การคำนวณการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรสำหรับหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยโดยใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

Volumetric Change Calculation for a Solid Waste Landfill Using UAV Photogrammetry

จุฬาวัลย์ นนตะพันธ์[1] อนุจิตร ภูมิพันธ์[2] และ ศิวา แก้วปลั่ง[3,*]

[1,3] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จ.มหาสารคาม
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: siwa.k@msu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางการคำนวณการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย จากการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ กรณีศึกษาบ่อขยะมูลฝอยเทศบาลเมืองมหาสารคาม โดยมีขั้นตอนการการศึกษาประกอบด้วย การวางแผนการบิน การเตรียมความพร้อมก่อนบินเก็บข้อมูล การบินถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ การประมวลผลภาพและการวิเคราะห์ข้อมูล การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่วิธีการคำนวณปริมาตรโดยใช้แบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลขจากการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ โดยทำบินถ่ายภาพเก็บข้อมูลหลายช่วงเวลา รวมระยะเวลา 6 เดือน เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ผลการวิเคราะห์พบว่ามีความแตกต่างของปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการสำรวจบ่อฝังกลบ โดยใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนสามารถช่วยสำหรับการวางแผนที่ดีขึ้นในการจัดการบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยได้

คำสำคัญ: การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ, บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย, แบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข

Abstract

The objective of this research was aimed to consider the calculation of volumetric changes calculation for a solid waste landfill using UAV photogrammetry. The case study was located at the waste landfill of Mahasarakham municipality. The process throughout this study is flight planning and arrangement before the flight, data collection using UAV, image processing, and analyzing data. This study focused on the method to calculate the volume using DEM from UAV photogrammetry. This observation took 6 months at intervals to monitor the changes in volume at the landfill site. The results of the analysis showed that there were differences of increasing in the volume of waste each time. The result has shown that the landfill volume surveys from UAV photogrammetry can help for a better plan in managing the landfill.

Keywords: UAV Photogrammetry, Municipal Landfill, DEM

1. บทนำ

ปริมาณขยะมูลฝอยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร ทั้งขยะมูลฝอยที่เกิดจากมนุษย์และจากธรรมชาติ ซึ่งปัญหาจากขยะมูลฝอยนับวันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากสภาพเศรษฐกิจและสังคมที่เปลี่ยนแปลงไป การขยายตัวของประชากรและการอยู่อาศัยในเขตเมืองซึ่งเป็นรูปแบบการดำเนินชีวิตที่ก่อให้เกิดปริมาณขยะมูลฝอยมากกว่าการอาศัยอยู่ในชนบท ส่งผลให้ปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอัตราที่เพิ่มขึ้น ทำให้ที่ทิ้งขยะมูลฝอยหรือบ่อขยะมูลฝอยต้องการพื้นที่มากขึ้นหรือต้องการพื้นที่ทิ้งขยะมูลฝอยใหม่

เทศบาลเมืองมหาสารคามสามารถเก็บขนย้ายไปทำการกำจัดได้ 75.65 ตันต่อวัน ไปกำจัดที่บ่อกำจัดขยะมูลฝอยตำบลแวงน่าง โดยวิธีกำจัดขยะมูลฝอยแบบการฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล ซึ่งมีพื้นที่ในการกำจัดขยะ เนื้อที่ 49 ไร่ เป็นศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยระดับกลาง เพื่อรองรับปริมาณขยะ 151.5 ตันต่อวัน จาก 6 เทศบาล ได้แก่ เทศบาลตำบลขามเรียง เทศบาลตำบลแวงน่าง เทศบาลตำบลแกดำ และเทศบาลตำบลท่าขอนยาง และ องค์การบริหารส่วนตำบลอีก 28 แห่ง ในพื้นที่ 3 อำเภอได้แก่ อำเภอเมืองมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย และอำเภอแกดำ

