ANALISIS AKURASI VERTIKAL DIGITAL TERRAIN MODEL (DTM) HASIL UAV FOTOGRAMETRI DAN TERRESTRIAL LASER SCANNER PADA PIT TAMBANG TERBUKA

(Studi Kasus: PT. Pamapersada Nusantara Site Asmi, Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah)

Danang Oktaviano[1], M. Edwin Tjahjadi[2], Adkha Yulianandа M.[3]

[1]Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Nasional Malang
[2]Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Nasional Malang
[3]Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Nasional Malang

Penulis Korespondensi: Danang Oktaviano | **Email:** danangoktaviano2@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini membandingkan ketelitian vertikal Digital Terrain Model (DTM) dari data Unmanned Aerial Vehicle (UAV) fotogrametri dan Terrestrial Laser Scanner (TLS) menggunakan metode interpolasi Nearest Neighbor, Inverse Distance Weighting (IDW), dan Triangulated Irregular Network (TIN) di area tambang batubara PT. Pamapersada Nusantara site Asmi, Kalimantan Tengah. Validasi dilakukan terhadap 11 titik Independent Check Point (ICP) mengacu standar ASPRS (2024), sedangkan komparasi antar-DTM menggunakan 41 titik sampel (11 ICP dan 30 random points) serta empat lintasan penampang melintang. Hasil menunjukkan DTM UAV memiliki akurasi lebih baik terhadap ICP dengan RMSEz terendah 0,192 m (IDW, Kelas 33,3-cm), dibanding DTM TLS terbaik sebesar 0,302 m (TIN, Kelas 66,7-cm). Pada komparasi UAV–TLS, metode TIN menghasilkan keselarasan tertinggi (RMSEz 0,417 m), sedangkan IDW dan Nearest Neighbor menghasilkan deviasi lebih besar (0,585 m dan 0,607 m) terutama pada lereng curam. Uji penampang melintang memperkuat bahwa TIN paling mampu mempertahankan ketajaman geometri lereng, sementara IDW menghaluskan permukaan dan Nearest Neighbor menghasilkan profil berundak. Disimpulkan bahwa UAV fotogrametri layak digunakan sebagai alternatif pemetaan topografi tambang, dengan metode TIN direkomendasikan untuk analisis yang menuntut presisi geometri lereng.

Kata kunci: *Digital Terrain Model, UAV, Terrestrial Laser Scanner, akurasi vertikal, interpolasi spasial*

ABSTRACT

This study compares the vertical accuracy of Digital Terrain Models (DTM) derived from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and Terrestrial Laser Scanner (TLS) data using Nearest Neighbor, Inverse Distance Weighting (IDW), and Triangulated Irregular Network (TIN) interpolation methods at the coal mining area of PT. Pamapersada Nusantara site Asmi, Central Kalimantan. Validation was performed against 11 Independent Check Points (ICP) referring to the ASPRS (2024) standard, while inter-DTM comparison used 41 sample points (11 ICP and 30 random points) and four cross-section lines. Results show UAV-derived DTM achieved better accuracy against the ICP, with the lowest RMSEz of 0.192 m (IDW, Class 33.3-cm), compared to the best TLS DTM of 0.302 m (TIN, Class 66.7-cm). In the UAV TLS comparison, TIN produced the highest agreement (RMSEz 0.417 m), while IDW and Nearest Neighbor produced larger deviations (0.585 m and 0.607 m), particularly on steep slopes. Cross-section testing confirmed that TIN best preserved slope geometry sharpness, while IDW smoothed the surface and Nearest Neighbor produced a blocky profile. UAV photogrammetry is concluded to be a viable topographic mapping alternative for mining, with TIN recommended for analyses requiring precise slope geometry.

