

**KAJIAN TINGKAT PEMROSESAN FOTO UDARA UAV TERHADAP
AKURASI DAN EFISIENSI ESTIMASI VOLUME BATUBARA
BERDASARKAN VALIDASI DATA TIMBANGAN**

(Skripsi)

Oleh

**DAMAI INDAH
NPM 2215071012**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**KAJIAN TINGKAT PEMROSESAN FOTO UDARA UAV TERHADAP
AKURASI DAN EFISIENSI ESTIMASI VOLUME BATUBARA
BERDASARKAN VALIDASI DATA TIMBANGAN**

Oleh

DAMAI INDAH

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

KAJIAN TINGKAT PEMROSESAN FOTO UDARA UAV TERHADAP AKURASI DAN EFISIENSI ESTIMASI VOLUME BATUBARA BERDASARKAN VALIDASI DATA TIMBANGAN

Oleh

DAMAI INDAH

Kegiatan operasional pertambangan batubara memerlukan data volume yang akurat dan cepat pada area *stockROM* yang dinamis, sehingga fotogrametri *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dimanfaatkan sebagai solusi penyediaan data spasial. Perbedaan tingkat pemrosesan foto udara (*high, medium, low*) memengaruhi ketelitian dan waktu pemrosesan, sehingga perlu analisis untuk menentukan tingkat pemrosesan yang optimal. Penelitian ini bertujuan menganalisis perbedaan ketelitian geometrik, efisiensi waktu pemrosesan, dan estimasi volume batubara pada tingkat pemrosesan *high, medium, dan low* serta menentukan tingkat pemrosesan yang paling optimal.

Metode penelitian meliputi akuisisi data UAV dengan metode *Post-Processed Kinematic* (PPK), pengukuran GCP dan ICP menggunakan GNSS RTK, serta pengolahan fotogrametri pada tingkat *high, medium, dan low*. Evaluasi ketelitian dilakukan menggunakan parameter RMSE, CE90, dan LE90 mengacu pada Kepdirjen Minerba No. 17.K/HK.02/DJB.S/2023. Estimasi volume dihitung dengan metode *cut and fill between DTMs* dan divalidasi secara langsung menggunakan data timbangan dengan acuan toleransi sesuai standar ASTM D6172-98, sedangkan efisiensi dianalisis berdasarkan waktu pemrosesan dengan acuan berdasar waktu tingkat pemrosesan *high*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pemrosesan *high* menghasilkan ketelitian geometrik terbaik dengan RMSE horizontal 0,0208 m dan vertikal 0,0258 m, serta membutuhkan waktu pemrosesan paling lama yaitu 2 jam 32 menit 37 detik. Tingkat pemrosesan *high* juga menghasilkan estimasi volume sebesar 339,765 ton dengan selisih 1,6% terhadap data timbangan yang masih dalam batas toleransi, sedangkan tingkat *medium* (3,4%) dan *low* (3,7%) melebihi batas toleransi sehingga tingkat pemrosesan *high* dinyatakan sebagai tingkat pemrosesan paling optimal.

Kata kunci: UAV, tingkat pemrosesan, estimasi volume batubara, akurasi geometrik, efisiensi waktu pemrosesan.

ABSTRACT

STUDY OF UAV AERIAL PHOTO PROCESSING LEVEL ON THE ACCURACY AND EFFICIENCY OF COAL VOLUME ESTIMATION BASED ON WEIGHT DATA VALIDATION

By

DAMAI INDAH

Coal mining operations require accurate and fast volume data in dynamic stockROM areas, so Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry is utilized as a solution for providing spatial data. Differences in aerial photo processing levels (high, medium, low) affect the accuracy and processing time, so analysis is needed to determine the optimal processing level. This study aims to analyze the differences in geometric accuracy, processing time efficiency, and coal volume estimation at high, medium, and low processing levels and determine the most optimal processing level. The research methods include UAV data acquisition using the Post-Processed Kinematic (PPK) method, GCP and ICP measurements using GNSS RTK, and photogrammetric processing at high, medium, and low levels. Accuracy evaluation was carried out using RMSE, CE90, and LE90 parameters referring to the Decree of the Director General of Mineral and Coal No. 17.K/HK.02/DJB.S/2023. Volume estimation was calculated using the cut and fill method between DTMs and validated directly using scale data with tolerance references according to the ASTM D6172-98 standard, while efficiency was analyzed based on processing time with reference to high processing level time. The results showed that the high processing level produced the best geometric accuracy with a horizontal RMSE of 0.0208 m and a vertical RMSE of 0.0258 m, and required the longest processing time of 2 hours 32 minutes 37 seconds. The high processing level also produced a volume estimate of 339,765 tons with a difference of 1,6% to the weighing data which was still within the tolerance limit, while the medium (3,4%) and low (3,7%) levels exceeded the tolerance limit so that the high processing level was declared the most optimal processing level.

Keywords: UAV, processing level, coal volume estimation, geometric accuracy, processing time efficiency

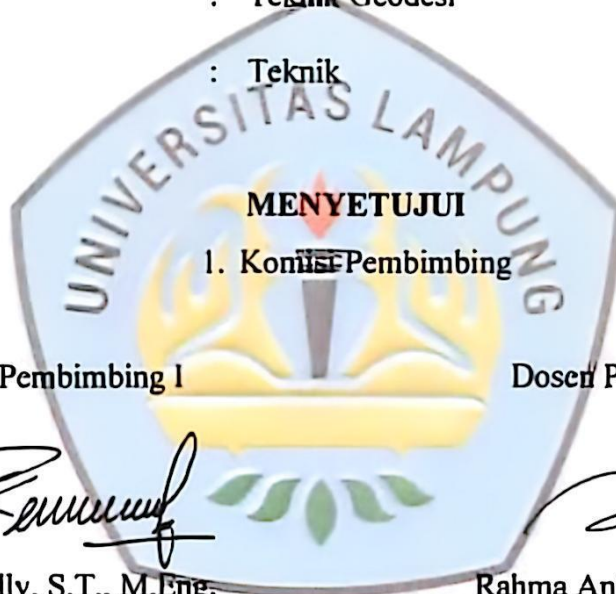
Judul : Kajian Tingkat Pemrosesan Foto Udara UAV Terhadap Akurasi dan Efisiensi Estimasi Volume Batubara Berdasarkan Validasi Data Timbangan

Nama Mahasiswa : Damai Indah

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215071012

Jurusan : Teknik Geodesi

Fakultas : Teknik



Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Romi Fadly, S.T., M.Eng.
NIP 19770824 2008121001

Rahma Anisa, S.T., M.Eng.
NIP 19930716 2020122032

MENGETAHUI

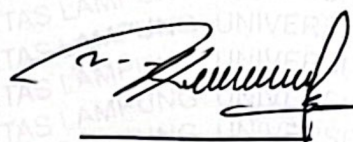
2. Ketua Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika

Ir. Fauzan Murdapa, M.T., IPM.
NIP 196410121992031002

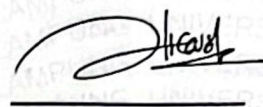
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

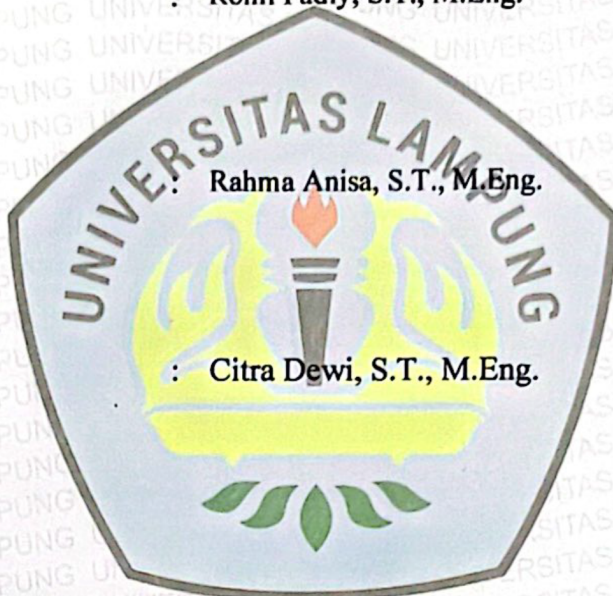
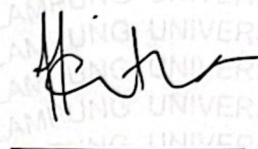
Ketua : Romi Fadly, S.T., M.Eng.



Sekretaris : Rahma Anisa, S.T., M.Eng.



Anggota : Citra Dewi, S.T., M.Eng.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T
NIP 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 22 Mei 2026

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Damai Indah

NPM : 2215071012

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang saya susun merupakan hasil pemikiran dan kerja saya sendiri berdasarkan pengetahuan serta data yang saya peroleh selama proses penelitian. Seluruh isi tulisan dalam skripsi ini saya kembangkan secara mandiri dan tidak memuat karya orang lain yang diakui sebagai milik saya. Apabila terdapat bagian yang mengacu pada sumber lain, telah saya cantumkan secara jelas sesuai kaidah penulisan ilmiah dan dapat ditemukan dalam daftar pustaka.

Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dalam keadaan sadar tanpa adanya paksaan dari pihak mana pun. Apabila di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian atau pelanggaran dalam pernyataan ini, saya bersedia mempertanggungjawabkannya sesuai ketentuan yang berlaku.

Bandar Lampung, Juni 2026



Damai Indah

2215071012

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 3 Agustus 2004 sebagai anak kedua dari empat bersaudara, dari pasangan Bapak Itong Hidayat dan Ibu Armah.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari TK Kartini 2 pada tahun 2009 dan TK Kartini 1 pada tahun 2010. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri 2 Palapa dan lulus pada tahun 2016, kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 4 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2019. Pendidikan menengah atas diselesaikan di SMA Negeri 3 Bandar Lampung pada tahun 2022.

Pada tahun 2022, penulis diterima di Program Studi S1 Teknik Geodesi, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama perkuliahan, penulis aktif di organisasi kemahasiswaan dan pernah menjabat sebagai Bendahara Umum I HIMAGES periode 2024. Penulis juga mengikuti Kemah Kerja dengan kegiatan pembuatan peta batas desa di Desa Sukanegara, Kecamatan Tanjung Bintang, Kabupaten Lampung Selatan pada tahun 2025. Selain itu, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kelurahan Gunung Terang, Kecamatan Langkapura, Kota Bandar Lampung pada Juli 2025, serta Kerja Praktik (KP) di PT. Budi Gema Gempita *Coal Mine – Site Lahat* pada September hingga Desember 2025.

Sebagai tugas akhir, penulis menyusun skripsi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) dengan judul: **“Kajian Tingkat Pemrosesan Foto Udara UAV Terhadap Akurasi dan Efisiensi Estimasi Volume Batubara Berdasarkan Validasi Data Timbangan”**.

PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, kekuatan, dan kemudahan yang menyertai setiap proses perjalanan ini, karya sederhana ini dipersembahkan sebagai bentuk penghargaan atas setiap langkah yang telah ditempuh hingga sampai pada titik ini.

Kedua orang tua tercinta, Bapak Itong Hidayat dan Ibu Armah menjadi alasan terbesar untuk terus bertahan dan melangkah. Segala doa yang tak pernah putus, kasih sayang yang tidak pernah berkurang, serta pengorbanan yang tidak terhitung jumlahnya menjadi hal yang tidak akan pernah mampu terbalaskan, selain dengan usaha untuk terus memberikan yang terbaik.

Keluarga dan orang-orang terdekat yang selalu ada dalam setiap keadaan, yang diam-diam menjadi penguat di saat rapuh, serta menjadi tempat kembali ketika dunia terasa terlalu berat untuk dijalani sendiri.

Para dosen dan pembimbing yang telah memberikan waktu, ilmu, serta kesabaran dalam membimbing proses belajar hingga penyusunan karya ini, yang perlahan membentuk pemahaman dan kedewasaan dalam berpikir maupun bertindak.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(QS. Al-Insyirah: 6)

SANWACANA

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah subhanahu wa ta'ala yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Kajian Tingkat Pemrosesan Foto Udara UAV Terhadap Akurasi dan Efisiensi Estimasi Volume Batubara Berdasarkan Validasi Data Timbangan”** dengan baik. Skripsi ini disusun guna melengkapi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan tugas akhir bagi mahasiswa Program Studi S1 Teknik Geodesi dan Geomatika Universitas Lampung. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ir. Fauzan Murdapa, M.T., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung sekaligus Dosen Pembimbing Akademik.
3. Bapak Romi Fadly, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing 1 atas segala bimbingan, arahan, saran, serta waktu yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini sehingga dapat diselesaikan dengan baik.
4. Ibu Rahma Anisa, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing 2 atas bimbingan, masukan, dan motivasi yang diberikan dalam membantu penulis memperbaiki dan menyempurnakan skripsi ini.
5. Ibu Citra Dewi, S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji atas saran, kritik, dan masukan yang bersifat membangun guna penyempurnaan skripsi ini.
6. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen beserta civitas akademik Teknik Geodesi Universitas Lampung.
7. Bapak M. Idris. E.K. Ode selaku Kepala Teknik Tambang PT. Budi Gema Gempita *Coal Mine – Site Lahat*.

8. Bapak Sony Darmawan, S.T. selaku Kepala Bagian *Engineering* PT. Budi Gema Gempita *Coal Mine – Site* Lahat.
9. Bapak D.N Wilopo dan Bapak M. Aziz Anafi selaku Surveyor PT. Budi Gema Gempita *Coal Mine – Site* Lahat.
10. Seluruh anggota tim survei yang telah membantu selama pelaksanaan penelitian berlangsung.
11. Kedua orang tua penulis, Bapak Itong Hidayat dan Ibu Armah, yang selalu menjadi tempat kembali dalam setiap proses yang tidak mudah, melalui doa yang tidak pernah terputus, dukungan yang sering kali hadir tanpa banyak kata, serta pengorbanan yang mungkin tidak selalu terlihat, namun terasa dalam setiap langkah yang penulis tempuh, termasuk dukungan secara materi yang turut membantu kelancaran proses ini. Dalam setiap kesulitan, ada kekuatan yang berasal dari harapan dan kepercayaan Papa dan Mama, sehingga penulis mampu bertahan, bangkit, dan menyelesaikan skripsi ini hingga akhir.
12. Kakak Jagad Satria serta adik Ayip Ali dan Muara Kasih, yang tidak hanya menjadi bagian dari dukungan penulis, tetapi juga menjadi penghibur di setiap lelah dan tekanan yang dirasakan selama proses penyusunan skripsi ini. Dalam kebersamaan yang sederhana, tersimpan harapan dan kepercayaan yang menjadi alasan bagi penulis untuk terus bertahan dan menyelesaikan apa yang telah dimulai.
13. Kakek dan nenek penulis, yang senantiasa memberikan motivasi, semangat, dan perhatian, sehingga penulis dapat menjalani setiap proses hingga skripsi ini dapat diselesaikan.
14. Paman penulis, Paman Mas Doni Saputra, yang telah memberikan dukungan dan bantuan materi sejak awal perkuliahan, selama kerja praktik, hingga tahap penelitian, sehingga penulis dapat menjalani seluruh proses tersebut dengan baik hingga skripsi ini selesai.
15. Keluarga besar penulis yang selalu memberikan doa, dukungan, semangat, serta perhatian kepada penulis selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik.

16. Seseorang yang telah menjadi teman dekat penulis sejak awal perkuliahan hingga saat ini, Muhammad Darmawan. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup penulis yang tidak selalu mudah. Selalu kebersamai dalam setiap proses yang dilalui, hadir untuk mendengarkan setiap keluh kesah, serta memberi saran dan bantuan dalam penulisan skripsi maupun saat penelitian berlangsung.
17. Sahabat penulis selama masa perkuliahan, Karina, Megumi, Audy, dan Vera, yang menghadirkan tawa di tengah lelah dan menjadi penguat dalam setiap proses. Kebersamaan yang terjalin membuat perjalanan ini terasa lebih ringan hingga penulis mampu sampai pada titik ini.
18. Sahabat penulis sejak bangku sekolah menengah pertama, Hijriara Tamara Putri, yang selalu menjadi tempat pulang untuk berbagi cerita. Kedekatan yang terjaga dengan cara yang sederhana tetap memberi rasa hangat dan tenang bagi penulis dalam setiap proses yang dijalani.
19. Yumara dan Niken yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta menemani penulis selama proses bimbingan dan penyusunan skripsi hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
20. Rekan sesama mahasiswa dari Teknik Geodesi angkatan 2022 atas kebersamaan, kerja sama, dukungan, serta semangat yang telah diberikan selama masa perkuliahan hingga proses penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan dan kesalahan, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pembaca guna menjadi acuan agar penulis dapat menjadi lebih baik lagi di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi orang lain dan dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Bandar Lampung, Juni 2026

Penulis

Damai Indah

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Penelitian Terdahulu.....	8
2.2 Pertambangan Batubara	12
2.3 <i>StockROM</i>	13
2.4 Fotogrametri UAV.....	13
2.5 <i>Point Cloud</i>	14
2.6 <i>Digital Terrain Model (DTM)</i>	15
2.7 Tingkat Pemrosesan Foto Udara UAV	16
2.8 Densitas Batubara	16
2.9 Perhitungan Volume Batubara.....	17
2.10 Data Timbangan	19
2.11 Uji Ketelitian Geometrik Foto Udara	19
2.12 Efisiensi Pemrosesan Data.....	21
2.13 Validasi Estimasi Volume	23
III. METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1 Lokasi Penelitian	24
3.2 Perencanaan Metode dan Alur Kerja Penelitian.....	25
3.3 Tahap Persiapan Penelitian.....	26
3.3.1 Identifikasi Masalah.....	27
3.3.2 Studi Literatur	27
3.3.3 Inventarisasi dan Persiapan Data	27
3.3.4 Persiapan Peralatan	28
3.4 Tahap Pengumpulan Data.....	29
3.4.1 Pengukuran <i>Base</i>	30
3.4.2 Akuisisi Data Foto Udara UAV.....	31
3.4.3 Pengukuran <i>Ground Control Point (GCP)</i> dan <i>Independent</i>	

	<i>Check Point (ICP)</i>	32
3.4.4	Data Topografi Awal Area <i>StockROM A2</i>	33
3.4.5	Data Timbangan Batubara	33
3.4.6	Data Densitas Batubara.....	33
3.5	Tahap Pengolahan Data	34
3.5.1	Pengolahan Data GNSS PPK.....	34
3.5.2	Pengolahan Data Foto Udara UAV	36
3.5.3	Perhitungan Nilai <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i>	45
3.5.4	Pemotongan <i>Boundary Area</i>	46
3.5.5	Filterisasi.....	46
3.5.6	Perhitungan Volume Batubara.....	49
3.6	Uji Ketelitian Geometrik	53
3.7	Analisis Efisiensi Waktu Pemrosesan	53
3.8	Validasi Estimasi Volume	54
3.9	Evaluasi Tingkat Pemrosesan Optimal.....	54
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1	Hasil Pengolahan Data.....	56
4.1.1	Hasil Pengolahan Data GNSS PPK	56
4.1.2	Hasil Pengolahan Foto Udara	59
4.1.3	Hasil Filterisasi	71
4.1.4	Hasil DTM	78
4.2	Uji Ketelitian Geometrik	81
4.3	Efisiensi Waktu Pemrosesan	86
4.4	Validasi Estimasi Volume	93
4.5	Evaluasi Tingkat Pemrosesan Optimal.....	96
V.	PENUTUP.....	99
5.1	Simpulan.....	99
5.2	Saran	100
	DAFTAR PUSTAKA	102
	LAMPIRAN A <i>REPORT</i> HASIL PENGOLAHAN GNSS PPK	109
	LAMPIRAN B HASIL PENGUKURAN DAN PENGOLAHAN DATA	114
	LAMPIRAN C DATA SEKUNDER PENELITIAN	122
	LAMPIRAN D BERKAS ADMINISTRASI	125
	LAMPIRAN E DOKUMENTASI KEGIATAN	127
	LAMPIRAN F KEPDIRJEN MINERBA NO. 17.K/HK.02/DJB.S/2023	131
	LAMPIRAN G PERBIG BIG NO. 6 TAHUN 2018.....	134
	LAMPIRAN H ASTM D6172-98.....	138