เพื่อรองรับขยะมูลฝอยที่เพิ่มขึ้นมากในทุกๆวัน และการบริหารจัดการบ่อขยะมูลฝอยเหล่านี้จำเป็นต้องมีการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณขยะมูลฝอยอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา จากปัญหาเหล่านี้พบว่าหากเราต้องทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณขยะมูลฝอยในพื้นที่ขนาดใหญ่ และบ่อยครั้งจะประสบปัญหาในเรื่องเวลา แรงงาน และงบประมาณของการสำรวจ รวมไปถึงปัญหาด้านสุขภาพของผู้ทำการสำรวจ หากต้องทำการสำรวจด้วยวิธีการใช้กล้องสำรวจแบบดั้งเดิมเพื่อให้ได้ปริมาณขยะมูลฝอย

หลายรายงานการศึกษา [1-4] ระบุว่า เทคโนโลยีการสำรวจด้วย UAV Photogrammetry สามารถใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของบ่อขยะมูลฝอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการศึกษาของ [1] ทำการตรวจวัดปริมาณขยะมูลฝอยโดยใช้ UAV Photogrammetry โดยมีค่าความละเอียดจุดภาพ 2.8 cm ความละเอียดทางดิ่งของ DEM 0.5 m. โดย DEM ที่ได้จาก UAV ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าระดับความสูงที่ได้จากการวัดกล้องสำรวจและ LIDAR ผลการศึกษาพบว่า DEM จาก UAV ให้ความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดกล้องสำรวจและ LIDAR ไม่เกิน 5% ซึ่งถือว่าเป็นข้อผิดพลาดที่ยอมรับได้ ในขณะที่ [2] ทำการวิจัยเพื่อศึกษาการคำนวณการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรสำหรับบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยโดยการใช้ UAV Photogrammetry และทำนายปริมาณขยะมูลฝอยในอนาคต โดยทำการทดสอบการติดตามปริมาณขยะมูลฝอยในช่วง 2 เดือน โดยผลการศึกษาพบว่าสามารถคำนวนปริมาณขยะมูลฝอยและติดตามปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มขึ้นได้ รายงานการศึกษาของ [3] ทำการศึกษา การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรในหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ ทำการบินถ่ายภาพทางอากาศ 5 เที่ยวบิน ในช่วงระยะเวลาประมาณ 2 ปี แล้วทำการคำนวณปริมาตร จากผลการศึกษาพบว่าการคำนวณปริมาตรโดยใช้การสำรวจจาก UAV มีศักยภาพสูงสำหรับใช้ในการสำรวจหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย ให้ผลลัพธ์ในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสโดยตรงกับขยะมูลฝอย ทำให้ UAV เหมาะที่จะใช้ในการวางแผนและการศึกษาการตัดสินใจ การศึกษาของ [4] ทำการทดสอบรูปแบบการซ้อนทับของภาพ UAV เพื่อประเมินความถูกต้องของการทำแผนที่จาก UAV โดยมีค่า GSD เท่ากับ 5 ซม. ทดสอบรูปแบบการซ้อนทับด้านหน้าในช่วง 80% ถึง 90% และ การซ้อนทับด้านข้าง 75% ถึง 90% ทำการประเมินความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งด้วยค่า RMSE ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน จำนวน 10 จุด และจุดตรวจสอบ 26-28 จุด เปรียบเทียบการประมวลผลตามมาตรฐาน American Society for Photogrammetry และ Remote Sensing พบว่ารูปแบบที่ได้ค่า RMSE ต่ำที่สุด คือ การซ้อนกันด้านหน้า 80% และการซ้อนกันด้านข้าง 75% และรายงานการศึกษาของ [5] พบว่า UAV Photogrammetry เป็นเทคโนโลยีที่สามารถดึงข้อมูลเชิงปริมาณจากพื้นผิวดินในวิธีที่รวดเร็ว แม่นยำ และปลอดภัย ในรูปแบบ Digital Elevation Models (DEMs) และ orthomosaics ที่มีความละเอียดสูง โดยจุดมุ่งหมายของการศึกษาคือเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและช่วงการใช้งานของ UAV Photogrammetry สำหรับการรังวัดเชิงเรขาคณิตและการคำนวนปริมาตร เมื่อเทียบกับขั้นตอนการสำรวจทั่วไป โดยทำการบิน UAV ถ่ายภาพ เป็นรายเดือนเป็นเวลามากกว่าหนึ่งปี สำหรับการวิเคราะห์ความแม่นยำ ผลการทดสอบพบว่าค่า RMSE ทางราบสูงสุด คือ 7.1 cm. และ สำหรับค่าระดับ คือ 0.37 cm. โดยการวัดปริมาตรทำการทดสอบโดยใช้การกำหนดค่า Ground Control Point (GCPs) ที่กระจายครั้งแรกที่ขอบหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย พบว่ามีความแตกต่างเฉลี่ย 9% เมื่อคำนวณเทียบกับภูมิประเทศทั่วไป และกรณีที่ GCPs ถูกวางไว้ภายในพื้นที่การดำเนินการฝังกลบ พบว่ามีความแตกต่างเฉลี่ย 4% จากภูมิประเทศทั่วไป

