

## การศึกษาความสูงและความเร็วการบินถ่ายภาพ ที่มีผลต่อความถูกต้องในการทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ

### The study of flight elevation and speed of UAV Photogrammetric accuracy For mapping.

ปาริชาติ สุขนาคน<sup>1</sup> นพรุจ เพชรทอง<sup>1</sup> อภิลิทธิ์ ภาสตา<sup>2</sup> คมศิลป์ ว่างยาว<sup>2</sup> และ อีระ ลาภิศขยางกุล<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

<sup>2</sup> บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

\*Corresponding author; E-mail address: theera.lap@gmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความถูกต้องของการทำแผนที่ด้วยภาพถ่ายทางอากาศโดยศึกษาผลกระทบของความสูงบิน และความเร็วที่ใช้ในการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับราคาถูก โดยทำการบินถ่ายภาพเหนือพื้นที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยขนาด 10 ไร่ มีรูปแบบการบิน 4 กรณี คือ การบินแบบเคลื่อนที่พร้อมถ่ายภาพและแบบหยุดนิ่งเพื่อถ่ายภาพแต่ละรูปแบบกำหนดความสูงบินให้มีความละเอียดของจุดภาพที่ 3.5 และ 5 ซม./จุดภาพ กำหนดการซ้อนทับของภาพด้านหน้าและด้านข้าง 80% และ 75% ตามลำดับ ใช้จุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบจำนวน 5 และ 15 จุดตามลำดับ โดยใช้การรังวัดดาวเทียมแบบจลนในการหาค่าพิกัดของจุดดังกล่าว จากนั้นทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft Photoscan Professional V.1.4.4 เพื่อสร้างความหนาแน่นของจุดระดับสำหรับแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข และภาพถ่ายดิจิทัล งานวิจัยนี้ใช้ค่า RMSE ในการประเมินความถูกต้องทั้งทางราบและทางตั้ง โดยใช้มาตรฐาน ASPRS 2014 ในการระบุชั้นคุณภาพของงาน จากการคำนวณพบว่า รูปแบบการบินที่ให้ค่าความถูกต้องดีที่สุดคือ การบินถ่ายภาพแบบหยุดนิ่งเพื่อถ่ายภาพที่มีความละเอียดของจุดภาพ 5 ซม./จุดภาพ สามารถผลิตภาพถ่ายดิจิทัลจริงสำหรับใช้ในงานที่มีความละเอียดสูงสุดได้ และให้ผลความถูกต้องทางตั้งอยู่ในชั้นความถูกต้องทางตั้งที่ 5 ซม.

คำสำคัญ: ภาพถ่ายทางอากาศ, รูปแบบการบิน, อากาศยานไร้คนขับ

#### Abstract

This study aims to evaluate the effect of flight elevation and speed to accuracy of landfill mapping by using Low-cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry. The study site located at landfill site that covers 10 Rai (16,000 square meters). Flight configuration was set up including 80% of frontal overlap and 75% of side overlap at Ground sampling distance (GSD) 3.5

and 5 cm/pixels. The picture trigger modes of UAV's flight were set to safe mode (stopping to capture) and fast mode (flying to capture). The Ground control points (GCPs) were set up at 5 positions and check point (CPs) were set up at 15 positions, respective. The Agisoft Photoscan Professional V.1.4.4 software was used for data processing in order to generate densified point cloud, digital elevation model, and orthoimage. The accuracy of GCPs and CPs were evaluated by Root Mean Square Error (RMSE) values and followed the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2014 standard. The result showed that GSD at 5 cm/pixel with safe mode gave the best accuracy both horizontal and vertical positions which can be used for the highest accuracy work. For Vertical accuracy evaluation, the result was in the 5-cm vertical accuracy class.

Keywords: Photogrammetry, The picture trigger mode, Unmanned Aerial Vehicle

#### 1. บทนำ

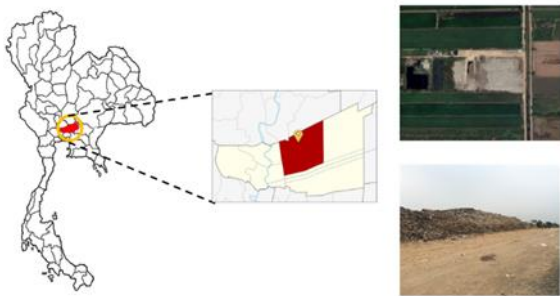
การพัฒนาเศรษฐกิจเขตพื้นที่พัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ได้ก่อให้เกิดความก้าวหน้าในด้านการลงทุนการคมนาคมขนส่ง การวางผังเมืองใหม่ และการท่องเที่ยว ส่งผลให้เกิดใช้พลังงานและทรัพยากรธรรมชาติจึงก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา อย่างไรก็ตามโครงการ EEC ได้วางนโยบายโครงการเร่งด่วนด้านสิ่งแวดล้อม 14 โครงการ วงเงินรวม 8,615 ล้านบาท ในส่วนของการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมและเน้นการจัดการมลพิษคิดเป็นเงิน 8,230 ล้านบาท [1] เงินส่วนนี้จะนำไปใช้ในการกำจัดขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นโดยวิธีการนำไปจัดการที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ซึ่งการจัดการขยะมูลฝอยภายในบ่อฝังกลบให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลทางวิชาการในการบริหารจัดการ โดยคำนึงถึงเทคโนโลยีที่เหมาะสม ส่วนสำคัญในการบริหารจัดการขยะคือแผนที่บ่อฝัง

