

การพัฒนา High-Altitude Balloon Platform สำหรับการศึกษา ทดลอง และวิจัย ทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์

Development of High-Altitude Balloon Platform for Education, Experiment and Research in Science, Technology and Engineering

กัมวิชญ์ สุทธิกาญจน์¹, ศรีวัฒน์ ชิวปรีชา^{1*}, ฐิตพันธ์ จงสงสาพร², อัครพล ตรีรัตน์¹

Pemmavit Sutthikarn¹, Sorawat Chivapreecha^{1*}, Thitaphan Jongsataporn², Akraphon Trirat¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

²ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประเทศไทย

¹Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Thailand

²Industrial Physics and Medical Instrumentation, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
Thailand

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาและนำเสนอแนวทางการพัฒนาแพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูง (High-altitude balloon platform) เพื่อการศึกษาทดลองวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีรวมทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีความจำเป็นต้องทำการทดลองในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นไประดับสตราโตสเฟียร์ หรือสภาพการจำลองระยะทางที่สูงใกล้เคียงอวกาศ ทั้งการทดลองหรือตรวจวัดปริมาณทางกายภาพต่าง ๆ ในด้านฟิสิกส์บนชั้นบรรยากาศระดับที่สูง ซึ่งรวมถึงงานทางด้านตรวจวัดสำหรับอุตุนิยมวิทยา โดยโครงสร้างของแพลตฟอร์มที่สำคัญจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับบอลลูนสำหรับวางแผนภารกิจ เช่น ความสามารถในการแบกรับเพย์โหลดสำหรับการทดลองขึ้นไปทำการทดสอบ เรื่องของแรงยกตัว (lifting force) ระยะเวลาที่ใช้ในการลอยตัวสำหรับปฏิบัติการกิจ ความเร็วในการลอยขึ้น (Ascent rate) เป็นต้น รวมไปถึงการออกแบบร่มชูชีพสำหรับการนำเพย์โหลดทั้งหมดกลับลงสู่พื้นโลกหลังเสร็จสิ้นภารกิจ 2) ระบบติดตามตำแหน่งพิกัดของบอลลูนและระบบการสื่อสาร ที่ทำหน้าที่ส่งค่าพิกัดเพื่อการติดตามและข้อมูลตรวจวัดที่จำเป็นอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อติดตามตำแหน่งการเดินทางของบอลลูนในขณะปฏิบัติการกิจ รวมไปถึงการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวดิ่งและการเคลื่อนตัวของระยะกระจัดตามแนวราบอันเกิดจากทิศทางและกระแสลม ทั้งนี้เพื่อภารกิจการตามเก็บกู้ โดยองค์ความรู้ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการกำหนดภารกิจและทดสอบด้วยแพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูงจะได้ถูกอธิบายในบทความนี้ พร้อมทั้งการดำเนินการทดลองบางส่วนกับการใช้แพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูงเพื่อการทดสอบต้นแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบ์แซทขนาด 1U (KMUTL-CubeSat) ให้ได้เห็นภาพของการนำไปประยุกต์ใช้งานกับการทดลอง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์กับการทดสอบในงานและภารกิจทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: แพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูง, ระบบติดตามตำแหน่งพิกัด, การวางแผนภารกิจ, ร่มชูชีพ, ดาวเทียมคิวบ์แซท

ABSTRACT

This paper presents a study and development of high-altitude balloon platform for education, experiment and research in science, technology and engineering where it is necessary to conduct the experiments in the atmosphere above stratosphere. Moreover, the high distance can also be used to simulate near space conditions, used in experiments or measurements of various physical quantities in high-level atmospheric physics including use in the measurement for meteorology. The platform consists of 2 major parts: 1) Calculations involving balloon for mission planning such as ability to carry payloads for testing, lifting force, total time the balloon can stay afloat for the mission, ascent rate, etc. It also includes designing a parachute for bringing all payloads back to Earth after complete a mission. 2) Balloon coordinate tracking system and communication system which serves to transmit coordinates for tracking and other necessary measurement data to the ground. This is to keep track of the balloon's travel position during the mission, including the vertical displacement and the horizontal displacement caused by wind current/direction, and also used to track the last stop for recovery mission. The main contribution and relevant knowledge for the mission that use high-altitude balloon platform for testing will

be explained in this paper. Along with conducting some experiments on the use of a high-altitude balloon platform to test engineering prototype of the 1U CubeSat (KMITL-CubeSat), we can visualize its application to the KMITL-CubeSat and also apply to other tests in the work and mission of science, technology and engineering in other areas further.

KEYWORDS: high-altitude balloons, autonomous tracking, mission operation, parachute, CubeSat