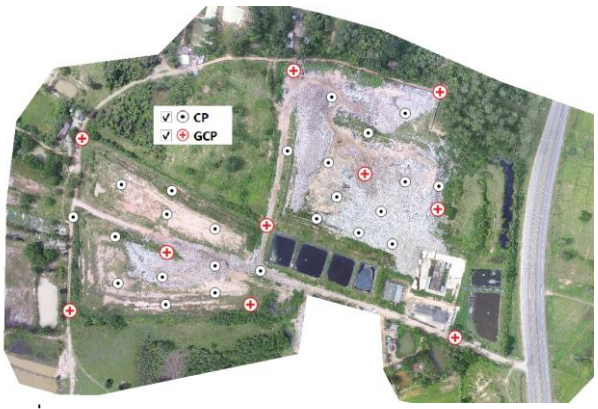
จากหลายรายงานการวิจัยที่กล่าวมาแล้วพบว่าเราสามารถใช้ UAV Photogrammetry ในการติดตามปริมาตรขยะมูลฝอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความถูกต้องของการคำนวณขนาดพื้นที่จะขึ้นกับขนาด GSD และความถูกต้องของการคำนวณค่าระดับจะขึ้นกับความละเอียดของ DEM ซึ่งรายงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วพบว่ายังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับความถูกต้องของการคำนวนปริมาตรขยะมูลฝอยเมื่อความละเอียดทางราบของ DEM แตกต่างกัน ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการทดสอบโดยใช้ UAV Photogrammetry ในการติดตามปริมาตรขยะมูลฝอยของบ่อขยะเทศบาลเมืองมหาสารคาม ทำการบินถ่ายภาพ 3 ครั้งห่างกันครั้งละ 2 เดือน โดยกำหนดจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบภาพตามมาตรฐาน ASPRS2014 ทำการคำนวนค่า RMSE ทางดิ่งของจุดตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบความละเอียดของ DEM ที่แตกต่างกันเพื่อให้สามารถเลือกใช้ความละเอียดในการประมวลผลภาพ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ

1. การบินถ่ายภาพด้วย DJI Phantom 4 Pro พื้นที่ศึกษาใช้บริเวณบ่อขยะมูลฝอยเทศบาลเมืองมหาสารคาม ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 60 ไร่ โดยการทำการวางแผนการบินด้วย Application PIX4D บนระบบปฏิบัติการ Android กำหนดความสูงของการบิน เท่ากับ 90 เมตร ระยะ Over lab ของภาพ 80% ใช้กล้องที่ติดมากับ UAV ความละเอียด 20 ล้านพิกเซล โดยทำการบินถ่ายภาพ 3 ครั้ง วันที่ 12 มกราคม 2563 วันที่ 9 เมษายน 2563 และวันที่ 12 กรกฎาคม 2563 โดย

2. การรังวัดจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบภาพ (CP) การศึกษานี้ใช้จุดควบคุมภาพ (GCP) จำนวน 10 จุด และจุดตรวจสอบภาพ (CP) 24 จุด ทำการรังวัดด้วยวิธี Fast Static โดยค่าระดับคำนวนโดยใช้แบบจำลอง TGM2017



รูปที่ 1 ตำแหน่งการกระจายจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบภาพ (CP)

3. การประมวลผลภาพ โดยทำการประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV โดยใช้ WebODM ประมวลผลภาพ สร้าง Ortho Photo ขนาด GSD 5 cm. และ DSM ที่มีความละเอียดทางราบ 50 cm และ ทำการ Resampling ให้ DEM มีความละเอียด 1, 2, 3, 4, 5, 10 และ 20 m.

4. การตรวจสอบความถูกต้องจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายจาก UAV หลังจากประมวลผลปรับแก้ภาพด้วยจุดควบคุมภาพ (GCP) จำนวน 10 จุด และทำการตรวจสอบความถูกต้องของภาพถ่ายจาก UAV ด้วยจุดตรวจสอบภาพ (CP) จำนวน 24 จุด โดยใช้ค่า RMSE จากสมการของ Martínez-Carricondo et al. (2018) ดังแสดงในสมการที่ 1-5

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

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

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

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

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

เมื่อ n คือ จำนวนจุด CP

Xoi, Yoi คือ ค่าพิกัดจุดตรวจสอบรูปที่รังวัดจากภาพ UAV ที่ได้จากการประมวลผลปรับแก้แล้ว

Xgnssi, Ygnssi คือ ค่าพิกัดจุดตรวจสอบรูปที่รังวัดจาก Fast Static GNSS

Zoi คือ ค่าระดับจุดตรวจสอบรูปที่รังวัดจากภาพ UAV ที่ได้จากการประมวลผลปรับแก้แล้ว

Zgnssi คือ ค่าระดับของจุดตรวจสอบรูปที่รังวัดจาก Fast Static GNSS โดยใช้แบบจำลอง TGM2017

3. สรุปผลการศึกษา

3.1 ผลการคำนวณค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่ง

จากการประมวลผลภาพได้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่มี GSD เท่ากับ 5 cm และทำการคำนวณค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนทางราบ (RMSEx, RMSEy และ RMSEH) ของจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบภาพ (CP) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

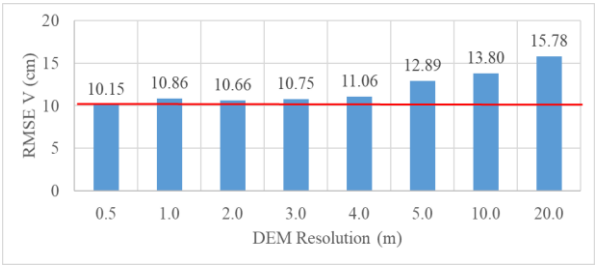
ตารางที่ 1 ค่า $RMSE_x$, $RMSE_y$ และ $RMSE_H$ ของจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบภาพ (CP)

GSD (5 cm)	$RMSE_x$ (cm)	$RMSE_y$ (cm)	$RMSE_H$ (cm)
GCPs (10)	6.25	6.56	9.06
CPs (24)	7.84	7.38	10.77

จากการประมวลผลภาพได้ความละเอียดของ DEM ที่มีความละเอียดทางราบ 50 cm ทำการ Resampling ให้ DEM มีความละเอียดทางราบ 1, 2, 3, 4, 5, 10 และ 20 m. และทำการคำนวณค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง (RMSEV) ของจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบภาพ (CP) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า **RMSE**$_V$ ของจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบภาพ (CP) แต่ละขนาดความละเอียดทางราบของ DEM

