



Evaluasi Akurasi Data LiDAR ALS-70 untuk Pemodelan 3D di Area Bandara Perkotaan: Studi Kasus Bandara Sultan Thaha, Jambi

Accuracy Evaluation of ALS-70 LiDAR Data for 3D Modeling in Urban Airport Areas: A Case Study of Sultan Thaha Airport, Jambi

Zulfikar Adlan Nadzir
Institut Teknologi Sumatera, Indonesia.

Article Info:

Received: 24-01-2025

Accepted: 01-03-2025

Published: 30-04-2025

Kata Kunci:

ALS-70,
Kalibrasi,
Akurasi,
Pemodelan 3-Dimensi,
Perkotaan.

DOI:

[10.31315/imagi.v5i1.14482](https://doi.org/10.31315/imagi.v5i1.14482)

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi akurasi data ALS-70 di area Bandara Sultan Thaha, Jambi, dengan fokus pada proses *boresight calibration* dan pengaruh penghapusan *ground control points* (GCP) yang dianggap anomali. Proses diawali dengan analisis tinggi terbang yang menunjukkan adanya variasi elevasi. Kemudian dilakukan perhitungan dan penelitian yang memperoleh nilai akhir memenuhi spesifikasi ALS-70 dan standar ketelitian vertikal SNI Orde 1. Selain hasil kuantitatif, data yang belum terkalibrasi menunjukkan kemampuan untuk mengenali lingkungan terbangun, membuka peluang penggunaan dalam respons cepat. Penelitian ini menekankan pentingnya pendekatan iteratif dan statistik dalam memastikan kualitas data LiDAR di perkotaan. *Outlook* dari penelitian ini merekomendasikan otomatisasi deteksi anomali dan integrasi dengan data penginderaan jauh lain untuk memperkaya analisis, serta validasi multi-kondisi untuk memperluas generalisasi hasil.

Abstract: *This study aims to evaluate the accuracy of ALS-70 data in the Sultan Thaha Airport area, Jambi, focusing on the boresight calibration process and the effect of removing ground control points (GCPs) that are considered anomalous. The process begins with an analysis of the flight height that shows elevation variations. Then calculations and research were carried out which obtained a final value that met ALS-70 specifications and SNI vertical accuracy standards of Order 1. In addition to the quantitative results, the uncalibrated data demonstrated the ability to recognize the built environment, opening up opportunities for use in rapid response. This research emphasizes the importance of iterative and statistical approaches in ensuring LiDAR data quality in urban areas. The outlook of this study recommends automation of anomaly detection and integration with other remote sensing data to enrich the analysis, as well as multi-condition validation to expand the generalizability of the results.*

How to Cite:

Nadzir, Z. A. (2025). Evaluasi Akurasi Data LiDAR ALS-70 untuk Pemodelan 3D di Area Bandara Perkotaan: Studi Kasus Bandara Sultan Thaha, Jambi. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 5(1), 111-126. <https://doi.org/10.31315/imagi.v5i1.14482>.

*Corresponding Author:

Email : zulfikar.nadzir@gt.itera.ac.id

Address : Jl. Terusan Ryacudu, Kec. Jati Agung,
Kabupaten Lampung Selatan, Lampung, 35365

PENDAHULUAN

Pemetaan skala besar adalah salah satu landasan penting dalam berbagai aplikasi, mulai dari perencanaan kota, pengelolaan sumber daya alam hingga proses mitigasi dan respon terhadap bencana, sekaligus menjadi salah satu hal yang dibutuhkan dalam usaha dari pembangunan secara berkelanjutan (Singh dkk., 2024). Kebutuhan akan peta skala besar seperti 1:500 di Indonesia sudah diatur dalam kebijakan-kebijakan nasional terkait (Sulastri dkk., 2024), seperti Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 45 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Informasi Geospasial (Pemerintah Pusat Indonesia, 2021) dan Peraturan Kepala (Perka) Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar (Badan Informasi Geospasial Indonesia, 2014) yang diperbarui oleh Perka BIG Nomor 6 tahun 2018 (Badan Informasi Geospasial Indonesia, 2018). Peta-peta tersebut wajib memenuhi standar akurasi tinggi untuk menjamin interoperabilitas data dalam Sistem Referensi Geospasial Nasional (SRGN).

Berbagai metode telah digunakan untuk menyelesaikan kebutuhan pembuatan peta tersebut, seperti metode teristris (Madimarova dkk., 2024), fotogrametri (Luhmann dkk., 2023), penggunaan citra satelit (Wieland dkk., 2023) dan juga teknologi *Light Detection and Ranging* (LiDAR) berbasis pesawat terbang dan satelit (Ma dkk., 2023; Yu dkk., 2025). Penggunaan metode teristris sangat akurat tetapi membutuhkan waktu pengukuran yang lebih lambat dan mahal dibandingkan dengan metode lainnya (Nadzir, 2024). Sebaliknya, metode penginderaan jauh unggul di waktu pengolahan data dengan resolusi spasial yang lebih rendah. Fotogrametri berbasis pesawat nirawak (*drone*) dapat menjembatani keduanya, namun menghadapi tantangan akurasi absolut, terutama pada daerah dengan relief kompleks atau vegetasi tinggi (Skondras dkk., 2022). Secara umum, pengukuran yang dilakukan secara langsung akan mendapatkan hasil yang lebih detail tetapi membutuhkan waktu yang lama. Semakin jauh alat pengamatan dengan lokasi yang diamati, akan berbanding terbalik dengan tingkat detail dan efektivitasnya (Zhong dkk., 2023).