กลบขยะมูลฝอย ข้อมูลในแผนที่จะแสดงให้เห็นถึงข้อมูลทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจาก Biochemical degradation และสามารถวิเคราะห์ปริมาณขยะมูลฝอยในพื้นที่เพื่อการจัดการขยะที่ดีได้ การทำแผนที่โดยเทคโนโลยี Direct measurement ที่มีการใช้กล้องสำรวจในบ่อขยะนั้น มีข้อจำกัดในด้านของการทำงานในพื้นที่ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่คนสำรวจได้ จึงมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งสามารถลดระยะเวลา และลดโอกาสการสัมผัสกับมลพิษจากขยะได้ แต่การสำรวจด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ยังไม่สามารถกำหนดรูปแบบการบินที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและถูกต้องสูง งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษา รูปแบบการบินที่เหมาะสมที่ใช้ในการบินถ่ายภาพทางอากาศ โดยศึกษา รูปแบบการบินและความเร็วที่ใช้ในการบินถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูกในการทำแผนที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยให้ได้ความถูกต้องสูงเทียบกับมาตรฐานการทำแผนที่ด้วยภาพถ่ายทางอากาศสากล

## 2. อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

### 2.1 พื้นที่การศึกษา

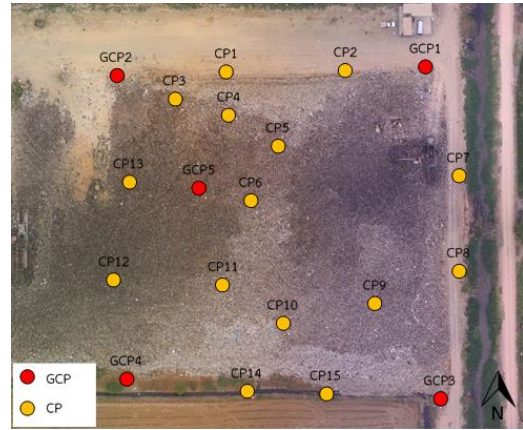
ในการศึกษานี้ได้เลือกตัวแทนพื้นที่ศึกษาเป็นบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยแบบเทกอง ตั้งอยู่บนพิกัด 14.14°N, 100.67°E ตำบลคลองสาม อำเภอลองสาม จังหวัดปทุมธานี 14 มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 10 ไร่ ดังแสดงลักษณะพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งและลักษณะทางภูมิศาสตร์ของบ่อขยะมูลฝอยแบบเทกองเทศบาลตำบลคลองสาม

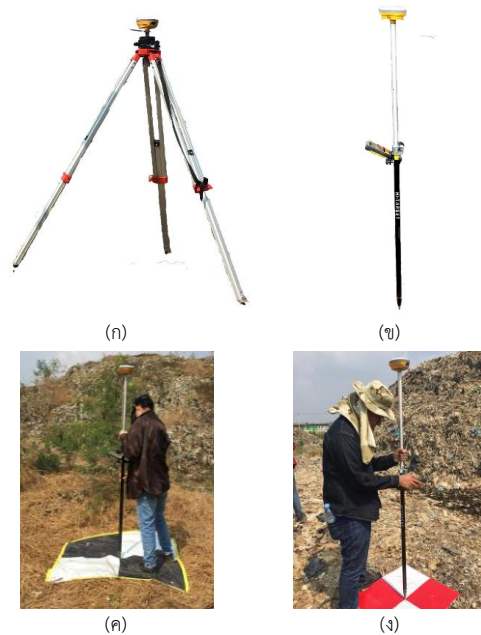
### 2.2 การสำรวจภาคสนาม

ในการทำแผนที่ภาพถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับต้องมีการสำรวจภาคสนามเพื่อกำหนดจุดควบคุมภาพ (GCP) สำหรับ Georeferencing และวางจุดตรวจสอบ (CP) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ โดยหลักการแล้วจุดดังกล่าวต้องวางให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาตามหลัก Stratified Random Sampling ซึ่งเป็นการกำหนดจุดตามความลาดชันให้กระจายครอบคลุมพื้นที่สำรวจ [2] ในการศึกษานี้ได้วางจุด GCP จำนวน 5 จุด และวางจุดตรวจสอบจำนวน 15 จุด ดังแสดงตำแหน่งของจุดต่าง ๆ ในรูปภาพที่ 2



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการวางจุด GCP และ CP ในพื้นที่ศึกษา

หลังจากที่ได้มีการวางจุด GCP และ CP แล้วมีการเก็บค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ด้วย วิธีการ Global Navigation setline System (GNSS) แบบ Real time kinetic (RTK) ด้วยอุปกรณ์ยี่ห้อ Hi-Target รุ่น V100 ที่ให้มีความคลาดเคลื่อนทางแนวราบ 8 มิลลิเมตร + 1ppm RMS และแนวตั้ง 15 มิลลิเมตร + 1ppm RMS โดยทำการติดตั้งสถานีฐาน (Base Station) ไว้บนหมุดหลักฐานจุดที่ 1 ซึ่งเป็นจุดออกงานวางพิกัดไว้ที่ทางเข้าบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย โดยมีตำแหน่งทางภูมิศาสตร์คือ N = 1,502,532.000 เมตร, E = 554,745.000 เมตร, z = 50.000 เมตร และนำสถานีเคลื่อนที่ (Rover Station) ไปวางบนจุด GCP และ CP เพื่อเก็บค่าพิกัด ดังแสดงลักษณะและการปฏิบัติงานในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การสำรวจภาคพื้นด้วย RTK-GNSS Hi-Target รุ่น V100 (ก) Base Station (ข) Rover Station ใน (ค) จุดควบคุมภาพ และ (ง) จุดตรวจสอบ

### 2.3 การถ่ายภาพอากาศ

การสำรวจภาพถ่ายทางอากาศเพื่อทำแผนที่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูก (Low-Cost UAV) ยี่ห้อ DJI รุ่น Phantom 3 Professional โดยมีกล้องถ่ายภาพแบบ gimbal ยี่ห้อ Sony EXMOR 1/2.3" CMOS ประกอบกับเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 20 มม. และความละเอียดกล้องเท่ากับ 12.0 megapixels (4000 × 3000) ดังแสดงชุดอากาศยานในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดอากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI Phantom 3 Professional

