

ที่มา : [14]

น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์หรือทางเลือกในแต่ละขั้นจะคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$Aw = \lambda_{max} w \quad (1)$$

เมื่อ

A คือ สแควร์เมตริกแสดงความเห็นของผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญหรือผู้เกี่ยวข้องในรูปของคะแนนความสำคัญซึ่งปรับค่าให้เป็น 1 แล้ว (Normalized)

w คือ Eigenvector แสดงน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของของซึ่งอยู่ในลำดับขั้นเดียวกัน หรือกลุ่มของที่อยู่ภายใต้ของในลำดับขั้นที่สูงกว่า

λ_{max} คือ Maximum eigenvalue

สร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างตารางเมตริกซ์ที่ใช้แสดงการเปรียบเทียบเป็นคู่แต่ละเกณฑ์หลัก

เกณฑ์ตัดสินใจ		ปัจจัย			
		A1	A2	A3	A4
ปัจจัย	A1	a11	a12	a13	a14
	A2	a21	a22	a23	a24
	A3	a31	a32	a33	a34
	A4	a41	a42	a43	a44

ที่มา : [19]

โดยที่ i คือ ค่าความสำคัญในแนวตั้ง และ j คือ ค่าความสำคัญในแนวนอน ของเมตริกซ์นี้ โดยจะทำการเปรียบเทียบถึงความสำคัญระหว่างปัจจัย A_i และ ปัจจัย A_j ซึ่งจะทำให้การกำหนดมาตราส่วนในการวินิจฉัย เปรียบเทียบหรือพิจารณา ดังนี้

ถ้า $A_{ij} = 1$ หมายถึง ปัจจัย A_i และ A_j มีความสำคัญเท่ากัน

ถ้า $A_{ij} = 3$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j เล็กน้อย

ถ้า $A_{ij} = 5$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j ปานกลาง

ถ้า $A_{ij} = 7$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j มากกว่า

ถ้า $A_{ij} = 9$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j มากที่สุด

และจำนวนระดับของมาตราส่วนในการเปรียบเทียบนี้จะขึ้นอยู่กับผู้วิเคราะห์ว่าต้องการเปรียบเทียบให้อยู่ในระดับไหน มีความละเอียดมากน้อยเพียงใด

3.4.3 การตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องของความสอดคล้องของข้อมูล เช่น วิเคราะห์เปรียบเทียบว่า A มีความสำคัญมากกว่า B 2 เท่า และ B มีความสำคัญมากกว่า C 4 เท่า ดังนั้น A ควรมีความสำคัญกว่า C 8 เท่า แต่ถ้าวิเคราะห์ว่า A มีความสำคัญมากกว่า C 2 เท่านั้นหมายถึงการวิเคราะห์ในตัวอย่างนี้ไม่มีความสอดคล้องกัน ซึ่งบางครั้งการวิเคราะห์อาจไม่มีความสอดคล้องของข้อมูลเกิดขึ้นได้ การแก้ไขก็คือ ทบทวนกระบวนการใหม่เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ออกมาที่มีความสอดคล้องกันอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ความสอดคล้องของข้อมูลจะต้องตรวจสอบจากค่า สัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) ว่า ยอมรับได้หรือไม่

3.4.3.1 สัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio)

CR = ค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio)

CI = ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index)

RI = ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Index)

3.4.3.2 ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index)

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n k_i / r_i}{t = 1} \quad (3)$$

3.4.3.3 ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Index: RI)

RI เป็นค่าที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างสามารถหาได้ดังนี้

ตาราง 3 แสดงค่า IR จากการสุ่มตัวอย่าง

N	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

N	9	10	11	12	13	14	15
RI	1.41	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

ที่มา : [19]

โดยค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (CR) ที่ยอมรับได้คือ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10 หากค่าความสอดคล้องสูงกว่าที่ยอมรับได้ต้องมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบใหม่หรือมีการทบทวนในการศึกษาอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าสัดส่วนความสอดคล้องเป็นที่ยอมรับ

4. บทสรุป

ปัญหาน้ำท่วมส่งผลกระทบต่อประชาชนในการเตรียมความพร้อมในการรับมือและป้องกัน คือเนื่องจากฝนที่ตกลงมาอย่างหนัก ก็อาจจะเป็นปัญหาเนื่องจากจะทำให้ น้ำฝนไหลจากพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงลงมายังพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำ จึงจะส่งผลทำให้เกิดน้ำท่วมฉับพลัน ซึ่งจะส่งผลให้ประชาชนรับมือและป้องกันไม่ทัน และจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออาชีพ

ของประชาชนได้ เช่น พื้นที่อยู่อาศัยเสียหาย พื้นที่เกษตรกรรมจมน้ำ ปศุสัตว์ล้มตาย เป็นต้น จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามียางอย่างที่ไม่เหมือนกันคือ ฝนที่ตกลงมามาก ทำให้รับมือและป้องกันไม่ทัน การศึกษาวิจัยในอดีตมีการเตรียมความพร้อมและการแก้ไขเฉพาะหน้าในการป้องกันจะมีความร่วมมือของประชาชนเป็นส่วนใหญ่ [9]

ผลการศึกษาการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วยแบบจำลอง AHP โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 คน เป็นผู้ให้ค่าคะแนนน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยพบว่ามี 6 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดภัยน้ำท่วมได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ความลาดชัน ลักษณะพื้นที่และความสูง ระยะห่างจากลำน้ำ การใช้ประโยชน์ที่ดินและชุดดิน ตามลำดับ ข้อเสนอแนะจากการศึกษาคั้งนี้ควรจะนำปัจจัยความลึกของดิน ปัจจัยความสามารถในการระบายน้ำของดินในแต่ละหมู่บ้าน และการสำรวจพื้นที่กลุ่มเปราะบางระดับครัวเรือนสำหรับจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่มาร่วมศึกษา

GIS เป็นเครื่องมือที่สามารถช่วยอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติจากอดีต ปัจจุบัน และอนาคตได้อย่างต่อเนื่อง ผลงานวิจัยหลายชิ้นได้นำ GIS มาใช้ในการแสดงภาพแผนที่บริบทของสิ่งที่ค้นพบ ยกตัวอย่างเช่น การนำ GIS มาใช้ด้านการศึกษาความเสียหายจากแมลงที่ทำลายต้นกาแฟอาราบิกา [20] โรคไข้เลือดออก [21] ติดตามไฟป่า [22-23]

ปัจจัยจากการกระทำของประชาชนส่งผลให้เกิดน้ำท่วม คือ เนื่องจากประชาชนบางกลุ่มที่อาศัยอยู่บนพื้นที่สูงหรือบนภูเขาจะมีการตัดไม้ไปใช้ประโยชน์หรือมีการตัดไม้เพื่อทำพื้นที่ปลูกพืชผัก และนี่ก็เป็นสาเหตุที่ส่งผลทำให้เกิดพื้นที่น้ำท่วมในพื้นที่ราบ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามียาง

อย่างที่ไม่เหมือนกันคือบริเวณบนเขาถ้าฝนตกลงมามาก ๆ ดินบริเวณบนเขาจะดูดซับน้ำไม่หมดเนื่องจากพืชปกคลุมดินถูกทำลาย และจะทำให้น้ำไหลลงมายังที่ราบและส่งผลให้เกิดน้ำท่วม แนวทางในการป้องกันประชาชนส่วนใหญ่จะตั้งแนวกระสอบทราย สร้างกำแพงขวางลำน้ำป่า และลำห้วยสาขาต่าง ๆ ขุดลอกลำน้ำ เพิ่มพื้นที่ป่าไม้ เป็นต้น ข้อเสนอแนะในครั้งต่อไปคือการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมอาจจะยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ อีก เช่น ความลึกของดินระดับน้ำใต้ดิน เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อความถูกต้องมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่สนับสนุนงบประมาณ ตามสัญญาฉบับเลขที่ 640201

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Rotjanakusol, T. & Laosuwan, T. 2018 Inundation area investigation approach using remote sensing technology on 2017 flooding in Sakon Nakhon province Thailand". Studia Universitatis Vasile Goldis Arad, Seria Stiintele Vietii, 28(4), 159-166.

[2] Milly, P.C., Wetherald, R.T., Dunne, K.A., & Delworth, T.L. 2002. Increasing Risk of Great Floods in a Changing Climate. Nature. 15(6871), 514-517.

[3] Department of Disaster Prevention and Mitigation. Ministry of Interior. Thailand. 2013. Report Analysis/Monitoring. Retrieved from www.disaster.go.th/th/dwn-down-

load-12-1/ (in Thai)

[4] Asian Disaster Reduction Center. 2012. Natural Disaster Data Book. Asian Disaster Reduction Center (ADRC).

[5] Blanc, J., Hall, J., Roche, N., Dawson, R., Cesses, Y., Burton, A., & Kilsby, C. 2012. Enhanced efficiency of pluvial flood risk estimation in urban areas using spatial-temporal rainfall simulations. *Journal of Flood Risk Management*, 5, 143–152.

[6] Kim, B., Sanders, B.F., Schubert, J.E., & Famiglietti, J.S. 2014. Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver. *Advances in Water Resources*, 68, 42–61.

[7] Elkharchy, I. 2015. Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 261–278.

[8] นาถนเรศ อากาศสุวรรณ, ประมาณ เทพสงเคราะห์, และ วรวัฒน์ นาทิ. 2552. การศึกษาปัจจัยการเกิดน้ำท่วมเพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และแนวทางป้องกันบรรเทาในบริเวณลุ่มน้ำย่อยทะเลสาบสงขลาฝั่งตะวันตก จังหวัดพัทลุง. *มหาบัณฑิต ศศ.ม. (พื้นที่ศึกษา)*. บัณฑิตวิทยาลัย/มหาวิทยาลัยทักษิณ. เอกสารอิเล็กทรอนิกส์.

[9] มยุรมาศ ปุณสกุล. 2545. การวิเคราะห์สภาพพื้นที่เสี่ยงอุทกภัยและสภาวะการรับรู้ของประชาชน กรณีศึกษา ตำบลวังบาล อำเภอหล่มเก่า จังหวัดเพชรบูรณ์. *ปริญญาานิพนธ์ วท.บ. (ภูมิศาสตร์)*. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เอกสาร

อิเล็กทรอนิกส์.

[10] เพ็ชรสวัสดิ์ กันคำ. 2547. การประยุกต์ใช้สารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในเขตลุ่มน้ำแม่กวัง. *ปริญญาานิพนธ์ วท.บ. (ภูมิศาสตร์)*. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เอกสารอิเล็กทรอนิกส์.

[11] Samarasinghe., S.M.J.S. 2010. Application of remote sensing and GIS for flood risk analysis: A case study at KALU-GAN-GA river, Sri Lanka. Survey Department. Kyoto Japan. Electronic records.

[12] Official Statistics Registration System, Thailand. 2553. Retrieved from <http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/districtList/page1.htm> (in Thai)

[13] Fundamental Geographic Data Set (FGDS). 2556. Retrieved from www.ngis.go.th/home/wp-content/uploads/2019/03/FundamentalGeographicDataSet_FGDS.pdf (in Thai)

[14] ไพศาล จีฟู 2561. การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์บนเว็บ (Application Development for Web-based GIS), พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 500 เล่ม, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ISBN : 9789740337508.

[15] สุเพชร จิรขจรกุล. 2552. เรียนรู้ระบบภูมิสารสนเทศด้วยโปรแกรม ArcGIS Desktop 9.3.1 (พิมพ์ครั้งที่ 1). นนทบุรี: บริษัท เอส.อาร์. พรินติ้งแมสโปรดักส์ จำกัด.

[16] สัญญา สราภิรมย์. 2549. เอกสารประกอบการสอนวิชาการระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (106611). นครราชสีมา: สาขาการรับรู้ระยะไกล สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[17] สรรค์ใจ กลั่นดาว. 2542. ระบบสารสนเทศ

ภูมิศาสตร์: หลักการเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 2).
กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[18] ประเสริฐ วิทยารัฐ. 2530. สถิติทาง
ภูมิศาสตร์. กรุงเทพฯ: อักษรบัณฑิต.

[19] Saaty, T.L. 1980. The analytical
hierarchy process, New York: McGraw-Hill.

[20] เผ่าไท ถายะพิงค์ และปิยะวรรณ สุทธิ
ประพันธ์. 2558. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิ
สารสนเทศในการศึกษาความหลากหลายชนิดและ
การแพร่กระจายของแมลงศัตรูกาแฟอราบิกาใน
จังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย. วารสารเกษตร 31(2),
203-213.

[21] Jeefoo., P. 2012. Space-Time Analysis
Tools of Dengue Epidemics in Chachoengsao
Province, Thailand. International Journal of
Geoinformatics, 8(3), 9-13.

[22] Jeefoo, P. 2020. A webGIS base
information system for monitoring wildfire
using Suomi-NPP (VIIR) satellite in Phare
province, Thailand. Naresuan University
Journal: Science and Technology, 28(2), 62-71.

[23] Jeefoo, P. 2019. Wildfire field survey
using mobile GIS technology in Nan province.
The 4th International Conference on Digital
Arts, Media and Technology and 2nd ECTI
Northern Section Conference on Electrical,
Electronics, Computer and Telecommuni-
cations Engineering, Nan, Thailand, 98-100.

แนวโน้มเทคโนโลยีจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถี ค.ศ. 2021-2030

ธนรัฐ ณะสมบุรณ์^{1*}

วันที่รับ 15 มิถุนายน 2564 วันที่แก้ไข 19 กรกฎาคม 2564 วันตอบรับ 20 กรกฎาคม 2564

บทคัดย่อ

ปัจจุบันจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถี ถือได้ว่าเป็นยุทธโศปกรณ์หลักชนิดหนึ่งในการป้องกันประเทศ ด้วยคุณสมบัติของการเป็นอาวุธที่สามารถโจมตีในระยะไกลด้วยอำนาจการยิงที่สูง ความรวดเร็ว แม่นยำ และยากต่อการป้องกัน ทำให้ผู้ใช้สามารถดำเนินกลยุทธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดความสูญเสียต่อพื้นที่รอบบริเวณเป้าหมาย หน่วยงานวิจัยพัฒนาด้านยุทธโศปกรณ์ทั่วโลกจึงมีการให้ความสำคัญในการพัฒนาระบบดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง รวมถึงพยายามแสวงประโยชน์จากเทคโนโลยีแวก์ล่อมสองทาง เช่น ปัญญาประดิษฐ์ วัสดุศาสตร์ และการสื่อสารนำร่องขั้นสูง เพื่อเสริมศักยภาพของผลิตภัณฑ์ตัวเองให้มีความโดดเด่นและสามารถแข่งขันในตลาดได้ รายงานวิเคราะห์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาแนวโน้มและพฤติกรรมของหน่วยงานวิจัยพัฒนาต่าง ๆ ทั่วโลกที่เกี่ยวข้องกับระบบจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถี ถึงทิศทางความต้องการในตลาดยุทธโศปกรณ์ประเภทนี้ และวิเคราะห์ถึงปัจจัยสำคัญ 3 ประการ ที่จะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของอาวุธประเภทนี้ ในทศวรรษอันใกล้ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถสร้างความเชื่อมโยงกับยุทธโศปกรณ์หรือเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับยุทธโศปกรณ์เหล่านี้ได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ : การวิจัยและพัฒนา, เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ, จรวด, อาวุธปล่อยนำวิถี, เทคโนโลยีสองทาง

¹ ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมลล์: thanarat.t@dti.or.th

Rocket and Missile Technology Trend 2020-2030

Thanarat Thanasomboon ^{1*}

Received 15 June 2021, Revised 19 July 2021, Accepted 20 July 2021

Abstract

Nowadays rockets and missiles could be considered as main armaments for defence security. These weapons have a high level of firepower, accuracy, agile and difficult-to-defence, making their use gain a lot of advantage on the battlefield with cost-effective tactics that can reduce a huge amount of coalition damage near the target. So on, many research and development organizations and manufacturers put a lot of resources on development in this kind of weapon and place them on the market continuously. Furthermore, the surrounding technology or dual-use technology like artificial intelligence, advanced material and telecommunication are also benefiting from this kind of technology. This analysis report is to address the trend and behaviour of rocket and missile research and development organizations around the world and to focus on the incoming decade demand in the global market of missile technology. These three mains factors of the parameter can be used to evaluate the performance of rockets and missiles in the incoming era for readers.

Keywords : Research and Development, Defence technologies, Defence Industries, Rocket, Missile, Dual-Technology

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

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

บทนำ

เทคโนโลยีจรวดถือกำเนิดมาเป็นเวลายาวนาน ตั้งแต่สมัยศตวรรษที่ 13 พร้อมกับการพัฒนาดินปืนโดยชาวจีนโบราณและได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งจรวดและอาวุธนำวิถี (Rocket and missile) ยังคงถือเป็นหนึ่งในอาวุธหลักของกองทัพทั่วโลก แม้จะมีการพัฒนาอาวุธทางเลือกก้าวหน้าอื่น ๆ ควบคู่ไปด้วย อาทิ อาวุธพลังงาน (Direct energy) หรือกระสุนอัจฉริยะ (Smart ammunition) แต่ด้วยจรวดและอาวุธนำวิดียังจัดเป็นยุทธโศปกรณ์ที่มีการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ทั้งด้านขนาด ความแม่นยำ อำนาจการทำลาย และระยะยิงทำให้ถือเป็นยุทธโศปกรณ์ที่สามารถเลือกใช้ ในการโจมตีเป้าหมายได้มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะสงครามสมัยใหม่ที่ต้องการอาวุธที่มีคุณลักษณะ “ฉลาด” (Smart weapon) มากขึ้น เพื่อให้การโจมตีมีความแม่นยำ ลดความเสี่ยงในการถูกตอบโต้ และลดความเสียหายต่อพื้นที่ข้างเคียงโดยรอบทำให้เทคโนโลยีในส่วนระบบนำวิถี (Guidance system) มีความสำคัญมากขึ้น

ในช่วงอนาคตอันใกล้เทคโนโลยีจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีก็มีแนวโน้มที่จะพัฒนาไปอีกระดับ ตามการพัฒนาของเทคโนโลยีแวดล้อมอื่น เช่น อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ระบบขับเคลื่อนขั้นก้าวหน้า (Advance propulsion) คุณสมบัติลดการตรวจจับ (Stealth) และปัญญาประดิษฐ์ (AI) ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวสามารถพบได้ในยุทธโศปกรณ์ประเภทอื่นเช่นกันทำให้ในบางกรณีการจำแนกประเภทอาวุธระหว่างจรวดอาวุธนำวิถี อาวุธปล่อยนำวิถี และระบบนำส่งอาวุธอื่น ๆ นั้น อาจทำได้ยากขึ้นในอนาคตอันใกล้ [1]

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) เป็น

หน่วยงานวิจัยพัฒนาด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และมีภารกิจหน้าที่ตามกฎหมายในการศึกษาวิจัย เพื่อสนับสนุนความต้องการของเหล่าทัพและส่งเสริมอุตสาหกรรมป้องกันประเทศได้มีโครงการวิจัยพัฒนาจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีเพื่อความมั่นคงในหลายรูปแบบ เพื่อให้ประเทศไทยสามารถพึ่งพาตนเองได้ในอนาคต ซึ่งผู้เชี่ยวชาญความได้ใช้วิธีการศึกษาผ่านบทความวิเคราะห์ (Analysis document) และข่าวสารการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องโดยเน้นที่การลงทุนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการเสริมขีดความสามารถของจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีของทั้งภาครัฐและเอกชนในหลายประเทศ

ทั้งนี้ บทความนี้จะดำเนินการศึกษาถึงเทคโนโลยีสำคัญที่เป็นองค์ประกอบของจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถี รวมถึงแนวโน้มที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ เพื่อให้ผู้บริหารและส่วนงานที่เกี่ยวข้องพิจารณาเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจ ผ่าน 3 หัวข้อหลัก คือ (1) แนวทางการจำแนกจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถี (2) การวิจัยและพัฒนาจรวด และอาวุธปล่อยนำวิถี พื้น-สู่-พื้นที่สำคัญในต่างประเทศ และ (3) แนวโน้มของจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีในอนาคต ดังต่อไปนี้

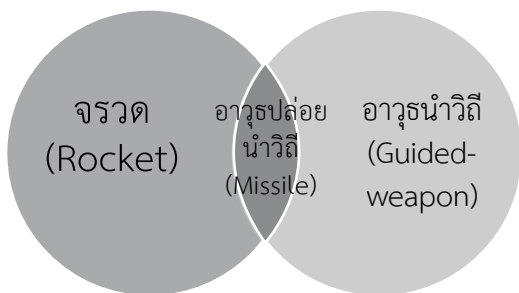
1. แนวทางการจำแนกจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถี

กลุ่มอาวุธประเภทจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีในปัจจุบันถือเป็นยุทธโศปกรณ์ที่มีการใช้งานหลากหลายที่สุดตั้งแต่กลุ่มอาวุธขนาดเบา เช่น เครื่องยิงจรวดต่อสู้อากาศยานที่ใช้กำลังพลเพียงคนเดียวในการปฏิบัติงาน จนถึงระบบยิงขีปนาวุธข้ามทวีประยะไกลที่ต้องมีระบบสนับสนุนเป็นจำนวนมากและอาวุธจรวดไม่นำวิถีที่ใช้องค์วิถีตรง/เฉียงจำลองจนถึงระบบนำวิถีที่สามารถโปรแกรมล่วงหน้า ตรวจจับ และตัดสินใจทำลายเป้าหมาย

ด้วยวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลให้การจำแนกประเภทเทคโนโลยีกลุ่มนี้มีอยู่หลายกระบวนการตามแนวปฏิบัติของผู้ใช้และผู้พัฒนา โดยผู้วิเคราะห์ได้แบ่งการจำแนกออกเป็นระดับพื้นฐาน และระดับคุณลักษณะขั้นพื้นฐานได้ดังนี้

- จรวด (Rocket)
- อาวุธนำวิถี (Guided weapon)
- อาวุธปล่อยนำวิถี (Missile)

โดยพื้นฐานแล้ว จรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีเป็นยุทธโศปกรณ์ที่มีเป้าหมายคล้ายกันคือ การนำส่งวัตถุหรืออุปกรณ์ (Payload) บางอย่าง ซึ่งอาจเป็นหัวรบ (Warhead) หรืออุปกรณ์ตามภารกิจเป้าหมายจากฐานยิง (Launcher platform) ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย (Target area) โดยมีระบบขับเคลื่อนภายในตัวเอง แต่อาจมีข้อแตกต่างกันในบางประเด็นคือ จรวด (Rocket) นั้นเจตนาสื่อถึงรูปแบบระบบการขับเคลื่อนเป็นสำคัญว่าต้องใช้เครื่องยนต์จรวด (Rocket engine) ซึ่งไม่กำหนดว่าต้องมีการควบคุมหลังจากรยิงใด ๆ ขณะที่อาวุธปล่อยนำวิถี (Missile) นั้น มุ่งเน้นที่รูปแบบระบบการนำร่อง และการปรับทิศทาง เพื่อบังคับให้จรวดเข้าสู่เป้าหมายโดยมีกระบวนการควบคุมระหว่างการเดินทาง (Trajectory flight control) เป็นหลัก ซึ่งในหลายกรณีระบบนำวิถี (Guidance system) อาจถูกนำไปติดตั้งกับอาวุธแบบอื่นที่อาจ



ไม่มีจรวดเกี่ยวข้องเลยก็เป็นไปได้ โดยสามารถเรียกเป็นภาพรวมว่า อาวุธนำวิถี (Guided weapon) เช่นระเบิดนำวิถี (Guided bomb) ตามแผนภาพความสัมพันธ์ตัวอย่างที่ผู้เขียนออกแบบ

ทั้งนี้ในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้ เทคโนโลยีจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีมีการพัฒนาที่หลากหลายขึ้นตามภารกิจและวัตถุประสงค์เฉพาะทางหลายประการ ทำให้การจำแนกชนิด/ประเภทของยุทธโศปกรณ์จำเป็นต้องมีการขยายรูปแบบเพื่อให้ครอบคลุมถึงผลิตภัณฑ์ในตลาดยุทธโศปกรณ์เพื่อความมั่นคงมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น ระบบฐานยิง ระบบขับเคลื่อน และการควบคุมที่หลากหลาย ซึ่งสามารถเลือกมาติดตั้งให้กับยุทธโศปกรณ์ตามความเหมาะสม [2]

อาวุธจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีถือเป็นยุทธโศปกรณ์สำคัญในการใช้โจมตีเป้าหมายหลายประเภทแต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันที่มีความก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้เริ่มมีการบูรณาการเทคโนโลยีไปสู่อาวุธประเภทอื่นให้ทวีขีดความสามารถ/ประสิทธิภาพ/ราคาที่ดีขึ้น และสามารถปฏิบัติการได้เหมาะสมเพื่อเป็นทางเลือกเพิ่มเติมให้กองกำลังต่าง ๆ พิจารณาได้เช่นกัน อาทิ ระเบิดนำวิถี (Guided bomb) หรือชุดดัดแปลงระเบิดนำวิถี (Guidance bomb kit) ที่ช่วยให้อากาศยานสามารถใช้ระเบิดธรรมดาสามารถโจมตีเป้าหมายด้วยความแม่นยำสูงรวมถึงอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่มีคุณสมบัติในการใช้เป็นอาวุธพลีชีพ (Suicide drone/loitering bomb) ที่สามารถบินรอเหนือพื้นที่เป้าหมายเป็นเวลานานก่อนตัดสินใจเดินทางกลับหรือโจมตีโดยทำลายตนเองไปพร้อมกับเป้าหมายที่มีความคุ้มค่า ซึ่งต่างจากจรวด/อาวุธปล่อยนำวิถีทั่วไปที่เป็นคุณลักษณะใช้แล้วทิ้ง (One-time used) เป็นหลัก โดยบทวิเคราะห์ฉบับนี้

ขอยกตัวอย่างเทคโนโลยีสำคัญเฉพาะของจรวด/อาวุธปล่อยนำวิถี ที่เป็นผลิตภัณฑ์เด่นในอนาคตอันใกล้ ซึ่งจำแนกประเภทได้ดังต่อไปนี้

- จรวด (Rocket) หมายถึงอาวุธที่มีคุณลักษณะอาศัยแรงขับเคลื่อนของเครื่องยนต์จรวด (Rocket engine) และเชื้อเพลิงจรวด (Rocket propellant) เพื่อโคจรเข้าสู่เป้าหมายโดยไม่จำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับกระบวนการนำวิถี (Guidance) หรือหัวรบที่บรรจุ (Warhead) เช่น เครื่องยิงจรวดต่อสู้อากาศยานนำวิถี RPG-7
- ชุดนำวิถี (Guidance kit) หมายถึง ชุดอุปกรณ์ติดตั้งเพิ่มเติมสำหรับควบคุมและสื่อสารกับอาวุธที่ติดตั้งอยู่เพื่อปรับวิถีโคจรเข้าหาเป้าหมายระหว่างการเดินทาง เช่น Lizard-kit ที่เป็นชุดเสริมปีกร่อนนำวิถีสำหรับลูกกระเบิดอากาศยานพื้นฐาน
- อาวุธปล่อยนำวิถี (Missile) หมายถึง อาวุธที่มีระบบขับเคลื่อนภายใน (Propulsion) อันประกอบด้วยเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ หัวรบ และระบบนำวิถีซึ่งสามารถโคจรเข้าหาเป้าหมายได้ด้วยตนเองและปรับแต่งวิถีโคจรให้เข้าสู่เป้าหมายระหว่างเดินทางได้ เช่น อาวุธปล่อยนำวิถีต่อสู้อากาศยาน Iglas
- อาวุธร่อนความเร็วสูง (HGV: Hypersonic glide vehicle) หมายถึง อาวุธใด ๆ ก็ตามที่มีคุณลักษณะการโคจรด้วยความเร็วสูงยิ่งยวดในระดับเกิน 5 เท่าของความเร็วเสียง (5 Mach) ขึ้นไป พร้อมทั้งขีดความสามารถในการนำวิถีตนเองเข้าสู่เป้าหมายได้ เช่น ขีปนาวุธโจมตีภาคพื้นดินความเร็วสูงมากแบบ Zircon

2. การวิจัยและพัฒนาจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีพื้น-สู่-พื้นที่สำคัญในต่างประเทศ

จรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีถือเป็นยุทธโศภนกรรมสำคัญที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในทุกภูมิภาคของโลก ในฐานะอาวุธสำคัญในคลังแสงที่มีอายุการใช้งานจำกัด แต่จำเป็นต้องใช้ในการปฏิบัติการกิจทั้งในระดับยุทธวิธีและส่งผลกระทบต่อจิตใจระดับยุทธศาสตร์ของแต่ละชาติ ซึ่งหัวข้อนี้จะเลือกวิเคราะห์และพิจารณาถึงความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีประเภท พื้น-สู่-พื้น (Surface-to-surface) ใน 7 ประเทศสำคัญ โดยเฉพาะจรวดนำวิถี (Guidance rocket) ที่ถือเป็นรูปแบบส่วนหนึ่งของอาวุธปล่อยนำวิถี ซึ่งการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีในประเทศไทยนั้น เริ่มต้นจากระบบการยิงภาคพื้นดินประเภทนี้เป็นอย่างมาก จึงได้ดำเนินการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากต่างประเทศเพื่อให้หน่วยงานในประเทศไทยสามารถใช้ประเมินขีดความสามารถและแนวคิดในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

- GMLRS-ER (US) คือ ระบบ Guidance Multi-Launcher Rocket System Extended-Ranged เป็นเครื่องยิงจรวดที่ออกแบบมาเพื่อทดแทนชุดยิง M26 โดยมีคุณสมบัติรองรับลูกจรวดระยะยิงไกลและการนำวิถีหลายรูปแบบพร้อมกันแต่ยังสามารถเลือกใช้หัวรบกับจรวดมาตรฐานเดิมได้ซึ่งสามารถขยายระยะยิงได้ถึง 150 กม. [2]
- LORA (Israel) เป็นระบบ Long - Range Artillery Guided Missile ที่อิสราเอลพัฒนาให้มีคุณสมบัติเป็นอาวุธปล่อยนำวิถีที่ใช้ได้กับฐานยิงทั้งบนบกและในทะเลในราคาประหยัดและมีคุณสมบัติการบินเดินทาง



รูปที่ 1 ส่วนประกอบหัวรบ GMLRS ที่มา: Lockheed Martin

แบบ Shaped Trajectory เพื่อเพิ่มระยะยิงโดยไม่ต้องใช้เพดานบินสูงและเลือกใช้จรวดที่มีระยะยิงได้ถึง 300 กม. [2]



รูปที่ 2 ตัวอย่างลูกจรวด LORA ที่มา IHS' Janes

- **A-Series (China)** ชุดยิงจรวดหลายลำกล้องนำวิถีตั้งแต่รุ่น A100 ขึ้นไป โดยออกแบบให้เป็นอาวุธปล่อยนำวิถีราคาประหยัดมากที่สุดให้ได้กับฐานยิงหลายขนานรวมถึงฐานยิงจรวดไม่นำวิถีและใช้ระบบนำร่อง Beidou ของประเทศจีนเป็นหลักโดยรองรับจรวดได้ถึงระยะยิง 290 กม. [2]



รูปที่ 3 ตัวอย่างจรวด A200 ที่มา: ALIT

- **Tornado-S/G (Russia)** จรวดนำวิถีที่ถูกพัฒนาเพื่อทดแทนจรวดหลายลำกล้องไม่นำวิถีแบบ Smerch ของรัสเซีย โดยใช้ได้ทั้งฐานยิงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ พร้อมทั้งพัฒนาให้มีการนำร่องด้วยโครงข่ายดาวเทียม Glosnass ของตนเองและเพิ่มระยะยิงจาก 70 เป็น 90 กม. ด้วยราคาที่ย่อมเยาและใช้ชิ้นส่วนร่วมกันได้ [2]



รูปที่ 4 ตัวอย่างจรวด Tornado-S ที่มา: Splav

- **Pinaka (India)** อาวุธปล่อยนำวิถีที่ใช้ลูกจรวดที่ออกแบบเป็นการเฉพาะขนาด 214 มม. ซึ่งต่างจากจรวดหลายลำกล้องในตลาดยุโรปทั้งหมดไป ตามความต้องการของผู้ใช้ที่ต้องการจรวดที่มีอำนาจการยิงและระยะยิงมากกว่าจรวดมาตรฐาน 122 มม. (ระยะยิง 40 กม.) แต่ค้ำจรวดตัวกว่าจรวดขนาดหนัก ที่มีขนาด 270 มม. ขึ้นไปโดยมีระยะยิงที่ 75 กม. [2]



รูปที่ 5 ตัวอย่างจรวด Pinaka ที่มา: DRDO

- **R-Han (Indonesia)** โครงการวิจัยอาวุธปล่อยนำวิถีประเภทจรวดหลายลำกล้องเบา และจรวดขนาดใหญ่ของกองทัพอินโดนีเซีย ในขนาด 122 มม. ที่เริ่มเข้าประจำการแล้ว และขนาด 450 มม. ที่อยู่ระหว่างการพัฒนา โดยใช้การนำร่องด้วยระบบ GPS ซึ่งมีระยะยิงสูงสุด 150 กม. และใช้ฐานยิงร่วมกับจรวดแบบ BM-21 ดังเดิมได้ [2]



รูปที่ 6 ชุดยิงจรวด R-Han ที่มา: KEMENTRIAN PERTAHANAN

- **Chun-Mu (South Korea)** โครงการพัฒนาอาวุธปล่อยนำวิถีประเภทจรวดหลายลำกล้องนำร่องด้วยระบบ GPS/INS ของเกาหลีใต้ที่ใช้ลูกจรวดหลายขนาดตั้งแต่ 130/227/239 มม. เนื่องจากมีการใช้คลังอาวุธร่วมกับมิตรประเทศรวมถึงรองรับการพัฒนาสู่การเป็นขีปนาวุธแบบพื้น-สู่-พื้น ระยะสั้น (SRBS) ที่มีระยะยิง 500 - 1,000 กม. (Hyunmoo-2B) ในอนาคต ซึ่งได้รับอนุญาตให้พัฒนาได้ในปี ค.ศ. 2021 [2]

จากหัวข้อข้างต้น สามารถพิจารณาได้ว่า การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีของแต่ละประเทศมีแนวโน้มที่คล้ายกันด้านหนึ่ง คือ เป็นการพัฒนายุทโธปกรณ์เพื่อตอบสนองความต้องการเฉพาะเหล่าทัพและหลักนิยมที่แต่ละประเทศใช้ อาทิ



รูปที่ 7 ตัวอย่างจรวด Hyunmoo ที่มา: Hanwha

การออกแบบที่เน้นด้านราคา ความคุ้มค่า ระยะยิงที่เหมาะสม ความเข้มแข็งทางระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือความอ่อนตัวในการปฏิบัติกร่วมกับฐานยิงและจรวดหลายชนิด ซึ่งเห็นได้ชัดว่า เทคโนโลยีจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีนั้นมีมาตรฐานที่ค่อนข้างอิสระต่างจากอาวุธยิงแบบอื่น เช่น ปืนใหญ่ ระเบิด ที่มีมาตรฐานกลางเป็นที่นิยมกัน เช่น ความกว้างปากลำกล้อง กับระบบควบคุมการยิง [3]

การออกแบบและพัฒนาจรวดและอาวุธนำวิถี นั้นแต่ละประเทศจะเลือกออกแบบให้เหมาะสมกับความต้องการและโครงสร้างพื้นฐานที่ตนเองมีมากที่สุด เช่น การออกแบบขนาดของลำกล้องจรวดนั้นไม่จำเป็นต้องยึดโยงกับผู้ผลิตเจ้าเดิมเพราะแม้จะมีขนาดเท่ากัน เช่น จรวดนำวิถี 122 มม. แต่กระบวนการควบคุมการยิงและแท่นยิงจรวดก็ไม่สามารถแลกเปลี่ยนตัวลูกจรวดได้อิสระอยู่ดีเพราะขึ้นกับระบบอิเล็กทรอนิกส์และฐานยิงที่สนับสนุนด้วย ดังนั้นผู้พัฒนาจึงมักเลือกขนาดที่ตัวเองใช้งานสะดวกที่สุด เช่น 214/239 มม. และเลือกจะจัดซื้อเทคโนโลยีส่วนที่ขาดจากผู้จำหน่ายภายนอกมาชดเชยแทนได้ตามความต้องการในภายหลัง โดยมีตัวอย่างกรณีศึกษาสำคัญหนึ่งของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศคือ การผลิตจรวดไม่นำวิถี

ขนาด 122 มม. ภายในประเทศให้สามารถใช้กับฐานยิงที่จัดซื้อจากต่างประเทศ ก็จำเป็นต้องมีการรับรองและทดสอบจำนวนมากกว่าจะสามารถทำการยิงได้อย่างแม่นยำปลอดภัย แม้ว่าตัวลูกจรวดจะมีขนาดทางกายภาพและคุณสมบัติการยิงเท่ากันตั้งแต่แรกก็ตาม

3. แนวโน้มของจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีในอนาคต

ปัจจุบันเทคโนโลยีอาวุธนำวิถีขั้นก้าวหน้าเริ่มกลายเป็นยุทธูปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนากำลังรบยุคใหม่เพื่อปฏิบัติการรบอย่างกว้างขวางโดยกองกำลังทั่วโลกไปแล้ว จากเดิมที่เป็นเพียงอาวุธเฉพาะทางหรืออาวุธอัจฉริยะที่ใช้เฉพาะภารกิจโจมตีเป้าหมายคุณค่าสูงโดยชาติมหาอำนาจเท่านั้น ซึ่งทำให้หน่วยงานความมั่นคงจำเป็นต้องพิจารณาวิธีการนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้รวมถึงพัฒนามาตรการหรือวิธีการรับมือตอบโต้ภัยคุกคามเทคโนโลยีสูงเหล่านี้ด้วย

สหรัฐอเมริกาและชาติพันธมิตรริเริ่มการใช้อาวุธความแม่นยำสูง (Precision guided-weapon) หรืออาวุธอัจฉริยะ (Smart weapon) อย่างจริงจังในสงครามตั้งแต่ ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา ซึ่งในช่วงปี ค.ศ. 2020 นี้จำนวนผู้ใช้อาวุธเหล่านี้ได้เพิ่มขึ้นอย่างมากทั้งในกลุ่มชาติมหาอำนาจ เช่น รัสเซีย จีน สหภาพยุโรป รวมไปถึงชาติขนาดเล็ก เช่น อิหร่าน และเกาหลีเหนือ แม้กระทั่งกลุ่มติดอาวุธที่ไม่มีสถานะรัฐชัดเจนอย่างกลุ่มเฮซบอลเลาะห์ หรือฮูตี ก็สามารถพัฒนาเทคโนโลยีจรวดและอาวุธนำวิถีของตนเองจนสามารถใช้ปฏิบัติการรบได้จริงได้โดยอาศัยความช่วยเหลือที่ไม่เป็นทางการจากภายนอก อาทิ กรณีการโจมตีสถานที่ผลิตน้ำมันของซาอุดีอาระเบียโดยหน่วยซีปนาจรวดร้อนและโดรนของกลุ่มกบฏฮูตี ในตะวันออกกลาง

ด้วยสถานะของเทคโนโลยีพื้นฐาน เช่น วัสดุศาสตร์ เชื้อเพลิงก้าวหน้า ชุดเครื่องยนต์ ระบบสื่อสาร เทคโนโลยีดิจิทัลและสารสนเทศ ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอิสระและซื้อขายเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ประเทศขนาดเล็กที่มีโครงสร้างอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในระดับหนึ่งก็สามารถยกระดับเทคโนโลยีเหล่านี้ให้สนับสนุนการพัฒนายุทธูปกรณ์ประเภทจรวดและอาวุธนำวิถีได้โดยไม่ต้องลงทุนศึกษาวิจัยมากและสามารถจัดหาเทคโนโลยีส่วนที่ขาดจากตลาดอุตสาหกรรมป้องกันประเทศบนโลกเสรีได้โดยทั่วไป ซึ่งไม่จำกัดว่าจะต้องเป็นค่ายตะวันตกหรือตะวันออก เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีในตุรกี อินโดนีเซีย อิหร่าน หรืออินเดีย ซึ่งบทความนี้จะมุ่งเน้นไปยัง 3 หัวข้อสำคัญคือ ความแม่นยำ ระยะยิง และความเร็ว [4] ที่มีแนวโน้มการพัฒนาอย่างชัดเจนภายในปี ค.ศ. 2030 นี้

ความแม่นยำ (Accuracy)

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีด้านความแม่นยำที่สนับสนุนระบบจรวดและอาวุธนำวิถีอยู่หลายประเภทโดยหลักการที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพคุ้มค่า (Cost-effective) มากที่สุดแบบหนึ่ง คือ การนำวิถีด้วยสัญญาณพิกัดผ่านดาวเทียม (GNSS: Global navigation satellite system) อาทิ ระบบ GPS (US) GLONASS (Russia) Galileo (EU) และ Beidou (China) ที่มีเครือข่ายให้บริการพิกัดได้ทั่วโลก ซึ่งอาวุธนำวิถีสามารถติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณภายในตัวจรวดและเทียบค่าพิกัดตนเองกับเป้าหมายผ่านเครือข่ายดาวเทียมได้อย่างรวดเร็วและนำพิกัดส่วนที่แตกต่างมาปรับวิถีการบินให้มุ่งเข้าสู่เป้าหมายได้ตลอดเวลา ซึ่งมีต้นทุนที่ประหยัดมากเพราะใช้เซนเซอร์เพียงระบบเดียวแต่ผู้ใช้จำเป็นต้องมีเครือข่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่นั้นและเข้าถึงก่อนได้ตลอดเวลา เช่น

ชิปนำร่องระยะไกลแบบโทมาฮอว์ค (US) ซึ่งเดิมมีระบบนำวิถีที่แม่นยำหลายแบบ เช่น เรดาร์ภาคพื้นระบบภาพถ่ายแผนที่นำทาง ระบบอินฟราเรดแต่ก็ส่งผลให้มีต้นทุนสูงมากในการผลิตเพราะทุกครั้งที่ทำภารกิจเท่ากับต้องเสียชุดเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูงไปทั้งหมดจนกระทั่งปลดประจำการไปเกือบทั้งหมดเหลือเฉพาะรุ่นที่นำร่องด้วยระบบ GPS เพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ดี ปัจจุบันมีภัยคุกคามแบบใหม่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะการพัฒนาขีดความสามารถต่อต้านเครือข่ายอิเล็กทรอนิกส์ของกลุ่มประเทศที่นำโดยรัสเซียและจีนที่สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการนำร่องอาวุธปล่อยนำวิถีโดยอาศัยเครือข่ายดาวเทียม เช่น สภาวะสงครามอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสัญญาณรบกวนรุนแรง (Enhanced Jammer) หรือการโจมตีทางไซเบอร์ที่อาจบิดเบือนข้อมูลพิกัดดิจิทัลจากดาวเทียมโดยผู้ใช้ไม่รู้ตัว อาทิ เทคนิคลวง GPS (GPS Spoofing) ที่เคยหลอกพิกัดเครือข่ายดาวเทียมของสหรัฐฯ เพื่อให้โดรน RQ-170 หลงทางจนลงผิวน้ำและถูกยึดได้ ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นในตัวอาวุธนำวิถีที่อาจจะไม่สามารถรักษาคุณสมบัติความแม่นยำของตัวเองไว้ได้ในพื้นที่ปฏิบัติการที่ถูกฝ่ายตรงข้ามปฏิเสธการเข้าถึงสัญญาณนำร่องด้วยดาวเทียม (GPS-denied Environment) อีกด้วย

ดังนั้นในอนาคตอันใกล้ (ค.ศ. 2030) คุณสมบัติสำคัญประการหนึ่งของจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีที่จำเป็นต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมคือ เทคโนโลยีด้านความแม่นยำที่สามารถตอบสนองได้ทุกสภาวะการณ์ อาทิ การพัฒนาระบบนำร่องด้วยดาวเทียมที่มีความอ่อนตัวสูง (เลือกใช้ได้หลายระบบ) รวมถึงหนทางต่อการโจมตีทางอิเล็กทรอนิกส์ (รองรับความถี่สัญญาณมากกว่าปกติ) ขณะเดียวกันก็จะมีพัฒนาระบบนำร่องแบบผสม (Hybrid Navigation) เช่น ระบบการนำร่อง