*Corresponding Author: sorawat.ch@kmitl.ac.th

Received: 30/03/2021; Revised: 31/08/2022; Accepted: 07/11/2022

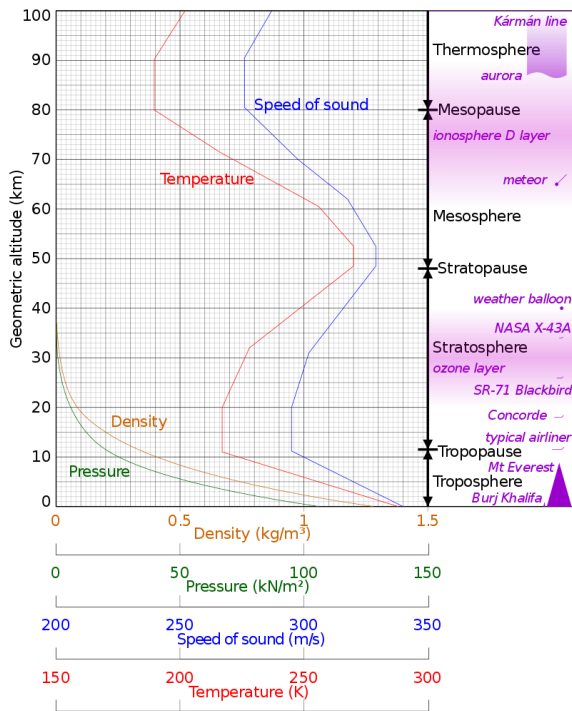
1. บทนำ

ในปัจจุบันงานที่ต้องใช้ high-altitude balloon อยู่สม่ำเสมอในทุก ๆ วัน คืองานทางด้านอุตุนิยมวิทยา ซึ่งใช้อุปกรณ์วิทยุห้วงอากาศ (Radiosonde) ผูกติดขึ้นไปกับบอลลูนตรวจอากาศ เพื่อวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศรวมถึงทิศทางลม แต่กระนั้นบอลลูนตรวจอากาศส่วนมากจะถูกปล่อยทิ้ง มุ่งเน้นรับสัญญาณข้อมูลในช่วงขณะที่บอลลูนยังคงลอยตัวอยู่ ซึ่ง High-Altitude Platform ที่กำลังจะได้กล่าวต่อไปนี้มี ความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่านั้น กล่าวคือ นอกจากจะสามารถรับข้อมูลที่ส่งมาได้ในพื้นที่เหมือนกับวิทยุห้วงอากาศทั่วไปแล้วยังสามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้ในกรณีที่ข้อมูลขนาดมีใหญ่ ซึ่งไม่สามารถส่งออกอากาศได้ในทันทีทันใด โดยออกแบบเพย์โพลด์ที่มีไมโครโพรเซสเซอร์พร้อมเซนเซอร์ตรวจวัด อีกทั้งยังมีระบบติดตามตำแหน่งพิกัดตลอดภารกิจ เพื่อการเฝ้าติดตามเก็บกู้และนำเพย์โพลด์กลับมาใช้งานได้ใหม่ ทั้งในแง่การใช้ซ้ำหรือการนำข้อมูลที่บันทึกไว้มาวิเคราะห์ในภายหลัง ทั้งนี้เรื่องการวางแผนภารกิจซึ่งจะต้องเตรียมบอลลูนทั้งในแง่ของขนาดและปริมาณก๊าซฮีเลียมที่จะบรรจุ นำหนักเพย์โพลด์ที่จะผูกติดขึ้นไป ระยะเวลาในการดำเนินภารกิจทั้งหมด รวมถึงขนาดของร่มชูชีพและความเร็วขาลงเพื่อนำเพย์โพลด์ทั้งหมดกลับลงสู่พื้นโลกอย่างปลอดภัย รายละเอียดเหล่านี้เป็นองค์ความรู้และสิ่งที่ต้องมีการคำนวณเพื่อการเตรียมใช้งาน High-Altitude Platform ดังกล่าว ซึ่งรวมถึงการพยากรณ์ถึงตำแหน่งตกจากจุดปล่อยโดยอาศัยข้อมูลลม (Mohamed *et al.*, 2007; Larson *et al.*, 2009) ที่ประกอบด้วยความเร็วและทิศทางลม เป็นสิ่งที่ช่วยให้การทำการกิจสำเร็จลุล่วงรวมทั้งชุดอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งพิกัดและสื่อสารข้อมูลตำแหน่ง ซึ่งอาจมีข้อมูลที่จำเป็นอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบ (Margarita *et al.*, 2016) ด้วยการใช้ช่องสื่อสารบนโครงข่ายวิทยุสมัครเล่นในระบบ APRS (Automatic Packet Reporting System) ซึ่งเป็นการติดตามตำแหน่งจริง ณ เวลาจริงก็เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่สำคัญในการปฏิบัติภารกิจ high-altitude balloon

นอกเหนือจากการใช้งาน high-altitude balloon กับงานทางด้านอุตุนิยมวิทยาและการทดลองทางวิทยาศาสตร์แล้ว (Jordan *et al.*, 2019) ทางทีมของผู้ศึกษาเองยังเคยได้มีโอกาสและประสบการณ์ตรงกับการนำไปทดสอบกับต้นแบบทางวิศวกรรมของดาวเทียม KMITL-CubeSat (Chanatip *et al.*, 2016; Pirada *et al.*, 2016; Pemmavit *et al.*, 2016; Pirada *et al.*, 2018; Pirada *et al.*, 2020; Trongsom *et al.*, 2020) ซึ่งทุก ๆ เทียบขึ้นของการปล่อยบอลลูนจำเป็นต้องวางแผนภารกิจ คำนวณน้ำหนักรวมของเพย์โพลด์ทั้งหมด ปริมาณก๊าซที่ต้องใช้ประจุแก๊บบอลลูน และขนาดของร่มชูชีพที่ใช้สำหรับขาลง (Nock *et al.*, 2007; Warayut *et al.*, 2009) รวมไปถึงการพยากรณ์เส้นทางการบินจนถึงจุดตก ด้วยข้อมูลตำแหน่งพิกัดและเวลาของจุดปล่อยตัว ที่สำคัญไม่แพ้กันอีกอย่างคือระบบติดตามและรายงานตำแหน่งพิกัดของบอลลูน ซึ่งต้องมีความน่าเชื่อถือ สามารถปฏิบัติงานได้ตลอดภารกิจจนกระทั่งเก็บกู้ได้สำเร็จ (Mohamed *et al.*, 2017; Pemmavit *et al.*, 2020)

จากที่ได้กล่าวมาจนถึงตรงนี้จะพบว่า high-altitude balloon platform จะเป็นประโยชน์ไม่น้อยสำหรับการศึกษาวิจัยทดลองทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ที่ต้องดำเนินการในชั้นบรรยากาศสูง ๆ ระดับสตราโทสเฟียร์ หรือในสภาวะใกล้เคียงกับอวกาศ ที่ซึ่งมีความดันอากาศเบาบาง และมีอุณหภูมิเป็นช่วงกว้างมาก

บทความนี้ได้จัดแบ่งลำดับการอธิบายเป็นดังนี้ เริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมในงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ high-altitude balloon platform เพื่อการทดลองทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนถัดมาจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของการใช้ high-altitude balloon platform ในการวางแผนภารกิจบอลลูน และติดตามตำแหน่งพิกัดของบอลลูนผ่านระบบสื่อสาร ส่วนผลการทดลองจะได้ อธิบายถึงการนำ high-altitude balloon platform มาใช้ในการทำการทดสอบต้นแบบทางวิศวกรรมของดาวเทียม KMITL-CubeSat ของทีมผู้ศึกษาเอง รวมทั้งผลทดสอบ



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นของอากาศ

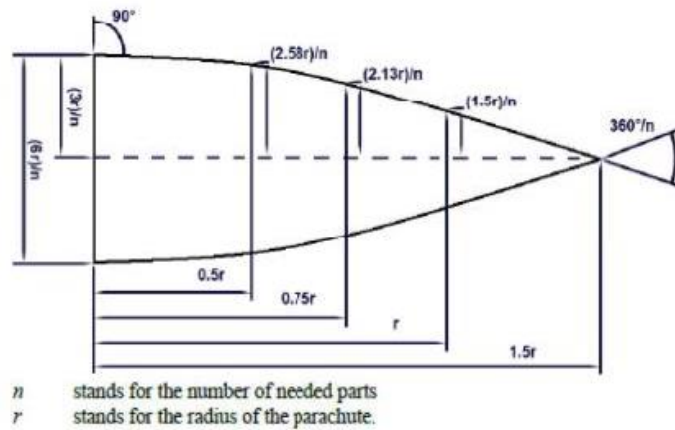
และส่วนสุดท้ายคือสรุปองค์ความรู้จากบทความนี้และข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ต่อไป