การศึกษานี้ได้บินถ่ายภาพพื้นที่ศึกษาด้วยรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์การศึกษา โดยใช้ DJI Go Application เพื่อควบคุมการทำงานการระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของอากาศยาน และใช้ Pix4D capture ในการกำหนดลักษณะการบินถ่ายภาพ ทั้งการซ้อนทับด้านหน้า การซ้อนทับด้านข้าง ความสูง และรูปแบบการถ่ายภาพ ได้กำหนดการซ้อนทับภาพด้านหน้าและด้านข้างเท่ากับ 80% และ 75% ตามลำดับ กำหนดความสูงบินที่ให้ค่า Ground Sampling Distance (GSD) เท่ากับ 3.5 และ 5 ซม./จุดภาพ และกำหนดรูปแบบการบินถ่ายภาพด้วย Fast Mode และ Safe Mode ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

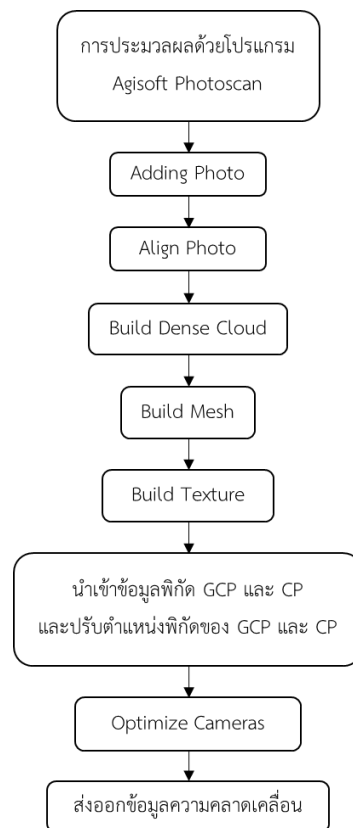
ตารางที่ 1 การกำหนดลักษณะการบินถ่ายภาพ

Configuration Codes	Mode	GSD (cm/pixel)	Number of photos	GCPs	CPs
Fast Mode Case 3.5	Fast Mode	3.94	54	5	15
Safe Mode Case 3.5	Safe Mode	3.97	53		
Fast Mode Case 5	Fast Mode	5.64	40		
Safe Mode Case 5	Safe Mode	5.78	35		

### 2.4 การประมวลผล

ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในรูปแบบการบินในลักษณะต่าง ๆ จะถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan Version 1.4.4 เพื่อสร้างแผนที่ภาพถ่ายออร์โธเชิงเลขและภาพถ่ายดิจิทัลจริงและคำนวณความ

คลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 5 เริ่มจากการนำข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่โปรแกรมแล้วทำการ Align Photo เพื่อแยกภาพให้กระจายออกเป็นจุดภาพที่มีพิกัดตำแหน่งย่อย ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจจำเป็นต้องมีการลบจุดภาพที่ไม่มีประโยชน์เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากจุดเหล่านี้ จากนั้นโปรแกรมจะทำการ Build Dense Cloud สร้างความหนาแน่นของจุดภาพจากจุดภาพที่มีจุดเด่นและพิกัดตำแหน่งตรงกัน และ Build Mesh เพื่อสร้างพื้นผิวแบบจำลอง ต่อมาโปรแกรมจะทำการ Build Texture สร้างรายละเอียดบนจุดภาพเพื่อสร้างเป็นแผนที่ภาพถ่ายดิจิทัลจริงและสร้างแบบจำลองเชิงเลข จากนั้นนำข้อมูลพิกัดตำแหน่งของจุดควบคุมภาพ และจุดตรวจสอบเข้าสู่โปรแกรมและทำการปรับตำแหน่งจุดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์และตำแหน่งจุดบนภาพถ่ายทางอากาศให้ตรงกัน เพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างพิกัดตำแหน่งจากการรังวัดและพิกัดตำแหน่งบนภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งให้ผลในรูปแบบของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root-mean Square Error : RMSE)



รูปที่ 5 ขั้นตอนการประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft Photoscan

### 2.5 การประเมินความถูกต้อง

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์และภาพถ่ายทางอากาศ ให้ผลในรูปแบบของค่าสมการการคำนวณรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองได้ดังสมการ

ที่ (1), (2), (3), (4) และ (5) โดยที่ลักษณะการบินแต่ละรูปแบบจะมีความคลาดเคลื่อนที่ต่างกัน โดยเมื่อได้ความคลาดเคลื่อนแล้วจะนำไปเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับมาตรฐาน American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) สำหรับการระบุระดับชั้นงานของค่าความถูกต้อง

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Oi} - X_{GNSSi})^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{Oi} - Y_{GNSSi})^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{Oi} - X_{GNSSi})^2 + (Y_{Oi} - Y_{GNSSi})^2]}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{Oi} - Z_{GNSSi})^2}{n}} \quad (4)$$

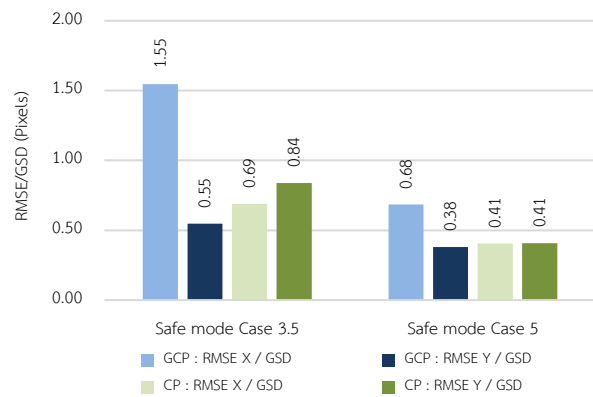
$$RMSE_T = \sqrt{(RMSE_r)^2 + (RMSE_z)^2} \quad (5)$$

เมื่อ  $RMSE_x$ ,  $RMSE_y$  และ  $RMSE_z$  คือความคลาดเคลื่อนในแนวแกน X แกน Y และแกน Z,  $X_{Oi}$ ,  $Y_{Oi}$  และ  $Z_{Oi}$  คือค่าพิกัดในแนวแกน X แกน Y และแกน Z จากการประมวลผลที่จุด  $i$ ,  $X_{GNSSi}$ ,  $Y_{GNSSi}$  และ  $Z_{GNSSi}$  คือค่าพิกัดในแนวแกน X แกน Y และแกน Z จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลนที่จุด  $i$ , และ  $n$  คือจำนวนจุดควบคุมหรือจุดตรวจสอบที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