ด้วยแรงเฉื่อย (INS) การนำร่องด้วยเลเซอร์ชี้เป้าจากภายนอก (Laser Designator) รวมถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการตัดสินใจเลือกเป้าหมายภายหลังการยิง (Lock-on After Launch) ให้กับอาวุธปล่อยของฝ่ายตนเองด้วยโดยเทคโนโลยีขั้นกลุ่มสำคัญนี้คือ Hybrid Sensor และชุดค้นหาเป้าหมายระดับสูง (Enhanced Seeker) ที่มีขนาดเล็กความละเอียดสูง และประหยัดพลังงานกว่าปกติ

ระยะยิง (Range)

คุณสมบัติหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาเชิงคุณภาพและมีความต้องการในการแข่งขันอย่างมากของยุทโธปกรณ์ในปัจจุบันคือ ระยะยิงหวังผล (Effective Range) ที่เป็นปัจจัยสำคัญมากในการวางแผนตั้งแต่ระดับยุทธวิธีจนถึงระดับยุทธศาสตร์ที่หากยังมีระยะยิงมากยังเป็นประโยชน์ ในการที่สามารถวางหน่วยยิงอาวุธของฝ่ายตนไว้นอกระยะที่ฝ่ายตรงข้ามจะทำการตอบโต้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การยิงตอบโต้กันระหว่างปืนใหญ่และชุดยิงจรวดหลายลำกล้อง (MLRS) ต่าง ๆ ซึ่งหน่วยยิงที่มีระยะยิงหวังผลไกลกว่าสามารถเลือกตั้งฐานปฏิบัติการยิงโจมตีล่วงหน้าได้ในขณะที่ฝ่ายที่ระยะยิงจำกัดจะต้องคอยปรับกลยุทธ์ด้านสถานที่ตลอดเวลาและมีความเสี่ยงในการขนส่งชุดยิงของฝ่ายตนเล็ดลอดเข้ามาในระยะยิงฝ่ายตรงข้ามทุกครั้งก่อนเริ่มการยิงตอบโต้ทำให้เสียเปรียบอย่างมากในการเลือกยุทธบริเวณสำคัญในพื้นที่การรบตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนเรื่องความได้เปรียบจากคุณสมบัติด้านระยะยิงล่าสุด เช่น กรณีศึกษาการรบระหว่างอาเซอร์ไบจานกับอาร์เมเนีย ในปี ค.ศ. 2020 ที่ในอดีตทั้งสองฝ่ายมียุทโธปกรณ์ประเภทปืนใหญ่และจรวดหลายลำกล้องเหมือนกันในปริมาณใกล้เคียงกันและสถานการณ์ความขัดแย้งอยู่ในสภาวะก้ำกึ่งมาเป็นเวลานานจนกระทั่งอาเซอร์ไบจานมีการจัดหา

UAV ดิจิตอล และซีปนาวุธพื้น-สู่-พื้น ที่มีระยะหวังผลไกลกว่าเดิมจากอิสราเอลและตุรกีมาเพิ่มเติมก่อนเริ่มการรบทำให้ฝ่ายอาร์เมเนียได้รับความสูญเสียอย่างหนักเนื่องจากเป็นฝ่ายถูกโจมตีก่อนจากระยะที่ไกลกว่าทำให้ต้องเป็นฝ่ายพยายามเคลื่อนกำลังสำคัญ เช่น ยานเกราะ หมูปืนใหญ่ เข้าประชิดเพื่อโจมตีตอบโต้ อันส่งผลกระทบให้ยากต่อการซ่อนพรางและเปิดเผย ตำแหน่งยุทธโศปกรณ์สำคัญให้ฝ่ายตรงข้ามโจมตีได้ตลอดเวลาระหว่างการปะทะ

กรณีศึกษาแบบที่ 2 เรื่องการใช้ประโยชน์ด้านระยะยิงคือ การใช้อาวุธปล่อยนำวิถีร่อนนำวิถีโจมตีเป้าหมายระยะไกลของสหรัฐอเมริกาและชาติตะวันตก โดยเฉพาะอาวุธประเภทซีปนาวุธร่อน Tomahawk (US) JASSM (US) StormShadow (UK) และ MDcN (France) ซึ่งมีระยะยิงตั้งแต่ 500 ถึง 2,500 กม. จากฐานยิงหลายแบบทั้งเรือรบ อากาศยาน และเรือดำน้ำ ซึ่งถือได้ว่าไกลมากเกินกว่าที่หน่วยต่อสู้อากาศยานภาคพื้นดินที่คุ้มครองเป้าหมายอยู่จะสามารถยิงตอบโต้ฐานยิงซีปนาวุธเหล่านี้ได้ อย่างเช่น ระบบต่อสู้อากาศยานภาคพื้นดินที่มีประสิทธิภาพสูงและมีระยะยิงไกลที่สุดในปัจจุบันคือ ระบบ S-400 ของรัสเซีย ซึ่งยังมีข้อจำกัดในการยิงสกัดกั้นเพียงแค่ระยะ 400 กม. เท่านั้น ทำให้สามารถรับรองความปลอดภัยของหน่วยปล่อยอาวุธ (Launching Platform) ต่าง ๆ ได้เต็มที่และไม่มี การสูญเสียยานพาหนะและนักบินจากการปะทะกับฝ่ายตรงข้ามอย่างแน่นอน ทำให้ผู้บังคับบัญชาสามารถควบคุมต้นทุนการรบ และ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นได้อย่างเป็นระบบและสามารถโจมตีได้จนกว่าฝ่ายตรงข้ามในตำบลเป้าหมายจะสิ้นสมรรถภาพในการต่อต้านก่อนที่จะตัดสินใจส่งกำลังรบที่มีคุณค่าสูงประเภทอื่น เช่น อากาศยานหรือกำลังพล เข้าไปในพื้นที่

ความเร็ว (Speed)

คุณสมบัติด้านความเร็ว (Speed) ถือเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญสำหรับการออกแบบระบบจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีในปัจจุบันเนื่องจากเป็นคุณลักษณะที่ส่งผลโดยตรงในการประเมินระยะเวลาในการเข้าถึงเป้าหมาย (Time-to-Target) และส่งผลต่อขีดความสามารถในตอบโต้สกัดกั้นของฝ่ายตรงข้ามอีกด้วย เช่น อาวุธปล่อยนำวิถีต่อต้านเรือรบความเร็วต่ำกว่าเสียง (Sub-sonic Missile) อาจใช้เวลาถึง 10 นาทีในการเข้าถึงเป้าหมายที่ระยะยิงไกลสุด ซึ่งในกรณีที่ตีที่เร็วที่สุด หน่วยป้องกันภัยทางอากาศของฝ่ายตรงข้ามมีโอกาสยิงอาวุธนำวิถีสกัดกั้นได้ถึง 5 ครั้ง แต่อาวุธกลุ่มความเร็วเหนือเสียง (Super-Sonic/Hypersonic Missile) นั้น อาวุธปล่อยนำวิถีจะใช้เวลาเพียง 2 ถึง 3 นาทีเท่านั้นในการเข้าถึงเป้าหมายทำให้ยากต่อกระบวนการตั้งรับตอบโต้ให้ทันเวลาอย่างมากเพราะเมื่อปรากฏเป้าหมายบนเรดาร์ตรวจการณ์ ศูนย์ยุทธการของฝ่ายตั้งรับก็มีขั้นตอนที่จำเป็นมากมายในการตอบสนอง ได้แก่ (1) ยืนยันเป้าหมาย (2) พิสูจน์ทราบ (3) กำหนดทิศทางภัยคุกคาม (4) คัดเลือกอาวุธ/หน่วยยิงในการตอบโต้ (5) ป้อนข้อมูลเป้าให้กับระบบต่อต้านของฝ่ายตน (6) สั่งการยิงตอบโต้ (7) อาวุธโคจรเข้าสกัดกั้นเป้าหมาย (8) ยืนยันเป้าหมายถูกทำลาย ซึ่งหากเป้าหมายยังคงอยู่ก็จำเป็นต้องเริ่มกระบวนการยิงตอบโต้ชุดถัดไปอีกด้วย

นอกจากนี้ความเร็วยังเป็นคุณสมบัติที่มีประโยชน์เชิงคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์กับตัวอาวุธโดยตรง ซึ่งอาวุธที่ทำความเร็วได้สูงจะสามารถสร้างพลังงานจลน์สะสมได้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีอำนาจการทำลายสูงชันมากเมื่อเข้าปะทะกับโครงสร้างหลักของเป้าหมาย ยิ่งกว่าการอาศัยหัวรบเพียงอย่างเดียว เช่น อาวุธนำวิถีความเร็วสูงมากที่ทำความเร็วได้เกิน 5 เท่าของความเร็วเสียง (5 มัค) จะถือเป็นกลุ่ม Hypersonic Missile

เช่น Zircon (Russia) Brahmos (India) และ DF-21 (China) ซึ่งใช้ระบบขับเคลื่อนที่ทำความเร็วสูงต่อเนื่องได้ เช่น ระบบ Ramjet สำหรับอาวุธร่อนลัดเลาะภูมิประเทศ ความเร็วสูงหรือระบบขับเคลื่อนเชื้อเพลิงแข็งสำหรับ จรวดลักษณะเดียวกับขีปนาวุธระยะกลางที่ยิงขึ้น วงโคจรระดับล่างก่อนทิ้งตัวโจมตีจากเขตแดนบินสูงมาก

อย่างไรก็ดี ชีตความสามารถด้านความเร็ว ที่สูงมากขึ้นของจรวดและอาวุธนำวิถีรุ่นใหม่ ๆ ส่งผลกระทบต่อในด้านอื่นด้วยเช่นกัน เนื่องจากการเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วสูงของอาวุธปล่อยนำวิถี ย่อมส่งผลกระทบต่อ คุณลักษณะการซ่อนพรางของอาวุธ เช่น ความร้อน จากการเสียดสีของชั้นบรรยากาศที่ความเร็วสูง จะทำให้เกิดรังสีความร้อนขนาดใหญ่บนระบบ ตรวจการณ์ของฝ่ายตรงข้ามทำให้ยากต่อการ ดำเนินการโจมตีโดยที่ฝ่ายตรงข้ามจะไม่รู้ตัว อีกทั้ง คุณสมบัติด้านความแม่นยำในการนำร่องทิศทาง (Guidance System) เข้าสู่เป้าหมายจะถูกลดความ เที่ยงตรงลงโดยอัตโนมัติ เนื่องจากความเร็วในการ เคลื่อนที่สูงจะทำให้วงจรสื่อสารบนตัวจรวด (Rocket Telemetry) มีจำนวนครั้งในการสื่อสารและการปรับ วิถีโคจรลดลงอย่างมาก

นอกจากนี้ คุณสมบัติด้านความรวดเร็วของ ยุทธโศปกรณ์มักจะขึ้นกับแนวทางการออกแบบส่วน สำคัญได้แก่ ระบบขับเคลื่อน โครงสร้างตัวจรวด และ กระบวนการควบคุมการแพร่สัญญาณจากตัวระบบ อาวุธไปด้วยพร้อมกัน โดยเทคโนโลยีสำคัญ 2 อย่าง ที่จะมีการแข่งขันกันอย่างมากในช่วง ค.ศ. 2030 คือ (1) ระบบเครื่องยนต์ขับเคลื่อนก้าวหน้าความเร็วสูงมาก เช่น ระบบแรมเจ็ต (Ramjet) และสแกรม์เจ็ต (Scramjet) และ (2) เทคโนโลยีโครงสร้างจรวด (Rocket Airframe) เช่น วัสดุศาสตร์ที่มีน้ำหนักเบาและทนทานต่ออุณหภูมิ

สูงจัดได้ เช่น ไทเทเนียมผสม รวมถึงคุณสมบัติ ที่ลดการแพร่คลื่นสัญญาณต่าง ๆ เช่น สารดูดกลืน สัญญาณเรดาร์ ตัวอย่างอาวุธ เช่น ขีปนาวุธร่อนทาง ยุทธศาสตร์ Avanguard ของรัสเซีย ที่เป็นขีปนาวุธ ทางยุทธศาสตร์ยิงขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศระดับสูงมาก ก่อนจะปล่อยร่อนลงโดยอิสระด้วยความเร็วสูงถึง ระดับ 20 เท่าของความเร็วเสียงแบบเปลี่ยนทิศทาง เพื่อลัดเลาะแนวป้องกันทางอากาศของฝ่ายตรงข้าม

4. บทสรุป

ในสถานะปัจจุบัน สถานะภัยคุกคามในระดับโลก และภูมิภาคยังมีเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยจรวดและ อาวุธปล่อยนำวิถียังคงถือเป็นยุทธโศปกรณ์สำคัญที่ มีบทบาทสูงในการรบทั้งในแบบและนอกแบบ ด้วยคุณลักษณะการโจมตีที่มีอำนาจหยุดยั้งสูง รวมถึงความแม่นยำที่สามารถช่วยให้ลดปริมาณ การใช้อาวุธ รวมถึงลดทอนความเสียหายต่อพื้นที่ ข้างเคียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงถือเป็นอาวุธที่มี คุณค่าทางยุทธการสูงจนหลายประเทศต้องมีการ ลงทุนศึกษาวิจัย และส่งเสริมให้เกิดอุตสาหกรรม เกี่ยวเนื่องภายในแต่ละประเทศ เพื่อให้พึ่งพาตนเอง ได้ในระยะยาว โดยใช้งบประมาณระดับที่ยอมรับได้ แทนการจัดซื้อปริมาณมากจากต่างประเทศ

ยุทธโศปกรณ์ประเภทจรวดและอาวุธปล่อยนำวิถี ถือเป็นผลิตภัณฑ์ในการรบที่ใช้แล้วหมดไป (Non-Resueable) และมีช่วงระยะเวลาพร้อมรบ (Shelf Life) ที่จำกัดในช่วง 10 - 15 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า จะต้องมีการพัฒนาปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในแต่ละ ยุคสมัยเพื่อให้สามารถแข่งขันกับตลาดโลกที่มีการ พัฒนาอาวุธตอบโต้ (Countermeasure) ประเภทต่าง ๆ เช่น อาวุธพลังงาน เป้าลวง หรืออาวุธสกัดกั้นอื่นใด ดังนั้นก่อนที่จรวดและอาวุธปล่อยนำวิถีในปัจจุบัน

จะหมดอายุการใช้งาน ผู้พัฒนาจึงมักวางแผนในการพัฒนาอาวุธรุ่นต่อไปในวงรอบ 10 ปีเป็นอย่างน้อย ซึ่งจะสอดคล้องกับช่วงระยะเวลาของบทวิเคราะห์นี้ ที่มุ่งเน้นการประเมินศักยภาพในอนาคตอันใกล้ของ เทคโนโลยีป้องกันประเทศกลุ่มดังกล่าว

ทั้งนี้ ประเทศไทยถือเป็นหนึ่งในประเทศที่มีอุตสาหกรรมอาวุธในระดับพื้นฐาน และยังคงพึ่งพาการนำเข้าทุโธปกรณ์ประเภทต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก จึงควรพิจารณาถึงเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอาวุธจรวดไม่นำวิถี (Unguided Rocket) เป็นจุดเริ่มต้นก่อน เพื่อสร้างองค์ความรู้ในเชิงสถาปัตยกรรมของจรวดอันได้แก่ โครงสร้าง ระบบขับเคลื่อน และระบบควบคุมการยิงมาตรฐานให้สมบูรณ์ ซึ่งจะทำการศึกษาวิจัยด้านจรวดและอาวุธนำวิถีภายในประเทศสามารถออกแบบทุโธปกรณ์ที่สอดคล้องกับแนวโน้มสำคัญในตลาดโลก 2 ส่วนคือ ระยะยิง (Range) และ ความเร็ว (Speed) ก่อนที่จะเริ่มพัฒนาส่วนประกอบทางเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับความแม่นยำ (Accuracy) ที่ใช้ต้นทุนการวิจัยและพัฒนาสูงเช่นกัน แต่ยังสามารถจัดหาจากภายนอกได้ซึ่งเมื่อเกิดการพัฒนาระบบจรวดการผลิตจะทำให้สายส่งกำลังบำรุงของจรวดและอาวุธนำวิถีจะสามารถทำได้ในประเทศเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดงบประมาณและเสริมศักยภาพด้านความพร้อมรบในระยะยาวเป็นอย่างมาก

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Frost&Sullivan, Global Defense Outlook, 2019

[2] IHS Janes, Ballistic Missile Technologies and Performance analysis, November

[3] IHS Janes, Rocket Missiles: Blurring

lines between guided Artillery rockets and missiles, January 2020

[4] Trend in missile Technology, <https://www.iiss.org/blogs/analysis/2019/03/trends-in-missile-technologies>

การประกอบแบตเตอรี่โซเดียมไอออนที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนที่สังเคราะห์จากพอลิอะนิลีนเป็นวัสดุที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนด

ปณิทัต หาลิน^{1*}

วันที่รับ 31 มีนาคม 2564 วันที่แก้ไข 3 สิงหาคม 2564 วันตอบรับ 4 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนถูกสังเคราะห์โดยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิอะนิลีนในรูพรุนระดับนาโนของวัสดุซิลิกา เพื่อใช้เป็นขั้วแอโนดราคาถูกในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนนั้นจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูง มีปริมาณข้อบกพร่องจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับโซเดียมไอออนได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีค่าการเก็บประจุสูงถึง 573 mA h g^{-1} ที่ 0.1 A g^{-1} และยังคงค่าการเก็บประจุสูงถึง 530 mA h g^{-1} หลังจากทำการทดสอบ 100 รอบ จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน โดยแบตเตอรี่โซเดียมไอออนที่ใช้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนเป็นขั้วแอโนดยังสามารถใช้เป็นต้นแบบของอุตสาหกรรมรถไฟฟ้าของประเทศอีกด้วย

คำสำคัญ : วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน, แบตเตอรี่โซเดียมไอออน, พอลิอะนิลีน, ขั้วแอโนด

¹ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย

* ผู้แต่ง, อีเมลล์: fscipths@ku.ac.th

Fabrication of High-Performance Sodium-Ion Batteries Based on Polyaniline-derived N-doped Mesoporous Carbon as Anode Material

Panitat Hasin ^{1*}

Received 31 March 2021, Revised 3 August 2021, Accepted 4 August 2021

Abstract

N-doped mesoporous carbon with high N content was prepared from in situ polymerized mesoporous silica-supported polyaniline (PANI) and was explored as a low-cost anode for sodium ion batteries. The N-doped samples possessed an enhanced electronic conductivity, rich defects, and improved Na⁺ adsorption capability, realizing the superior capacity of 573 mA h g⁻¹ at 0.1 A g⁻¹ and retaining 530 mA h g⁻¹ even after 100 cycles. As a consequence, N-doped mesoporous carbon shows great prospect for the application of sodium-ion battery anode material. Sodium-ion batteries based on polyaniline-derived N-doped mesoporous carbon can also be the prototype of an electric vehicle industry in the country.

Keywords : N-doped mesoporous carbon, Sodium-ion batteries, Polyaniline, Anode

¹ Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC), Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันงานการทหารได้อาศัยเทคโนโลยีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในงานด้านการทหารเพื่อเป็นเครื่องมือทุ่นแรงและลดภาระบรรทุกของทหารในการเดินเท้าลาดตระเวนในพื้นที่เสี่ยงภัยต่าง ๆ จากเดิมที่ต้องมีการแบกสัมภาระ ทั้งอาหาร อาวุธปืน เครื่องกระสุน เครื่องมือสื่อสาร และแบตเตอรี่ด้วยการลดขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่ ทำให้ทหารมีขีดความสามารถในการเคลื่อนที่ได้คล่องตัวยิ่งขึ้นลดอาการล้าจากการแบกน้ำหนักและลดห้วงเวลาในการชาร์ตพลังงานไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ นอกจากนี้ การพัฒนาแบตเตอรี่ให้มีอายุการใช้งานนานขึ้นเพื่อตอบสนองภารกิจด้านความมั่นคงทางทหารจากการปฏิบัติงานในพื้นที่ห่างไกลจากโครงข่าย สายไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดที่เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พกพาได้โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ และรถพลังงานไฟฟ้า ก็มีความต้องการมากยิ่งขึ้น [1]

การพัฒนาเทคโนโลยีที่รวดเร็วในปัจจุบัน อุปกรณ์กักเก็บพลังงานเชิงเคมีไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion batteries; LIBs) แบตเตอรี่โซเดียมไอออน (Sodium-ion batteries; SIBs) และแบตเตอรี่สังกะสี (Zinc batteries) มีความต้องการเพื่อใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บและแปรรูปพลังงานเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานของโลกและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม [2] โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1991 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ถูกวางจำหน่ายเชิงการค้าและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้มากและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน [3] แต่อย่างไรก็ตามในทศวรรษที่ผ่านมาพบว่าปริมาณโลหะลิเทียมที่นำมาใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาดใหญ่ เพื่อนำมาใช้ในระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่จะมีค่ามากกว่าปริมาณของโลหะลิเทียมที่มีอยู่บนเปลือกโลก (0.0065%) [4] ในขณะที่เดียวกันโลหะ

ลิเทียมไม่ได้มีอยู่ทุก ๆ บริเวณบนเปลือกโลกจึงส่งผลให้การนำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไปใช้ในระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งอยู่กับที่มีข้อจำกัด [5] เมื่อเร็ว ๆ นี้ แบตเตอรี่โซเดียมไอออนถือเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเนื่องจากโลหะโซเดียมสามารถหาได้ง่ายและมีปริมาณมากบนเปลือกโลกรวมทั้งยังเป็นโลหะที่มีราคาถูกอีกด้วย [6]

แต่อย่างไรก็ตาม กราไฟท์ที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเชิงพาณิชย์จะมีความการเกิด Lithiation/delithiation ที่ต่ำ [8] จึงทำให้กราฟไฟท์เป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออนเพราะโซเดียมไอออนมีขนาดใหญ่กว่าลิเทียมไอออน (Na^+ 0.204 nm, Li^+ 0.152 nm) [9] จึงทำให้การแทรกเข้าของโซเดียมไอออนในโครงสร้างของกราฟไฟท์เกิดขึ้นได้ยากดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการพัฒนาวัสดุที่มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานมาก มีราคาถูก และมีอัตราการเกิด Sodiation/desodiation ที่เร็ว เพื่อนำมาทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับแบตเตอรี่โซเดียมไอออน ในบรรดาวัสดุคาร์บอน เช่น คาร์บอนอสัณฐาน กราไฟท์ และกราฟีน วัสดุคาร์บอน ที่มีรูพรุนในระดับนาโน (Mesoporous carbon) ถือเป็นวัสดุคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน เนื่องจากวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนมีปริมาณรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวสูง มีความเสถียรเชิงโครงสร้างที่ดี มีความสามารถในการอัดและคายประจุที่สูงและมีราคาถูก [10]

แต่อย่างไรก็ตาม การที่โครงสร้างของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนมีความเป็นกราฟไฟท์ต่ำ จึงส่งผลให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีความการนำไฟฟ้า มีความประสิทธิภาพคูลอมบ์ (Coulombic efficiency) สามารถอัดและคายประจุที่ไม่ดี [11] ดังนั้น เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวนักวิจัยส่วนใหญ่จึงทำการควบคุมสัณฐานวิทยา [12] ควบคุมขนาดอนุภาค [13] เจือเฮเทอโรอะตอม (Heteroatom) [14]

และเพิ่มความพรุน [15] เพื่อเพิ่มบริเวณเร่ง (Active site) บริเวณบกพร่อง (Defect) และช่องว่าง (Void) เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุและความสามารถในการอัดและคายประจุ [16] ซึ่งการเจือธาตุไนโตรเจนถือเป็นวิธีที่มีศักยภาพวิธีหนึ่งในการเพิ่มบริเวณเร่งและค่าการนำไฟฟ้าเนื่องจากธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุที่สามารถให้อิเล็กตรอนแก่โครงสร้างของคาร์บอนได้ [17]

โดยเทคนิคที่นักวิจัยส่วนใหญ่ใช้ในการเจือธาตุไนโตรเจนคือ Pyrolysis [18], Hydrothermal [19] และ Ammonia treatment [20] แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวจะทำให้ได้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้พอลิอะนิลีน (Polyaniline) เป็นแหล่งของไนโตรเจนสำหรับการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนเนื่องจากพอลิอะนิลีนมีอัตราส่วนของธาตุ N/C สูง (0.167) และมีมวลโมเลกุลมากซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงในการสูญเสียธาตุไนโตรเจนในขั้นตอนการเผา ยิ่งไปกว่านั้น การที่งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนในรูพรุนระดับนาโนของวัสดุซิลิกานอกจากจะทำให้ได้วัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นมีพื้นที่ผิวสูงแล้วยังทำให้วัสดุคาร์บอนที่ได้มีปริมาณไนโตรเจนสูงอีกด้วยเนื่องจากรูพรุนที่เล็กมากในระดับนาโนของวัสดุซิลิกาจะไปขัดขวางการสลายตัวของพอลิอะนิลีน [21]

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนโดยใช้พอลิอะนิลีนเป็นแหล่งของคาร์บอนและไนโตรเจนเพื่อใช้ทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออน จากข้อดีข้างต้นจึงส่งผลให้ วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนมีความมีความสามารถในการอัด/คายประจุที่สูงขึ้น จึงทำให้วัสดุนาโนคอมโพสิตดังกล่าวมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ทำเป็นขั้วแอโนดสำหรับการพัฒนาแบตเตอรี่โซเดียมไอออนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการพัฒนา

วัสดุที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่โซเดียมไอออนในระดับห้องปฏิบัติการที่มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์อีกด้วย

2. วิธีการวิจัย/ทดลอง (Method)

2.1 สังเคราะห์วัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโน (SBA-15 Mesoporous silica) ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่เอมีนเป็นองค์ประกอบ (Organodiamine group)

ละลาย Pluronic® 123 จำนวน 4 กรัม ในสารละลายกรด HCl เข้มข้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น ปริมาตร 130 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) จำนวน 8.5 กรัม ลงไป และคนสารละลายเป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วนำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ได้และล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาณมากเสร็จแล้วนำสารที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้จำนวน 4 กรัม คนในสารละลายของ Hexamethyldisilazane/toluene (5 มิลลิลิตร/60 มิลลิลิตร) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อทำการเคลือบพื้นผิวด้านนอกของวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโนด้วยหมู่ Trimethylsilyl (-SiMe₃) จากนั้นนำไปเหวี่ยงเพื่อแยกเอาตะกอนออกมาและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการกำจัดเอา Pluronic® 123 ออกโดยการนำสารที่เตรียมได้จำนวน 5 กรัม คนในตัวทำละลายของ Diethyl ether และ Ethanol (อัตราส่วน 1:1) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการนี้จะทำให้พื้นผิวด้านนอกของวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโนถูกเคลือบด้วยหมู่ -Me ได้สารที่มีชื่อว่า Me-SBA-15 จากนั้นทำการเคลือบผิวชั้นในของวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโนด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่เอมีนเป็นองค์ประกอบ (Organodiamine groups) โดยการคน Me-SBA-15 จำนวน 0.1 กรัม ในสารละลายของ *N*-(2-aminoethyl) -3-aminopropyl

Trimethoxysilane ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร และ Anhydrous Toluene ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นล้างสารที่ได้ด้วย Ethanol ปริมาณมาก อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ จะทำให้พื้นผิวด้านนอกของวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโนถูกเคลือบด้วยหมู่ -Me และพื้นผิวด้านในถูกเคลือบด้วยหมู่ -NR₂ (Alkyldiamine groups) โดยสารที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนนี้มีชื่อเรียกว่า SBA-15/Diamine

2.2 สังเคราะห์ Polyaniline (PANI) ในรูพรุนของ SBA-15 (PANI/SBA-15)

นำ SBA-15/Diamine จำนวน 100 มิลลิกรัม ใส่ลงในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วย Sodium Persulfate จำนวน 600 มิลลิกรัม หลังจากนั้นคนสารผสมดังกล่าวเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องเสร็จแล้วล้าง Persulfate ส่วนเกินออกด้วยน้ำกลั่นปริมาณมากแล้วนำไปเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนออกมาเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้จะได้สารที่มีชื่อเรียกว่า SBA-15/Diammonium-persulfate จากนั้น คนสารที่ได้ในสารละลายของ Aniline ปริมาตร 150 ไมโครลิตร และกรด HCl เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในอ่างน้ำแข็งที่ อุณหภูมิ 0-4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อทำการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนในรูพรุนของวัสดุซิลิกา (SBA-15) โดยสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนสี ของสารตัวอย่างจากสีขาวเป็นสีเขียวเสร็จแล้วล้างสารที่ได้ด้วย Acetone และ Ethanol (อัตราส่วน 1:1) ปริมาณมาก แล้วคนสารที่ได้ด้วยสารละลาย Ammonia เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาณมาก พร้อมทั้งทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะได้สารที่มีชื่อว่า PANI/SBA-15

2.3 เฝ้า PANI/SBA-15

เฝ้า PANI/SBA-15 ภายใต้บรรยากาศของ Argon ที่มีอัตราการไหล 30 มิลลิลิตร/นาที่ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และ 300 องศาเซลเซียส (อัตราการเพิ่ม

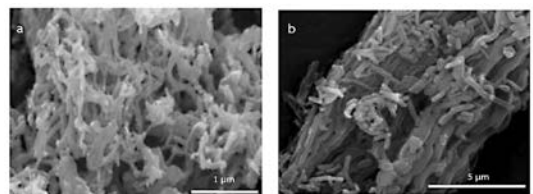
อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส/นาที่) นาน 2 ชั่วโมง ในแต่ละอุณหภูมิจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 800 องศาเซลเซียส (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที่) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.4 กำจัดวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโนออกจากวัสดุคาร์บอน

นำวัสดุคาร์บอนที่เผาแล้วจำนวน 0.002 กรัม คนในสารละลาย NaOH เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้วัสดุคาร์บอนตกตะกอนลงมาที่ก้นขวด จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปเหวี่ยงด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่า pH ให้เป็นกลางเสร็จแล้วล้างสารที่ได้ด้วย Ethanol แล้วนำไปอบเพื่อทำให้แห้ง

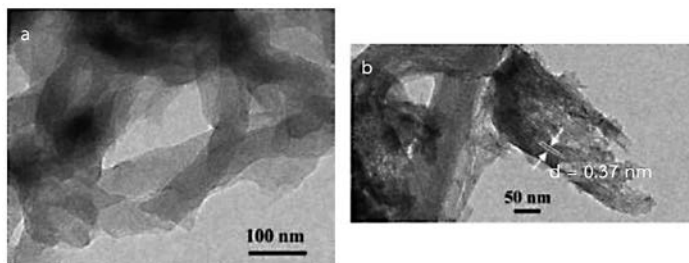
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and discussion)

สัณฐานวิทยาของวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนในระดับนาโน (SBA-15 Mesoporous silica) จึงถูกนำมาตรวจสอบโดยใช้เทคนิค Field-Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ (รูปที่ 1(a) - รูปที่ 1(b)) จากภาพถ่าย SEM ของ N-MC วัสดุคาร์บอน N-MC มีลักษณะเป็นเส้นยาวและเชื่อมต่อกันเป็นร่างแหอย่างไม่มีระเบียบโดยมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 0.35 μm ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ SBA-15 ที่นำมาใช้เป็นสารต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) ซึ่งลักษณะเป็นเส้นยาวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 1 ภาพถ่าย SEM ของ (a) N-MC และ (b) SBA-15

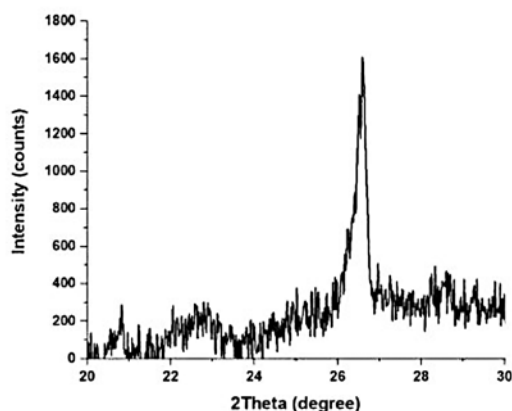
ภาพถ่าย TEM ของ N-MC ถูกแสดงดังรูปที่ 2 (a) สัณฐานวิทยาของวัสดุคาร์บอนที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกันนอกจากนี้ภาพถ่าย High-resolution TEM



รูปที่ 2 ภาพถ่าย TEM ของ (a) กำลังขยายต่ำ และ (b) กำลังขยายสูง ของ N-MC

(HRTEM) (รูปที่ 2 (b)) ยังแสดงระนาบแลตทิซ (Lattice fringe) ที่มีระยะห่างเท่ากับ 0.37 nm ซึ่งระยะห่างระหว่างระนาบดังกล่าวสอดคล้องกับระนาบ (002) ของวัสดุคาร์บอน [1]

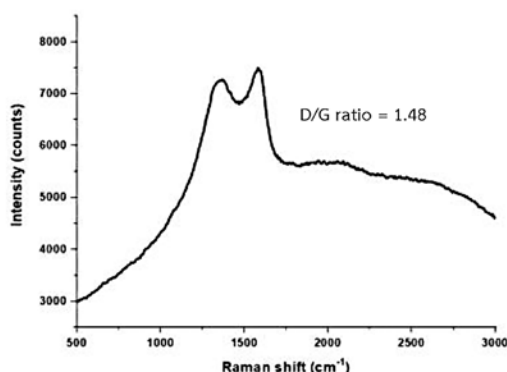
ความเป็นผลึกของวัสดุคาร์บอนสามารถวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค X-ray diffraction (XRD) จากรูปที่ 3 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุคาร์บอนทุกชนิดจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง $2\theta \approx 26.5^\circ$ ซึ่งคือ พีคของคาร์บอนระนาบ (002) ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเปรียบเทียบพีคของคาร์บอนระนาบ (002) ของกราฟไฟท์ จะเห็นได้ว่าพีคคาร์บอนของกราฟไฟท์ปรากฏที่ตำแหน่ง $2\theta \approx 26^\circ$ และมีระยะห่างระหว่างระนาบ ($d_{(002)}$) เท่ากับ 0.336 nm ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบความเป็นผลึกของวัสดุคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ได้ จากผลการทดลองที่ได้พบวาระยะห่างระหว่างระนาบ ($d_{(002)}$) ของวัสดุ N-MC จะมีค่าเท่ากับ 0.332 nm ซึ่งมีค่าแตกต่างจากกราฟไฟท์ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าวัสดุคาร์บอนดังกล่าว



รูปที่ 3 กราฟ XRD ของ N-MC

มีโครงสร้างอสัณฐานหรือมีข้อบกพร่องในโครงสร้างคาร์บอนมากดังนั้นจึงเป็นประโยชน์มากต่อการนำวัสดุคาร์บอนดังกล่าวมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีในขั้วแคโทดหรือแอโนดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เทคนิค Raman Spectroscopy ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนและข้อบกพร่องของโครงสร้างคาร์บอน จากกราฟรามานของวัสดุ N-MC (รูปที่ 4) ปรากฏพีคอยู่ 2 พีค นั่นก็คือ D-band และ G-band ที่มีเลขคลื่นเท่ากับ 1355 cm^{-1} และ 1580 cm^{-1} ตามลำดับ โดยที่ D-band บ่งบอกถึงข้อบกพร่องหรือ sp^3 - คาร์บอนอะตอมในโครงสร้างของคาร์บอน ในขณะที่ G-band บ่งบอกถึงโครงสร้างกราฟไฟท์ หรือ sp^2 - คาร์บอนอะตอมใน



รูปที่ 4 กราฟ Raman ของ N-MC

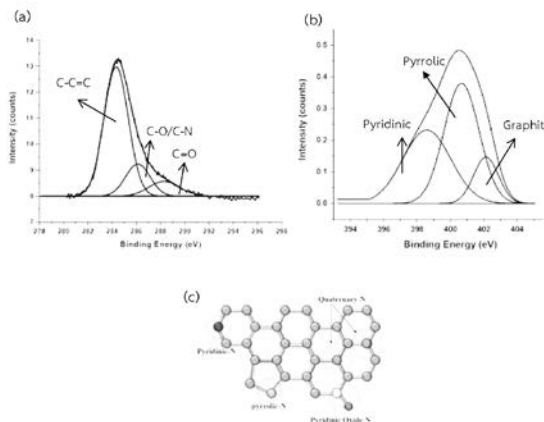
โครงสร้างของคาร์บอนซึ่งความเป็นผลึกของวัสดุคาร์บอนนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง D-band กับ G-band (I_D/I_G) หมายความว่า ถ้า I_D/I_G มีค่าน้อย วัสดุคาร์บอนนั้นจะมีโครงสร้างคล้ายกราฟไฟท์มาก จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่าง I_D/I_G

โครงสร้างของคาร์บอนซึ่งความเป็นผลึกของวัสดุคาร์บอนนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง D-band กับ G-band (I_D/I_G) หมายความว่า ถ้า I_D/I_G มีค่าน้อย วัสดุคาร์บอนนั้นจะมีโครงสร้างคล้ายกราฟไฟท์มาก จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่าง I_D/I_G ของ N-MC มีค่าเท่ากับ 1.48 จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนจะมีโครงสร้างอสัณฐานหรือมีข้อบกพร่องในโครงสร้างคาร์บอนมากซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy จะมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction

เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนและไนโตรเจนบนพื้นผิวของวัสดุคาร์บอน พีค C 1s ของวัสดุคาร์บอนประกอบด้วยหลายพีคย่อยนั่นคือ C-C=C (284.3 eV), C-O/C-N (286.0 eV) และ C=O (286.9 eV) ดังแสดงในรูปที่ 5(a) โดยที่อัตราส่วนระหว่าง C-C=C/C-O,C=O ในวัสดุคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้จากพื้นที่ใต้พีคย่อยของ C 1s ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าวัสดุ N-MC มีอัตราส่วนระหว่างปริมาณของ C-C=C/C-O,C=O เท่ากับ 1.40 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุ N-MC มีปริมาณ C-C=C มากกว่า C-O และ C=O จึงส่งผลให้วัสดุ N-MC มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งจะช่วยให้อิเล็กทรอนิกส์สามารถเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างของคาร์บอนได้ดีขึ้น สำหรับพีค N 1s ประกอบด้วยพีคสามพีคย่อยที่มีพลังงานยึดเหนี่ยว

เท่ากับ 398.3, 400.1 และ 401.2 eV ดังแสดงในรูปที่ 5 (b) ซึ่งบ่งบอกถึงชนิดของไนโตรเจน ที่แตกต่างกันคือ Pyridinic N, Pyrrolic N และ Graphitic N ตามลำดับ (รูปที่ 5 (c)) จากผลการทดลอง ดังกล่าวจะเห็นว่าไนโตรเจนได้ถูกเจือลงในโครงสร้างของคาร์บอนจริง นอกจากนี้ปริมาณของ Pyridinic N กับ Graphitic N ที่วิเคราะห์ได้จากพื้นที่ใต้พีคย่อย N 1s ของวัสดุ N-MC นั้นมีค่าเท่ากับ 53 % (น้ำหนักอะตอม) ตามลำดับ พบว่า Pyridinic N และ Graphitic N มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีสูง [14] ดังนั้นการที่วัสดุ N-MC มีปริมาณ Pyridinic N และ Graphitic N ที่มากนั้น จะทำให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่ดีด้วย

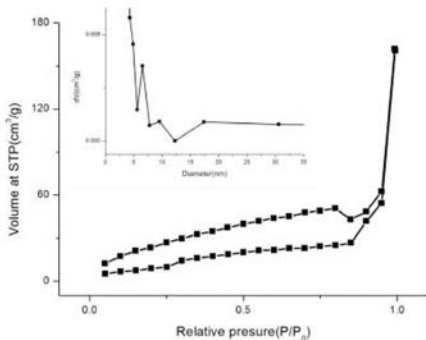
พื้นที่ผิวปริมาตรและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ MC, Co-MC และ Ni-MC ที่ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nitrogen Porosimetry จากรูปที่ 6 พื้นที่ผิวของ N-MC มีค่าเท่ากับ 100.76 m^2/g นอกจากนี้ไอโซเทอม การดูดซับการคายออกของไนโตรเจนบนวัสดุคาร์บอน N-MC ที่แสดงดังรูปที่ 6 จัดอยู่ในประเภทไอโซเทอมแบบ IV โดยจะมี Hysteresis Loop ในช่วงความดัน (P/P₀) ระหว่าง 0.40-0.70 ซึ่ง Hysteresis Loop เกิดจากการควบแน่นของแก๊สไนโตรเจนในรูพรุนที่มีขนาดในระดับนาโนของวัสดุคาร์บอน N-MC จึงเป็นการบ่งบอกว่าวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นนี้มีรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 nm (Mesopore)



รูปที่ 5 กราฟ XPS ของ (a) C 1s, (b) N 1s ในสารตัวอย่าง N-MC และ (c) ไนโตรเจนแต่ละชนิดในโครงสร้างของคาร์บอน

รูปที่ 6 (Inset) แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนวัสดุคาร์บอน N-MC วัสดุ Co-MC และ Ni-MC มีขนาดรูพรุนประมาณ 3.8 nm เพียงขนาดเดียวเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีการกระจายตัวของรูพรุนที่แคบ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาตรรูพรุนบนวัสดุคาร์บอน N-MC พบปริมาตรรูพรุนของวัสดุ N-MC ($0.30 \text{ cm}^3/\text{g}$) มีค่ามากซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอน N-MC มีความแข็งแรงเชิงกลมาก โดยจะส่งผลให้รูพรุนเกิดการหดตัวได้น้อยลงระหว่างกระบวนการเผา

ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry: CV) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาหลักการเก็บโซเดียมไอออน



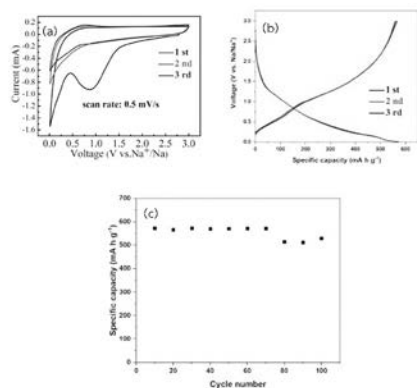
รูปที่ 6 โยโซเทอมการดูดซับ-การคายออก และการกระจายของขนาดรูพรุนของ N-MC (Inset)

โดยทำการทดลองในช่วงความต่างศักย์ระหว่าง 0.01 และ 3 V โดยกราฟ CV 3 รอบแรกของ N-MC ถูกแสดงในรูปที่ 7 (a) พิกขนาดใหญ่ที่ 0.9 V ในการกวาดความต่างศักย์ไปทางคาโทดในรอบแรก โดยพิกดังกล่าว เกิดจากการสลายตัวของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ และการเกิดฟิล์มอินเทอร์เฟซที่เป็นของแข็ง (Solid - electrolyte interphase: SEI) นอกจากนี้ ปรากฏพิกที่ความต่างศักย์ต่ำ ($\approx 0 \text{ V}$) ซึ่งเกิดจากกระบวนการแทรกเข้าของ Na^+ เข้าไปยังรูพรุนที่มีขนาดเล็ก (Micropore) ของคาร์บอนและกระบวนการแทรกเข้าดังกล่าวยังคงเกิดขึ้นในรอบต่อไปแสดงให้เห็นว่ากระบวนการแทรกเข้าของ Na^+ เป็นกระบวนการผันกลับได้ ยิ่งไปกว่านั้นกราฟ CV ในรอบต่าง ๆ ยังมีรูปร่างคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของ N-MC สามารถย้อนกลับได้เป็นอย่างดี จากกราฟ

CV ยังพบพิกแอโนดิก (Anodic peak) ที่กว้างในช่วง 0.1-1.0 V ในทุก ๆ รอบ ซึ่งพิกดังกล่าวจะเกิดจากกระบวนการที่โซเดียมไอออนเคลื่อนออกจากโครงสร้างของ N-MC โดยจะเกิดขึ้นในช่วงความต่างศักย์ที่กว้าง

รูปที่ 7 (b) แสดงกราฟกัลวานอสแตติกชาร์จ/ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge/discharge) 3 รอบแรกของ N-MC ที่ 0.1 A g^{-1} โดยความสามารถในการปล่อยประจุของขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจาก N-MC จะมีค่า 573 mA h g^{-1} และมีค่าประสิทธิภาพคูลอมบ์ (Coulombic efficiency) เริ่มต้น 97.6% แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของ N-MC สามารถย้อนกลับได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค CV นอกจากนี้ การที่ N-MC มีพื้นที่ผิวสูง จึงเป็นสาเหตุทำให้ N-MC มีค่าประสิทธิภาพคูลอมบ์ (Coulombic efficiency) เริ่มต้นสูง

เพื่อที่จะประเมินความเสถียรของ N-MC รูปที่ 7 (c) แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบความเสถียรที่ 0.1 A g^{-1} จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่า ค่าการเก็บประจุจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังคงค่าการเก็บประจุที่ 530 mA h g^{-1} หลังจากทำการทดสอบเป็นจำนวน 100 รอบ การที่ค่าการเก็บประจุลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เกิดมาจากการสลายตัวของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดเป็นฟิล์มพอลิเมอร์คล้ายเจลบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นขั้วไฟฟ้าจะถูกกระตุ้นจากปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้น นอกจากนี้การเจือฮาตุ N



รูปที่ 7 (a) กราฟ CV ของขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจาก N-MC, (b) กราฟกัลวานอสแตติกชาร์จ/ดิสชาร์จของ N-MC ที่ 0.1 A g^{-1} และ (c) การทดสอบความเสถียรของ N-MC

จะเหนียวนำทำให้เกิดข้อบกพร่อง (Defect) และบริเวณเร่งปฏิกิริยา (Active site) ที่สามารถสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นอย่างดี จากเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น จึงส่งผลให้ค่าการเก็บประจุลดลงเพียงเล็กน้อยหลังจากทำการทดสอบเป็นจำนวน 100 รอบ

4. บทสรุป (Conclusions)

วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนในระดับนาโนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนที่สังเคราะห์โดยวิธีพอลิเมอร์โรเซชันของพอลิอะนิลีนในรูพรุนระดับนาโนของวัสดุซิลิกาสามารถนำมาใช้เป็นแอโนดที่มีราคาถูกในแบตเตอรี่โซเดียมไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุคาร์บอนที่เจือธาตุไนโตรเจนลงไปในนั้นมีความเป็นกราฟไฟท์สูงจึงทำให้วัสดุคาร์บอนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น นอกจากนี้ วัสดุคาร์บอนที่ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจนจะมีปริมาณ Pyridinic N และ Graphitic N สูง โดยไนโตรเจนชนิดดังกล่าวจะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเชิงทางไฟฟ้าเคมีได้ดีและผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุคาร์บอนยืนยันว่าวัสดุคาร์บอนที่เจือธาตุไนโตรเจนลงไปในพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนสูงซึ่งจะส่งผลดีต่อการเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีอีกด้วยจึงมีความเป็นไปได้ที่วัสดุคาร์บอนดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับการแพร่และการแทรกเข้า/การเคลื่อนที่ออกของ Na^+ ในโครงสร้างของคาร์บอนได้ดีดั่งนั้นจากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าวัสดุคาร์บอน N-MC ที่สังเคราะห์ได้มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานได้หลายประเภท อาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีการพัฒนาแบตเตอรี่โซเดียมไอออนจะเป็นเป็นอนาคตของแบตเตอรี่คุณภาพสูงที่จะตอบโจทย์ความต้องการใช้ในวันข้างหน้าได้ดี โดยเฉพาะเมื่อเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนานั้นมีเสถียรภาพต่อการใช้งานมากพอและเท่าทันกับการขับเคลื่อนของกระแสเทคโนโลยีอื่น ๆ โดยเฉพาะรถไฟฟ้าหรือแม้กระทั่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการพัฒนาในหลากหลายรูปแบบและมีการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

แผนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทุนอุดหนุนโครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2564 ของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหมและขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการให้ความอนุเคราะห์ทั้งอุปกรณ์สถานที่และเวลาในการทำงานเพื่อให้คณะผู้วิจัยสามารถดำเนินงานได้อย่างคล่องตัว

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Ding, J., Wang, H., Li, Z., Kohandehghan, A., Cui, K., Xu, Z., Zahir, B., Tan, X., Lotfabad, E. M., Olsen, B. C., & Mitlin, D. 2013. Carbon Nanosheet Frameworks Derived from Peat Moss as High Performance Sodium Ion Battery Anodes. *ACS Nano*. 7 (12). pp. 11004-11015.
- [2] Wu, S., Zhu, Y., Huo, Y., Luo, Y., Zhang, L., Wan, Y., Nan, B., Cao, L., Wang, Z., Li, M., Yang, M., Cheng, H., & Lu, Z. 2017. Bimetallic organic frameworks derived CuNi/carbon nanocomposites as efficient electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *Science China Materials*. 60 (7). pp. 654-663.
- [3] Wang, B., Li, X., Zhang, X., Luo, B., Jin, M., Liang, M., Dayeh, S. A., Picraux, S. T., & Zhi, L. 2013. Adaptable Silicon-Carbon Nanocables Sandwiched between Reduced Graphene Oxide Sheets as Lithium Ion Battery Anodes. *ACS Nano* 7 (2). pp. 1437-1445.
- [4] Liu, Y., Zhang, A., Shen, C., Liu, Q., Cao, X., Ma, Y., Chen, L., Lau, C., Chen, T.-C., Wei, F., & Zhou, C. 2017. Red Phosphorus Nanodots on Reduced Graphene Oxide as a Flexible and Ultra-Fast Anode for Sodium-Ion Batteries. *ACS Nano*. 11 (6). pp. 5530-5537.
- [5] Yue, J., Han, F., Fan, X., Zhu, X., Ma, Z., Yang, J., & Wang, C. 2017. High-Performance All-Inorganic Solid-State Sodium-Sulfur Battery. *ACS Nano*. 11 (5). pp. 4885-4891.
- [6] David, L., Bhandavat, R., & Singh, G. 2014. $\text{MoS}_2/\text{Graphene}$ Composite Paper for Sodium-Ion

Battery Electrodes. *ACS Nano*. 8 (2). pp. 1759-1770.