2. การทบทวนวรรณกรรม

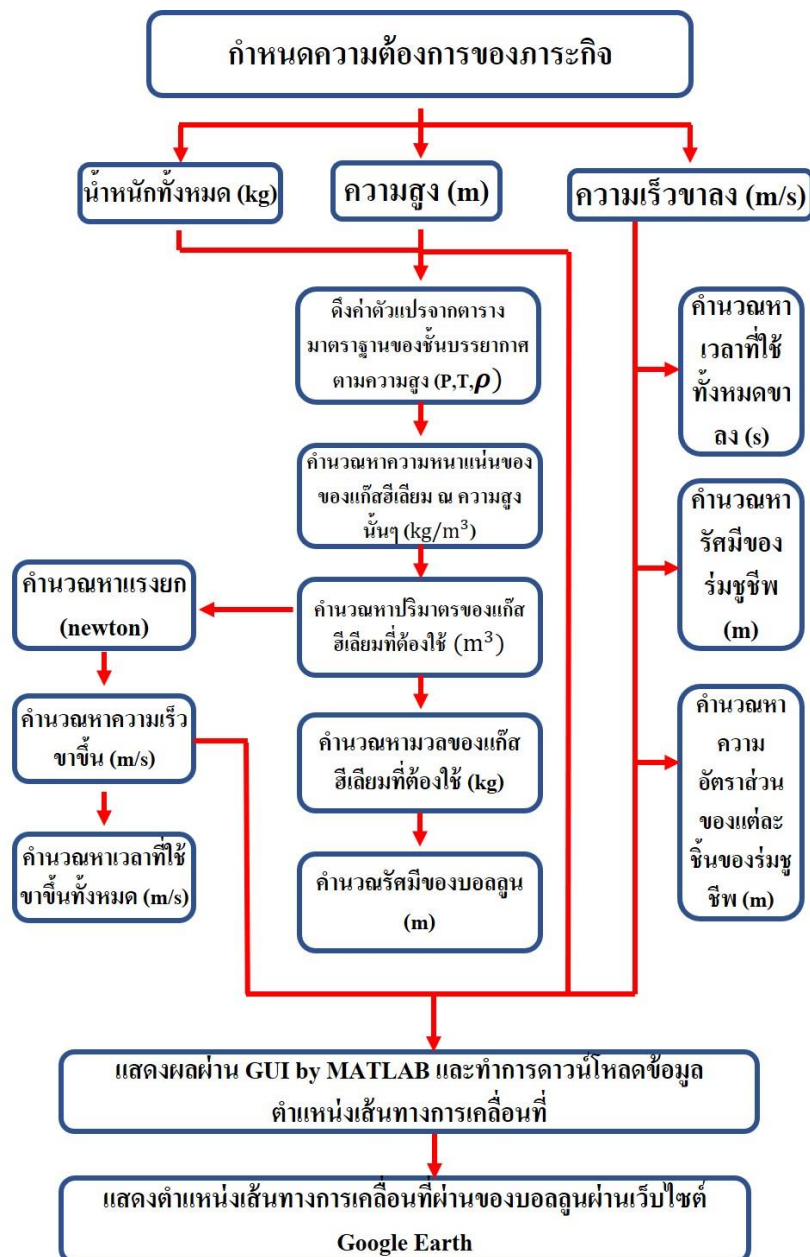
High-altitude balloon เป็นเครื่องมือที่สำคัญยิ่งสำหรับนักวิจัยรวมถึงนักเรียนนักศึกษา ในการเข้าถึงสภาพที่คล้ายคลึงกับอวกาศและสภาพแวดล้อมนอกโลก ในชั้นบรรยากาศชั้นบนของโลก เนื่องด้วยบรรยากาศในชั้นสตราโตสเฟียร์ของโลก ช่วยให้นักวิจัยสามารถเข้าถึงการผสมผสานระหว่างรังสีดวงอาทิตย์แบบแบนด์กว้าง, ความเย็นจัด, ความชื้นต่ำ, และการแผ่รังสีไอออไนซ์เฉียบพลันซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยชีววิทยาอวกาศ ดังนั้นในงานวิจัย (McKaig *et al.*, 2019) ได้นำเสนอการออกแบบ payload สำหรับใช้กับบอลลูนอวกาศโดยทั่วไปรวมถึงร่างโปรโตคอลมาตรฐานสำหรับภารกิจ high-altitude balloon ที่สามารถใช้เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการทดลองในบรรยากาศระดับสูง โดยมีการปรับ payload ให้เหมาะสมสำหรับการสุ่มตัวอย่างละอองลอยและการสัมผัสกับตัวอย่างทางชีวภาพบนชั้นบรรยากาศระดับสูง อย่างไรก็ตามลักษณะโมดูลาร์ของการออกแบบ payload ช่วยให้สามารถรวมการทดลองและการวิเคราะห์ประเภทต่าง ๆ เข้าด้วยกันได้ รวมถึงข้อมูลอวกาศวิทยาที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, และระดับความสูง วิธีการที่พัฒนาจากโครงการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการ HAB ในอนาคต

เพื่อวัตถุประสงค์ทั้งด้านการศึกษาและการวิจัยต่อไป โดยผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า HAB ราคาประหยัดทั่วไปสามารถใช้เพื่อเข้าถึงชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์ ซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลสำหรับการตรวจสอบที่เกี่ยวข้องกับทั้งบรรยากาศของโลกและสภาพคล้ายดาวอังคาร ที่ความสูงในช่วง 30-35 กิโลเมตรจากพื้นโลกจะมีสภาพแวดล้อมคล้ายกับพื้นผิวของดาวอังคาร โดยจะมีความดัน 560 Pa (0.006 atm), อุณหภูมิ -36°C และความหนาแน่น 0.008 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งในงานวิจัย (Larson *et al.*, 2009) ได้นำเสนอการออกแบบและสร้าง high-altitude balloon ด้วยโครงการชื่อว่า HARBOR ที่ใช้นักเรียนเป็นศูนย์กลาง ซึ่งจะมี payload ที่สำคัญได้แก่ โมดูลวัดอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอก โมดูลวัดความดันบรรยากาศ โมดูลวัดรังสีคอสมิก และโมดูลถ่ายภาพดิจิทัล รวมทั้งมีการออกแบบระบบ APRS ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งตำแหน่งของบอลลูนผ่านเครือข่ายวิทยุสมัครเล่น เพื่อใช้ในการติดตามเก็บข้อมูลต่อไป และในงานวิจัย (Safonova *et al.*, 2016) ได้นำเสนอการใช้บอลลูนเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นบน ช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ของแสงในอวกาศ และการสังเกตการณ์ UV ด้วยสเปกโตรสโกปีของวัตถุทางดาราศาสตร์ที่ขยายออกไปเช่นดาวหาง โดยใช้สเปกโตรกราฟที่ใช้แผ่นกรองในย่าน UV 200 ถึง 400 นาโนเมตร นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้วางแผนทำการทดลองทางชีววิทยาดาราศาสตร์ เช่น การอยู่รอดของจุลินทรีย์ในบรรยากาศชั้นบน หรือการเก็บตัวอย่างบรรยากาศในชั้นสตราโตสเฟียร์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของอากาศ/ฝุ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจจับเซลล์นอกโลกในสตราโตสเฟียร์ รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่สำคัญของการทดลองทางชีววิทยาดาราศาสตร์ (ค่าความดันก๊าซ, อุณหภูมิ, ความชื้นและการแผ่รังสีของสตราโตสเฟียร์) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับพื้นผิวของดาวอังคารมาก นอกจากวัตถุประสงค์ทางวิทยาศาสตร์ดังกล่าวแล้วทางผู้วิจัยยังได้ตั้งใจที่จะพัฒนาเครื่องมือที่จะใช้ในการทดลองด้วยตนเอง สำหรับการบินในอวกาศด้วยบอลลูน โดยคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของ high-altitude balloon คือความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบและผลิตรบบป้องกันการสั่นไหวแบบ 2 แกนเพื่อแก้ไขการเคลื่อนที่แบบสุ่มของเพย์โหลด