Sesuai dengan kelebihan dan kekurangan akan metode-metode pengamatan untuk pemetaan skala besar, kombinasi dari beberapa metode pengukuran diperlukan. Faktor yang menentukan dalam pencarian metode pilihannya adalah mencari jalan tengah antara efektivitas secara waktu dan materi, serta resolusi yang memenuhi kebutuhan skala tersebut (X. Liu dkk., 2020). Salah satu metode yang dapat digunakan adalah menggunakan teknologi LiDAR berbasis pesawat terbang. LiDAR sendiri adalah teknologi penginderaan jauh yang menggunakan laser untuk mengukur jarak ke objek yang dapat digunakan untuk membuat model 3D akurat dari permukaan bumi dengan aplikasi dalam pemetaan, klasifikasi objek, dan analisis perubahan ketinggian. Teknologi ini menghasilkan peta yang akurat dengan kerapatan data yang baik. Selain itu, penggunaan pesawat terbang menyelesaikan masalah aksesibilitas dari lokasi *remote* yang sulit dijangkau. Ditambah lagi, waktu yang dibutuhkan dalam pengukuran dengan LiDAR relatif singkat daripada waktu yang dibutuhkan untuk metode teristris (Beni dkk., 2023; Lindgren dkk., 2021). Namun, data LiDAR tetap menghadapi tantangan akurasi terutama dalam aspek referensi koordinat. Hal ini berasal dari proses pengikatan referensi dari hasil pengamatan menggunakan kombinasi dari *Global Positioning System* (GPS) dan sistem navigasi inersial untuk pesawat terbang. Kesalahan sistem referensi geodetik (*misalignment*) dapat menyebabkan ketidaksesuaian data dengan

sistem geospasial nasional, sehingga mengurangi reliabilitas analisis spasial dan integrasi antar-data (Di Benedetto & Fiani, 2022; Oniga dkk., 2024).

Penggunaan metode LiDAR memiliki keterbatasan sistemik yang terpusat pada 3 jenis, yaitu kesalahan dari sistem pengamatan pada sudut cermin dan jarak laser yang berujung pada halangan (*occlusion*) (Coops dkk., 2021), kesalahan pada hasil pengamatan dan sistem koordinat dan referensi dari pengikatan hasil pengamatan dari berbagai sumber data (Keyetieu & Seube, 2019), dan juga kesalahan dari hasil yang sering terjadi di daerah perkotaan (*noise*) karena perbedaan parameter kalibrasi (Veronese dkk., 2021). Kesalahan yang berkaitan dengan sistem koordinat dan referensi ini menyebabkan data LiDAR tidak sejajar dengan data geospasial lainnya dan dapat memengaruhi akurasi pengukuran jarak dan ketinggian. Minimalisasi kesalahan tersebut menjadi topik dari beberapa penelitian (D. Li dkk., 2016; X. Liu dkk., 2022; McDermott & Rife, 2024), dengan fokus utama untuk mengoreksi kesalahan secara sistematis pada proses pengukuran, namun masih kurang mendapat perhatian dalam konteks penelitian dengan lokasi di Indonesia (Prasvita dkk., 2021). Penelitian oleh Pronk dkk. (2024) menunjukkan bahwa kesalahan sistem referensi dapat menyebabkan pergeseran vertikal hingga lebih dari 30 cm pada model elevasi digital berbasis LiDAR di wilayah pegunungan. Selain itu, studi oleh Okolie & Smit (2022) menegaskan bahwa minimnya koreksi terhadap kesalahan posisi dapat menyebabkan data LiDAR tidak sejajar dengan peta dasar nasional, terutama untuk peta skala besar seperti 1:500 yang mensyaratkan akurasi tinggi.

Berangkat dari kurangnya penelitian mengenai koreksi kesalahan LiDAR di Indonesia dan dalam rangka usaha mendukung pemutakhiran teknologi untuk memenuhi syarat regulasi terkait, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas data LiDAR setelah dan sebelum koreksi yang berkenaan dengan kesalahan sistem koordinat dan referensi hasil pengamatan, sebagaimana dijelaskan sebelumnya. Selain itu, dilakukan pula identifikasi akan tingkat signifikansi dari pengamatan geodetik berbasis posisi untuk meningkatkan akurasi dan kesesuaian spasial data LiDAR. Dengan menyoroti salah satu sumber kesalahan paling fundamental namun sering diabaikan, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan keandalan data LiDAR, yang pada gilirannya mampu mendorong integrasi metode geodetik dalam pemrosesan LiDAR untuk menghasilkan peta skala besar yang akurat, reliabel, dan kompatibel dengan Sistem Referensi Geospasial Nasional sesuai dengan regulasi yang berlaku. Data LiDAR yang lebih akurat nantinya dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti perencanaan kota, pengelolaan sumber daya alam, dan respons bencana. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam menjembatani kesenjangan antara akurasi geodetik dan kebutuhan pemetaan nasional berskala besar di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Data

Lokasi dari penelitian ini terletak di area perkotaan di sekitar Bandara Sultan Thaha, Kota Jambi, Provinsi Jambi. Bandara ini berlokasi secara koordinat geografis di 1,634° Lintang Selatan dan 103,642° Bujur Timur, seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Pemilihan dari lokasi penelitian ini berdasarkan pada proses perencanaan pengembangan kapasitas dari bandara Sultan Thaha untuk melayani lepas dan landas pesawat terbang dengan kelas yang lebih tinggi; menambah panjang landasan dari 2.200 meter menjadi 9% lebih besar, 2.400 meter. Selain itu, lokasi ini dipilih karena merupakan kawasan padat bangunan dan infrastruktur dengan tingkat kepadatan sedang, memiliki tinggi bangunan yang beragam tetapi masih terdapat vegetasi yang memiliki pengaruh cukup besar dalam pengolahan data LiDAR (Kuras dkk., 2021; Münzinger dkk., 2022).