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu	8
2. Ketelitian Geometrik Peta	21
3. Perangkat keras	28
4. Perangkat lunak	29
5. Data penelitian	30
6. Parameter terbang UAV	31
7. <i>Workflow</i> pengolahan foto udara UAV	37
8. Parameter proses <i>align photos</i>	39
9. Parameter proses <i>build dense cloud</i>	42
10. Parameter proses <i>build mesh</i>	43
11. Parameter proses <i>build orthomosaic</i>	44
12. Koordinat <i>base</i>	56
13. Hasil pengolahan GNSS PPK	59
14. Hasil proses <i>align photos</i>	62
15. Nilai <i>error</i> GCP	64
16. Hasil proses <i>build dense cloud</i>	67
17. Resolusi <i>orthomosaic</i>	70
18. Nilai RMSE horizontal dan RMSE vertikal	81
19. Nilai CE90 dan LE90	83
20. Waktu pemrosesan pada tingkat pemrosesan <i>high</i>	86
21. Waktu pemrosesan pada tingkat pemrosesan <i>medium</i>	87
22. Waktu pemrosesan pada tingkat pemrosesan <i>low</i>	89
23. Persentase efisiensi waktu pemrosesan	90
24. Hasil perhitungan dan selisih volume	93
25. Evaluasi kinerja tingkat pemrosesan berdasarkan parameter ketelitian,	

persentase selisih volume, dan efisiensi waktu pemrosesan	97
26. <i>Report</i> Hasil Pengolahan GNSS PPK	109
27. Koordinat titik GCP	115
28. Koordinat titik ICP hasil pengukuran	116
29. Koordinat titik ICP hasil pemodelan fotogrametri tingkat pemrosesan <i>high</i>	116
30. Koordinat titik ICP hasil pemodelan fotogrametri tingkat pemrosesan <i>medium</i>	117
31. Koordinat titik ICP hasil pemodelan fotogrametri tingkat pemrosesan <i>low</i>	117
32. Perhitungan nilai RMSE, CE90, dan LE90 tingkat pemrosesan <i>high</i>	118
33. Perhitungan nilai RMSE, CE90, dan LE90 tingkat pemrosesan <i>medium</i>	118
34. Perhitungan nilai RMSE, CE90, dan LE90 tingkat pemrosesan <i>low</i>	119

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Visualisasi perhitungan volume metode <i>Cut and Fill Triangular Prism</i>	18
2. Lokasi penelitian.	24
3. Alur kerja penelitian.	25
4. Proses konversi data ke dalam format RINEX.	34
5. <i>Drone data processing</i>	35
6. <i>Geotagging</i> foto udara.	36
7. Alur pengolahan data foto udara UAV.	36
8. Persebaran titik GCP.	40
9. Proses penandaan titik GCP.	40
10. Parameter <i>optimize camera alignment</i>	41
11. Proses perhitungan nilai RMSE.	45
12. Pemotongan <i>boundary area</i>	46
13. <i>Noise</i> pada <i>point cloud</i>	47
14. <i>Point cloud</i> yang belum dilakukan klasifikasi.	47
15. Hasil klasifikasi otomatis.	48
16. Hasil klasifikasi <i>point cloud</i>	49
17. Alur perhitungan volume batubara.	50
18. Pembentukan DTM.	51
19. <i>Boundary area</i> hasil digitasi.	51
20. Proses perhitungan volume.	52
21. Jarak <i>base</i> dan <i>StockROM A2</i>	57
22. Hasil pengolahan GNSS PPK.	58
23. <i>Sparse point cloud</i> tingkat pemerosesan <i>high</i>	60
24. <i>Sparse point cloud</i> tingkat pemerosesan <i>medium</i>	61

25. <i>Sparse point cloud</i> tingkat pemrosesan <i>low</i>	61
26. Persebaran titik GCP.....	63
27. <i>Dense point cloud</i> tingkat pemrosesan <i>high</i>	66
28. <i>Dense point cloud</i> tingkat pemrosesan <i>medium</i>	66
29. <i>Dense point cloud</i> tingkat pemrosesan <i>low</i>	67
30. <i>Orthomosaic</i> tingkat pemrosesan <i>high</i>	69
31. <i>Orthomosaic</i> tingkat pemrosesan <i>medium</i>	69
32. <i>Orthomosaic</i> tingkat pemrosesan <i>low</i>	70
33. <i>Noise</i> pada tingkat pemrosesan <i>high</i>	71
34. <i>Noise</i> pada tingkat pemrosesan <i>medium</i>	72
35. <i>Noise</i> pada tingkat pemrosesan <i>low</i>	72
36. Klasifikasi <i>ground point</i> otomatis tingkat pemrosesan <i>high</i>	73
37. Klasifikasi <i>ground point</i> otomatis tingkat pemrosesan <i>medium</i>	74
38. Klasifikasi <i>ground point</i> otomatis tingkat pemrosesan <i>low</i>	74
39. Klasifikasi <i>ground point</i> tingkat pemrosesan <i>high</i>	76
40. Klasifikasi <i>ground point</i> tingkat pemrosesan <i>medium</i>	76
41. Klasifikasi <i>ground point</i> tingkat pemrosesan <i>low</i>	77
42. DTM tingkat pemrosesan <i>high</i>	79
43. DTM tingkat pemrosesan <i>medium</i>	79
44. DTM tingkat pemrosesan <i>low</i>	80
45. Grafik perbandingan nilai CE90 dan LE90.....	85
46. Grafik persentase efisiensi waktu pemrosesan.....	92
47. Grafik persentase selisih volume.	94
48. Persebaran titik ICP	115
49. Report hasil perhitungan volume tingkat pemrosesan <i>high</i>	120
50. Report hasil perhitungan volume tingkat pemrosesan <i>medium</i>	120
51. Report hasil perhitungan volume tingkat pemrosesan <i>low</i>	121
52. DTM topografi awal area <i>StockROM A2</i>	123
53. Data timbangan batubara.	123
54. Data densitas batubara.	124
55. Surat permohonan izin pengambilan data.....	126
56. Persiapan alat.	128

57. Pengukuran base GNSS metode statik.....	128
58. Akuisisi data foto udara.	129
59. Pengukuran titik GCP dan ICP.	129
60. Pengolahan data.	130

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambangan batubara merupakan salah satu sektor strategis di Indonesia yang berperan penting dalam penyediaan energi nasional serta memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian daerah dan negara (Irham dkk., 2024; Lesmana dkk., 2022; Purba dkk., 2025). Kegiatan pertambangan batubara meliputi eksplorasi, penambangan, pengolahan, penyimpanan sementara, dan pengangkutan ke konsumen (Satriawan, 2021; Sufi dkk., 2023). Setiap tahapan kegiatan tersebut memerlukan pengelolaan data produksi yang akurat untuk mendukung pengendalian operasional dan pelaporan perusahaan (Sinaga & Oktavianor, 2025).

Pengukuran volume batubara pada area penyimpanan sementara merupakan aspek penting dalam kegiatan pertambangan batubara sebelum material tersebut diproses lebih lanjut atau didistribusikan (Maulana & Kuncoro, 2025; Setyawan & Susilo, 2025). Material hasil penambangan umumnya disimpan sementara pada area *Run of Mine* (ROM) atau *StockROM* (Aldiansyah dkk., 2024; Fansya dkk., 2022; Harsiga dkk., 2024; Samosir dkk., 2018). *StockROM* berperan sebagai penghubung antara aktivitas penambangan dan distribusi, sehingga memiliki peran penting dalam memastikan aliran produksi tetap berjalan lancar (Maulana & Kuncoro, 2025; Setyawan & Susilo, 2025). Ketelitian hasil perhitungan volume batubara pada area *stockROM* menjadi faktor krusial karena kesalahan estimasi volume dapat berdampak pada perencanaan produksi dan pengawasan material di lapangan (Setyawan & Susilo, 2025).

Aspek ketelitian menjadi salah satu faktor penting dalam kegiatan operasional pertambangan, sementara ketersediaan data volume dalam waktu yang relatif

singkat merupakan syarat utama dalam mendukung kegiatan tersebut (Sarmidi dkk., 2023). Data volume batubara digunakan sebagai dasar perhitungan produksi yang dilakukan secara berkala, termasuk dalam proses pembayaran kepada kontraktor pada setiap periode tertentu (Autume et al., 2020; Baruna, 2021; Maulana & Kuncoro, 2025). Keterlambatan penyediaan data volume berpotensi mengganggu proses pengambilan keputusan teknis, terutama dalam aktivitas pemantauan stok batubara yang bersifat dinamis (Autume et al., 2020; Orzeł et al., 2025). Metode survei terestris yang umum digunakan memiliki tingkat ketelitian yang baik, namun membutuhkan waktu pelaksanaan dan pengolahan data yang relatif lama sehingga kurang efisien untuk kebutuhan operasional yang menuntut kecepatan (Maulana & Kuncoro, 2025; Model dkk., 2021; Setyawan & Susilo, 2025).

Pemanfaatan wahana udara tanpa awak atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dengan metode fotogrametri merupakan alternatif untuk memperoleh data spasial secara cepat di area yang luas (Aji & Djurdjani, 2022; Auningsih dkk., 2021; Dhakal et al., 2025). Data foto udara hasil akuisisi UAV dapat diolah menjadi model permukaan tiga dimensi yang digunakan sebagai dasar perhitungan volume batubara (Aji & Djurdjani, 2022; Budiyo, 2025; Kristianie dkk., 2023). Proses pengolahan data foto udara UAV membutuhkan waktu dan kapasitas komputasi yang bervariasi, bergantung pada parameter dan tingkat pengolahan yang diterapkan pada perangkat lunak fotogrametri (Aji & Djurdjani, 2022; Guimar et al., 2020).

Perangkat lunak fotogrametri menyediakan beberapa tingkat pemrosesan foto udara UAV, yaitu *high*, *medium*, dan *low*, yang menghasilkan karakteristik *point cloud* dan model permukaan yang berbeda (Aji dkk., 2019; Kristianie dkk., 2023). Perbedaan tingkat pemrosesan tersebut menyebabkan variasi kepadatan data dan detail representasi bentuk *stockROM* yang berpengaruh terhadap ketelitian hasil perhitungan volume batubara (Aji & Djurdjani, 2022; Tucci et al., 2019). Tingkat pemrosesan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan model dengan detail yang lebih baik, sedangkan tingkat pemrosesan yang lebih rendah menghasilkan data dengan kepadatan yang lebih rendah (Syam & Usman, 2025).

Dalam praktik operasional pertambangan, pemilihan tingkat pemrosesan foto udara UAV perlu mempertimbangkan keseimbangan antara ketelitian hasil perhitungan volume dan efisiensi waktu pemrosesan data (Dhakal dkk., 2025; Syam & Usman, 2025). Cwiakala dkk. (2026) menyatakan bahwa penggunaan tingkat pemrosesan *high* masih umum diterapkan karena dianggap paling teliti, meskipun membutuhkan waktu pemrosesan dan sumber daya komputasi yang lebih besar, sejalan dengan temuan Syam & Usman (2025). Fokus penggunaan tingkat pemrosesan *high* tersebut menyebabkan aspek efisiensi pemrosesan sering kali kurang diperhatikan dalam kegiatan operasional yang menuntut ketersediaan data secara cepat.

Tingkat pemrosesan *medium* dan *low* berpotensi menghasilkan waktu pemrosesan yang lebih singkat dengan kebutuhan sumber daya komputasi yang lebih rendah dibandingkan tingkat pemrosesan *high*. Namun, kajian yang membahas perbandingan tingkat pemrosesan *high*, *medium*, dan *low* terhadap ketelitian hasil perhitungan volume batubara masih terbatas (Nagy et al., 2024). Keterbatasan kajian tersebut menyebabkan dalam pemilihan tingkat pemrosesan foto udara UAV yang tidak hanya mempertimbangkan ketelitian, tetapi juga efisiensi waktu dan kapasitas pemrosesan, belum terbentuk secara jelas dalam konteks operasional pertambangan. Penggunaan data timbangan sebagai data validasi diperlukan untuk menilai keandalan hasil estimasi volume batubara yang dihasilkan dari fotogrametri UAV karena data tersebut digunakan sebagai acuan operasional dalam perhitungan produksi batubara (Aji & Djurdjani, 2022; Kristianie dkk., 2023; Setyawan & Susilo, 2025).

Penelitian ini dilakukan pada area *StockROM A2 PT. Budi Gema Gempita Coal Mine – Site Lahat* untuk menganalisis perbandingan tingkat pemrosesan foto udara UAV terhadap akurasi estimasi volume batubara dengan mempertimbangkan efisiensi waktu pemrosesan menggunakan validasi data timbangan. Analisis ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam memilih tingkat pemrosesan yang sesuai dengan kebutuhan operasional, yaitu menghasilkan data volume yang cepat tersedia dan tetap memiliki tingkat akurasi yang dapat diterima.

1.2 Rumusan Masalah

Kegiatan operasional pertambangan batubara membutuhkan data volume yang akurat dan cepat, terutama pada area *StockROM* yang dinamis. Pemrosesan foto udara UAV umumnya menggunakan tingkat *high* karena dianggap lebih teliti, namun tingkat pemrosesan tersebut memerlukan waktu pemrosesan yang lebih lama. Tingkat pemrosesan *medium* dan *low* menawarkan waktu pemrosesan yang lebih singkat, tetapi tingkat akurasi hasilnya belum banyak dikaji secara komprehensif.

Kondisi tersebut menunjukkan belum adanya acuan yang jelas mengenai tingkat pemrosesan UAV yang paling sesuai untuk menghasilkan estimasi volume batubara yang akurat dan efisien berdasarkan validasi data timbangan.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini dirumuskan ke dalam beberapa pertanyaan penelitian. Adapun pertanyaan penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perbedaan ketelitian geometrik hasil pemrosesan foto udara UAV pada tingkat pemrosesan *high*, *medium*, dan *low* berdasarkan parameter RMSE, CE90, dan LE90?
2. Bagaimana perbedaan waktu pemrosesan sebagai indikator efisiensi pada pemrosesan foto udara UAV tingkat *high*, *medium*, dan *low* dalam pengolahan data volume batubara?
3. Bagaimana perbedaan hasil estimasi volume batubara pada pemrosesan foto udara UAV tingkat *high*, *medium*, dan *low* berdasarkan validasi terhadap data timbangan?
4. Tingkat pemrosesan manakah yang paling optimal dalam menghasilkan estimasi volume batubara dengan mempertimbangkan ketelitian geometrik, efisiensi waktu pemrosesan, dan validasi volume?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis perbedaan ketelitian geometrik hasil pemrosesan foto udara UAV tingkat pemrosesan *high*, *medium*, dan *low* berdasarkan parameter RMSE, CE90, dan LE90.
2. Menganalisis perbedaan waktu pemrosesan sebagai indikator efisiensi pada pemrosesan foto udara UAV tingkat *high*, *medium*, dan *low* dalam pengolahan data volume batubara.
3. Menganalisis perbedaan hasil estimasi volume batubara pada pemrosesan foto udara UAV tingkat *high*, *medium*, dan *low* berdasarkan validasi terhadap data timbangan.
4. Menentukan tingkat pemrosesan yang paling optimal dalam menghasilkan estimasi volume batubara dengan mempertimbangkan ketelitian geometrik, efisiensi waktu pemrosesan, dan validasi volume.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Agar penelitian ini tetap terfokus serta selaras dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian berada pada area *StockROM A2* PT. Budi Gema Gempita *Coal Mine – Site Lahat*.
2. Objek penelitian berupa estimasi volume batubara menggunakan metode fotogrametri UAV.
3. Akuisisi data dilakukan menggunakan foto udara UAV metode *Post-Processed Kinematic* (PPK) serta pengukuran GCP dan ICP menggunakan GNSS metode *Real Time Kinematic* (RTK), dengan jumlah 6 titik GCP dan 12 titik ICP.
4. Pengolahan data fotogrametri dilakukan menggunakan perangkat lunak dengan tingkat kualitas pemrosesan *high*, *medium*, dan *low*, yang berasal dari pengaturan pada perangkat lunak, dengan data dan cakupan area yang sama.

5. Proses fotogrametri dilakukan menggunakan pendekatan *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi View Stereo* (MVS) hingga tahap pembentukan *orthomosaic*.
6. Perhitungan estimasi volume dilakukan menggunakan metode *cut and fill between DTMs*.
7. Konversi volume batubara dari satuan meter kubik (m³) ke satuan ton dilakukan menggunakan data densitas batubara yang diperoleh dari laporan perusahaan.
8. Uji ketelitian geometrik dilakukan dengan mengacu pada standar ketelitian peta skala 1:1000 sesuai Kepdirjen Minerba No. 17.K/HK.02/DJB.S/2023 menggunakan parameter RMSE, CE90, dan LE90 berdasarkan titik ICP yang kemudian dibandingkan dengan klasifikasi ketelitian menurut Peraturan BIG No. 6 Tahun 2018.
9. Validasi hasil estimasi volume dilakukan dengan membandingkan terhadap data timbangan batubara sebagai data operasional, dengan mengacu pada standar ASTM D6172-98 yang mensyaratkan selisih maksimum sebesar 2%.
10. Analisis efisiensi dilakukan berdasarkan perbandingan total waktu pemrosesan pada masing-masing tingkat pemrosesan, dihitung sejak pengolahan data *base* lokal hingga diperolehnya nilai estimasi volume batubara, dengan waktu pada tingkat pemrosesan *high* digunakan sebagai acuan perbandingan efisiensi.
11. Penelitian ini tidak membahas spesifikasi UAV, kualitas batubara, perencanaan tambang, maupun aspek ekonomi pertambangan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini antara lain sebagai berikut:

a. Bagi Perusahaan Pertambangan

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi PT. Budi Gema Gempita *Coal Mine – Site* Lahat dalam menentukan tingkat pemrosesan foto udara UAV yang tepat untuk perhitungan volume batubara di area *stockROM*. Informasi mengenai tingkat pemrosesan yang optimal dan diharapkan dapat mendukung penyediaan data volume yang cepat dan akurat

bagi pengendalian produksi, manajemen stok, dan pengambilan keputusan operasional.

b. Bagi Akademisi dan Peneliti

Penelitian ini diharapkan dapat menambah referensi ilmiah di bidang geodesi dan fotogrametri UAV, khususnya terkait variasi tingkat pemrosesan foto udara UAV terhadap akurasi dan efisiensi perhitungan volume batubara. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya yang membahas hubungan antara tingkat pemrosesan fotogrametri, akurasi hasil pengukuran, dan efisiensi waktu pemrosesan dalam pemetaan menggunakan UAV.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada beberapa penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan topik kajian. Penelitian-penelitian tersebut digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk memperkuat pemahaman penulis terhadap permasalahan yang dibahas serta sebagai dasar dalam penyusunan dan pengembangan penelitian ini. Uraian mengenai penelitian terdahulu yang relevan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
1.	Setyawan & Susilo, 2025	Analisis Perbandingan Volume <i>Stockpile</i> Batu Bara Hasil UAV LiDAR Dan Hasil Penimbangan (Studi Kasus PT. Hardaya Mining Energy, <i>Site</i> Sebakis, Nunukan, Kalimantan Utara)	Perhitungan volume <i>stockpile</i> menggunakan UAV LiDAR dengan metode DTM <i>cut and fill</i> di Surpac lalu divalidasi dengan data timbangan.	Perhitungan volume <i>stockpile</i> batubara menggunakan UAV LiDAR menghasilkan 134.333,038 ton, sementara data timbangan menunjukkan 136.196,663 ton, dengan selisih 1.863,625 ton (1,39%), masih di bawah batas toleransi ASTM 2%, sehingga metode UAV LiDAR dinyatakan akurat dan layak digunakan.

(Lanjutan) Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
2.	Kristianie dkk., 2023	Perhitungan Volume Timbunan Batubara Menggunakan <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (UAV) Di PT. Mitra Barito Lumbung Energi Site PT. Kalimantan Prima Nusantara (KPN)	Fotogrametri UAV dengan variasi ketinggian 30 m dan 60 m serta kualitas <i>low</i> , <i>medium</i> , <i>high</i> serta uji ketelitian RMSE, CE90, LE90 (acuan BIG 2018) dan perhitungan volume metode <i>cross section</i> dengan validasi data timbangan,	Hasil perhitungan volume timbunan batubara menggunakan UAV menghasilkan volume sebesar 11.409,3 m ³ , sedangkan data timbangan menunjukkan volume sebesar 10.912,497 m ³ . Selisih antara kedua metode sebesar 496,803 m ³ atau 4,35%, yang masih berada dalam batas toleransi perusahaan (<5%), sehingga metode UAV dinyatakan layak digunakan untuk perhitungan volume timbunan batubara.
3.	Budiyono, 2025	Analisis Perubahan Volume Lahan Pasca Kegiatan Galian Berbasis UAV dengan Evaluasi DEMNAS sebagai Permukaan Awal	UAV-SfM dengan GCP GNSS statik, filtering CSF untuk membentuk DTM, dan perhitungan volume metode TIN. Evaluasi akurasi menggunakan CE90 dan LE90.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi UAV-GNSS mampu menghasilkan orthophoto dan DTM berakurasi tinggi. Perbandingan DTM dengan DEMNAS menghasilkan selisih volume sebesar 13.355,72 m ³ . Evaluasi ketidakpastian volume menunjukkan nilai $\pm 110,1$ m ³ atau ketelitian relatif sekitar 0,82%, yang menandakan bahwa metode ini cukup andal untuk perhitungan volume.