นอกจากการทดลองทางวิทยาศาสตร์ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว high-altitude balloon ยังถูกใช้ในการทดสอบการทำงานของดาวเทียม Cubesat ในขั้นตอนการศึกษา, ออกแบบ, และทดสอบดาวเทียมก่อนที่จะขึ้นสู่



รูปที่ 2 ร่มชูชีพแบบ Semi-Spherical (ซ้าย) และ อัตราส่วนของแต่ละชิ้นส่วนของร่มชูชีพ (ขวา)



รูปที่ 3 ลำดับการทำงานของโปรแกรมวางแผนภารกิจ

วงโคจรจริง ดังในงานวิจัย (Techavijit *et al.*, 2016) ที่ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาโปรโตคอลการส่งข้อมูลรูปภาพ ด้วยการมอดูเลตแบบ GFSK ซึ่งทดสอบการทำงานด้วย high-altitude balloon โดยผลลัพธ์ของการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าโปรโตคอลดิจิทัล GFSK สามารถทำงานได้ดีที่ความไวของตัวรับคือ -110 dBm ซึ่งสามารถยอมรับได้

2.1 High-Altitude Balloon Platform

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงองค์ประกอบของการใช้งาน high-altitude balloon platform ซึ่งได้แก่ การวางแผนภารกิจ และระบบติดตามตำแหน่งพิกัด

1) การวางแผนภารกิจ

ในการวางแผนภารกิจปล่อยบอลลูนนี้จะได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การคำนวณหาปริมาณก๊าซฮีเลียมที่ใช้บรรจุเพื่อให้สามารถยกเพย์โพลด์ขึ้นไปได้ 2) การคำนวณเพื่อออกแบบร่มชูชีพสำหรับนำเพย์โพลด์ลงสู่พื้นดินอย่างปลอดภัย และ 3) การพยากรณ์เส้นทางและจุดตกของของบอลลูน ซึ่งจะเริ่มอธิบายจากส่วนแรกก่อน โดยใช้ทฤษฎีและหลักการของแก๊สในอุดมคติที่ต้องบรรจุลงบอลลูนในปริมาณมากพอที่จะเกิดแรงยกตัวของบอลลูนที่ผูกกับเพย์โพลด์ให้ไต่ระดับไปถึงความสูงที่ต้องการ ซึ่งปริมาณแก๊สที่ใช้จะต้องมากพอที่จะทำให้เกิดแรงลอยตัวที่มีค่ามากกว่าน้ำหนักของโพลด์ จากทฤษฎีกฎของแก๊สที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ แต่ยังมีสมบัติที่ควรคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งคือ ปริมาตรหรือจำนวนโมล (n) ของแก๊สในระบบ จากกฎของอาโวกาโดรที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน แก๊สที่มีปริมาตรเท่ากันจะมีจำนวนอนุภาคเท่ากัน นอกจากนี้จำนวนโมลของแก๊ส ยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ จำนวนอนุภาคและปริมาตรของแก๊สอีกด้วย กล่าวคือแก๊ส 1 โมล จะมีจำนวน 6.02×10^{23} อนุภาคและปริมาตร 22.4 ลิตรหรือลูกบาศก์เดซิเมตรที่ STP จึงสามารถเขียนนิยามของกฎอาโวกาโดรได้ดังสมการที่ (1)

$$PV = nRT = \left(\frac{\rho}{m}\right)kt \quad (1)$$

เมื่อ เป็นปริมาตรของแก๊ส หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3), เป็นความดันของแก๊ส หน่วยเป็นปาสกาล (Pa), เป็นอุณหภูมิอุณหพลวัต หน่วยเป็นเคลวิน (K), เป็นจำนวนโมลของแก๊ส, เป็นค่าคงตัวแก๊สอุดมคติ (ประมาณ 8.3145 จูลต่อ (โมล เคลวิน) (J/K), เป็นค่าคงที่ของ Boltzman's (ประมาณ 1.38×10^{-23}

J/K), เป็นความหนาแน่นของแก๊ส He และ เป็นมวลของแก๊ส เนื่องจากบนชั้นบรรยากาศแต่ละชั้นนั้นจะมีอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นของอากาศที่ไม่เท่ากัน แต่มีความสัมพันธ์กัน โดยในที่นี้ผู้ศึกษาจะอ้างอิงจาก มาตรฐานชั้นบรรยากาศ 1976 สำหรับการออกแบบภารกิจการปล่อยบอลลูนดังรูปที่ 1

ขนาดของโพลด์มีผลต่อแรงยกของบอลลูนที่อัดแก๊ส (Timothy *et al.*, 2012) โดยปริมาณแก๊สนั้นจะต้องมากพอที่จะทำให้เกิดแรงลอยตัวที่มีค่ามากกว่าน้ำหนักของโพลด์ โดยจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของปริมาตร และความหนาแน่นของแก๊สดังสมการที่ (2) (Cross *et al.*, 2007)

$$Fb = V(\rho_{He} - \rho_{Air})g \quad (2)$$

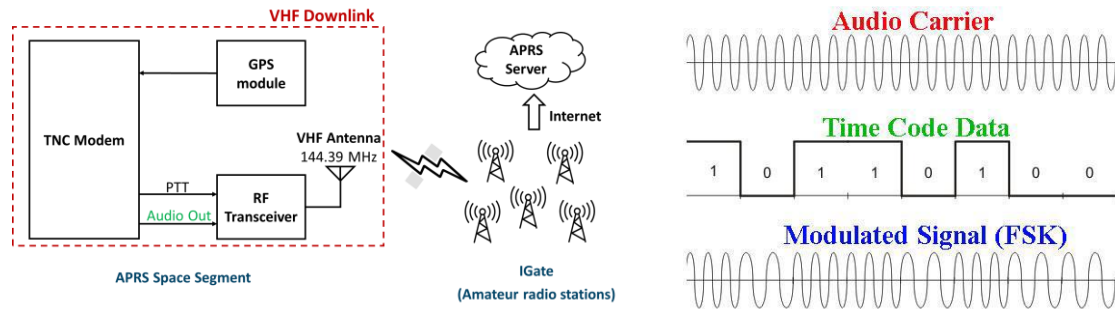
เมื่อ V เป็นปริมาตรของแก๊ส หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3), P เป็นความดันของแก๊ส หน่วยเป็นปาสกาล (Pa), T เป็นอุณหภูมิอุณหพลวัต หน่วยเป็นเคลวิน (K), n เป็นจำนวนโมลของแก๊ส, R เป็นค่าคงตัวแก๊สอุดมคติ (ประมาณ 8.3145 จูลต่อ (โมล เคลวิน) (J/K), k เป็นค่าคงที่ของ Boltzman's (ประมาณ 1.38×10^{-23} J/K), ρ เป็นความหนาแน่นของแก๊ส He (kg/m^3) และ m เป็นมวลของแก๊ส (kg)

นอกจากปัจจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ ความเร็วต้นในการปล่อยของบอลลูน โดยจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาตั้งแต่ทำการเริ่มปล่อยจนถึงจุดที่บอลลูนแตกนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการดังสมการที่ (3) (Gallice *et al.*, 2011)