### 3. ผลการทดลอง

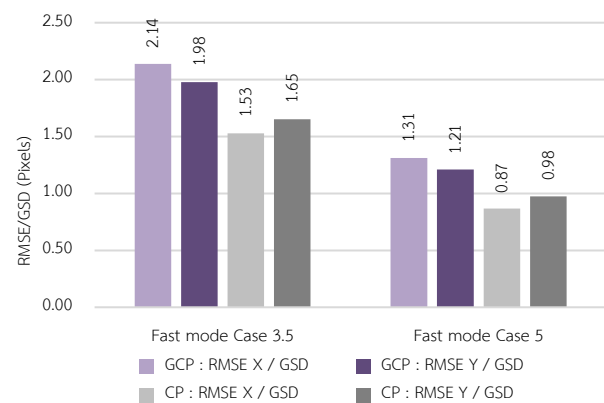
ผลจากการประมวลด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan ทำให้ได้แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศในรูปแบบของภาพถ่ายจริงและแบบจำลองเชิงเลขจากจุดประสงค์ของการศึกษา เพื่อต้องการประเมินความถูกต้องที่เกิดจากลักษณะการบินถ่ายภาพที่ต่างกัน โดยผลการศึกษาแบ่งออกเป็นรูปแบบการบินแบบ Fast Mode และ Safe Mode

ผลการศึกษาแสดงถึงความถูกต้อง (RMSE/GSD) ในหน่วยจุดภาพ (Pixel) ของจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบที่เกิดจากลักษณะการบินถ่ายภาพที่ต่างกันทั้ง 2 แบบ ซึ่งแสดงความถูกต้องออกมาในหน่วยของจุดภาพ ที่บ่งบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (RMSE/GSD) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานการเปรียบเทียบของ ASPRS (2014) โดยนำเสนอในแนวราบ (X และ Y) แนวตั้ง (Z) และความถูกต้องรวม (Total) ของตำแหน่ง GCP และ CP



รูปที่ 6 ความถูกต้องในแนวราบของกรณี Safe mode ที่ 3.5 และ 5

จากรูปที่ 6 ความถูกต้องในแนวราบของจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบ (CP) ที่เกิดจากลักษณะการบินแบบ Safe mode case 3.5 และ case 5 พบว่า ค่าความถูกต้องของ GCP และ CP ทั้ง แกน X และ Y ของ case 5 มีความถูกต้องมากกว่า case 3.5 โดยลักษณะการบินที่ให้ความถูกต้องยอมรับได้ คือ การบินแบบ Safe Mode case 5 ซึ่งมีความถูกต้องของ GCP ในพิกัดแกน X และแกน Y เท่ากับ 0.68 จุดภาพ และ 0.38 จุดภาพ ตามลำดับ และความถูกต้องของ CP ในพิกัดแกน X และ Y เท่ากับ 0.41 จุดภาพ และ 0.41 จุดภาพ ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความถูกต้องในแนวราบของกรณี Fast mode ที่ 3.5 และ 5

จากรูปที่ 7 ความถูกต้องในแนวราบของจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบ (CP) ที่เกิดจากลักษณะการบินแบบ Fast mode case 3.5 และ case 5 พบว่า ค่าความถูกต้องของ GCP และ CP ทั้ง แกน X และ Y ของ case 5 มีความถูกต้องมากกว่า case 3.5 โดยลักษณะการบินที่ให้ความถูกต้องยอมรับได้ คือ การบินแบบ Safe Mode case 5 ซึ่งมีความถูกต้องของ GCP ในพิกัดแกน X และแกน Y เท่ากับ 1.31 จุดภาพ และ 1.21 จุดภาพ ตามลำดับ และความถูกต้องของ CP ในพิกัดแกน X และ Y เท่ากับ 0.87 จุดภาพ และ 0.98 จุดภาพ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความถูกต้องที่เกิดจากลักษณะการบินแบบ Safe mode และ Fast mode พบว่าการบินแบบ Safe mode จะให้ความถูกต้องทางแนวราบดีกว่าการบินแบบ Fast mode และการบินที่ case 5 กล่าวคือมีความสูงบินที่แสดงด้วยค่า Ground Sampling Distance (GSD) เท่ากับ

5.64 ซม./จุดภาพ จะให้ความถูกต้องสูงกว่า case 3.5 ที่ความสูงแสดงด้วยค่า GSD เท่ากับ 3.94 ซม./จุดภาพ

มาตรฐานคุณภาพแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศแบบภาพออร์โธเชิงเลข (Digital Orthophoto) ASPRS 2014 ที่ระบุระดับชั้นของความถูกต้องโดยเปรียบเทียบค่าความถูกต้องในหน่วยจุดภาพ (Pixel) ในแนวราบ (RMSE<sub>x</sub>) และ (RMSE<sub>y</sub>) โดยความถูกต้องในแนวราบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จุดภาพ จัดเป็นคุณภาพประเภทงานที่มีความถูกต้องสูงสุด (Highest accuracy work) ความถูกต้องในแนวราบมากกว่า 1 จุดภาพแต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 จุดภาพจัดเป็นคุณภาพประเภทงานทั่วไปและงาน GIS (Standard Mapping and GIS work) และความถูกต้องมากกว่า 2 จุดภาพขึ้นไปจัดเป็นงานคุณภาพต่ำ (Lowest accuracy) เมื่อนำผลการศึกษาดังแสดงในรูป 6 และ 7 ในหน่วยจุดภาพมาทำการแบ่งระดับชั้นความถูกต้องของ CP แล้วพบว่า มีระดับชั้นที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2