Keywords: *Digital Terrain Model, UAV, Terrestrial Laser Scanner, vertical accuracy, spatial interpolation*

1. PENDAHULUAN

Batubara merupakan salah satu bahan galian yang sangat penting sebagai bahan bakar alternatif seiring dengan semakin menipisnya cadangan minyak bumi (Triono, 2014). Kegiatan survei pada usaha pertambangan merupakan kegiatan pendukung yang sangat penting, baik pada tahap eksplorasi, operasional, maupun pascatambang (Mahfudz, 2012). Salah satu produk utama dari kegiatan survei tersebut adalah *Digital Terrain Model* (DTM), yaitu model permukaan tanah yang bebas dari pengaruh vegetasi dan objek buatan manusia (*bare earth*).

Selama ini akuisisi data topografi tambang banyak mengandalkan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) yang mampu memancarkan hingga 500.000 titik per detik sehingga menghasilkan *point cloud* dengan tingkat kerapatan dan ketelitian tinggi (Quintero dkk., 2008). Namun demikian, metode ini memiliki keterbatasan pada sudut pandang (*line of sight*) karena dilakukan dari posisi stasioner di darat, sehingga rawan menghasilkan area kosong (*blank spot*) pada morfologi pit yang kompleks. Sebagai alternatif, fotogrametri menggunakan wahana *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dinilai mampu meningkatkan efisiensi akuisisi data dari segi waktu, fleksibilitas cakupan area, serta kemudahan mobilisasi peralatan pada area tambang terbuka yang dinamis.

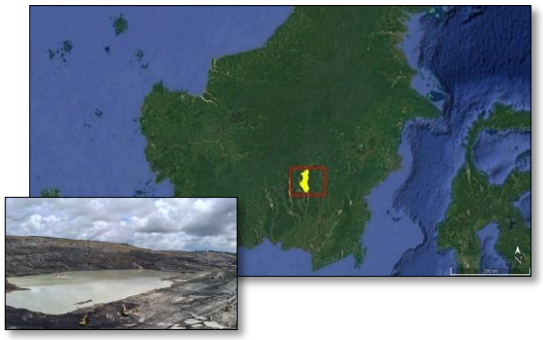
Kualitas DTM yang dihasilkan, baik dari UAV maupun TLS, sangat dipengaruhi oleh metode interpolasi spasial yang digunakan untuk mengubah data *point cloud* diskrit menjadi permukaan yang kontinu. Beberapa metode interpolasi yang umum digunakan antara lain *Nearest Neighbor*, *Inverse Distance Weighting* (IDW), dan *Triangulated Irregular Network* (TIN). Ketepatan pemilihan metode interpolasi menjadi krusial karena berdampak langsung pada akurasi DTM yang digunakan dalam estimasi volume dan monitoring perubahan permukaan tambang (Raza dkk., 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan akurasi vertikal DTM hasil UAV fotogrametri dan TLS pada area pertambangan batubara PT. Pamapersada Nusantara site Asmi, dengan menerapkan tiga metode interpolasi, yaitu *Nearest Neighbor*, IDW, dan TIN, serta mengevaluasi hasilnya terhadap standar *ASPRS Positional Accuracy Standards* (2024). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi metode pemetaan topografi yang paling sesuai diterapkan pada tambang batubara guna mendukung pengambilan keputusan teknis di lapangan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di area tambang terbuka (*open-pit*) PT. Pamapersada Nusantara site Asmi, yang terletak di Desa Barunang, Kecamatan Kapuas Tengah, Kabupaten Kapuas, Provinsi Kalimantan Tengah, pada koordinat geografis 0°59'23,1" LS dan 114°24'59,5" BT. Ruang lingkup spasial penelitian difokuskan secara eksklusif pada area bukaan tambang dan tidak mencakup bidang topografi di luar area tambang tersebut.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

