

PENGUNAAN FOTO UDARA UNTUK MONITORING LERENG TIMBUNAN IPD PIT 1 LAHAN PASCATAMBANG PT MEGAPRIMA PERSADA

Sumarlin^{*)}, Ibrahim, Yunianto Setiawan, Revia Oktaviani, Pangea Ghiyats Sabrian

Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Pascasarjana, Universitas Mulawarman

Email : papamvh@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu tantangan utama dalam pascatambang adalah pemantauan stabilitas lereng timbunan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat ketelitian penggunaan foto udara dari Unmanned Aerial Vehicles (UAV) dalam mengidentifikasi lereng timbunan lahan pascatambang, dengan pendekatan kuantitatif berbasis parameter spasial. Dari hasil penelitian penggunaan drone/UAV dalam kegiatan identifikasi lereng lahan pascatambang IPD (In pit dump) Pit 1 lahan pascatambang PT Megaprima berdasarkan ketentuan (standart) yang berlaku didapat nilai CE90 yang dihasilkan nilai horisontal adalah 0,64 meter dan nilai LE90 ketelitian secara vertikal adalah 2,02 meter secara ketentuan masih masuk dalam Kelas 1 pada ketelitian horisontal dan masuk kedalam kelas 3 ketelitian secara vertikal. Dari data spasial yang dihasilkan dari pemetaan menggunakan drone atau UAV pada daerah penelitian IPD Pit 1 berdasarkan analisis ulang (back analysis) geoteknik nilai Faktor Keamanan (FK) adalah 0,77 dalam kondisi FK Dinamis pada salah titik lereng timbunan yang diteliti, sehingga jika mengacu kepada ketentuan Kepmen ESDM nomor : 1827.K/30/MEM/2018 masuk kedalam kategori keparahan konsekuensi tinggi. Secara lingkungan daerah penelitian masih terdapat void, kurangnya vegetasi yang menutupi, banyak terbentuk gulir erosi dan dekat dengan pemukiman Masyarakat serta daerah penelitian merupakan lereng timbunan yang terbentuk pada lubang bekas tambang seluas 70 Ha.

Kata Kunci : UAV , foto udara , geoteknik

ABSTRACT

One of the main challenges in post-mining is monitoring the stability of dump slopes. This study aims to analyze the accuracy level of using aerial photos from Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in identifying post-mining land dump slopes, with a quantitative approach based on spatial parameters. From the research results on the use of drones/UAV in identifying slopes of post-mining land in the IPD (In Pit Dump) Pit 1 of PT Megaprima, based on applicable standards, the CE90 value for horizontal accuracy is 0.64 meters and the LE90 value for vertical accuracy is 2.02 meters, which still falls within Class 1 for horizontal accuracy and Class 3 for vertical accuracy. From the spatial data generated from mapping using drones or UAVs in the research area of IPD Pit 1, based on back analysis of geotechnical data, the Factor of Safety (FS) value is 0.77 under dynamic FS conditions at one point of the studied dump slope, thus referring to the provisions of ESDM Ministerial Decree number: 1827.K/30/MEM/2018, it falls into the category of high consequence severity. Environmentally, the research area still has voids, a lack of vegetation cover, significant erosion gullies, and is close to residential areas, and the research area consists of slopes formed in a former mining pit covering an area of 70 Ha.

Keywords: UAV, aerial photography, geotechnics

1. Pendahuluan

Aktivitas pertambangan, khususnya tambang terbuka (open-pit mining), memiliki dampak signifikan terhadap morfologi lahan dan lingkungan. Di Indonesia, lebih dari 8 juta hektar lahan telah terdaftar dalam izin usaha pertambangan (IUP), dan sebagian besar telah mengalami perubahan bentang alam secara drastis (Kementerian ESDM, 2023). Dampak utama dari kegiatan ini adalah terbentuknya lereng timbunan yang tidak stabil, yang berpotensi menimbulkan longsor dan kerusakan lingkungan lanjutan.

^{*)} Penulis Utama, Penanggung Jawab

Salah satu tantangan utama dalam pascatambang adalah pemantauan stabilitas lereng timbunan. Lereng yang dibentuk oleh material buangan tambang sering kali memiliki struktur yang heterogen dan tidak terkompaksi dengan baik, meningkatkan risiko ketidakstabilan. Oleh karena itu, pemantauan dan identifikasi lereng secara akurat menjadi aspek penting dalam pengelolaan lahan pascatambang.