	$RMSE_V$ (cm)							
DEM (m)	0.5	1	2	3	4	5	10	20
GCPs (10)	6.3	6.4	6.3	7.2	6.5	7.4	7.9	8.4
CPs (24)	10.2	10.9	10.7	10.4	11.1	12.9	13.8	15.8



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $RMSE_V$ กับ DEM Resolution ของจุดตรวจสอบภาพ (CP)

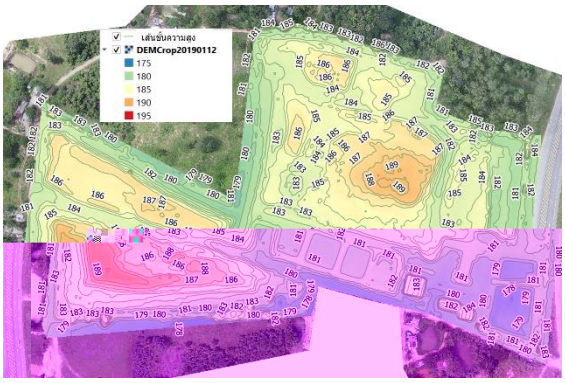
จากผลการศึกษาพบว่าขนาดความละเอียดของ DEM ที่ 0.5, 1, 2, 3, 4 m. ค่า RMSEV มีค่าคามแตกต่างกันไม่เกิน 10% ในขณะที่ ความละเอียดของ DEM 5, 10, 20 m. มี ความแตกต่างของค่า $RMSE_V$ มากกว่า 30% ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $RMSE_V$ แต่ละความละเอียด DEM

	RMSEV (cm)							
DEM (m)	0.5	1	2	3	4	5	10	20
CPs (24)	10.2	10.9	10.7	10.4	11.1	12.9	13.8	15.8
% Diff	0	7	5	6	9	27	36	55

3.2 ผลการคำนวณปริมาตรบ่อขยะมูลฝอย

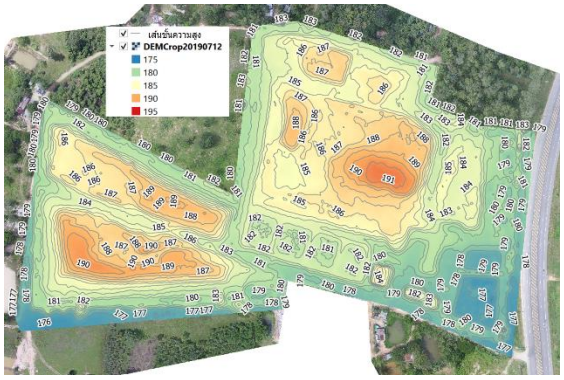
จาก DEM มีความละเอียดทางราบ 50 cm นำมาเขียนเป็นเส้นชั้นความสูงของพื้นผิวขยะมูลฝอยในบ่อ ของวันที่ 12 มกราคม 2563 วันที่ 9 เมษายน 2563 และวันที่ 12 กรกฎาคม 2563 สำหรับเป็นข้อมูลในการคำนวนปริมาตรบ่อขยะมูลฝอยและติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณขยะมูลฝอยของแต่ละช่วงเวลา (ดังแสดงในรูปที่ 3-5) และคำนวนปริมาตรขยะมูลฝอยด้วยวิธี prismoidal โดยเทียบจากแบบก่อสร้างของบ่อขยะมูลฝอยเพื่อจะได้ทราบปริมาตรของขยะมูลฝอยในบ่อในแต่ละช่วงเวลา โดยผลการคำนวนปริมาตรของขยะมูลฝอยแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 3 เส้นชั้นความสูงของบ่อขยะมูลฝอยวันที่ วันที่ 12 มกราคม 2563