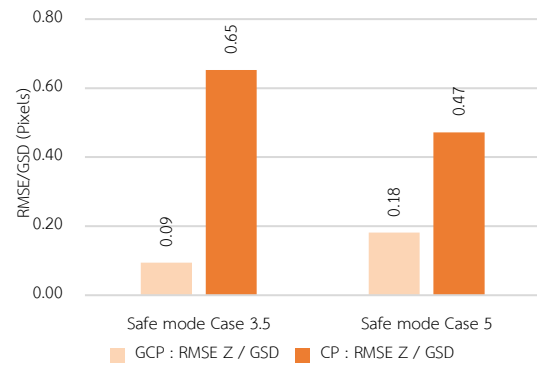
ตารางที่ 2 การจำแนกคุณภาพระดับชั้นความถูกต้องของลักษณะการบิน

Cases	Horizontal Accuracy (RMSE/GSD) (pixels)	Recommended use		
		Highest Accuracy work (≤ 1-pixel)	Standard Mapping and GIS work (2-pixels)	Visualization and less accurate work (≥ 3-pixels)
Fase Mode Case 3.5	X Position		√	
	Y Position		√	
Safe Mode Case 3.5	X Position	√		
	Y Position	√		
Fast Mode Case 5	X Position	√		
	Y Position	√		
Safe Mode Case 5	X Position	√		
	Y Position	√		

เมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของจุดตรวจสอบตามมาตรฐาน ASPRS (2014) พบว่า ลักษณะการบินแบบ Safe mode case 3.5, Safe mode Case 5 และ Fast mode Case 5 มีค่าความถูกต้องของ CP ของทั้งแกน X และ แกน Y น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จุดภาพ จัดเป็นคุณภาพประเภทงานที่มีความถูกต้องสูงสุด (Highest accuracy work) และลักษณะการบินแบบ Fast mode case 3.5 มีค่าความถูกต้องของ CP ทั้งแกน X และแกน Y มีค่ามากกว่า 1 แต่มenosกว่าหรือเท่ากับ 2 จุดภาพ จัดเป็นคุณภาพประเภทงานทั่วไปและงาน GIS (Standard Mapping and GIS work)

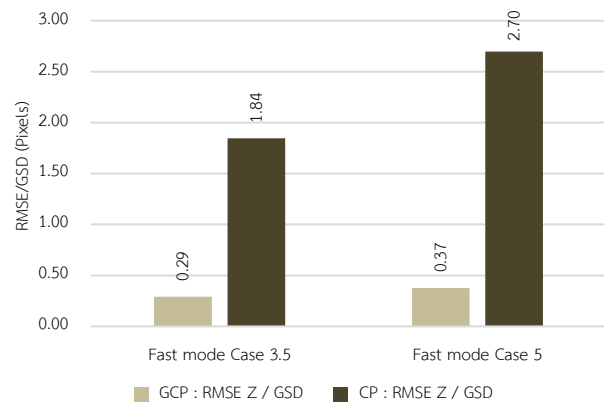
ความถูกต้องในแนวดิ่งซึ่งพิจารณาจากแกน Z เป็นค่าที่แสดงคุณภาพของการผลิตภาพถ่ายจริง (Orthophoto) โดยสามารถนำไปใช้สำหรับเป็นข้อมูลการทำแบบจำลองข้อมูลจุดความสูงเชิงพื้นผิว (Digital Surface

Model, DSM) และแบบจำลองสามมิติ (3D model) ความถูกต้องในแนวดิ่งสำหรับการศึกษานี้แสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 8 ความถูกต้องในแนวดิ่งของกรณี Safe mode ที่ 3.5 และ 5

จากรูปที่ 8 ความถูกต้องในแนวดิ่งของ GCP และ CP ที่เกิดจากลักษณะการบินถ่ายภาพแบบ Safe Mode case 3.5 และ case 5 พบว่า case 3.5 ให้ความถูกต้องของ GCP ดีกว่า case 5 แต่ case 5 ให้ความถูกต้องของ CP ดีกว่า case 3.5



รูปที่ 9 ความถูกต้องในแนวดิ่งของกรณี Fast mode ที่ 3.5 และ 5

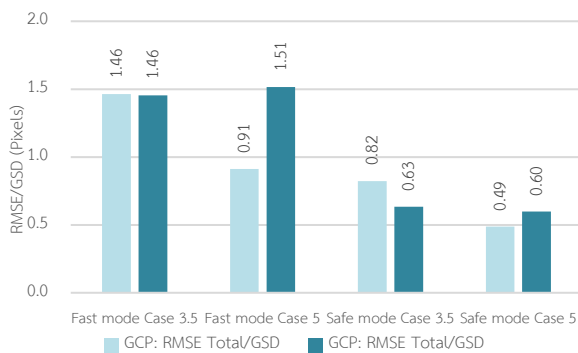
จากรูปที่ 9 ความถูกต้องในแนวดิ่งของ GCP และ CP ที่เกิดจากลักษณะการบินถ่ายภาพแบบ Fast mode case 3.5 และ case 5 พบว่า ทั้ง case 3.5 ให้ความถูกต้องของ GCP และ CP ดีกว่า case 5

ในส่วนของความถูกต้องในแนวดิ่งจะแบ่งจากระดับความถูกต้องที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง (Vertical accuracy class) (ASPRS,2014) โดยเปรียบเทียบค่า RMSE<sub>Z</sub> ที่ได้ สำหรับการศึกษานี้ความถูกต้อง (ซม./จุดภาพ) จะถูกคูณด้วยค่า GSD ของกรณีนั้น ๆ เพื่อให้ได้หน่วย RMSE<sub>Z</sub> แล้วนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานในแกน Z โดยการเปรียบเทียบจะจัดอยู่ในรูปแบบ in Non Vegetated Terrain ซึ่งผลการเปรียบเทียบมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การจำแนกความถูกต้องของภาพถ่ายตั้งจริง (Orthophoto)

Cases	RMSE <sub>Z</sub> of CP	Vertical Accuracy Class of CP
Fast Mode Case 3.5	7.27	10-cm
Safe Mode Case 3.5	2.50	2.5-cm
Fast Mode Case 5	15.21	20-cm
Safe Mode Case 5	2.73	5-cm.