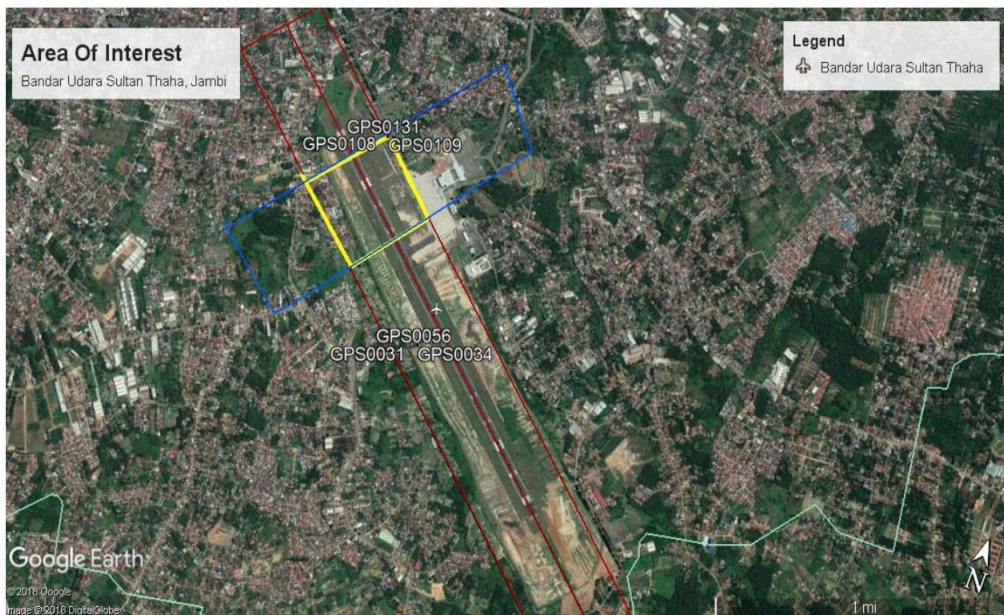
Hasil pengamatan dari sensor *Airborne Laser Ranging* (Leica ALS-70) pada akhir tahun (9 Desember) 2017 digunakan sebagai data utama dalam penelitian ini dengan pesawat terbang Cessna yang berjenis pesawat terbang berawak kecil. Selain itu, digunakan pula data geodetik komplementer seperti data GPS dan data IMU-INS (*Inertial Measurement Unit - Inertial Navigation System*) dari jalur terbang selama pengamatan menggunakan sensor penerima koordinat Applanix POS AV 510 (Jouybari dkk., 2023). Selain itu, data koordinat dari *Ground Control Points* (GCP) dan *Independent Control Points* (ICP) sejumlah 156 titik sebagai pengikat secara referensi juga didapatkan yang berlokasi secara menyeluruh pada sistem proyeksi koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) zona 48S dengan datum referensi WGS84. Hasil pra-analisis menunjukkan bahwa kerapatan titik pengamatan (*point cloud*) dari sensor ALS-70 adalah ~ 7 poin/m² yang dikombinasikan dengan hitungan teoretis dari akurasi horizontal dan vertikal pada IMU + GPS sebesar ~ 45 cm dan ~ 20 cm (Nadzir, 2024).

Pengolahan Data

Awal dari pengolahan data dilakukan menggunakan aplikasi *Inertial Explorer* sebagai pengolah data GPS dan IMU untuk mendapatkan data jalur terbang (*trajectory*), dalam hal ini menggunakan data dari 3 GCP utama sebagai referensi koordinat awal pada seluruh *trajectory* dengan metode *tightly coupled geo-referencing*. Hal ini merupakan bagian pertama dari proses kalibrasi yang setelahnya dilanjutkan dengan ekstraksi data dari masing-masing *trajectory*. Proses ekstraksi tersebut dilakukan menggunakan *Leica Cloudpro* yang diperbarui menjadi *Cyclone Cloud* dengan fokus utama menjadi pengolahan yang berbasis *cloud* (awan, bukan di mesin lokal – *local machine*). Hasil dari proses ekstraksi ini adalah model lintasan 3D yang presisi. Terdapat tiga sumbu yang digunakan sebagai referensi dari proses kalibrasi; *roll* (ke samping kanan dan kiri), *pitch* (hidung pesawat ke atas dan ke bawah), dan *heading* (ke arah kanan atau kiri) yang juga sering disingkat sebagai RPH. Pemilihan jalur terbang untuk kalibrasi masing-masing sumbu (minimal 2 jalur untuk setiap sumbu) didasarkan pada tingkat kesejajaran, jenis orientasi terbang dan tingkat kestabilan dari wahana (W. Liu dkk., 2022), yang ditandai oleh **Gambar 2**. Jalur yang dipilih sebagai kalibrasi *roll* ditandai dengan tiga garis searah dengan warna merah sedangkan dua garis kuning mewakili jalur terbang untuk kalibrasi *pitch* dan *heading*.



Gambar 1. Denah Lokasi Penelitian



Gambar 2. Jalur-Jalur Kalibrasi (merah: *roll*, kuning dan biru: *pitch* dan *heading*)

Setelah data *trajectory* terkalibrasi dengan ketiga sumbu *RPH*, dilakukan perhitungan standar deviasi dan *Root Mean Square Error* (RMSE) secara iteratif sebagai ukuran akurasi awal sebelum dilakukan proses *boresight calibration* dengan jumlah titik referensi berupa data GCP dan ICP dari 156 lokasi di sekitar lokasi penelitian menggunakan aplikasi *Micro Station*. **Persamaan 1** (Nadzir dkk., 2020) dan **Persamaan 2** (Nadzir & Adil, 2024) mewakili bagaimana standar deviasi (σ) dan RMSE secara matematis. Nilai standar deviasi digunakan sebagai parameter untuk menentukan

tingkat presisi, menunjukkan tingkat sebaran dari pengamatan untuk satu lokasi dalam waktu tertentu dengan asumsi sampel $(n - 1)$ Sedangkan untuk tingkat akurasi didapatkan dari perhitungan RMSE yang mewakili bagaimana kebaikan data pengamatan yang sudah dilakukan dengan data lain yang dianggap sebagai validator/referensi dengan asumsi populasi (n) . Tahap ini disebut sebagai proses *Boresight Calibration*.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\Delta N_i - \Delta \bar{N}_j)^2}{n - 1}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\Delta N_{als70} - \Delta \bar{N}_{gps})^2}{n}}$$

Tahapan *Boresight Calibration* merupakan salah satu tahapan penting dari proses pengolahan data ALS-70 yang menggunakan pendekatan koreksi kesalahan sistemik secara diskrit. Umumnya, proses *Boresight Calibration* ini berfokus pada pendekatan secara visual yang mana menghabiskan waktu yang sedikit, tetapi pada praktiknya, hasilnya susah dipertanggungjawabkan secara angka dan kuantitatif. Penelitian ini menggunakan pendekatan secara berulang (*iteration*) dengan batas konvergensi (*convergence threshold*) yang dipilih secara seksama, sebagai usaha untuk menjadi dasar kuantitatif pada proses *Boresight Calibration* dalam berbagai lokasi dan kondisi. Penentuan batas ini didasarkan pada pengamatan visual dari jalur terbang yang sejajar dan berimpit (disebut dengan *line 1* dan *line 2*). Hasil dari proses tersebut akan digunakan sebagai parameter utama dari tingkat akurasi pemodelan 3-dimensi menggunakan ALS-70. Tujuan daripada tahap ini adalah untuk meminimalisir kesalahan posisi secara relatif dari pengamatan yang dilakukan secara kontinu, yang disebabkan oleh kesalahan sudut tampak observasi (*boresight*). Sebagai masukan awal, digunakan parameter kesalahan RPH pada **Tabel 1** yang didapatkan dari pengolahan awal pada 3 GCP di proses sebelumnya. Untuk *roll*, dipilih jalur terbang dengan arah terbang yang berbeda tetapi secara lokasi sejajar satu sama lain dan terbang di atas lokasi yang cenderung datar tanpa vegetasi, dalam hal ini adalah lintasan terbang. Kondisi pemilihan yang mirip juga digunakan dalam memilih jalur terbang untuk *pitch* dan *heading*, yaitu 2 atau lebih jalur yang sejajar dengan arah yang berbeda. Tetapi, untuk *pitch* digunakan lajur terbang di atas bangunan padat dan untuk *heading* dipilih jalur terbang yang berada di bangunan padat, lebih tepatnya berada di pojok-pojok dari bangunan padat tersebut (Liao dkk., 2023).