(Lanjutan) Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
4.	Maulana & Kuncoro, 2025	Evaluasi Pendekatan Hybrid Dalam Pengukuran Volume Stockpile Batubara Menggunakan UAV, GNSS RTK dan Total Station	Penelitian membandingkan UAV, GNSS RTK, dan Total Station. Data UAV diolah dengan fotogrametri, volume dihitung menggunakan metode <i>cut-and-fill</i> . Evaluasi mencakup akurasi, efisiensi, dan kendala teknis.	Metode UAV menghasilkan deviasi volume yang relatif kecil, yaitu -1,19% terhadap GNSS RTK dan -1,13% terhadap Total Station, dengan $RMSE \leq 1,73$ cm. UAV juga lebih efisien dengan waktu akuisisi sekitar 30 menit dan 2 personel, dibandingkan GNSS RTK dan Total Station yang memerlukan waktu serta personel lebih banyak. Oleh karena itu, UAV direkomendasikan sebagai metode utama dengan validasi menggunakan GNSS atau Total Station.
5.	Aji & Djurdjani, 2022	Analisis Perbandingan Volume Stockpile Batu Bara Hasil UAV Fotogrametri dan UAV Lidar	Perbandingan perhitungan volume stockpile batubara menggunakan UAV fotogrametri dan UAV LiDAR melalui pembentukan DTM serta uji volumetrik ASTM D6172-98.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa perhitungan volume menggunakan UAV LiDAR memenuhi toleransi standar dengan ASTM persentase selisih sebesar 1,426%, sedangkan UAV fotogrametri memiliki persentase selisih sebesar 2,338% sehingga tidak memenuhi batas toleransi.

(Lanjutan) Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis dan Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
6.	Damai, 2026	Kajian Tingkat Pemrosesan Foto Udara UAV Terhadap Akurasi Dan Efisiensi Estimasi Volume Batubara Berdasarkan Validasi Data Timbangan	Perbandingan tingkat pemrosesan UAV (<i>high, medium, low</i>) dengan perhitungan volume metode <i>cut and fill between DTMs</i> , evaluasi ketelitian (RMSE, CE90, LE90, dan uji validasi data timbangan), serta analisis efisiensi berdasarkan waktu pemrosesan.	Hasil uji menunjukkan tingkat pemrosesan <i>high</i> memiliki terbaik (RMSEr 0,0208 m; RMSEz 0,0258 m) dan selisih volume 1,6% (memenuhi standar). Tingkat pemrosesan <i>medium</i> (3,4%) dan tingkat pemrosesan <i>low</i> (3,7%) tidak memenuhi standar. Tingkat pemrosesan <i>high</i> yang paling optimal.

Tabel penelitian terdahulu menunjukkan bahwa teknologi UAV telah banyak digunakan dalam perhitungan volume *stockpile* batubara karena mampu menghasilkan ketelitian yang baik dan efisiensi waktu dibanding metode survei konvensional. Penelitian Setyawan & Susilo (2025) serta Aji dan Djurdjani (2022) menunjukkan bahwa UAV LiDAR mampu memenuhi toleransi ASTM dengan selisih volume di bawah 2%. Penelitian Kristianie dkk. (2023) dan Budiyo (2025) menunjukkan bahwa UAV fotogrametri juga dapat digunakan untuk estimasi volume dengan ketelitian yang cukup baik melalui pembentukan DTM dan metode *cut and fill*. Penelitian Maulana dan Kuncoro (2025) menunjukkan bahwa metode UAV lebih efisien dibanding GNSS RTK dan *Total Station* dari segi waktu maupun kebutuhan personel.

Penelitian ini memiliki keterkaitan dengan penelitian terdahulu karena sama-sama memanfaatkan teknologi UAV untuk estimasi volume *stockpile* batubara

menggunakan pendekatan DTM dan metode cut and fill serta melakukan validasi terhadap data operasional perusahaan. Penelitian ini juga mengacu pada standar ketelitian geometrik dan validasi volume sebagaimana digunakan pada penelitian sebelumnya, seperti penggunaan parameter RMSE, CE90, LE90, serta toleransi ASTM D6172-98. Perbedaan utama penelitian ini terletak pada fokus analisis tingkat kualitas pemrosesan foto udara UAV, yaitu *high*, *medium*, dan *low*, terhadap akurasi geometrik, estimasi volume batubara, dan efisiensi waktu pemrosesan. Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada perbandingan antar metode survei, perbedaan sensor, maupun integrasi data UAV dengan survei terestris, sedangkan penelitian ini menitikberatkan pada variasi tingkat pemrosesan dalam perangkat lunak fotogrametri terhadap kualitas hasil estimasi volume dan efisiensi pengolahan data.

2.2 Pertambangan Batubara

Pertambangan batubara merupakan kegiatan usaha yang meliputi tahapan eksplorasi, eksploitasi, pengolahan, hingga pemasaran sebagai komoditas energi dan industri (Satriawan, 2021; Sufi dkk., 2023). Batubara sebagai sumber daya alam tidak terbarukan memiliki peran strategis dalam penyediaan energi nasional, khususnya sebagai bahan bakar PLTU dan industri semen (Afin & Kiono, 2021).

Di Indonesia, penambangan batubara umumnya dilakukan dengan metode tambang terbuka (*open pit mining*) karena karakteristik endapan yang relatif dangkal dan ekonomis (Pranajati & Ananda, 2023). Metode ini mencakup pengupasan tanah penutup (*overburden removal*), pengambilan batubara, serta pengangkutan menuju area penimbunan sementara atau fasilitas pengolahan (Maulana & Kuncoro, 2025).

Dalam operasionalnya, kegiatan produksi dan distribusi batubara harus dikendalikan melalui perencanaan teknis, pengaturan alat berat, serta pengelolaan material agar jumlah yang ditambang, ditimbun, dan dipasarkan tetap terkendali, sehingga stabilitas produksi dan pelaporan perusahaan dapat terjaga (Maulana & Kuncoro, 2025).

2.3 *StockROM*

StockROM merupakan area yang digunakan untuk menyimpan sementara batubara yang telah ditambang sebelum diolah lebih lanjut atau dikirim ke konsumen (Aldiansyah dkk., 2024; Fansya dkk., 2022; Harsiga dkk., 2024; Samosir dkk., 2018). *StockROM* berfungsi sebagai penghubung antara proses penambangan dan distribusi sehingga mendukung kelancaran produksi serta pengendalian ketersediaan material sesuai rencana produksi (Fansya dkk., 2022; Setyawan & Susilo, 2025).

Material batubara yang disimpan di *stockROM* umumnya berbentuk tumpukan dengan permukaan tidak rata dan bersifat dinamis, sehingga perubahan bentuk dan volume dapat terjadi akibat aktivitas penambahan maupun pengurangan material (Aji & Djurdjani, 2022; Setyawan & Susilo, 2025). Perubahan Kondisi tersebut menyebabkan pemantauan *stockROM* perlu dilakukan secara berkala agar data volume yang tersedia tetap mencerminkan kondisi aktual di lapangan (Setyawan & Susilo, 2025).

Pengukuran volume *stockROM* batubara merupakan aspek krusial dalam operasional pertambangan karena berfungsi sebagai dasar pelaporan produksi, perencanaan logistik, dan pengendalian cadangan material (Maulana & Kuncoro, 2025; Setyawan & Susilo, 2025). Seiring perkembangan teknologi, pengukuran tidak hanya menggunakan metode terestris seperti *Total Station* atau *GNSS*, tetapi juga memanfaatkan UAV yang mampu menyediakan data spasial secara cepat dan detail untuk perhitungan volume (Aji & Djurdjani, 2022).

2.4 Fotogrametri UAV

Fotogrametri merupakan perpaduan seni, ilmu, dan teknologi untuk memperoleh informasi objek melalui perekaman dan interpretasi citra fotografi atau gelombang elektromagnetik (Auningsih dkk., 2021). Metode ini memungkinkan pengukuran tiga dimensi objek berdasarkan citra dua dimensi (Alsayed & Nabawy, 2023).

Fotogrametri UAV memanfaatkan *Unmanned Aerial Vehicle* sebagai wahana pemotretan untuk menghasilkan foto udara resolusi tinggi yang mendukung pemetaan dan analisis spasial secara efisien (Abdalla dkk., 2025; Harfan dkk., 2020; Model dkk., 2021). Prinsip dasar fotogrametri UAV didasarkan pada akuisisi citra bertumpang tindih sehingga objek permukaan bumi dapat direkonstruksi secara tiga dimensi melalui pencocokan fitur antar foto (Hermann et al., 2024).

Dalam metode fotogrametri UAV, salah satu teknik penentuan posisi yang banyak digunakan adalah *Post-Processed Kinematic* (PPK). Metode ini merupakan teknik berbasis GNSS yang melakukan koreksi koordinat setelah penerbangan menggunakan data dari *base station* yang direkam secara simultan (Ahmad dkk., 2024). Proses pasca pengolahan tersebut memungkinkan peningkatan ketelitian hingga tingkat sentimeter karena kesalahan orbit, atmosfer, dan ambiguitas fase dapat dikoreksi secara lebih optimal (Ahmad dkk., 2024).

Dalam pemrosesan fotogrametri UAV, teknik utama yang digunakan adalah *Structure from Motion* (SfM) untuk membentuk model tiga dimensi awal berupa *sparse point cloud* dari serangkaian citra yang saling bertumpang tindih melalui pencocokan titik-titik fitur (Sambodo, 2023). Tahap selanjutnya dilakukan menggunakan *Multi-View Stereo* (MVS) untuk meningkatkan kerapatan titik sehingga dihasilkan *dense point cloud* yang lebih detail dan menjadi dasar dalam pembentukan model elevasi permukaan (Aji & Ilmawan, 2025).

2.5 Point Cloud

Point cloud merupakan kumpulan titik tiga dimensi yang merepresentasikan posisi objek di ruang dengan koordinat X, Y, dan Z, yang diperoleh dari akuisisi data terestris maupun citra udara (Ramadhani dkk., 2021). Dalam fotogrametri UAV, *point cloud* dibentuk melalui rekonstruksi tiga dimensi menggunakan algoritma *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi-View Stereo* (MVS) (Aji & Ilmawan, 2025). *Point cloud* terdiri atas *sparse point cloud* sebagai dasar orientasi kamera dan *dense point cloud* yang memiliki kerapatan tinggi untuk merepresentasikan

detail permukaan objek secara lebih akurat (Aji & Ilmawan, 2025). Kerapatan dan kualitas *point cloud* sangat memengaruhi tingkat detail serta ketelitian informasi spasial yang dihasilkan.

Kualitas *point cloud* dipengaruhi oleh resolusi dan geometri citra, tingkat *overlap*, konfigurasi kamera, serta parameter pemrosesan SfM–MVS, di mana citra dan *overlap* yang baik dapat meningkatkan kerapatan serta representativitas titik permukaan (Bani, 2022). Dalam proses pengolahan, *point cloud* sering mengandung *noise* yang berasal dari objek *non* target seperti vegetasi, bayangan, atau bangunan, sehingga diperlukan proses *filtering* untuk menghilangkan titik-titik *outlier* agar data lebih bersih dan representatif terhadap permukaan sebenarnya (Aji & Ilmawan, 2025; Gou et al., 2026). *Point cloud* yang telah difilter menjadi dasar utama dalam pembentukan model permukaan seperti *Digital Terrain Model* (DTM), di mana kualitas *point cloud* sangat menentukan ketelitian hasil interpolasi dan akurasi model permukaan yang dihasilkan (Aji & Ilmawan, 2025; Bani, 2022).

2.6 *Digital Terrain Model* (DTM)

Digital Terrain Model (DTM merupakan representasi digital permukaan tanah yang menyajikan informasi ketinggian tanah asli dengan mengecualikan objek di atasnya, seperti bangunan, vegetasi, dan infrastruktur, sehingga menggambarkan kondisi permukaan tanah murni untuk keperluan pemetaan dan analisis topografi (Fakih dkk., 2025; Matong, 2021). DTM berbeda dengan *Digital Surface Model* (DSM) yang merepresentasikan ketinggian seluruh objek di permukaan, karena DTM hanya memfokuskan pada lapisan tanah sebenarnya (Assidiq & Febriandi, 2025).

Pembentukan DTM dari data UAV diawali dengan akuisisi citra udara yang diproses menjadi *dense point cloud* menggunakan teknik fotogrametri seperti *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi-View Stereo* (MVS), kemudian dilakukan klasifikasi untuk memisahkan titik permukaan tanah dari objek *non*-tanah melalui metode penyaringan seperti *ground filtering* (Aji & Ilmawan, 2025; Gou et al.,

2026). Hasil klasifikasi tersebut selanjutnya digunakan untuk membangun permukaan DTM dengan metode *Triangular Irregular Network* (TIN) (Aji & Djurdjani, 2022).

DTM berperan penting dalam perhitungan volume material karena berfungsi sebagai permukaan referensi atau *baseline* dalam estimasi perubahan topografi, khususnya pada metode *cut and fill* untuk menghitung selisih elevasi antara kondisi eksisting dan permukaan desain atau target (Assidiq & Febriandi, 2025; Setyawan & Susilo, 2025).

2.7 Tingkat Pemrosesan Foto Udara UAV

Tingkat pemrosesan foto udara UAV adalah pengaturan kualitas pemrosesan yang digunakan dalam perangkat lunak fotogrametri untuk menghasilkan produk 3D seperti *point cloud* dan model permukaan, yang memengaruhi detail yang dihasilkan dan waktu pemrosesan (Pinatik & Papilaya, 2024). Tingkat pemrosesan ini umumnya dibagi menjadi rendah (*low*), menengah (*medium*), dan tinggi (*high*) yang mencerminkan konfigurasi parameter seperti skala citra, kerapatan titik, dan kecermatan algoritma rekonstruksi (Kristianie dkk., 2023).

Tingkat pemrosesan *low* menghasilkan *point cloud* dengan kerapatan dan detail rendah tetapi membutuhkan waktu pemrosesan yang lebih singkat, sedangkan tingkat *medium* menyeimbangkan ketelitian dan efisiensi waktu dengan kerapatan titik yang lebih representatif (Nagy et al., 2024). Tingkat pemrosesan *high* menghasilkan *point cloud* dengan kerapatan titik sangat tinggi dan detail maksimal, namun memerlukan waktu pemrosesan serta sumber daya komputasi yang lebih besar (Nagy et al., 2024).

2.8 Densitas Batubara

Densitas batubara merupakan besaran yang menyatakan perbandingan antara massa dan volume batubara dalam suatu kondisi tertentu (Samudro dkk., 2023). Besaran

ini menggambarkan karakteristik fisik batubara yang berkaitan dengan tingkat kepadatan material dalam suatu timbunan. Nilai densitas dipengaruhi oleh ukuran butir, tingkat pemadatan, kadar air, serta komposisi material sehingga nilainya dapat bervariasi pada setiap lokasi dan kondisi penimbunan (SM dkk., 2024).

Densitas batubara berperan penting dalam proses konversi volume menjadi tonase pada perhitungan cadangan maupun produksi batubara. Nilai densitas yang tepat menentukan ketelitian hasil estimasi tonase karena perbedaan densitas memberikan perbedaan langsung terhadap hasil perhitungan (Rassarandi dkk., 2015). Rumus perhitungan nilai densitas batubara mengacu pada Samudro dkk. (2023) yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots (1)$$

$$V = s^3 \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

ρ = Densitas batubara (ton/m³)

m = Massa (ton)

V = Volume (m³)

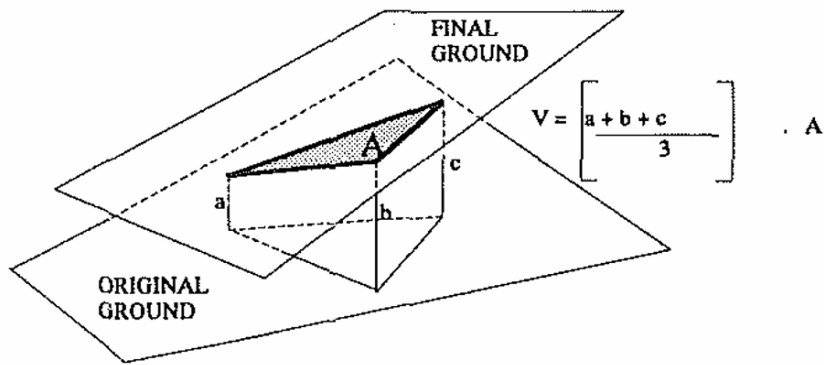
s = Sisi (m)

2.9 Perhitungan Volume Batubara

Metode *cut and fill* merupakan teknik perhitungan volume untuk menentukan jumlah material yang dipindahkan dengan membandingkan dua model permukaan, yaitu *design surface* sebagai permukaan rencana dan *base surface* sebagai permukaan referensi (Setyawan & Susilo, 2025). Dalam survei tambang, *cut* merepresentasikan material yang digali dari permukaan eksisting, sedangkan *fill* menunjukkan material yang ditimbun hingga mencapai elevasi desain (Awaliah dkk., 2025).

Perhitungan volume timbunan batubara dilakukan dengan pendekatan *cut and fill between DTMs*, yakni membandingkan *DTM base* dari laporan perusahaan dengan *DTM* hasil survei UAV untuk memperoleh selisih elevasi sebagai volume

perubahan material (Setyawan & Susilo, 2025). Berikut adalah visualisasi perhitungan volume metode *cut and fill between DTMs*.



Gambar 1. Visualisasi perhitungan volume metode *Cut and Fill Triangular Prism*.
 Sumber: Oloufa et al. (1991)

Rumus perhitungan volume menggunakan metode *Cut and Fill Triangular Prism* dalam penelitian ini mengacu pada Oloufa et al. (1991) yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$V = \left[\frac{a+b+c}{3} \right] \cdot A \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

V_i = Volume (m^3)

A_i = Luas bidang permukaan proyeksi (m^2)

a, b, c = Beda Tinggi antara permukaan *final ground* dan *original ground* pada masing-masing titik sudut segitiga (m).

Hasil volume dalam satuan meter kubik (m^3) kemudian dikonversi ke satuan ton dengan mengalikan volume terhadap densitas batubara (ρ) berdasarkan data perusahaan sehingga diperoleh estimasi tonase aktual material pada *stockROM* (SM dkk., 2024). Sebagaimana dinyatakan oleh Rassarandi dkk. (2015), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$T = V \times \rho \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

T = Tonase batubara (ton)

V = Volume batubara (m^3)

ρ = Densitas batubara (ton/m^3)

2.10 Data Timbangan

Data hasil penimbangan merupakan salah satu jenis data operasional yang krusial dalam pemantauan produksi tambang, karena memberikan informasi kuantitatif secara langsung mengenai berat material yang diangkut oleh armada *hauling* setiap hari (Yogaswara & Fawzy, 2023). Pengambilan data ini umumnya dilakukan pada *weighbridge* statis, yaitu jembatan timbang permanen di mana truk pengangkut material harus berhenti untuk dilakukan pengukuran beratnya (Sepriadi dkk., 2024).

Penentuan tonase *stockROM* batubara dilakukan dengan menghitung selisih berat kendaraan bermuatan dan kendaraan kosong, yang selanjutnya dapat dikoreksi berdasarkan kadar air untuk memperoleh tonase kering yang merepresentasikan jumlah material sesungguhnya (Setyawan & Susilo, 2025).

2.11 Uji Ketelitian Geometrik Foto Udara

Uji ketelitian geometrik foto udara merupakan proses evaluasi untuk menilai tingkat kesesuaian posisi spasial hasil pemetaan foto udara terhadap kondisi sebenarnya di lapangan berdasarkan parameter statistik tertentu (Silaban dkk., 2025). Pengujian ini bertujuan memastikan produk fotogrametri, seperti *orthophoto*, DSM, dan DTM, telah memenuhi standar ketelitian peta sesuai dengan Peraturan Kepala BIG No. 6 Tahun 2018 tentang Pedoman Teknik Ketelitian Peta Dasar.

Ketelitian geometrik sangat dipengaruhi oleh penggunaan *Ground Control Point* (GCP) sebagai referensi koordinat dalam proses georeferensi dan orientasi model fotogrametri, sehingga mampu mengurangi kesalahan geometrik dan meningkatkan kesesuaian posisi hasil pemetaan terhadap kondisi sebenarnya di lapangan (Prayogo dkk., 2020). Selain penggunaan *Ground Control Point* (GCP), *Independent Check*

Point (ICP) digunakan secara terpisah untuk menguji dan memverifikasi ketelitian hasil pemetaan secara independen (Silaban dkk., 2025).

Perbedaan koordinat antara hasil pemetaan foto udara dan koordinat referensi pada titik ICP digunakan untuk menghitung nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebagai indikator utama ketelitian geometri (Silaban dkk., 2025). RMSE horizontal (RMSE_x) digunakan untuk menilai ketelitian posisi planimetris, sedangkan RMSE vertikal (RMSE_z) digunakan untuk mengevaluasi ketelitian elevasi model permukaan (Prayogo dkk., 2020).

Rumus RMSE yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih koordinat hasil pemetaan dan koordinat referensi pada titik uji, baik untuk komponen horizontal maupun vertikal, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (5) sampai dengan persamaan (7).

$$\text{RMSE}_{\text{horizontal}} = \sqrt{\frac{D^2}{n}} \dots\dots\dots (5)$$

$$D^2 = \sqrt{\text{RMSE}_x^2 + \text{RMSE}_y^2} = \sqrt{\frac{D[(X_{\text{data}} - X_{\text{cek}})^2 + (Y_{\text{data}} - Y_{\text{cek}})^2]}{n}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{RMSE}_{\text{vertikal}} = \sqrt{\frac{D(Z_{\text{data}} - Z_{\text{cek}})^2}{n}} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

n = Jumlah total pengecekan pada peta

D = Selisih antara koordinat yang diukur di lapangan dengan koordinat di peta

x = Nilai koordinat pada sumbu X

y = Nilai koordinat pada sumbu Y

z = Nilai koordinat pada sumbu Z

Dalam uji ketelitian geometri, nilai RMSE selanjutnya dikonversi menjadi parameter *Circular Error 90%* (CE90) dan *Linear Error 90%* (LE90) untuk menyatakan batas kesalahan pada tingkat kepercayaan 90 persen (Kristianie dkk., 2023). Nilai CE90 dan LE90 yang kecil menunjukkan bahwa hasil pemetaan foto

udara memiliki tingkat ketelitian geometri yang tinggi dan layak digunakan untuk analisis spasial lanjutan (Kristianie dkk., 2023).