ตารางที่ 3 แสดงการจำแนกความถูกต้องของภาพถ่ายตั้งจริง (Orthophoto) ของ CP โดยการเปรียบเทียบจากค่า RMSE<sub>Z</sub> จากตารางพบว่า ผลของ CP ที่มีระดับความถูกต้องที่ดีที่สุดคือ 2.5-cm vertical accuracy class คือรูปแบบ Safe mode case 3.5 ระดับความถูกต้องรองลงมาคือ 5-cm vertical accuracy class คือรูปแบบ 5-cm vertical accuracy class เมื่อพิจารณาความถูกต้องพบว่า รูปแบบการบินที่ให้ผลที่ดีที่สุด GCP และ CP คือรูปแบบการบินแบบ Safe mode case 5



รูปที่ 10 ความถูกต้องรวมของ GCP และ CP แต่ละลักษณะการบิน

รูปที่ 10 แสดงความถูกต้องรวม (Total accuracy) ของ GCP และ CP ของลักษณะการบินแบบ fast mode และ safe mode ของทั้ง 2 กรณีพบว่า ลักษณะการบินแบบ Safe mode ให้ความถูกต้องที่ดีกว่าการบินแบบ Fast mode และกรณี 5 จะให้ผลดีกว่ากรณี 3.5 ของลักษณะการบินแบบ Safe mode คือความถูกต้องของ GCP เท่ากับ 0.49 จุดภาพ และความถูกต้องของ CP เท่ากับ 0.60 จุดภาพ ตามลำดับ

การวิเคราะห์ผลความถูกต้องในภาพรวม ทำให้เห็นว่ารูปแบบการบินที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพมีความเหมาะสมบนพื้นฐานของความถูกต้องของตำแหน่งทางภูมิศาสตร์เพื่อผลิตภาพถ่ายออร์โธเรซิเจนซ์และภาพถ่ายตั้งจริงอันจะเป็นข้อมูลสำคัญในการสร้างแผนที่ความสูงเชิงพื้นผิว (Digital Surface Model, DSM) และแบบจำลองสามมิติ (3D model)

#### 4. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการบินถ่ายภาพในเชิงของความสูงพบว่า การบินถ่ายภาพที่ความสูงบินมากขึ้น จะทำให้ความถูกต้องมีแนวโน้มที่ดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยโดย Sharan Kumar และคณะ ในปี 2018 [3] ซึ่งทำการบินถ่ายภาพที่ระดับความสูงที่มีความละเอียดจุดภาพเป็น 2.6, 3.2,

3.7, 4.2, และ 5.3 ซม./จุดภาพ ด้วยจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบจำนวน 4 และ 12 จุดตามลำดับ บนพื้นที่สนามหญ้าภายในมหาวิทยาลัย Sains Malaysia ซึ่งเป็นพื้นที่ลาดชันพบว่าเมื่อทำการบินถ่ายภาพที่มีค่าความละเอียดจุดภาพมากขึ้น ทำให้ค่าความถูกต้องมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มดีขึ้น ซึ่งค่าความละเอียดจุดภาพที่ 5.3 ซม./จุดภาพให้ค่าความถูกต้องได้ดีที่สุดในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการบินถ่ายภาพบนพื้นที่บ่อฝังกบขยะมูลฝอย ซึ่งมีความลาดชันมากกว่าและไม่คงที่อันเกิดจากปริมาณขยะมูลฝอยเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เมื่อบินถ่ายภาพที่ระดับความสูงที่มีค่าความละเอียดจุดภาพ 5 ซม./จุดภาพ พบว่าค่าความถูกต้องที่ได้สามารถนำไปผลิตแผนที่ภาพถ่ายตั้งจริงที่มีความละเอียดสูงได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบินถ่ายภาพในพื้นที่ที่มีความแตกต่างของระดับมากนั้นควรบินถ่ายภาพด้วยความสูงบินที่มาก จากสมการที่ (6) และ (7) [4]

$$b = d_w \left( \frac{p}{100} \right) \quad (6)$$

$$a = d_l \left( \frac{q}{100} \right) \quad (7)$$

เมื่อ  $b$  คือระยะบนพื้นดินของส่วนที่ไม่ซ้อนทับด้านหน้า (เซนติเมตร),  $a$  คือระยะบนพื้นดินของส่วนที่ไม่ซ้อนทับด้านข้าง (เซนติเมตร),  $d_w$  คือระยะของภาพถ่ายด้านกว้างบนพื้นที่จริง (เซนติเมตร),  $d_l$  คือระยะของภาพถ่ายด้านยาวบนพื้นที่จริง (เซนติเมตร),  $p$  คือเปอร์เซ็นต์ซ้อนทับด้านหน้า และ  $q$  คือเปอร์เซ็นต์ซ้อนทับด้านข้าง

จากตารางที่ 4 เป็นผลจากการคำนวณตามสมการ (6) และ (7) จะเห็นว่าความสูงบินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ภาพถ่ายหนึ่งภาพครอบคลุมพื้นที่ได้ขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อภาพถ่ายเกิดการซ้อนทับกันจะทำให้พื้นที่ส่วนซ้อนทับมีพื้นที่มากขึ้นทำให้จุดภาพบนภาพถ่ายมีตำแหน่งและจุดเด่นที่เหมือนกันมากขึ้นส่งผลให้ค่าความถูกต้องมีแนวโน้มดีขึ้น ดังนั้นในการบินถ่ายภาพทางอากาศจึงควรกำหนดค่าการซ้อนทับและความสูงบินที่ทำให้มีพื้นที่ส่วนซ้อนทับที่เหมาะสมจึงจะทำให้ค่าความถูกต้องดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการบินถ่ายภาพเหนือพื้นที่บ่อฝังกบขยะมูลฝอยควรบินถ่ายภาพด้วยความสูงที่มีความละเอียดจุดภาพเป็น 5 ซม./จุดภาพจึงจะทำให้ได้ค่าความถูกต้องที่ดีที่สุด