Tabel 1
Nilai Parameter RPH

Sumbu	Parameter A	Parameter B
<i>Roll</i>	$-9,90 \times 10^{-4}$	$-1,10 \times 10^{-3}$
<i>Pitch</i>	$1,72 \times 10^{-4}$	$-1,75 \times 10^{-4}$
<i>Heading</i>	$-6,75 \times 10^{-4}$	$-6,98 \times 10^{-4}$

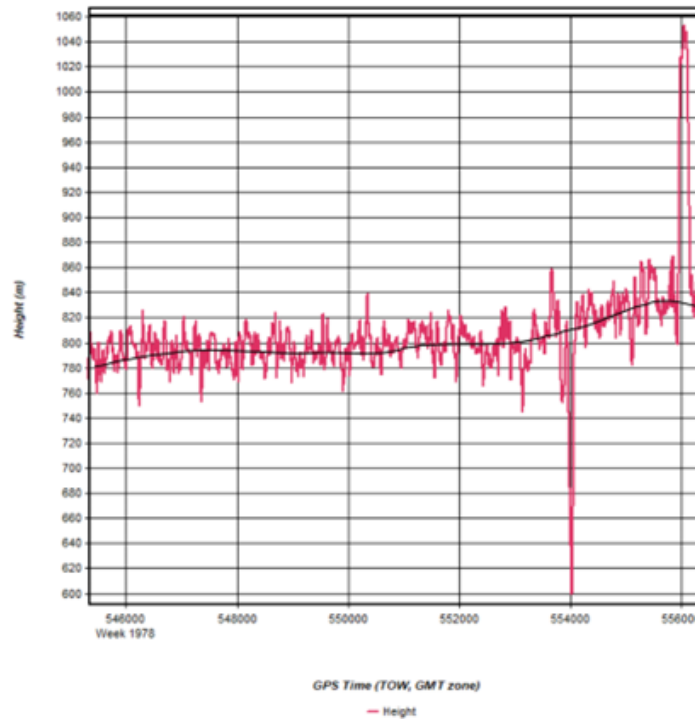
Sumber: Data Diolah

Parameter pada tabel 1 ini dimasukkan ke dalam hitungan untuk kalibrasi RPH, sehingga didapatkan nilai standar deviasi dan RMSE sebagai tahap kontrol kualitas pertama (*quality control #1 – QC#1*). Selisih antara RMSE pada iterasi- k dan iterasi $k-1$ dihitung untuk melihat tingkat konvergensinya. Selanjutnya, 2 titik GCP dengan standar deviasi yang terbesar pada iterasi n dikeluarkan dari proses *geo-referencing*. Setelah itu, proses diulangi pada iterasi $k+1$. Ketika selisih sudah mencapai batas konvergensi sebesar 1×10^{-4} , maka proses QC#1 dapat dilanjutkan dengan QC#2 yang berbasis penyaringan *noise* dengan pendekatan *outlier exclusion* menggunakan nilai *outlier* 3σ yang mewakili tingkat kepercayaan 95% (Berger & Kiefer, 2021). *Boresight Calibration* dapat dikatakan selesai, dengan kuantifikasi akhir dari tingkat kualitas pengambilan data ALS-70 diambil dari perbandingan antara RMSE yang didapatkan dengan hasil pra-analisis sensor sebagai parameter QC#3.