Perhitungan nilai CE90 dan LE90 dalam penelitian ini mengacu pada Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (8) dan (9).

$$CE90 = 1,5175 \times RMSEr \dots\dots\dots (8)$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSEz \dots\dots\dots (9)$$

Dengan:

RMSEr = *Root Mean Square Error* pada posisi x dan y (horizontal)

RMSEz = *Root Mean Square Error* pada posisi z (vertikal)

Kelas ketelitian peta foto yang dihasilkan diklasifikasi berdasarkan tabel berikut.

Tabel 2. Ketelitian Geometrik Peta

No	Skala	Interval Kontur (m)	Ketelitian Peta RBI					
			Kelas 1		Kelas 2		Kelas 3	
			Horizontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horizontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horizontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)
1.	1:1.000.000	400	300	200	600	300	900	400
2.	1:500.000	200	150	100	300	150	450	200
3.	1:250.000	100	75	50	150	75	225	100
4.	1:100.000	40	30	20	60	30	90	40
5.	1:50.000	20	15	10	30	15	45	20
6.	1:25.000	10	7,5	5	15	7,5	22,5	10
7.	1:10.000	4	3	2	6	3	9	4
8.	1:5.000	2	1,5	1	3	1,5	4,5	2
9.	1:2.500	1	0,75	0,5	1,5	0,75	2,3	1
10.	1:1.000	0,4	0,3	0,2	0,6	0,3	0,9	0,4

Sumber: PerBIG No 6 Tahun 2018

2.12 Efisiensi Pemrosesan Data

Efisiensi pemrosesan data merupakan ukuran kinerja suatu sistem dalam menyelesaikan proses pengolahan data dengan penggunaan waktu yang minimal tanpa mengurangi kualitas hasil yang dihasilkan. Konsep efisiensi ini menekankan perbandingan antara sumber daya yang digunakan dengan *output* yang diperoleh

dalam suatu proses pengolahan data (Ranggu dkk., 2022). Efisiensi pemrosesan menjadi salah satu aspek penting dalam menentukan optimalitas suatu metode pengolahan data.

Waktu pemrosesan data menjadi indikator utama dalam menilai efisiensi karena kebutuhan operasional sering menuntut ketersediaan data dalam waktu yang cepat dan tepat. Perbandingan waktu pemrosesan antar metode atau tingkat pemrosesan digunakan untuk menentukan tingkat efisiensi relatif dari masing-masing metode (Sherina dkk., 2023). Semakin singkat waktu yang dibutuhkan dalam proses pengolahan data dengan tetap mempertahankan tingkat ketelitian yang dapat diterima, maka tingkat efisiensi pemrosesan data semakin tinggi. Penelitian ini menggunakan waktu pemrosesan sebagai parameter efisiensi untuk membandingkan tingkat pemrosesan *high*, *medium*, dan *low* dalam pengolahan data fotogrametri UAV.

Menurut Sherina dkk. (2023), efisiensi waktu dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara waktu kerja yang tersedia dan waktu kerja efektif yang digunakan dalam suatu proses, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Persentase Waktu Pemrosesan} = \frac{\text{Waktu Kerja Efektif}}{\text{Waktu Kerja yang Tersedia}} \times 100\% \dots \dots (10)$$

Keterangan:

Waktu Kerja Efektif = Waktu yang dibutuhkan dalam pemrosesan data (menit)

Waktu Kerja yang Tersedia = Waktu acuan dalam pemrosesan data (menit)

Nilai efisiensi waktu pemrosesan selanjutnya dihitung berdasarkan selisih antara persentase waktu pemrosesan terhadap waktu acuan, sehingga semakin besar nilai efisiensi menunjukkan proses pengolahan yang semakin cepat. Rumus efisiensi waktu pemrosesan ditunjukkan sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi} = 100\% - \text{Persentase Waktu Pemrosesan} \dots \dots \dots (11)$$

Keterangan:

Efisiensi Waktu Pemrosesan = Tingkat penghematan waktu pemrosesan (%)

Persentase Waktu Pemrosesan = Persentase waktu yang digunakan terhadap pemrosesan *high* (%)

2.13 Validasi Estimasi Volume

Validasi volume merupakan tahapan evaluasi untuk menilai tingkat kesesuaian antara hasil estimasi volume berbasis model permukaan dengan data referensi yang dianggap mewakili kondisi aktual di lapangan (Aji & Djurdjani, 2022). Pada penelitian timbunan batubara, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan volume metode *cut and fill between DTMs* terhadap data timbangan batubara perusahaan sebagai nilai acuan (Setyawan & Susilo, 2025).

Selisih volume antara hasil perhitungan model dan data referensi dihitung untuk mengetahui besarnya deviasi estimasi terhadap nilai acuan. Perhitungan selisih volume antara hasil pemodelan dan data referensi mengacu pada Rassarandi dkk. (2015), yang secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta V = V_h - V_r \dots\dots\dots (12)$$

Kesesuaian estimasi terhadap volume referensi dinyatakan sebagai persentase selisih berdasarkan persamaan (11) mengacu pada Rassarandi dkk. (2015).

$$\% \text{Selisih Volume} = \frac{V_h - V_r}{V_r} \times 100\% \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan :

V_h = Volume hasil perhitungan (ton)

V_r = Volume referensi/data timbangan (ton)

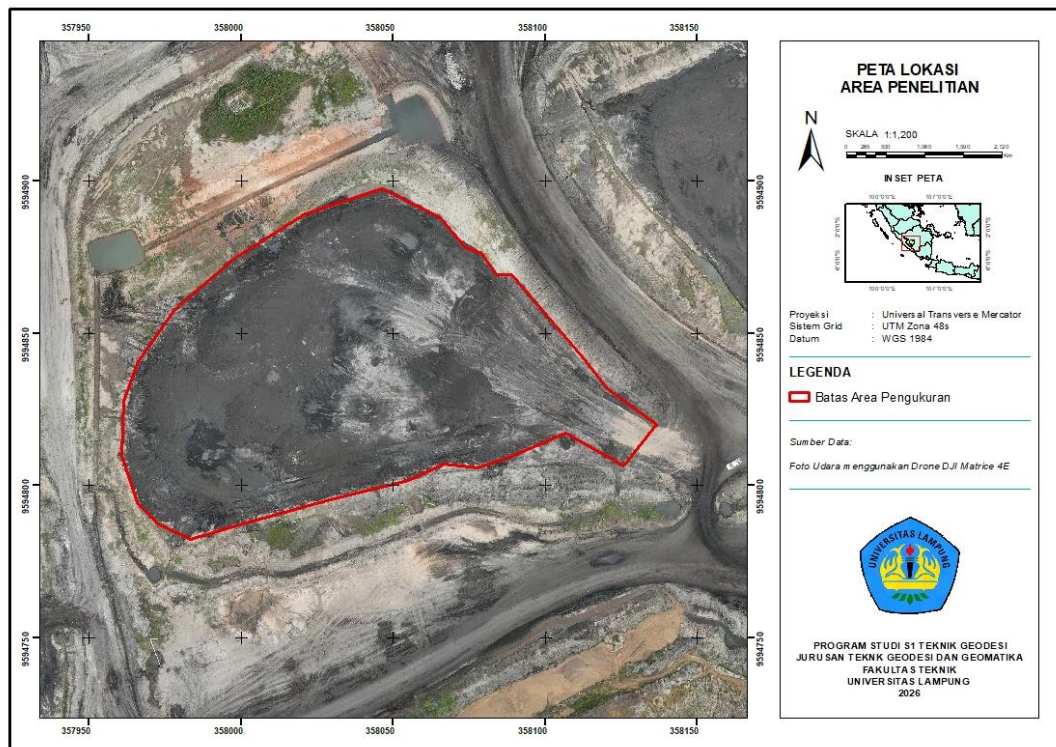
ΔV = Selisih volume

Dalam konteks operasional tambang, data timbangan (*weighbridge*) digunakan sebagai pembanding karena mencerminkan jumlah material aktual yang tercatat pada saat pengangkutan (Setyawan & Susilo, 2025). Salah satu standar internasional yang sering dijadikan acuan dalam uji volume adalah *American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard D6172-98*, yaitu standar pengujian untuk penentuan volume material curah (*bulk material*) (Aji & Djurdjani, 2022). Batas toleransi maksimal yang diambil adalah dibawah 2% yang merupakan nilai *industry accepted error* (Aji & Djurdjani, 2022).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

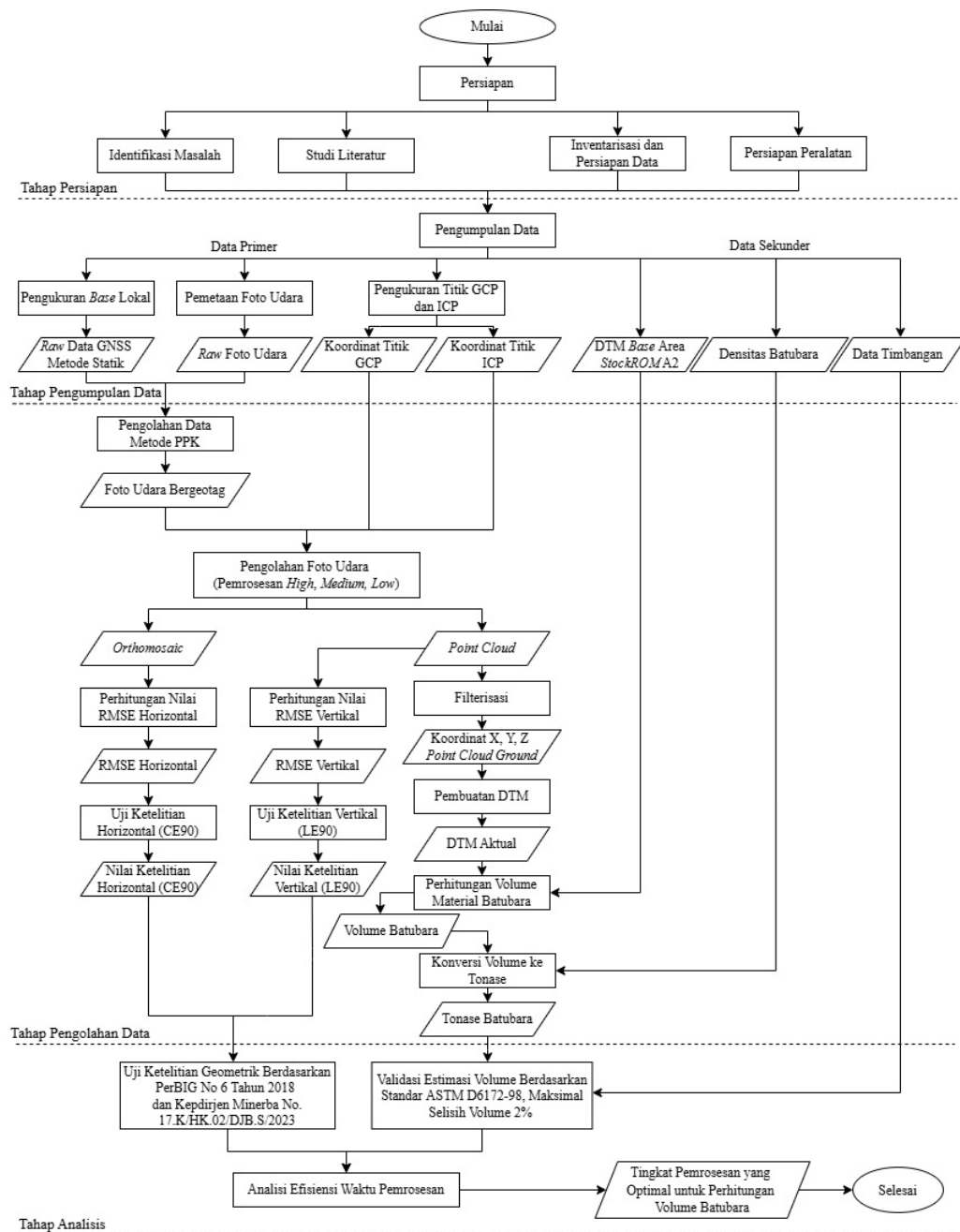
Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) PT. Budi Gema Gempita *Coal Mine – Site* Lahat yang berada di Kecamatan Merapi Timur, Kabupaten Lahat, Provinsi Sumatera Selatan. IUP operasi produksi PT. Budi Gema Gempita seluas 1.524 Ha. Area pengukuran volume *stockROM* A2 memiliki luas sekitar 1,19 ha. Adapun peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi penelitian.
Sumber: Penulis (2026)

3.2 Perencanaan Metode dan Alur Kerja Penelitian

Secara umum, rangkaian proses penelitian ini direpresentasikan secara visual dalam bentuk alur kerja penelitian untuk menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis dari awal hingga akhir. Alur kerja penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur kerja penelitian.

Alur kerja penelitian ini menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian yang dimulai dari tahap persiapan hingga tahap analisis untuk menentukan tingkat pemrosesan yang paling optimal dalam perhitungan volume batubara. Tahap persiapan meliputi identifikasi masalah, studi literatur, inventarisasi dan persiapan data, serta persiapan peralatan yang digunakan dalam penelitian.

Tahap pengumpulan data terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran GNSS metode statik, pemetaan foto udara UAV, serta pengukuran titik GCP dan ICP yang menghasilkan raw data GNSS, foto udara, dan koordinat titik kontrol. Data sekunder meliputi DTM *base area*, densitas batubara, dan data timbangan sebagai pembanding.

Tahap pengolahan data diawali dengan pengolahan data metode PPK untuk menghasilkan foto udara bergeotag, yang kemudian diolah melalui proses fotogrametri dengan tingkat pemrosesan *low*, *medium*, dan *high*. Hasil pengolahan berupa *orthomosaic* dan *point cloud* yang digunakan untuk menghitung RMSE horizontal dan vertikal serta membangun DTM melalui proses filtrasi. DTM tersebut selanjutnya digunakan dalam perhitungan volume batubara dan konversi ke tonase.

Tahap analisis dilakukan dengan mengevaluasi ketelitian geometrik yang mengacu pada Kepdirjen Minerba No. 17.K/HK.02/DJB.S/2023, dengan penentuan kelas ketelitian berdasarkan Peraturan BIG No. 6 Tahun 2018, serta kesesuaian volume terhadap standar ASTM D6172-98 dan efisiensi waktu pemrosesan, sehingga diperoleh tingkat pemrosesan yang paling optimal.

3.3 Tahap Persiapan Penelitian

Tahap persiapan penelitian dalam penelitian ini meliputi serangkaian kegiatan awal yang bertujuan untuk memastikan seluruh proses penelitian dapat dilaksanakan secara sistematis, terarah, dan selaras dengan tujuan yang telah ditetapkan. Tahap ini menjadi landasan penting dalam menentukan kualitas dan kelancaran

pelaksanaan penelitian secara keseluruhan, sehingga setiap komponen yang terlibat perlu direncanakan dengan cermat dan matang. Secara umum, tahapan persiapan penelitian dalam studi ini mencakup beberapa kegiatan sebagai berikut.

3.3.1 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah merupakan tahap awal penelitian yang bertujuan untuk menentukan pokok permasalahan agar penelitian memiliki arah yang jelas dan terfokus. Penelitian ini membahas perbandingan tingkat pemrosesan foto udara UAV, yaitu *high*, *medium*, dan *low*, terhadap hasil perhitungan volume batubara pada area *stockROM*. Perbedaan tingkat pemrosesan menghasilkan variasi kualitas data dan hasil perhitungan volume, sehingga diperlukan analisis untuk membandingkan kedekatan hasil perhitungan volume terhadap data timbangan serta menilai kesesuaiannya dengan kebutuhan operasional pertambangan.

3.3.2 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahapan penelitian yang dilakukan dengan mengkaji berbagai sumber pustaka yang relevan, seperti jurnal ilmiah, buku, dan laporan penelitian, untuk memperoleh landasan teoritis serta gambaran metode dan hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik penelitian. Dalam penelitian ini, studi literatur difokuskan pada kajian mengenai perhitungan volume *stockROM* batubara, pemanfaatan UAV fotogrametri, serta perbandingan tingkat pemrosesan foto udara terhadap hasil perhitungan volume. Literatur yang dikaji digunakan sebagai dasar penyusunan metodologi penelitian dan sebagai acuan dalam menganalisis serta membandingkan hasil perhitungan volume batubara dari tingkat pemrosesan *high*, *medium*, dan *low* terhadap data timbangan.

3.3.3 Inventarisasi dan Persiapan Data

Inventarisasi data dilakukan untuk mengidentifikasi data primer dan data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian. Data primer meliputi data *base* lokal dan data

foto udara UAV hasil akuisisi lapangan serta data hasil pengukuran *Ground Control Point* (GCP) dan *Independent Check Point* (ICP) menggunakan GNSS untuk kontrol dan uji ketelitian geometrik. Data sekunder meliputi data topografi awal area *StockROM A2* sebagai permukaan acuan untuk menghitung volume batubara, data timbangan batubara sebagai data validasi volume, dan data densitas batubara sebagai parameter dalam proses konversi volume batubara menjadi satuan tonase. Pada tahap ini juga dilakukan pengecekan kelengkapan, kualitas, dan kesiapan data sebelum dilanjutkan ke tahap pengolahan.

3.3.4 Persiapan Peralatan

Peralatan penelitian yang digunakan dalam studi ini dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Adapun peralatan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Perangkat keras

No	Nama Alat	Tipe	Fungsi
1.	<i>Drone</i>	DJI Matrice 4E	Digunakan untuk melakukan pemetaan foto udara.
2.	GNSS (<i>Rover</i>)	V200	Digunakan untuk melakukan pengukuran titik GCP dan ICP.
3.	GNSS (<i>Base</i>)	V30 Plus	Digunakan sebagai penerima serta penyambung sinyal untuk GNSS <i>Rover</i> dan pengukuran metode Statik.
4.	Statif	-	Digunakan untuk menopang GNSS <i>Base</i> di <i>benchmark</i> yang disediakan.
5.	<i>Stick Pole</i>	-	Digunakan untuk menopang GNSS <i>Rover</i> dalam pengambilan titik GCP dan ICP.
6.	<i>Extension Pole</i>	-	Digunakan sebagai penyambung dari <i>tribrach</i> ke GNSS <i>Base</i> .
7.	<i>Tribrach</i>	-	Digunakan untuk tempat berdirinya alat pengukuran GNSS <i>Base</i> .
8.	<i>Controller</i>	-	Digunakan untuk <i>setting</i> GNSS dan mengambil data akuisisi lapangan

(Lanjutan) Tabel 3. Perangkat keras

No	Nama Alat	Tipe	Fungsi
9.	Meteran	-	Digunakan untuk mengukur tinggi alat.
10.	<i>Premark</i>	-	Digunakan sebagai penanda dalam pengambilan titik GCP dan ICP.
11.	PC	Desktop – 49H1GVM	Digunakan untuk menjalankan perangkat lunak pengolahan data.
12.	Laptop	Acer Aspire 5	Digunakan untuk menjalankan perangkat lunak pengolahan data, analisis, dan penyusunan laporan penelitian.

Tabel 4. Perangkat lunak

No	Perangkat Lunak	Fungsi
1.	Perangkat Lunak Fotogrametri	Digunakan untuk pembuatan <i>Point Cloud</i> dan <i>Orthomosaic</i> .
2.	Perangkat Lunak Pengolahan Data <i>Point Cloud</i>	Digunakan untuk <i>filtering noise</i> dan <i>ground classification</i> .
3.	Perangkat Lunak Pemetaan Tambang	Digunakan untuk pembuatan model 3D dan perhitungan volume batubara.
4.	Perangkat Lunak Pengolahan Data Spasial	Digunakan untuk memperoleh koordinat model sebagai dasar perhitungan nilai RMSE.
5.	<i>Emlid Studio</i>	Digunakan untuk pengolahan data GNSS PPK.
6.	<i>Microsoft Excel</i>	Digunakan untuk pengelompokan data.
7.	<i>Microsoft Word</i>	Digunakan untuk pembuatan laporan penelitian.