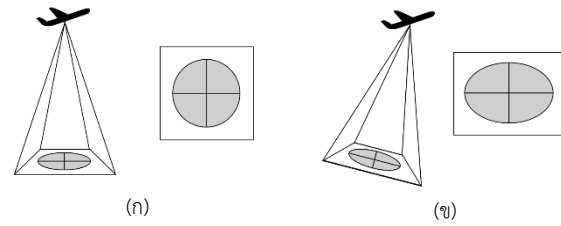
ตารางที่ 4 ส่วนซ้อนทับบนพื้นที่จริง

Cases	GSD (cm.)	Front Overlap (%)	Side Overlap (%)	ส่วนซ้อนทับด้านหน้าบนพื้นที่จริง (ซม./ภาพ)	ส่วนซ้อนทับด้านข้างบนพื้นที่จริง (ซม./ภาพ)
Fast Mode	3.94	80	75	12608	8865
Safe Mode	3.97			12704	8932.5
Fast Mode	5.64			18048	12690
Safe Mode	5.78			18496	13005

จากการวิเคราะห์ผลในเชิงของรูปแบบการถ่ายภาพ จากการศึกษา งานวิจัยโดย Francisco-Javier และคณะ ในปี 2015 [5] ซึ่งทำการบิน ถ่ายภาพแบบหยุดนิ่งและเคลื่อนที่ด้วยความละเอียดจุดภาพ 3, 4 และ 5 ซม./จุดภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ MD4-1000 ติดตั้งด้วยกล้อง TetraCam mini-MCA6 ชนิดของกล้องถ่ายภาพแบบ Rolling Shutter ที่มีระยะโฟกัส 9.6 มิลลิเมตร ความคมชัด 1.3 megapixel (1280 x 1024 pixels) เซนเซอร์ CMOS และ readout time ของกล้องอยู่ที่ 0.5 ถึง 5 วินาที [6] พบว่าการบินถ่ายภาพแบบเคลื่อนที่ที่จะทำให้ Vector error distribution มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการถ่ายภาพแบบหยุดนิ่ง ส่งผลให้การบิน ถ่ายภาพแบบเคลื่อนที่ที่มีความละเอียด 4 ซม./จุดภาพให้ผลดีที่สุด ในขณะที่ งานวิจัยชิ้นนี้ทำการบินถ่ายภาพแบบหยุดนิ่งและเคลื่อนที่ที่มีความละเอียด จุดภาพเป็น 3.5 และ 5 ซม./จุดภาพใช้อากาศยานไร้คนขับ DJI Phantom 3 Professional ติดตั้งด้วยกล้อง FC300X ชนิดของกล้องถ่ายภาพแบบ Rolling Shutter ที่มีระยะโฟกัส 3.61 มิลลิเมตร ความคมชัดของภาพ 12 megapixel (4000 x 3000 pixels) เซนเซอร์ CMOS และ readout time ของกล้องอยู่ที่ 0.033 วินาที พบว่าการบินถ่ายภาพแบบหยุดนิ่งทำให้ Camera Location error มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการบินถ่ายภาพ แบบเคลื่อนที่ส่งผลให้การบินถ่ายภาพแบบหยุดนิ่งที่มีความละเอียด 5 ซม./จุดภาพได้ค่าความถูกต้องที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าระยะโฟกัส ความคมชัดของ ภาพ และ readout time ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการกำหนดรูปแบบการ บินถ่ายภาพ ดังนั้นกล้องถ่ายภาพนั้นมีระยะโฟกัสและ readout time ที่ น้อยและมีความคมชัดสูงควรกำหนดรูปแบบการถ่ายภาพแบบหยุดนิ่งจึงจะ ให้ค่าความถูกต้องได้ดี

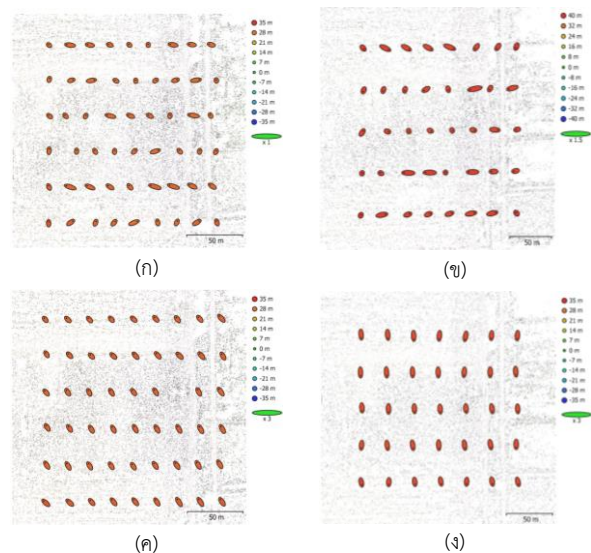
จากงานวิจัยโดย Jonas และ คณะ ในปี 2016 [6] ได้ทำการบิน ถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ DJI Inspire 1 ซึ่งเป็นกล้องถ่ายภาพแบบ Rolling Shutter ที่ความเร็วบิน 1, 4 และ 8 เมตรต่อวินาทีที่อากาศยานไร้ คนขับ DJI Inspire 1 ที่มี readout time เป็น 74 มิลลิวินาทีให้ค่าความ ถูกต้องได้ดีที่สุดเมื่อบินถ่ายภาพด้วยความเร็ว 4 เมตรต่อวินาที ในงานวิจัย ชิ้นนี้ได้ใช้อากาศยานไร้คนขับ DJI Phantom 3 Professional ซึ่งเป็น กล้องถ่ายภาพแบบ Rolling Shutter เช่นกันมี readout time เป็น 33 มิลลิวินาทีให้ค่าความถูกต้องได้ดีที่สุดเมื่อบินถ่ายภาพด้วยความเร็ว 2 เมตร ต่อวินาที จะเห็นได้ว่าค่า readout time ของกล้องถ่ายภาพมีผลต่อ ความเร็วที่ใช้ในการบินเมื่อกำลังถ่ายภาพมีค่า readout time ที่สูงจะทำให้ สามารถบินถ่ายภาพด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นได้ ในขณะที่กล้องที่มี readout time ต่ำไม่ควรบินถ่ายภาพด้วยความเร็วที่มาก ดังนั้นในการบิน ถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ DJI Phantom 3 Professional จึงควร ใช้ความเร็วบิน 2 เมตรต่อวินาทีจึงจะให้ค่าความถูกต้องได้ดีที่สุด