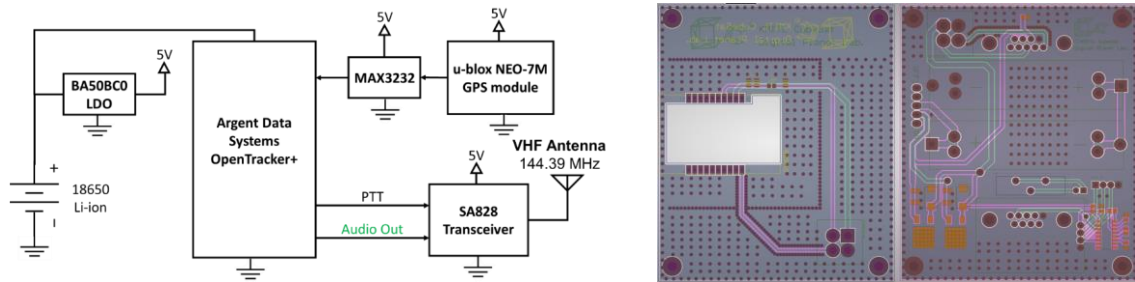
$$v = \sqrt{\frac{4d(\rho_{He} - \rho_{Air})g}{3Cd\rho_{Air}}} \quad (3)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของแก๊ส (m^3), ρ_{He} คือความหนาแน่นของแก๊ส He มีค่าเท่ากับ 1.225 (kg/m^3), ρ_{Air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) และ g คือ ความเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก (m/s^2)

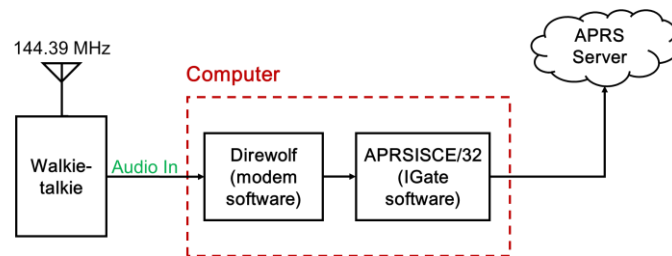
จากจุดที่บอลลูนแตกจนกระทั่งถึงพื้นนั้นจะชะลอความเร็วในการตกด้วยร่มชูชีพ นอกจากนั้นยังทำให้โพลด์ได้รับความเสียหายน้อยลงเมื่อตกสู่พื้นดินซึ่งจะอาศัยแรงต้านอากาศในการลดความเร็วขาลง โดยร่มชูชีพนั้นมีหลากหลายให้เลือกมากมาย ทั้งนี้ผู้ศึกษาได้เลือกกรม



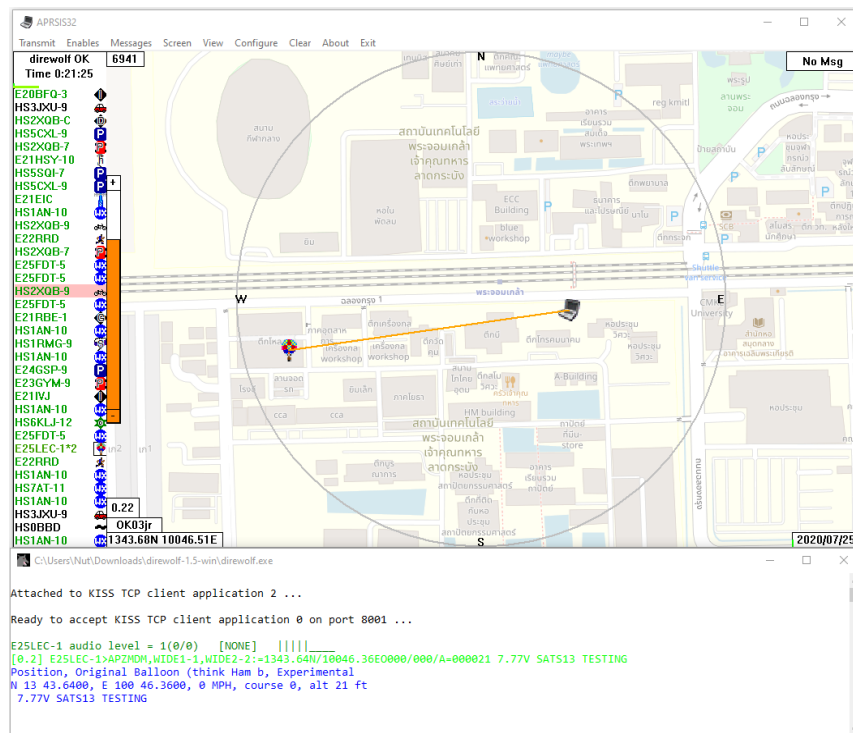
รูปที่ 4 ภาพรวมของระบบ APRS (ซ้าย) และการมอดูเลตแบบ AFSK (ขวา)



รูปที่ 5 ไดอะแกรมของระบบ APRS ในส่วนของภาคส่ง (ซ้าย) และการออกแบบ PCB ของระบบในส่วนของภาคส่ง (ขวา)



รูปที่ 6 ไดอะแกรมของระบบ APRS ในส่วนของภาครับ [iSTEM-Ed]



รูปที่ 7 APRSISCE/32 [iSTEM-Ed]

ซูชิพชนิด Semi-spherical ซึ่งมีประสิทธิภาพในการต้านแรงอากาศได้ดี แสดงได้ดังรูปที่ 2 (ซ้าย)

ในการออกแบบรูปร่างซูชิพแบบ semi-spherical นั้นจำเป็นต้องคำนวณหารัศมีของรูปร่างซูชิพที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของโหลดและความเร็วของลมจากสมการที่ (4)

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8mg}{\pi \rho_{Air} C_d v^2}} \quad (4)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของรูปร่างซูชิพ (m), m คือ มวลของโหลดทั้งหมด (kg) และ v คือ ความเร็วในการตกของรูปร่างซูชิพ (m/s)

รูปร่างซูชิพแบบ semi-spherical นั้นเกิดจากการนำชิ้นส่วนที่คล้ายคลึงสามเหลี่ยมจำนวนหลายชิ้นมาเย็บต่อกันเป็นลักษณะวงกลมมุม 360 องศา จากนั้นเย็บเชือกที่ส่วนปลายของรูปร่างซูชิพ โดยเมื่อเราคำนวณหารัศมีของรูปร่างซูชิพได้แล้วนั้น จะสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความยาวแต่ละส่วนของแต่ละชิ้นนี้ได้จากรูปแบบชิ้นส่วนของรูปร่างซูชิพดังรูปที่ 2 (ขวา) โดยขั้นตอนการวางแผนการกิจปล่อยบอลลูนสามารถสรุปได้ดังผังงานรูปที่ 3 (Warayut et al., 2009)

2) ระบบติดตามตำแหน่งพิกัด

ระบบติดตามและรายงานพิกัดโดยอัตโนมัติผ่านเครือข่ายไร้สายในบทความนี้ใช้ระบบ APRS ที่ซึ่งสามารถส่งข้อความหรือข้อมูลโทรมาตรรวมทั้งตำแหน่งพิกัด โดยจัดการเฟรมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบโปรโตคอล AX.25 สำหรับแพ็คเกจวิทยุสมัครเล่น (amateur packet radio) ซึ่งระบบ APRS ในบทความนี้ประกอบไปด้วยส่วนที่ผูกติดไปกับบอลลูน (space/air segment) ที่ทำหน้าที่ติดตามพร้อมรายงานพิกัดโดยอัตโนมัติผ่านภาคส่ง และส่วนที่อยู่บนภาคพื้นดิน (ground segment) หรือ IGate ที่เป็นภาครับสัญญาณและส่งต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์ของระบบ APRS เพื่อการเข้าถึงข้อมูลตำแหน่งพิกัดสำหรับการติดตามต่อไป โดยภาพรวมของระบบ APRS แสดงได้ดังรูปที่ 4 (ซ้าย)