3.4 Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memastikan seluruh data yang dibutuhkan tersedia lengkap dan memenuhi spesifikasi teknis penelitian. Proses ini mencakup pengumpulan data primer dan sekunder secara sistematis agar kualitas dan

konsistensi data tetap terjaga selama pengolahan dan analisis. Data yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data penelitian

No	Jenis Data	Kategori Data	Sumber Data	Fungsi dalam Penelitian
1.	Data Base	Primer	Pengukuran GNSS	Data referensi dalam pengolahan <i>Post-Processed Kinematic</i> (PPK) pada pemetaan foto udara UAV.
2.	Foto Udara UAV area <i>StockROM</i> A2	Primer	Akuisisi lapangan	Data utama untuk pemodelan fotogrametri serta pembentukan <i>point cloud</i> dan DTM aktual.
3.	Koordinat <i>Ground Control Point</i> (GCP)	Primer	Pengukuran GNSS	Titik kontrol untuk meningkatkan ketelitian geometrik hasil pemodelan fotogrametri.
4.	Koordinat <i>Independent Check Point</i> (ICP)	Primer	Pengukuran GNSS	Titik uji untuk evaluasi ketelitian geometrik hasil pemodelan fotogrametri.
5.	Data Topografi Awal area <i>StockROM</i> A2 (DTM base)	Sekunder	Laporan/survei perusahaan	Permukaan acuan (<i>base surface</i>) dalam perhitungan volume batubara.
6.	Data Timbangan batubara	Sekunder	Laporan operasional perusahaan	Data validasi hasil perhitungan volume dan tonase batubara.
7.	Data Densitas Batubara	Sekunder	Laporan operasional perusahaan	Parameter konversi volume batubara menjadi satuan tonase.

3.4.1 Pengukuran Base

Tahap pertama pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran *base* menggunakan metode statik untuk memperoleh data observasi GNSS *base* dengan tingkat ketelitian tinggi sebagai referensi dalam pengolahan *Post-Processed*

Kinematic (PPK) pada pemetaan foto udara UAV. Pengukuran metode statik dilakukan menggunakan satu unit *receiver* GNSS yang dipasang pada *benchmark* STN 1 yang telah memiliki koordinat.

Pemasangan GNSS *base* pada *benchmark* dilakukan sebelum pelaksanaan penerbangan UAV agar data GNSS *base* dan data GNSS pada wahana UAV dapat direkam secara simultan selama proses pemetaan berlangsung. Kondisi ini bertujuan untuk mendukung proses koreksi posisi secara diferensial pada tahap pengolahan data. Pengamatan GNSS dilakukan dengan interval perekaman setiap 1 detik untuk menghasilkan data observasi yang kontinu dan teliti.

3.4.2 Akuisisi Data Foto Udara UAV

Sebelum melakukan akuisisi data foto udara, terlebih dahulu dilakukan perencanaan jalur terbang untuk memastikan proses pengambilan data berjalan secara efisien, sistematis, dan menghasilkan kualitas citra yang sesuai dengan kebutuhan analisis. Parameter perencanaan jalur terbang yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Parameter terbang UAV

No	Parameter	Nilai
1.	Luas Area	$\pm 3,7$ ha
2.	Pola Jalur Terbang	<i>Grid</i>
3.	Kamera	P1
4.	Panjang Fokus	35 mm
5.	Mode Akuisisi	<i>Ortho Collection</i>
6.	<i>Ground Sampling Distance</i> (GSD)	1,00 cm/pixel
7.	Ketinggian Terbang	80 m
8.	<i>Overlap</i>	80%
9.	<i>Sidelap</i>	70%
10.	Kecepatan Terbang	10 m/s
11.	<i>Course Angle</i>	174°
12.	<i>Altitude Mode</i>	<i>Relative to Takeoff Point (ALT)</i>
13.	<i>Safe Takeoff Altitude</i>	20 m
14.	Metode Pengambilan Foto	<i>Timed Interval 1s</i>

(Lanjutan) Tabel 6. Parameter terbang UAV

No	Parameter	Nilai
15.	Estimasi Durasi	4 menit 14 detik
16.	Estimasi Penyimpanan	216 MB
17.	Mode Akhir Misi	<i>Return To Home</i>

Berdasarkan Tabel 6, perencanaan jalur terbang disusun untuk menyeimbangkan ketelitian dan efisiensi survei. Area $\pm 3,7$ hektar dipetakan menggunakan pola grid dengan kamera P1 mode *ortho collection* pada ketinggian 80 meter untuk menghasilkan GSD 1,00 cm/pixel. *Overlap* 80% dan *sidelap* 70% diterapkan guna menjaga keterikatan citra, dengan kecepatan 10 m/s dan *course angle* 174° agar penerbangan lebih efisien. Pengaturan tersebut dilakukan untuk memperoleh kualitas citra yang optimal pada area penelitian.

Akuisisi data dilakukan menggunakan fotogrametri UAV metode PPK dengan penerbangan otomatis mengikuti *flight plan*. Citra diambil setiap 1 detik dengan estimasi durasi 4 menit 14 detik dan mode akhir *return to home*. Foto udara raw kemudian dilakukan *geotagging* menggunakan data GNSS *base* dan *rover* untuk memperoleh koordinat yang lebih teliti sebelum pengolahan fotogrametri. Tahapan ini bertujuan meningkatkan ketelitian posisi pada hasil pemetaan dan estimasi volume.

3.4.3 Pengukuran *Ground Control Point (GCP)* dan *Independent Check Point (ICP)*

Pengukuran *Ground Control Point (GCP)* dan *Independent Check Point (ICP)* dilakukan untuk memperoleh titik kontrol dan titik uji ketelitian geometrik pada pemodelan fotogrametri UAV. Pengukuran titik GCP dan ICP dilaksanakan setelah kegiatan pemetaan foto udara selesai. Pengukuran dilakukan menggunakan GNSS metode *Real Time Kinematic (RTK)* dengan memanfaatkan *base* GNSS yang sama dengan *base* yang digunakan pada pengukuran GNSS metode statik. Pengukuran dilakukan dengan memperhatikan sebaran titik yang merata pada area *StockROM A2* serta kondisi lingkungan yang mendukung penerimaan sinyal satelit.

3.4.4 Data Topografi Awal Area *StockROM A2*

Data topografi awal area *StockROM A2* diperoleh dari data survei sebelumnya yang terdokumentasi dalam laporan perusahaan. Data tersebut disajikan dalam bentuk *Digital Terrain Model (DTM)* yang merepresentasikan kondisi permukaan dasar area *StockROM A2* sebelum penimbunan material batubara. Data topografi awal digunakan sebagai *base surface* atau permukaan acuan dalam proses perhitungan volume batubara. Permukaan acuan tersebut berfungsi sebagai bidang pembanding terhadap model permukaan hasil pemrosesan foto udara UAV untuk menghitung selisih volume material batubara pada area *StockROM A2*.

3.4.5 Data Timbangan Batubara

Pengumpulan data penimbangan batubara dilakukan untuk memperoleh data acuan volume batubara yang digunakan dalam proses validasi hasil perhitungan volume dari pemodelan fotogrametri UAV. Data penimbangan diperoleh dari catatan operasional perusahaan yang bersumber dari sistem jembatan timbang. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai data pembanding untuk menilai ketelitian hasil estimasi volume batubara yang dihasilkan dari pemodelan fotogrametri UAV.

3.4.6 Data Densitas Batubara

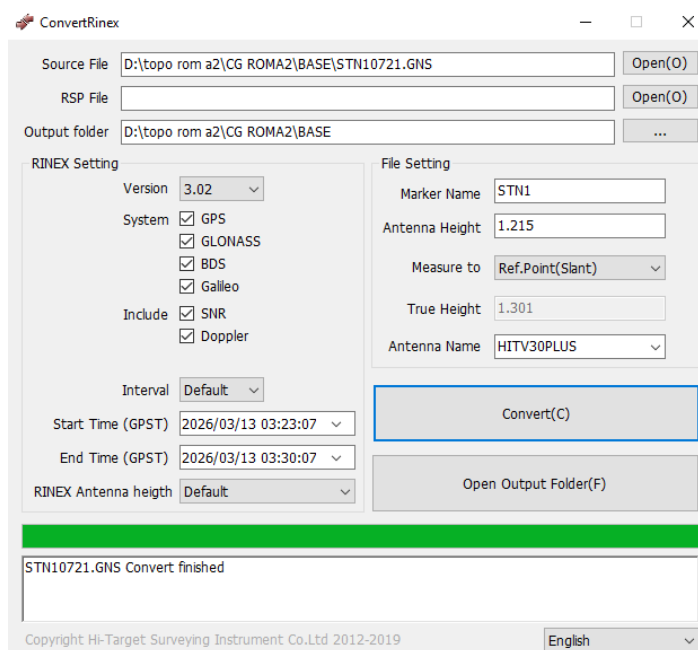
Pengumpulan data densitas batubara dilakukan untuk mendukung proses perhitungan volume batubara pada area *StockROM A2*. Data densitas batubara diperoleh dari laporan resmi perusahaan yang digunakan sebagai acuan dalam perhitungan volume batubara. Data densitas batubara digunakan sebagai faktor pengali untuk mengonversi hasil perhitungan volume batubara dalam satuan meter kubik (m^3) menjadi tonase batubara. Nilai densitas yang digunakan disesuaikan dengan karakteristik material batubara pada lokasi penelitian. Penggunaan data densitas yang tepat sangat penting untuk meminimalkan kesalahan dalam estimasi tonase batubara yang dihasilkan.

3.5 Tahap Pengolahan Data

Setelah tahap persiapan dan pengumpulan data selesai dilaksanakan, tahapan selanjutnya adalah pengolahan data yang bertujuan untuk menganalisis perbandingan tingkat pemrosesan foto udara UAV terhadap ketelitian perhitungan volume batubara dengan mempertimbangkan efisiensi pemrosesan. Seluruh proses pengolahan data foto udara UAV dan perhitungan volume dilakukan secara berulang dengan menerapkan tingkat pemrosesan foto udara UAV yang berbeda, yaitu *high*, *medium*, dan *low*.

3.5.1 Pengolahan Data GNSS PPK

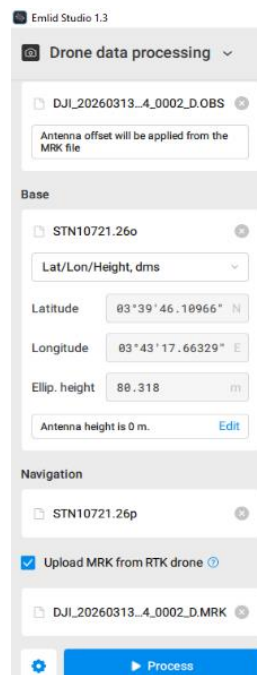
Pengolahan data GNSS metode *Post-Processed Kinematic* (PPK) diawali dengan proses konversi data mentah hasil pengamatan GNSS berupa file observasi hasil perekaman receiver *base* ke dalam format RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) menggunakan perangkat lunak pengolahan data GNSS, yang ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil pengolahan ini digunakan sebagai data referensi dalam proses kombinasi dan koreksi data GNSS UAV pada penerapan metode PPK.



Gambar 4. Proses konversi data ke dalam format RINEX.

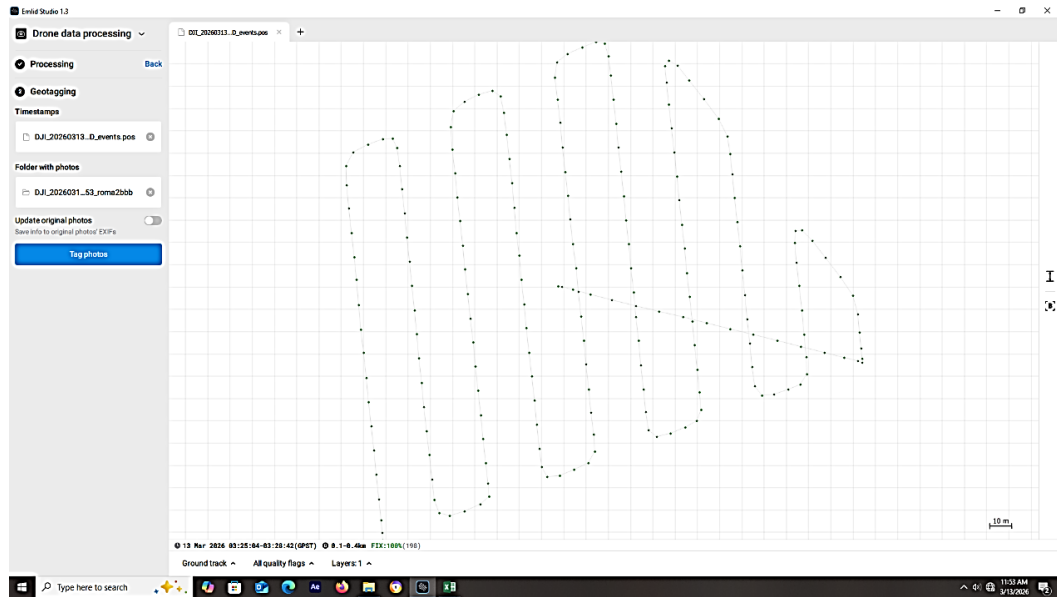
Tahap selanjutnya berupa proses penerapan metode PPK terhadap data GNSS UAV menggunakan perangkat lunak Emlid Studio yang terdiri atas dua tahapan utama, yaitu *drone data processing* dan *geotagging*. Data yang digunakan dalam proses ini meliputi data RINEX sebagai data referensi *base*, data observasi GNSS dari UAV, serta data marker yang berfungsi dalam proses sinkronisasi waktu dan posisi untuk proses *geotagging*.

Koordinat *base* dimasukkan sebagai acuan dalam bentuk lintang, bujur, dan tinggi elipsoid dengan memperhatikan tinggi antenna. Proses ini dilakukan seperti pada Gambar 5 hingga diperoleh solusi dengan status *fix* sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa seluruh data pengamatan memiliki tingkat ketelitian posisi yang tinggi.



Gambar 5. *Drone data processing*.

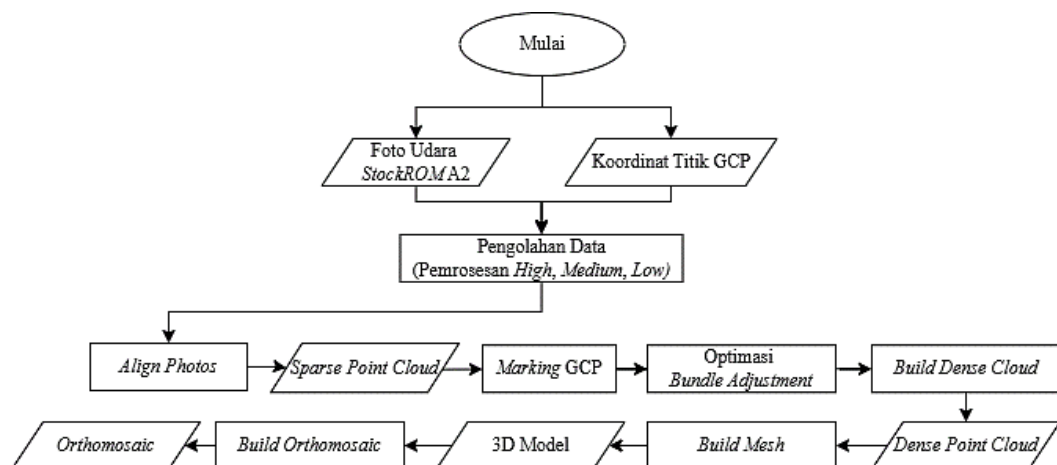
Tahap selanjutnya adalah *geotagging* melalui fitur *tag photos*, yaitu proses pemberian informasi koordinat pada setiap foto udara berdasarkan hasil pengolahan sebelumnya, sehingga setiap citra memiliki referensi spasial yang akurat dan siap digunakan dalam pengolahan fotogrametri, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Geotagging foto udara.

3.5.2 Pengolahan Data Foto Udara UAV

Alur pengolahan data foto udara UAV pada penelitian ini disajikan untuk memperjelas proses yang dilakukan mulai dari tahap *input* data, pengolahan, hingga diperolehnya keluaran berupa *point cloud ground* dan *orthomosaic*. Urutan tahapan pengolahan data foto udara UAV pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Alur pengolahan data foto udara UAV.

Pengolahan data foto udara UAV pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode fotogrametri dengan pendekatan *Structure from Motion* (SfM) dan *Multi-View Stereo* (MVS). Proses dimulai dari pengumpulan foto udara dan koordinat GCP. Foto udara digunakan untuk membentuk model tiga dimensi sedangkan GCP berfungsi mengikat model ke sistem koordinat lapangan. Data kemudian diproses dengan variasi tingkat pemrosesan (*high*, *medium*, dan *low*). Tahapan dalam pengolahan foto udara dilakukan berdasarkan pada SfM *Workflow* mengacu pada Over et al., (2021), sebagai berikut :

Tabel 7. *Workflow* pengolahan foto udara UAV

No	Menu	Fungsi	Keterangan
<i>Image Setup and Alignment</i>			
1.	<i>Main Menu >> Workflow</i>	<i>Add Photos</i>	Memilih semua foto hasil akuisisi.
2.	<i>Reference panel >> Settings</i>	<i>Set camera coordinate reference system</i>	Memilih sistem koordinat WGS 84/UTM Zona 48s.
3.	<i>Main Menu >> Workflow</i>	<i>Align Photos</i>	Menyelaraskan foto untuk menentukan posisi kamera dan menghasilkan <i>sparse point cloud</i> .
<i>Add Ground Control Points</i>			
4.	<i>Reference panel >> Import</i>	<i>Add GCPs</i>	Menambahkan titik GCP.
5.	<i>Reference panel >> Markers</i>	<i>Filter by Marker</i>	Menyesuaikan titik GCP secara manual pada setiap foto.
<i>Bundle Adjustment</i>			
6.	<i>Reference panel >> Optimize</i>	<i>Optimize Camera</i>	Mengoptimasi parameter kamera dan posisi berdasarkan GCP.
<i>Build Dense Point Clouds and Orthomosaics</i>			
7.	<i>Main Menu >> Workflow</i>	<i>Build Dense Cloud</i>	Membuat <i>dense point cloud</i> (awan titik rapat) dari hasil <i>align</i> .

(Lanjutan) Tabel 7. *Workflow* Pengolahan Foto Udara UAV

No	Menu	Fungsi	Keterangan
8.	<i>Main Menu >> Workflow</i>	<i>Build Mesh</i>	Membentuk model permukaan 3D dari <i>dense cloud</i> .
9.	<i>Main Menu >> Workflow</i>	<i>Build Orthomosaic</i>	Menggabungkan foto menjadi <i>orthomosaic</i> yang telah terkoreksi geometrik.

Pengolahan data foto udara UAV pada tingkat pemrosesan *high*, *medium*, dan *low* mengacu pada alur kerja *Structure from Motion* (SfM) sebagaimana disajikan pada Tabel 7. Tahapan pengolahan dimulai dari *input* foto udara hingga menghasilkan produk akhir berupa *orthomosaic*. Pengolahan dilakukan sebanyak tiga kali menggunakan data foto udara yang sama dengan variasi tingkat pemrosesan (*high*, *medium*, *low*) sehingga menghasilkan tiga dataset yang berbeda.

a. *Image Setup and Alignment*

Tahapan awal pengolahan data foto udara dilakukan dengan mengimpor hasil akuisisi ke dalam perangkat lunak pengolahan. Selanjutnya dilakukan pengaturan sistem referensi koordinat sesuai dengan zona lokasi penelitian, yaitu UTM WGS 84 Zona 48S, mengingat penelitian dilaksanakan di Provinsi Sumatera Selatan.

Setelah sistem referensi koordinat sesuai, dilakukan proses *align photos*. Proses ini bertujuan untuk menyelaraskan seluruh foto udara dengan mendeteksi kesamaan fitur (*tie points*) antar foto, sehingga dapat ditentukan posisi dan orientasi kamera pada saat pemotretan. Hasil dari tahapan ini berupa *sparse point cloud* (awan titik jarang) yang menjadi dasar dalam proses pemodelan selanjutnya.

Parameter yang digunakan dalam proses *align photos* dapat dilihat pada tabel berikut.

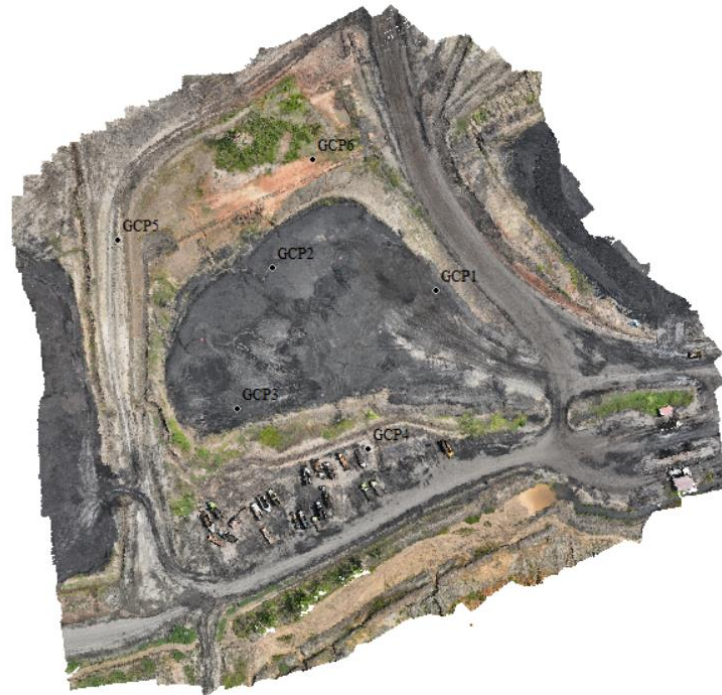
Tabel 8. Parameter proses *align photos*

No	Parameter	Tingkat Pemrosesan		
		<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
1.	<i>Accuracy</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
2.	<i>Generic Preselection</i>	<i>Disabled</i>	<i>Disabled</i>	<i>Disabled</i>
3.	<i>Reference Preselection</i>	<i>Source</i>	<i>Source</i>	<i>Source</i>
4.	<i>Key Point Limit</i>	40.000	40.000	40.000
5.	<i>Tie Point Limit</i>	4.000	4.000	4.000

Tabel tersebut menunjukkan parameter yang digunakan pada proses *align photos* dengan tiga tingkat pemrosesan, yaitu *high*, *medium*, dan *low*. Perbedaan utama terletak pada parameter *accuracy* yang menentukan tingkat ketelitian pencocokan antar foto, di mana *high* lebih teliti namun membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan *medium* dan *low*. Parameter *generic preselection* dinonaktifkan agar semua foto tetap dipertimbangkan dalam proses pencocokan, sedangkan *reference preselection* menggunakan *source* untuk memanfaatkan data koordinat awal sehingga proses lebih cepat. Nilai *key point limit* sebesar 40.000 digunakan untuk membatasi jumlah titik fitur yang dideteksi agar tetap detail namun efisien, dan *tie point limit* sebesar 4.000 untuk mengontrol jumlah titik ikat agar model stabil. Parameter selain *accuracy* dibuat sama agar perbedaan hasil hanya dipengaruhi oleh tingkat ketelitian pemrosesan.