[7] Zhang, X., Qiu, X., Kong, D., Zhou, L., Li, Z., Li, X., & Zhi, L. 2017. Silicene Flowers: A Dual Stabilized Silicon Building Block for High-Performance Lithium Battery Anodes. *ACS Nano*. 11 (7). pp. 7476-7484.

[8] Saurel, D., Orayech, B., Xiao, B., Carriazo, D., Li, X., & Rojo, T. 2018. From Charge Storage Mechanism to Performance: A Roadmap toward High Specific Energy Sodium-Ion Batteries through Carbon Anode Optimization. *Advanced Energy Materials*. 8 (17). pp. 1703268.

[9] Zhou, X., Zhu, X., Liu, X., Xu, Y., Liu, Y., Dai, Z., & Bao, J. 2014. Ultralong Cycle Life Sodium-Ion Battery Anodes Using a Graphene-Templated Carbon Hybrid. *The Journal of Physical Chemistry C*. 118 (39). pp. 22426-22431.

[10] Li, H., Wang, Z., Chen, L., & Huang, X. 2009. Research on Advanced Materials for Li-ion Batteries. *Advanced Materials*. 21 (45). pp. 4593-4607.

[11] Zhang, J., Yin, Y.-X., & Guo, Y.-G. 2015. High-Capacity Te Anode Confined in Microporous Carbon for Long-Life Na-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 7 (50). pp. 27838-27844.

[12] Jayaraman, S., Singh, G., Madhavi, S., & Aravindan, V. 2018. Elongated graphitic hollow nanofibers from vegetable oil as prospective insertion host for constructing advanced high energy Li-ion capacitor and battery. *Carbon*. 134. pp. 9-14.

[13] Hou, H., Banks, C. E., Jing, M., Zhang, Y., & Ji, X. 2015. Carbon Quantum Dots and Their Derivative 3D Porous Carbon Frameworks for Sodium-Ion Batteries with Ultralong Cycle Life. *Advanced Materials*. 27 (47). pp. 7861-7866.

[14] Niu, S., Lv, W., Zhang, C., Li, F., Tang, L., He, Y., Li, B., Yang, Q.-H., & Kang, F. 2015. A carbon sandwich electrode with graphene filling coated by N-doped porous carbon layers for lithium-sulfur batteries. *Journal of Materials Chemistry A*. 3 (40). pp. 20218-20224.

[15] Xiong, W., Wang, Z., Zhang, J., Shang, C.,

Yang, M., He, L., & Lu, Z. 2017. Hierarchical ball-in-ball structured nitrogen-doped carbon microspheres as high performance anode for sodium-ion batteries. *Energy Storage Materials*. 7. pp. 229-235.

[16] Xu, Y., Zhang, C., Zhou, M., Fu, Q., Zhao, C., Wu, M., & Lei, Y. 2018. Highly nitrogen doped carbon nanofibers with superior rate capability and cyclability for potassium ion batteries. *Nature Communications*. 9 (1). pp. 1720.

[17] Liu, L., Yin, Y.-X., Li, J.-Y., Wang, S.-H., Guo, Y.-G., & Wan, L.-J. 2018. Uniform Lithium Nucleation/Growth Induced by Lightweight Nitrogen-Doped Graphitic Carbon Foams for High-Performance Lithium Metal Anodes. *Advanced Materials*. 30 (10). pp. 1706216.

[18] Qu, K., Zheng, Y., Zhang, X., Davey, K., Dai, S., & Qiao, S. Z. 2017. Promotion of Electrocatalytic Hydrogen Evolution Reaction on Nitrogen-Doped Carbon Nanosheets with Secondary Heteroatoms. *ACS Nano*. 11 (7). pp. 7293-7300.

[19] Yang, Q., Zhou, J., Zhang, G., Guo, C., Li, M., Zhu, Y., & Qian, Y. 2017. Sb nanoparticles uniformly dispersed in 1-D N-doped porous carbon as anodes for Li-ion and Na-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*. 5 (24). pp. 12144-12148.

[20] Zhong, X., Tang, J., Wang, J., Shao, M., Chai, J., Wang, S., Yang, M., Yang, Y., Wang, N., Wang, S., Xu, B., & Pan, H. 2018. 3D heterostructured pure and N-Doped Ni₃S₂/VS₂ nanosheets for high efficient overall water splitting. *Electrochimica Acta*. 269. pp. 55-61.

[21] Silva, R., Voiry, D., Chowalla, M., & Asefa, T. 2013. Efficient Metal-Free Electrocatalysts for Oxygen Reduction: Polyaniline-Derived N- and O-Doped Mesoporous Carbons. *Journal of the American Chemical Society*. 135 (21). pp. 7823-7826.

การพัฒนาแบบจำลองเส้นทางการบินของอากาศยาน 3 มิติ ด้วย สมการแบบกำหนดตัวแปรเนริฟ

ชนะ รัชศิริ^{1*} กฤติยา พาอิม¹ และ ภูมเรศ แสงราม²

วันที่รับ 14 กรกฎาคม 2564 วันที่แก้ไข 9 สิงหาคม 2564 วันตอบรับ 9 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยที่ผ่าน ๆ มาการสร้างเส้นทางการบินของอากาศยาน หรือการทำนายเส้นทางการบินมีหลากหลายวิธี เช่น การทำนายด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม หรือการทำนายด้วยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่ง โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างเส้นทางการบินของอากาศยานด้วยสมการ Parametric แบบ Non-Uniform Rational Basic Spline (NURBS) โดยสมการ NURBS นี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพื้นฐานมาจาก Spline ซึ่งนิยมใช้ในงานคอมพิวเตอร์กราฟิกต่าง ๆ เพื่อสร้างเส้นโค้ง ซึ่งลักษณะของเส้นทางการบินของอากาศยานนั้นก็มีส่วนเส้นโค้งเช่นกันซึ่งเหมาะสำหรับนำมาสร้างเส้นทางการบินได้ โดยการนำเอาข้อมูลทางด้านสามมิติของเส้นทางการบินมาคำนวณหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับเส้นทางการบินแต่ละเส้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งในการสร้างเส้นโค้งของ NURBS คือ Control point การทดสอบการสร้างสมการ NURBS parametric จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการแล้วทำการเปรียบเทียบหาความผิดพลาดระหว่างชุดข้อมูลตำแหน่งอากาศยานที่ได้มากับค่าตำแหน่งเส้นโค้งที่ได้จากสมการ NURBS เพื่อให้ค่าความผิดพลาดของเส้นโค้งที่น้อยที่สุด แล้วให้พารามิเตอร์เหล่านั้นเป็นสมการ Parametric แบบ NURBS เพื่อแสดงเส้นทางการบินของอากาศยานต่อไป

คำสำคัญ : เส้นทางการบิน, สมการแบบกำหนดตัวแปรเนริฟ

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้แต่ง, อีเมลล์: fengcnr@ku.ac.th

The Development of 3D Aircraft Flight Path Models by NURBS Parametric Equations

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

Received 14 July 2021, Revised 9 August 2021, Accepted 9 August 2021

Abstract

There are a variety of methods for creating aircraft flight routes or predicting flight routes such as prediction by the neural network method or prediction with relative motion between positions. In this research, aircraft flight paths will be created using the Non-Uniform Rational Basic Spline parametric (NURBS) equation. The NURBS equation is a mathematical model based on spline method commonly used in various computer graphics applications which are used to create curves. The nature of an aircraft's flight path also has curves, which are suitable for creating a flight path by using the three dimensions data of the flight path to calculate the appropriate parameters for each flight path. One of the most important parameters for constructing a NURBS curve is the Control Point. To test the NURBS parametric equation, the parameters of the equation are adjusted and then the errors are compared between the obtained aircraft position data set and the curve position obtained from the NURBS equation to give the smallest error value of the curve. Then, those parameters defined as NURBS parametric equations show the flight path of the next aircraft.

Keywords : Aircraft flight path, NURBS parametric equations

¹ Department of Industrial Engineering, Kasetsart University.

² Department of Mechanical Engineering, Kasetsart University.

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

1. บทนำ

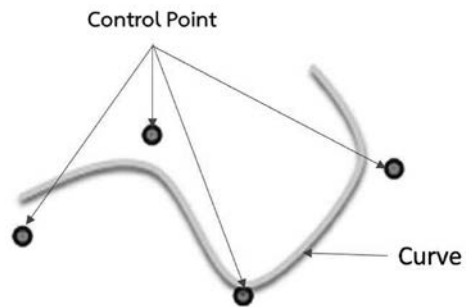
เส้นทางการบินของอากาศยานแตกต่างกันไปตามประเภทของเครื่องบินจะมีลักษณะการบินไม่เหมือนกัน เช่น เครื่องบินพาณิชย์จะเป็นลักษณะการบินแบบเป็นเส้นตรงหรือเครื่องบินรบจะเป็นลักษณะการบินทางยุทธวิธีต่าง ๆ ที่ถูกฝึกมาตามแต่ละสถานการณ์ วัตถุประสงค์ของการทำนายเส้นทางการบินของอากาศยานแต่ละอย่าง เครื่องบินพาณิชย์จะเป็นการทำนายเพื่อการจัดการจราจรทางอากาศ ส่วนการทำนายการบินของเครื่องบินรบก็เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการต่อสู้ทางอากาศยานระหว่างอากาศยานด้วยกันหรือระหว่างอากาศยานกับภาคพื้นดิน

งานวิจัยดั้งเดิมของทำนายเส้นทางการบินหรือการสร้างเส้นทางการบินของอากาศยานส่วนใหญ่จะเป็นการทำนายเส้นทางการบินของเครื่องบินพาณิชย์ ซึ่งผลการทำนายค่อนข้างมีความแม่นยำแต่ความเสถียรต่ำ งานวิจัยในปัจจุบันเริ่มมีความแม่นยำที่มากขึ้นโดยการทำนายด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม [1-4] หรือการทำนายเส้นทางการบินด้วยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตำแหน่ง [5] ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การสร้างเส้นทางการบินของอากาศยานด้วยสมการ NURBS ที่มีพื้นฐานมาจาก Spline [6] เนื่องจาก NURBS สามารถแทนเส้นโค้งได้ทุกชนิดและลักษณะของเส้นทางการบินของอากาศยานต่าง ๆ นั้น ก็มีส่วนเส้นโค้งคล้าย ๆ กับเส้นทางการเคลื่อนที่ของมีดบนเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยของการสร้างเส้นทางการเดินมีดหลาย ๆ งานได้มีการนำหลักการของ NURBS มาใช้ในการคำนวณและทำนายเส้นทางการเดินมีด [7-10] และในงานวิจัยนี้จะมีการใช้ฐานข้อมูลการบินมาเป็นตัวคำนวณเช่นเดียวกับการทำนายเส้นทางการบินของ

งานวิจัยอื่น ๆ โดยขั้นตอนในงานวิจัยนี้คือจะมีการนำเอาข้อมูลทางด้านสามมิติของเส้นทางการบินมาคำนวณหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับเส้นทางการบินแต่ละเส้นทางจากนั้นจะทำการทดสอบการสร้างสมการ Parametric ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการ NURBS และสุดท้ายจะทำการเปรียบเทียบหาความผิดพลาด โดยเมื่อได้ค่าความผิดพลาดของเส้นโค้งที่น้อยที่สุดแล้ว จะให้พารามิเตอร์เหล่านั้นเป็นสมการ Parametric แบบ NURBS เพื่อแสดงเส้นทางการบินของอากาศยานต่อไป

2. สมการ Parametric แบบ Non-Uniform Rational Basis Spline (NURBS)

NURBS หรือ Non-Uniform Rational Basic Spline เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพื้นฐานมาจาก Spline ซึ่งนิยมใช้ในงานคอมพิวเตอร์กราฟิกต่าง ๆ เพื่อสร้างเส้นโค้ง (Curve) และพื้นผิว (Surface) โดยรูปร่างของเส้นโค้งแบบ Spline นั้น จะถูกสร้างขึ้นโดยการคำนวณจากจุดจำนวนหนึ่งบนเส้นโค้ง แต่เส้นโค้งแบบ NURBS นั้นจะต่างออกไป โดยรูปร่างจะถูกควบคุมด้วยกลุ่มของจุดที่ใช้กำกับรูปร่างของเส้นโค้ง (Control point) โดยที่จุดเหล่านี้จะไม่ใช่อัตตาบบนเส้นโค้ง ซึ่งเส้นโค้งนั้นจะถูกลากไปมาระหว่าง Control Point แต่ละจุดเรียงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 NURBS หรือ Non-Uniform Rational Basic Spline [6]

NURBS Curve ถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น Knot, Control point, Degree และ Weight ใน Basic function ซึ่ง Basic function นี้ [11] แสดงได้ในสมการที่ (1)

$$N(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \quad (1)$$

เมื่อ $N_{i,p}(u)$ คือ B-spline basis function โดยสมการนี้สามารถอธิบายได้ในสมการที่ (2) และสมการที่ (3)

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3)$$

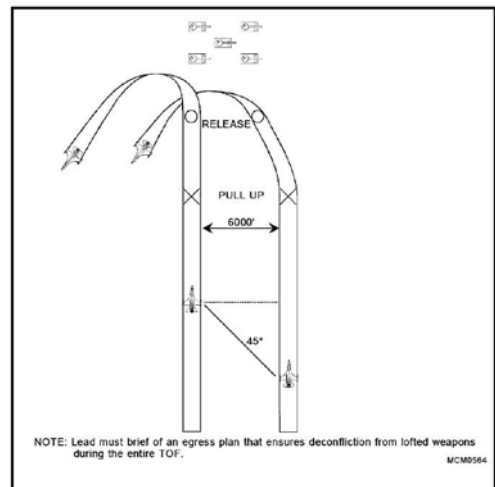
เมื่อ p คือ Degree ของ Basic function, i คือ Degree บวก 1 ($i = p + 1$), u_i คือ Knot และ u คือ Knot vector โดยเมื่อดูที่ Basic function รูปร่างของเส้นโค้งจะถูกกำหนดด้วยค่า Degree, p ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเส้นโค้ง NURBS ยังมีตัวแปรอื่นกำหนดด้วยเช่นกัน คือ Weight, w_i และ Control point, p_i ซึ่งแสดงได้ในสมการที่ (4)

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} P_i \quad (4)$$

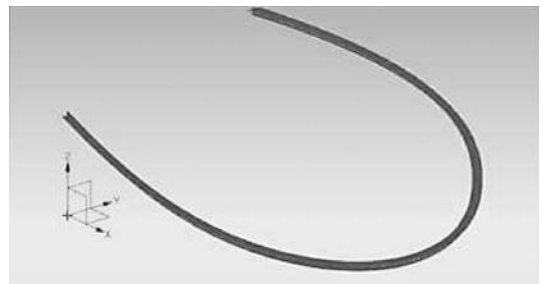
การนำค่าน้ำหนัก (Weight), w_i มาใช้เพื่อเพิ่มหรือลดความสำคัญของ Control Point และองค์ประกอบของค่าน้ำหนักนี้อาจจะมีค่าไม่เท่ากับ 1 จากสมการที่ (4) $C(u)$ เป็นฟังก์ชันตรรกยะใน u ดังนั้นหากเราใช้การเขียนแบบเส้นโค้ง B-spline เราจะได้ฟังก์ชันเดียวกับกับ B-spline ที่ได้มาจากการแปลง Control Point ดังนั้น จึงสามารถใช้วิธีการสร้างแบบจำลองเส้นโค้ง NURBS จากกัน B-spline ได้กันอย่างแพร่หลาย

3. ข้อมูลตำแหน่งอากาศยานแบบ 3 องศาอิสระ

ได้ทำการศึกษายุทธวิธีการบินต่อสู้อากาศพื้นดิน หรือมีเป้าหมายการยิงขีปนาวุธจากอากาศสู่พื้น (Air-to-surface) ของเครื่องบิน F-16 ในภารกิจต่าง ๆ มาแล้ว แต่ไม่สามารถเก็บข้อมูลตำแหน่งวิถีการบินของเครื่องบิน F-16 ได้จริง จึงได้ทำการจำลองเส้นทางการบินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการเลือกยุทธวิธีการบินมา 1 ยุทธวิธี คือ Simultaneous Loft ดังแสดงในรูปที่ 2 และ ใช้ข้อมูลตำแหน่งอากาศยานแบบ 3 องศาอิสระ x, y และ z จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาเพื่อนำไปสร้างสมการ NURBS Parametric ต่อไป โดยเส้นทางการบินที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 Simultaneous Loft [12]



รูปที่ 3 เส้นทางการบินของยุทธวิธี Simultaneous Loft ที่จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

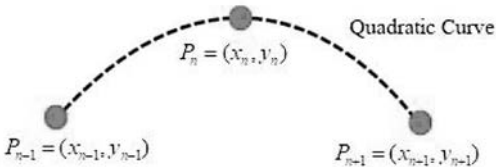
4. นำข้อมูลตำแหน่งอากาศยานสร้างสมการ NURBS Parametric

ข้อมูลตำแหน่งอากาศยานที่ได้มาจากการจำลองเส้นทางการบินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น จะเป็นค่าในรูปแบบ 3 องศาอิสระ x, y และ z มีจำนวน 1,000 พิกัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) แปลงกลุ่มข้อมูลให้อยู่ในระนาบ 2 มิติ นำข้อมูลตำแหน่งที่ได้มาจากการจำลองเส้นทางการบินในรูปแบบ 3 มิติ มาพิจารณาในระนาบ 2 มิติ เพื่อใช้ในการกำหนดจุด Control Point ซึ่งจุด Control Point ที่เลือกมาครั้งแรกนั้นจะเป็นจุดแรก, จุดสุดท้าย และจุดกลับตัว ของกลุ่มข้อมูลเส้นทางการบิน

2) สร้างสมการ Quadratic จากการผ่านจุด 3 จุดบนของกลุ่มข้อมูลเส้นทางการบิน เพื่อหาจุดกลับตัวของ Curve ซึ่งสมการ Quadratic แสดงในรูปแบบที่ 4 และสมการจะอยู่ในรูปของ [13]

$$\begin{aligned} y_{n-1} &= ax_{n-1}^2 + bx_{n-1} + c \\ y_n &= ax_n^2 + bx_n + c \\ y_{n+1} &= ax_{n+1}^2 + bx_{n+1} + c \end{aligned} \quad (5)$$



รูปที่ 4 สมการ Quadratic จากจุด 3 จุด

แก้สมการหาค่าตัวแปร a, b และ c จะได้

$$a = \frac{[(y_n - y_{n-1})(x_{n-1} - x_{n+1}) + (y_{n+1} - y_n)(x_n - x_{n-1})]}{[(x_n^2 - x_{n-1}^2)(x_{n-1} - x_{n+1}) + (x_{n+1}^2 - x_n^2)(x_n - x_{n-1})]} \quad (6)$$

$$b = \frac{[(y_n - y_{n-1}) - a(x_n^2 - x_{n-1}^2)]}{[x_n - x_{n-1}]} \quad (7)$$

$$c = y_{n-1} - ax_{n-1}^2 - bx_{n-1} \quad (8)$$

3) หาจุดกลับตัวด้วยหลักการความชันของสมการ Quadratic ซึ่งแต่ละจุดบนเส้นโค้งเมื่อทำการอนุพันธ์สมการที่ (5) จะได้เป็นเส้นของความชันของจุด [13]

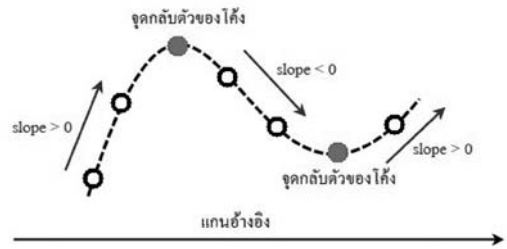
$$\text{slope} = \frac{dy}{dx} = 2ax + b \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) การทำย้อนกลับของสมการความชัน จะได้

$$\tan(\theta) = \frac{dy}{dx} \quad (10)$$

$$\theta = \tan^{-1}(2ax + b)$$

ทิศทางของความชันจากซ้ายไปขวามีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าค่าความชันมีค่าเป็นบวก ทิศทางของความชันจากซ้ายไปขวามีค่าลดลง แสดงว่าค่าความชันมีค่าเป็นลบ และถ้าทิศทางของความชันอยู่แนวระดับ แสดงว่าความชันเป็นศูนย์ ซึ่งจะใช้จุดที่ความชันเท่ากับศูนย์นี้เป็นจุดกลับตัวของเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ทิศทางของความชัน

4) กำหนด Order, Basic function และ Weight ของสมการ NURBS ในส่วนนี้จะทำการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ของสมการ NURBS ก่อน เช่น Order, Knot Vector และ Weight โดย

- Order ที่ใช้ในการสร้างเส้นโค้งคือ Quadratic order: $K=3$ (degree =2)

- Knot Vector จะทำให้เกิด Basic function (สมการที่ 3) ของเส้นโค้ง และจำนวน Knot Vector จะเท่ากับจำนวน Degree+1 และจำนวน Control Point เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$U = (u_0, u_1, \dots, u_{K-1}, u_K, u_{K+1}, \dots, u_{n-1}, u_n, u_{n+1}, \dots, u_{n+K}) \quad (11)$$

โดยค่าของ Knot Vector จะเป็นค่าที่ถูกคำนวณอัตโนมัติจาก Degree+1 และ Control Point ซึ่งจะเริ่มที่ 0 จำนวนเท่ากับ Order (degree+1)

- Weight จำนวนของ w_i จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของ Control Point

โดยเริ่มต้นกำหนดให้ $w_i = 1$

5) สร้าง NURBS Curve จากตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดเบื้องต้น ตามสมการที่ (4)

6) เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างชุดข้อมูลตำแหน่งอากาศยานที่ได้มากับค่าตำแหน่งเส้นโค้งที่ได้จากสมการ NURBS โดยใช้สมการ

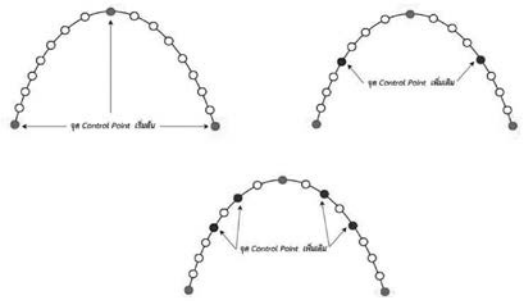
$$Err_{x,y,z} = \left| \frac{Pt_N(x,y,z) - Pt_O(x,y,z)}{Pt_O(x,y,z)} \right| \times 100\% \quad (12)$$

เมื่อ $Err_{x,y,z}$ คือ Absolute error,

$Pt_N(x,y,z)$ คือ ตำแหน่งบน NURBS และ

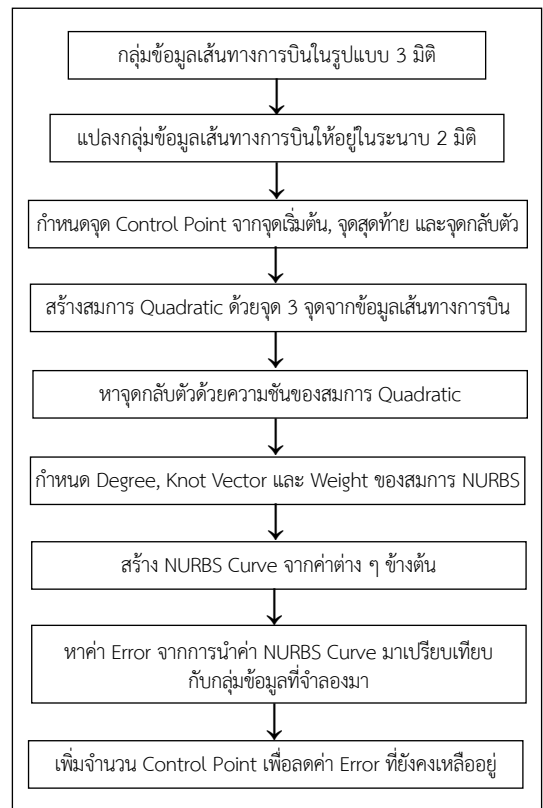
$Pt_O(x,y,z)$ คือ ตำแหน่งข้อมูลชุดข้อมูล

7) เพิ่มจำนวน Control Point, P_i เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่ยังคงหลงเหลืออยู่ โดยจุด P_i ที่เพิ่มขึ้นมาจะเป็นตำแหน่งอยู่ระหว่างจุด P_i เดิมที่มีอยู่แล้ว และใกล้กับตำแหน่งจุดกลับตัว ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเพิ่มจุด Control Point

โดยขั้นตอนการสร้างสมการ NURBS Parametric มีขั้นตอนตามแผนผัง ดังแสดงในรูปที่ 7

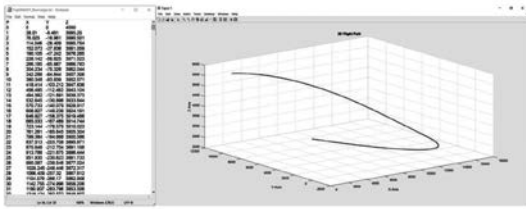


รูปที่ 7 ขั้นตอนการสร้างสมการ NURBS Parametric

5. การทดสอบการสร้างสมการเส้นทางการบิน

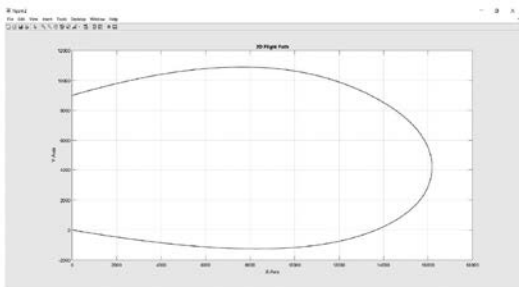
ผลการทดสอบการสร้างสมการ NURBS Parametric โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ แสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1) กลุ่มข้อมูลเส้นทางการบินในรูปแบบ 3 มิติ ของยุทธวิธี Simultaneous Loft



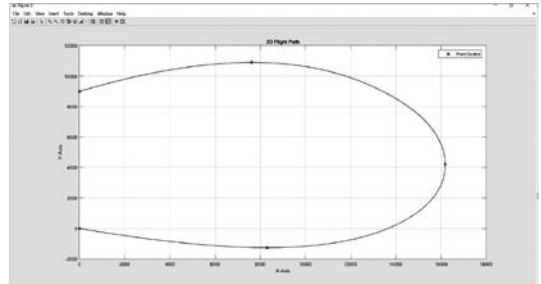
รูปที่ 8 กลุ่มข้อมูลเส้นทางการบินในรูปแบบ 3 มิติ ของยุทธวิธี Simultaneous Loft

2) แปลงกลุ่มข้อมูลเส้นทางการบินให้อยู่ในระนาบ 2 มิติ เพื่อใช้ในการกำหนดจุด Control Point



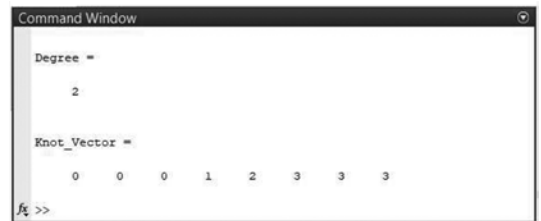
รูปที่ 9 กลุ่มข้อมูลเส้นทางการบินในระนาบ 2 มิติ

3) กำหนดจุด Control Point โดยการทดสอบครั้งแรกได้กำหนด Control Point ได้จำนวน 5 จุด คือ จุดเริ่มต้นของข้อมูล จุดสุดท้ายของข้อมูล และจุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางของข้อมูล ดังรูปที่ 10 ซึ่งจุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางหาได้จากความชันของสมการ Quadratic



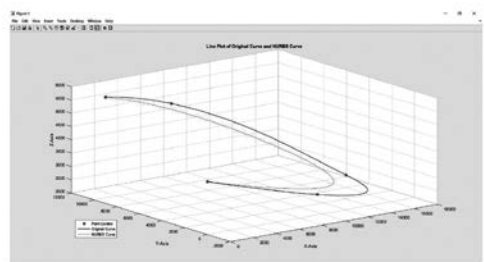
รูปที่ 10 Control Point บนจุดข้อมูลการบิน

4) กำหนด Degree และคำนวณ Knot Vector โดยออเดอร์ที่ใช้ในการสร้างเส้นโค้งคือ Quadratic Order (Order=2) ซึ่งมี Degree เท่ากับ 3 และ จำนวน Knot Vector จะเท่ากับจำนวน Degree (=3) บวกกับจำนวน Control Point = (5) ดังนั้น จำนวน Knot Vector = 8 จำนวน



รูปที่ 11 กำหนดค่า Degree และ Knot Vector

5) นำตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดมาจากข้างต้นมาสร้าง NURBS Curve ได้ดังรูปที่ 12 โดยเส้นสีฟ้าคือ เส้นทางตำแหน่งอากาศยานที่ได้มาจากการจำลองเส้นทางการบินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จุดสีแดงคือ Control Point บนจุดข้อมูลการจำลองเส้นทางการบินและเส้นสีเขียวคือ เส้นทางการบินที่ได้จากสมการ NURBS



รูปที่ 12 ภาพเปรียบเทียบตำแหน่งเส้นทางการบินกับตำแหน่งจาก NURBS

6) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างชุดข้อมูลตำแหน่งอากาศยานที่ได้มากับค่าตำแหน่งเส้นโค้งที่ได้จากสมการ NURBS โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากสมการ NURBS ครั้งแรกนั้นอยู่ที่ 10.33%

```

Degree =
    2

Knot_Vector =
    0    0    0    1    2    3    3    3

Percent_Error =
    10.3302

f1 >>
    
```

รูปที่ 13 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งเส้นทางการบินกับตำแหน่งจาก NURBS

7) ปรับปรุงสมการ NURBS เพื่อลดค่าความผิดพลาดโดยการเพิ่มจำนวน Control Point ตามตารางที่ (1) ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 การลดค่าความผิดพลาดของสมการ NURBS

ลดความผิดพลาดครั้งที่	จำนวน Control Point	จำนวน Knot Vector	% Error
1	9	12	2.5392
2	15	18	0.7775
3	25	28	0.4013

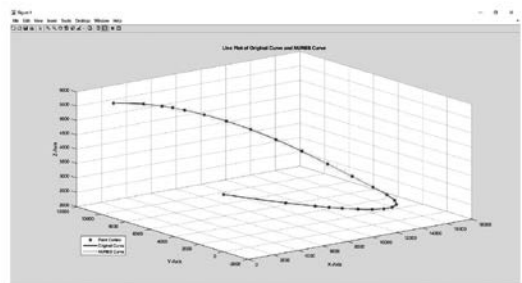
6. ผลการทดสอบการสร้างสมการเส้นทางการบิน

จากผลการทดสอบการสร้างสมการ NURBS Parametric โดยใช้โปรแกรม MATLAB นั้น จะให้โปรแกรมคำนวณหา Control Point แบบอัตโนมัติ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าต่ำกว่า 0.5% จะให้หยุดการทำงาน ซึ่งจากการทดสอบได้มีการสร้างสมการ NURBS Parametric มี

การเพิ่มจำนวน Control Point 4 ครั้ง และค่า NURBS Parametric ที่ได้นั้นมีค่าดังนี้

- Control Point จำนวน 25 จุด คิดเป็น 2.5% ของจำนวนข้อมูลตำแหน่งอากาศยาน
- Order : Order = 2 (Quadratic Order)
- Knot Vector = [0 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 23 23]

โดยผลจากการลดค่าความผิดพลาดในครั้งสุดท้ายนี้แสดงรูปการเปรียบเทียบข้อมูลจำลองเส้นทางการบิน กับเส้นทางการบินที่ได้จากสมการ NURBS ได้ดังรูปที่ 14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นทางการบินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (เส้นสีฟ้า) กับเส้นทางการบินที่ได้จากสมการ NURBS (เส้นสีเขียว) มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งคำนวณความผิดพลาดออกมาได้ประมาณ 0.4%



รูปที่ 14 ภาพเปรียบเทียบตำแหน่งเส้นทางการบินกับตำแหน่งจาก NURBS จากการลดความผิดพลาดครั้งสุดท้าย

7. สรุปผลการดำเนินการ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองเส้นทางการบินของอากาศยาน 3 มิติโดยใช้ยุทธวิธี Simultaneous Loft มาเป็นตัวอย่างของเส้นทางการบินด้วยการสร้างสมการ NURBS Parametric

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพื้นฐานมาจาก Spline เนื่องจาก NURBS สามารถแทนเส้นโค้งได้ทุกชนิดและลักษณะของเส้นทางการบินของอากาศยานต่าง ๆ นั้นก็มีส่วนเส้นโค้ง สมการ NURBS Parametric จึงเหมาะสำหรับนำมาสร้างเส้นทางการบินได้ การทดสอบการสร้างสมการ NURBS Parametric จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์คือจำนวน Control Point แล้วทำการเปรียบเทียบหาความผิดพลาดระหว่างชุดข้อมูลตำแหน่งอากาศยานที่ได้มากับค่าตำแหน่งเส้นโค้งที่ได้จากสมการ NURBS Parametric โดยเริ่มต้นการคำนวณจะเลือก Control Point จากจุดเริ่มต้น จุดกลับตัว และจุดสุดท้ายของชุดข้อมูลตำแหน่งอากาศยาน โดยมีการกำหนดเกณฑ์เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไว้ที่ 0.5% ถ้าความผิดพลาดยังสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะมีการเพิ่ม Control Point ระหว่างจุดเดิม และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอีกครั้ง และหยุดการปรับค่า NURBS Parametric เมื่อค่าความผิดพลาดต่ำกว่า 0.5% จากผลการดำเนินการมีการปรับปรุงค่า NURBS Parametric จำนวน 4 ครั้ง และค่าความผิดพลาดที่ได้น้อยที่สุดอยู่ที่ 0.4% แสดงให้เห็นว่า การสร้างสมการ NURBS Parametric นั้นสามารถจำลองเส้นทางการบินของอากาศยาน 3 มิติได้ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้เป็นการสร้างเส้นทางการบินแบบวิถีเลือกได้อีกวิธีการหนึ่ง

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Liu Y. & Hansen M. 2018. Predicting Aircraft Trajectories: A Deep Generative Convolutional Recurrent Neural Networks Approach, Institutes of Transportation Studies, University of California, Berkeley

[2] Pang Y., Xu N & Liu Y. 2019. Aircraft Trajectory Prediction using LSTM Neural Network with Embedded Convolutional Layer. Annals Conference of The Prognostics and Health Management Society.

[3] Xu X., Yang R., Zhang T. & Yang B. 2019. Trajectory Prediction of Target Aircraft in Air Combat Based on GA-OIF-Elman Neural Network. IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA).

[4] Rodin E.Y., & Amin S.M. 1992. Maneuver prediction in air combat via artificial neural network. Computer Mat. Applic, Vol. 24, No.3, pp. 95-112.

[5] Lin Y., Zhang J. & Liu H. 2018. An algorithm for trajectory prediction of flight plan based on relative motion between positions. Front Inform Technol Electron Eng, 19 (7) :905-916.

[6] Ulf A. 2020. Computer Graphics Curves and Surfaces.

[7] Lei W.T., Sung M.P., Lin L.Y. & Huang J.J. 2007. Fast real-time NURBS path interpolation for CNC machine tools. Int. J. Mach. Tool Manufact., 47 (10) pp. 1530-1541.

[8] Lei W.T. & Sung M.P. 2008. NURBS-based fast geometric error compensation for CNC machine tools. Int. J. Mach. Tool Manufact., 48 (3-4) , pp. 307-319.

[9] Liang F., Kang Ch. & Fang F. 2020. A smooth tool path planning method on NURBS surface based on the shortest boundary

geodesic map. *Int. J. Manufact Proc.*, 58 pp. 646-658.

[10] Ji Sh., Lei L., Zhao J., Lu X. & Gao H. 2021. An adaptive real-time NURBS curve interpolation for 4-axis polishing machine tool. *Robot. Comput. Integrat. Manuf.*, 67

[11] John, F., J.L. Lowther, & C.K. Shene. 2004. If You Know BSplines Well, You Also Know NURBS!. *ACM SIGCSE Bulletin* 36(1):343-347.

[12] Johnson D.L. 1996. *Multi-Command Handbook* 11-F16. Vol.5.

[13] Chouychai B. 2015. Point cloud data reduction with tangent function method for nurbs curve and surface fitting. *International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*.

การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพของระบบติดตามตำแหน่งสำหรับ ปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

ธนทรศน์ แซ่ลิ้ม^{*1} เบญจมา บุญเอื้อ¹ วรารุณี ภิรมย์¹
สรภพ สุภชัยพานิชพงศ์¹ และมาลินดา หงษ์ทอง¹

วันที่รับ 4 เมษายน 2564 วันที่แก้ไข 6 สิงหาคม 2564 วันตอบรับ 6 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอการออกแบบพัฒนาและประเมินผลประสิทธิภาพของระบบติดตามตำแหน่งเจ้าหน้าที่สำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเครือข่ายสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สายระยะไกล (LoRaWAN) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบมาสำหรับติดตั้งที่ตัวของเจ้าหน้าที่หรือยานพาหนะสำหรับการติดตามตำแหน่งและรายงานสถานะของเจ้าหน้าที่ เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการกิจต่าง ๆ ทางทหาร เช่น การกิจลาดตระเวน ฝ้าตรวจ ปิดล้อมจับกุม หรือหาข่าว เป็นต้น โดยหลักการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งจะมีระบบประมวลผลกลางทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ได้แก่ เซนเซอร์บอกพิกัดผ่านดาวเทียม เซนเซอร์ตรวจวัดความเร็ว 3 แกน เซนเซอร์ตรวจวัดความดัน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ระดับพลังงาน และส่งข้อมูลดังกล่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ไปยังศูนย์บัญชาการและควบคุมผ่านเกตเวย์ เพื่อประมวลผลและแสดงผลข้อมูลบนแผนที่สถานการณ์ ซึ่งจะช่วยให้ศูนย์บัญชาการและควบคุม หัวหน้าชุดปฏิบัติการ ทราบถึงภาพรวมของตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ในแต่ละหน่วยที่เข้าร่วมในการปฏิบัติการกิจ ทำให้สามารถสั่งการและตัดสินใจได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมถึงเพิ่มอัตราความสำเร็จและลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับเจ้าหน้าที่ทหารในการปฏิบัติการกิจอีกด้วย

คำสำคัญ : ระบบติดตามตำแหน่ง, ไอโอที, เครือข่ายสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สายระยะไกล, โลร่าแวน, โลร่า, ระบบบัญชาการและควบคุม, จีพีเอส, เซนเซอร์

¹ ส่วนงานวิศวกรรมควบคุมและการสื่อสาร - RCC, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

^{*} อีเมลติดต่อผู้เขียน : thanathat.s@dti.or.th

Design and Performance Evaluation of Tactical Tracking Operations Based on LoRaWAN Technology

Thanathat Saelim^{*1} Bencha Boon-uea¹ Varavut Pirom¹
Soraphob Suparchaiparnitchapong¹ and Marinda Hongthong¹

Received 4 April 2021, Revised 6 August 2021, Accepted 6 August 2021

Abstract

This paper presents the design, development, and system efficiency evaluation of a Troop Tracking Equipment operating via a Long-Range Wide Area Network (LoRaWAN). At Defence Technology Institute, a LoRaWAN system has been developed for use on body of a soldier or on a vehicle in order to track the object's position as well as report certain status. The system can be used for supporting various missions such as surveillance, monitoring, seizure, or intelligence gathering. The system is operated by having a main central processor read certain data from sensors within the module, which include the GPS, 3-axis accelerometer, barometric sensor, temperature sensor, humidity sensor, as well as power level of the module. These data will be transmitted from a client module through LoRaWAN to the Control Center via a Gateway module. At the Control Center, the data will be displayed on a Situation Map so that the Team Supervisor will see and understand overall picture as well as position of all team members on the mission. This results in a precise command and decision-making as well as an increasing success rate of the operation and therefore minimizes any loss which might occur to soldiers in the mission.

Keywords : Tactical Tracking, Internet of Things, IoT, LoRa, LoRaWAN, Command Control, Military Operations, GPS, Sensor

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

^{*} Corresponding author e-mail: thanathat.s@dti.or.th

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

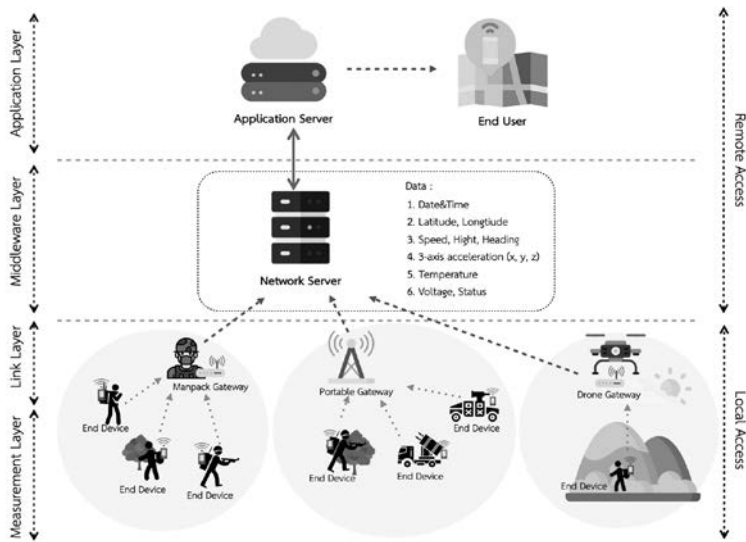
เนื่องจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศเป็นสถาบันที่มีภารกิจในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการทำงานของเจ้าหน้าที่ทางด้านความมั่นคง ซึ่ง สทป. มีการดำเนินงานโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบสารสนเทศแบบรวมศูนย์และโปรแกรมประยุกต์สำหรับเจ้าหน้าที่หน่วยงานด้านความมั่นคง สนับสนุนการแก้ไขปัญหา 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่าง สทป. และกองอำนวยการรักษาความมั่นคงภายในภาค 4 ส่วนหน้า ทำให้ สทป. ทราบถึงความต้องการหรือข้อขัดข้องในการปฏิบัติภารกิจต่าง ๆ ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ ปัญหาในการบัญชาการและควบคุมในกรณีที่มีการปฏิบัติภารกิจทางทหาร เช่น ภารกิจลาดตระเวน ฝึาตรวจ หาข่าว รวมถึงการปิดล้อมจับกุม ในปัจจุบันยังไม่มีการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการสนับสนุนการทำงานของเจ้าหน้าที่ ทำให้ผู้บังคับบัญชาและหัวหน้าชุดไม่ทราบถึงภาพรวมของตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ อีกทั้งในบางภารกิจมีหลายหน่วยงานด้านความมั่นคงเข้าร่วมในการปฏิบัติภารกิจโดยขาดการประสานงานก่อนปฏิบัติภารกิจ ทำให้เจ้าหน้าที่ไม่ทราบตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ภายในหน่วยและนอกหน่วยส่งผลให้การปฏิบัติภารกิจขาดประสิทธิภาพรวมถึงอาจก่อให้เกิดความสูญเสียของเจ้าหน้าที่ทั้งภายในและภายนอกหน่วย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวโดยการนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) [1] เข้ามาช่วยในการสื่อสาร โดยหลักการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งจะมีระบบประมวลผลกลางทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่

ติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ ได้แก่ เซนเซอร์บอกพิกัดผ่านดาวเทียม เซนเซอร์วัดความเร่ง 3 แกน เซนเซอร์วัดความดัน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ระดับพลังงาน และส่งข้อมูลดังกล่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN [2] ไปยังเกตเวย์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบเคลื่อนย้ายได้และแบบพกพา โดยเกตเวย์ประเภทแรกจะติดตั้งในพื้นที่ที่เป็นจุดสูงสามารถรับสัญญาณจากโหนดได้แบบไม่มีสิ่งกีดขวางส่วนในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางจะใช้งานเกตเวย์แบบพกพาโดยจะติดตั้งอยู่กับหัวหน้าชุดที่อยู่ในพื้นที่ภารกิจ เกตเวย์ชนิดพกพานี้ สามารถติดตั้งอยู่กับอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน ในกรณีที่มีการปฏิบัติการในระยะไกลหรือพื้นที่ที่มีภูมิประเทศเป็นข้อจำกัดในการรับส่งข้อมูล หลังจากนั้นเกตเวย์จะส่งข้อมูลต่อไปยังศูนย์บัญชาการและควบคุม เพื่อประมวลผลและแสดงผลข้อมูลบนแผนที่สถานการณ์ดังรูปที่ 1

ในบทความวิจัยนี้ในส่วนแรกจะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ส่วนที่ 2 จะเป็นงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการสื่อสารและการระบุตำแหน่ง ส่วนที่ 3 เป็นหลักการของเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สาย (LPWAN) ส่วนที่ 4 จะเป็นหลักการในการออกแบบระบบทั้งในส่วนของอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งและระบบแสดงผล ส่วนที่ 5 เป็นการประเมินประสิทธิภาพของระบบและในส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลการออกแบบพัฒนาและการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ในการพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าว จะมีเทคโนโลยีหลักอยู่ 2 เทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลและเทคโนโลยีที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง ซึ่งในส่วนองเทคโนโลยีที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลได้มีงานวิจัยที่นำเสนอการใช้ระบบโครงข่ายโทรศัพท์



รูปที่ 1 การทำงานของระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการทางด้านยุทธการด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

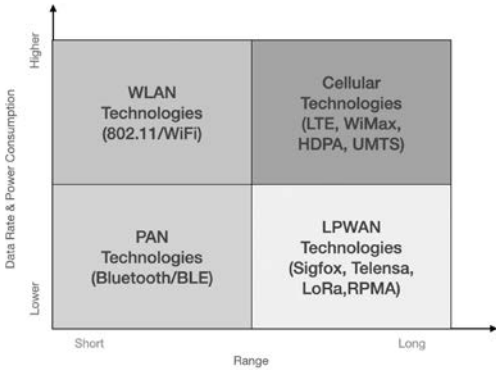
เคลื่อนที่ในการส่งข้อมูลต่าง ๆ ไปยังระบบแสดงผลด้วยระบบจีพีอาร์เอส [3, 4] และข้อความสั้น [5, 6, 7, 8] ซึ่งเป็นระบบที่ใช้พลังงานสูงและสามารถใช้งานได้เฉพาะบริเวณที่มีสัญญาณครอบคลุม งานวิจัย [9, 10, 11] ได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยี Wi-Fi ในการส่งข้อมูลซึ่งสามารถสนับสนุนการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากด้วยความเร็วสูงได้แต่ระยะรับส่งข้อมูลอยู่ในระยะจำกัดและมีโอกาสเกิดการรบกวนของสัญญาณสูง เนื่องจากใช้ความถี่ย่านสาธารณะ (ISM-Band)

ในงานวิจัย [12, 13] ได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยี IEEE802.15.4 หรือ Zigbee เข้ามาใช้ในการส่งข้อมูลตำแหน่งและสถานะของเป้าหมาย ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวใช้พลังงานต่ำมีระยะการส่งข้อมูลในระยะจำกัดแต่มีคุณสมบัติในการส่งข้อมูลต่อยุทธวิธีแบบ Mash รวมถึงมีการนำเสนอสัญญาณ NB-IoT เข้ามาเป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลด้วย [13, 14] รวมถึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีระบุตำแหน่งและเทคโนโลยี NB-IoT อยู่ในโครงสร้างด้วยกัน [15] ซึ่งมีคุณสมบัติหลักคือ สามารถสื่อสารข้อมูลโดยใช้พลังงานต่ำ แต่

จำเป็นต้องเสียค่าบริการให้กับผู้ให้บริการ เนื่องจากอาศัยระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการส่งข้อมูล

ในส่วนของเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งมีการนำเสนองานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีที่หลากหลายมีการใช้ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ของโครงข่ายระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มาใช้ในการระบุตำแหน่งของเป้าหมาย [16] การใช้เทคโนโลยีเชิงแสงในย่านความถี่อินฟราเรดช่วยในการระบุตำแหน่งซึ่งตัวของเป้าหมายจะมีอุปกรณ์กำเนิดแสงอินฟราเรดและใช้กล้องที่สามารถแสดงภาพย่านอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์ในการแสดงตำแหน่งของเป้าหมาย [17, 18] รวมถึงมีการใช้ประโยชน์จาก RSSI ของสัญญาณจากความถี่คลื่นวิทยุของเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น วิทยุ [19] บลูทูธ [20] หรือ โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (WSN) [21, 22, 23] เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งของเป้าหมาย ซึ่งจำเป็นต้องมีฐานข้อมูลที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังเป้าหมายไม่น้อยกว่า 2 สถานี เพื่อให้ลูกข่ายสามารถคำนวณพิกัดของตัวเองได้อย่างถูกต้องซึ่ง

วิธีดังกล่าวมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของเป้าหมายไปยังแต่ละสถานีฐานอีกด้วย รวมถึงมีงานวิจัย [24] ที่นำคุณลักษณะของสัญญาณ (Fingerprint signal) มาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งและนำเทคนิคของ Machine Learning เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาตำแหน่งอีกด้วย

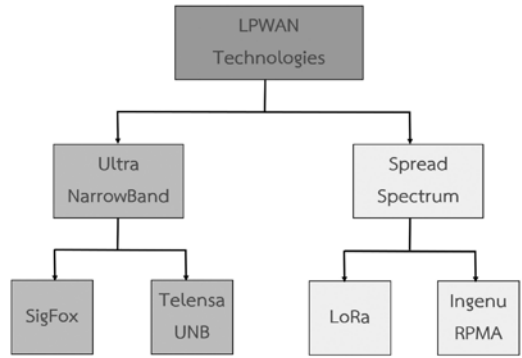


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบอัตราเร็วในการส่งข้อมูล พลังงานที่ใช้ และระยะสื่อสารของแต่ละเทคโนโลยี

โดยในงานวิจัยส่วนใหญ่ในการหาตำแหน่งจะนำเสนอการใช้เทคโนโลยีจีพีเอสเข้ามาช่วยในการระบุตำแหน่งเป้าหมาย [3, 25] ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ แต่มีข้อจำกัดคือระบบจีพีเอสใช้พลังงานสูงและมีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่ออยู่ในอาคารหรือพื้นที่ที่มีการบดบังจากสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอส

3. เทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สาย (LPWAN)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายระยะไกลกำลังงานต่ำ ซึ่งในปัจจุบันมีหลายเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน โดยจะแบ่งประเภทออกตามคุณสมบัติของเทคโนโลยี ดังรูปที่ 2 เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล ระยะทางในการสื่อสารและระดับพลังงานที่ใช้ เป็นต้น



รูปที่ 3 เทคโนโลยีของ LPWAN แบ่งตามเทคนิคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณข้อมูลเข้าไปยังแถบความถี่

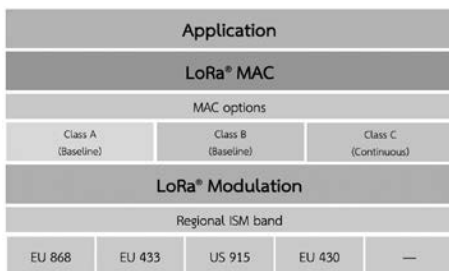
ในส่วนของเทคโนโลยี LPWAN มีการแบ่งเทคโนโลยีออกตามเทคนิคที่ใช้ในการแปลงสัญญาณข้อมูลเข้าไปยังแถบความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งจะมีการใช้งานอยู่ 2 เทคนิค ได้แก่ Ultra-Narrowband (UNB) และ Spread Spectrum (SS) ดังรูปที่ 3 โดยในการเลือกใช้งานเทคโนโลยีระบบสื่อสาร IoT ส่วนใหญ่ผู้ใช้งานจะเลือกประเมินจากความต้องการพื้นฐานในการสื่อสารข้อมูล เช่น รัศมีการให้บริการ ปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล ระดับพลังงานที่ใช้ต่ำ รวมถึงปริมาณการรองรับจำนวนของลูกข่ายซึ่งแต่ละเทคโนโลยีจะมีรายละเอียดและคุณสมบัติดังตารางที่ 1

3.1 LoRaWAN เทคโนโลยีสื่อสารระยะไกล หรือ LoRa เป็นคำที่ย่อมาจาก Long-Range ถูกพัฒนาโดยบริษัท Semtech โดยเทคโนโลยี LoRa ในประเทศไทยได้รับอนุญาตให้ใช้ย่านความถี่ที่ 923 MHz ซึ่งเป็นย่าน ISM-Band โดยเทคโนโลยี LoRa มีแบนด์วิธ (BW) ขนาด 125, 250 หรือ 500 kHz ขึ้นอยู่กับย่านความถี่ที่อนุญาตใช้งานในแต่ละประเทศ LoRa มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ Frequency-Shift Keying (FSK) และแบบ Chirp Spread Spectrum (CSS) โดยอัตราเร็วในการส่งข้อมูลหรือ Data Rate (DR) หรือ บิตเรต (Rb) ซึ่งมีหน่วยเป็นจำนวนบิตต่อวินาที

โดยอัตราของ R_b จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจำนวนบิตของค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัว (Spreading factor, SF) ซึ่ง SF จะมีขนาด 7-12 บิต จำนวนบิตดังกล่าวจะแปรผกผันกับ R_b ดังสมการที่ 1

$$R_b = SF * \frac{\left(\frac{4}{4 + CR}\right)}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)} \quad (1)$$

โดยจะเห็นได้ว่าหากจำนวนบิตของ SF มาก อัตราเร็วในการส่งข้อมูลจะต่ำลง แต่จะมีคุณสมบัติในการทนต่อสภาพการสื่อสารที่มีสัญญาณรบกวนสูงและมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยอัตราการเข้าไค้ด (Code rate, CR) จะมีค่าอยู่ที่ 1-4 โดยทั่วไปอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของ LoRa จะอยู่ที่ 0.3 ถึง 50 kbps [26] ซึ่งเทคโนโลยี LoRa ทำงานบนโปรโตคอล LoRaWAN Stack ดังรูปที่ 4 ซึ่งถูกกำกับดูแลโดย LoRa Alliance โดยหลักการทำงานคือ อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะส่งข้อมูลไปยังปลายทางผ่านเกตเวย์ ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถสื่อสารได้ไกลไม่ต่ำกว่า 10 กิโลเมตร ในขณะที่เกตเวย์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งข้อมูลของลูกข่ายไปยังเซิร์ฟเวอร์ด้วยระบบเครือข่าย TCP/IP ผ่านระบบ LAN หรือระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่



รูปที่ 4 โปรโตคอล LoRaWAN Stack

3.2 Sigfox เป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานในย่านความถี่ ISM-Band มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่ 100-600 bps มีระยะในการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 10 - 50 กิโลเมตร เทคโนโลยีของ Sigfox มีข้อจำกัดคือ ในแต่ละอุปกรณ์ จะมีการจำกัดการรับส่งข้อมูลในแต่ละวันเพื่อคงคุณสมบัติในการประหยัดพลังงาน กล่าวคือ สามารถส่งข้อมูลได้วันละ 140 ข้อความ และรับข้อมูลได้วันละ 4 ข้อความ [27] โดย Sigfox จะใช้การประมวลผลบน Cloud เป็นหลัก ในส่วนของคุณสมบัติการทนทานต่อสภาพสัญญาณรบกวนของ Sigfox จะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย ได้แก่ เวลา ความถี่ และระยะทาง

3.3 Random Phase Multiple Access (RPMA)

เทคโนโลยี RPMA จะใช้ช่วงความถี่ 2.4 GHz ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งช่วงความถี่ที่ใช้จะแตกต่างกับเทคโนโลยี LoRa และ Sigfox ซึ่งเป็นการใช้งานความถี่ที่ต่ำกว่า 1 GHz โดย RPMS จะใช้เทคนิค Spread Spectrum ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณให้ครอบคลุมแถบความถี่ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งเป็นการพัฒนาอยู่บนพื้นฐานของเทคโนโลยี LPWAN โดยบริษัท Ingenu ซึ่งในการรับส่งข้อมูลจะมีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยเทคนิค Advance Encryption Standard หรือ AES ขนาด 128 บิต โดยเทคโนโลยี RPMA มีข้อดีคือ สามารถใช้ความถี่ดังกล่าวได้ทั่วโลก เนื่องจากเป็นความถี่ ISM-Band ทำให้มีกำลังส่งสูง จึงสามารถสื่อสารข้อมูลในระยะไกลได้ดี โดยอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลของ RPMA สูงสุดในการดาร์วินโหลดอยู่ที่ 156 kbps และอัฟโหลดจะอยู่ที่ 624 kbps จะเห็นได้ว่า RPMS จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ไกลกว่า LoRa และ Sigfox แต่จะมีข้อเสียคือ ใช้พลังงานที่สูงเกิดสัญญาณรบกวนจากการใช้งานความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะได้ง่ายรวมถึงข้อกำหนดในการควบคุมกำลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณของบางประเทศ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ UNB และ Spread Spectrum ของเทคโนโลยี LPWAN [27]

	SigFox	Telensa	LoRaWAN	RPMA
Band	Sub-GHz ISM: EU (868 MHz), US (902 MHz)	Sub-GHz ISM: EU (868 MHz), US (915 MHz), AS (430 MHz)	Sub-GHz ISM: EU (433, 868 MHz), US (915 MHz)	2.4 GHz ISM
Data rate	UL: 100/600 bps DL: 600bps	UL: 62.5 bps DL: 500bps	LoRa: 0.3-5 kbps FSK: 50 kbps	UL: 624 Kbps DL: 156 kbps
Bandwidth	UL: 100/600 bps DL: 1.5kHz	100kHz	125 kHz	1 MHz
Modulation	UL: UNB/DBPSK, DL: GFSK	UNB 2-FSK	LoRa/FSK	RPMA/DSSS
Range	10 km (urban), 50 km (rural)	3 km (urban), 8km (rural)	5 km (urban), 15km (rural)	15 km (urban), 500 km (LoS)
MAC	R-FDMA	Not Known	Pure ALOHA	CDMA-like
Max. Payload Size (bytes)	UL: 12, DL:8	64 k	250	64
Error Correction	UL: CRC-16, DL: CRC-8	CRC	CRC-8/16	16 bits hash, AES 128 bits

3.4 Telensa เป็นระบบสื่อสารอีกชนิดหนึ่ง ที่ใช้เทคโนโลยี UNB ซึ่งพัฒนาอยู่บนพื้นฐานของการส่งข้อมูลไร้สายระยะไกลที่ใช้พลังงานต่ำ พัฒนาโดยบริษัท Telensa โดยใช้งานความถี่วิทยุย่าน ISM-Band ส่งข้อมูลขนาดเล็ก เชื่อมต่อเข้ากับระบบ IoT โดยใช้ระบบบริหารจัดการกลาง (Central management system, CMS) ที่ชื่อว่า Telensa PLANet ใช้ในการควบคุมไฟส่องสว่างของเส้นทางการจราจร ซึ่งมีการใช้งานอยู่ไม่ต่ำกว่า 30 ประเทศทั่วโลก

4. หลักการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

ส่วนของหลักการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN จะกล่าวถึงปัจจัยสำคัญที่ผู้วิจัยได้นำมาใช้ในการออกแบบ ได้แก่ แนวทางการออกแบบระบบ โครงสร้างระบบโดยรวม รายละเอียดอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้ การออกแบบ

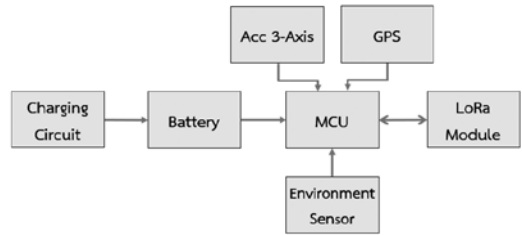
ประสิทธิภาพในการสื่อสาร รวมถึงระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ ตามลำดับดังนี้

4.1 แนวทางในการออกแบบ เนื่องจากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะมีเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานด้านความมั่นคงเป็นผู้ใช้งานอุปกรณ์ ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลที่ได้รับจากการปฏิบัติการกิจของหน่วยผู้เข้ามาเป็นปัจจัยในการออกแบบระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) อุปกรณ์ต้องมีขนาดเล็ก ติดตั้งง่าย สามารถพกพาได้สะดวกไม่เป็นภาระแก่เจ้าหน้าที่
- 2) ระบบสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ติดตามและเกตเวย์ต้องเป็นระบบเครือข่ายส่วนบุคคล (Private network) เพื่อให้สอดคล้องกับการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ซึ่งมีความจำเป็นต้องปฏิบัติการกิจในภูมิประเทศที่เป็นภูเขาหรือป่าทึบโดยในบางพื้นที่อยู่นอกพื้นที่ให้บริการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่
- 3) คลื่นความถี่ที่ใช้เป็นย่านความถี่ ISM Band
- 4) รัศมีในการให้รับส่งข้อมูลระหว่างโหนดและเกตเวย์ต้องครอบคลุมไม่น้อยกว่า 20 กม. แบบไม่มีสิ่งกีดขวาง (Line of sight, LoS)
- 5) รองรับจำนวนผู้ใช้งานไม่ต่ำกว่า 100 โหนด และสามารถขยายระบบได้ในอนาคต
- 6) อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับเจ้าหน้าที่จะต้องใช้พลังงานต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับการปฏิบัติการกิจเป็นระยะเวลาหลายวัน
- 7) ศูนย์บัญชาการและควบคุมสามารถแสดงผลตำแหน่งและสถานะของเจ้าหน้าที่ได้แบบเวลาจริง

4.2 โครงสร้างของระบบ โครงสร้างของระบบติดตามตำแหน่งสำหรับปฏิบัติการด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN จะประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลกลางที่ใช้ในการควบคุมและรับส่งข้อมูลกับโมดูลเซนเซอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ ดังรูปที่ 5

ซึ่งประกอบด้วยระบบสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำไร้สาย ระยะไกลเช่นเซอร์รายงานพิกัดผ่านดาวเทียม เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง 3 แกน เซนเซอร์ตรวจวัดสถานะแวดล้อม แหล่งพลังงาน รวมถึงอุปกรณ์ LoRa เกตเวย์ โดยรูปที่ 6 แสดงถึงอุปกรณ์ติดตามที่ได้ ออกแบบขึ้น ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 โครงสร้างของอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง

4.2.1 หน่วยประมวลผลกลาง (MCU) อุปกรณ์ประมวลผลกลางใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิต ตระกูล ARM Cortex M5 ชนิดใช้พลังงานต่ำ ทำหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูล อ่านค่าจากเซนเซอร์ต่าง ๆ และส่งข้อมูลที่ได้ไปยังโมดูลสื่อสาร SX1276 เพื่อส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

4.2.2 ระบบสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สายระยะไกล การสื่อสารข้อมูลจากอุปกรณ์รายงานตำแหน่งไปยังศูนย์บัญชาการและควบคุมจะใช้เทคโนโลยี LoRaWAN ในการรับส่งข้อมูลเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานต่ำ มีความสามารถในการสื่อสารได้ในระยะไกล อีกทั้งยังมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสูง โดยเลือกใช้ชิปเซต SX1276 ของบริษัท Semtech ซึ่งมีกำลังส่งสูงสุดที่ 100mW มีความไวในการรับสัญญาณอยู่ที่ -148 dBm โดยในประเทศไทยหน่วยงาน กสทช. ได้อนุญาตให้เทคโนโลยี LoRaWAN ใช้งานในย่านความถี่ 923 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะ

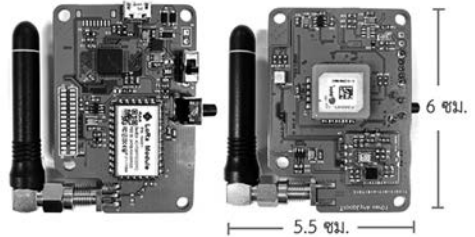
4.2.3 เซนเซอร์รายงานพิกัดผ่านดาวเทียม เป็นอุปกรณ์ที่เอาไว้บอกพิกัดตำแหน่งของเจ้าหน้าที่ทหารหรือยานพาหนะ โดยอุปกรณ์จีพีเอสนี้จะรายงานข้อมูลตามมาตรฐาน MNEA-0183 ยกตัวอย่างเช่น วัน-เวลา สถานะจีพีเอส แลตติจูด ลองติจูด ความเร็วในการเคลื่อนที่ ทิศทางของการเคลื่อนที่ ความสูงจากระดับน้ำทะเล เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปยังระบบประมวลผลและแสดงผล เพื่อแสดงผลข้อมูลดังกล่าวบนระบบแผนที่สถานการณ์ โดยเซนเซอร์จีพีเอสที่เลือกใช้ เป็นของบริษัท U-blox รุ่น SAM-M8Q ซึ่งมีจุดเด่นคือ มีสายอากาศภายในโมดูล กินพลังงานต่ำ มีขนาดเล็กและมีความไวในการรับสัญญาณจากดาวเทียมสูง

4.2.4 เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง 3 แกน เป็นเซนเซอร์ทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่าความเร่งในแนวแกน 3 แกน ได้แก่ แกน x แกน y และ แกน z โดยจะเลือกใช้เซนเซอร์ LIS3DHTR ซึ่งโมดูลนี้จะสื่อสารข้อมูลกับหน่วยประมวลผลกลาง ด้วย I2C เมื่อทราบถึงค่าความเร่งที่ได้ในแต่ละแนวแกนแล้ว จะสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลเพื่อรายงานถึงสถานะของเจ้าหน้าที่ทหารได้

4.2.5 เซนเซอร์ตรวจวัดสถานะแวดล้อม เป็นเซนเซอร์ที่ทำการรวมคุณสมบัติของเซนเซอร์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ เซนเซอร์ตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันอากาศ และเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยเซนเซอร์ BME680 จะเชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลกลางด้วยการสื่อสารแบบ I2C

4.2.6 แหล่งกำเนิดพลังงาน เป็นระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับหน่วยประมวลผลกลางและโมดูลเซนเซอร์ต่าง ๆ โดยแหล่งจ่ายไฟเป็นแบตเตอรี่

ขนาดแรงดัน 3.7 โวลต์ ขนาด 1000 มิลลิแอมป์ รวมถึงมีวงจรจัดเรียงกระแสไฟเพื่อทำการชาร์จพลังงานให้กับแบตเตอรี่อีกด้วย



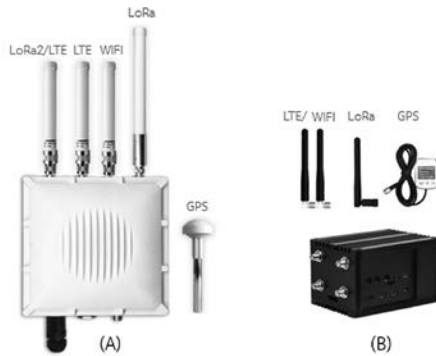
รูปที่ 6 อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งที่ได้ทำการออกแบบ

4.2.7 อุปกรณ์ LoRa เกตเวย์ ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง หากอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ในพื้นที่ให้บริการของเกตเวย์ใด เกตเวย์นั้นจะรับสัญญาณจากอุปกรณ์และส่งข้อมูลต่อไปยัง Application Server โดยจะส่งผ่านระบบ Network Server เพื่อไปแสดงผลบนระบบแผนที่สถานการณ์ ซึ่ง LoRa เกตเวย์เป็นแบบ Commercial off-the-shelf (COTS) โดยจะมี 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 7 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) เกตเวย์ชนิดเคลื่อนย้ายได้ (Portable gateway) เป็นเกตเวย์ที่มีคุณลักษณะในการติดตั้งได้ทั้งแบบถาวรและแบบเคลื่อนที่ได้ตามลักษณะของภารกิจ โดยเกตเวย์ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน LoRaWAN ได้ 16 ช่องสัญญาณ มีกำลังส่งสูงสุดที่ 27 dBm ความไวในการรับสัญญาณที่ -139 dBm มีระบบจีพีเอสแสดงพิกัดของเกตเวย์ได้สามารถเชื่อมต่อระบบ Wi-Fi และโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้มีแบตเตอรี่ภายใน รวมถึงมีคุณสมบัติในการทนต่อสภาพแวดล้อมสูง โดยผ่านการรับรองมาตรฐาน IP-67

2) เกตเวย์ชนิดพกพา (Manpack gateway) เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการเคลื่อนย้ายและติดตั้งได้อย่างสะดวกซึ่งเกตเวย์แบบพกพาจะมีความเหมาะสมในการใช้งานในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางในการรับส่ง

สัญญาณ เกตเวย์ ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน LoRaWAN จำนวน 8 ช่องสัญญาณ มีกำลังส่งอยู่ที่ 27 dBm ความไวในการรับสัญญาณ -139 dBm และมีระบบจีพีเอสแสดงพิกัดของเกตเวย์ได้ โดยในการใช้งานสามารถติดตั้งไว้กับหัวหน้าชุดที่เข้าปฏิบัติการกิจเพื่อรับสัญญาณจากเจ้าหน้าที่ชุดปฏิบัติการหรือติดตั้งบนโดรนเพื่อสนับสนุนภารกิจในลักษณะภูมิประเทศที่มีการกีดขวางสัญญาณสื่อสารรวมถึงยังสามารถใช้งานในการกึ่งค้นหาได้อีกด้วย



รูปที่ (7A) เกตเวย์ชนิดเคลื่อนย้ายได้
รูปที่ (7B) เกตเวย์ชนิดพกพา

4.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร
ประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร (Link budget) จะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ภาคส่งได้ทำการส่งออกไปและกำลังงานที่ภาครับได้รับ หากค่า Link Budget มีค่าสูง หมายความว่า ระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะไกลซึ่งการคำนวณ Link Budget จะมีพารามิเตอร์หลายชนิดที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบสื่อสารเข้ามาเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่าง เช่น กำลังงานที่ใช้ในการส่ง กำลังของสายอากาศ (Gain) ค่าการสูญเสียระหว่างการสื่อสาร (Path loss) ค่าการสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation loss) ค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณ

และจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ (Cable & connector loss) ค่าความไวในการรับสัญญาณ (Receiver sensitivity) เป็นต้น ซึ่งการคำนวณ Link Budget จะทำให้เราสามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสารที่ได้ทำการออกแบบขึ้นได้เพื่อลดปัญหาการออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพเกินความจำเป็น ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบสื่อสารที่ไม่คุ้มค่าเกิดขึ้น ซึ่งระบบ LPWAN ส่วนใหญ่จะมีค่า Link Budget อยู่ที่ 156 dB ถึง 172 dB โดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 160 dB [28] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\text{Received Power (dBm)} = \text{Transmitted Power (dBm)} + \text{Gains (dB)} - \text{Losses (dB)}$$

(2)

ซึ่งจากสมการที่ 2 นี้ สามารถนำพารามิเตอร์ต่างที่เกี่ยวข้องในการคำนวณกำลังส่งของอุปกรณ์สื่อสารและค่าการสูญเสียต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ 3

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M - L_{RX}$$

(3)

จากการคำนวณในสมการที่ 3 ทำให้เราทราบถึงค่ากำลังงานที่ภาครับได้รับ ซึ่งจะสามารถทำให้ทราบถึงค่ากำลังงานคงเหลือของระบบ (Link margin) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{Link Margin} = P_{RX} - S_{RX}$$

(4)

โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะมีความหมายดังต่อไปนี้

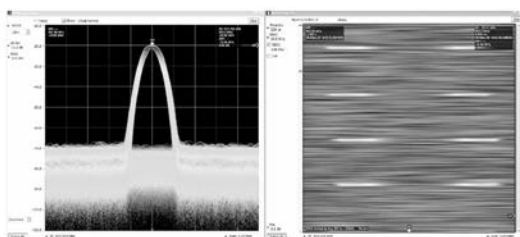
- P_{RX} คือ กำลังงานที่ได้รับของภาครับ (dBm)
- P_{TX} คือ กำลังงานส่งของภาคส่ง (dBm)
- G_{TX} คือ เกนของสายอากาศภาคส่ง (dBi)
- G_{RX} คือ เกนของสายอากาศภาครับ (dBi)
- L_{TX} คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณและจุดเชื่อมต่อของภาคส่ง (dB)

- L_{FS} คือ ค่าการสูญเสียระหว่างการส่งข้อมูล (dB)
- L_M คือ ค่าการสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่น (dB)
- L_{RX} คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณและจุดเชื่อมต่อของภาครับ (dB)
- S_{RX} คือ ค่าความไวการรับสัญญาณของภาครับ (dBm)

4.4 ระบบแสดงผลแผนที่สถานการณ์ หลังจากทีอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งได้ส่งข้อมูลมายังระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ผ่านเกตเวย์ชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ระบบ LoRa Server จะนำข้อมูลที่รับส่งผ่านไปยังระบบประมวลผลด้วยเทคนิค ZeroMQ (ZMQ) เมื่อระบบประมวลผลได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จะทำการประมวลผลและแสดงผลบนระบบแผนที่สถานการณ์ ซึ่งงานวิจัยนี้พัฒนาระบบแสดงผลด้วยแอปพลิเคชัน NASA Worldwind [29] ซึ่งเป็นระบบโอเพนซอร์สและพัฒนาภาษาจาวา

5. การประเมินผลประสิทธิภาพของระบบ

ในการประเมินผลการทำงานของระบบ จะทำการเปิดใช้งานระบบทั้งหมด โดยจะนำอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งติดตั้งที่เจ้าหน้าที่ ส่วนระบบเกตเวย์จะติดตั้งอยู่บนชั้นบนสุดของอาคารสูง 10 ชั้น โดยอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะส่งข้อมูลที่อ่านได้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ ไปยัง LoRa เกตเวย์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จาก Spectrum Analyzer ดังรูปที่ 8



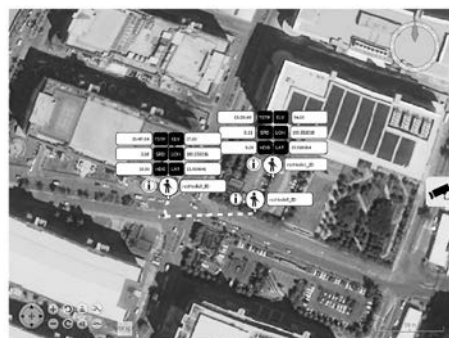
รูปที่ 8 ค่ากำลังงานในรูปแบบของคลื่นความถี่วิทยุที่วัดได้จากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง

หลังจากนั้นเกตเวย์จะทำการส่งข้อมูลที่ได้รับต่อไปยัง Network Server และ Application Server ตามลำดับ ผ่านระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่ง Application Server สามารถแสดงรายละเอียดข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งดังรูปที่ 9



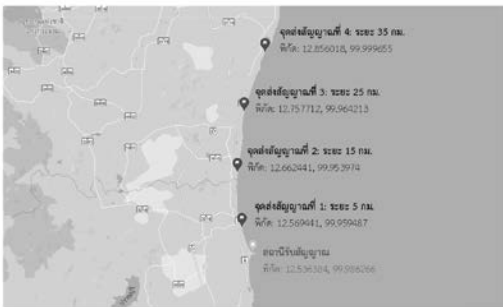
รูปที่ 9 รายละเอียดภายในเฟรมข้อมูลที่แสดงผลบนระบบ Application Server

หลังจากที่ Application Server ได้รับข้อมูลแล้ว จะส่งข้อมูลต่อไปยังระบบประมวลผลและแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ที่พัฒนาด้วยโอเพนซอร์สของ NASA Worldwind ซึ่งจะแสดงชื่อของอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง ค่าที่ตรวจวัดได้เซนเซอร์ต่าง ๆ รวมถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ้าหน้าที่ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์

ในส่วนของการประเมินผลประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร จะทำการประเมินในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศไม่มีการกีดขวางของสัญญาณ ซึ่งได้ทดสอบในพื้นที่ชายฝั่งของจังหวัดเพชรบุรีและประจวบคีรีขันธ์ ดังรูปที่ 11 เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีระยะ LoS เป็นระยะทาง 35 กิโลเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการทดสอบในการทดสอบจะเป็นการทดสอบ 2 รูปแบบ ได้แก่ การรับส่งข้อมูลจากระดับภาคพื้นสู่พื้นที่สูงและการรับส่งข้อมูลจากระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น

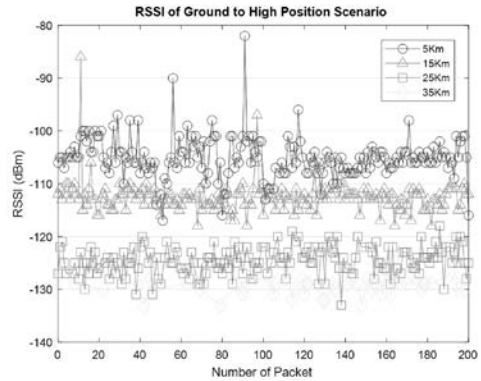


รูปที่ 11 ตำแหน่งจุดติดตั้งระบบรับส่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

ซึ่งจะทำการส่งข้อมูลที่มีเฟรมขนาด 11 Bytes ทุก ๆ 3 วินาที จำนวน 200 ชุดข้อมูล ไปยังเกตเวย์ โดยการวัดประสิทธิภาพจะเป็นการวัดผ่านพารามิเตอร์ที่บอกถึงคุณภาพในการรับส่งสัญญาณประกอบไปด้วยระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) จำนวนข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับรวมถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการรับข้อมูล (PER) ซึ่งมีรายละเอียดผลการวัดประสิทธิภาพดังนี้

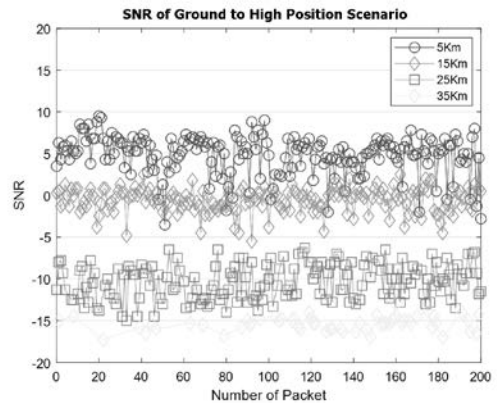
5.1 การวัดประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณจากภาคพื้นสู่พื้นที่สูง ในการวัดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในรูปแบบนี้จะทำการติดตั้งระบบเกตเวย์ไว้บริเวณพื้นที่มีระดับความสูง 58 เมตรจากระดับน้ำทะเล โดยอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งจะติดตั้งอยู่ที่ภาคพื้นระยะ 5, 15, 25 และ 35 กิโลเมตร ซึ่งผลการทดสอบวัดประสิทธิภาพระบบสื่อสารจะแสดง

ถึงค่าของ RSSI, SNR และปริมาณข้อมูลที่ได้รับ



รูปที่ 12 ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

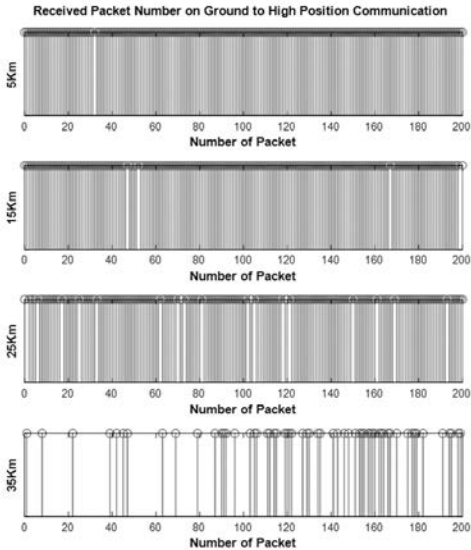
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งที่มีระยะไกลกับเกตเวย์จะมีค่าระดับ RSSI ที่สูง หากอุปกรณ์มีระยะห่างไกลออกจากเกตเวย์ค่า RSSI จะมีค่าลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 13 ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

ในส่วนค่า SNR ก็จะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับค่า RSSI กล่าวคือ ยิ่งอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งไกลออกจากเกตเวย์มากเท่าไรก็จะมีสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณข้อมูลมากขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 13 ในส่วนของจำนวนข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับในการทดสอบจะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลระยะ 5 - 25 กิโลเมตร เกตเวย์ยังคง

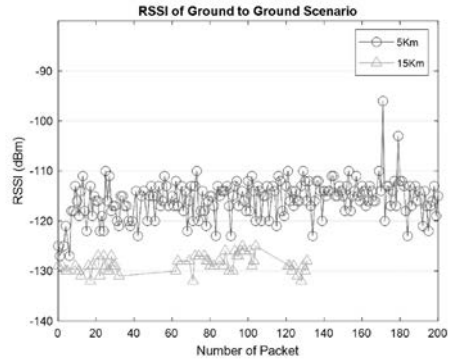
รับข้อมูลได้ดีแต่จะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเข้าสู่ระยะที่ 35 กิโลเมตรดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ปริมาณข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับในระยะต่าง ๆ

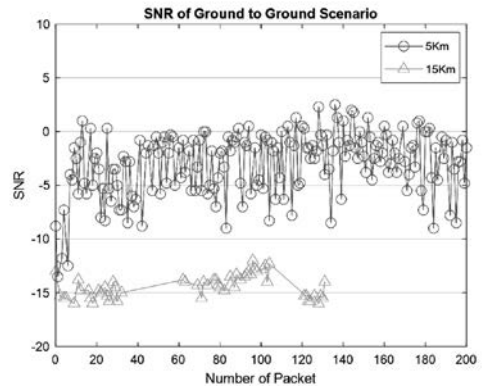
5.2 การวัดประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณจากระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น ในการวัดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น จะทำการติดตั้งระบบเกตเวย์ไว้บริเวณพื้นที่ระดับความสูง 6 เมตรจากระดับน้ำทะเล โดยอุปกรณ์ติดตั้งตำแหน่งจะติดตั้งที่ภาคพื้นระยะ 5, 10, 15, 25 และ 35 กิโลเมตร ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงถึงระดับค่า RSSI, SNR และปริมาณข้อมูลที่ได้รับ โดยในการรับส่งข้อมูลจากระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้นจะเห็นได้ว่าค่า RSSI และ SNR มีค่าการกระจายตัวที่มากกว่า รวมถึงปริมาณข้อมูลที่ได้รับมีน้อยกว่าการส่งข้อมูลในระบบภาคพื้นสู่พื้นที่สูง ดังรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ

โดยสาเหตุที่ทำให้การรับส่งข้อมูลแบบภาคพื้นสู่ภาคพื้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการส่งข้อมูลแบบภาคพื้นสู่จุดสูง เนื่องจากมีปัจจัยในการเกิดการลดทอนของสัญญาณมากกว่า เช่น การบดบังสัญญาณจากสิ่งกีดขวางการลดทอนของสัญญาณจากปรากฏการณ์



รูปที่ 15 ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

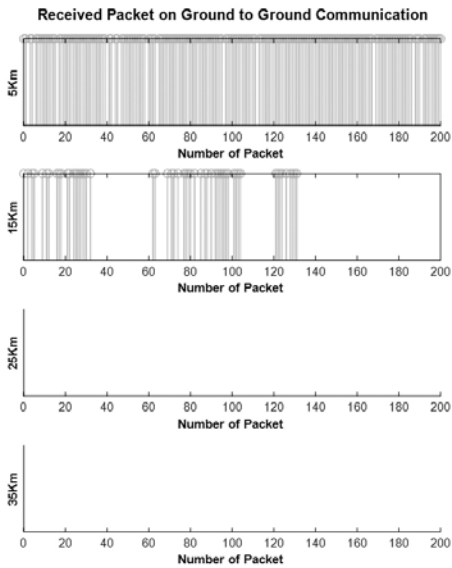
Multi Path การส่งสัญญาณที่ไม่เป็นไปตามหลักของ Fresnel Zone รวมถึงสัญญาณรบกวนจากการใช้งานความถี่ข้างเคียงของระบบสื่อสารอื่น ๆ ภายในเขตชุมชน เป็นต้น



รูปที่ 16 ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่วัดได้จากการทดสอบในระยะต่าง ๆ

ซึ่งจากรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าในการรับส่งข้อมูลระดับภาคพื้นจะรับส่งข้อมูลได้ดีที่ระยะ 5 กิโลเมตร ในขณะที่ระยะ 15 กิโลเมตร ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลเริ่มลดลง โดยระบบจะไม่สามารถรับข้อมูลได้เลยในระยะที่ 25 และ 35 กิโลเมตร

ผลการวัดประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจากการทดสอบประสิทธิภาพทั้ง 2 รูปแบบ จำนวนข้อมูลที่เกตเวย์สามารถรับได้ในระยะต่าง ๆ จะแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 17 ปริมาณข้อมูลที่เกตเวย์ได้รับในระยะต่าง ๆ

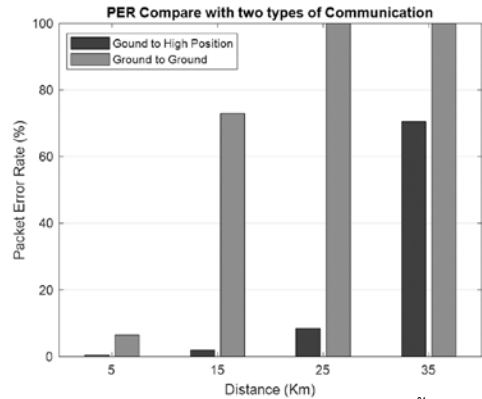
ตารางที่ 2 จำนวนข้อมูลที่ได้รับในแต่ละระยะ

ระยะทาง (กม.)	5	15	25	35
ภาคพื้นสู่พื้นที่สูง	199	196	183	59
ภาคพื้นสู่ภาคพื้น	187	54	0	0

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์อัตราการผิดพลาดในการรับข้อมูล (PER)

ระยะทาง (กม.)	5	15	25	35
ภาคพื้นสู่พื้นที่สูง	0.5	2	8.5	70.5
ภาคพื้นสู่ภาคพื้น	6.5	73	100	100

ในส่วนของจำนวนของเปอร์เซ็นต์ของอัตราการผิดพลาดในการรับข้อมูลจะแสดงในตารางที่ 3 จากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าการรับส่งข้อมูลในรูปแบบระดับภาคพื้นสู่พื้นที่สูงจะมีค่า PER ต่ำจนถึงระยะที่ 25 กิโลเมตร และมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะที่ 35 กิโลเมตร ในส่วนของการทดสอบระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้น มีค่า PER ต่ำ ในระยะที่ 5 กิโลเมตร และมีค่า PER ใกล้เคียง 70% ที่ระยะ 15 กิโลเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวจะแปรผันตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบค่า PER ในการรับส่งข้อมูลทั้ง 2 รูปแบบ

6. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งสำหรับงานด้านยุทธการและการข่าวด้วยเทคโนโลยีระบบสื่อสารข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สาย (LoRaWAN) เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการต่าง ๆ ทางทหาร เช่น การกักตุนตรวจเฝ้าตรวจ ปิดล้อมจับกุม หรือหาข่าว เป็นต้น โดยในบทความมีการบรรยายถึงการออกแบบและพัฒนาระบบฯ ในขั้นตอนต่าง ๆ รวมถึงการวัดประสิทธิภาพระบบสื่อสารที่ได้ทำการออกแบบขึ้น โดยแบ่งการวัดประสิทธิภาพออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การรับส่งสัญญาณระดับภาคพื้นสู่พื้นที่สูงและระดับภาคพื้นสู่ภาคพื้นซึ่งมีระยะทางในการทดสอบสูงสุดที่ระยะ 35 กิโลเมตร โดยผลการทดสอบพบว่าการทดสอบรูปแบบที่ 1 จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ดีที่ระยะทางไม่เกิน 25 กิโลเมตร ในส่วนของการวัดประสิทธิภาพในรูปแบบที่ 2 จะสามารถรับข้อมูลได้ดีที่ระยะ 5 กิโลเมตร หลังจากนั้นจะมีค่า PER เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการรับส่งข้อมูลแบบภาคพื้นสู่ภาคพื้นมีปัจจัยในการเกิดการลดทอนของสัญญาณมากกว่า เช่น มีสิ่งกีดขวางระหว่างการรับส่งสัญญาณ การลดทอนจากปรากฏการณ์ Multi Path การส่งสัญญาณที่ไม่เป็นไปตามหลักของ Fresnel Zone

รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการใช้งานความถี่ข้างเคียงภายในเขตชุมชน เป็นต้น

ในทางปฏิบัติหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารของระบบรายงานตำแหน่งให้ดีขึ้น ทำได้โดยปรับเปลี่ยนได้ที่สายอากาศฝั่งเกิดเวทย์ให้มีกำลังขยายมากขึ้นซึ่งไม่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงที่อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งก็จะทำให้การรับส่งข้อมูลของระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบสารสนเทศแบบรวมศูนย์และโปรแกรมประยุกต์สำหรับหน่วยงานด้านความมั่นคงใน 3 จังหวัดชายแดนใต้รวมถึงได้รับการสนับสนุนจากนาวาอากาศโท พันธุ์เทพ แก้วมงคล ผู้อำนวยการส่วนงานวิศวกรรมการสื่อสารข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์และเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในการพัฒนาระบบแสดงผลบนแผนที่สถานการณ์ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Andrade, R.O., Yoom, S.G., Tello-Oquendo, L. & Ortiz-Garcés, I. 2020. A Comprehensive Study of the IoT Cybersecurity in Smart Cities. vol 8. IEEE Access.

[2] Sornin, N. 2015. LoRaWAN Specification, LoRa Alliance.

[3] Hoque, M.I., Amin, A.A., Rahaman, M.J. & Hossam-E-Haider, M. 2017. Designing and Performance Evaluation of GSM/GPS Based Helicopter Tracking Device. IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics.

[4] Mustafa, A., al-Nouman, M.I.A. & Awad, O.A. 2019. A Smart real-time tracking system using GSM/GPRS technologies. First International

Conference of Computer and Applied Sciences.

[5] Islam, M.N., Islam, M.R., Rafiqul Islam, S.M., Bhuyan, S.A. & Hasib, F. 2018. LocSoldiers: Towards Developing an Emergency Troops Locating System in Military Operations. 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology.

[6] Yellamma, P., Chandra, N.S.N.S.P., Sukhesh, P., Shruthi, P. & Teja, S.S. 2021. Arduino Based Vehicle Accident Alert System Using GPS, GSM and MEMS Accelerometer. 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication.

[7] Ameen, F.N., Mohammed, Z.S. & Sddiq, A.I. 2018. An Economic Tracking Scheme for GPS-GSM Based Moving Object Tracking System. The 2nd International Conference on Engineering, Technology and Sciences of Al-Kitab University.

[8] Bharavi, U. & Rao, M.S. 2017. Design and Development of GSM and GPS Tracking Module. 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology.

[9] Mohsin, A. & Yellampalli, S.S. 2017. IoT based Cold Chain Logistics Monitoring. IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation.

[10] Raj, J.T. & Sankar, J. 2017. IoT Based Smart School Bus Monitoring and Notification System. IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference.

[11] Ranjeeth, B., Reddy B.S., Reddy, Y.M.K., Suchitra, S. & Pavithra, B. 2020. Smart Child Safety Wearable Device. International Conference on Electronics and Sustainable Communication System.

[12] Nair, S., Rodrigues, G., Bellary, C.D. & Gonsalves, V. 2019. Designing of Beach Rescue Drone Using GPS And Zigbee Technologies. International

Conference on Communication and Electronics Systems.

[13] Kavuri, S., Moltchanov, D., Ometov, A. & Andreev, S. 2020. Performance Analysis of Onshore NB-IoT for Container Tracking During Near-the-Shore Vessel Navigation. *IEEE Internet of Things Journal*. vol 7. issue 4.

[14] Wan, L., Zhang, Z., Huang, Y., Yan, Y. & Wang, J. 2017. Performance Analysis of NB-IoT Technology for Indoor IoT Applications. *International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication*.

[15] Choi, W., Galkin, I., Lee, S., Park, J., Lee, J. & Kim, D. 2019. Efficient NB-IoT and GNSS chipset solution. *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*.

[16] Chitraranjan, C. D., Denton, A. M. & Perera, A.S. 2016. A Complete Observation Model for Tracking Vehicles from Mobile Phone Signal Strengths and its Potential in Travel-time Estimation. *IEEE 84th Vehicular Technology Conference*.

[17] Zulkifley, M.A. & Trigoni, N. 2018. Multiple-Model Fully Convolutional Neural Networks for Single Object Tracking on Thermal Infrared Video. *IEEE Access*.

[18] Tsun, M.T.K., Lau, B.T., Jo, H.S. & Lau, S.L. 2015. A Human Orientation Tracking System using Template Matching and Active Infrared Marker. *International Conference on Smart Sensors and Application*.

[19] Guo, G., Chen, R., Ye, F., Peng, X., Liu, Z. & Pan, Y. 2019. Indoor Smartphone Localization: A Hybrid WiFi RTT-RSS Ranging Approach. *IEEE Access*.

[20] Chena, W., Koa, K., Changa, Y. & Chang, C. 2018. An RSSI-based Distributed Real-time Indoor Positioning Framework. *IEEE International Conference on Applied System Innovation*.

[21] Guan, B. & Li, X. 2018. Research on Wireless Sensor Networks Localization Algorithm. *IEEE International*

Conference of Safety Produce Informatization.

[22] Arif, S.A., Niaz, M.H., Shabbir, N., Zafar, M.H., Hassan, S.R. & Rehman, A.U. 2018. RSSI Based Trilateration for Outdoor Localization in Zigbee based Wireless Sensor Networks (WSNs). *10th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*.

[23] Zhang, L., Yang, H., Yu, Y. & Peng, F. 2018. A Three-Dimensional Node Security Localization Method for WSN Based on Improved RSSI-LSSVR Algorithm. *10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.

[24] Li, L., Guo, X. & Ansari, N. 2020. SmartLoc: Smart Wireless Indoor Localization Empowered by Machine Learning. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 67, issue 8.

[25] Ge X., Gu R., Lang Y. & Ding, Y. 2017. Design of Handheld Positioning Tracker Based on GPS/GSM. *IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*.

[26] LoRa Alliance technical committee, LoRaWAN 1.1 Specification, LoRa Alliance, Product specification, 2017. Retrieved from https://loro-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/

[27] Qadir, Q.M., Rashid, T.A., Al-Salihi, N.K., Ismael, B., Kist, A.A. & Zhang, Z. 2018. Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs. vol. 6. *IEEE Access*.

[28] Naik, N. 2018. LPWAN Technologies for IoT Systems: Choice Between Ultra Narrow Band and Spread Spectrum. *IEEE International Systems Engineering Symposium*.

[29] The NASA WorldWind project. Retrieved from <https://worldwind.arc.nasa.gov/>

การวิเคราะห์ข้อมูล อาวุธปล่อยนำวิถีแบบอากาศสู่พื้น และอาวุธอินทราয়สูงของโลก

พีระยุทธ สารตายน¹

วันที่รับ 17 กรกฎาคม 2564 วันที่แก้ไข 13 สิงหาคม 2564 วันที่ตอบรับ 14 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอการแปลงข้อมูลทางการทหารไปสู่ดิจิทัลและวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เครื่องมือทางสถิติและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งความเชี่ยวชาญและการสืบค้นทางวิศวกรรมทหาร โดยใช้กรณีศึกษาเป็นอาวุธปล่อยนำวิถีแบบต่าง ๆ ของโลกและค่าใช้จ่ายทางการทหาร โดยเริ่มจากการนำหลักการทางวิชาการและทฤษฎีด้านข้อมูลและสารสนเทศ มาใช้ศึกษาธรรมชาติของข้อมูล ทำการแสดงผล และวิเคราะห์เชิงสถิติแบบต่าง ๆ อย่างเหมาะสมและน่าสนใจ โดยใช้ฐานข้อมูลจากนิตยสาร Jane's Defense ผลการศึกษาข้อมูลอาวุธปล่อยแบบอากาศสู่พื้นเทคโนโลยีสูงแสดงให้เห็นว่ามีประเทศผู้มีบทบาทเป็นผู้เล่นหลัก (Big players) ของโลกอยู่ 5 ประเทศ/กลุ่มประเทศ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา รัสเซีย จีน อิสราเอล และโครงการความร่วมมือของสหภาพยุโรป การสร้างภาพข้อมูลแสดงให้เห็นว่า อาวุธอินทราয়เหล่านี้มักถูกพัฒนาจากประเทศขนาดใหญ่หรือมีภัยคุกคามสูง เราพบว่า จีน รัสเซีย และปากีสถาน ซึ่งมีภัยคุกคามทางบกสูง เลือที่จะพัฒนาอาวุธปล่อยทางบก (Land-based missile) จำนวนมาก ในขณะที่สหรัฐอเมริกาเลือกที่จะพัฒนาอาวุธปล่อยทางทะเลจำนวนมาก (Sea-based ballistic missile) เนื่องจากมีพื้นที่ติดกับมหาสมุทร การวิเคราะห์ข้อมูลจากฐานข้อมูลอาวุธอินทราয় โดยใช้ปริมาตรของชีพินาอาวุธมาพล็อตแผนภาพการกระจาย (Scatterplot) พบว่า “ปริมาตรและน้ำหนัก” ของชีพินาอาวุธมีค่าสหสัมพันธ์ที่สูงกว่า “ปริมาตรและพิสัย” ดังนั้น พิสัยซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงอินทราয়ของชีพินาอาวุธ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบขับเคลื่อน (Propulsion) ความเร็วต้น (Initial velocity) รวมทั้งชนิดของหัวรบ (Warhead) ด้วย รวมทั้งใช้จำแนกประสิทธิภาพของอาวุธได้ จากการวิเคราะห์ผลและการจัดประเภทต่าง ๆ ของอาวุธนำวิถี นอกจากนี้จะสามารถสรุปคุณลักษณะที่สำคัญของอาวุธนำวิถีที่มีความร้ายแรงสูงแล้ว ยังสามารถสรุปได้ว่า จรวด D1G ซึ่งพัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) น่าจะจัดเป็นอาวุธนำวิถีที่มีความอันตรายค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก สทป. ถูกจัดตั้งขึ้นมาในปี พ.ศ. 2552 จากการพัฒนางานวิจัยจรวดและลดการนำเข้าและจัดหาอาวุธจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการเปรียบเทียบและการศึกษาแนวโน้มของงบประมาณที่กลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) ใช้จ่ายไปในทางการทหารในปัจจุบัน รวมทั้งพยากรณ์งบประมาณที่คาดว่าประเทศไทยจะใช้ในปี พ.ศ. 2564 โดยใช้หลักเส้นกราฟที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่กลุ่มข้อมูล (Curve fitting) ทั้งนี้พบว่าประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้งบประมาณทางทหารที่ลดลงเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตามเพื่อตรวจสอบข้อสันนิษฐานและผลการวิเคราะห์ดังกล่าวผู้เขียนได้เปรียบเทียบกับข้อมูลค่าใช้จ่ายทางการทหารของประเทศไทยที่ทางนิตยสาร Jane's Defense ได้เก็บไว้ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2553 และจำแนกไว้เป็นหมวดหมู่และได้ข้อสรุปที่น่าสนใจเป็นอย่างดี

คำสำคัญ : การวิเคราะห์แนวโน้ม, การพยากรณ์ข้อมูล, อาวุธปล่อยนำวิถีแบบอากาศสู่พื้น, อาวุธทำลายล้างสูง, งบประมาณทางทหารของไทย, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, จรวดนำวิถี D1G

¹ ผู้เขียน, E-mail: peerayudh.s@dti.or.th

Data Analysis and Digital Transformation: The Air-to-Ground Missile and Offensive Weapon Case Study

Peerayudh Saratayon ¹

Received 17 July 2021, Revised 13 August 2021, Accepted 14 August 2021

Abstract

This report is devoted to data analysis and digital transformation using the Air-to-Ground Missile and Offensive Weapon as a case study. The objective of the study is to understand nature of the data being used, after which data visualization and data analysis can be taken. The database was collected from Jane's Defense archive. From data visualization results, it can be concluded that there are 5 countries that play the main role (Big players) in producing high-technology Air-to-Ground Missile, namely, the US, China, Russia, Israel and Cooperative Project from the European Union countries. Data Visualization revealed offensive weapons were used or developed from large countries, especially those with high level of threats. China, Russia and Pakistan are all surrounded by land threats, hence produced a large number of land-based missiles, while a large number of sea-based ballistic missiles were found to be produced from the USA because of its maritime threats. The correlation of missile's threat-indicating parameters was shown in scattering plots. The plot of Volume and Weight was found to be more correlated when compared to those from Volume and Range. This implied that Range of a missile depends on many other significant design parameters, e.g. type of propulsion and warhead as well as its initial velocity. After sorting and grouping of all missiles in the world, it was found that the D1G missile from DTI can easily be classified as a "not-so-dangerous missile" for the region. As rocket and missile research and development had set the starting point of DTI in the year BE2552 and hence a gradual decline in military expenses was seen in the graph and the data prediction for year BE2564 was found using "Curve Fitting" method. In order to verify such gradual decline in military expenditure, this was compared to another graph of collection of expenditures of Thai military from Jane's Defense website. The data was collected for Thailand from BE2553 and classified into various categories. Here, very interesting conclusions were found.

Keywords : Trend Analysis, Data Prediction, Air-to-Surface Missile, Offensive Weapon, Thai Military Expenditures, DTI, D1G Missile

¹ Corresponding author e-mail: peerayudh.s@dti.or.th

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พระราชบัญญัติเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2562 มาตรา 22 (5) ให้สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) มีวัตถุประสงค์ในการเป็น ศูนย์ข้อมูลความรู้ด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ให้แก่กระทรวงกลาโหม (กท.) และหน่วยงานของรัฐ เพื่อใช้ในการ กำหนดนโยบายและแผนการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีป้องกันประเทศ [1] ซึ่งเป็นหน้าที่และความรับผิดชอบของกลุ่มบริการทางวิชาการและเทคโนโลยี (Technology and Academic Service Group – TG) ครอบคลุมการวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศและเป็นแหล่งข้อมูลด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศให้แก่ กท. การจัดทำแผนแม่บทเทคโนโลยีป้องกันประเทศการวิเคราะห์และสังเคราะห์องค์ความรู้ที่ได้ มาจากการวิจัยและพัฒนาและการปฏิบัติงานภายใน องค์การการผลิตและพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศรวมทั้งการเผยแพร่ข้อมูลด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ การให้บริการทางวิชาการและเทคโนโลยี ตลอดจนการพัฒนาและให้บริการเทคโนโลยีสารสนเทศภายในองค์กร [2]

กลุ่มบริการทางวิชาการและเทคโนโลยีแบ่ง ส่วนงานออกเป็น ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Technology Analysis Department - TTA) ฝ่ายองค์ความรู้และการเผยแพร่ (Knowledge and Publication Management Department - TKP) ฝ่ายบริการทางวิชาการและเทคโนโลยี (Defence Technology Service Department - TTS) และ ฝ่ายเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Development Department - TTD) และตัวชี้วัด สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาระบบราชการ (ก.พ.ร.) ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ของ สทป. ที่กลุ่ม

บริการทางวิชาการและเทคโนโลยีเป็นกลุ่มหลักคือ องค์กรประกอบที่ 2: ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในการดำเนินงานด้านที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการบริหารงาน/ ความคุ้มค่าในการดำเนินงานประกอบด้วย “การพัฒนา ระบบงาน (Application) สำหรับคลังข้อมูลเทคโนโลยี ป้องกันประเทศ (Defence Technology Repository) น้ำหนัก 10%” และ “ความสำเร็จในการดำเนินการเสนอ การรับรองระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001:2015 กระบวนการวิจัยและพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยีป้องกัน ประเทศ การให้บริการและองค์ความรู้ทางเทคโนโลยี ป้องกันประเทศ ของ สทป. น้ำหนัก 5%” องค์กรประกอบ ที่ 3: ศักยภาพขององค์การมหาชน ด้านผล การพัฒนาศักยภาพองค์การสู่ การเป็นระบบ ราชการ 4.0 รายละเอียดตัวชี้วัด “การพัฒนา ระบบข้อมูลให้เป็นดิจิทัล เพื่อนำไปสู่การเปิดเผย ข้อมูลภาครัฐ (Open data) น้ำหนัก 10%”

การวิเคราะห์ข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงทาง ดิจิทัล: กรณีศึกษาอาวุธปล่อยนำวิถีแบบอากาศสู่พื้น และอาวุธอันทรงพลังสูงของโลกจึงเป็นการทดลองตั้ง โจทย์ปัญหาจากข้อมูลเพื่อให้ทราบถึงธรรมชาติของ ข้อมูลที่นำมาใช้ การแสดงภาพข้อมูล การวิเคราะห์ ข้อมูลเพื่อฝึกการรวบรวมองค์ความรู้และข้อมูลของ เทคโนโลยีป้องกันประเทศต่างและการสังเคราะห์ ให้เกิดประโยชน์สำหรับเผยแพร่ให้กับประชาสังคม ผู้วิจัยใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลนิตยสาร Jane’s Defense¹ ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับระบบอาวุธของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก อย่างไรก็ตามระบบอาวุธที่มีการผลิตใช้งาน มีหลากหลายและแตกต่างกันตามประเทศผู้ผลิต วัตถุประสงค์ใช้งาน การประจำการ หรือลักษณะทาง ภูมิศาสตร์ของการใช้งาน ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูล

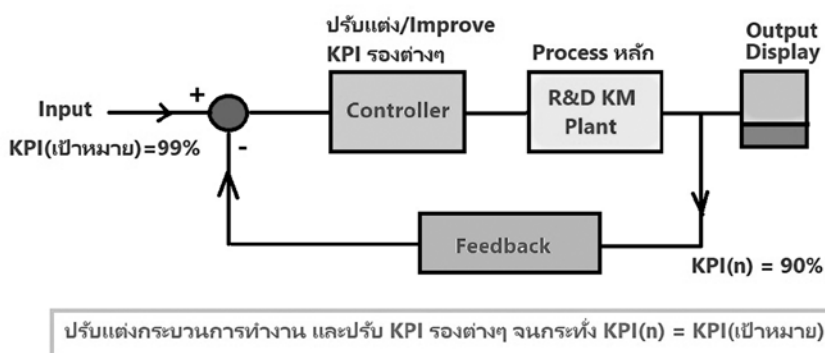
¹ <http://library.dti.or.th/index.php/2013-05-09-04-40-51/ihs-jane-s-defence> เข้าถึงเมื่อ 13 ส.ค.64

ระบบอาวุธถือเป็นศาสตร์อีกด้านหนึ่งที่มีความสำคัญ ผู้วิจัยได้คัดมาเฉพาะที่เกี่ยวข้องและลักษณะคล้ายคลึงกับระบบจรวดและอาวุธนำวิถีที่ สทป. ดำเนินการวิจัยและพัฒนาอยู่ รวมทั้งได้เลือกฐานข้อมูลอาวุธที่ถือเป็นภัยอันตรายต่อโลก มาทำการวิเคราะห์เพื่อให้เกิดความน่าสนใจและอาจนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Digital Transformation [3] คือกระบวนการในการแปลงสิ่งใด ๆ ที่มีลักษณะเป็นข้อมูลเชิงกายภาพ (Physical data) ให้มีรูปแบบเป็นข้อมูลดิจิทัล เช่น ในงาน GIS (Geographic Information Systems) ซึ่งแปลงพื้นที่บนพื้นโลกให้อยู่ในรูปแบบของภาพและข้อมูลดิจิทัล ส่งผลให้สามารถติดตามผลผลิตทางการเกษตร หรือนำข้อมูลมาใช้ตัดสินใจในการทำงาน พื้นที่ดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม หากเราสามารถทำการแปลงสิ่งใด ๆ ที่เดิมไม่ได้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล ให้มาอยู่ในรูปแบบดิจิทัลได้ เราก็จะสามารถติดตาม ตรวจสอบ ควบคุมและบูรณาการให้สามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุด (Optimization) จากสิ่งดังกล่าวได้ ผลลัพธ์ที่ต้องการในที่นี้คือ การดำเนินการให้ได้ KPI หลัก

99% โดยการปรับแต่ง KPI รอง ให้เหมาะสม ตัวอย่างของการพัฒนาระบบงานภายในองค์กรสามารถเริ่มด้วย Digital Transformation แล้วนำแนวคิด Lean Six Sigma และ Feedback Control Loop ทางวิศวกรรมไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถควบคุม KPI หลักให้เข้าสู่เป้าหมาย 99% ได้โดยเร็วที่สุด [4] โดยการปรับแต่งองค์ประกอบย่อย หรือ KPI รองต่าง ๆ ให้เหมาะสมดังตัวอย่างในรูปที่ 1 ทั้งนี้ KPI หลักอาจวัดได้จากการสำรวจความพึงพอใจและการยอมรับของ Stakeholders ด้านงานวิจัย (99% หมายถึง 99 หน่วยจาก 100 หน่วยเห็นพ้องกัน) ส่วน KPI รองจะเป็นปัจจัยที่สนับสนุนปัจจัยหลัก เช่น จำนวนโครงการที่ สทป. รับผิดชอบในแต่ละปี (x หน่วย/ปี), จำนวนโครงการที่มีผลการวิจัยประสบผลสำเร็จดีเยี่ยม (x หน่วย/ปี), การรับรู้/ความพึงพอใจของสังคมผ่านการโฆษณาประชาสัมพันธ์ (x หน่วย/ปี), DTI Resource Utilization & Sharing (x บาท/ปี), อัตราการใช้ DTI “in-kind” (x บาท/ปี), จำนวนโครงการวิจัยภายใต้ความร่วมมือ/หลักสูตรระดับ ป.โท (x งานวิจัย/ปี), จำนวน Explicit KM (x paper/ปี), และ จำนวน Tacit KM (x กิจกรรมถ่ายทอดความรู้/ปี) เป็นต้น กระบวนการต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล (Digital transformation) เริ่มตั้งแต่การแปลงข้อมูล (Data) ให้เป็นสารสนเทศ



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงแนวทางในการควบคุมในลักษณะของ Control & Optimization เพื่อให้ได้

(Information) และฐานข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) ซึ่งการวิเคราะห์ผล (Data Analysis) ที่ง่ายที่สุดคือการแสดงออกมาเป็นภาพข้อมูล (Data Visualization) รวมทั้งการใช้เครื่องมือทางสถิติพื้นฐาน ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การวิเคราะห์แนวโน้ม และการคาดคะเน (Trend Analysis and Prediction) อาจใช้หลักการทางสถิติที่สูงขึ้น รวมทั้งความเข้าใจในธรรมชาติของระบบ และมักจะใช้การวิเคราะห์แบบอนุกรมเวลา (Time Series Analysis)

2.1 ข้อมูลและสารสนเทศ (Data & Information)

การแปลงข้อมูลให้เป็นสารสนเทศ (Data to Information Transformation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญและมีความยากในการทำส่วนมากจะต้องทำแบบอัตโนมัติด้วยการเขียน Computer Script แหล่งข้อมูลที่มีความเหมาะสมสำหรับการสกัดสารสนเทศออกมา ได้แก่ สื่อสังคมหรือ Social Media ต่าง ๆ หรืออาจเป็นข้อมูลจาก “ระบบอ่านป้ายทะเบียนรถยนต์” ซึ่งจะเป็ข้อมูลที่เป็นทางการมากกว่า ทั้งนี้มีเครื่องมือและกระบวนการที่หลากหลายในการสกัดเอาสารสนเทศออกมาจากข้อมูลที่เราต้องการ [5] มักใช้หลาย ๆ วิธีผสมกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เช่น OCR, Machine Learning, Image Extraction, keyword matching และ grouping เป็นต้น

2.2 การทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleansing)

เป็นหัวข้อใหญ่มาก เพราะหากไม่ใช้ฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นเองแต่มาจากบุคคลที่สามหรือแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ส่วนใหญ่จะต้องนำมาผ่านกระบวนการทำให้ข้อมูลสะอาดขึ้น หรือกำจัดขยะ สิ่งที่ไม่เกี่ยวข้อง และ Outlier ต่าง ๆ ออกไป ทั้งนี้อาจรวมถึง Remark ต่าง ๆ ในฐานข้อมูล หรือพวก “n/a”, “n/k”, “-” เป็นต้น ซึ่งต้องพยายามหาข้อมูลจริงที่เป็นตัวเลขมาแทนหากไม่ได้ Record ดังกล่าวจะนำมาแสดงผลไม่ได้

และจำเป็นต้องกำจัดทิ้ง นอกจากนี้ การทำ Data Cleansing ยังรวมไปถึงการทำให้อัฒมพร้อมสำหรับการ Visualization ในขั้นตอนต่อไป โดยการกำจัดตัวอักษรต่าง ๆ ที่ไม่จำเป็น หรือที่ถูกแทรก หรือประกอบเข้ามากับตัวเลข เช่น m, kg, km, max, min, (est) เป็นต้น การดำเนินการในขั้นตอนนี้ส่วนมากทำด้วยมือจะสะดวกกว่า หากมีข้อมูลไม่มาก แต่หากเป็น Big Data ที่มีข้อมูลมหาศาล ก็จำเป็นต้องเขียน Computer Script ในการดำเนินการดังกล่าวอย่างเป็นระบบ ปัจจุบันมีเครื่องมือในการช่วยวิเคราะห์ข้อมูลอยู่มากมาย ตั้งแต่ระดับ low level จนถึง high level แต่อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์และเรียนรู้ที่ดีที่สุดจำเป็นต้องมีมนุษย์เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจหรือตรวจสอบ (Human In the Loop) เสมอ เพราะการวิเคราะห์ที่ดี ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องเป็นผู้ที่มีความชำนาญในด้านนั้น ๆ หรืออยู่ในวงการดังกล่าว เข้าใจความหมายของทุก ๆ Field ข้อมูล และเข้าใจเพียงพอที่จะตัดประเด็นไม่สำคัญหรือกรอง (Filter) สิ่งที่ไม่คิดว่าไม่เกี่ยวข้องออกไป

2.3 การสร้างภาพข้อมูล (Data Visualization)

เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาให้เข้าใจได้ง่าย มีข้อมูลที่จำเป็นเพียงพอ ไม่มากและไม่น้อยจนเกินไป รวมทั้งมีรูปแบบที่สวยงาม เหมาะสมกับการใช้งาน เครื่องมือในการทำ Data Visualization มีอยู่จำนวนมาก [6] เช่น Power BI, Google Studio, Excel เป็นต้น เครื่องมือส่วนใหญ่ จำเป็นต้องดึงไฟล์ฐานข้อมูลออกมาจาก Network ยกเว้นแต่เครื่องมือพื้นฐาน เช่น Excel ที่อนุญาตให้ใช้ข้อมูลที่อยู่บนเครื่อง local ที่ทำงานอยู่ ในขั้นตอนนี้มักนิยมทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติขั้นต้นประกอบไปด้วย เช่น การทำ Order Sorting, การหาค่า Min, Max, Average, และการ filter ข้อมูลที่ต้องการออกมา เป็นต้น

2.4 การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend Analysis) การหาแนวโน้มของข้อมูลถือเป็น Data Analysis อย่างหนึ่ง [7] การหา Trend หรือแนวโน้ม จะต้องทราบตัวข้อมูลนั้น ๆ ในอดีต หรือในลักษณะของ time series ยิ่งมีจำนวนมากยิ่งจะทำให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้น วิธีหนึ่งที่น่าิยมใช้คือ Curve Fitting ซึ่งใช้กราฟ/สมการ รูปแบบต่าง ๆ ที่คิดว่าเหมาะสมที่สุดมาแทนกลุ่มข้อมูล กราฟ/สมการ ดังกล่าวอาจเป็น Linear, Exponential, Polynomial ในลำดับต่าง ๆ หรือ Moving Average เป็นต้น เมื่อแทนที่กลุ่มข้อมูลด้วยกราฟได้ ก็จะสามารถต่อกราฟแนวโน้มเพื่อพยากรณ์ข้อมูลที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้และส่วนมากจะแทนกลุ่มข้อมูลด้วยกราฟโดยตัดแบ่งเป็นส่วนสั้น ๆ (Piecewise)

2.5 การพยากรณ์ข้อมูล (Data Prediction) การพยากรณ์สภาพและความเป็นไปของข้อมูลจำเป็นต้องรู้พฤติกรรมการกระจายตัวเชิงสถิติของข้อมูลเพื่อให้สามารถคาดการณ์ชุดข้อมูลใหม่ได้อย่างถูกต้องมากที่สุดในการศึกษาพฤติกรรมของข้อมูลหากไม่มีข้อมูลในอดีต จำเป็นต้องทำการสุ่มข้อมูลใหม่ขึ้นมา (Sampling)

โดยทำให้มีการกระจายตัว (Distribution) ตามที่ต้องการโดยใช้หลักการของ Stochastic นอกจากนี้ในกรณีที่มีความสนใจในการศึกษาพฤติกรรมของกลุ่มข้อมูลซึ่งอาจมีแนวโน้มที่จะลู่ออกค่าใดค่าหนึ่งที่สนใจ ในกรณีดังกล่าว มักนิยมใช้ Markov Chain Monte Carlo Analysis ในการศึกษา

3. ข้อมูลและการเตรียมข้อมูล เทคโนโลยีสารสนเทศนับเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการจัดเก็บและบริหารจัดการข้อมูลยุทธโธปกรณ์ในทางบก ทางทะเลและทางอากาศ ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ [8] กล่าวถึงแนวทางในการนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาบริหารจัดการในรูปแบบภูมิสารสนเทศและแสดงรายละเอียดข้อมูลยุทธโธปกรณ์อาวุธในระดับประเทศ ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปจัดเก็บด้วยแนวทางดังกล่าวได้เช่นเดียวกันซึ่งประกอบด้วยจำนวน 3 ไฟล์ ดังต่อไปนี้

3.1 ไฟล์ “fg_2589188_AGM.xls” เป็นฐานข้อมูลของ Air-to-Ground Missiles ต่าง ๆ ในโลก ตัวอย่างบางส่วนแสดงดังตารางด้านล่างโดยมีข้อมูลอยู่ 300 รายการ

Missile Designation and Name	Country	Length (m)	Diameter (mm)	Weight (kg)	Warhead (kg)	Guidance	Propulsion	Range (km)	Speed (km/h)		
AIM-7	France	4.15 m	402 mm	550 kg	150 kg HC war	radio	RCS passive radar	solid propellant	100 km	350 km/h	
AS-10T	France	2.3 m	198 mm	100 kg	30 kg HC armor piercing	impact	radio (Radar command)	solid propellant	3 km	17 km	360 km/h
AS-15L	France	3.65 m	340 mm	520 kg	240 kg HC	impact	RCS SAR	solid propellant	-	12 km	400 km/h
PRR-31R (LR TRIGAT)	Germany	1.6 m	150 mm	40 kg	4.5 kg HC tandem hollow charge	impact, proximity	passive IR	solid propellant	0.5 km	7 km	290 km/h
Hellfire (AGM)	India	1.92 m	156 mm	43 kg	8 kg HC Tandem HCAT	proximity	passive IR, radio (non wave active radar)	solid propellant	0.5 km	7 km (full copper), 10 km (lead wing)	230 km/h
Multi-mission Capability (MCM) and Laser	Iran	1.7 m (w/o)	140 mm	32 kg	multi-purpose tandem hollow charge	-	IR, SAR, TV (Dual band)	solid propellant	-	10 km (w/o)	-
Zassan (KAM 5702) and Yasser	Iran	3.16 m	400 mm	900 kg	340 kg HC	-	-	solid propellant	20 km	5,140 km/h	-
Skyline (LAHAT)	Israel	0.875 m	100 mm	12.9 kg (70 kg (w/air)	12.9 kg (w/air) (w/air) (w/air)	2.8 kg armor piercing	active radar	solid propellant	-	8 km	280 km/h
Whip Shot	Israel	1.35 m	100 mm	10 kg	6 kg HC steel fragmentation	impact	-	solid propellant (booster: steel apparatus)	-	3 km	-

ที่มา: ข้อมูลจรวดนำวิถีแบบอากาศสู่พื้น (Air-to-Ground Missiles) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane’s Defense

ข้อมูลของ Air-to-Ground Missiles ประกอบด้วย Field ต่าง ๆ ดังนี้ :

“SI No” – Running Number สำหรับฐานข้อมูล, “Missile Designation and Name” – ชื่อเรียกในวงการ หรือ Code Name, “Section” – ประเภทของ missile, “Sub-section” – ประเภทย่อยของ missile, “Country” – ประเทศที่สร้างอาวุธ, “Length” – ความยาวของ missile (m), “Diameter” – เส้นผ่านศูนย์กลางของ missile (mm), “Weight” – น้ำหนักของ missile (kg), “Warhead” – ประเภทของหัวรบ, “Fuze” – ประเภทของชนวนหัว, “Guidance” – ประเภทของระบบนำวิถี, “Propulsion” – ประเภทของระบบขับเคลื่อนที่ใช้, “Range (min)” – พิสัยของอาวุธขั้นต่ำ (km), “Range (max)” – พิสัยของอาวุธสูงสุด (km), และ “Speed (m/s)” – ความเร็วสูงสุดของ missile (m/s)

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติขั้นต้นพบว่าระบบอาวุธนำวิถีแบบอากาศยานที่จำเป็นต้องติดตั้งอยู่บนอากาศยานเพื่อต่อระยะในการใช้อาวุธมีความยาวที่หลากหลายตั้งแต่ 0.975m (Israel) จนถึง 11.67m (Russia) และสามารถมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้สูงสุดถึง 1.2m ในขณะที่มีพิสัยสูงสุดถึง 5,000 km (Russia)

3.2 ไฟล์ “fg_2595639_a_Offensive Weapons.xls” เป็นฐานข้อมูลของอาวุธปล่อยที่ถือว่าเป็นอาวุธอันตรายสูงมาก (ทั้งนำวิถีและไม่นำวิถี) ตัวอย่างบางส่วนแสดงในตารางด้านล่าง โดยมีข้อมูลอยู่ 150 รายการ

ข้อมูลของอาวุธปล่อยประกอบด้วย Field ต่าง ๆ ดังนี้: “Table” – หมวดหมู่หลักของอาวุธ, “Country” – ประเทศที่สร้างอาวุธ, “Missile name and designation” – ชื่อ missile และ Code Name ของอาวุธ, “Length” – ความยาวของ missile (m), “Diameter” – เส้นผ่านศูนย์กลางของ missile (m), “Launch weight” – น้ำหนักของ missile (kg), “Payload” – โหลดที่บรรทุก, “Propulsion” – ประเภทของระบบขับเคลื่อน, “Range” – ระยะสูงสุดของอาวุธ, “Status” – สถานะของอาวุธ, และ “In-service” – มีใช้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ หรือมีประจำการอยู่หรือไม่

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติขั้นต้นพบว่าอาวุธปล่อยที่อันตรายเหล่านี้ มีขนาดที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับระบบที่ปล่อยอาวุธ ซึ่งอาจจะเป็นการปล่อยจากอากาศ จากพื้นดิน หรือจากทางทะเล โดยมีระยะไกลสุดอยู่ที่ 18,000 km (อาวุธปล่อยแบบ Land-based ของ Russia) นอกจากนี้ยังพบว่าข้อมูลของลูกระเบิดนิวเคลียร์ จะมีรายละเอียดทางมิติต่าง ๆ ตามปกติของลูกระเบิด เช่น ขนาดและ

6	Country	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
112	South-East Asia																				
113	Brunei	4.1%	3.9%	3.9%	3.7%	2.5%	2.3%	2.3%	2.4%	2.3%	2.9%	2.9%	2.2%	2.2%	2.3%	3.1%	3.3%	3.5%	2.9%	2.6%	3.3%
114	Cambodia	2.2%	1.8%	1.5%	1.4%	1.3%	1.1%	1.0%	0.9%	0.8%	1.3%	1.5%	1.5%	1.5%	1.6%	1.7%	1.8%	1.9%	2.1%	2.2%	2.3%
115	Indonesia	0.7%	0.6%	0.7%	0.9%	0.9%	0.8%	0.7%	0.7%	0.6%	0.6%	0.6%	0.7%	0.7%	0.9%	0.8%	0.9%	0.8%	0.9%	0.7%	0.7%
116	Laos	0.8%	0.7%	0.6%	0.5%	0.4%	0.4%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	..	..	..	..	..	..
117	Malaysia	1.6%	2.1%	2.2%	2.6%	2.3%	2.2%	2.0%	2.1%	1.9%	2.0%	1.5%	1.6%	1.4%	1.5%	1.5%	1.5%	1.4%	1.1%	1.0%	1.0%
118	Myanmar	2.0%	1.6%	1.1%	1.7%	1.7%	1.4%	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
119	Philippines	1.6%	1.5%	1.5%	1.6%	1.4%	1.3%	1.3%	1.3%	1.3%	1.3%	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	1.1%	1.1%	1.1%	1.3%	0.9%	1.0%
120	Singapore	4.5%	4.8%	4.9%	4.9%	4.4%	4.3%	3.9%	3.6%	3.9%	3.9%	3.4%	3.2%	3.2%	3.1%	3.1%	3.1%	3.2%	3.1%	3.1%	3.2%
121	Thailand	1.5%	1.5%	1.4%	1.3%	1.2%	1.1%	1.2%	1.4%	1.6%	1.8%	1.6%	1.6%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.6%	1.6%	1.4%	1.3%
122	Timor-Leste	xxx	xxx	..	..	..	0.4%	0.6%	0.8%	0.5%	1.1%	0.6%	0.3%	0.5%	0.6%	0.7%	1.2%	1.0%	0.9%	0.7%	1.0%
123	Viet Nam	..	..	..	2.1%	2.0%	1.8%	1.9%	2.3%	2.2%	2.3%	2.3%	2.0%	..	..	..	..	..	..	..	..