รูปที่ 4 เส้นชั้นความสูงของบ่อขยะมูลฝอยวันที่ วันที่ 9 เมษายน 2563



รูปที่ 5 เส้นชั้นความสูงของบ่อขยะมูลฝอยวันที่ วันที่ 12 กรกฎาคม 2563

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณปริมาตรขยะมูลฝอยคำนวนจากภาพ UAV โดยใช้ DEM มีความละเอียดทางราบ 50 cm

วันที่	ปริมาตรขยะมูลฝอย (m^3)
12-ม.ค.-63	1,301,779
9-เม.ย.-63	1,329,653
12-ก.ค.-63	1,371,333

4. อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการประมวลผลภาพได้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่มี GSD เท่ากับ 2.5 cm และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนทางราบ (RMSEx, RMSEy และ RMSEH) ของจุดควบคุมภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบภาพ (CP) ของการศึกษานี้ได้ผลการทดสอบได้สอดคล้องกับหลายรายงานการศึกษา [1,6-7] ที่ระบุว่าค่าความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งจะมีค่าประมาณ 2-5 เท่าของค่า GSD

ผลการศึกษาการทดสอบความละเอียดทางราบของ DEM ที่แตกต่างกันพบว่า DEM ที่มีความละเอียดทางราบ 0.5, 1, 2, 3, 4 m. ค่า RMSEV มีค่าคามแตกต่างกันไม่เกิน 10% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งจะมีค่าประมาณ 2-5 เท่าของค่า GSD สอดคล้องกับหลายรายงานการศึกษา [1-7] หากปรับความละเอียดของ DEM ที่ 5, 10, 20 m. ค่า RMSEV มีค่าคามแตกต่างกัน 27, 36, 55 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งจะมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่า GSD ดังนั้นจากผลการศึกษาพบว่าไม่ควรใช้ ความละเอียดของ DEM มากกว่า 4 m. จะทำให้ผลการคำนวนปริมาตรเกิดความคลาดเคลื่อนมาก

5. บทสรุป

จากผลการศึกษาพบว่า ความละเอียดของ DEM ที่เหมาะสมในการนำมาคำนวนปริมาตรบ่อขยะมูลฝอยไม่ควรเกิน 4 m. โดยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ สามารถติดตามความแตกต่างของปริมาณขยะมูลฝอยและติดตามปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มขึ้นได้ในแต่ละครั้ง การคำนวณปริมาตรโดยใช้การสำรวจจากอากาศยานไร้คนขับมีศักยภาพสูง เหมาะสำหรับใช้ในการสำรวจบ่อขยะมูลฝอย ให้ผลลัพธ์ในช่วงเวลาสั้นๆ ไม่จำเป็นต้องสัมผัสโดยตรงกับขยะมูลฝอย เหมาะที่จะใช้ในการวางแผนและการศึกษาการตัดสินใจ

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอบทความครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Gasperini, D., Allemand, P., Delacourt, C., & Grandjean, P. (2014). Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 17(1), 1-13.

[2] Kaamin, M. (2019). Volumetric change calculation for a landfill stockpile using UAV photogrammetry. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(9), 053-062.

[3] Incekara, A. H., Delen, A., Seker, D. Z., & Goksel, C. (2019). Investigating the utility potential of low-cost unmanned aerial vehicles in the temporal monitoring of a landfill. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(1), 22.

[4] Bhatsada, A., Towprayoon, S., Garivait, S., Wangyao, K., Laphitchayangkul, T., Ishigaki, T., & Chiemchaisri, C. (2020). Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping of open dump based on variation of image overlaps. *KMUTT Res. Dev. J,* 2, 133-142.

[5] de Sousa Mello, C. C., Salim, D. H. C., & Simões, G. F. (2022). UAV-based landfill operation monitoring: A year of volume and topographic measurements. *Waste Management*, 137, 253-263.

[6] Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73, 539-543.

[7] Wiącek, P., & Pyka, K. (2019). The test field for UAV accuracy assessments. The International Archives of Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 67-73.