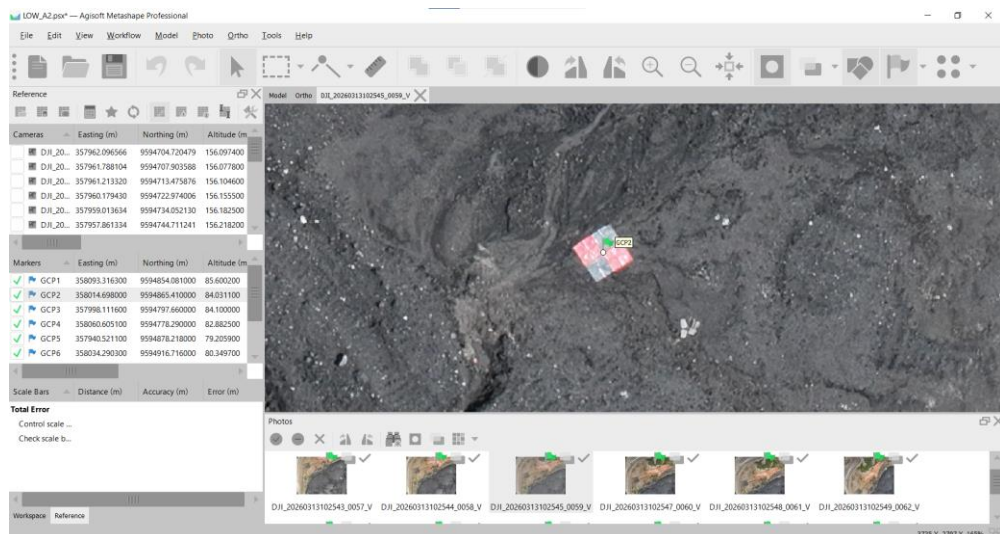
b. *Add Ground Control Points*

Tahapan pengolahan data selanjutnya dilakukan dengan mengimpor titik *Ground Control Point* (GCP) ke dalam perangkat lunak pengolahan. Penambahan GCP bertujuan untuk meningkatkan ketelitian geometrik dan akurasi posisi model, sehingga hasil pemetaan memiliki kesesuaian yang tinggi terhadap kondisi di lapangan. Persebaran titik GCP dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 8. Persebaran titik GCP.

Proses *marking* titik GCP dilakukan secara manual pada setiap foto yang memuat titik tersebut. Proses ini bertujuan untuk memastikan ketepatan posisi titik kontrol pada citra, sehingga dapat meminimalkan kesalahan geometrik dan meningkatkan akurasi hasil georeferensi. Proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

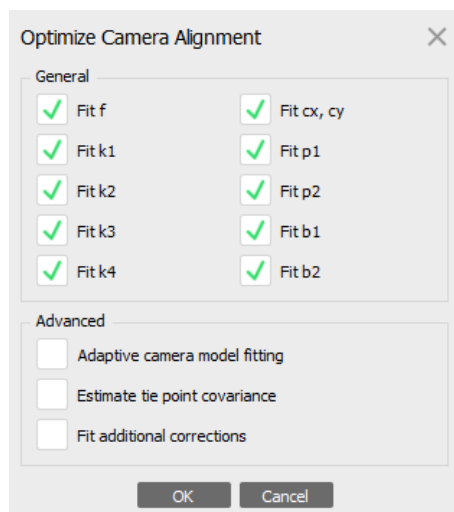


Gambar 9. Proses penandaan titik GCP.

c. *Bundle Adjustment*

Penandaan titik GCP yang telah selesai dilanjutkan dengan proses optimasi parameter kamera dan posisi model berdasarkan titik GCP. Proses optimasi ini bertujuan untuk memperbaiki akurasi orientasi kamera dan mengurangi kesalahan geometrik, sehingga model yang dihasilkan menjadi lebih presisi dan sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Parameter *optimize camera alignment* yang digunakan pada ketiga tingkat pemrosesan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 10. Parameter *optimize camera alignment*.

1. *Focal Length* (f_x, f_y), diaktifkan untuk mengoreksi panjang fokus kamera agar sesuai dengan kondisi aktual saat pengambilan foto.
2. *Principal Point* (c_x, c_y), diaktifkan untuk memperbaiki posisi pusat foto sehingga mengurangi kesalahan geometri pada hasil rekonstruksi.
3. *Radial Distortion* (k_1, k_2, k_3, k_4), diaktifkan untuk mengoreksi distorsi lensa radial yang menyebabkan efek melengkung pada citra.
4. *Tangential Distortion* (p_1, p_2), diaktifkan untuk mengoreksi distorsi akibat ketidaksejajaran lensa terhadap sensor kamera.
5. *Affinity and Skew* (b_1, b_2), diaktifkan untuk memastikan seluruh kemungkinan distorsi dapat dikoreksi sehingga hasil model lebih optimal.

d. *Build Dense Point Clouds and Orthomosaics*

Proses optimasi kamera yang telah selesai dilanjutkan dengan pembangunan *dense point cloud (build dense cloud)*. Tahapan ini bertujuan untuk menghasilkan representasi permukaan yang lebih detail dengan meningkatkan kerapatan titik dari hasil *sparse point cloud*. Hasil dari proses ini berupa *dense point cloud* yang menggambarkan bentuk objek atau permukaan secara lebih rinci dan akurat. Data *dense point cloud* kemudian diekspor ke dalam format *.laz* untuk dilakukan proses filterisasi pada perangkat lunak pengolahan data selanjutnya. Data ini juga digunakan sebagai dasar dalam melakukan uji ketelitian geometric vertikal.

Parameter *build dense cloud* yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 9. Parameter proses *build dense cloud*

No	Parameter	Tingkat Pemrosesan		
		<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
1.	<i>Quality</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
2.	<i>Depth Filtering</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>	<i>Mild</i>

Tabel tersebut menunjukkan parameter yang digunakan pada proses *build dense cloud* dengan tiga tingkat pemrosesan, yaitu *high*, *medium*, dan *low*, yang diterapkan untuk membandingkan hasil dari masing-masing tingkat pemrosesan. Perbedaan utama terletak pada parameter *quality*, yang mengatur tingkat kerapatan titik yang dihasilkan dalam proses pembentukan *dense point cloud*, di mana setiap tingkat pemrosesan menggunakan pengaturan yang berbeda. Sementara itu, parameter *depth filtering* ditetapkan pada tingkat *mild* untuk seluruh variasi pemrosesan guna mengurangi noise tanpa menghilangkan detail permukaan secara signifikan. Penggunaan parameter yang sama pada *depth filtering* bertujuan agar perbedaan hasil yang diperoleh berasal dari perbedaan pengaturan *quality*.

Dense point cloud yang telah terbentuk dilanjutkan dengan proses *build mesh*. Tahapan ini bertujuan untuk membentuk model permukaan 3D dengan menghubungkan titik-titik pada *dense point cloud* menjadi bidang segitiga (*triangular mesh*). Hasil dari proses ini berupa model 3D permukaan objek yang lebih kontinu dan merepresentasikan bentuk geometri secara menyeluruh.

Parameter *build mesh* yang digunakan pada ketiga tingkat pemrosesan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 10. Parameter proses *build mesh*

No	Parameter	Tingkat Pemrosesan		
		<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
1.	<i>Source Data</i>	<i>Depth Maps</i>	<i>Depth Maps</i>	<i>Depth Maps</i>
2.	<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>	<i>Arbitrary</i>
3.	<i>Reference Preselection</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
4.	<i>Interpolation</i>	<i>Enabled</i>	<i>Enabled</i>	<i>Enabled</i>
5.	<i>Strict Volumetric Mask</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>

Parameter yang digunakan pada proses *build mesh* dengan tiga tingkat pemrosesan, yaitu *high*, *medium*, dan *low*, disajikan pada Tabel 10. Parameter *source data* menggunakan *depth maps* karena mampu menghasilkan model permukaan yang lebih detail berdasarkan hasil *dense point cloud*. Parameter *surface type* ditetapkan sebagai *arbitrary* agar pembentukan permukaan mengikuti bentuk objek yang tidak beraturan. Perbedaan tingkat pemrosesan terletak pada parameter kualitas (*quality*) yang diatur menjadi *high*, *medium*, dan *low*. Parameter *interpolation* diaktifkan untuk mengisi kekosongan data sehingga permukaan tetap kontinu, sedangkan *strict volumetric mask* dinonaktifkan karena tidak diperlukan pembatasan volume. Keseragaman parameter lainnya bertujuan agar perbedaan hasil hanya dipengaruhi oleh *quality* pemrosesan yang digunakan.

Tahapan akhir dalam pengolahan foto udara adalah pembuatan *orthomosaic* melalui proses *build orthomosaic*. Proses ini menghasilkan citra yang telah terkoreksi geometrik dengan skala seragam dan bebas distorsi. *Orthomosaic* yang dihasilkan kemudian dimanfaatkan untuk uji ketelitian geometrik horizontal melalui perbandingan koordinat titik pada citra dengan titik kontrol lapangan, sehingga dapat menilai tingkat akurasi data yang digunakan dalam perhitungan volume.

Parameter *build orthomosaic* yang digunakan pada ketiga tingkat pemrosesan adalah sebagai berikut:

Tabel 11. Parameter proses *build orthomosaic*

No	Parameter	Tingkat Pemrosesan		
		<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
1.	<i>Blending Mode</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>	<i>Mosaic</i>
2.	<i>Surface</i>	<i>Mesh</i>	<i>Mesh</i>	<i>Mesh</i>
3.	<i>Enable Hole Filling</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
4.	<i>Enable Ghosting Filter</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>

Parameter proses *build orthomosaic* pada berbagai tingkat pemrosesan disajikan pada Tabel 13. Seluruh tingkat pemrosesan menggunakan *blending mode mosaic* karena metode ini mampu menghasilkan citra ortomosaik yang lebih halus dan konsisten dengan menggabungkan bagian terbaik dari setiap foto. Parameter *surface* ditetapkan sebagai *mesh* agar proyeksi ortofoto mengikuti bentuk permukaan hasil rekonstruksi tiga dimensi. Fitur *enable hole filling* diaktifkan untuk menutup area yang tidak memiliki data sehingga citra menjadi lebih utuh, sedangkan *ghosting filter* dinonaktifkan karena tidak ditemukan pergeseran objek yang signifikan pada citra. Kesamaan parameter pada setiap tingkat pemrosesan bertujuan agar perbedaan hasil yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh tingkat pemrosesan yang digunakan.

3.5.3 Perhitungan Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE)

Perhitungan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dilakukan untuk mengevaluasi tingkat ketelitian geometrik hasil pemrosesan foto udara UAV. Perhitungan ini menggunakan data koordinat titik uji independen (*Independent Check Point / ICP*) yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan sebagai acuan pembandingan terhadap koordinat hasil pengolahan fotogrametri.

Perhitungan RMSE dilakukan dengan membandingkan selisih koordinat antara hasil pengolahan dan data referensi pada setiap titik uji. Komponen yang dihitung meliputi kesalahan horizontal dan kesalahan vertikal. Kesalahan horizontal dihitung berdasarkan selisih koordinat pada sumbu X dan Y, sedangkan kesalahan vertikal dihitung berdasarkan selisih koordinat pada sumbu Z. Data yang digunakan untuk perhitungan nilai RMSE yaitu data *orthomosaic* untuk perhitungan nilai RMSE horizontal dan data *.laz* untuk perhitungan nilai RMSE vertikal. Proses perhitungan nilai RMSE dapat dilihat pada gambar berikut.

Titik ICP	DATA GNSS			DATA CEK		Z DEM	Z LAZ	SQUARE				
	X	Y	Z	X	Y			ΔX^2 (m)	ΔY^2 (m)	X2+Y2	ΔZ^2 (m)	
ICP1	358065.9780	9594834.5530	85.6464	358065.9797	9594834.5701	85.6237	85.6248	0.00000299	0.00029070	0.00029370	0.00046656	
ICP2	358047.2610	9594870.0780	84.5251	358047.2471	9594870.0579	84.5020	84.5071	0.00019216	0.00040361	0.00059576	0.00032400	
ICP3	357980.6864	9594830.9040	83.7255	357980.6986	9594830.9220	83.7021	83.6976	0.00014904	0.00032436	0.00047340	0.00077841	
ICP4	358038.6449	9594804.5220	84.8304	358038.6482	9594804.5190	84.8355	84.8337	0.00001064	0.00000888	0.00001952	0.00001089	
ICP5	358046.5344	9594813.4860	88.6881	358046.5492	9594813.4858	88.7197	88.7198	0.00021880	0.00000003	0.00021883	0.00100489	
ICP6	358042.2589	9594823.2590	89.9479	358042.2591	9594823.2597	89.9389	89.9377	0.00000004	0.000000048	0.00000051	0.00010404	
ICP7	358084.7864	9594818.2890	85.2401	358084.7848	9594818.3026	85.2204	85.2186	0.00000263	0.00018414	0.00018677	0.00046225	
ICP8	358023.2119	9594762.4140	82.5944	358023.2121	9594762.4458	82.5426	82.5450	0.00000006	0.00100806	0.00100812	0.00244036	
ICP9	357979.4459	9594767.2960	83.2765	357979.4475	9594767.3333	83.2708	83.2684	0.00000244	0.00139428	0.00139671	0.00006561	
ICP10	357957.4855	9594783.4080	83.9759	357957.4753	9594783.3974	83.9692	83.9691	0.00010329	0.00011300	0.00021628	0.00004624	
ICP11	357948.7608	9594824.1980	82.5369	357948.7738	9594824.2180	82.5419	82.5429	0.00016900	0.00040000	0.00056900	0.00003600	
ICP12	357995.3980	9594899.5860	80.4890	357995.3895	9594899.5982	80.4409	80.4419	0.00007213	0.00014787	0.00022000	0.00221841	
								sum		0.00519861	0.00795766	
								mean		0.00043322	0.00066314	
								root (RMS)		0.0208	0.0258	

Gambar 11. Proses perhitungan nilai RMSE.

Nilai RMSE yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan tingkat ketelitian geometrik horizontal dan vertikal. Nilai RMSE horizontal kemudian dikonversi menjadi nilai CE90, sedangkan nilai RMSE vertikal dikonversi menjadi nilai LE90 sesuai dengan standar ketelitian peta yang berlaku. Perhitungan nilai RMSE pada penelitian ini dilakukan untuk masing-masing tingkat pemrosesan, yaitu *high*, *medium*, dan *low*, sehingga dapat dibandingkan tingkat ketelitian geometrik yang dihasilkan dari setiap tingkat pemrosesan.

3.5.4 Pemotongan *Boundary Area*

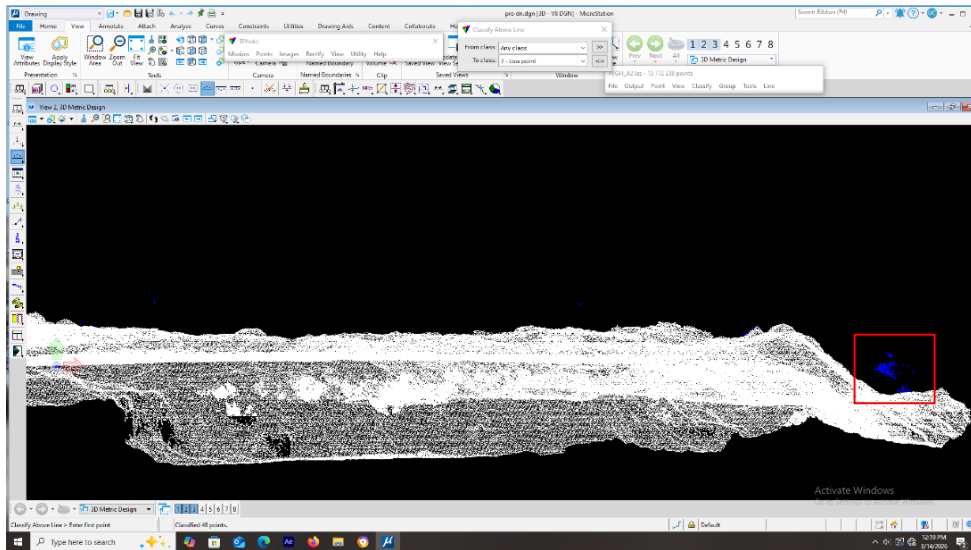
Data *dense point cloud* dari ketiga tingkat pemrosesan yang telah diekspor ke dalam format *.laz* kemudian diimpor ke dalam perangkat lunak pengolahan selanjutnya untuk dilakukan pemotongan batas area (*boundary*) pada *StockROM A2*. Proses pemotongan ini bertujuan untuk membatasi area pengolahan agar hanya mencakup wilayah penelitian, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dalam tahap filterisasi serta mempermudah dan mempercepat proses perhitungan volume. Pemotongan *boundary area* pada data *point cloud* hasil dari pengolahan data dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Pemotongan *boundary area*.

3.5.5 Filterisasi

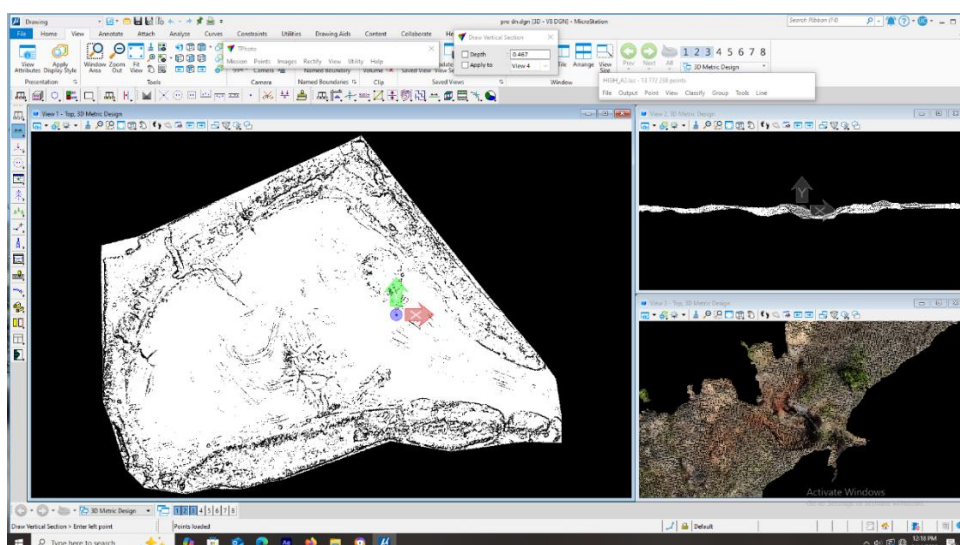
Pemotongan *boundary area* yang telah dilakukan dilanjutkan dengan proses filterisasi pada data *dense point cloud* dari ketiga tingkat pemrosesan. Proses filterisasi ini bertujuan untuk menghilangkan *noise* atau titik-titik yang tidak relevan yang masih terdapat dalam data. Proses ini juga dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik distribusi titik pada masing-masing tingkat pemrosesan. *Noise* yang terdapat pada data *point cloud* dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. *Noise pada point cloud.*

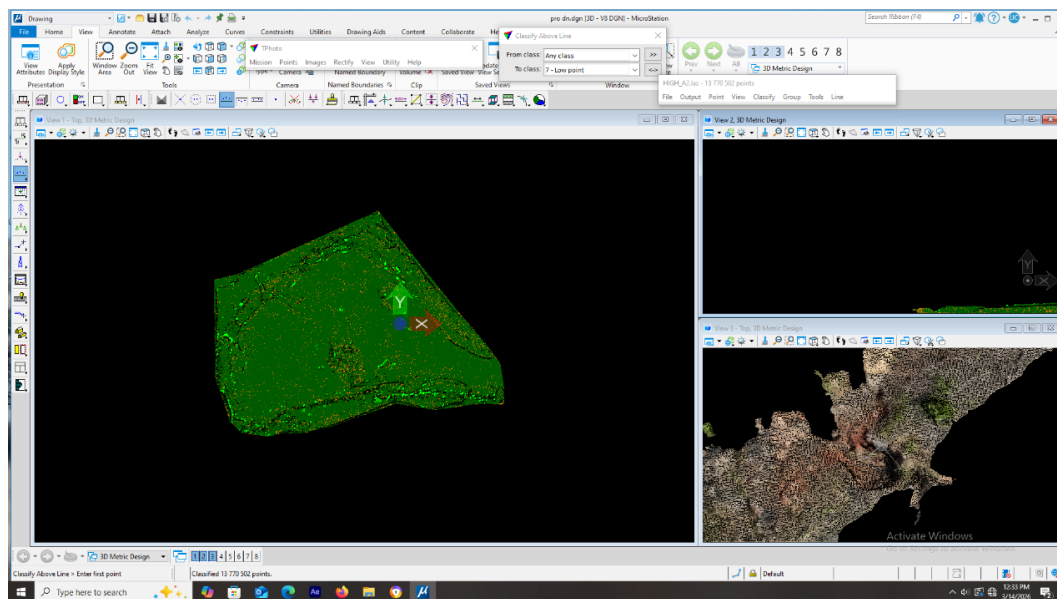
Penghapusan *noise* dilakukan melalui pendekatan berbasis parameter ketinggian, kemiringan, jarak, dan kepadatan titik, sehingga titik-titik yang menyimpang dari pola permukaan utama dapat diidentifikasi dan dieliminasi secara otomatis.