ที่มา: ข้อมูลการใช้รายด้านยุทธโประณของแต่ละประเทศ (World Military Expenditures) ปี พ.ศ. 2563 www.sipri.org/databases/milex จาก Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI)

ชนิดของ Payload อย่างไรก็ตาม ไม่พบข้อมูลของ ยานพาหนะที่จะทำการบรรทุกและปล่อยลูกกระเบิด ดังกล่าว ซึ่งถือเป็นเรื่องที่ยังคงปกปิดเป็นความลับ และไม่เปิดเผยต่อสาธารณชน

3.3 ไฟล์ “SIPRI-Milex-data-1949-2019_ World Military Expenditures.xls” เป็นไฟล์ ที่ดาวน์โหลดได้โดยไม่มีค่าใช้จ่ายจากเว็บไซต์ของ Stockholm International Peace Research Institute (www.sipri.org/databases/milex) ซึ่ง เผยแพร่ข้อมูล รวมทั้งอนุญาตให้ดาวน์โหลดฐานข้อมูล ในรูปแบบต่าง ๆ เกี่ยวกับ Military Expenditures ของประเทศต่าง ๆ ในโลก โดยมีข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1949 - 2019 อย่างไรก็ตามพบว่าความสมบูรณ์ ของข้อมูลเป็นไปตามระดับการพัฒนาประเทศ และ นโยบายในการเปิดเผยข้อมูลของแต่ละประเทศใน แต่ละช่วงเวลา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องสกัดเอา เฉพาะข้อมูลที่เราสนใจออกมาและนำมาผ่าน Data Cleansing พอสมควรก่อนการนำมาแสดงผลหรือ วิเคราะห์ผลอื่น ๆ ต่อไป นอกจากนี้พบว่าข้อมูลจาก ประเทศต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะมีความสมบูรณ์มากขึ้นใน ช่วงหลังปี ค.ศ. 2000 ซึ่งเป็นช่วงที่ประเทศส่วนใหญ่ ไม่มีสถานการณ์ทางการเมืองที่ขึ้นจากจำนวนข้อมูล ทั้งสิ้น 180 รายการ ทางกลุ่มงานจะนำเฉพาะข้อมูล ของกลุ่มประเทศ South East Asia 11 ประเทศมา นำเสนอ ดังแสดงในตารางด้านล่าง ทั้งนี้เป็นข้อมูล

การใช้จ่ายของแต่ละประเทศไปในการซื้อ/ผลิต อาวุธ รวมทั้งใช้ในกิจการทางทหาร ตัวเลขใน แต่ละปี แสดงอยู่ในรูป อัตราการเติบโตของ GDP ของแต่ละประเทศ ตัวอย่างบางส่วนแสดงในตาราง ด้านล่าง

4. การแสดงภาพข้อมูล (Data Visualization)

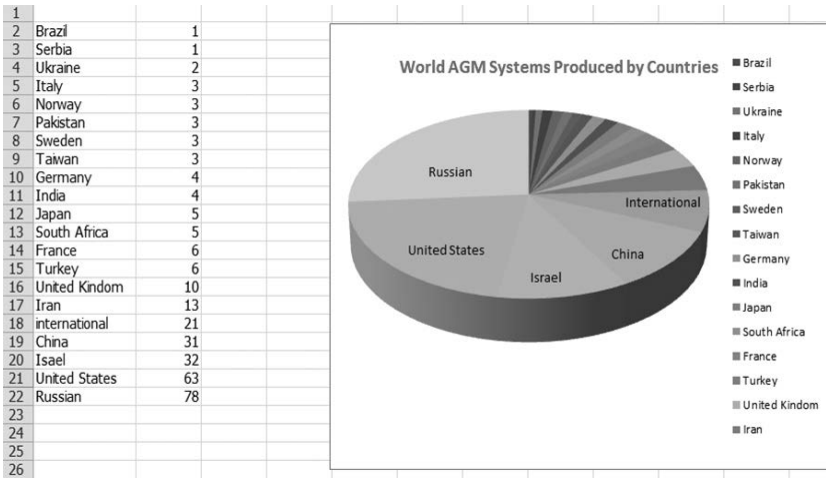
สิ่งสำคัญในการทำ Data Visualization คือ การ คิดหัวข้อ/ประเด็น ของการวิเคราะห์/การนำเสนอ เพื่อให้สามารถแสดงผลออกมาได้น่าสนใจ มีหลักการ และเป็นประโยชน์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ ใช้ทางทหาร [9] โดยในเบื้องต้นผู้เขียนจะสกัดข้อมูล Field ต่าง ๆ ออกมาจากฐานข้อมูลใหญ่เท่าที่จำเป็น ต้องใช้ เพื่อให้สามารถจัดการข้อมูลได้สะดวก (Data Manipulation) หลังจากนั้นจะทำ Data Cleansing ให้ ข้อมูลอยู่ในรูปแบบเดียวกัน ที่เป็นตัวเลข (numeric) และมีความหมาย (valid) รวมทั้งตัดสิ่งต่าง ๆ ที่ไม่ เกี่ยวข้อง (outlier) ออกไป หลังจากนั้นจะใช้วิธี Sorting, Filtering, Grouping และ Counting เพื่อจัดรูปแบบ การแสดงผลให้น่าสนใจ ก่อนนำมาแสดงผลด้วย 3D Pie Chart ในการนำเสนอ “World AGMs Produced by Countries” และแสดงผลด้วย Horizontal Bar Graph ในการนำเสนอ “Max Range of AGMs by Countries” ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Table	Country	Missile name and designation	Length	Diameter	Launch weight	Payload	Propulsion	Range	Status	In-service
2	Land-based ballistic missiles	China	BB11	6.0 m	0.6 m	2,100 kg	480 kg (single conventional HE)	solid	150 km	operational	2004 (but may be 1999)
3	Land-based ballistic missiles	China	BB11M	6.80 m	0.6 m	2,187 kg	480 kg (single conventional HE)	solid	260 km	operational	2007
4	Land-based ballistic missiles	China	DF-3	21.2 m	2.25 m	84,000 kg	2,150 kg (single nuclear, 1-3 MT)	liquid	2,500 km	withdrawn (est)	1970
5	Land-based ballistic missiles	China	DF-3A	21.2 m	2.25 m	84,000 kg	single, conventional (HE) or nuclear	liquid	2,400-2,800 km	withdrawn (est)	1987
6	Land-based ballistic missiles	China	DF-4	28.05 m	2.25 m	82,000 kg	2,200 kg (single nuclear, 1-3 MT)	liquid	5,500 km	operational	1980
7	Land-based ballistic missiles	China	DF-5	36.0 m	3.35 m	183,000 kg	3,900 kg (single nuclear, 1-3 MT)	liquid	12,000 km	operational	1981
8	Land-based ballistic missiles	China	DF-5A	36.0 m	3.35 m	183,000 kg	3,200 kg (single nuclear 1-3 MT)	liquid	13,000 km	operational	1988
9	Land-based ballistic missiles	China	DF-5B	36.0 m	3.35 m	183,000 kg	3 MIRV nuclear, 150-350 kT	liquid	13,000 km	operational	2015
10	Land-based ballistic missiles	China	DF-11	7.5 m	0.8 m	3,800 kg	800 kg (single conventional HE)	solid	260 km	operational	1992
11	Land-based ballistic missiles	China	DF-11A	8.5 m	0.8 m	4,200 kg	500 kg (single conventional HE)	solid	350 km	operational	1999
12	Land-based ballistic missiles	China	DF-15/15A/15B	9.1 m (15),	1.0 m	6,200 kg	500 kg (single conventional HE)	solid	600-800 km	operational	1990 (15), 1996 (15A), 2006
13	Land-based ballistic missiles	China	DF-16	n/k	1.2 m	n/k	500 kg (single conventional HE)	solid	1,000 km	operational	2011 (est)

ที่มา: ข้อมูลของอาวุธปล่อยอันตรายสูง (Offensive Weapons) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane's Defense

รูปที่ 2 แสดงภาพรวมของอุตสาหกรรม AGM ในโลกแบ่งตามประเทศต่าง ๆ ทั้งนี้พบว่ามี Big Players อยู่ 5 ประเทศเท่านั้น ได้แก่ รัสเซีย สหรัฐอเมริกา อิสราเอล จีน และโครงการความร่วมมือของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป ตามลำดับ

นิวเคลียร์, หัวรบแรงระเบิดสูง (HE-High Explosive) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังอาจเป็นแบบ Sub-munition หรือประกอบด้วยหัวรบหลายประเภทย่อยรวมอยู่ด้วยกัน ในตารางฐานข้อมูลใหญ่ ยังประกอบด้วย ข้อมูลของ ICBM หรือ Inter-continental Ballistic



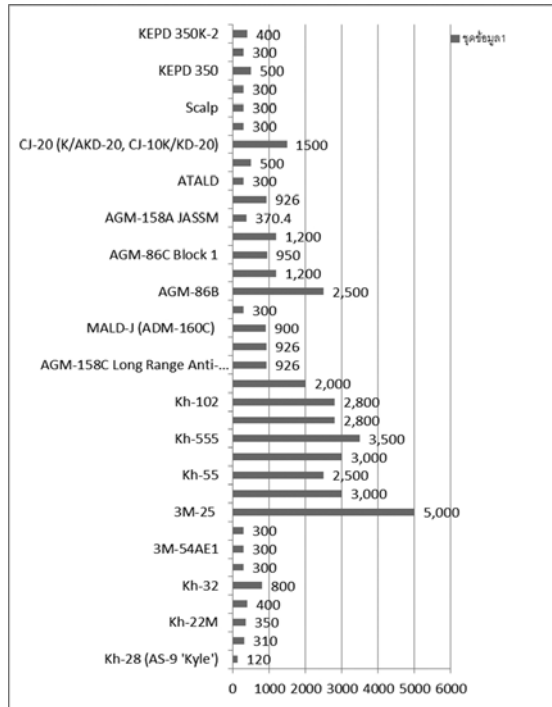
รูปที่ 2 แผนภาพข้อมูลจำนวนขีปนาวุธแบบอากาศสู่พื้นของแต่ละประเทศ (ที่มา: ข้อมูลขีปนาวุธแบบอากาศสู่พื้น (Air-to-Ground Missiles) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane’s Defense)

เราสามารถแสดงผลที่น่าสนใจเพิ่มเติม โดยทำการศึกษารายละเอียดปลีกย่อยของขีปนาวุธซึ่งมีพารามิเตอร์ Field ต่าง ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก และน่าจะต้องใช้ Expert Judgement ประกอบในวงการอาวุธนำวิถี เราจะทราบพิสัยสูงสุด (Max Range) ที่ไกลกว่า 300 km น่าจะเป็นสิ่งที่ถือว่าอันตรายและมีเพียงไม่กี่ประเทศที่จะมีหรือใช้อาวุธดังกล่าวซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 3 “Max Range of AGMs by Countries”

นิตยสาร Jane’s Defense ได้ทำการรวบรวมฐานข้อมูล Offensive Weapon หรือ “อาวุธปล่อย” ที่จัดว่าเป็นอาวุธที่อันตรายของโลกไว้ อาวุธเหล่านี้ถูกออกแบบมาให้สามารถติดตั้งหัวรบ (Warhead) แบบอันตรายสูง เช่น แบบสารเคมีอันตราย, หัวรบ

Missile หรือขีปนาวุธข้ามทวีปซึ่งส่วนใหญ่เป็นอาวุธที่มีพิสัยไกลกว่า 5000 km ซึ่งในจำพวก ICBM นี้ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถนำหัวรบของ Missile จำนวนมากมาจัดรวมอยู่ด้วยกันในลักษณะของ Cluster ซึ่งเรียกว่า Multiple Independently targetable Reentry Vehicle (MIRV) สามารถถูกโปรแกรมให้กระจายตัวลงสู่เป้าหมายต่าง ๆ กันได้อย่างแม่นยำ ในขาลงของจรวด Missile เมื่อกลับคืนสู่โลกหลังผ่านจุด Apogee ซึ่งมีระยะความสูงกว่า 2000 km

ในตารางฐานข้อมูลอาวุธปล่อยอันตรายสูงข้างต้นยังสามารถแบ่งออกอาวุธปล่อยได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะของการปล่อยอาวุธ ได้แก่ 1) Land-based Ballistic Missile ปล่อยจากพื้นไปสู่พื้นดังแสดงในรูป

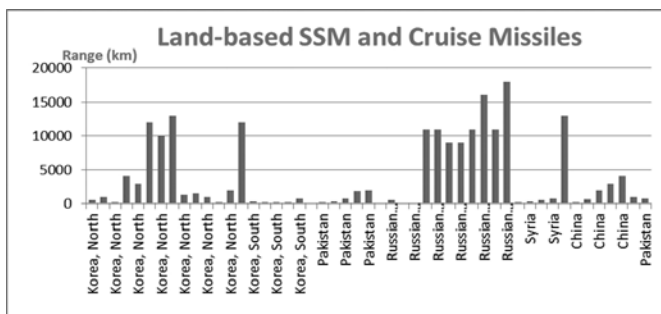


รูปที่ 3 แผนภาพแสดงกราฟแท่ง Max Range of AGMs by Countries (ที่มา: ข้อมูลจรวดนำวิถีแบบอากาศสู่พื้น (Air-to-Ground Missiles) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane's Defense)

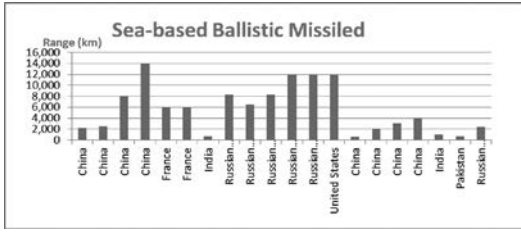
ที่ 4 2) Sea-based Cruise Missile (SSM) ปล่องจากพื้นผิวทะเล หรือเรือดำน้ำไปสู่พื้นดังแสดงในรูปที่ 5 และ 3) Air-launched Cruise Missile (ASM) ปล่องจากอากาศไปสู่พื้นดังแสดงในรูปที่ 6 รวมทั้งยังแบ่งออกได้เป็น อาวุธอันตรายสูงที่เป็นจรวด Missile ซึ่งมีระบบขับเคลื่อนเป็นของตนเอง และในส่วนที่เป็นระเบิดนิวเคลียร์ (Nuclear Bomb) ซึ่งไม่มีระบบ

ขับเคลื่อนของตนเองและขึ้นอยู่กับภารกิจระเบิดของอากาศยานที่บรรทุกระเบิดไปเท่านั้น

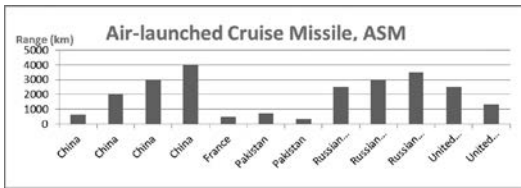
ภายหลังการ Cleansing, Grouping, Sorting และ Filtering ที่เหมาะสม เราสามารถแสดงกราฟของระบบอาวุธดังกล่าวได้เป็น 3 ประเภทหลักที่กล่าวมา ในรูปที่ 4 - 6 ตามลำดับ



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงกราฟของระบบอาวุธปล่องจากพื้นสู่พื้น (ที่มา: ข้อมูลของอาวุธปล่องอันตรายสูง (Offensive Weapons) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane's Defense)



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงกราฟของระบบอาวุธปล่อยจากพื้นผิวนทะเลหรือเรือดำน้ำสู่พื้น (ที่มา: ข้อมูลของอาวุธปล่อยอันตรายสูง (Offensive Weapons) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane's Defense)



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงกราฟของระบบอาวุธปล่อยจากอากาศสู่พื้น (ที่มา: ข้อมูลของอาวุธปล่อยอันตรายสูง (Offensive Weapons) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane's Defense)

สิ่งที่สามารถสรุปได้จากกราฟทั้ง 3 พบว่า นอกจากอาวุธอันตรายเหล่านี้จะมีใช้หรือพัฒนาจากประเทศขนาดใหญ่และมีภัยคุกคามทางบกสูง เช่น สหรัฐอเมริกา รัสเซีย จีน ปากีสถาน ฝรั่งเศส และเกาหลีเหนือ ยังพบสิ่งที่น่าสนใจว่าไม่มี Land-based Cruise Missile ระดับความอันตรายสูงจากสหรัฐอเมริกา เลย แต่พบว่ามีอาวุธจากจีน รัสเซีย และปากีสถาน อยู่เป็นจำนวนมาก ในขณะที่สหรัฐอเมริกา มีการพัฒนา Sea-based Ballistic Missile จำนวนมากซึ่งรวมไปถึงระบบอาวุธแบบ Submarine-launch และพบว่าทุก ๆ ประเทศมหาอำนาจมีส่วนในการพัฒนาระบบอาวุธแบบ Air-launched Cruise Missile มากพอ ๆ กัน จุดนี้สะท้อนให้เห็นถึงภัยคุกคาม (Threats) ที่อยู่รอบ ๆ ประเทศแต่ละประเทศ ซึ่งไม่เหมือนกัน ประเทศที่มีภัยคุกคามทางบกจากประเทศต่าง ๆ ที่มีชายแดนติดกันมักจะพัฒนา Land-based Cruise Missile แต่ประเทศที่อยู่ติดทะเลมักจะพัฒนา Sea-based Cruise Missile

5. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากฐานข้อมูล Offensive Weapons อาจมีคำถามว่า ความอันตรายของอาวุธเหล่านี้พิจารณาจากอะไร ในการวิเคราะห์เราจะ Filter เฉพาะอาวุธที่มีพิสัยมากกว่า 1000 km เพื่อมุ่งไปที่อาวุธปล่อยที่มีระยะที่ค่อนข้างไกล เพื่อให้ได้ Player ที่พัฒนาอาวุธที่มีนัยสำคัญจริง ๆ ในที่นี้คำถามที่ชัดเจนมากขึ้นคือ ขนาดของอาวุธปล่อยแปรผันตามพิสัยของอาวุธปล่อยซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ความอันตรายของอาวุธใช่หรือไม่

5.1 ความเป็นอันตรายของอาวุธในโลกประเภทจรวดและขีปนาวุธ

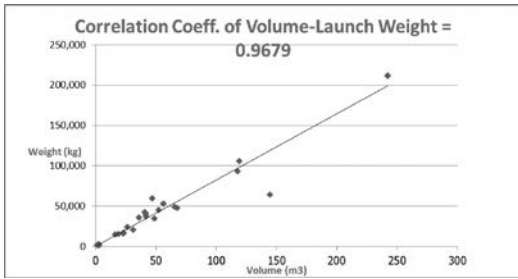
จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางฐานข้อมูล ซึ่งมี Field “Length (m)”, “Diameter (m)”, “Weight (kg)” และ “Range (km)” เราจะทำ Data Fusion ของ 2 Field ข้อมูล เพื่อให้เกิด Field ข้อมูลใหม่คือ

$$\text{ปริมาตรของจรวด (Volume)} = \pi R^2 h$$

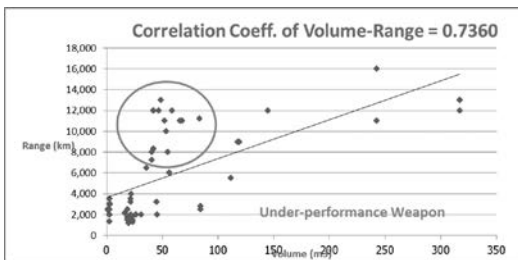
แสดงใน คอลัมน์สีแดง ในตาราง เมื่อ R = รัศมีของจรวด และ h = ความยาวของจรวด แล้วใช้ Scattering Plot แสดงสหสัมพันธ์ (Correlation) ของ Volume และ Weight

- 1
- Volume และ Range ----- 2

ที่มา: ข้อมูลของอาวุธปล่อยอันตรายสูง (Offensive Weapons) ของโลก ปี 2562 นิตยสาร Jane's Defense



รูปที่ 7 กราฟแสดง Correlation Coefficient ระหว่าง Volume และ Launch Weight ของอาวุธ (ที่มา: ข้อมูลของอาวุธปล่อยอันตรายสูง (Offensive Weapons) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane's Defense)



รูปที่ 8 กราฟแสดง Correlation Coefficient ระหว่าง Volume และ Range ของอาวุธ (ที่มา: ข้อมูลของอาวุธปล่อยอันตรายสูง (Offensive Weapons) ของโลก ปี 2562 จากนิตยสาร Jane's Defense)

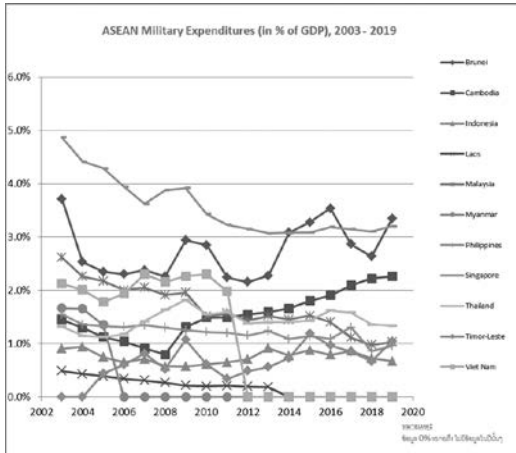
กราฟในรูปที่ 7 - 8 ด้านบน แสดงค่า Correlation Coefficient ที่สอดคล้องกันสูงมาก สำหรับปริมาตร (Volume) และ น้ำหนัก (Weight) ในขณะที่พบความสอดคล้องกันที่ต่ำ สำหรับน้ำหนัก (Volume) และพิสัย (Range) แต่จาก Expert Judgement เราทราบว่า ค่าความอันตรายของอาวุธนำวิถีข้ามทวีปเหล่านี้ สามารถพิจารณาได้จากพิสัย (Range) ความเร็วต้น (Initial Velocity) และประเภทของหัวรบ (Warhead) ที่บรรจุทุกไปซึ่งมีอยู่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถเลือกผสมหัวรบหลายประเภทเข้าด้วยกันได้ด้วย ความต่างของค่าสหสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า ในขณะที่เราทราบว่า ปริมาตรของอาวุธปล่อยนำวิถีจะต้องแปรผันตรงกับน้ำหนักอย่างแน่นอน ปริมาตรของอาวุธกลับมีค่าสหสัมพันธ์ที่ต่ำกว่ากับพิสัย

แสดงให้เห็นว่าพิสัยของอาวุธปล่อยนำวิถีไม่ได้แปรผันตรง หรือขึ้นอยู่กับปริมาตรของมันเท่าใดนัก หากแต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ด้วย อาทิ ประเภทของระบบขับเคลื่อนและประเภทของหัวรบที่ใช้ เป็นต้น

นอกจากนี้ ในรูปที่ 8 การหาสหสัมพันธ์ทำให้เราสามารถจำแนกอาวุธในเบื้องต้นได้เป็นกลุ่มอาวุธประสิทธิภาพสูงและกลุ่มอาวุธประสิทธิภาพต่ำซึ่งแสดงในวงกลมสีเขียว ทั้งนี้ในกลุ่มประสิทธิภาพสูงส่วนใหญ่ จะมี Volume ต่ำ แต่ Range สูง ส่วนมากผลิตจาก Russia และสังเกตได้ว่าใช้ระบบเชื้อเพลิงเป็น Solid Propellant หรือ Liquid Propellant

5.2 การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend Analysis) ด้วยเส้นกราฟที่ดีที่สุด (Best Fit) ของค่าใช้จ่ายทางทหาร (Military Expenditures) ของประเทศต่าง ๆ

เมื่อทราบถึงอาวุธปล่อยนำวิถีแบบต่าง ๆ ในโลก ทั้งแบบธรรมดาและแบบที่มีอันตรายสูงแล้วและทราบถึง Big Players ในวงการแล้ว เมื่อมองย้อนกลับมาที่ประเทศไทย สิ่งที่น่าสนใจคือ สทป. ก็สามารถพัฒนาอาวุธปล่อยดังกล่าวได้เช่นกัน (ปัจจุบันสามารถทำได้ที่ระยะไกลสุด 180 km) ดังนั้นจึงเป็นที่น่าติดตามว่าเมื่อประเทศไทยตัดสินใจพัฒนาวิจัยระบบอาวุธทางการทหารด้วยตนเองแล้วงบประมาณที่ประเทศไทยใช้จ่ายไปในทางการทหารในปัจจุบันมีมูลค่าเท่าใดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มประเทศ ASEAN เพื่อนบ้านแล้วเป็นอย่างไรงบประมาณที่ใช้ยุ่น่าจะลดน้อยลงเรื่อย ๆ หรือไม่ และน่าจะมีค่าเท่าใดในอนาคตทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำข้อมูล World Military Expenditures มาพล็อตเพื่อเปรียบเทียบกัน ในรูปที่ 9 และทำการหาแนวโน้มภายหลังจากที่ทำความสะอาดข้อมูลแล้วระดับหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 10 - 11 ตามลำดับ

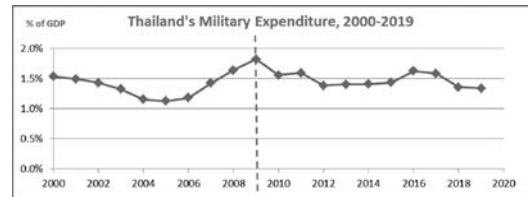


รูปที่ 9 แสดงการใช้จ่ายทางการทหารของกลุ่มประเทศ ASEAN ในช่วงปี ค.ศ. 2000 - 2019 (ที่มา: World Military Expenditures ปี 2563 www.sipri.org/databases/milex ของ SIPRI)

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ประเทศสิงคโปร์ และบรูไน ต่างลงทุนไปกับกิจการทางทหารในมูลค่าที่สูงมาก (3-5% ของ GDP เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศไทย ที่ 1-2% ของ GDP) สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือ ในประเทศทั้งหมด มีเพียงสิงคโปร์ประเทศเดียวที่ค่อนข้างโดดเด่นในปัจจุบันที่สามารถสร้างอุตสาหกรรมทางทหารในคุณภาพที่เป็นที่ยอมรับในระดับโลกเป็นจำนวนมาก ภายใต้ Brand – “STK” หรือ “ST-Engineering”

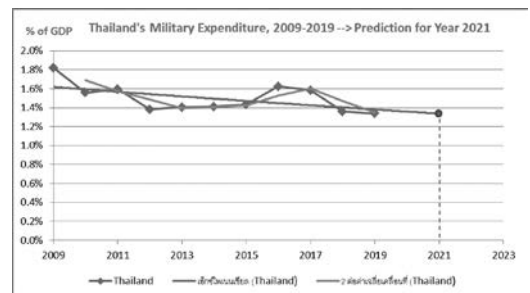
ประเทศไทยเริ่มกิจการพัฒนาวิจัยภายหลังสิงคโปร์พอสมควรและด้วยงบประมาณในการลงทุนที่ต่ำกว่ามากและอยู่ในช่วง 1 - 2% ของ GDP ของประเทศ อย่างไรก็ตามหากสังเกตกราฟของประเทศไทยในรูปที่ 9 จะพบว่าเราใช้งบประมาณทางทหารในระดับที่พอประมาณและมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ และหากสนใจว่าเรามีแนวโน้มว่าจะใช้งบประมาณในกิจการทางทหารเป็นมูลค่าเท่าใดในอนาคต เช่น ในอีก 2 ปีถัดไป (เป็นปี 2021) เราสามารถหาเส้นกราฟที่เหมาะสมที่สุด (Best fit) ที่เหมาะสมที่สุดให้กับชุดข้อมูลของประเทศไทยได้ ดังแสดงในรูปที่ 10-11 ตามลำดับ โดยใน MS Excel มี

ให้เลือกหลายแบบ (ดังแสดงด้านล่าง) ทั้งแบบเส้นตรงและเส้นโค้ง ทั้งนี้การเลือกใช้รูปแบบใดจะขึ้นอยู่กับความรู้เกี่ยวกับ Curve Fitting และความเข้าใจในธรรมชาติของชุดข้อมูลนั้น ๆ



รูปที่ 10 แสดงกราฟการใช้จ่ายทางการทหารของไทย แยกออกมาจากประเทศอื่น ๆ สังเกตว่ามีการเริ่มลดลงประมาณในการซื้ออาวุธอย่างมีนัยสำคัญ (ที่มา: World Military Expenditures ปี 2563 www.sipri.org/databases/milex ของ SIPRI)

จากกราฟ ในรูปที่ 10 พบความไม่ต่อเนื่องในช่วงปี 2009 ดังนั้นอาจจะเหมาะสมกว่าหากเราพิจารณาเฉพาะช่วงปี ค.ศ. 2009-2019 ดังแสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้ มีความเป็นไปได้ที่รัฐบาลจะเริ่มลดงบประมาณในการซื้ออาวุธลงอย่างมีนัยสำคัญและเริ่มพัฒนาวิจัยอาวุธขึ้นแทนการนำเข้า (บางส่วน) หลังจากปี พ.ศ.2552 (หรือ ค.ศ. 2009 ในกราฟ) ซึ่งเป็นปีที่จัดตั้งสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.)



รูปที่ 11 แสดงกราฟที่ดีที่สุด (Best fit) เส้นที่เชื่อมกับเส้นประที่เหมาะสมกับข้อมูลของประเทศไทย (ที่มา: World Military Expenditures ปี 2563 www.sipri.org/databases/milex ของ SIPRI)

ผู้เขียนเลือกใช้ Prediction แบบ Exponential Fitting ซึ่งออกมาคล้ายคลึงกับการใช้ Linear Line Fitting เนื่องจากเชื่อว่า กราฟน่าจะเริ่มอิมตัวและไม่น่าจะลดลงมากไปกว่านี้เท่าใดนักในอนาคต ทั้งนี้ ค่าของ Expenditure ที่พยากรณ์สำหรับปี ค.ศ. 2021 อยู่ที่ 1.35 % ของ GDP ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่า น่าจะเป็นตัวเลขที่มีความเป็นไปได้สูง หากไม่เกิด Covid-19 Pandemic ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับวิธีอื่นในการหาเส้นแนวโน้มเราได้ลองใช้วิธี ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ หรือ Moving Average เส้นสีเขียวมาประกอบด้วยจะพบสิ่งที่น่าสนใจคือ วิธี Moving Average จะทำให้ข้อมูลมีการแกว่งตัวน้อยลงแต่น่าจะเหมาะสมกับกรณีของการเฉลี่ยค่าที่วัดจากกลุ่มประชากรจำนวนมาก เช่น การทดลองทางวิทยาศาสตร์ ที่มีการวัดที่ Sampling Rate สูง ๆ และมี ΔT ที่สั้น ๆ และไม่เหมาะกับการทำนายแนวโน้มในระยะเวลา 2 ปี ในกรณีนี้

6. สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลในกรณีศึกษาอาวุธปล่อยนำวิถีแบบอากาศสู่พื้นและอาวุธอันทรรายสูงของโลกและการลงทุนทางการทหารของไทย

การวิเคราะห์ข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัลโดยใช้กรณีศึกษาเป็นอาวุธปล่อยนำวิถีแบบอากาศสู่พื้นและอาวุธอันทรรายสูงของโลก เป็นการทดลองตั้งโจทย์ปัญหาจากข้อมูลเพื่อให้ทราบถึงธรรมชาติของข้อมูลที่น่ามาใช้ในการแสดงภาพข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อฝึกการรวบรวมองค์ความรู้และข้อมูลของเทคโนโลยีป้องกันประเทศต่างและทำการสังเคราะห์ให้เกิดประโยชน์สำหรับเผยแพร่ให้กับประชาสังคมเพื่อนำไปสู่การพัฒนาหลักคิดและแนวทางในการปฏิบัติงานภายในกลุ่มบริการทางวิชาการและเทคโนโลยีให้ประสบผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัด ก.พ.ร. ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

ของ สทป. ที่กลุ่มบริการทางวิชาการและเทคโนโลยีรับผิดชอบ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำหลักการทางวิชาการและทฤษฎีด้านข้อมูลและสารสนเทศการวิเคราะห์ข้อมูลการสร้างภาพข้อมูลการวิเคราะห์แนวโน้มและการคาดคะเนข้อมูลมาดำเนินการกับฐานข้อมูลที่รวบรวมมาจากฐานข้อมูล Jane's Defense ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่เชื่อถือได้เกี่ยวกับระบบอาวุธของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ประกอบด้วย ข้อมูลของอาวุธปล่อยแบบอากาศสู่พื้น (Air-to-ground missiles) ทั้งแบบนำวิถีและไม่นำวิถี และข้อมูลการใช้จ่ายของแต่ละประเทศทั่วโลกในการซื้อ/ผลิต อาวุธ รวมทั้งใช้ในกิจการทางทหาร

ผลแสดงภาพข้อมูลได้ข้อสรุปว่ามีประเทศผู้มีบทบาทเป็นผู้เล่นหลัก (Big players) ของโลกสำหรับอาวุธปล่อยนำวิถีซึ่งส่วนใหญ่ใช้เทคโนโลยีสูงอยู่ 5 ประเทศ ได้แก่ รัสเซีย สหรัฐอเมริกา อิสราเอล จีน และโครงการความร่วมมือของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรปตามลำดับ รูปแสดงการจัดกลุ่มข้อมูลอาวุธปล่อยแสดงให้เห็นถึงภัยคุกคาม (Threats) ที่อยู่รอบ ๆ ประเทศแต่ละประเทศซึ่งไม่เหมือนกันทั้งทางบกและทางทะเลซึ่งส่งผลถึงแนวโน้มในการที่แต่ละประเทศจะเลือกพัฒนาประเภทของอาวุธปล่อยของตน (Land-based หรือ Sea-based cruise missile)

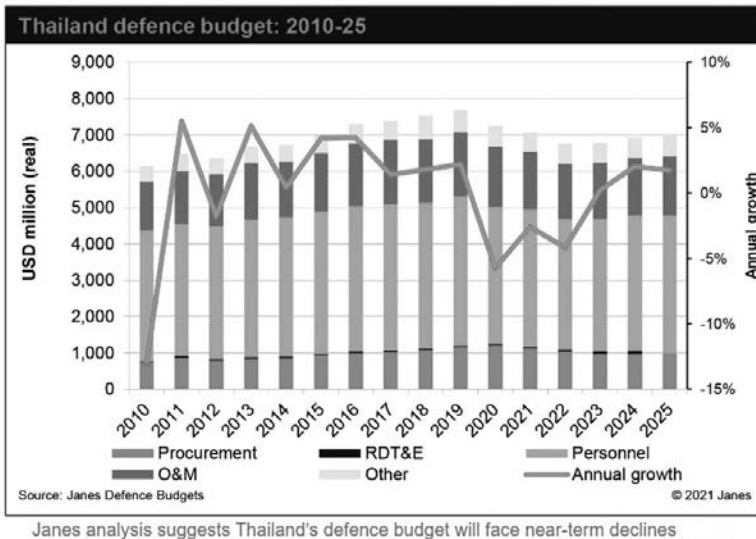
การวิเคราะห์ข้อมูลจากฐานข้อมูลอาวุธที่มีความอันทรรายสูง (Offensive weapons) ทำให้เราทราบว่า สทป. ซึ่งพัฒนางานวิจัยจรวดนำวิถีแบบ D1G อยู่ไม่น่าจะถูกจัดเป็นภัยคุกคามหรือมีความอันทรรายสูงเนื่องจากมีพิสัยเพียง 180 km ในขณะที่อาวุธนำวิถีที่จัดว่ามีความร้ายแรงในฐานข้อมูล มีพิสัยสูงสุดถึง 18,000 km และเมื่อหาสหสัมพันธ์ (Correlation)

ของพิสัยและปริมาตร เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ น้ำหนักและปริมาตรของซีปนาวุธและแสดงผลโดยใช้ Scattering Plot พบสิ่งที่น่าสนใจคือ 1) ปริมาตรของ ซีปนาวุธมีสหสัมพันธ์กับน้ำหนักมากกว่าพิสัยทำการ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระยะใกล้ - ไกลของซีปนาวุธไม่ได้ แปรผันขึ้นตรงกับปริมาตรเสียทีเดียวและเราพบว่า พิสัยของซีปนาวุธซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการ ระบุความอันตรายของมันยังขึ้นกับชนิดของหัวรบ ความเร็วต้นและเทคโนโลยีของระบบขับเคลื่อนด้วย นอกจากนี้ การหาสหสัมพันธ์ยังทำให้เราเห็นการ จำแนกระบบอาวุธประสิทธิภาพต่ำ (ปากีสถาน เกาหลี ตุรกี เป็นต้น) แยกออกมาจากอาวุธประสิทธิภาพสูง (กลุ่มประเทศยุโรป รัสเซีย และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น)

ท้ายสุดจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางการ ทหารของกลุ่มประเทศ ASEAN ในปัจจุบัน พบว่า สิงคโปร์และบรูไน มีการใช้จ่ายด้านนี้ สูงเกือบ 5% ของ GDP ในขณะที่ประเทศอื่น ๆ รวมทั้งประเทศไทย

มีค่าใช้จ่ายอยู่ประมาณ 1 - 2% เท่านั้น จากกราฟ ประเทศไทยมีการลดปริมาณการซื้ออาวุธอย่างมี นัยสำคัญ ในปี 2552 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจัดตั้ง สหป. อย่างเป็นทางการและกราฟของการใช้จ่าย มีการลดลงทีละน้อยอย่างต่อเนื่องและมีนัยสำคัญ ซึ่งเราสามารถใส่สมการ Exponential (หรือในหลาย ๆ กรณีอาจใช้ Moving average) ในการทำ Curve Fitting และแสดงการพยากรณ์การใช้จ่ายทางการทหารใน ปี 2021 ออกมาได้ที 1.35% ของ GDP (ข้อมูลก่อนเกิด Covid-19 Pandemic)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในองค์ประกอบหลักของ ค่าใช้จ่ายทางการทหารของประเทศไทยทางเว็บไซต์ ของนิตยสาร Jane's Defense ได้รวบรวมข้อมูล ตั้งแต่ปี ค.ศ.2010 มาแสดง รวมทั้งทำการพยากรณ์ ข้อมูลจนถึงปี ค.ศ. 2025 และได้แบ่งประเภทข้อมูล ค่าใช้จ่ายทางการทหารทั้งหมดออกเป็นหมวดหมู่ หลัก ๆ ไว้อย่างน่าสนใจ ดังรูปที่ 12 ด้านล่าง



รูปที่ 12 แสดงกราฟแท่งค่าใช้จ่ายทางการทหารของประเทศไทย จากเว็บไซต์ทางการของนิตยสาร Jane's Defense ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 พยากรณ์จนถึงปี 2025 (ที่มา: www.janes.com/defence-news/news-detail/thailand-cuts-defence-budget-again_17744)

สิ่งที่สามารถสรุปได้จากแนวโน้มของกราฟในรูปที่ 12 ได้แก่ 1) ประเทศไทยมีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อจัดจ้าง (Procurement) ที่ค่อนข้างคงที่ และมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ 2) ประเทศไทยมีค่าใช้จ่ายในส่วนของเงินเดือนบุคลากร (Personnel) ทางทหารที่สูงมาก 3) ประเทศไทยมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการปฏิบัติงานและการปรนนิบัติบำรุง (O&M) ที่สูงมากมาโดยตลอด และสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อจัดจ้างอยู่พอสมควร 4) ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันประเทศไทยจัดงบประมาณสำหรับการพัฒนาวิจัยและการทดสอบ (Research, Development, Test and Evaluation – RDT&E) ในปริมาณที่น้อยมากมาโดยตลอด

7. เอกสารอ้างอิง

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

[2] ปรีชา ประดับมุข. 2563. ประกาศสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ 18/2563. เรื่อง การแบ่งส่วนงาน กำหนดหน้าที่ความรับผิดชอบ และกำหนดอำนาจการบังคับบัญชา. จำนวน 27 หน้า.

[3] วศิน ศิวสฤกษ์ดี. 2564. Data Analysis and Digital Transformation” – เอกสารประกอบการอบรม, หลักสูตร Smart Executive Development Beyond. สถาบันเสริมศึกษาและทรัพยากรมนุษย์. มธ

[4] พีระยุทธ สารตายน. 2563. แนวทางการสร้างสหป. ให้เป็นศูนย์ความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีป้องกันประเทศ - Guidelines for Defence Technology Excellence Center Development. เอกสารนำเสนอ Process Innovation Project หลักสูตร Smart Supervisor-2. สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ.

[5] Scott Tilley. 2019. Systems Analysis

and Design. 12th Edition. Cengage Learning. San Francisco, CA. 576 p.

[6] Juso Jonatan & Hilden Koponen. 2019. Data Visualization Handbook. Aalto-yliopisto, Aalto University. Finland. 352 p.

[7] Paul Kinley. 2016. Data Analytics for Beginners: Basic Guide to Master Data Analytics. CreateSpace Independent Publishing Platform. Amazon. 86 p.

[8] สาคร เมฆรักชาวนิช. 2563. ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ. ปีที่ 2 ฉบับที่ 5 พฤษภาคม – สิงหาคม 2563. หน้า 4 – 15.

[9] Valérie Lavigne & Denis Gouin. 2011. Applicability of Visual Analytics to Defence and Security Operations. 16th Research and Technology Symposium International Command and Control “Collective C2 in Multinational Civil-Military Operations” (ICCRTS 2011), Quebec Canada, June 21-23.

การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วยแบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิง วิเคราะห์ กรณีศึกษา ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน

ไพศาล จีฟู^{1*} วัชรารณณ์ ปริตากรมย์² และ ชัชชฎาวัลล์ ชิลศิริ³

วันที่รับ 19 กรกฎาคม 2564 วันที่แก้ไข 3 สิงหาคม 2564 วันตอบรับ 3 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

ภัยพิบัติน้ำท่วมเป็นปัญหาที่ทั่วโลกต่างประสบและได้สร้างความเสียหายอย่างใหญ่หลวง การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม กรณีศึกษา ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน วิธีการดำเนินงานได้ใช้แบบสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ให้ค่าคะแนนน้ำหนักปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 6 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ความลาดชัน ลักษณะพื้นที่และความสูง ระยะห่างจากลำน้ำ การใช้ประโยชน์ที่ดิน และชุดดิน และนำมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ โดยแบ่งระดับพื้นที่เสี่ยงออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ สูงมาก สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก ผลการศึกษาพบว่าค่าจากแบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดน้ำท่วมมากที่สุด ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน (0.328) รองลงมาคือความลาดชัน (0.285) ลักษณะพื้นที่และความสูง (0.144) ระยะห่างจากลำน้ำ (0.114) การใช้ประโยชน์ที่ดิน (0.082) และชุดดิน (0.046) ค่าสัดส่วนความสอดคล้อง มีค่า 0.0035 ค่าดัชนีความสอดคล้อง มีค่า 0.043 และดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง มีค่า 6.0216 ตามลำดับ ระดับความเสี่ยงสูง มีพื้นที่ 10,380 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 71 ของพื้นที่ทั้งตำบล ระดับความเสี่ยงปานกลาง มีพื้นที่ 2,681 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 18 ของพื้นที่ทั้งตำบล ระดับความเสี่ยงสูงมาก มีพื้นที่ 1,380 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 9 ของพื้นที่ทั้งตำบล และระดับความเสี่ยงต่ำและระดับต่ำมาก มีพื้นที่ 191 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 1.30 ตามลำดับ เจ้าหน้าที่หน่วยความมั่นคงสามารถนำข้อมูลและผลการศึกษาไปใช้งานในการเตรียมการป้องกันในอนาคต

คำสำคัญ : พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, แบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

¹ หน่วยวิจัยเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่, สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, มหาวิทยาลัยพะเยา

² สาขาวิชาสรีรวิทยา, คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์, มหาวิทยาลัยพะเยา

³ สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, มหาวิทยาลัยพะเยา

* ผู้แต่ง, อีเมล: phaisarn.je@up.ac.th / p.jeefoo@gmail.com

Flood Risk Assessment using Analytical Hierarchy Process: A Case Study in Pua Subdistrict, Pua District, Nan Province

Phaisarn Jeefoo^{1*} Watcharaporn Preedapirom² and Chatchadawan Chinkeeree³

Received 19 July 2021, Revised 3 August 2021, Accepted 3 August 2021

Abstract

Flood disasters are a global problem and have caused tremendous damages. The main objective of this research is to assess flood risk areas, a case study of Pua subdistrict, Pua district, Nan province. For an operation method, we used an expert interview form as a scorer for the weight of 6 related factors consist of rainfall, slope, elevation, stream distance, land use and soil series and analyzed by analytical hierarchy process (AHP) model by dividing the risk areas into 5 levels comprise of very high, high, moderate, low and very low. Results were achieved by AHP calculation for most contributing factors to flooding. The most contributing factor is rainfall at 0.328, the second being slope at 0.285, the third being elevation at 0.144, the fourth being stream distance at 0.114, the fifth being land use at 0.082 and the least contributing factor being soil series at 0.046. The consistency ratio (CR), consistency Index (CI), and Random Index (RI) were accepted with values of 0.0035, 0.043 and 6.0216, respectively. The high risk level of damaged area was 10,380 Rai, or 71% of the study area. The moderate risk level of damaged area was 2,681 Rai, or 18% of the study area, the very high level was covered 1,380 Rai, or 9% of the study area, and the low and very low was 191 Rai or 1.30%. Security personnel can use the information and results of this study to prepare for future defence.