นอกจากนั้นการกำหนดรูปแบบการบินโดยแสดงดังรูปที่ 11 จะกำหนด จุดที่ลั่นชัตเตอร์ไว้บนแผนที่ เมื่อถึงจุดลั่นชัตเตอร์กล้องจะทำการลั่นชัต เตอร์เพื่อถ่ายภาพ การบินแบบหยุดนิ่งจะทำให้จุดที่ลั่นชัตเตอร์และ ตำแหน่งของภาพเป็นจุดเดียวกันในขณะที่การบินแบบเคลื่อนที่ที่จะทำให้ ตำแหน่งและภาพถ่ายมีความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 11 รูปแบบการถ่ายภาพ (ก) Safe Mode (ข) Fast Mode

ซึ่งรูปแบบการถ่ายภาพจะส่งผลต่อตำแหน่งของโดรนซึ่งก็คือตำแหน่ง ของกล้องขณะทำการบินถ่ายภาพส่งผลให้ตำแหน่งของกล้องมีความ คลาดเคลื่อนเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 Camera Location and Error Estimates. (ก) Fast Mode Case 3.5 (ข) Fast Mode Case 5 (ค) Safe Mode Case 3.5 (ง) Safe Mode Case 5

รูปที่ 12(ก) และ 14(ข) แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งของ กล้องนั้นมีการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในแต่ละตำแหน่ง ในขณะที่ รูป 12(ค) เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งของกล้องมีการเรียงตัวไปในทิศทาง เดียวกันแต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนทั้งแนวแกน x และแกน y และรูปที่ 12(ง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากเวกเตอร์จะเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน แล้ว ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังเกิดขึ้นในแนวแกน y และเกิดความ คลาดเคลื่อนในแนวแกน x เพียงเล็กน้อยจึงส่งผลให้ค่าความถูกต้องของ ตำแหน่งภาพมีความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการบิน ถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ DJI Phantom 3 Professional พบว่า การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศโดยกำหนดให้มีความเร็วบิน 2 เมตรต่อ วินาที เมื่อถึงจุดถ่ายภาพกำหนดให้อากาศยานไร้คนขับหยุดเคลื่อนที่แล้ว ทำการถ่ายภาพจะทำให้ได้ผลของความถูกต้องที่ดีที่สุด

## 5. สรุปผลการทดลอง

การผลิตแผนที่ภาพถ่ายดิจิทัลที่มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งด้วยอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่บ่อฝังกบขยะมูลฝอยยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทยเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอการใช้อากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูกเพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศให้ได้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ยอมรับได้ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความถูกต้องของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศชนิดภาพออร์โธเรซิเจนเลข (Digital orthophoto) กับมาตรฐาน ASPRS 2014 โดยลักษณะการบินถ่ายภาพที่อากาศยานไร้คนขับมีการหยุดนิ่งขณะถ่ายภาพและความเร็วบินเป็น 2 เมตร/วินาที ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุดที่ทำการถ่ายภาพ และมีความสูงบินที่ทำให้ความละเอียดจุดภาพเป็น 5 ซม./จุดภาพ จะทำให้ได้ความถูกต้องในแนวราบดีที่สุดซึ่งสามารถใช้งานที่มีความถูกต้องสูงสุดได้ ส่วนความถูกต้องในแนวตั้งที่ดีที่สุดสามารถใช้งานที่มีความถูกต้องในระดับ 5 ซม. ได้ ลักษณะการบินดังกล่าวทำให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองเชิงเลขมีความถูกต้องที่สุด ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของบ่อขยะ และปริมาณขยะเพื่อบริหารจัดการขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาในการสำรวจซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงที่จะสัมผัสกับมลพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายแก่นักสำรวจได้

เพื่อการศึกษาการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับทำแผนที่บ่อฝังกบขยะมูลฝอยให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งทางด้านการบริหารจัดการทรัพยากร วัสดุอุปกรณ์ งบประมาณและเวลา จึงควรมีการศึกษาแบบการกำหนดจุดและการกระจายตัวของควบคุมภาพบนพื้นที่ศึกษา รวมถึงการซ้อนทับภาพที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับที่มีความถูกต้องแม่นยำทางตำแหน่งสูงสุด

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ด้วยความอนุเคราะห์จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ สนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์และผู้ร่วมวิจัยที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ และให้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้ออำนวยอุปกรณ์ที่ใช้ในงานสำรวจ ขอขอบคุณเทศบาลตำบลคลองสามเอื้ออำนวยสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยเพื่อใช้ในการศึกษาและเก็บข้อมูล หากงานวิจัยชิ้นนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2562). แผนปฏิบัติการเพื่อจัดการสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ EEC. *การประชุมคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ครั้งที่ 2*, กรุงเทพฯ, 15 กุมภาพันธ์ 2562, หน้า 10-11.
- [2] กาญจน์ขจร ชูชีพ (2018). การประเมินความถูกต้องในการสำรวจระยะไกล. *Remote Sensing Technical Note*, ฉบับที่ 3, หน้า 8.

- [3] Sharan Kumar N. et al. (2018). Accuracy assessment on low altitude UAV-borne photogrammetry outputs influenced by ground control point at different altitude. Sains Malaysia University, Malaysia.
- [4] Juan Antonio Perez Alvarez (2001). *Apuntes De Fotogrametria III*. Universidad De Extremadura, pp. 17-18.
- [5] Francisco Javier et al. (2015). Assessing Optimal Flight Parameters for Generating Accurate Multispectral Orthomosaics by UAV to Support Site-Specific Crop Management. University of Cordoba, Spain.
- [6] Tetracam Inc. (2017). Tetracam's Miniature Multiple Camera Array. [Online], Available: <http://www.tetracam.com/>. (2020, 30 April)
- [7] Jonas Vautherin et al. (2016). Photogrammetric Accuracy and Modeling of Rolling Shutter Cameras. ISPRS Congress, Czech.