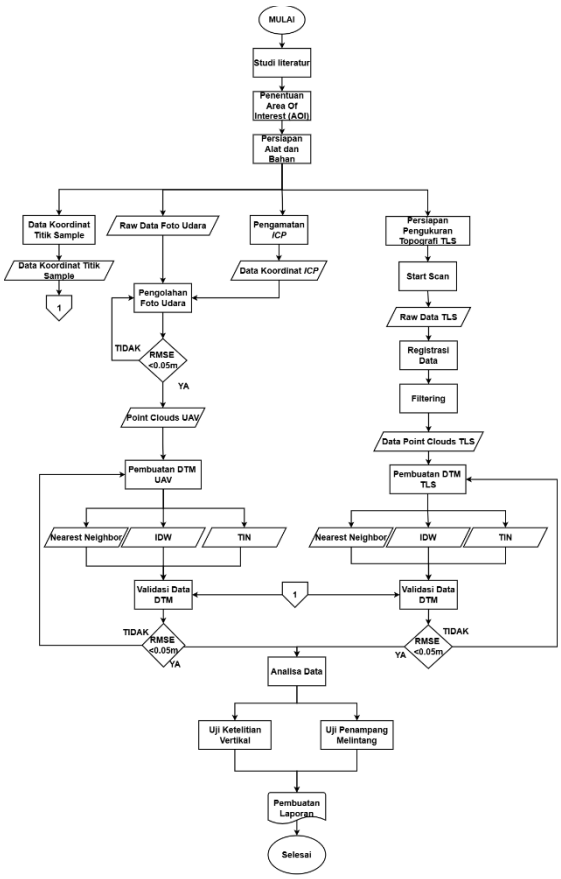
2.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi *GNSS geodetic*, statif, *drone RTK* beserta *remote control*-nya, serta *Terrestrial Laser Scanner*. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Agisoft Metashape untuk pengolahan foto udara, RiSCAN PRO untuk pengolahan *point cloud* TLS, Surfer untuk interpolasi *Nearest Neighbor* dan IDW, Global Mapper untuk interpolasi TIN dan uji penampang melintang, serta ArcGIS untuk pembuatan titik sampel acak (*random points*). Bahan penelitian berupa data *point cloud* hasil TLS yang telah diregistrasi dan difilter, data *point cloud* hasil UAV dalam format .laz, serta data koordinat GNSS pada 11 titik *Independent Check Point* (ICP).

2.3 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis, meliputi studi literatur, penentuan area penelitian (*Area of Interest*/AOI), akuisisi data UAV dan TLS, pengolahan data, pembentukan DTM dengan tiga metode interpolasi, validasi akurasi, uji komparasi vertikal, uji

penampang melintang, hingga penarikan kesimpulan. Diagram alir tahapan penelitian secara lengkap disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.4 Pembentukan Digital Terrain Model

Data *point cloud* hasil UAV dan TLS yang telah difilter dari objek *non-ground* diinterpolasi menjadi DTM menggunakan tiga metode, yaitu: (1) *Nearest Neighbor*, yang menetapkan nilai suatu sel berdasarkan titik sampel terdekat secara Euclidean (Sibson, 1981); (2) *Inverse Distance Weighting* (IDW), yang mengestimasi nilai sel melalui kombinasi pembobotan linear terhadap jarak titik sekitarnya (Childs, 2011); dan (3) *Triangulated Irregular Network* (TIN), yang merepresentasikan permukaan melalui jaringan segitiga tidak beraturan berbasis prinsip triangulasi *Delaunay* (Li, Zhu, & Gold, 2004).

2.5 Uji Akurasi Vertikal

Uji akurasi vertikal dilakukan dengan membandingkan nilai elevasi hasil ekstraksi DTM terhadap data koordinat referensi pada titik uji, kemudian dihitung nilai *Root Mean Square Error* vertikal (RMSEz) menggunakan persamaan berikut (ASPRS, 2024):

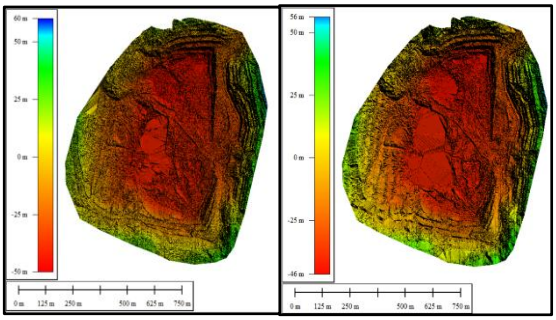
$$RMSEz = \sqrt{[\ \Sigma(Zmodel,i - Zcek,i)^2 / n\ ]} \qquad ...(1)$$