Proses selanjutnya merupakan klasifikasi titik untuk memisahkan antara *ground* dan *non-ground* pada data *point cloud*. Data *point cloud* sebelum proses klasifikasi masih terdiri dari seluruh titik tanpa pemisahan kelas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14.



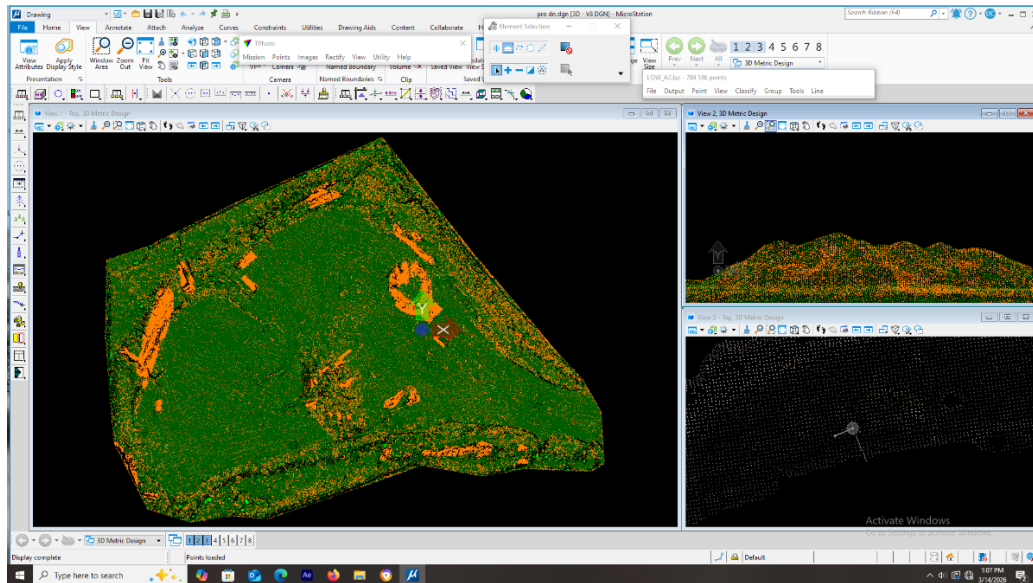
Gambar 14. *Point Cloud* yang belum dilakukan klasifikasi.

Klasifikasi dilakukan secara otomatis dengan mempertimbangkan perbedaan elevasi, jarak antar titik, serta bentuk permukaan, sehingga titik yang termasuk permukaan tanah dapat teridentifikasi dengan baik. Pengecekan visual dilakukan untuk memastikan kesesuaian hasil klasifikasi dengan kondisi sebenarnya serta mengidentifikasi kemungkinan kesalahan klasifikasi yang masih terjadi pada beberapa bagian data. Hasil klasifikasi pada data *point cloud* dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Hasil klasifikasi otomatis.

Apabila hasil klasifikasi yang diperoleh masih menunjukkan ketidaksesuaian, proses koreksi dilakukan secara manual menggunakan metode seleksi berbasis area untuk memperbaiki pengelompokan titik. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa titik-titik yang termasuk dalam kelas *ground* dan *non-ground* telah terklasifikasi dengan lebih tepat sesuai kondisi sebenarnya di lapangan. Hasil klasifikasi pada ketiga tingkat pemrosesan menunjukkan masih adanya ketidaktepatan, sehingga dilakukan kembali proses klasifikasi manual pada seluruh data untuk meningkatkan akurasi pemisahan titik. Hasil akhir dari proses klasifikasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam tahap pengolahan selanjutnya dan dapat dilihat pada Gambar 16.

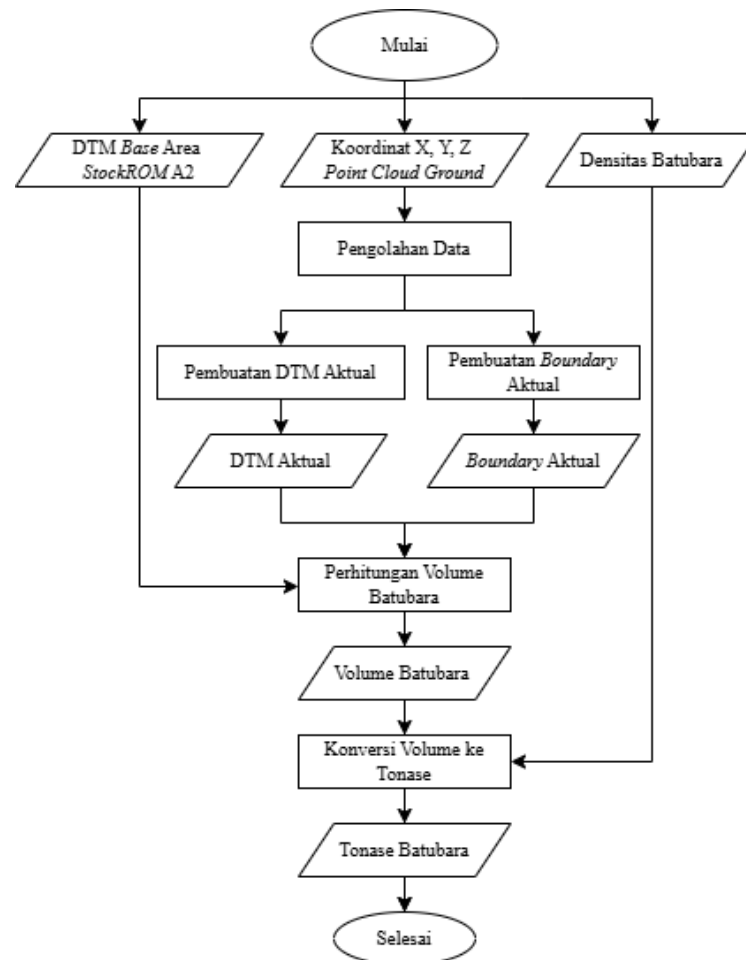


Gambar 16. Hasil klasifikasi *point cloud*.

Data yang telah terklasifikasi kemudian difilter dengan memilih hanya kelas ground sehingga diperoleh titik-titik yang merepresentasikan permukaan tanah secara lebih akurat. Proses penyaringan ini bertujuan untuk menghilangkan pengaruh objek *non-ground* yang dapat menyebabkan distorsi pada model permukaan. Data *ground* tersebut selanjutnya diekspor dalam bentuk *lattice model* dengan ukuran grid 0,20 m. Pemilihan ukuran *grid* ini dilakukan sebagai upaya untuk mereduksi jumlah titik yang sangat besar tanpa menghilangkan karakteristik utama permukaan. Penggunaan *grid* yang lebih teratur juga mempermudah proses pengolahan lanjutan, terutama dalam pembuatan model permukaan dan analisis spasial.

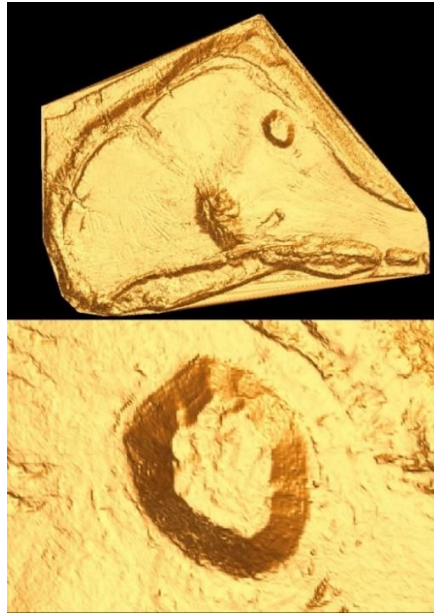
3.5.6 Perhitungan Volume Batubara

Tahapan perhitungan volume batubara pada penelitian ini disusun untuk memperjelas proses penentuan volume berdasarkan data DTM aktual, batas area *stockROM*, dan data densitas batubara. Urutan tahapan perhitungan volume batubara pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 17. Setiap tahapan dilakukan secara sistematis untuk memastikan hasil perhitungan volume yang diperoleh memiliki tingkat ketelitian yang tinggi.



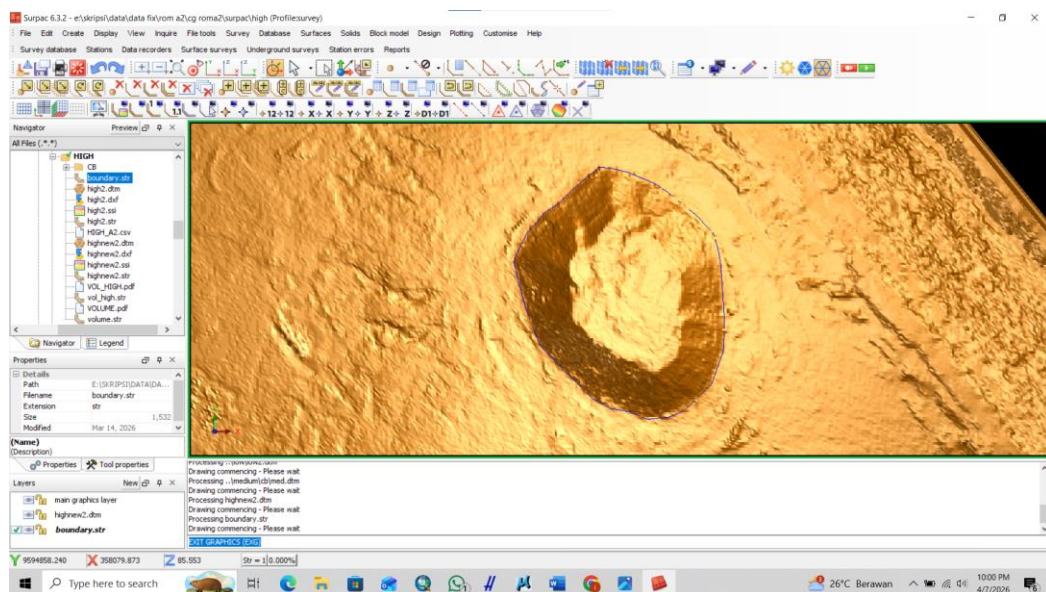
Gambar 17. Alur perhitungan volume batubara.

Perhitungan volume batubara dilakukan menggunakan metode *cut and fill between DTMs*. Data *point cloud ground* dari ketiga tingkat pemrosesan yang telah melalui tahapan pengolahan digunakan sebagai dasar dalam pembentukan *Digital Terrain Model (DTM)* menggunakan metode *Triangulated Irregular Network (TIN)*, yang selanjutnya dimanfaatkan untuk menghitung volume batubara pada area *stockROM*. Kualitas DTM yang dihasilkan sangat bergantung pada kepadatan dan distribusi titik, sehingga perbedaan tingkat pemrosesan berpotensi memengaruhi hasil model permukaan. DTM yang telah terbentuk kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses perhitungan volume dengan membandingkan permukaan terhadap bidang acuan tertentu. Berikut adalah hasil pembentukan DTM dari salah satu tingkat pemrosesan.



Gambar 18. Pembentukan DTM.

Proses perhitungan volume dibatasi oleh *boundary area* yang telah ditentukan melalui proses digitasi untuk memastikan bahwa analisis hanya dilakukan pada wilayah kajian yang relevan. Penentuan batas ini bertujuan untuk menghindari perhitungan pada area di luar *stockROM* yang dapat mempengaruhi hasil estimasi volume. *Boundary area* hasil digitasi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 19. *Boundary area* hasil digitasi.

Proses perhitungan volume dilakukan dengan cara membandingkan model DTM permukaan hasil pemetaan terbaru dengan DTM lantai dasar (*base*) yang diperoleh dari pengukuran topografi perusahaan. Hasil perhitungan menghasilkan nilai volume pengurangan (*cut*) dan volume penimbunan (*fill*) yang merepresentasikan total volume material batubara pada area *stockROM*. Proses ini menggunakan kedua DTM yang telah berada pada referensi yang sama sehingga dapat dibandingkan secara langsung. Penentuan batas area perhitungan dilakukan sesuai dengan *boundary stockROM* agar hasil volume lebih representatif. Tahapan perhitungan volume menggunakan metode *cut and fill between DTMs* ditunjukkan pada Gambar 20.

The screenshot shows a dialog box titled "DTM cut and fill volumes" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is organized into several sections:

- Define the first DTM:**
 - Location: `../././base topo roma2/SUIRPAC/basea22`
 - Object ID: `1`
 - Trisolation ID: `1`
- Define the second DTM:**
 - Location: `highnew2`
 - Object ID: `1`
 - Trisolation ID: `1`
- Define the volume boundary string:**
 - Location: `boundary`
 - Boundary string: `2`
- Define the file for the cut and fill boundary:**
 - Location: `volume`
 - ID number: (empty)
 - Fill string: `2`
 - Cut string: `3`
 - Boundary string: `1`
- Define reporting options:**
 - Decimals: `3`
 - Density: `1.000`
 - Report format: `.pdf`
 - Detailed report
 - Report by elevation
 - Range: (empty)

At the bottom of the dialog, there are three buttons: a help icon (question mark), an "Apply" button with a green checkmark, and a "Cancel" button with a red X.

Gambar 20. Proses perhitungan volume.

Melalui metode *cut and fill between DTMs*, perbedaan antara permukaan aktual tumpukan dan permukaan referensi dihitung sehingga menghasilkan nilai volume dalam satuan meter kubik (m^3). Proses ini dilakukan dengan membandingkan dua model permukaan yang telah dibentuk sebelumnya untuk memperoleh selisih elevasi pada setiap area yang dianalisis. Hasil perhitungan volume yang diperoleh dari pengolahan data menggunakan perangkat lunak pemetaan tambang kemudian dikonversi menjadi tonase dengan mengalikan volume tersebut dengan nilai densitas sesuai jenis *seam* batubara.

3.6 Uji Ketelitian Geometrik

Uji ketelitian geometrik dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian hasil pemodelan fotogrametri UAV terhadap standar ketelitian yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, acuan yang digunakan adalah Kepdirjen Minerba No. 17.K/HK.02/DJB.S/2023 yang mensyaratkan bahwa peta yang dihasilkan harus memenuhi ketelitian untuk skala 1:1000 kelas 1.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil pengolahan model terhadap titik ICP yang diukur menggunakan GNSS metode RTK. Ketelitian horizontal dihitung menggunakan nilai RMSE_x dan RMSE_y berdasarkan Persamaan (5) dan (6), yang kemudian dikonversi menjadi nilai CE90 menggunakan Persamaan (8). Ketelitian vertikal dihitung menggunakan RMSE_z berdasarkan Persamaan (7), yang dikonversi menjadi LE90 menggunakan Persamaan (9).

Nilai CE90 dan LE90 yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan standar ketelitian peta menurut ketentuan Badan Informasi Geospasial No. 6 Tahun 2018 untuk menentukan kelas dan skala peta yang dihasilkan. Hasil pengujian ini kemudian digunakan untuk menilai apakah masing-masing tingkat pemrosesan (*high*, *medium*, dan *low*) telah memenuhi persyaratan ketelitian sesuai acuan yang digunakan.

3.7 Analisis Efisiensi Waktu Pemrosesan

Analisis efisiensi dilakukan menggunakan metode analisis komparatif. Penilaian efisiensi pemrosesan dilakukan berdasarkan waktu total pemrosesan. Waktu total pemrosesan dihitung sejak pengolahan data *base* lokal hingga diperolehnya nilai volume batubara. Waktu pada tahap pemrosesan diperoleh dari durasi proses yang tercatat pada perangkat lunak dan diukur menggunakan pencatatan waktu secara manual menggunakan timer. Total waktu dari seluruh tahapan tersebut digunakan sebagai indikator efisiensi waktu pemrosesan. Tingkat pemrosesan *high* digunakan

sebagai acuan, kemudian efisiensi waktu pemrosesan pada tingkat *medium* dan *low* dihitung berdasarkan persentase penghematan waktu terhadap pemrosesan *high*. Rumus perhitungan efisiensi waktu pemrosesan dapat dilihat pada Persamaan (10) dan Persamaan (11).

3.8 Validasi Estimasi Volume

Validasi estimasi volume dilakukan untuk mengetahui perbedaan hasil perhitungan volume batubara akibat variasi tingkat pemrosesan data fotogrametri. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan volume batubara yang diperoleh dari tingkat pemrosesan *high*, *medium*, dan *low* terhadap data timbangan sebagai data validasi. Data timbangan digunakan sebagai data validasi karena dianggap merepresentasikan kondisi aktual material di lapangan. Proses validasi mengacu pada standar industri dari ASTM International (*American Society for Testing and Materials*), dengan batas toleransi selisih maksimum sebesar 2%.

Hasil perhitungan dinyatakan memenuhi standar apabila nilai selisih $\leq 2\%$. Rumus perhitungan selisih volume dapat dilihat pada Persamaan (12) dan Persamaan (13). Analisis ini bertujuan untuk menentukan tingkat pemrosesan yang menghasilkan estimasi volume paling mendekati data timbangan sebagai data validasi.

3.9 Evaluasi Tingkat Pemrosesan Optimal

Penentuan tingkat pemrosesan optimal dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan tiga parameter, yaitu ketelitian geometrik, validasi estimasi volume, dan efisiensi waktu pemrosesan. Parameter ketelitian geometrik dan validasi volume dievaluasi berdasarkan kesesuaian terhadap standar yang berlaku, sedangkan efisiensi waktu pemrosesan dianalisis secara komparatif dengan menggunakan tingkat pemrosesan *high* sebagai acuan. Tingkat pemrosesan yang menunjukkan kinerja paling baik secara keseluruhan berdasarkan pertimbangan tersebut ditetapkan sebagai tingkat pemrosesan optimal. Hasil perbandingan tersebut disajikan dalam bentuk tabel komparasi untuk mempermudah pengamatan terhadap perbedaan kinerja antar

tingkat pemrosesan secara sistematis. Hasil evaluasi tersebut diharapkan dapat menjadi dasar dalam menentukan tingkat pemrosesan yang paling efektif dan efisien untuk kebutuhan estimasi volume batubara.

V. PENUTUP

5.1 Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan akurasi, efisiensi waktu pemrosesan, serta menentukan tingkat pemrosesan optimal dalam estimasi volume batubara menggunakan foto udara UAV. Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Seluruh hasil pengolahan data UAV pada penelitian ini memenuhi standar ketelitian peta skala 1:1000 kelas 1 sesuai Kepdirjen Minerba No. 17.K/HK.02/DJB.S/2023. Penentuan kelas ketelitian tersebut mengacu pada perhitungan RMSE, CE90, dan LE90 yang dibandingkan dengan klasifikasi dalam Peraturan BIG No. 6 Tahun 2018. Tingkat pemrosesan *high* menunjukkan hasil ketelitian terbaik dibandingkan tingkat pemrosesan *medium* dan *low*. Tingkat pemrosesan *high* memiliki nilai RMSEr sebesar 0,0208 m, RMSEz sebesar 0,0258 m, CE90 sebesar 0,0316 m, dan LE90 sebesar 0,0425 m. Tingkat pemrosesan *medium* memiliki nilai RMSEr sebesar 0,02223 m, RMSEz sebesar 0,02761 m, CE90 sebesar 0,03373 m, dan LE90 sebesar 0,04556 m, sedangkan tingkat pemrosesan *low* memiliki nilai RMSEr sebesar 0,02584 m, RMSEz sebesar 0,02586 m, CE90 sebesar 0,03921 m, dan LE90 sebesar 0,04265 m.
2. Hasil analisis waktu pemrosesan menunjukkan bahwa tingkat pemrosesan *low* menghasilkan efisiensi waktu tertinggi sebesar 51% dengan total waktu pemrosesan selama 1 jam 15 menit 18 detik. Tingkat pemrosesan *medium* menghasilkan efisiensi waktu sebesar 43% dengan total waktu pemrosesan selama 1 jam 26 menit 18 detik. Tingkat pemrosesan *high* memerlukan waktu pemrosesan paling lama, yaitu 2 jam 32 menit 37 detik dan digunakan sebagai waktu acuan dalam analisis efisiensi waktu pemrosesan. Secara keseluruhan,

hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin rendah tingkat pemrosesan yang digunakan, maka semakin singkat waktu pemrosesan yang dibutuhkan.