Keywords : Flood risk area, Geographic Information Systems, Analytical Hierarchy Process

¹ Research Unit of Spatial Innovation Development (RUSID), Geographic Information Science, School of Information and Communication Technology, University of Phayao

² Physiology, School of Medical Sciences, University of Phayao

³ Geographic Information Science, School of Information and Communication Technology, University of Phayao

* Corresponding author, E-mail: phaisarn.je@up.ac.th / p.jeefoo@gmail.com

1. บทนำ

ภัยธรรมชาติหรือปรากฏการณ์รุนแรงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีผลกระทบต่อทำให้มนุษย์ไม่สามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติสุข ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิต และทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้สังคมเสื่อมโทรมลง [1] หนึ่งในภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยคืออุทกภัยหรือน้ำท่วม ซึ่งเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุดคิดเป็น 41.4% ตามมาด้วย แผ่นดินไหว และพายุ โดยทวีปเอเชียได้รับผลกระทบสูงสุด [2] สำหรับประเทศไทยพบว่าตัวเลขความเสียหายจากน้ำท่วมได้เพิ่มขึ้นจาก 6,000 ล้านบาทในปี 1990 เป็น 40,000 ล้านบาทในปี 2000 และ 1.44 ล้านล้านบาทในปี 2554 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี 2554 [3] นี้ถูกจัดให้เป็นภัยพิบัติครั้งสร้างความเสียหายมากที่สุดเป็นอันดับสี่ของโลก รองจากแผ่นดินไหวและสึนามิที่ญี่ปุ่นในปี 2554 แผ่นดินไหวที่ญี่ปุ่นในปี 2538 และพายุเฮอริเคนแคทเธอรินาที่เกิดในสหรัฐอเมริกาในปี 2548 ตามลำดับ [4]

ประเทศไทยมีพื้นที่ 513,115 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ใจกลางคาบสมุทรอินโดจีนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยที่ผ่านมาประเทศไทยประสบกับปัญหาน้ำท่วมเป็นประจำทุกปีและเกิดในทั่วทุกภาคของประเทศอันเนื่องมาจากปัจจัยทางด้านภูมิศาสตร์ที่ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นซึ่งทำให้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ตลอดจนมีพายุพัดผ่านตลอดทั้งปี [5] โดยสิ่งจำเป็นเร่งด่วนที่ขาดไม่ได้สำหรับการประเมินระดับความเสียหายและระดับความรุนแรงของน้ำท่วมก็คือข้อมูลสารสนเทศหรือแผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่ที่ประสบภัยพิบัติ [6,7] ทั้งนี้วิธีการแบบเดิม ๆ ในอดีตที่ใช้กันมา เช่น การทำแผนที่น้ำท่วมได้

ใช้วิธีการทำสำรวจรังวัดภาคสนามนั้นทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงและใช้ระยะเวลาอันยาวนานอีกทั้งบางบริเวณพื้นที่มีขนาดใหญ่ตลอดจนการเข้าถึงพื้นที่ยากลำบาก

ปัจจัยการเกิดน้ำท่วมนั้น มีหลายปัจจัยที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาปัจจัยการเกิดน้ำท่วมเพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และแนวทางป้องกันบรรเทาในบริเวณลุ่มน้ำย่อยทะเลสาบสงขลาฝั่งตะวันตก จังหวัดพัทลุง ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำท่วมโดยข้อมูลที่น่ามาใช้ในการศึกษาคือ ข้อมูลสถิติ ข้อมูลปัจจัยและความสัมพันธ์ของชุมชน จากการเก็บข้อมูลภาคสนามและแบบสัมภาษณ์ ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ [8] นอกจากนี้ฐานข้อมูลภูมิศาสตร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม นั้น ได้คำนึงถึงกิจกรรมการใช้ที่ดินอยู่ 5 ประเภท ได้แก่ พื้นที่นา พื้นที่ชุมชน พื้นที่พืชไร่ พื้นที่ว่างเปล่า พื้นที่ป่าเสื่อมโทรม และพื้นที่ป่าไม้ โดยสามารถแบ่งระดับความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับมากที่สุด ระดับมาก ระดับปานกลาง ระดับต่ำ และระดับต่ำมาก โดยได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดน้ำท่วมโดยพบว่ามีตัวแปรทั้งหมด 5 ตัวแปร คือ ความลาดชัน ความสูงของพื้นที่ ลักษณะการใช้ที่ดิน คุณสมบัติในการระบายน้ำของดิน และความหนาแน่นของลำน้ำที่มีความสัมพันธ์กับความสูงของพื้นที่ โดยให้ค่าน้ำหนักตัวแปรลดหลั่นตามลำดับ โดยเรียงความสำคัญของตัวแปรจากมากไปหาน้อย คือ 5, 4, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ [9] หรือกรณีศึกษาหาพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในเขตลุ่มน้ำแม่กวง ซึ่งได้ใช้หลักการซ้อนทับข้อมูล (Overlay) พบว่ามีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนทั้งสิ้น 8 ตัวแปร ได้แก่ ความหนาแน่นของลำน้ำ ความหนาแน่นเส้นทางคมนาคม การใช้ประโยชน์ที่ดิน ความสูงจากระดับ

น้ำทะเล ความลาดชันของพื้นที่ ความสามารถในการระบายน้ำของดิน ระดับน้ำใต้ดิน และปริมาณน้ำฝนตามลำดับ [10] การประยุกต์หลักการรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information Systems: GIS) เพื่อการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมนั้นสามารถนำมาตรวจสอบร่วมกับแบบจำลองน้ำท่วม HEC-HMS และ HEC-RAS โดยสามารถวิเคราะห์ลักษณะการไหลของน้ำและขอบเขตของน้ำที่ท่วม [11]

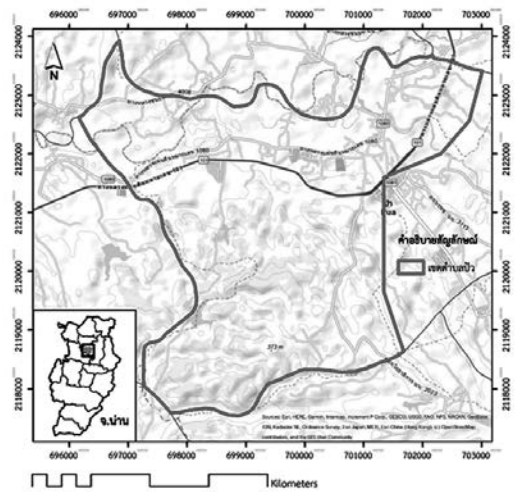
ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน เป็นอีกหนึ่งพื้นที่ที่ประสบปัญหาน้ำท่วมมาอย่างต่อเนื่อง บ้านที่อยู่อาศัยของประชาชนได้มีการสร้างใหม่ รวมถึงได้ทำการปรับปรุงซ่อมแซมให้กลับมาเหมือนสภาพเดิมทุกครั้งหลังเกิดภัยน้ำท่วม ซึ่งช่วงระยะเวลาที่เกิดน้ำท่วมนั้น สิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ถูกตัดขาดทำให้การเข้าไปให้ความช่วยเหลือของเจ้าหน้าที่เป็นไปอย่างยากลำบาก การเดินทางต้องอาศัยเรือท้องแบนเท่านั้น นอกจากนี้เจ้าหน้าที่ด้านบรรเทาสาธารณภัยไม่ชำนาญเส้นทางและไม่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับจำนวนผู้ที่ติดอยู่ในบ้านแต่ละหลัง รวมถึงทรัพย์สินที่มีค่าต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน จึงทำให้ยากต่อการประเมินความเสียหายได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดน้ำท่วมพื้นที่ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางภูมิศาสตร์วิธีการบวกราคาอันดับชั้นเชิงวิเคราะห์ หรือแบบจำลอง AHP สำหรับประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดภัยน้ำท่วม เพื่อใช้เป็นข้อมูลฐานสำหรับหน่วยงานด้านความมั่นคงนำไปใช้เป็นเครื่องประกอบการประเมินสถานการณ์ด้านภัยพิบัติน้ำท่วมในอนาคตได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วต่อไป

2. พื้นที่ศึกษาและข้อมูล

2.1 ขอบเขตของการวิจัย

1) พื้นที่ศึกษาคือ ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน (รูปที่ 1) จำนวน 8 หมู่บ้าน และ 3,063 ครัวเรือน โดยมีจำนวนประชากรทั้งสิ้น 7,302 คน [12] ครอบคลุมพื้นที่ 23.15 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 14,469 ไร่ มีที่ตั้งในระบบพิกัดกริด UTM ระหว่าง 2118000 ทางเหนือ ถึง 2124000 ทางเหนือ และ 696000 ทางตะวันออก ถึง 703000 ทางตะวันออก



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา

ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปด้านทิศตะวันออกเป็นเทือกเขาและลาดลงมาทางทิศตะวันตก มีแม่น้ำปัวไหลผ่านทางด้านทิศเหนือ พื้นที่อยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 310 เมตร

2) แบบสำรวจข้อมูลที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง และเครื่องกำหนดตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ภาคพื้นดิน (Global Positioning System: GPS) ยี่ห้อ GARMIN รุ่น GPS Map60csx

3) สสำรวจข้อมูลภาคสนามพร้อมซักถามประชาชนในชุมชน/หมู่บ้านที่เคยประสบภัยพิบัติ

4) ออกแบบและจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial database) โดยยึดหลักการออกแบบฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานโครงสร้าง เนื้อหา คุณลักษณะ คุณภาพของชุดข้อมูลภูมิศาสตร์พื้นฐาน (Fundamental Geographic Data Set: FGDS) [13]

5) วิเคราะห์/ประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วย แบบจำลอง AHP โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 คน เป็นผู้ให้ค่าคะแนนน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย

2.2 ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม WorldView-3 รายละเอียดจุดภาพ 31 เซนติเมตร เป็นแผนที่ฐาน (Base map) บันทึกข้อมูลในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แบบ UTM WGS 1984 zone47n (รูปที่ 2)

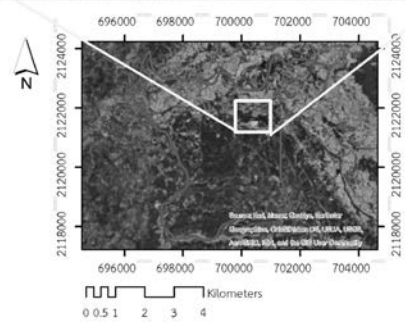
2.3 ซอฟต์แวร์และเครื่องมือ

การสำรวจพื้นที่ตำบลบัว อำเภอบัว จังหวัดน่าน คณะผู้วิจัยได้ทำการใช้แบบสำรวจข้อมูลที่ดินและสิ่งปลูกสร้างที่ได้รับจากเทศบาลตำบลบัว พร้อมทั้งใช้เครื่อง GPS โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 เมตร และใช้โปรแกรมสำเร็จรูประบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcGIS เวอร์ชัน 10.8 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับคอมพิวเตอร์ฮาร์ดแวร์นั้น ได้ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 Enterprise, Inter(R) Core(TM) i5-6400T, CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz, RAM 8.00GB 64-bit operating system และเครื่อง Printer สี

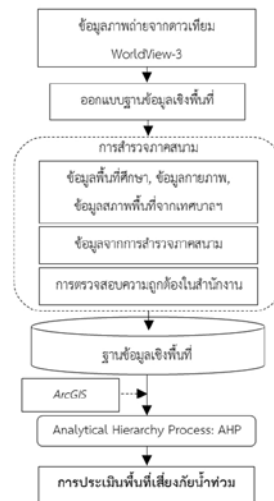
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัยครั้งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3

3.1 การเตรียมข้อมูล

คณะผู้วิจัยได้ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่



รูปที่ 2 ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม WorldView-3



รูปที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

จากสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดน่าน (ทสจ.น่าน) ที่ได้มอบข้อมูลเชิงพื้นที่มาให้อินรูปแบบดิจิทัลไฟล์ อีเอสอาร์ไอ เซฟไฟล์ (ESRI Shapefile) ประกอบด้วย ชั้นข้อมูลเขตการปกครอง และชั้นข้อมูลจุดดิน

ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ได้ขอความอนุเคราะห์ ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยา จำนวน 3 สถานี ได้แก่ (1) สถานีอำเภอป่า จังหัดน่าน รหัส 28042 (2) สถานีอำเภอท่าวังผา รหัส 28073 และ (3) สถานีอำเภอเชียงกลาง รหัส 28102

ข้อมูลความลาดชันและชั้นข้อมูลลักษณะภูมิประเทศและความสูง คณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างชั้นจากการ Digitization เส้นชั้นความสูง (Contour) ช่วงชั้น 20 เมตร จากแผนที่ภูมิประเทศ 1:50,000 ชุด L7018 กรมแผนที่ทหาร ครอบคลุมพื้นที่ตำบลป่า

ทำการแปลงไฟล์ข้อมูลทั้งหมดให้อยู่ในรูปแบบ ESRI Shapefile ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แบบ UTM WGS 1984 zone47n

3.2 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

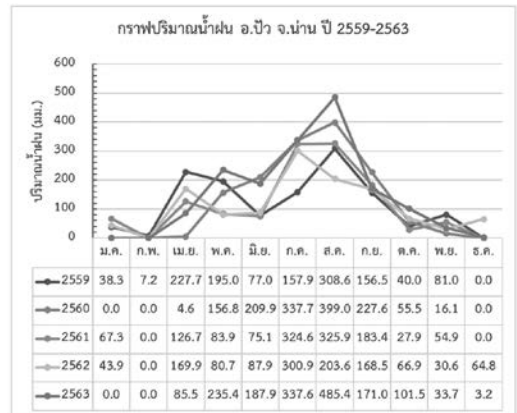
การเก็บข้อมูลภาคสนามได้ใช้แบบสำรวจที่ดินและสิ่งปลูกสร้างที่ได้รับจากเทศบาลตำบลป่ามาใช้ในการสำรวจ ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ลงสำรวจพื้นที่โดยการสังเกตจากวัตถุพยาน เช่น ร่องรอยระดับน้ำที่เคยท่วมเมื่อปีที่ผ่านมา ซักถามประชาชนในพื้นที่ กำหนดผู้ใหญ่บ้าน อาสาสมัครสาธารณสุขประจำหมู่บ้าน (อสม.) เป็นต้น รวมทั้งทำการเก็บพิกัดตำแหน่งที่เคยเกิดน้ำท่วมด้วยเครื่อง GPS

3.3 การจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่

ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่จะใช้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แบบ UTM WGS 1984 zone47n ขนาดมาตราส่วน 1:1,000 โดยมีจำนวน 6 ชั้นข้อมูล ได้แก่

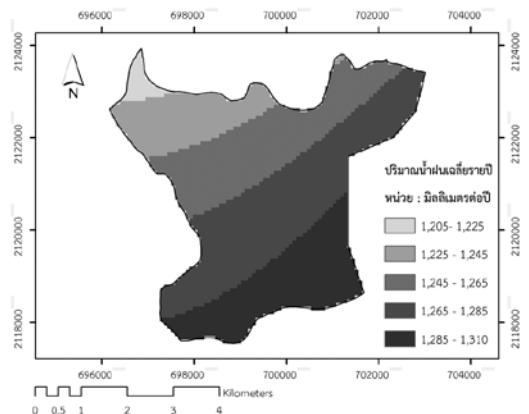
1) ชั้นข้อมูลปริมาณน้ำฝน (Rainfall) ดำเนินการสร้างชั้นข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนระหว่างปี พ.ศ. 2559 ถึง 2563 (5 ปี) โดยพบว่า ปี พ.ศ. 2563 เดือนสิงหาคม มีปริมาณน้ำฝนสูงที่สุด วัดได้ 485.4 มิลลิเมตร รองลงมาคือ ปี พ.ศ. 2560 วัด

ได้ 399.0 มิลลิเมตร (รูปที่ 4)



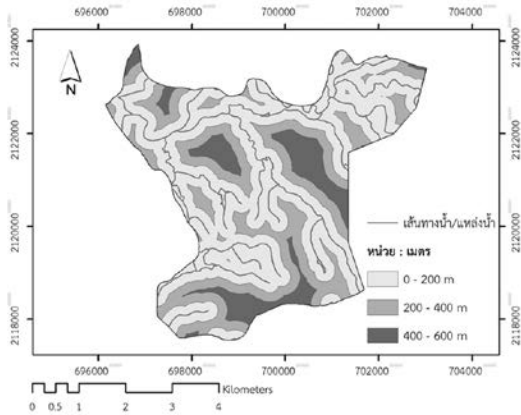
รูปที่ 4 แสดงกราฟปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 5 ปี

คณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างชั้นข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี โดยได้ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจาก 3 สถานี นำการคำนวณหาค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย ด้วยโปรแกรม ArcGIS ด้วยวิธี IDW (Inverse Distance Weight) ระหว่างปี พ.ศ. 2559-2563 โดยได้ค่าอยู่ระหว่าง 1,205-1,310 มิลลิเมตรต่อปี ดังรูปที่ 5



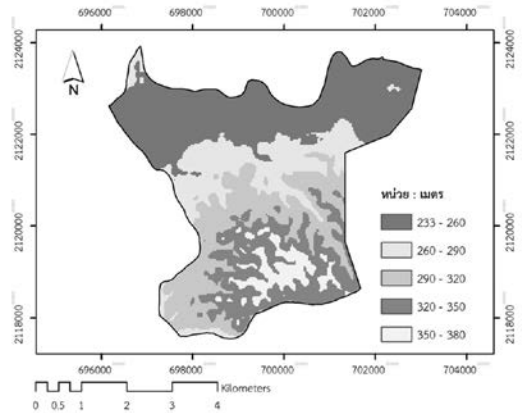
รูปที่ 5 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี (พ.ศ. 2559 - 2563)

2) ชั้นข้อมูลระยะห่างจากลำน้ำ (Stream distance) พื้นที่ตำบลปัว มีแม่น้ำป่าไหลผ่านทางทิศเหนือ และมีลำห้วย ได้แก่ ห้วยปลาก้าง ห้วยเมียง ห้วยร่อง ห้วยป่าช้า และห้วยทรายขาว เป็นต้น (รูปที่ 6)



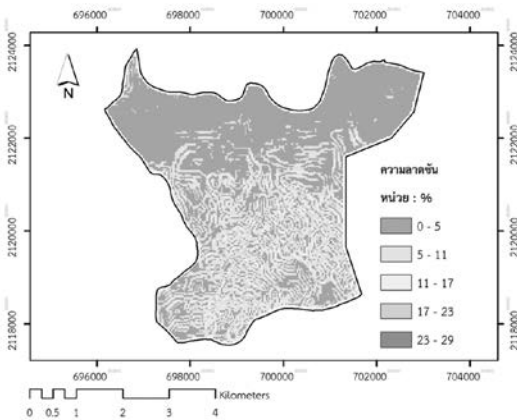
รูปที่ 6 ชั้นข้อมูลระยะห่างจากลำน้ำ

4) ชั้นข้อมูลลักษณะพื้นที่ภูมิประเทศและความสูง (Elevation) ดำเนินการสร้างข้อมูลด้วยวิธีโครงข่ายสามเหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ (Triangulation Irregular Network: TIN) โดยพบว่าตำบลปัวมีค่าเฉลี่ยความสูงอยู่ระหว่าง 233-380 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง (รูปที่ 8)



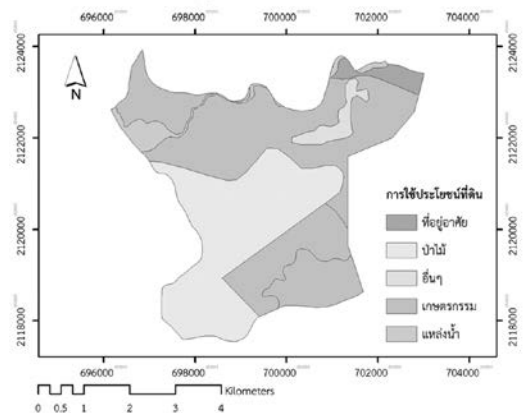
รูปที่ 8 ชั้นข้อมูลความสูง

3) ชั้นข้อมูลความลาดชัน (Slope) ดำเนินการสร้างข้อมูลด้วยวิธีโครงข่ายสามเหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ (Triangulation Irregular Network: TIN) ความลาดชันอยู่ระหว่าง 0-29 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 7)



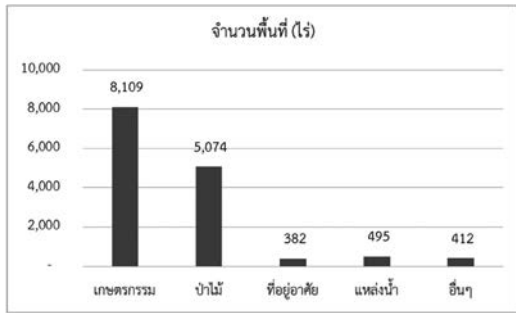
รูปที่ 7 ชั้นข้อมูลความลาดชัน

5) ชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use) ดำเนินการสร้างชั้นข้อมูลโดยการ Digitization ด้วยโปรแกรม ArcGIS จากแผนที่ฐานข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม WoldView-3 โดยสามารถจำแนกชั้นข้อมูลได้ 5 ชั้นข้อมูล ได้แก่ ที่อยู่อาศัย ป่าไม้ เกษตรกรรม แหล่งน้ำ และพื้นที่อื่น ๆ (รูปที่ 9)



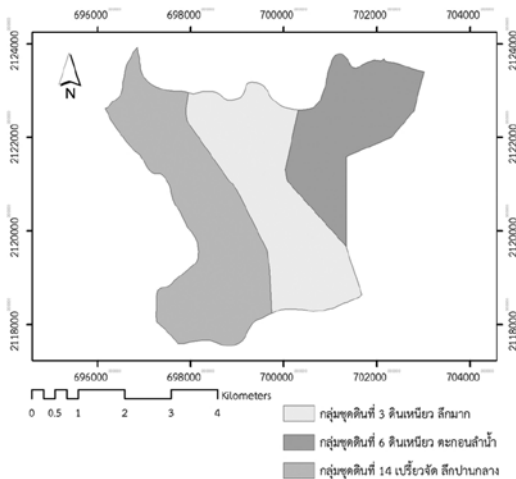
รูปที่ 9 ชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน

โดยพบว่าชั้นข้อมูลเกษตรกรรมมีพื้นที่มากที่สุด จำนวน 8,109 ไร่ รองลงมา คือ พื้นที่ป่าไม้ จำนวน 5,074 ไร่ แหล่งน้ำ 495 ไร่ พื้นที่อื่น ๆ 412 ไร่ และที่อยู่อาศัย 382 ไร่ ตามลำดับ (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 แสดงจำนวนพื้นที่แยกตามการใช้ประโยชน์ที่ดิน

6) ชั้นข้อมูลชุดดิน (Soil) ในพื้นที่ตำบลบัว ประกอบด้วยกลุ่มชุดดินจำนวน 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มชุดดินที่ 3 เป็นกลุ่มชุดดินในพื้นที่ลุ่ม มีลักษณะเด่นเป็นกลุ่มดินเหนียวสีเทาที่เกิดจากตะกอนน้ำกร่อย โครงสร้างดินแน่นทึบ ดินแห้งแข็งและแตกกระแวง ทำให้ไถพรวนยาก กลุ่มชุดดินที่ 6 เป็นกลุ่มชุดดินพื้นที่ลุ่มกลุ่มดินเหนียวสีเทาที่เกิดจากตะกอนลำน้ำ ปฏิกิริยาดินเป็นกรดจัดมาก ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ การระบายน้ำเลวถึงค่อนข้างเลว บางพื้นที่ดินเป็นก



รูปที่ 11 ชั้นข้อมูลชุดดิน

รดจัดมาก ขาดแคลนน้ำ และน้ำท่วมขังในฤดูฝน ให้ความเสียหายกับพืชที่ไม่ชอบน้ำ และกลุ่มชุดดินที่ 14 กลุ่มชุดดินในพื้นที่ลุ่มดินเปรี้ยวจัดสีเทาปานกลาง ดินชั้นล่างเป็นดินเลนที่มีศักยภาพก่อให้เกิดเป็นดินกรดกำมะถัน คุณภาพน้ำเป็นกรดจัดมาก ขาดแคลนน้ำ แหล่งน้ำจืดและน้ำท่วมขังในฤดูฝน ให้ความเสียหายกับพืชที่ไม่ชอบน้ำ

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการ “วัดค่าระดับ” ของการตัดสินใจในเรื่องต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้ผลการตัดสินใจที่ถูกต้องตรงกับเป้าหมายของการตัดสินใจได้มากที่สุด กระบวนการนี้ได้รับการคิดค้นเมื่อปลายทศวรรษที่ 1970 โดยศาสตราจารย์ Thomas Saaty แห่งมหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนีย ซึ่งกระบวนการตัดสินใจที่มีเหตุผลในปัญหาที่มีหลายปัจจัย โดยใช้วิธีจับคู่เปรียบเทียบทีละคู่ เพื่อเรียงลำดับความสำคัญและน้ำหนักที่ให้กับทางเลือกที่เป็นคำตอบของปัญหา โดยมีหลักการ คือ แบ่งโครงสร้างของปัญหาออกเป็นชั้น ๆ ชั้นแรกคือ การกำหนดเป้าหมาย (Goal) แล้วจึงกำหนดเกณฑ์ (Criteria) เกณฑ์ย่อย (Subcriteria) และทางเลือก (Alternatives) [14] แล้วจึงวิเคราะห์หาทางเลือกที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (Trade off) เกณฑ์ในการคัดเลือกทางเลือกทีละคู่ (Pairwise) เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจว่าเกณฑ์ไหนสำคัญกว่ากัน โดยการให้คะแนนตามความสำคัญหรือความชอบ หลังจากให้คะแนนเพื่อจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์แล้ว จึงค่อยพิจารณาวิเคราะห์ทางเลือกทีละคู่ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทีละเกณฑ์จนครบทุกเกณฑ์ ถ้าการให้คะแนนความสำคัญหรือความชอบนั้น สมเหตุสมผล (Consistency) จะสามารถ

จัดลำดับทางเลือกเพื่อหาทางเลือกที่ดีที่สุดได้ วิธี AHP เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการหาพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น อุทกภัย วาดภัย ภัยแล้ง หรือแม้กระทั่งการเกิดโรคติดต่อ เป็นต้น ซึ่งต้องเลือกปัจจัยที่ดีที่สุดจากหลาย ๆ ปัจจัย และมีเกณฑ์ในการพิจารณาทางเลือกหลายเกณฑ์ AHP เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบของทีละคู่ จึงทำให้การเลือกทางเลือกทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น ปัจจุบัน AHP เป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision making) ซึ่งมีผู้นิยมใช้กันมากมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ตัดสินใจทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น

แบบจำลอง AHP นั้นมีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาอยู่ 3 ประการ ดังนี้ การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์การหาลำดับความสำคัญ (Priority) และการวิเคราะห์ความสมเหตุสมผลของข้อมูล [14] โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์ (Structuring the hierarchy) ในการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจเลือกของหรือทางเลือกที่ดีที่สุด จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นลำดับชั้นดังนี้คือ เป้าหมาย (Goal) เกณฑ์ (Criteria) เกณฑ์ย่อย (Subcriteria) และทางเลือก (Alternatives) โดยในแต่ละชั้นอาจมีหลายเกณฑ์ และในแต่ละเกณฑ์อาจมีหลายเกณฑ์ย่อยได้

3.4.2 การคำนวณหาลำดับความสำคัญ (Calculation of relative priority) ในแต่ละชั้นผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญหรือผู้เกี่ยวข้องจะเป็นผู้ให้คะแนนความสำคัญหรือความชอบโดยการเปรียบเทียบของ (เกณฑ์) ทีละคู่ (Pairwise comparison) โดยเริ่มจากชั้นบนลงสู่ชั้นล่าง โดยแบ่งระดับความสำคัญหรือความชอบ (AHP measurement scale) ออกเป็น 9 ระดับ ดังแสดงในตาราง 1 หลังจากที่เราทราบ

ความเห็นที่ผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญหรือผู้เกี่ยวข้องในรูปของคะแนนความสำคัญหรือความชอบจากการเปรียบเทียบของเป็นคู่ในชั้นนั้นแล้ว จะทำการคำนวณหาน้ำหนักความสำคัญ (Weight) หรือลำดับความสำคัญสัมพัทธ์ (Relative priority) ของในชั้นนั้นและทำการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันทีละชั้นจากชั้นบนลงสู่ชั้นล่างจนครบทุกชั้น จะทราบคะแนนความสำคัญรวมของทางเลือกตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ได้ (ตาราง 1)

ตาราง 1 แสดงระดับความสำคัญหรือความชอบ

ระดับความสำคัญ (Preference level)	ค่าแสดงเป็นตัวเลข (Numerical value)
เท่ากัน	1
เท่ากันถึงปานกลาง	2
ปานกลาง	3
ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	4
ค่อนข้างมาก	5
ค่อนข้างมากถึงมากกว่า	6
มากกว่า	7
มากกว่าถึงมากที่สุด	8
มากที่สุด	9

ที่มา : [14]

น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์หรือทางเลือกในแต่ละชั้นจะคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$Aw = \lambda \max w \quad (1)$$

เมื่อ A คือ สแควร์เมตริกซ์แสดงความเห็นของผู้บริหารหรือผู้เชี่ยวชาญหรือผู้เกี่ยวข้องในรูปของคะแนนความสำคัญซึ่งปรับค่าให้เป็น 1 แล้ว (Normalized)

W คือ Eigenvector แสดงน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของของซึ่งอยู่ในลำดับชั้นเดียวกัน หรือกลุ่มของที่อยู่ภายใต้ของในลำดับชั้นที่สูงกว่า

λ_{max} w คือ Maximum eigenvalue

สร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่ ดังตารางที่ 2

ตาราง 2 แสดงตัวอย่างตารางเมตริกซ์ที่ใช้แสดงการเปรียบเทียบเป็นคู่แต่ละเกณฑ์หลัก

เกณฑ์ตัดสินใจ		ปัจจัย			
		A1	A2	A3	A4
ปัจจัย	A1	a11	a12	a13	a14
	A2	a21	a22	a23	a24
	A3	a31	a32	a33	a34
	A4	a41	a42	a43	a44

ที่มา : [14]

โดยที่ i คือค่าความสำคัญในแนวตั้ง และ j คือค่าความสำคัญในแนวนอน ของเมตริกซ์นี้ โดยจะทำการเปรียบเทียบถึงความสำคัญระหว่างปัจจัย A_i และ ปัจจัย A_j ซึ่งจะทำการกำหนดมาตราส่วนในการวินิจฉัย เปรียบเทียบหรือพิจารณา ดังนี้

ถ้า $A_{ij} = 1$ หมายถึง ปัจจัย A_i และ A_j มีความสำคัญเท่ากัน

ถ้า $A_{ij} = 3$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j เล็กน้อย

ถ้า $A_{ij} = 5$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j ปานกลาง

ถ้า $A_{ij} = 7$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j มากกว่า

ถ้า $A_{ij} = 9$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j มากที่สุด

และจำนวนระดับของมาตราส่วนในการเปรียบเทียบนี้จะขึ้นอยู่กับผู้วิเคราะห์ว่าต้องการเปรียบเทียบให้อยู่ในระดับไหน มีความละเอียดมากน้อยเพียงใด

3.4.3 การตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องของความสอดคล้องของข้อมูล เช่น วิเคราะห์เปรียบเทียบว่า A มีความสำคัญมากกว่า B 2 เท่า และ B มีความสำคัญมากกว่า C 4 เท่า ดังนั้น A ควรมีความสำคัญกว่า C 8 เท่า แต่ถ้าวิเคราะห์ว่า A มีความสำคัญมากกว่า C 2 เท่า นั้นหมายถึงการวิเคราะห์ในตัวอย่างนี้ไม่มีความสอดคล้องกัน ซึ่งบางครั้งการวิเคราะห์อาจไม่มีความสอดคล้องของข้อมูลเกิดขึ้นได้ การแก้ไขก็คือทบทวนกระบวนการใหม่เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ออกมามีความสอดคล้องกันอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ความสอดคล้องของข้อมูลจะต้องตรวจสอบจากค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) ว่ายอมรับได้หรือไม่

3.4.3.1 สัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio)
 $CR =$ ค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio)
 $CI =$ ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index)
 $RI =$ ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Index)

3.4.3.2 ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index)

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{t=1}^n k_t / r_t}{t = 1} \quad (3)$$

3.4.3.3 ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Index: RI)
RI เป็นค่าที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างสามารถหาได้ดังนี้

ตาราง 3 แสดงค่า RI จากการสุ่มตัวอย่าง

N	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

N	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.45	0.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

ที่มา : [14]

โดยค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (CR) ที่ยอมรับได้คือ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10 หากค่าความสอดคล้องสูงกว่าที่ยอมรับได้ต้องมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบใหม่หรือมีการทบทวนในการศึกษาอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าสัดส่วนความสอดคล้องเป็นที่ยอมรับ

4. ผลการศึกษา

4.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำท่วม

ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง AHP โดยผู้เชี่ยวชาญที่ได้ให้ค่าคะแนนน้ำหนักนั้น พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดน้ำท่วมในพื้นที่ตำบลปัวมากที่สุด ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน (0.328) รองลงมาคือความลาดชัน (0.285), ลักษณะพื้นที่และความสูง (0.144) ระยะห่างจากลำน้ำ (0.114) การใช้ประโยชน์ที่ดิน (0.082) และชุดดิน (0.046) ตามลำดับ (ตาราง 4)

ค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (CR) มีค่า 0.0035 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 0.10) ค่าดัชนีความสอดคล้อง (CI) มีค่า 0.043 และดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (RI) มีค่า 6.0216 ดังนั้น สามารถสร้างสมการ

ตาราง 4 แสดงการให้ค่าน้ำหนักปัจจัย

	RF	SL	E	SD	LU	SO	W	NW
RF	1	1	2	3	5	7	0.328	7.081
SL	1	1	2	3	3	5	0.285	6.162
E	1/2	1	1	1	2	3	0.144	3.118
SD	1/3	1/3	1	1	1	3	0.114	2.463
LU	1/5	1/3	1/2	1	1	2	0.082	1.780
SO	1/7	1/5	1/3	1/3	1/2	1	0.046	1.000

$$CI = 0.0430, CR = 0.0035, \lambda_{max} = 6.0216$$

หมายเหตุ: RF คือ ปริมาณน้ำฝน (Rainfall); SL คือ ความลาดชัน (Slope); E คือ ความสูง (Elevation); SD คือ ระยะห่างจากลำน้ำ (Stream distance); LU คือ การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use); SO คือ ชุดดิน; W คือ ค่าคะแนนน้ำหนักปัจจัย (Weight) และ NW คือ ค่าคะแนนความสำคัญซึ่งปรับค่าให้เป็น 1 แล้ว (Normalized weights)

แบบจำลองน้ำท่วมพื้นที่ตำบลปัว (Flood Risk Zonation of Pua: FRZP) ได้ดังนี้

เมื่อ F คือ น้ำหนักปัจจัยปริมาณน้ำฝน (RF); ความลาดชัน (SL); ลักษณะภูมิประเทศและความสูง (E); ระยะห่างจากลำน้ำ (SD); การใช้ประโยชน์ที่ดิน (LU) และซูดดิน (SO); C คือ ค่าน้ำหนักของปัจจัยย่อยแต่ละชั้น

$$FRZP = \sum (F_{RF} C_i + F_{SL} C_i + F_{E} C_i + F_{SD} C_i + F_{LU} C_i + F_{SO} C_i) / \sum W_i \quad (4)$$

4.2 พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม

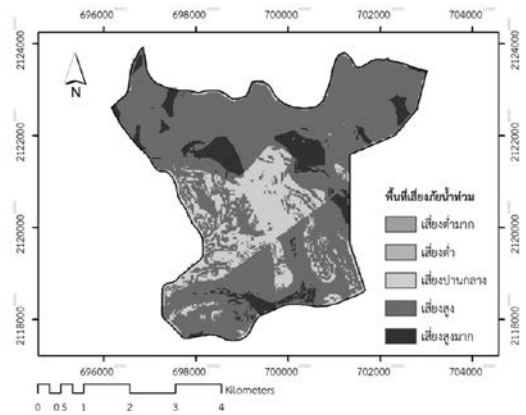
ผลการศึกษาพบว่าระดับความเสี่ยงสูง มีพื้นที่ทั้งสิ้น 10,380 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 71 ของพื้นที่ทั้งตำบล ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ป่าไม้ แหล่งน้ำ ลำน้ำปัว รวมถึงลำห้วย ได้แก่ ห้วยปลาก้าง ห้วยเมียง ห้วยร้องห้วยป่าช้า และห้วยทรายขาว และพื้นที่อยู่อาศัยเนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่ของตำบลตั้งบ้านเรือนอยู่ใกล้แหล่งน้ำ

ระดับความเสี่ยงปานกลาง มีพื้นที่ทั้งสิ้น 2,681 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 18 ของพื้นที่ทั้งตำบล โดยพบว่าเป็นพื้นที่ป่าไม้ ระดับความเสี่ยงสูงมาก มีพื้นที่ทั้งสิ้น 1,380 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 9 ของพื้นที่ทั้งตำบล โดยพบว่าเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ได้แก่ นาข้าว และระดับความเสี่ยงต่ำและระดับต่ำมาก มีพื้นที่รวมกันทั้งสิ้น 191 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 1.30 ตามลำดับ พบว่าเป็นพื้นที่ลาดต่ำเนินเขาและแปลงข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ตาราง 5 ระดับค่าความเสี่ยงภัยน้ำท่วม

ระดับความเสี่ยง	ค่า AHP	พื้นที่ (ไร่)	ร้อยละ (%)
เสี่ยงสูงมาก	1.607–1.944	1,380	9.43
เสี่ยงสูง	1.221–1.607	10,381	70.94
เสี่ยงปานกลาง	0.834–1.221	2,681	18.32
เสี่ยงต่ำ	0.448–0.834	147	1.00
เสี่ยงต่ำมาก	0.061–0.448	44	0.30
รวม		14,633	100.00

รูปที่ 12 แสดงผลการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมจากผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ พบว่าพื้นที่ตำบลปัวร้อยละ 71 มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดน้ำท่วม ซึ่งกระจายพื้นที่เสี่ยงทั่วทั้งตำบลโดยเฉพาะทางทิศเหนือของตำบลปัว



รูปที่ 12 แผนที่การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมตำบลปัวด้วยแบบจำลอง AHP

5. การอภิปรายผล

การศึกษาวิจัย “การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วยแบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ กรณีศึกษา ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน” มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดน้ำท่วมพื้นที่ตำบลปัว อำเภอปัว จังหวัดน่าน โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางภูมิศาสตร์วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ หรือแบบจำลอง AHP เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับหน่วยงานด้านความมั่นคงนำไปวิเคราะห์และประเมินสถานการณ์ด้านภัยพิบัติน้ำท่วมในอนาคตได้อย่างแม่นยำ

จากการศึกษาจะต้องทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดน้ำท่วมในพื้นที่ตำบลบัว อำเภอบัว จังหวัดน่าน ซึ่งในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็น 6 ปัจจัย คือ ปริมาณน้ำฝน ความลาดชัน ลักษณะภูมิประเทศและความสูง ระยะห่างจากลำน้ำ การใช้ประโยชน์ที่ดิน และชุดดิน

ปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดน้ำท่วมมากที่สุดโดยมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในช่วงฤดูฝน หากมีปริมาณน้ำฝนรายวันตกมากกว่า 250 มิลลิเมตร ติดต่อกัน 3 วัน จะส่งผลให้เกิดน้ำท่วมฉับพลันน้ำป่าไหลหลากได้

ลักษณะความลาดชันของพื้นที่ พบว่าบริเวณที่มีความลาดชันต่ำจะมีโอกาสในการเกิดน้ำท่วมสูงและน้ำท่วมที่เกิดจะเป็นแบบน้ำท่วมขังและพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงมีแนวโน้มในการเกิดน้ำท่วมต่ำ และในขณะเดียวกันพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงเมื่อเกิดน้ำท่วมจะเป็นการท่วมแบบน้ำท่วมฉับพลันโดยพื้นที่ที่มีความลาดชันมากกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ มีโอกาสเกิดน้ำท่วมได้มากกว่า

ลักษณะภูมิประเทศและความสูง มีผลทำให้เกิดน้ำท่วมโดยใช้ปัจจัยความสูงในการแบ่งลักษณะของพื้นที่ศึกษาโดยพบว่าความสูงที่น้อยกว่า 260 เมตร มีโอกาสในการเกิดน้ำท่วมมากที่สุดเนื่องจากเป็นพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง พื้นที่ราบใช้ทำการเกษตร

ระยะทางจากลำน้ำได้วิเคราะห์ระยะจากลำน้ำออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ 200 เมตร 400 เมตร และมากกว่า 400 เมตร โดยพบว่าความหนาแน่นของลำน้ำมีผลต่อการเกิดน้ำท่วมโดยเฉพาะในระยะห่าง 200 เมตร มีความเสี่ยงน้ำท่วมสูง

การใช้ประโยชน์ที่ดินซึ่งแบ่งการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็น 5 ประเภท คือ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่

ป่าไม้ พื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่แหล่งน้ำและพื้นที่อื่น ๆ ซึ่งพบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินมีผลต่อการเกิดน้ำท่วมมากที่สุด คือ บริเวณแหล่งน้ำ/ลำน้ำบัว ห้วยปลาข้าง ห้วยเมียง ห้วยร่อง ห้วยป่าช้า และห้วยทรายขาว เป็นต้น และพื้นที่เกษตรกรรมเนื่องจากเป็นพื้นที่ราบและบริเวณพื้นที่ป่าไม้จะมีโอกาสที่จะเกิดน้ำท่วมต่ำเนื่องจากมีต้นไม้ช่วยชะลอการไหลบ่าของน้ำ

ชุดดินที่ส่งผลให้เกิดน้ำท่วมคือความสามารถในการระบายน้ำของดินในแต่ละชุดดินว่าชุดดินไหนระบายน้ำดี หรือชุดดินไหนระบายน้ำเลว จากการศึกษาค้นคว้าในพื้นที่ศึกษามีคุณลักษณะของดินที่ระบายน้ำได้เร็วเป็นส่วนใหญ่ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นที่ต่ำ ดังนั้น บริเวณพื้นที่สูงมีโอกาที่จะเกิดน้ำท่วมต่ำส่วนพื้นที่ราบนั้นจะมีโอกาสในการเกิดน้ำท่วมสูงเนื่องจากลักษณะดินส่วนใหญ่จะเป็นดินที่มีความสามารถในการระบายน้ำเลว

เมื่อทราบปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมแล้วคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบสัมพัทธ์ตามหลักการแบบจำลอง AHP โดยได้ขอความอนุเคราะห์ผู้เชี่ยวชาญด้านทรัพยากรน้ำและมีผลงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภัยพิบัติน้ำท่วมมาเป็นผู้ประเมินให้ค่าคะแนนน้ำหนักหรือค่าคะแนนปัจจัย (Weight) โดยนำปัจจัยต่าง ๆ มาแบ่งระดับคะแนน 0 - 9 [14] และเมื่อได้ค่าคะแนนแล้วได้ทำการนำเข้าสู่แบบจำลอง AHP ด้วยโปรแกรม ArcGIS โดยใช้หลักการซ้อนทับข้อมูลใน GIS มาวิเคราะห์สร้างแผนที่เสี่ยงต่อการเกิดภัยน้ำท่วมใน 5 ระดับ คือ ระดับเสี่ยงสูงมาก ระดับเสี่ยงสูง ระดับเสี่ยงปานกลาง ระดับเสี่ยงต่ำ และระดับเสี่ยงต่ำมาก ผลการวิเคราะห์ทำให้ได้ทราบพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมสูง มีพื้นที่ทั้งสิ้น 10,380 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 71 ของพื้นที่ทั้งตำบล ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ป่าไม้ แหล่งน้ำ ลำน้ำบัว รวมถึงลำห้วย ได้แก่

ห้วยปลาแก้ง ห้วยเมียง ห้วยร้อง ห้วยป่าช้า และห้วยทรายขาว และพื้นที่อยู่อาศัย เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่ของตำบลตั้งบ้านเรือนอยู่ใกล้แหล่งน้ำระดับความเสี่ยงปานกลาง มีพื้นที่ทั้งสิ้น 2,681 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 18 ของพื้นที่ทั้งตำบล โดยพบว่าเป็นพื้นที่ป่าไม้ ระดับความเสี่ยงสูงมาก มีพื้นที่ทั้งสิ้น 1,380 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 9 ของพื้นที่ทั้งตำบล ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ได้แก่ นาข้าว (นาปี นาปรัง) และระดับความเสี่ยงต่ำและระดับต่ำมากมีพื้นที่รวมกันทั้งสิ้น 191 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 1.30 ตามลำดับ ซึ่งเป็นพื้นที่ลาดต่ำเนินเขาและแปลงข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ สวนยางพารา เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมต่ำมากจะพบบริเวณพื้นที่สูงและพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมสูงมากพบที่บริเวณพื้นที่ราบทางด้านทิศเหนือของพื้นที่ตำบลป่า

6. บทสรุป

ปัญหาน้ำท่วมส่งผลต่อประชาชนในการเตรียมความพร้อมในการรับมือและป้องกันคือเนื่องจากฝนที่ตกลงมาอย่างหนัก ก็อาจจะเป็นปัญหาเนื่องจากจะทำให้น้ำฝนไหลจากพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงลงมายังพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำจึงจะส่งผลทำให้เกิดน้ำท่วมฉับพลันซึ่งจะส่งผลให้ประชาชนรับมือและป้องกันไม่ทันและจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออาชีพของประชาชนได้ เช่น พื้นที่อยู่อาศัยเสียหาย พื้นที่เกษตรกรรมจมน้ำ ปศุสัตว์ล้มตาย เป็นต้น จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีความไม่เหมือนกันคือ ฝนที่ตกลงมามาก ทำให้รับมือและป้องกันไม่ทัน การศึกษาวิจัยในอดีตมีการเตรียมความพร้อมและการแก้ไขเฉพาะหน้าในการป้องกันจะมีความร่วมมือของประชาชนเป็นส่วนใหญ่ [9]

ปัจจัยจากการกระทำของประชาชนส่งผลให้เกิดน้ำท่วมคือ เนื่องจากประชาชนบางกลุ่มที่อาศัย

บนพื้นที่สูงหรือบนภูเขาจะมีการตัดไม้ไปใช้ประโยชน์หรือมีการตัดไม้เพื่อทำพื้นที่ปลูกพืชผักและนี่ก็เป็นสาเหตุที่ส่งผลทำให้เกิดพื้นที่น้ำท่วมในพื้นที่ราบ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีความไม่เหมือนกันคือ บริเวณบนเขาถ้าฝนตกลงมามาก ๆ ดินบริเวณบนเขาจะดูดซับน้ำไม่หมดเนื่องจากพืชปกคลุมดินถูกทำลายและจะทำให้หน้าไหลลงมายังที่ราบและส่งผลให้เกิดน้ำท่วมแนวทางในการป้องกันประชาชนส่วนใหญ่จะตั้งแนวกระสอบทรายสร้างกำแพงขวางลำน้ำป่าและลำห้วยสาขาต่าง ๆ ขุดลอกลำน้ำเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ เป็นต้น ข้อเสนอแนะในครั้งต่อไปคือการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมอาจจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ อีก เช่น ความลึกของดิน ระดับน้ำใต้ดินเข้ามาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อความถูกต้องมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ หรือ สทป. ที่สนับสนุนงบประมาณตามสัญญาฉบับเลขที่ 640201 พร้อมทั้งสนับสนุนเจ้าหน้าที่และเครื่องมือๆ สำหรับงานสำรวจพื้นที่ภาคสนาม

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Rotjanakusol, T. & Laosuwan, T. 2018. Inundation area investigation approach using remote sensing technology on 2017 flooding in Sakon Nakhon province Thailand". Studia Universitatis Vasile Goldis Arad, Seria Stiintele Vietii, 28(4), 159-166.