dengan n adalah jumlah titik uji, Z adalah nilai koordinat pada sumbu vertikal. Nilai *Linear Error* pada tingkat kepercayaan 90% (LE90) dihitung dengan persamaan LE90 = 1,6499 × RMSEz. Nilai RMSEz yang diperoleh selanjutnya dievaluasi terhadap kelas akurasi vertikal berdasarkan *ASPRS Positional Accuracy Standards* (2024). Validasi terhadap 11 titik ICP dilakukan untuk masing-masing kombinasi sumber data (UAV/TLS) dan metode interpolasi (TIN/IDW/*Nearest Neighbor*). Selanjutnya, uji komparasi menyeluruh antara DTM UAV dan DTM TLS dilakukan pada 41 titik sampel, yaitu gabungan 11 titik ICP dan 30 titik acak (*random points*) yang dibangkitkan menggunakan ArcGIS di dalam batas poligon area tambang.

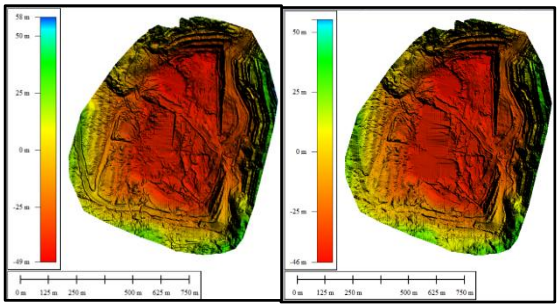
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pembentukan Digital Terrain Model

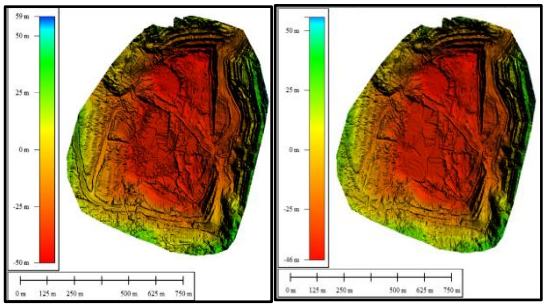
Pengolahan *point cloud* UAV dan TLS menggunakan tiga metode interpolasi menghasilkan model permukaan yang secara visual memiliki karakteristik berbeda. DTM hasil TLS cenderung menampilkan fitur tebing dan jenjang tambang (*bench*) yang lebih tajam dibandingkan UAV, karena karakteristik perekaman TLS yang memancarkan laser dengan kerapatan tinggi secara langsung dari posisi stasioner. Permukaan hasil TIN memperlihatkan tekstur topografi paling natural karena dibentuk langsung dari jaringan segitiga antar titik data, sementara IDW menampilkan efek permukaan yang lebih halus (*smooth*) akibat rata-rata pembobotan jarak, dan *Nearest Neighbor* memperlihatkan tekstur yang lebih tegas pada area dengan perubahan elevasi ekstrem.



Gambar 3. Perbandingan Visual DTM UAV (kiri) dan TLS (kanan) TIN



Gambar 3. Perbandingan Visual DTM UAV (kiri) dan TLS (kanan) IDW



Gambar 3. Perbandingan Visual DTM UAV (kiri) dan TLS (kanan) Nearest neighbor

3.2 Hasil Uji Validasi DTM terhadap Titik Kontrol

Validasi dilakukan dengan membandingkan elevasi DTM terhadap 11 titik ICP hasil pengukuran GNSS. Rekapitulasi hasil uji validasi disajikan pada Tabel 1.