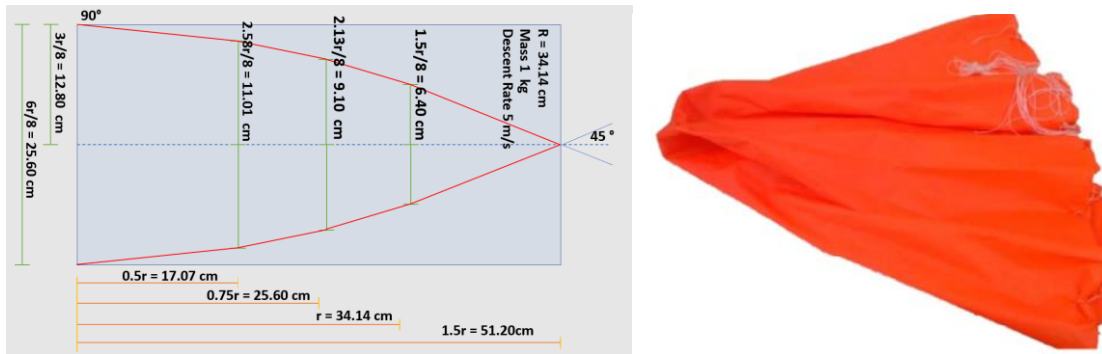
ในภาคส่งของระบบ APRS จะใช้โมเด็ม TNC (Terminal Node Controller) ในการเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก AFSK (Audio Frequency Shift Keying) ดังรูปที่ 4 (ขวา) ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่ใช้ความถี่เสียง 1200 Hz แทนบิตข้อมูล “1” และใช้ความถี่ 2200 Hz แทนบิตข้อมูล “0” ภายใต้มาตรฐาน Bell 202 โดยมีความเร็วในการสื่อสาร 1200 baud หรือ 150 ตัวอักษรต่อวินาที

หลังจากได้สัญญาณอนาล็อก AFSK ซึ่งเป็นสัญญาณเสียงมาแล้ว จากนั้นจะถูกส่งออกอากาศด้วยการมอดูเลตแบบความถี่ (frequency modulation) โดยใช้คลื่นพาห้ที่ความถี่ 144.39 MHz เพื่อให้ภาครับสัญญาณที่อยู่บนพื้นดิน ซึ่งก็คือสถานีภาคพื้นดินของนักวิทยุสมัครเล่นทั่วโลก สามารถรับสัญญาณและทำการดีมอดูเลตกลับมาเป็นข้อมูลตำแหน่งพิกัด พร้อมทั้งข้อมูลอื่น ๆ ส่งขึ้นไปยังเซิร์ฟเวอร์ของระบบ APRS เพื่อให้ผู้ใช้งานระบบสามารถติดตามพิกัดบอลลูนได้ต่อไป โดยการออกแบบในส่วนของภาคส่งแสดงได้ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) (Pemmavit et al., 2020)

ทีมพัฒนาของผู้ศึกษาได้เลือกใช้โมเด็ม TNC รุ่น OpenTracker ซึ่งสามารถจัดการกับข้อมูลจากโมดูล GPS พร้อมทั้งนำมาจัดเฟรมโปรโตคอล AX.25 ให้โดยอัตโนมัติ โดยหลังจากมอดูเลตสัญญาณแบบ AFSK แล้ว จึงส่งต่อสัญญาณไปยังโมดูลสื่อสาร FM รุ่น SA828 เพื่อกระจายสัญญาณต่อไป โดยการออกแบบ PCB (printed circuit board) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 (ขวา) ในส่วนของภาครับหรือ IGate ทีมพัฒนาของผู้ศึกษาได้ประยุกต์ใช้งานในเชิงซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ผสมกับวิทยุสื่อสารความถี่ 144.39 MHz ซึ่งอยู่ในย่านวิทยุสมัครเล่น สามารถแสดงไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6 โดยใช้เครื่องวิทยุเป็นตัวรับสัญญาณและดีมอดูเลต FM จากนั้นจะได้สัญญาณเสียงออกมาแล้วส่งต่อเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อใช้โมเด็ม TNC ที่เป็นแบบซอฟต์แวร์ซึ่งในที่นี้คือโปรแกรม direwolf ทำการถอดสัญญาณ AFSK ให้กลายเป็นข้อมูลที่ภาคส่งต้องการสื่อสาร หรือก็คือตำแหน่งพิกัดของบอลลูนนั่นเอง จากนั้นจึงส่งต่อข้อมูลตำแหน่งพิกัดให้กับ IGate ในที่นี้คือโปรแกรม APRSSISCE/32 ซึ่งทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลขึ้นไปบนเซิร์ฟเวอร์ของระบบ APRS ซึ่งจะสามารถเฝ้าสังเกตการณ์ติดตามพิกัดผ่านเว็บ aprs.fi โดยทั้งสองโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 (Pemmavit et al., 2020)

3. ผลจากการศึกษาค้นคว้า

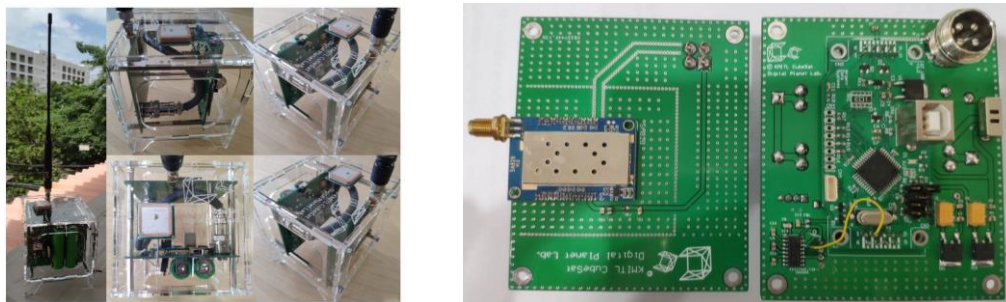
ในส่วนของผลการทดลองก็ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน เพื่อความให้เห็นถึงความชัดเจนของการใช้งาน high-altitude balloon platform



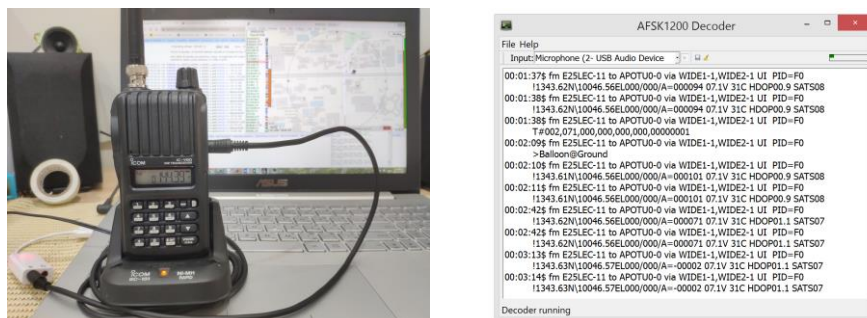
รูปที่ 8 ขนาดความยาวของแต่ละอัตราส่วนแต่ละชั้นของร่มชูชีพที่ได้จากการคำนวณ