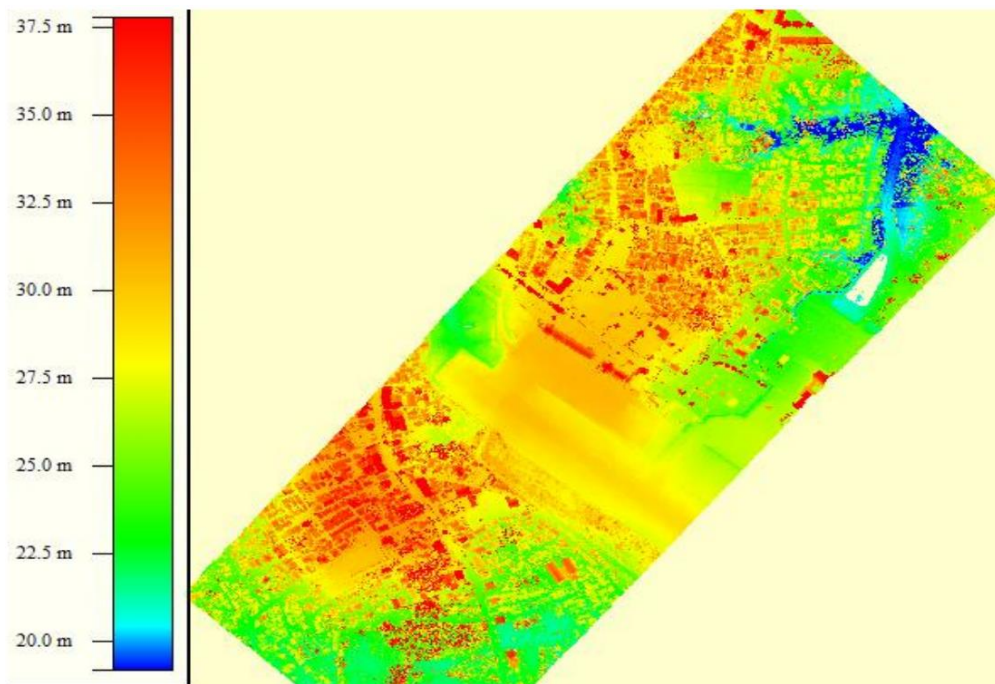
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil integrasi jalur terbang dari wahana pesawat terbang yang ditunjukkan pada **Gambar 3** menunjukkan bahwa rerata tinggi terbang ada di ketinggian 745 m, dengan ketinggian minimum di 605 m dan ketinggian maksimal pada 1048 m. Rentang (*range*) tinggi sebesar 443 meter ini menjadi indikator awal adanya instabilitas ketinggian terbang, yang secara langsung berimplikasi pada variasi presisi hasil pengukuran. Kondisi ini mempertegas pentingnya proses *Boresight Calibration* dalam pengolahan data ALS untuk menjamin kestabilan dan akurasi data spasial. Temuan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya stabilitas jalur terbang secara geometris untuk menghasilkan luaran dengan kualitas tinggi (Vo dkk., 2021), juga dengan temuan bahwa fluktuasi tinggi terbang memiliki dampak signifikan dan secara langsung terhadap kesalahan posisi dan akurasi dari hasil pengamatan (Lin dkk., 2021). Data model 3-dimensi yang belum terkalibrasi ini memiliki tingkat presisi berupa standar deviasi sebesar 16,03 cm, sedangkan tingkat akurasi dari model tersebut sebesar 85,01 cm (diwakili oleh nilai RMSE, keduanya adalah QC#1). Nilai RMSE ini cukup besar dan menjadi penanda bahwa pengukuran menggunakan ALS-70, walau cepat dalam ukuran waktu dan menghasilkan data yang sudah terlihat baik, secara kuantitatif masih belum memenuhi syarat secara Standar Nasional Indonesia (SNI) Kerangka Kontrol Horizontal (KKH) Orde 1 ataupun syarat secara Kerangka Acuan Kerja (KAK) dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Temuan ini senada dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa data LiDAR tanpa proses koreksi menghasilkan kesalahan posisi vertikal hingga di atas 1 meter pada area urban yang kompleks (Van Genderen, 2011). Ditambah lagi, temuan di penelitian sebelumnya menegaskan bahwa akurasi absolut dalam pemetaan LiDAR sangat dipengaruhi oleh kualitas integrasi GNSS/IMU dan keakuratan GCP (Pöppel dkk., 2023; Salehi-Dorcheabedi dkk., 2024). Walaupun demikian, hasil ekstraksi dari jalur terbang sebelum kalibrasi ditampilkan pada **Gambar 4** yang menunjukkan bahwa sebelum kalibrasi sudah mewakili fitur-fitur lingkungan terbangun (*built environment*) di lokasi penelitian yang ditandai oleh titik-titik berwarna merah. Hal ini menunjukkan peluang penggunaan data *uncalibrated* sebagai penanda cepat dan awal jika dibutuhkan oleh pengguna data ALS-70, atau LiDAR secara umum. Temuan ini diperkuat oleh hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa meskipun data LiDAR yang belum dikalibrasi memiliki keterbatasan dalam akurasi vertikal, informasi bentuk permukaan dan objek-objek besar seperti bangunan dan jalan tetap

dapat terekstraksi dengan baik (Mathews & Nghiem, 2021). Selain itu, hasil sebelumnya juga menunjukkan bahwa data mentah LiDAR dapat digunakan untuk deteksi awal perubahan penggunaan lahan di wilayah perkotaan sebelum dilakukan penyempurnaan posisi melalui *Boresight Calibration* (Altuntas, 2019).

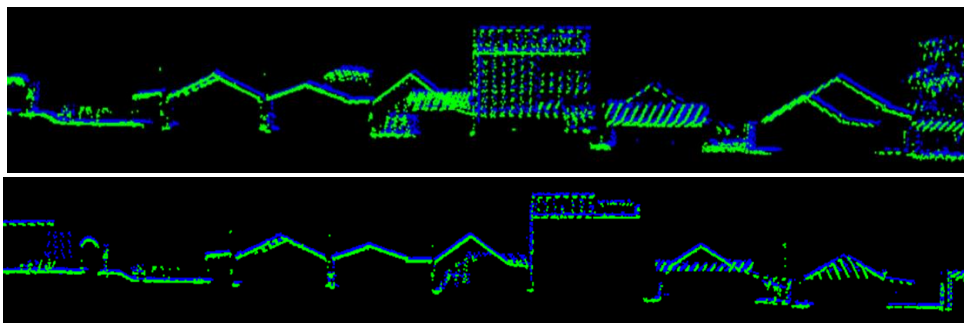


Gambar 3. Profil Memanjang dari Jalur Terbang
Sumber: Data Diolah



Gambar 4. Model 3-dimensi Lokasi Penelitian Sebelum Dikalibrasi
Sumber: Data Diolah

Proses selanjutnya dari *Boresight Calibration* yang dilakukan di lokasi penelitian adalah perhitungan secara iteratif, sebagai parameter QC#2 diwakili di **Gambar 5** untuk *heading*. Hasil menunjukkan tingkat variabilitas vertikal yang cukup besar antara dua jalur yang ditandai dengan warna biru dan warna hijau, yang mana bisa diminimalisir menggunakan perubahan titik secara visual. Nilai *offset* dari sumbu *roll* tercatat sebesar 4x lipat dari konstanta kesalahan (dari 0,99 menjadi 0,21). Sedangkan perubahan sebesar 10x terjadi pada *offset* di sumbu *pitch* dan 16% untuk sumbu *heading*. **Tabel 2** merangkum kondisi konstanta masing-masing sumbu sebelum dan sesudah kalibrasi pada iterasi pertama. Secara kuantifikasi RMSE dan standar deviasi, walaupun secara visual sudah terlihat jauh lebih baik, belum mengalami perubahan yang signifikan, khususnya dalam usaha pemenuhan spesifikasi ketelitian dari ALS-70 sebesar 5 sampai 38 cm (Dong & Chen, 2017). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *Boresight Calibration* yang akurat dapat mengurangi error sistematis hingga 70% dalam pembentukan model elevasi (Räty dkk., 2023). Penelitian lain mendemonstrasikan bahwa iterasi kalibrasi yang memperhitungkan hubungan spasial antara jalur terbang menghasilkan model yang lebih akurat dalam konteks aplikasi perkotaan (Hasheminasab dkk., 2022). Sebagai usaha untuk memenuhi spesifikasi tersebut, dilakukan proses iterasi selanjutnya sebesar 4 kali yang digambarkan pada **Tabel 3**. Hasil dari iterasi 0-1 dan 1-2 menunjukkan perbaikan RMSE sebesar 15,5%, yang mana merupakan hasil yang cukup baik. Pada iterasi 2-3, nilai konvergensi mulai terlihat walau belum memasuki ambang batas, yaitu 0,8%. Terlihat bahwa dari iterasi-3 dan iterasi-4 terjadi selisih RMSE sebesar 1×10^{-4} m (0,08%), yang mana memenuhi batas selesainya proses *Boresight Calibration*. Tetapi, secara selisih dari iterasi-0 dan hasil iterasi-4, belum memenuhi spesifikasi. Oleh karena itu proses mengurangi GCP dilakukan dengan catatan bahwa GCP tersebut memiliki nilai standar deviasi yang lebih dari 30% dibandingkan dengan ketelitian dari data-data GCP lainnya. Secara statistik max-min menunjukkan bahwa satu GCP (nomor 78) memiliki nilai standar deviasi sebesar 29 cm, 50% lebih besar dari rerata standar deviasi seluruh dataset. Setelah GCP tersebut dihilangkan, ditemukan RMSE sebesar 22,53 cm yang memenuhi syarat spesifikasi ALS-70 sebagai QC#3. Pendekatan eliminasi GCP berdasarkan deviasi statistik ini juga diterapkan oleh Sharifisoraki dkk. (2023), yang menunjukkan peningkatan akurasi model sebesar 35% pada pengolahan data LiDAR di area bandara. Selain itu, studi dari Haala dkk. (2022) menyarankan kombinasi pendekatan statistik dan spasial untuk optimalisasi distribusi GCP dalam lingkungan urban yang heterogen.