Pendekatan Pemodelan	Sumber Data	Jumlah Titik Uji	ΔZ (m)	RMSEz (m)	LE90 (m)
TIN	UAV	11	0,051	0,226	0,372
TIN	TLS	11	0,091	0,302	0,496
IDW	UAV	11	0,037	0,192	0,316
IDW	TLS	11	0,095	0,309	0,508
Nearest Neighbor	UAV	11	0,039	0,198	0,326
Nearest Neighbor	TLS	11	0,131	0,361	0,595

Tabel 1. Hasil Uji Validasi DTM terhadap 11 Titik ICP

Berdasarkan Tabel 1, DTM UAV secara konsisten menghasilkan nilai RMSEz yang lebih rendah (berkisar 0,192–0,226 m) dibandingkan DTM TLS (0,302–0,361 m) pada ketiga metode interpolasi. Nilai terbaik diperoleh pada kombinasi UAV dengan metode IDW (RMSEz = 0,192 m), yang termasuk dalam kelas akurasi vertikal ASPRS 33,3 cm. Fenomena ini diduga terjadi karena keterbatasan sudut pandang (*line of sight*) TLS yang rentan terhadap area kosong (*blank spot*) pada dasar jenjang tambang, sedangkan akuisisi *nadir* UAV lebih selaras dengan geometri pengukuran GNSS geodetik.

3.3 Hasil Uji Akurasi Ketelitian Vertikal Antar-DTM

Uji komparasi menyeluruh antara DTM UAV dan DTM TLS dilakukan pada 41 titik sampel uji (11 ICP dan 30 *random points*). Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2.

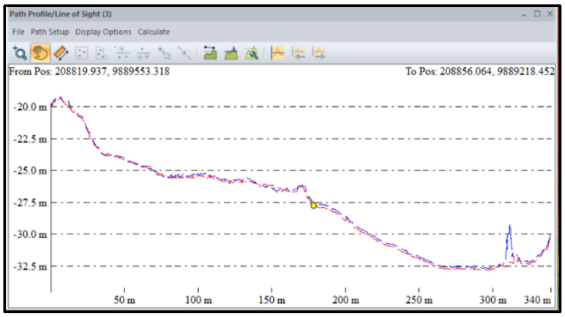
Pendekatan Pemodelan	Jumlah Titik Sampel	Rata-rata Selisih ΔZ (m)	RMSEz (m)	LE90 (m)
TIN	41	0,174	0,417	0,686
IDW	41	0,342	0,585	0,962
Nearest Neighbor	41	0,369	0,607	0,999

Tabel 2. Hasil Uji Akurasi Vertikal antara DTM UAV dan DTM TLS

Pendekatan TIN menghasilkan deviasi terendah (RMSEz = 0,417 m), yang mengindikasikan bahwa secara geometris kedua model memiliki kesesuaian bentuk rupa bumi paling tinggi ketika direkonstruksi langsung melalui jaringan segitiga tidak beraturan. Sebaliknya, metode berbasis grid, yaitu IDW dan *Nearest Neighbor*, menghasilkan deviasi yang lebih besar. Deviasi maksimum secara konsisten berpusat pada titik sampel yang sama untuk ketiga metode, yaitu pada topografi patahan lereng tambang yang curam, dengan selisih elevasi meningkat dari 1,209 m (TIN) menjadi 2,720 m (IDW) dan 2,785 m (*Nearest Neighbor*). Hal ini menunjukkan bahwa algoritma interpolasi berbasis grid merespons kerapatan *point cloud* UAV dan TLS secara berbeda pada kondisi topografi berundak dan ekstrem.

3.4 Hasil Uji Penampang Melintang

Analisis penampang melintang (*cross section*) dilakukan pada empat lintasan yang menghubungkan titik-titik ICP untuk membandingkan profil geometris permukaan tanah antara DTM UAV dan TLS secara lebih mendalam.



Gambar 4. Perbandingan Grafik Penampang Melintang DTM UAV dan TLS

Pada area datar atau landai, profil elevasi UAV dan TLS menunjukkan keselarasan yang sangat tinggi pada ketiga metode interpolasi. Namun, pada area patahan lereng atau tebing tambang yang curam, terjadi kerenggangan deviasi yang signifikan. Metode TIN terbukti mampu mempertahankan ketajaman struktur asli lereng tambang secara geometris paling tegas dibandingkan metode lain. Metode IDW cenderung "menumpulkan" pinggiran tebing curam akibat proses rata-rata pembobotan jarak, sedangkan metode *Nearest Neighbor* menghasilkan tekstur penampang yang terputus-putus atau menyerupai bentuk anak tangga (*blocky*), sehingga kehilangan ketajaman relief aslinya.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

1. Hasil uji validasi terhadap titik kontrol menunjukkan DTM UAV memiliki ketelitian vertikal yang lebih baik (RMSEz = 0,192 m dengan IDW) dibandingkan DTM TLS (RMSEz = 0,302 m dengan TIN), yang diduga terkait keterbatasan sudut pandang TLS pada dasar jenjang tambang.