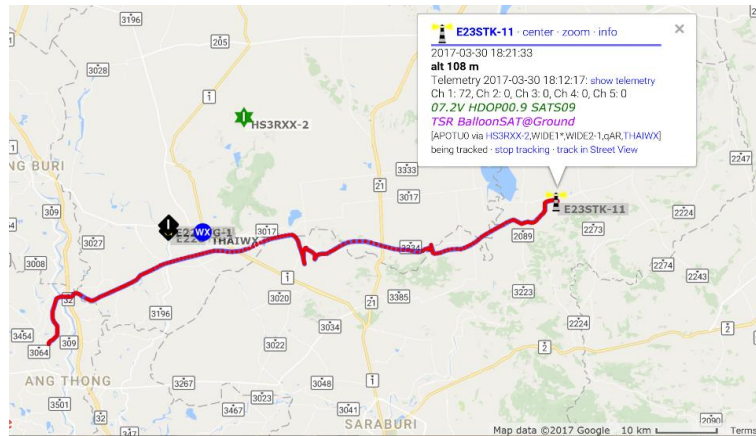
รูปที่ 9 ตำแหน่งพิกัด 3 มิติจากหลังการปล่อยจริงและหมุดพิกัดที่เพยโฮลดตกถึงพื้นโลกจากการพยากรณ์



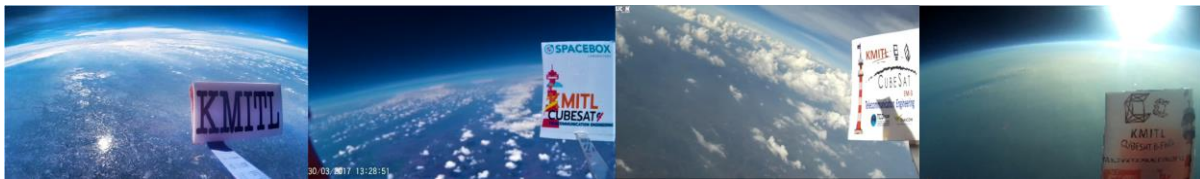
รูปที่ 10 อุปกรณ์ภาคส่งของระบบ APRS [iSTEM-Ed] ที่ประกอบแล้ว (ซ้าย) และ PCB ทั้ง 2 (ขวา)



รูปที่ 11 อุปกรณ์ภาครับของระบบ APRS (ซ้าย) และข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่รับได้ (ขวา)



รูปที่ 12 การติดตามบอลูนด้วยระบบ APRS ผ่านเว็บ aprs.fi



รูปที่ 13 ภาพถ่ายทางอากาศจากหลาย ๆ การกิจที่ใช้งาน high-altitude balloon platform

3.1 การวางแผนภารกิจ

การคำนวณการออกแบบในส่วนต่าง ๆ นั้นสามารถแสดงดังตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการให้บอลูนแตกที่ความสูง 30 กิโลเมตรจากพื้นดินที่บรรจุด้วยแก๊สฮีเลียม มีน้ำหนักโหลรวมน้ำหนักของบอลูนแล้ว 1 กิโลกรัม และมีความเร็วขาลงเป็น 5 m/s จากข้อมูลมาตรฐานชั้นบรรยากาศ (U.S. Standard 1976) ที่ ความสูง 30 กิโลเมตรจะมีอุณหภูมิ 226.650 เคลวิน ความดัน 8.7898 Torr (0.0116 n/m²) และความหนาแน่นของอากาศเป็น 1.8×10^{-2} kg/m³ ดังนั้นเมื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการแล้วจะได้ปริมาตรแก๊สฮีเลียมที่ต้องบรรจุเป็น 64.4773 m³ และได้รับรัศมีของร่มชูชีพเป็น 0.34 m เมื่อนำมาแทนค่าลงในแบบอัตราส่วนของชิ้นส่วนร่มชูชีพจะได้ขนาดความยาวแต่ละส่วนดังรูปที่ 8 (ซ้าย) จึงทำการตัดตามรูปแบบและเย็บเข้าด้วยกันจนครบทั้ง 8 ชิ้น จะได้ร่มชูชีพที่มีลักษณะครึ่งวงกลมที่มีมุม 360 องศา และเย็บเชือกที่ส่วนปลายของร่มชูชีพตามลำดับรูปที่ 8 (ขวา) (Warayut et al., 2020)

ในส่วนของการพยากรณ์เส้นทางและจุดตกของบอลูนซึ่งใช้ฐานข้อมูลจาก CUSF Landing Predictor จะไดยกตัวอย่างจากภารกิจที่ปล่อยทิ้งเมื่อบอลูนแตกโดยข้อมูลตำแหน่งพิกัดจากการปล่อยจริงแสดงได้ดังเส้นกราฟใน 3 มิติ พร้อมทั้งหมุดพิกัดที่เพย์โหลดตกถึงพื้นโลกจากการพยากรณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 9

จากการสังเกตเส้นทางที่พยากรณ์จากฐานข้อมูลลมเปรียบเทียบกับข้อมูลหลังการปล่อยบอลูนจริงนั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นคือระยะทางระหว่างจุดตกที่ได้จากการพยากรณ์และจุดตกจริงที่ 12.5 กิโลเมตร

3.2 ระบบติดตามตำแหน่งพิกัด

จากการออกแบบ PCB ของระบบ APRS ในส่วนของภาคส่ง จึงนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 10 (ซ้าย) ซึ่งประกอบด้วย 2 บอร์ด ดังรูปที่ 10 (ขวา) (Pemmavit et al., 2020) ที่แยกการทำงานระหว่างส่วนของโมเด็ม TNC กับส่วนของโมดูลสื่อสารวิทยุออกจากกันเพื่อป้องกันการรบกวน

ภาครับหรือ IGate ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์กับเครื่องวิทยุสื่อสารย่านความถี่วิทยุสมัครเล่น สามารถแสดงการเชื่อมต่อได้ดังรูปที่ 11 (ซ้าย) และแสดงข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่รับได้ดังรูปที่ 11 (ขวา)

จากการทดสอบต้นแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียม KMITL-CubeSat กว่า 4 ครั้งที่ผ่านมาของทีมผู้ศึกษา ด้วยการใช้นาน high-altitude balloon platform สามารถวางแผนภารกิจและตามเก็บกู้ดาวเทียม และเศษซากบอลูนที่แตกแล้วได้ทุกครั้ง นำมาซึ่งภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายได้ด้วยกล้องสังเกตการณ์ที่ผูกติดไปกับบอลูนดังรูปที่ 13