Gambar 5. Perbandingan Data Sebelum (Atas) dan Sesudah (Bawah) Kalibrasi
Heading

Sumber: Data Diolah

Tabel 2
Nilai Offset Error RPH

Sumbu	Sebelum Kalibrasi	Sesudah Kalibrasi
<i>Roll</i>	$-9,90 \times 10^{-4}$	$-2,18 \times 10^{-3}$
<i>Pitch</i>	$1,72 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-3}$
<i>Heading</i>	$-6,75 \times 10^{-4}$	$7,94 \times 10^{-4}$

Sumber: Data Diolah

Tabel 3
Perbandingan RMSE setiap iterasi

Iterasi	RMSE (meter)	Perbaikan (%)
0	0,8501	-
1	0,7220	15,069%
2	0,6095	15,582%
3	0,6046	0,803%
4	0,6045	0,016%

Sumber: Data Diolah

Perjalanan dan hasil yang didapatkan dari proses kalibrasi menunjukkan bahwa proses minimalisasi akan kesalahan merupakan kombinasi dari pendekatan visual, matematis dan pengurangan data yang dianggap anomali, sesuai dengan temuan dari Chekole, (2014) serta Richardson & Moskal, (2011). Limitasi yang didapatkan ini perlu dijadikan perhatian dalam proses pengolahan data ALS-70 di berbagai lokasi perkotaan. Temuan ini juga sejalan dengan studi terbaru oleh Wang dkk. (2024), yang mengungkapkan bahwa pengolahan data LiDAR di area urban memerlukan strategi multi-tahapan untuk memitigasi efek struktur kompleks dan gangguan sistem referensi. Begitu pula dengan kajian X. Li dkk. (2021), yang merekomendasikan integrasi model spasial dan penyesuaian geodetik untuk peningkatan reliabilitas dalam pemetaan urban berskala besar.

SIMPULAN

Penelitian ini menegaskan pentingnya proses kalibrasi dalam meningkatkan akurasi data Airborne LiDAR Scanning (ALS-70) di lingkungan perkotaan, khususnya di area Bandara Sultan Thaha, Jambi. Karakteristik wilayah yang kompleks dan dinamis, seperti ketinggian terbang yang tidak stabil serta keberadaan fitur-fitur lingkungan terbangun, menuntut pendekatan kalibrasi yang terstruktur dan adaptif. Melalui penerapan metode *boresight calibration*, terjadi penurunan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebagai QC#1 dari 85,01 cm menjadi 60,45 cm dalam empat iterasi awal sebagai QC#2, hingga akhirnya diperoleh nilai akhir sebesar 22,53 cm setelah eliminasi Ground Control Point (GCP) dengan penyimpangan terbesar yang digunakan sebagai QC#3. Nilai ini tidak hanya memenuhi spesifikasi teknis alat ALS-70, namun juga sesuai dengan standar akurasi vertikal Standar Nasional Indonesia (SNI) Orde 1 dan Kerangka Acuan Kerja (KAK) BIG. Hasil ini juga memperlihatkan potensi pemanfaatan awal data yang belum dikalibrasi untuk identifikasi cepat fitur permukaan pada wilayah terbangun, yang bermanfaat dalam konteks tanggap darurat atau pengawasan wilayah pembangunan. Dengan demikian, integrasi antara metode visual, statistik, dan iteratif dalam proses kalibrasi menjadi krusial untuk mendapatkan hasil akhir yang optimal di area perkotaan

yang kompleks seperti bandara. Ke depannya, pengembangan sistem otomatisasi untuk deteksi GCP yang anomali dan penentuan konvergensi iteratif akan mempercepat proses pengolahan dan kalibrasi data ALS-70. Selain itu, kolaborasi dengan data penginderaan jauh lainnya seperti citra optik resolusi tinggi atau GNSS-IR dapat memperkaya proses validasi dan memperluas potensi penggunaan data ALS-70 dalam pemantauan pembangunan bandara, perencanaan infrastruktur, serta mitigasi risiko di kawasan urban padat. Studi lanjutan juga perlu mencakup variasi musim dan cuaca untuk melihat kestabilan performa ALS-70 di bawah berbagai kondisi atmosferik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada PT ASI Pudjiastuti Geosurvey sebagai penyedia data dan pengolahan data. Selain itu penulis juga berterima kasih kepada pihak Redaksi Jurnal dan Mitra Bestari dalam proses *review*.

DAFTAR PUSTAKA

- Altuntas, C. (2019). Urban area change visualization and analysis using high density spatial data from time series aerial images. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 107(1), 1–12. <https://doi.org/10.2478/rgg-2019-0001>.
- Badan Informasi Geospasial Indonesia. (2014). *Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar*. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/269446/perka-big-no-15-tahun-2014>.
- Badan Informasi Geospasial Indonesia. (2018). *Peraturan Badan Informasi Geospasial Nomor 6 Tahun 2018 tentang Perubahan atas Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar*. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/269444/peraturan-big-no-6-tahun-2018>.
- Beni, T., Borselli, D., Bonechi, L., Lombardi, L., Gonzi, S., Melelli, L., Turchetti, M. A., Fanò, L., D'Alessandro, R., Gigli, G., & Casagli, N. (2023). Laser scanner and UAV digital photogrammetry as support tools for cosmic-ray muon radiography applications: An archaeological case study from Italy. *Scientific Reports*, 13(1), 19983. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46661-4>.
- Berger, A., & Kiefer, M. (2021). Comparison of Different Response Time Outlier Exclusion Methods: A Simulation Study. *Frontiers in Psychology*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.675558>
- Chekole, S. D. (2014). Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner: A comparative study School of Architecture and the Built Environment. *Thesis*. School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm.

- Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Queinnec, M., Luther, J. E., Bolton, D. K., White, J. C., Wulder, M. A., van Lier, O. R., & Hermosilla, T. (2021). Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112477. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112477>.
- Di Benedetto, A., & Fiani, M. (2022). Integration of LiDAR Data into a Regional Topographic Database for the Generation of a 3D City Model. Dalam E. Borgogno-Mondino & P. Zamperlin (Ed.), *Geomatics for Green and Digital Transition* (hlm. 193–208). Springer International Publishing.
- Dong, P., & Chen, Q. (2017). *LiDAR Remote Sensing and Applications* (1 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781351233354>.
- Haala, N., Kölle, M., Cramer, M., Laupheimer, D., & Zimmermann, F. (2022). Hybrid georeferencing of images and LiDAR data for UAV-based point cloud collection at millimetre accuracy. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 4, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2022.100014>.
- Hasheminasab, M., Zhou, T., & Habib, A. (2022). Multi-Modal Triangulation For In-Situ Bore-sight Calibration Of Frame And Line Cameras Onboard Gns/Ins-Assisted UAVS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2022*, 51–57. XXIV ISPRS Congress “Imaging today, foreseeing tomorrow”, Commission II - 2022 edition, 6–11 June 2022, Nice, France. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-51-2022>.
- Jouybari, A., Bagherbandi, M., & Nilfouroushan, F. (2023). Numerical Analysis of GNSS Signal Outage Effect on EOPs Solutions Using Tightly Coupled GNSS/IMU Integration: A Simulated Case Study in Sweden. *Sensors*, 23(14), 1-22. <https://doi.org/10.3390/s23146361>.
- Keyetieu, R., & Seube, N. (2019). Automatic Data Selection and Bore-sight Adjustment of LiDAR Systems. *Remote Sensing*, 11(9), 1087. <https://doi.org/10.3390/rs11091087>.
- Kuras, A., Brell, M., Rizzi, J., & Burud, I. (2021). Hyperspectral and Lidar Data Applied to the Urban Land Cover Machine Learning and Neural-Network-Based Classification: A Review. *Remote Sensing*, 13(17), 1-39. <https://doi.org/10.3390/rs13173393>.
- Li, D., Guo, H., Wang, C., Dong, P., & Zuo, Z. (2016). Improved bore-sight calibration for airborne light detection and ranging using planar patches. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2), 024001. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.024001>.

- Li, X., Li, X., Huang, J., Shen, Z., Wang, B., Yuan, Y., & Zhang, K. (2021). Improving PPP–RTK in urban environment by tightly coupled integration of GNSS and INS. *Journal of Geodesy*, *95*(12), 132. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01578-6>.
- Liao, Y., Li, J., Kang, S., Li, Q., Zhu, G., Yuan, S., Dong, Z., & Yang, B. (2023). SE-Calib: Semantic Edge-Based LiDAR–Camera Bore-sight Online Calibration in Urban Scenes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *61*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3278024>.
- Lin, A., Sun, X., Wu, H., Luo, W., Wang, D., Zhong, D., Wang, Z., Zhao, L., & Zhu, J. (2021). Identifying Urban Building Function by Integrating Remote Sensing Imagery and POI Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *14*, 8864–8875. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3107543>.
- Lindgren, N., Wästlund, André, Bohlin, Inka, Nyström, Kenneth, Nilsson, Mats, & Olsson, H. (2021). Updating of forest stand data by using recent digital photogrammetry in combination with older airborne laser scanning data. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *36*(5), 401–407. <https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1936153>.
- Liu, W., Gardoni, P., Li, Z., Królczyk, G. M., Du, H., Li, W., & Sotelo, M. A. (2022). Multiple Natural Features Fusion for On-Site Calibration of LiDAR Bore-sight Angle Misalignment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *60*, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3218564>.
- Liu, X., Huang, Y., Xu, X., Li, X., Li, X., Ciais, P., Lin, P., Gong, K., Ziegler, A. D., Chen, A., Gong, P., Chen, J., Hu, G., Chen, Y., Wang, S., Wu, Q., Huang, K., Estes, L., & Zeng, Z. (2020). High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*, *3*(7), 564–570. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0521-x>.
- Liu, X., Li, Q., Xu, Y., & Wei, X. (2022). Point Cloud Intensity Correction for 2D LiDAR Mobile Laser Scanning. *Wireless Communications and Mobile Computing*, *2022*(1), 3707985. <https://doi.org/10.1155/2022/3707985>.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Böhm, J. (2023). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging* (4th edition). De Gruyter.
- Ma, X., Zheng, G., Chi, X., Yang, L., Geng, Q., Li, J., & Qiao, Y. (2023). Mapping fine-scale building heights in urban agglomeration with spaceborne lidar. *Remote Sensing of Environment*, *285*, 113392. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113392>.
- Madimarova, G., Nurpeissova, T., Ormambekova, A., Suleimenova, D., & Zhildikbayeva, A. (2024). Advanced topographic-geodetic surveys and GNSS methodologies in urban planning. *Journal of Applied Geodesy*, *18*(3), 449–462. <https://doi.org/10.1515/jag-2023-0088>.