3. Hasil validasi volume menunjukkan bahwa tingkat pemrosesan *high* menghasilkan estimasi volume yang paling mendekati data timbangan. Tingkat pemrosesan *high* memiliki selisih sebesar 1,6%, tingkat pemrosesan *medium* sebesar 3,4%, dan tingkat pemrosesan *low* sebesar 3,7%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hanya tingkat pemrosesan *high* yang memenuhi toleransi *Standard* ASTM D6172-98, yaitu dibawah 2%, sedangkan tingkat pemrosesan *medium* dan *low* berada di luar batas toleransi.
4. Evaluasi keseluruhan menunjukkan bahwa tingkat pemrosesan *high* merupakan tingkat pemrosesan yang paling optimal dalam estimasi volume batubara. Tingkat pemrosesan *high* menghasilkan ketelitian geometrik terbaik dan estimasi volume yang memenuhi standar ASTM D6172-98, sehingga memiliki tingkat keandalan tertinggi. Meskipun membutuhkan waktu pemrosesan yang lebih besar, tingkat pemrosesan *high* tetap direkomendasikan karena memberikan hasil yang paling akurat dan dapat diandalkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perusahaan pertambangan disarankan untuk menggunakan tingkat pemrosesan *high* pada kegiatan estimasi volume batubara yang membutuhkan ketelitian tinggi, karena tingkat pemrosesan ini terbukti menghasilkan ketelitian geometrik terbaik dan memenuhi toleransi standar ASTM D6172-98.
2. Tingkat pemrosesan *low* disarankan digunakan apabila pengolahan data membutuhkan waktu pemrosesan yang lebih cepat dan tidak terlalu mengutamakan tingkat ketelitian hasil estimasi volume.
3. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan perangkat keras dengan spesifikasi yang lebih tinggi, terutama pada kemampuan *processor*, agar proses komputasi dan pengolahan data fotogrametri dapat dilakukan secara lebih optimal.

4. Pengolahan data disarankan dilakukan dengan ketelitian tinggi pada tahap *marking* GCP, filterisasi *noise*, dan klasifikasi *ground* untuk meminimalkan kesalahan akibat faktor *human error* yang dapat mempengaruhi hasil akhir.
5. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data pembandingan tambahan selain data timbangan, seperti pengukuran terestris atau LiDAR, untuk memperkuat validasi hasil estimasi volume.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, U. A., Dewi, C., & Anisa, R. (2025). Kajian Ketelitian Planimetrik dan Geometrik Peta Foto Udara Dengan Variasi Tinggi Terbang UAV. *Datum: Journal of Geodesy and Geomatics*, 5(1), 13–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.23960/datum.v5i1.6815>
- Afin, A. P., & Kiono, B. F. T. (2021). Potensi Energi Batubara serta Pemanfaatan dan Teknologinya di Indonesia Tahun 2020 – 2050 : Gasifikasi Batubara. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 2(2), 114–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11429>
- Ahmad, A. A., Sidabutar, Y. L., & Herwieany, A. S. (2024). Nirawak Untuk Survei Fotogrametri Pada Proyek Jalan. *Jurnal Jalan Jembatan*, 41(1), 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.58499/jatan.v41i1.1283>
- Aji, A. R. S., & Djurdjani. (2022). Analisis Perbandingan Volume Stockpile Batu Bara Hasil UAV Fotogrametri dan UAV Lidar. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 5(2), 132–138. <https://doi.org/10.22146/jgise.78295>
- Aji, D. S., Sabri, L. M., & Prasetyo, Y. (2019). Analisis Akurasi DEM dan Foto Tegak Hasil Pemotretan dengan Pesawat Nir Awak DJI Phantom 4 (Studi Kasus : Bukit Perumahan Permata Hijau Tembalang Semarang). *Jurnal Geodesi Undip*, 8(2), 8–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jgundip.2019.23729>
- Aji, G. B. J., & Ilmawan, H. (2025). Pembuatan Model 3Dimensi Metode Manual Pada Gedung Juang 45 Bekasi Menggunakan Integrasi Point Cloud Hasil Pengolahan Data Foto Terestris Dan Aerial dengan Menggunakan Metode Structure From Motion (SFM) dan Multi- View Stereo (MVS). *Elipsoida : Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 08(01), 12–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/potensi.%Y.26131>
- Aldiansyah, Arisanti, R., & Nursani, R. (2024). Evaluasi Pola Penimbunan Batubara Pada Rom Stockpile Di PT Global Energi Makmur. *Pondasi: Journal of Applied Science Engineering*, 2(1), 50–62.
- Alsayed, A., & Nabawy, M. R. A. (2023). Stockpile Volume Estimation in Open and Confined Environments : A Review. *Drones*, 7(8), 1–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/drones7080537>.

- ASTM International. (1998). ASTM D6172-98: Standard Test Method for Determining the Volume of Bulk Materials Using Contours or Cross Sections Created by Direct Operator Compilation Using Photogrammetric Procedures. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Assidiq, M. S., & Febriandi. (2025). Perbandingan Pengolahan Orthophoto Menggunakan Surface Type DSM (Digital Surface Model) dengan DTM (Digital Terrain Model). *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 9(1), 2616–2627. <https://doi.org/https://doi.org/10.31004/jptam.v9i1.24983>
- Auningsih, S. W. N., Rohmaeni, D., & Zahar, W. (2021). Pemodelan Stockpile Menggunakan Metode Fotogrametri Dengan Wahana Uav (Unmanned Aerial Vehicle) Di PT Triaryani. *Jurnal Geomine*, 9(2), 141–149. <https://doi.org/https://doi.org/10.33536/jg.v9i02.1490>
- Autume, M., Perry, A., Morel, J., Meinhardt-Ilopis, E., & Facciolo, G. (2020). Stockpile Monitoring Using Linear Shape-From-Shading On PlanetScope Imagery. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-2–2020, 427–434. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-427-2020, 2020>
- Awaliah, A. H., Nurwaskito, A., & Firdaus. (2025). Penerapan Metode Cut And Fill Untuk Desain Hauling Pada Penambangan Komoditas Tanah Urug PT Geostone Khamilah Indonesia. *Jurnal Aneka Tambang*, 02(03), 105–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.33096/eayf3c32>
- Badan Informasi Geospasial. (2014). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Badan Informasi Geospasial. Cibinong, Bogor.
- Badan Informasi Geospasial. (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. Badan Informasi Geospasial. Cibinong, Bogor.
- Bani, M. N. (2022). Analisis Kerapatan 3d Point Clouds Pada Uav Fotogrametri. *Jurnal Qua Teknika*, 12(1), 45–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.35457/quateknika.v12i01.2107>
- Baruna, A. C. A. (2021). Tinjauan Hukum Terhadap Kontraktor Penambang Batu Bara dan Kontraktor Reklamasi Dalam Pelaksanaan Reklamasi Lahan Pasca Tambang di Kota Samarinda. *Journal of Law*, 7(2), 1–12.
- Budiyono, A. S. P. (2025). Analisis Perubahan Volume Lahan Pasca Kegiatan Galian Berbasis UAV dengan Evaluasi DEMNAS sebagai Permukaan Awal. *Jurnal Ilmiah Geomatika Volume*, 5(2), 87–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.31315/imagi.v5i2.14913>

- Cwiakala, P., Puniach, E., Pastucha, E., & Gruszczynski, W. (2026). The impact of processing parameters on high-accuracy measurements in UAV photogrammetry. *Elsevier*, 265(2025). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.120315>
- Dhakal, S., Manandhar, A., & Shah, A. (2025). Integrating UAS Remote Sensing and Edge Detection for Accurate Coal Stockpile Volume Estimation. *Remote Sens*, 17, 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs17183136>
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. (2023). Keputusan Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Nomor 17.K/HK.02/DJB.S/2023 tentang Petunjuk Teknis Pemetaan dan Evaluasi Kemajuan Tambang Mineral dan Batubara dengan Menggunakan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Jakarta.
- Fakih, M. A., Susilo, Y., Prabawa, S. E., & Alina, A. N. (2025). Pembuatan Model Tiga Dimensi Bangunan Kampus Universitas Dr . Soetomo Menggunakan Data Light Detection and Ranging (LIDAR). *Elipsoida : Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 08(01), 42–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/elipsoida.2025.25976>
- Fansya, M. D. Al, Winarno, A., Magdalena, H., Nugroho, W., & Sakdillah. (2022). Kajian Teknis Desain Dan Manajemen Penimbunan Batubara di ROM Stockpile PT. Bara Mega Quantum kota Bengkulu Provinsi Bengkulu. *Journal Transformation of Mandalika*, 3(2), 36–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.36312/jtm.v3i3.1082>
- Gou, J., Lee, H., Park, J., Jang, S., Lee, N., & Song, I. (2026). Development of a stream DTM generation methodology using UAV-based SfM and LiDAR point cloud. *Scientific Reports*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-026-35473-x>
- Guimar, N., Padua, L., Adao, T., Hruska, J., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). VisWebDrone: A Web Application for UAV Photogrammetry Based on Open-Source Software. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi9110679>
- Harfan, A., Yudhatama, D., & Bachrodin, I. (2020). Pemanfaatan Metode Fotogrametri Untuk Pengukuran Garis Pantai dan Identifikasi Objek-objek Tematik dengan Menggunakan Wahana UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (Studi Kasus Pengukuran Garis Pantai Di Pangkalan TNI AL Pondok Dayung). *Jurnal Chart Datum*, 5(1), 71–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.37875/chartdatum.v5i1.147>
- Harsiga, E., Hardianti, S., & Hidayat, A. L. (2024). Analisis Metode Perhitungan Kuantitas Batubara Di Stockpile ROM PT . XYZ. *MINERAL*, 9(1), 33–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.33019/mineral.v9i1.5547>

- Hermann, M., Weinmann, M., Nex, F., Stathopoulou, E. K., Remondino, F., Jutzi, B., & Ruf, B. (2024). Depth estimation and 3D reconstruction from UAV-borne imagery: Evaluation on the UseGeo dataset M. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 13, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2024.100065>
- Irham, F., R, M. Z. D., Fauzan, R. G., & Pramasha, R. R. (2024). Peran Sumber Daya Alam dalam Mendorong Perekonomian Nasional. *Jurnal Media Akademik (JMA)*. 2(11), 1–17. <https://doi.org/10.62281/v2i11.969>
- Kristianie, Y., Usup, H. L. D., & Ferdinandus. (2023). Perhitungan Volume Timbunan Batubara Menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Di PT . Mitra Barito Lumbang Energi Site PT . Kalimantan Prima Nusantara (KPN). *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 7, 79–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.33019/snppm.v7i0.4834>
- Lesmana, I., Suprayogi, A., Saddam, M., Busro, M. A., & Saifuddin. (2022). Pengaruh Rasio Keuangan Terhadap Pertumbuhan Laba (Studi Empiris Pada Perusahaan Tambang Batubara Yang Terdaftar di Bursa Efek Indonesia Periode Tahun 2017-2020). *Jurnal Neraca Peradaban*, 2(2), 113–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.55182/jnp.v2i2.177>
- Matong, H. I. (2021). Pemanfaatan Digital Terrain Model Hasil Fotogrametri Unmanned Aerial Vehicle Untuk Estimasi Ketinggian Genangan Air Banjir Hasil Deteksi Citra Synthetic Aperture Radar. *Jurnal Sumber Daya Air*, 17(1), 39–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.32679/jsda.v17i1.711>
- Maulana, M. H. R., & Kuncoro, H. (2025). Evaluasi Pendekatan Hybrid Dalam Pengukuran Volume Stockpile Batubara Menggunakan UAV , GNSS RTK dan Total Station. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(4), 15653–15659. <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/issue/view/3>
- Model, M. P., Purnomo, H., & Sari, L. P. (2021). Perbandingan Perhitungan Volume Stockwash Menggunakan Total Station dan Unmanned Aerial Vehicle Di PT. Jaga Usaha Sandai. *Mining Insight*, 02(02), 147–152.
- Nagy, L. A., Szabó, S., Burai, P., & Bertalan, L. (2024). Improving Urban Mapping Accuracy : Investigating the Role of Data Acquisition Methods and SfM Processing Modes in UAS - Based Survey Through Explainable AI Metrics. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 8(15), 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41651-024-00179-z>
- Oloufa, A. A., Member, & ASCE. (1991). Triangulation Applications In Volume Calculation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 5(1), 103–119. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1991\)5:1\(103\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1991)5:1(103))
- Orzeł, B., Tokarczyk, J., Michalak, D., & Szeferda, K. (2025). Automated on-demand inventory of coal dumps and heaps using UAV imagery and IoT-driven data processing. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral*

- Resources Management*, 41(3), 117–143.
<https://doi.org/10.24425/gsm.2025.155339>
- Over, J. R., Ritchie, A. C., Kranenburg, C. J., Brown, J. A., Buscumbe, D., Noble, T., Sherwood, C. R., Warrick, J. A., & Wernette, P. A. (2021). Processing Coastal Imagery With Agisoft Metashape Professional Edition , Version 1 . 6 — Structure From Motion Workflow Documentation. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1039*, 46, 1–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/ofr20211039>
- Pinatik, N. Y., & Papilaya, F. S. (2024). Pengolahan Foto Udara UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Menggunakan Software Agisoft Metashape. *Jurnal Perangkat Lunak*, 6(1), 1–11.
<https://doi.org/https://doi.org/10.32520/jupel.v6i1.2838>
- Pranajati, A., & Ananda, F. (2023). Perencanaan Penambangan Tambang Terbuka Batubara Pada PT. Caritas Energi Indonesia Jobsite Batubara Jambi Lestari Kabupaten Muaro Jambi, Provinsi Jambi. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 23(2), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.37412/jrl.v23i2.196>
- Prayogo, I. P. H., Manoppo, F. J., & Lefrandt, L. I. R. (2020). Pemanfaatan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter dalam Pemetaan Digital (Fotogrametri) Menggunakan Kerangka Ground Control Point (GCP). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 10(1), 47–58.
- Purba, B., Sakinah, A., Purba, E. E., Marpaung, K. B., & Bella, S. (2025). *Pengaruh Pertambangan Batu Bara terhadap Lapangan Pekerjaan*. 4(2), 8148–8153.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i2.3029>
- Ramadhani, S. M., Prasetyo, Y., & Bashit, N. (2021). Analisis Ketelitian Point Clouds Teknologi Terrestrial Laser Scanner (Studi Kasus: Dekanat Lama Fakultas Teknik). *Jurnal Geodesi Undip*, 10(1), 250–258.
<https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jgundip.2021.29712>
- Rangu, R. B., Kasmira, & Alhabsyi, G. A. P. (2022). Analisis Cycle Time Dan Efisiensi Kerja Preparasi Kering Bijih Nikel Pada Pulp Preparation Di PT . Vale Indonesia , Tbk. *Jurnal Teknik AMATA*, 03(2), 75–80.
<https://doi.org/https://doi.org/10.55334/jtam.v3i2.307>
- Rassarandi, F., Sai, S., & Purwanto, H. (2015). Analisis Ketelitian Perhitungan Tonase Stockpile Batubara Hasil Pengukuran Metode RTK Radio GNSS dengan Teknik Akuisisi Data secara Point to Point dan Auto. *Jurnal Integrasi*, 7(2), 123–129.
- Sambodo, G. A. (2023). Perekaman Tiga Dimensi (3D) Benda Hasil Budaya Menggunakan Telepon Pintar : Studi Kasus Arca Dewi Laksmi di Madiun. *JANUS*, 1(1), 61–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.22146/janus.v1i1.6599>

- Samosir, V. R., Mardiah, & Andini, D. E. (2018). Kelancaran Kegiatan Penambangan Batugamping Untuk Mencapai Target Produksi 2 . 317 . 000 Ton / Tahun Pada Pabrik Baturaja 2 PT Semen Baturaja (Persero) Tbk di Desa Sukajadi Baturaja. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 134–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.33019/snppm.v2i0.607>
- Samudro, P. A., Asmara, S., & Kuncoro, S. (2023). Pengaruh Perbedaan Komposisi dan Ukuran Partikel Batang Singkong dan Batubara Terhadap Kualitas Bahan Bakar Briket Biocoal. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*, 2(2), 270–280. <https://doi.org/https://doi.org/10.23960/jabe.v2i2.7481>
- Sarmidi, Nuryanneti, I., & Prayoga, R. D. (2023). Evaluasi Produktivitas Alat Gali Muat Excavator Volvo 480 Dan Alat Angkut Dump Truck Volvo 400 Pada Penambangan Batubara Di PIT 2 Tambang Banko Barat PT. Bukit Asam Tbk. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, 1(2), 53–60. <https://doi.org/https://doi.org/10.62278/jits.v1i2.11>
- Satriawan, D. D. (2021). Pengelolaan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara Pasca Berlakunya Undang- Undang tentang Cipta Kerja. *Jurnal Esensi Hukum*, 3(2), 123–133. <https://doi.org/https://doi.org/10.35586/esensihukum.v3i2.108>
- Sepriadi, Adiwarmn, M., Pranola, S., & Putra. (2024). Analisis Perbandingan Kuantitas Batubara Menggunakan Metode Situasi Detail Dengan Software Surpac Vision 6.5.1 dan Metode Timbangan di PT. Putra Muba Coal. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, 1(3), 159–166. <https://doi.org/https://doi.org/10.62278/jits.v1i3.19>
- Setyawan, D., & Susilo, Y. (2025a). Analisis Perbandingan Volume Stockpile Batu Bara Hasil Uav Lidar Dan Hasil Penimbangan (Studi Kasus Pt. Hardaya Mining Energy, Site Sebakis, Nunukan, Kalimantan Utara). *El-Jughrafiyah*, 5(1), 112. <https://doi.org/10.24014/jej.v5i1.36301>
- Setyawan, D., & Susilo, Y. (2025b). Analisis Perbandingan Volume Stockpile Batubara Hasil UAV Lidar dan Hasil Penimbangan (Studi Kasus PT. Hardaya Mining Energy, Site Sebakis, Nunukan, Kalimantan Utara). *Jurnal Geografi dan Terapannya*, 05(01), 112–123. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24014/jej.v5i1.36301>
- Sherina, N., Franto, & Mardiah. (2023). Perhitungan Volume Stockpile dan Pengoptimalan Waktu Pengolahan Stockpile 3 , 5 dan 6 Terhadap Produksi Alat Gali muat dan Alat Angkut pada TB Primer Batubesi PT Timah Tbk Abstrak. *MINERAL*, 8(2), 31–37. <https://doi.org/https://doi.org/10.33019/mineral.v8i2.5070>
- Silaban, R. M., Fadly, R., Anisa, R., & Dewi, C. (2025). Perbandingan Nilai Ketelitian Geometri Hasil Pengolahan Foto Udara dengan UAV Wingtra One

- Gen II Dan Mavic 3 Enterprise (Studi Kasus : Proyek Jalan Tol Cimanggis Cibitung). *Jurnal Ilmiah Tekno Global*, 14(01), 25–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.36982/jtg.v14i01.4878>
- Sinaga, M. B., & Oktavianor, T. (2025). Efektivitas dan Efisiensi Sistem Manajemen Hauling Teman Indobara dalam Kerangka Pengembangan dan Pemberdayaan Masyarakat Pada PT . XYZ. *Jurnal Bisnis dan Pembangunan*, 14(1), 10–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.20527/jbp.1414i1.64>
- SM, A. A. I., Riansyah, & Sutaji, A. A. M. (2024). Perhitungan Tonase Stockpile Batubara Metode Cut and Fill Menggunakan Aplikasi Minescape. *Journal of Geomatics Engineering, Technology, and Science (GETS)*, 2(2), 41–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.51967/gets.v2i2.36>
- Sufi, F., Yuliana, L., & Fuadi, Y. (2023). Identifikasi Bahaya, Penilaian, dan Pengendalian Risiko Proses Pengangkutan Batu Bara di PT Alam Karya Gemilang Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. *JUMANTIK*, 8(2), 149–160. <https://doi.org/10.30829/jumantik.v8i2.14582>
- Syam, R. F., & Usman, S. (2025). Analysis of Artificial Intelligence-Based Photogrammetry for Calculating the Volume of Bulk Material Stockpiles. *MALCOM: Indonesian Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 5(4), 1443–1449. <https://doi.org/https://doi.org/10.57152/malcom.v5i4.2323>
- Tucci, G., Gebbia, A., Conti, A., Fiorini, L., & Lubello, C. (2019). Monitoring and Computation of the Volumes of Stockpiles of Bulk Material by Means of UAV Photogrammetric Surveying. *Remote Sens*, 11, 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11121471>
- Yogaswara, Y., & Fawzy, F. Y. (2023). Sistem Penimbangan Stratified Random Sampling Pada Pengangkutan Batubara PT. Adaro Indonesia. *PROSIDING TPT XXXII PERHAPI, April*, 487–498.