Metode konvensional untuk pemetaan lereng, seperti survei topografi manual dan penggunaan total station, membutuhkan waktu, biaya, serta aksesibilitas yang tinggi. Area pascatambang sering kali sulit dijangkau secara fisik, terlebih dengan medan yang ekstrem. Dalam konteks ini, pendekatan berbasis teknologi menjadi pilihan yang lebih efisien dan aman.

Dalam satu dekade terakhir, penggunaan Unmanned Aerial Vehicles (UAV) atau drone telah berkembang pesat untuk keperluan pemetaan topografi dan lingkungan. UAV mampu menghasilkan foto udara resolusi tinggi yang dapat diolah menjadi model elevasi digital (DEM) dan ortofoto, yang sangat bermanfaat untuk analisis morfologi lereng (Rossi et al., 2020). Teknologi ini dinilai lebih hemat biaya dan cepat dibandingkan metode pemetaan tradisional.

Studi oleh Alsadik et al. (2021) menunjukkan bahwa UAV efektif dalam mengidentifikasi bentuk permukaan tanah di area bekas tambang, termasuk dalam estimasi volume timbunan dan kemiringan lereng. Di Indonesia, beberapa perusahaan tambang mulai menerapkan UAV untuk kebutuhan eksplorasi dan pemantauan, namun penggunaannya untuk identifikasi lereng pascatambang masih terbatas pada skala pilot project.

Meskipun UAV memberikan keunggulan dalam pengambilan data spasial, tantangan masih ada, termasuk akurasi data tergantung pada kualitas kamera dan parameter penerbangan, serta kebutuhan perangkat lunak pengolahan data yang mumpuni seperti Agisoft Metashape atau Pix4D. Selain itu, integrasi hasil identifikasi lereng dengan sistem pengelolaan risiko pascatambang masih jarang dilakukan.

Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pemetaan vegetasi (Restrepo et al., 2020) atau rekonstruksi topografi umum menggunakan UAV, namun sangat sedikit yang secara spesifik meneliti efisiensi UAV untuk identifikasi lereng timbunan di lahan pascatambang. Bahkan, sebagian studi belum mengukur akurasi spasial dengan parameter kuantitatif seperti Root Mean Square Error (RMSE) atau slope deviation.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan pendekatan kuantitatif berbasis foto udara untuk mengidentifikasi kemiringan lereng timbunan di area pascatambang. Dengan membandingkan hasil interpretasi lereng dari foto udara dengan data kontrol lapangan, studi ini akan memberikan pemahaman yang lebih sistematis dan objektif terkait keandalan metode UAV dalam konteks ini.

Secara teoritis, penelitian ini akan memberikan kontribusi pada pengembangan metode pemetaan lereng berbasis UAV dalam ranah geomatika dan rekayasa lingkungan. Secara praktis, hasilnya dapat digunakan oleh pelaku industri pertambangan, konsultan reklamasi, maupun pemerintah daerah untuk merancang strategi mitigasi risiko dan reklamasi lahan yang lebih efektif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode pemantauan dan analisis kestabilan lereng timbunan pascatambang dengan memanfaatkan foto udara dari UAV. Secara spesifik, penelitian ini memiliki tujuan untuk menilai tingkat ketelitian foto udara dalam memantau perubahan lereng dibandingkan survei lapangan dan mengkaji penggunaan foto udara untuk analisis ulang kestabilan lereng.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis kestabilan lereng berbasis data fotogrametri udara. Pendekatan ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk mengukur dan menganalisis kestabilan lereng secara objektif menggunakan parameter geoteknik yang dapat dihitung secara matematis dan dianalisis secara statistik.

Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini berorientasi pada pengukuran karakteristik geoteknis dan morfologis lereng pasca-tambang menggunakan data foto udara. Pendekatan ini memungkinkan analisis numerik terhadap parameter kestabilan lereng, seperti kemiringan lereng (*slope angle*), ketinggian lereng (*slope height*) serta melakukan analisis geometri dan deformasi lereng berdasarkan hasil pemodelan fotogrametri.

Melalui pendekatan ini, penelitian dapat memberikan hasil yang objektif dan terukur, yang dapat digunakan untuk evaluasi risiko serta rekomendasi stabilisasi lereng pasca-tambang. metode penelitian yang digunakan adalah penginderaan jauh atau fotogrametri, melakukan *Back Analysis* (kajian ulang) geoteknik serta melakukan validasi hasil pemodelan dengan data lapangan atau data historis untuk meningkatkan akurasi.