2. Uji komparasi sistem grid menunjukkan metode TIN menghasilkan keselarasan tertinggi antara DTM UAV dan TLS (RMSEz = 0,417 m), sedangkan metode berbasis grid standar, yaitu IDW (0,585 m) dan *Nearest Neighbor* (0,607 m), menghasilkan deviasi lebih besar, terutama pada lereng curam.

3. Analisis penampang melintang menunjukkan seluruh metode berfungsi baik pada rupa bumi datar, tetapi pada dinding tebing curam metode TIN terbukti paling baik mempertahankan ketajaman relief asli, sedangkan IDW menghasilkan efek penghalusan dan *Nearest Neighbor* menghasilkan penampang berundak (*blocky*).

4.2 Saran

1. Perlu dilakukan penambahan stasiun pemindaian TLS dari berbagai sudut pandang, khususnya dari elevasi tinggi (*crest*), untuk meminimalkan area kosong (*blank spot*) pada struktur jenjang tambang.

2. Metode TIN disarankan digunakan secara konsisten untuk keperluan rekayasa yang menuntut presisi bentuk lereng, seperti analisis kemantapan lereng dan perhitungan volume.

3. Penempatan titik kontrol (GCP/ICP) perlu memastikan area terbuka dengan *line of sight* yang bersih, baik terhadap satelit GNSS maupun terhadap stasiun pemindai TLS terdekat.

DAFTAR PUSTAKA

ASPRS. (2024). *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.* Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.

Bazarnik, M. (2018). Slope stability monitoring in open pit mines using 3D terrestrial laser scanning. *E3S Web of Conferences, 66.*

Childs, C. (2011). *Interpolating Surface in ArcGIS Spatial Analyst.* Esri Education Service: ESRI.

Hengl, T. (2009). *A Practical Guide to Geostatistical Mapping.* Amsterdam: University of Amsterdam.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LiDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards, 61*(1), 5–28.

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology.* Boca Raton: CRC Press.

Mahfudz. (2012). Evaluasi penambangan di Pit 3 berdasarkan pengukuran survei kemajuan tambang terhadap ritase alat angkut. *Jurnal Teknik Pertambangan, 5*(1), 5–7.

Pratomo, A. (2017). Pengujian akurasi dan ketelitian planimetrik pada pemetaan bidang tanah pemukiman skala besar menggunakan wahana Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Jurnal Geodesi Undip, 6*(4).

Quintero, M. S., dkk. (2008). Terrestrial laser scanning: Applications for cultural heritage documentation. Proceedings of the 3D-ARCH Conference.

Raza, A., dkk. (2023). A critical comparison of interpolation techniques for digital terrain modelling in mining. International Journal of Mining Science and Technology.

Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbour interpolation. Dalam *Interpreting Multivariate Data* (hlm. 21–36).

Triono, D. I. (2014). Perhitungan kemajuan tambang (progress mining) dengan metode penampang melintang di CV. Wulu Bumi Sakti. *Jurnal Ilmiah Pertambangan.*

Watson, D. F. (1992). *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data.* Oxford: Pergamon Press.

Wirantiko, M., Handayani, H. H., & Cahyono, A. B. (2020). Studi pembuatan DTM menggunakan metode slope based filtering dan grid based filtering. *Journal of Geodesy and Geomatics, 16*(1), 47.

Wolf, P. R. (1993). *Elemen Fotogrametri dengan Interpretasi Foto Udara dan Penginderaan Jauh.* Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Yang, C. S., Kao, S. P., Lee, F. B., & Hung, P. S. (2004). Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, 778–785.