4. สรุป

เนื่องจากบทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนา high-altitude balloon platform เพื่อการทดลอง และวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ จึงได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือการวางแผนภารกิจบอลลูน และระบบติดตามตำแหน่งพิกัด ซึ่งมีความจำเป็นต้องทำงานประสานกัน กล่าวคือในการวางแผนภารกิจจะคำนึงถึงปริมาณแก๊สฮีเลียมที่ต้องใช้บรรจุลงในบอลลูน เพื่อให้สามารถยกเพย์โหลดขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศในระดับความสูงที่ต้องการได้ พร้อมทั้งต้องสามารถพยากรณ์เส้นทาง และความสูงของบอลลูน ณ เวลาต่าง ๆ ขณะทำการกิจ และสามารถออกแบบร่มชูชีพที่สามารถนำเพย์โหลดลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย ซึ่งต้องทำงานร่วมกับระบบติดตามตำแหน่งพิกัด ที่สามารถกระจายสัญญาณข้อมูลพิกัดได้ในระยะไกล เนื่องจากบอลลูนได้ระดับขึ้นไปสูงถึงระดับ สตราโทสเฟียร์ และต้องเป็นระบบที่มีช่วยผู้ที่รับสัญญาณได้อยู่ทั่วโลก จึงต้องเลือกใช้ระบบ APRS ที่ซึ่งอยู่ในข่ายของนักวิทยุสมัครเล่นที่มีอยู่ทั่วประเทศ ทำหน้าที่คอยรับสัญญาณและส่งต่อไปยังยังเซิร์ฟเวอร์เพื่อให้ผู้ใช้งานแพลตฟอร์มสามารถติดตามตำแหน่งพิกัดของบอลลูนขณะทำการกิจผ่านอินเทอร์เน็ตได้ ณ เวลาจริงผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้เตรียมภารกิจสำหรับการทดลอง/ทดสอบทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องอาศัย high-altitude balloon ในการนำพาการทดลองขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศที่สูงหรือในสภาวะใกล้เคียงอวกาศ เช่น การทดสอบต้นแบบดาวเทียม CubeSat ดังที่ได้นำเสนอเป็นกรณีศึกษาในบทความนี้ นอกจากนี้ยังรวมถึงการทดลองและการตรวจวัดอื่นทางด้านวิทยาศาสตร์ที่จำเป็นต้องทำการทดลองหรือตรวจวัดปริมาณทางกายภาพต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศระดับสูง การตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น ความสามารถในการแบกน้ำหนักอุปกรณ์ที่จะนำขึ้นไปปริมาณแก๊สฮีเลียมที่ต้องใช้บรรจุระยะเวลา ตำแหน่งและเส้นทางตลอดการเดินทางของภารกิจ จนกระทั่งตามเก็บกู้เมื่ออุปกรณ์ทดสอบตกกลับลงมายังพื้นดิน สามารถคำนวณ ออกแบบและใช้ประโยชน์จากสิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้ รวมทั้งส่วนหนึ่งของผลงานวิจัยนี้จะช่วยให้การทดลองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับอวกาศทำได้โดยสะดวกและใช้เวลาในการเตรียมดำเนินการกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยหน่วยบริหารและจัดการทุน ด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม สัญญาเลขที่ B05F630018

เอกสารอ้างอิง

- Chaisita, T., Nakorn, T. N., Prathetrat, C., Sutthikarn, P., Chivapreecha, S., & Trirat, A. (2020). Development of High-Altitude Balloon Tracking by APRS System. *ECTI CARD 2020*, Nakornsawan, Thailand. (in Thai)
- Cross, R. (2007). Aerodynamics of a Party Balloon. *The Physics Teacher*, 45(6), 334-336. <https://doi.org/10.1119/1.2768686>
- Gallice, A., Wienhold, F. G., Hoyle, C. R., Immler, F., & Peter, T. (2011). Modeling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion. *Atmos. Meas. Tech.*, 4 (1 0) , 2 2 3 5 - 2 2 5 3 . <https://doi.org/10.5194/amt-4-2235-2011>
- Kerry, T. N., Kim, M. A., Matthew, K. H., & Alexey, A. P. (2007). Aerodynamic and Mission Performance of a Winged Balloon Guidance System. *Journal of Aircraft*, 44 (6) , 1 9 2 3 - 1 9 3 8 . <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.31922>
- Kusonthammarat, T., Thepsittha, T., & Sutthikarn, P. (2016). *Design and Implementation of CubeSat Engineering Model and Channel Coding Department of Telecommunications Engineering*. Faculty of Engineer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- McKaig, J., Caro, T., Hyer, A., Talburt, E. D., Verma, S., Cui, K., Boguraev, A.-S., Heit, M., Johnson, A., Johnson, E., Jong, A., Shepard, B., Stankiewicz, J., Tran, N., & Rask, J. (2019). A High-Altitude Balloon Platform for Space Life Sciences Education. *Gravitational and Space Research*, 7 (1) , 6 2 - 6 9 . <https://doi.org/10.2478/gsr-2019-0007>
- Roeksukrungrueang, C. (2016). *The CubeSat Engineering Model and Improvement of Power Consumption using Adjustable Code Rate Convolution Code Department of Telecommunications Engineering*. Faculty of Engineer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- Safonova, M., Nayak, A., Sreejith, A. G., Mathew, J., Sarpotdar, M., Ambily, S., Nirmal, K., Talnikar, S., Hadigal, S., & Prakash, A. (2015). An overview of high-altitude balloon experiments at the Indian Institute of Astrophysics. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 29(3), 397-426. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01538>
- Shane, L. L., John, C. A., & William, A. H. (2009). The first frontier: High altitude ballooning as a platform for student research experiences in science and engineering. *American Journal of Physics*, 77(6), 489-497. <https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.3097775>
- Sitha, W., Sutthikarn, P., & Chivapreecha, S. (2020). Simulation Software Development for Mission Planning of Science/Engineering Testing Using with High-Altitude Balloon. *ARUCON 2020*, Ayutthaya, Thailand.
- Smith, T. P. (2012). *Balloon Calculations*. <https://northstar-www.dartmouth.edu/~klynch/pmwikie/uploads/BalloonCalculations.pdf>

- Sutthikarn, P., Chivapreecha, S., Sitha, W., Jongsataporn, T., & Trirat, A. (2020). Automatic Position Reporting System for Miniaturized Satellite Experiment Using High-Altitude Balloon. *2020 International STEM Education Conference (iSTEM-Ed 2020)*, Huahin, Thailand.
- Techavijit, P. (2020). *Practical Ground-Space Communication Network for Miniaturized Satellites* Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- Techavijit, P., Chivapreecha, S., Sukchalerm, P., & Wongphuangfuthaworn, N. (2016). Suitable altitude for long-operated communication high altitude balloon with experimental flights. *2016-8th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, Chiangmai, Thailand.
- Techavijit, P., Chivapreecha, S., Sukchalerm, P., & Plodpai, A. (2016). *CubeSat image transmission in JPEG compression: An experiment on high altitude platform* [Paper presentation], the 2016-8th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST).
- Techavijit, P., Sukchalerm, P., Wongphuangfuthaworn, N., Plodpai, A., Manuthasna, S., & Chivapreecha, S. (2018). Internet Network in Space for Small Satellites: Concept and Experiments. *Sensors and Materials*, 30(10), 2295–2311. <https://doi.org/10.18494/SAM.2018.1854>
- Thaheer, A. S. M., & Ismail, N. A. (2017). Mission design and analysis of USM high-altitude balloon. *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, 14(2), 62–92.