[2] Milly, P.C., Wetherald, R.T., Dunne, K.A., & Delworth, T.L. 2002. Increasing Risk of Great Floods in a Changing Climate. Nature. 15(6871), 514-517.

[3] Department of Disaster Prevention and Mitigation. Ministry of Interior. Thailand.

2013. Report Analysis/Monitoring. Retrieved from www.disaster.go.th/th/dwn-down-load-12-1/ (in Thai)

[4] Asian Disaster Reduction Center. 2012. Natural Disaster Data Book. Asian Disaster Reduction Center (ADRC).

[5] Blanc, J., Hall, J., Roche, N., Dawson, R., Cesses, Y., Burton, A., & Kilsby, C. 2012. Enhanced efficiency of pluvial flood risk estimation in urban areas using spatial-temporal rainfall simulations. *Journal of Flood Risk Management*, 5, 143-152.

[6] Kim, B., Sanders, B.F., Schubert, J.E., & Famiglietti, J.S. 2014. Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver. *Advances in Water Resources*, 68, 42-61.

[7] Elkharchy, I. 2015. Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 261-278.

[8] นาถนเรศ อากาศสุวรรณ, ประมาณ เทพสงเคราะห์, และ วรุฒน์ นาที. 2552. การศึกษาปัจจัยการเกิดน้ำท่วมเพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และแนวทางป้องกันบรรเทาในบริเวณลุ่มน้ำย่อยทะเลสาบสงขลาฝั่งตะวันตก จังหวัดพัทลุง. มหาคณิศ ศศ.ม. (พื้นที่ศึกษา).บัณฑิตวิทยาลัย/มหาวิทยาลัยทักษิณ. เอกสารอิเล็กทรอนิกส์.

[9] มยุรมาศ ปุ่นสกุล. 2545. การวิเคราะห์สภาพพื้นที่เสี่ยงอุทกภัยและสภาวะการรับรู้ของประชาชน กรณีศึกษา ตำบลวังบาล อำเภอหล่มเก่า

จังหวัดเพชรบูรณ์. ปรินญาณิพนธ์ วท.บ. (ภูมิศาสตร์).บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เอกสารอิเล็กทรอนิกส์.

[10] เพ็ชรสวัสดิ์ กั้นคำ. 2547. การประยุกต์ใช้สารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในเขตลุ่มน้ำแม่กวาง. ปรินญาณิพนธ์ วท.บ. (ภูมิศาสตร์). บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เอกสารอิเล็กทรอนิกส์.

[11] Samarasinghe, S.M.J.S. 2010. Application of remote sensing and GIS for flood risk analysis: A case study at KALU-GANGA river, Sri Lanka. Survey Department. Kyoto Japan. Electronic records.

[12] Official Statistics Registration System, Thailand. 2553. Retrieved from <http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/districtList/page1.htm> (in Thai)

[13] Fundamental Geographic Data Set (FGDS). 2556. Retrieved from www.ngis.go.th/home/wp-content/uploads/2019/03/FundamentalGeographicDataSet_FGDS.pdf (in Thai)

[14] Saaty, T.L. 1980. *The analytical hierarchy process*, New York: McGraw-Hill.

Content awareness and satisfaction of DTI virtual seminar amid Covid-19

Phimraphas Ngamsantivongsa ^{1*}

Received 22 July 2021, Revised 4 August 2021, Accepted 4 August 2021

Abstract

This research article aims at the analytical assessment of content awareness and the audience satisfaction of a virtual seminar held by Defence Technology Institute (DTI) while the world has been affected by the Covid-19 pandemic. The questionnaires were designed to transform qualitative data from 40 attendees of DTI key stakeholders attending the seminar into quantitative information. The quantitative analysis for statistical proof was proposed to achieve quantitative results that were followed by interpretation and discussion. Grounded in the classical test theory definition of reliability and the tenets basic to Likert-scale measurement methodology. As for the attendees satisfaction, quantitative research with at least one variable measured by a Likert-type scale, while the qualitative data will be analyzed through content analysis. The findings lead to the conclusion that the virtual seminar among Covid-19 was statistically successful and matched the objectives of the knowledge network. Moreover the organizer was successfully able to modify the seminar due to the Covid-19 pandemic ensuring the safety of the attendees and staff while maintaining the quality of the seminar, and further improving the attendees satisfaction.

Keywords : Knowledge management, Satisfaction, Likert-type scale, Virtual seminar, Covid-19 pandemic, Network forum

¹ Knowledge Management Division - TKM, Defence Technology Institute

* Corresponding author: phimraphas.n@dti.or.th

1. Introduction

Defence Technology Institute (DTI) was established to research and develop large-scale projects according to the Defence Council. To figure and approve for implementing, studying, researching project, and other related activities or continually develop defence technology.

The Knowledge Management Division which is under the supervision of Knowledge and Publication Management Department of DTI takes responsibility in the systematic administration and management of knowledge to enable knowledge retrieval and sharing for application and exploitation, and the fostering, support and provision for the activity or process of knowledge sharing and exchange. Therefore, the seminar was organized by coordinating with the military and higher education institutions to create a network of academic knowledge management in defence technology and industry and further knowledge from renowned academic institutions leading to the international transfer of knowledge sharing, networking and knowledge management.

There are several methods to assess the satisfaction and success of knowledge management. Janus addressed in [1] that some indicators in measuring the effectiveness of knowledge sharing where most organizations would set such targets as benchmarks to be attained in a given period of time. One of intermediate-outcome indicators was improved collaboration among staff or between departments. A number of literature were devoted to statistical analysis of the knowledge management results. The authors in [2] conducted an exploratory study and suggested

that a knowledge and innovation view could enhance service differentiation but demanded a proper engagement approach where social ties were paramount to success. The work in [3] proposed the methodology based on the basic open questionnaires Framework for Information System Due Diligence (FISDD), data analysis, and at the end questionnaire related to the data gathering process.

It was suggested in [4] for the use of an Integrated Management Information System (IMIS) with cognitive agents for acquiring and acquisition sub-processes in a collective knowledge processing in the IMIS. It aimed [5] to determine whether and to what extent the attributes of organic structure contributed to the creation and sharing of knowledge from the empirical study obtained through the survey of 150 respondents, employed in 30 companies from several industries, in the Republic of Serbia. The questionnaires were adapted to the needs of the study and were developed based on the theoretical knowledge and findings of several previous studies on the processes of knowledge creation and knowledge sharing. A regression method was used to test all the hypotheses.

The authors of [6] aimed to uncover the combinations of knowledge sharing mechanisms that organizations in a science and technology park in Brazil used to share managerial and technical knowledge. They adopted a qualitative approach that used a fuzzy set qualitative comparative analysis to analyze data that were gathered from 51 managers of organizations in a science and technology park. The results showed that knowledge sharing happened regardless of the type of knowledge. More recently, the study in [7] followed the design science research

paradigm and employed mixed methodology, combining quantitative learning analytics with qualitative analysis of notable segment replay instances by viewers of online video lectures. The work of [8] was set to develop a belief-value-satisfaction model based on social cognitive theory. This paper was aimed to explain how relational virtual community (RVC) members' beliefs on individual features and environments could be transformed into satisfaction through social learning strategies.

The COVID-19 pandemic has affected many parts of our lives. Following social distancing recommendations, many organizations have shifted their in-person conferences to virtual meetings. And while online events like webinars existed before COVID-19, virtual conferences further present benefits and challenges to navigate for attendees. For example, you can attend more than one conference to help your professional development needs while saving money on travel. However, the primary challenge of attending a virtual conference is that you lose out on the face-to-face networking aspect. No matter the benefits and challenges to a virtual conference, remember the reasons why you are attending, which most likely have to do with presenting and learning about research, gaining professional development skills and networking with others.

This current research study took a combined approach of technological Zoom-based teleconference, traditional questionnaire entry survey, and simple statistical analysis to tackle the study objective of assessing content awareness of the virtual seminar amid the Covid-19 pandemic. The following three main parts of this research article address the seminar in its contents and

assessment, the proposed statistical analysis, and the analytical interpretation that leads to the results that conclude the article. Further study was suggested to for the extension of the study of this kind to the post-seminar assessment.

2. Materials

2.1 The Seminar of Knowledge Network Forum 2020

The seminar of Knowledge Network Forum is a Defence Technology Institute or DTI annual event and in 2020 titled "Multisensor Detection and Aerial Robot" was held on 12 November 2020 at Venus Room 3 – 4, Impact Exhibition Hall, Impact Muang Thong Thani, Nonthaburi, Thailand [9]. As the name implies, the event is to keep strong Institute's knowledge network with stakeholders.

Figure 1 up was the banner the organizing team used to advertise the seminar among former and new targeted network members. That was a very important piece of information that attracted seminar attendees to participate in the forum since the announcement was made during August to December 2020 amidst the second wave of Covid-19 worldwide. However, the virus situation in Thailand was significantly eased out and the forum was widely embraced by key persons from DTI's stakeholders as seen in Figure 1 down.

2.1.1 Seminar overview

The Knowledge Management Division which is under the supervision of Knowledge and Publication Management Department of DTI, Thailand has the function of, and takes responsibility in the systematic administration and



Fig.1 Banner for advertisement (up) and key persons photo from the seminar (down).

management of knowledge to enable knowledge retrieval and sharing for application and exploitation, and the fostering, support and provision for the activity or process of knowledge sharing and exchange. The activity summarized from the seminar and reported herein was to reflect such function and responsibility of the division. The objectives of the seminar were twofold; 1) to create a forum that enables knowledge and experience sharing and 2) to create the network of knowledge administering and acquisition among the stakeholders in the ministry of defense and beyond, and 3) to introduce advanced defense knowledge and technology to personnel from the ministry of defense and security, private and academic sectors.

The division team planned and managed the seminar which was organized by a professional organizer, and financed by DTI in an annual budget. The organizer was tasked with a smooth, interactive, and live seminar infrastructure whose video footage could be revisited at a

publicly announced website, still photography, and online registration. The language medium used in the seminar was Thai. Three Thai presenters working as a professor at universities in Japan, Hong Kong, and Singapore were invited to deliver lectures. The lecturer from the National University of Singapore was formerly invited to a 2018 seminar and kind to extend the network further to Osaka University and City University of Hong Kong. Most importantly, the seminar helped to promote Thailand's Meetings, Incentives, Conventions and Exhibitions or MICE, which refers to a particular type of tourism in which large groups, usually planned well advance are brought together for some particular purpose.

2.1.2 Infrastructure for virtual seminar

The seminar was designed such that before, during, and after activities were accessible online. Thus, the professional organizer needed to make sure that such concept was realized via a reliable communications infrastructure. Figure 2 left was the online registration form being used for interested stakeholders to register online provided that they received an exclusive invitation letter from the institute. That was to ensure the limited but truly targeted participation was achieved. To follow the Thai government upon Covid-19 restrictions was another reason for the limited number of the online registration.



Fig.2 Activities before (left), during (middle), and after (right) the seminar.

Activities during the seminar were central to the success and needed broadband wireless internet to enable such live seminar interaction among the audience in Thailand and the lecturers in Singapore, Hong Kong and Japan (Figure 2 middle). The website to the activities in the forum was available for access to the attendees and all the networked stakeholders (Fig. 2 right). The Zoom video conference created the required communication infrastructure using a 10 GB speed internet. The system was perfect at test but with a slightly problematic effect due to several bandwidth-greedy functions such as audio, online and offline backup tasks were simultaneously occupying the traffic. However, nothing considered as a major defect to cause the complete stop to the seminar was seen throughout the seminar.

2.1.3 Seminar contents

The seminar had 4 important parts, each of which was presented by 1 presenter and lasted at least 45 minutes for each lecture with 15 minutes for questions and answers, see Figure 3. Four parts had four different topics including 1) Aerial-Terrestrial-Aquatic Robots (ATA-Robots) for search, rescue and inspection in an ATA Extreme Environment, 2) Introduction to swarm operations for UAVs, Advancing Aerial Robots with Mechanical Intelligence, and 3) Multi Target and Multi Sensor Detection in Autonomous Vehicles. The first content was delivered with aiming to demonstrate the capability of Cyber media Center of Osaka University, Japan. Research output extracted from projects funded to the Center by various sources was outlined to sections that included Aerial-Terrestrial Robot, Aerial-Aquatic Robot, and Mapping and Teleoperation. To the entirety

The Seminar of Knowledge Network Forum 2021 "Multi Sensor Detection and Aerial Robot" 12 November 2021		The Seminar of Knowledge Network Forum 2021 "Multi Sensor Detection and Aerial Robot" 12 November 2021	
Venue: Venue Room 3 - 4 Impact Exhibition Hall, Impact Muang Thong Thani		Venue: Venue Room 3 - 4 Impact Exhibition Hall, Impact Muang Thong Thani	
08:00 - 08:30 A.S.	Registration	04:00 - 04:30 P.M.	Type of Seminar: Multi Target and Multi Sensor Detection in Autonomous Vehicle by Swamir Robotics in Thailand, Singapore, Mechanical Engineering Department, National University of Singapore, Singapore
08:30 - 09:45 A.S.	Group Captain Dr Channarong Komuang Director of Knowledge and Publication Management Department, Defense Technology Institute to address the role of the seminar	04:30 P.M.	Chairman Seminar Gobind Choudhary
09:45 - 09:55 A.S.	At Chief Marshal Dr.Prasanna Pradhamoek Director General, Defense Technology Institute to address the opening speech		
09:55 - 10:45 A.S.	Type of Seminar: "Aerial Terrestrial-Aquatic Robots (ATA-Robots) for search, rescue and inspection in an ATA Extreme Environment" by Assistant Professor Dr.Prachin Hattanasorn from Kyushu Institute of Design, Osaka University		
10:50 - 11:00 A.S.	Coffee break		
11:00 - 12:00 A.S.	Type of Seminar: "Introduction to the seminar presentation for UAVs" by Associate Professor Dr.Sudhikang Sengupta from Mechanical Engineering Department, National University of Singapore		
12:00 - 03:00 P.M.			
03:00 - 03:45 P.M.	Type of Seminar: "Advancing Aerial Robots with Mechanical Intelligence" by Associate Professor Dr.Jitaying Chantanasorn from the Robotics and Intelligent Systems Laboratory, City University of Hong Kong		
03:45 - 03:50 P.M.	Coffee break		

Fig.3 Seminar agenda extending from 08:00 AM and 04:00 PM.

of the lecture, the project results were demonstrated from underlying principles to real-world applications.

Describing the incident in Tham-Luang cave rescue as an inspiring research question, the presenter mentioned the motivation of the extreme environment – inspired Aerial-Terrestrial-Aquatic Robots from the world renowned incident. The underwater drive test of the robot was demonstrated on the video clip. The Mapping and Teleoperation part was mainly based on the Simultaneous Localization and Mapping or SLAM concept of using the first aerial robot to simultaneously map the studied environment as situation awareness for the second robot to perform a search and rescue operation. A collapsed building on a disaster-hit site was the proposed environment. The interest of the audience to the content was on a multifunction robot that was performing a dangerous and tedious job denied by human workers. Rust on old iron bridges in Japan was central to the application of robots of this kind. The second presentation was live-streamed from the Mechanical Engineering and Temasak Lab of National University of Singapore. The rationale of swarm operations for UAVs was the difficulty in urban/forest environment operation of poor GPS

reception where autonomy was needed for their self-localization and autonomous navigation. System overview was first described to cover hardware design and software architecture. Hardware details were exposed for expert discussion, experience and knowledge sharing with the audience. The software structure was also addressed, leading to further offline discussion at the end of the lecture. State estimation providing challenges for visual odometry with an unstable illumination condition was discussed as the process yielded indoor scenes with less texture. Mapping and planning were adopted for UAV environment perception. After a Model Predictive Local Motion Planning with boundary State Constrained Primitive (BSCPs), a safe trajectory could be computed in 1/100 second on TX2. The system supported Open-street map that was imported into a simulator as the test map. The Unity3D® was used to simulate varying types of drones to achieve maximum number of 6 drones operating at the same time. Experimental results for instancing the flight test of a square path were covered. The result of flight test in corridor was showed with a video footage in the presentation.

The third lecture advanced aerial robot topic was delivered first in the evening of the seminar day from the Department of Biomedical Engineering of the City University of Hong Kong by the presenter who was an associate professor at the Robotics and Intelligent Systems Laboratory. The inspiring idea of the presentation was human inspiration to fly dated back the day the Wright brothers' era and beyond. A fly was an example of natural flying machines with no unrivalled aerodynamics feats. The Reynolds Number was introduced to the audience to show scaling effects on flight efficiency. Most of the audience

was first informed by the reduced flight time and energetic efficiency with smaller machines. Flapping-wing aerodynamics was the most interesting part of this presentation. It was less explored but most anticipated in Thailand than any other robotic kinds. The bio-inspired flying robot which was the world's smallest flying robot in 2013 and subject to the ongoing collaboration of Harvard University and Massachusetts Institute of Technology was demonstrated in a video clip. The presenter's own robot called Harvard Robobee© showed flying against wind disturbances at 80 cm./s. was much inspiring to the audience. Its planar components were elaborated for an audience's better understanding on the Harvard Robobee© flight capabilities. The delayed stall introduced at the beginning of the talk was further discussed at benefits of which flapping wings and Samara or auto-rotating plant seeds took advantage of A Samara - inspired robot with 13.8 gram mass, two motors and propellers was elaborated, claiming passive attitude stability at the Laboratory.

The second presenter was back to deliver the fourth presentation from his Laboratory in National University of Singapore. A number of publications and research byproducts were obtained from the project Multi Target and Multi Sensor Detection in Aerial Autonomous Vehicle. The first concept that the presenter explained was multi-camera, multi-target detection, localization and tracking in 3D with image enhancement and moving camera compensation.

Then, trajectory-based target identification and association was showed with a video clip displaying tracked trajectory of flight paths. More interestingly, the small flying object classification

and identification of drone versus bird was derived from trajectory based detection and characterization that classified small, fast-moving drones from other small objects such as birds. The result from a combination of extended Kalman filter, Kernelized Correlation filter, Particle filter, and Discrimination filter was demonstrated to track drones with Reinforce Learning. Finally, the approach using multi-camera, multi-target tracking systems with trajectory-based target matching and re-identification was achieved using target identification, intra- and inter-camera target matching, and multiple target and identification.

2.1.4 Seminar Attendees

The attendees were from public, private and academic sectors already established the strong knowledge network with DTI. The 2020 seminar was restricted to only 40 attendees to comply with the social distancing rules strictly enforced by the Thai government. Educational background was compiled to crosscheck the fit-for-all contents of the seminar. Half of the attendees hold Master's degree, making the seminar the forum of highly educated network. Of 9 Ph.D. attendees, more than half of the number were from computer science background. Attendees with Bachelor were engaged with unmanned technology either professionally or educationally.

The age of the attendees was also an indicator of a degree of engagement with the knowledge and technology in the forum. The attendees aged from 30 – 50 years old accumulated more than half of the participants. This number reflected two fold i.e., on the interest the networked sectors had

showed on the forum and a strong relation between DTI and its partners. The attendees above 50 years old was one-fourths of the participation, indicating such a success of the forum contents. At 10 years before retirement, Thai people at this age are at the topmost of their performance and most successful on their career. Most importantly, one of the participants was more than 60 years old and found to be closely networked with one of the presenters.

2.2 Questionnaires

At the end of the seminar, the attendees were facilitated with either the online response or paper-based questionnaires. The questionnaires were designed with the first section aimed to collect personal data of the attendees. The second section was for the awareness creation to the attendees on the 4 topics. Each topic was measured on: 1) the significance of the topic in research and development, 2) the advancement of the topic in Thailand, 3) the application and benefit of the topic in the attendee's work, and 4) the opportunity of the topic research and development in Thailand. Five-rating scores from 1 to 5 were expected from the attendees to show the Least to the most aware content the attendees responded to the questions of each topic.

Due to the Covid-19 pandemic, the virtual seminar was adopted to comply with government instructions. The presenters physically resided in Osaka of Japan, Singapore, and Hong Kong were provided with the communications infrastructure to deliver their lectures to the audience in the convention of Bangkok. This technological adoption was needed to guarantee to the audience that the presentation worked smoothly and

with no difficulties to the point that contents planned to deliver by the presenters were not comprehended by the audiences. The third section was targeted on attendees' satisfaction with three aspects of the seminar that included; 1) multi-media, communications, equipment and documents, 2) seminar contents and time allocation, and 3) with the online seminar itself. Similar to the purpose of the second section, five rating scores from 1 to 5 were expected from the attendee to rate the Least satisfied to the Most satisfied for the measured aspects.

2.3 Proposed Quantitative Analysis

The seminar was divided into 4 sections from three lecturers where section 2 referred to topic T_2 or presentation 2 and section 4 referred to topic T_4 or presentation 4 were delivered by the same lecturer in Table 1. The questionnaires were composed of 4 questions upon similar purposes for each lecture session. Assume that $a_{i,1}$ is the value that the attendee i rates upon gaining awareness aimed by the seminar to Q_1 , whereby 1 means the Least aware and 5 means the Most aware. The rating values range from 1 to 5. In addition $a_{i,2}$, $a_{i,3}$ and $a_{i,4}$, are the rating of the attendee i to question Q_2 , Q_3 , and Q_4 respectively. The number of seminar attendees is n . Let $A_{i,1}$ be awareness anticipation calculated from the attendee rating and be it less than or equal to 1. Thus, the awareness anticipation from an attendee i can be calculated from equation (1) below.

$$A_{i,1} = \frac{a_{i,1}}{5} \quad (1)$$

Therefore, the total awareness anticipation of n attendees can be calculated from equation (2).

$$\sum_{i=1}^n A_{i,1} = \frac{a_{1,1}}{5} + \frac{a_{2,1}}{5} + \frac{a_{3,1}}{5} + \dots + \frac{a_{n,1}}{5} \quad (2)$$

The awareness anticipation from the presentation of each of the 3 lecturers having total 4 lectures was rated with the similar 4 questions in the questionnaire. If P_1 , P_2 and P_3 are presenter1, presenter2 and presenter3, respectively, the percentage of anticipation from presenter1 derived from Q_1 or $P_{Q_1}P_1$ can be calculated from equation (3).

$$P_{Q_1}P_1 = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n A_{i,1} \quad (3)$$

Using equation (3), total awareness anticipation from presenter1 to Q_1 - Q_4 or $tot.P_{Q_{1-4}}P_1$ can be calculated as equation (4).

$$tot.P_{Q_{1-4}}P_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{100}{n} \sum_{i=1}^n A_{i,1} + \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n A_{i,2} + \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n A_{i,3} + \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n A_{i,4} \right) \quad (4)$$

The average awareness anticipation from the seminar presentation or

$ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4}$ is obtained by the overall total percentage of all presenters divided by the number of presenters as in equation (5).

$$ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4} = \frac{1}{4} (tot.P_{Q_{1-4}}P_1 + tot.P_{Q_{1-4}}P_2 + tot.P_{Q_{1-4}}P_3 + tot.P_{Q_{1-4}}P_4) \quad (5)$$

To determine the level of attendees' awareness anticipation of the seminar, grades are applied to the $ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4}$ as follows:

1. If $ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4} < 20$, the attendees gain *Least knowledge awareness* as anticipated by the seminar;
2. If $20 \leq ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4} < 40$, the attendees gain *Less knowledge awareness* as anticipated by the seminar;
3. If $40 \leq ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4} < 60$, the attendees gain *Moderate knowledge awareness* as anticipated by the seminar;
4. If $60 \leq ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4} < 80$, the attendees gain *Much knowledge awareness* as anticipated by the seminar; and
5. If $80 \leq ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4} = 80$, the attendees gain *Most knowledge awareness* as anticipated by the seminar.

3. Methodology

3.1 Quantitative Implementation

The implemented methodology was illustrated in Figure 4. The knowledge network has been established and extended annually since the origin of DTI more than 10 years ago. The forum such as this one has been a mechanism for DTI to keep its stakeholders closely and inform the knowledge and technology deemed important to the defense technology and industry, of course reflected in the objectives. The Covid-19 pandemic was crucial to the adaptation of the seminar to be held in a virtual environment in which the experienced and expert presenters residing in virus hard-hit countries interacted with the audience in Thailand in a manner that complied with the government rules and regulations. The seminar venue was provided for the domestic attendees in order to keep the Institute in close

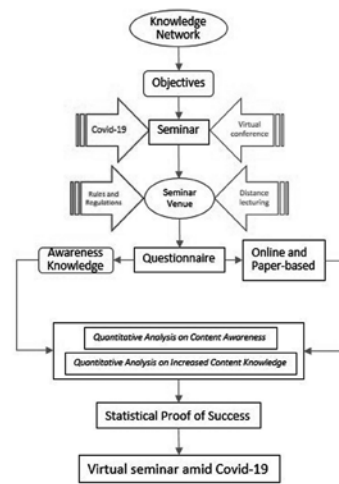


Fig.4 The methodology of quantitative analysis for statistical proof.

contact with the stakeholders while the distance lecturing was to ensure the presenters and the attendees seamless back and forth communications. From this section on, the article was dedicated to the assessment part of the seminar of whether it was conducted to achieve the targeted objectives.

From the lower part of Figure 4, the questionnaire was provided for the invited applicants to fill out either online or paper-based to collect the attendees' rating on the content awareness and increased content knowledge from the seminar. A simple but effective statistical analysis was applied, to be detailed in section C Proposed Quantitative Analysis, to address how the virtual forum responded to the objectives of the long established network. The 4 level grading system was adopted to determine the level of attendees' awareness anticipation of the seminar into the Least, Less, Moderate, Much and Most knowledge awareness scales. The average calculation was used to obtain the content awareness and increase of the introduced technologies.

3.2 Qualitative data

Responses to the questionnaire were summarized in Table 1 for to the content awareness questions and in Table 2 for the increased knowledge questions. It was visually interpreted that all topics attained exclusively Much and Most rating scales. Equal number was seen at 13 Much and Most ratings for the question 2 of the presentation 1. Where there was low at the number of rating such as 9 Most ratings for the question 4 of the presentation 1, there was high at the number of 25 Much ratings of this criterion. The highest rating from 25 attendees was at Much category for Q4 of Topic 1 for presentation 1. Accordingly, the network agreed that the ATA-robot research had opportunity in Thailand. However, the advancement of flapping and bio-inspired robots had seen less developed in the country with 6 attendees rating the Least aware content, thus, requiring policy, encouragement and financial boost from relevant agencies.

3.3 Quantitative information and interpretation

After applying the ratings in Table 1 to the equations in section C *Proposed Quantitative Analysis*, the statistically computed results were detailed in Table 2. As expected, the statistical results of $P_{Q_2}P_{1-4}$ that were related to the advancement of the topics in Thailand dropped to less than 80% with that of Presentation 3 slightly above 80%. The flapping winged robot technology did have a great opportunity for research and development in Thailand. Where benefit in workplace was not highly realized such as the topic of the presentation 3, a forum for technological promotion and education was required from a policy level of the Institute.

However, the $tot.P_{Q_{1-4}}P_{1-4}$ values were well above 80%, making the average for all presentations or $ave.P_{Q_{1-4}}P_{1-4}$ at 85%. When this final statistical outcome was determined for the level of attendees' awareness anticipation of the seminar, the grade of gaining Most knowledge awareness as anticipated by the seminar was achieved. As a result, the final score of 85% proved the virtual seminar among Covid-19 statistically successful and matched the objective of the knowledge network.

Table 1 Summary of responses to the questions

Questions	Rating				
	Most	Much	Moderate	Less	Least
*P1_Q1: Significance in R&D	23	17	0	0	0
P1_Q2: Advancement in Thailand	13	13	11	2	1
P1_Q3: Application and benefit in work	18	19	0	3	3
P1_Q4: R&D Opportunity in Thailand	9	25	4	0	1
P2_Q1: Significance in R&D	18	21	1	0	0
P2_Q2: Advancement in Thailand	13	14	11	2	0
P2_Q3: Application and benefit in work	16	19	4	1	0
P2_Q4: R&D Opportunity in Thailand	15	18	7	0	0
P3_Q1: Significance in R&D	22	18	0	0	0
P3_Q2: Advancement in Thailand	17	12	6	2	3
P3_Q3: Application and benefit in work	13	20	4	3	0
P3_Q4: R&D Opportunity in Thailand	15	18	3	4	0
P4_Q1: Significance in R&D	22	18	0	0	0
P4_Q2: Advancement in Thailand	17	12	3	2	6
P4_Q3: Application and benefit in work	13	20	4	3	0
P4_Q4: R&D Opportunity in Thailand	15	18	3	4	0

* P1_Q1 is abbreviated for question 1 of presentation 1, and so on.

Table 2. Results of statistical content awareness.

Awareness contents	Statistical results				
	P_{Q_1}	P_{Q_2}	P_{Q_3}	P_{Q_4}	$tot.P_{Q_1-P}$
P_1	91.5	77.5	86	81.5	84.125
P_2	88.5	79	85	84	84.125
P_3	89.5	80.5	96.5	87	88.375
P_4	91	79	81.5	82	83.375
$ave.P_{Q_1-P_1-4}$					85.000

$P_1, P_2, P_3,$ and P_4 are presentation1, presentation2, presentation3, and presentation4, respectively.

3.4 Scope of satisfaction assessment

3.4.1 The Likert Scale

5 point Likert scale consists of 5 answer options which will contain two extreme poles and a neutral option connected with intermediate answer options. A commonly used 5 point Likert scale example to measure satisfaction is: Very satisfied, Satisfied, Neither satisfied nor dissatisfied, Dissatisfied, and Very dissatisfied [10]. A principle basic to Likert scale measurement methodology is that scores yielded by a Likert scale are composite (summated) scores derived from an individual’s responses to the multiple items on the scale [11].

3.4.2 The contents are as follows:

1. Attendees knowledge before and after the seminar
2. Seminar attendees' satisfaction towards the seminar in terms of location, suitability of equipment, satisfaction with the speakers, appropriateness of content, duration and platform for virtual events

An on-line questionnaire, comprised of 5-point Likert scaled items ranging from 1

(strongly dissatisfied) to 5 (strongly satisfied) and open-ended questions, was used as research instrument. The population was all 40 attendees attending to the seminar by the time the survey questionnaire was administered. The average score estimation was prepared as a five sub-scales measuring attendees’ satisfaction as follows:

- 1.00 – 1.80 means strongly dissatisfied
- 1.81 – 2.60 means dissatisfied
- 2.61 – 3.40 means neutral
- 3.41 – 4.20 means satisfied
- 4.21 – 5.00 means strongly satisfied

The attendees’ overall satisfaction of knowledge before and after attending the seminar averaged mean score is 3.77 which illustrated that they tended to be satisfied with the seminar (see Table 3 and figure 5 below).

The attendees’ overall satisfaction of the virtual seminar averaged mean score is 4.49 which illustrated that they tended to be strongly satisfied with the seminar (see Table 4 and figure 6 below).

4. Results and discussion

The seminar of Knowledge Network Forum 2020 “Multisensor Detection and Aerial Robot” was held amid the Covid-19 pandemic to create a forum that enabled knowledge and experience sharing among the DTI stakeholder network. The seminar was to make sure that the essential content awareness of the forum was attained via the reliable communications infrastructure when the presenters were distancing lecturing from the pandemic-affected countries. The 2020 seminar was restricted to only 40 attendees to comply with the social distancing rules strictly enforced by the Thai

Table 3. Attendees knowledge before and after attending the seminar

Assessment Items	Satisfaction (n=40)			
	\bar{X}	SD	Scale	Interpretation
1. (ATA-Robots) knowledge before attending the seminar	3.25	1.15	3	Neutral
2. (ATA-Robots) knowledge after attending the seminar	4.28	0.60	5	Strongly satisfied
3. (Advancing Aerial Robots) knowledge before attending the seminar	3.30	1.20	3	Neutral
4. (Advancing Aerial Robots) knowledge after attending the seminar	4.20	0.65	4	Satisfied
5. (Swarm operation) knowledge before attending the seminar	3.35	1.19	3	Neutral
6. (Swarm operation) knowledge after attending the seminar	4.20	0.61	4	Satisfied
7. (Multi detection) knowledge before attending the seminar	3.38	1.08	4	Satisfied
8. (Multi detection) knowledge after attending the seminar	4.23	0.61	5	Strongly satisfied
Attendees knowledge before and after attending the seminar	3.77	0.89	4	Satisfied

Table 4 Seminar attendees' satisfaction

Assessment Items	Satisfaction (n=40)			
	\bar{X}	SD	Scale	Interpretation
1. Location	4.60	0.50	5	Strongly satisfied
2. Suitability of equipment	4.35	0.74	5	Strongly satisfied
3. Satisfaction with the speakers	4.57	0.59	5	Strongly satisfied
4. Appropriateness of content and duration	4.20	0.65	5	Strongly satisfied
5. Platform for virtual events	4.48	0.62	5	Strongly satisfied
6. (Swarm operation) knowledge after attending the seminar	4.44	0.49	5	Strongly satisfied
Overall satisfaction	4.49	0.59	5	Strongly satisfied

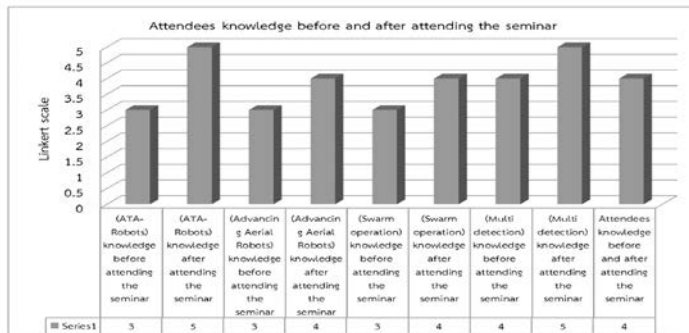


Fig.5 Histogram of attendees knowledge before and after attending the seminar.

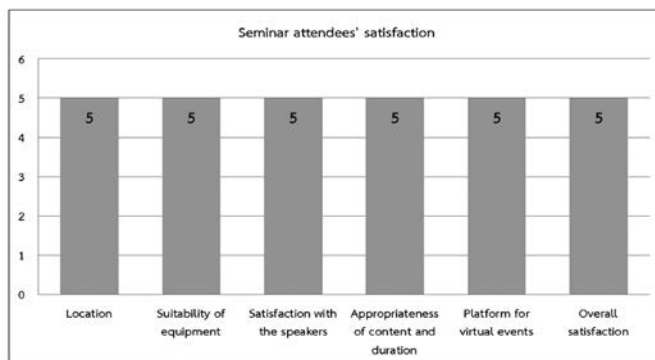


Fig.6 Histogram of Seminar attendees' satisfaction.

government. The methodology of quantitative analysis for statistical proof of the forum success was proposed with the questionnaire designed to measure the Least to the Most content awareness the attendee response to the questions of the topics. The visual interpretation from all topics summarized in the tables managed to attain only Much and Most rating categories. The highest rating from 25 attendees was at Much category for Q4 of Topic 1 for presentation 1. Since the average content awareness in statistical value was at 85%, the grade of gaining Most knowledge awareness as anticipated by the seminar was achieved. The Likert-scale scores reported and interpreted; furthermore, the attendees' overall satisfaction of knowledge before and after attending the seminar and the virtual seminar averaged mean scores are 3.77 and 4.49 which illustrated that they tended to be satisfied and strongly satisfied with the seminar respectively.

As a result, the final score of 85% proved the virtual seminar among Covid-19 statistically successful and matched the objective of the knowledge network.

5. Conclusions

This research paper addresses the virtual seminar forum held amid the Covid-19 pandemic. However, the virus situation in Thailand was significantly mostly contained and the forum was widely embraced by DTI's stakeholders. The rationale of the seminar was to create a forum that enabled knowledge and experience sharing by the invited speakers distantly lecturing advanced defense knowledge and technology to the audience. The Zoom video conference played a central role of communication infrastructure using a 10 GB speed internet. The

seminar was divided into four different topics but all covering unmanned robots which were of interest of the 40 attendees. Thus came the objective of this research of assessing the content awareness from the distance lecture. The seminar was measured via the questionnaires designed to contain 4 questions upon similar purposes for each lecture session. The rating values range from 1 the Least to 5 the Most gained awareness. The average awareness of all presenters was used to grade the attendees' awareness anticipation of the seminar. The summarized data showed that the attendees rated mainly Much and Most categories with the highest rating from 25 attendees at Much category for "Opportunity of ATA-robot R&D in Thailand" of the ATA-robot Topic. And in conclusions, the attendees' overall satisfaction of knowledge upon the 4 topics by assessing the knowledge before and after attending the seminar averaged mean score is 3.77 which illustrated that they tended to be satisfied with the seminar; moreover, the attendees' overall satisfaction of the virtual seminar averaged mean score is 4.49 which illustrated that they tended to be strongly satisfied with the seminar. In addition, the final score of 85% proved the virtual seminar among Covid-19 statistically successful and matched the objectives of the knowledge network.

6. Acknowledgment

The author acknowledges DTI for the 2020 budget that made the seminar and this research possible. The DTI network of stakeholders was highly appreciated for the support and appreciation since the network establishment. Last but not least, the author owes thanks to the team of Knowledge Management Division.

7. References

- [1] Janus, S. S. 2016. Becoming a Knowledge-Sharing Organization: A Handbook for Scaling up Solutions through Knowledge Capturing and Sharing. World Bank Group. 187p.
- [2] Marques, B. A. R., & Amorim, M. 2016. Knowledge and innovation roles in business partnerships: The case of the Portuguese insurance sector. KM Conference 2016. Lisbon. Portugal. pp. 51-63.
- [3] Cram, W. A., Proudfoot, J., & D'Arcy, J. 2017. January 4-7. How to evaluate knowledge within the organization: Research in progress report. KM Conference 2015. Katowice. Poland. pp. 2-13.
- [4] Hernes, M., & Nguyen, N. T. 2018. Definition of a framework for acquiring and acquisition sub-processes in a collective knowledge processing in the integrated management information system. KM Conference 2018. University of Pisa. Italy.
- [5] Stojanović-Aleksić, V., Nielsen, J. E., & Bošković, A. 2018. Organizational prerequisites for knowledge creation and sharing: empirical evidence from Serbia. Journal of Knowledge Management. 23(8). pp. 1543-1565. DOI 10.1108/JKM-05-2018-0286.
- [6] Balle, A. R., Steffen, M. O., Curado, C., & Oliveira, M. 2018. Interorganizational knowledge sharing in a science and technology park: the use of knowledge sharing mechanisms. Journal of Knowledge Management. 23(108), pp. 2016-2038. DOI 10.1108/JKM-05-2018-0328.
- [7] Geri, N., Kopolovich, O., & Winer, A. 2020. Replay-peak attention chart: A performance measure for improving online video lecture design. Online Journal of Applied Knowledge Management. 8(1). pp. 1-15. [https://doi.org/10.36965/OJAKM.2020.8\(1\)1-15](https://doi.org/10.36965/OJAKM.2020.8(1)1-15).
- [8] Chou, S.-W. 2020. Understanding relational virtual community members' satisfaction from a social learning perspective. Journal of Knowledge Management. 24(6). pp. 1425-1443. <https://doi.org/10.1108/JKM-12-2019-0683>.
- [9] Knowledge Management Division. 2020. THE SEMINAR OF KNOWLEDGE NETWORK FORUM 2020. Available: <https://www.dtikmforum.com/>. 12 November 2020. (in Thai)
- [10] Likert, R. 1932. A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology. pp. 1-55.
- [11] J., Robert Warmbrod. 2014. Reporting and Interpreting Scores Derived from Likert-type Scales. Journal of Agricultural Education, 55(5), pp. 30-47