- Mathews, A. J., & Nghiem, S. V. (2021). Examining Urban Built-up Volume. Dalam *Urban Remote Sensing* (hlm. 17–45). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119625865.ch2>.
- McDermott, M., & Rife, J. (2024). Correcting Motion Distortion for LIDAR Scan-to-Map Registration. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(2), 1516–1523. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3346757>.
- Münzinger, M., Prechtel, N., & Behnisch, M. (2022). Mapping the urban forest in detail: From LiDAR point clouds to 3D tree models. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127637. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127637>.
- Nadzir, Z. A. (2024). Studi Komparasi Untuk As-Built Survey Dan Pengawasan Deformasi Dari Gedung: Metode Terestris Vs Metode Satelit Di Gedung Kuliah Umum (Gku) Institut Teknologi Sumatera. *Journal of Science and Applicative Technology*, 8(1), 65-72. <https://doi.org/10.35472/jsat.v8i1.1635>.
- Nadzir, Z. A., & Adil, I. (2024). Assessment of Low-Cost Tide Gauges to Meet GLOSS 1-cm Precision and Accuracy Standards: A Case Study on Pramuka Island, Indonesia. *Forum Geografi*, 38(2), 222–230. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v38i2.5182>.
- Nadzir, Z. A., Simarmata, N., & Aliffia, A. (2020). Pengembangan Algoritma Identifikasi Sawah Padi Berdasarkan Spektra Fase Padi (Studi Kasus: Lampung Selatan) (Paddy Field Identification Algorithm Development Using Spectral Value Of Paddy Field (Case Study: South Lampung)). *JURNAL SAINS INFORMASI GEOGRAFIS*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.31314/jsig.v3i1.537>.
- Okolie, C. J., & Smit, J. L. (2022). A systematic review and meta-analysis of Digital elevation model (DEM) fusion: Pre-processing, methods and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 188, 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.016>.
- Oniga, V.-E., Loghin, A.-M., Macovei, M., Lazar, A.-A., Boroianu, B., & Sestras, P. (2024). Enhancing LiDAR-UAS Derived Digital Terrain Models with Hierarchic Robust and Volume-Based Filtering Approaches for Precision Topographic Mapping. *Remote Sensing*, 16(1), 1-33. <https://doi.org/10.3390/rs16010078>.
- Pemerintah Pusat Indonesia. (2021, Februari 2). *Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 45 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Informasi Geospasial*. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161966/pp-no-45-tahun-2021>.

- Pöppel, F., Mandlbürger, G., & Pfeifer, N. (2023). Evaluation Of A Gnss/Imu/Lidar-Integration For Airborne Laser Scanning Using Rtklib Ppk And Ppp Gnss Solutions. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-1-W3-2023*, 161–166. 2nd GEOBENCH Workshop on Evaluation and BENCHmarking of Sensors, Systems and GEOspatial Data in Photogrammetry and Remote Sensing - 23–24 October 2023, Krakow, Poland. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-161-2023>.
- Prasvita, D. S., Santoni, M. M., Wirawan, R., & Trihastuti, N. (2021). Klasifikasi Pohon Kelapa Sawit Pada Data Fusi Citra Lidar Dan Foto Udara Menggunakan Convolutional Neural Network. *JIPi (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.29100/jipi.v6i2.2437>.
- Pronk, M., Eleveld, M., & Ledoux, H. (2024). Assessing Vertical Accuracy and Spatial Coverage of ICESat-2 and GEDI Spaceborne Lidar for Creating Global Terrain Models. *Remote Sensing*, 16(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/rs16132259>.
- Räty, J., Hauglin, M., Astrup, R., & Breidenbach, J. (2023). Assessing and mitigating systematic errors in forest attribute maps utilizing harvester and airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(4), 284–301. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0053>.
- Richardson, J. J., & Moskal, L. M. (2011). Strengths and limitations of assessing forest density and spatial configuration with aerial LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2640–2651. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.020>.
- Salehi-Dorcheabedi, M., Asgari, J., Amiri-Simkooei, A., & Fatemi Nasrabadi, S. B. (2024). Improving LiDAR height precision in urban environment: Low-cost GNSS ranging prototype for post-mission airborne laser scanning enhancement. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101251. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101251>.
- Sharifisoraki, Z., Dey, A., Selzler, R., Amini, M., Green, J. R., Rajan, S., & Kwamena, F. A. (2023). Monitoring Critical Infrastructure Using 3D LiDAR Point Clouds. *IEEE Access*, 11, 314–336. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3232338>.
- Singh, S., Sharma, S. K., & Shukla, A. K. (2024). The Role of Geospatial Technology in Sustainable Development. Dalam C. Sharma, A. K. Shukla, S. Pathak, & V. P. Singh (Ed.), *Sustainable Development and Geospatial Technology: Volume 1: Foundations and Innovations* (hlm. 17–31). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65683-5_2.
- Skondras, A., Karachaliou, E., Tavantzis, I., Tokas, N., Valari, E., Skalidi, I., Bouvet, G. A., & Stylianidis, E. (2022). UAV Mapping and 3D Modeling as a Tool for Promotion and Management of the Urban Space. *Drones*, 6(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/drones6050115>.

- Sulastri, S., Syafri, S., & Latief, R. (2024). Pemanfaatan Peta Foto Tegak Sebagai Peta Dasar Untuk Evaluasi Pelaksanaan Rencana Tata Ruang. *Urban and Regional Studies Journal*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.35965/ursj.v7i1.5272>.
- Van Genderen, J. L. (2011). Airborne and terrestrial laser scanning. *International Journal of Digital Earth*, 4(2), 183–184. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.553487>.
- Veronese, L. de P., Auat-Cheein, F., Mutz, F., Oliveira-Santos, T., Guivant, J. E., De Aguiar, E., Badue, C., & De Souza, A. F. (2021). Evaluating the Limits of a LiDAR for an Autonomous Driving Localization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(3), 1449–1458. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2971054>.
- Vo, A. V., Laefer, D. F., & Byrne, J. (2021). Optimizing Urban LiDAR Flight Path Planning Using a Genetic Algorithm and a Dual Parallel Computing Framework. *Remote Sensing*, 13(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/rs13214437>.
- Wang, A., Shi, S., Man, W., & Qu, F. (2024). Enhanced Land-Cover Classification through a Multi-Stage Classification Strategy Integrating LiDAR and SIF Data. *Remote Sensing*, 16(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/rs16111916>.
- Wieland, M., Martinis, S., Kiefl, R., & Gstaiger, V. (2023). Semantic segmentation of water bodies in very high-resolution satellite and aerial images. *Remote Sensing of Environment*, 287, 113452. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113452>.
- Yu, Z., Qiao, Z., Liu, W., Yin, H., & Shen, S. (2025). SLIM: Scalable and Lightweight LiDAR Mapping in Urban Environments. *IEEE Transactions on Robotics*, 1–20. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3554400>.
- Zhong, Y., Yan, B., Yi, J., Yang, R., Xu, M., Su, Y., Zheng, Z., & Zhang, L. (2023). Global urban high-resolution land-use mapping: From benchmarks to multi-megacity applications. *Remote Sensing of Environment*, 298, 113758. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113758>.