A. Data dan Peralatan

Jenis Data yang Digunakan penelitian ini menggunakan beberapa jenis data utama Foto udara diperoleh melalui *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) untuk analisis morfologi permukaan menggunakan drone DJI Air 2S (drone komersil), titik ikat atau *Ground Control Point* (GCP) menggunakan patok survey yang sudah terpasang dan diketahui koordinat dan beda tingginya (x, y dan z), kemudian penggunaan data topografi meliputi *Digital Elevation Model* (DEM) dan *Digital Surface Model* (DSM) untuk mengamati perubahan bentuk lahan. Untuk hasil serta penggunaan data laporan kajian analisa geoteknik.

Peralatan dan perangkat lunak yang digunakan untuk akuisisi dan analisis data, digunakan beberapa perangkat keras dan lunak yaitu *Drone UAV DJI Air 2S*, penggunaan perangkat lunak yaitu *WebODM* atau *OpenDroneMap* untuk pemrosesan citra fotogrametri, *ArcGIS* atau *QGIS* untuk analisis geospasial dan perubahan morfologi lereng dan *Slide6* atau *GeoStudio* untuk evaluasi stabilitas lereng menggunakan metode limit equilibrium.

B. Metode Pengumpulan Data

Akuisisi Data dengan UAV dengan melakukan penerbangan drone dilakukan dengan pola jalur yang sistematis untuk memastikan cakupan area penelitian yang optimal dan penggunaan data citra diambil dengan resolusi tinggi dan dikoreksi secara geometrik untuk meningkatkan akurasi.

Pengolahan data dengan fotogrametri digital yang terdiri dari proses pengolahan dilakukan dengan metode *Structure from Motion* (SfM) untuk menghasilkan model 3D kemudian data diolah menjadi *DSM* dan *DEM* yang digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Tahapan terakhir adalah melakukan validasi Data dengan Survei Lapangan dari data UAV dikoreksi dengan menggunakan titik kontrol tanah (*Ground Control Points/GCP*) dari patok survey yang sudah diketahui koordinat dan beda tingginya selanjutnya melakukan verifikasi morfologi lahan dilakukan dengan observasi langsung di lapangan.

C. Metode Analisis Data

Analisis ketelitian data foto udara dengan melakukan Perhitungan nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) dari koordinat horizontal dan beda tinggi atau elevasi (vertical), menggunakan petunjuk teknis berdasarkan peraturan Kepdirjen Minerba No. 17.K/HK.02/DJB.S/2023 tanggal 2 Oktober 2023 dan dimana nilai ketelitian dengan skala 1 : 5.000 perbandingannya selisihnya ketelitian mengacu pada nilai CE90 dan LE90 pada Kelas I untuk Horizontal adalah 1,5 meter dan vertical 1 meter, kelas 2 untuk ketelitian horizontal 3 meter dan vertikal 1,5 meter, sedangkan untuk kelas 3 tingkat ketelitian horizontal 4,5 meter dan vertikal 2 meter. Jika nilai selisih peta dari RBI yang diperoleh dari hasil pemetaan drone ataupun ground survey lebih tinggi dari nilai setiap kelas maka ketelitian pasti dibawah 90%

Back Analysis Kestabilan Lereng dari hasil pemetaan drone dilakukan pengolahan dan analisis data menggunakan software WebODM akan menghasilkan data spasial berupa data Digital Elevation Model (DEM) yang dirubah menjadi Digital Terrain Model (DTM) yang bertujuan menghilangkan titik-titik ketinggian yang bukan titik ketinggian tanah (ground level) seperti bangunan dan tumbuh-tumbuhan. Setelah titik ketinggian sudah pada posisi ground level maka data yang dihasilkan adalah data DTM, menggunakan software ArcGis dilakukan pengolahan data (raster) menggunakan tools yang sudah tersedia pada software ArcGis yaitu ArcToolBox terdapat fitur Spatial Analyst Tools → Surface → Contour, secara otomatis tools ini akan mengolah data DTM menjadi garis-garis elevasi (garis kontur). Dari data peta topografi yang dihasilkan dilakukan pengolahan data lanjutan menggunakan software Minescape, dari data peta kontur hasil pemetaan drone overlay dengan peta topografi situasi ground survey kemudian dibuat penampang sayatan

yang bisa menggambarkan bentuk lereng pada daerah penelitian. Penampang sayatan dibuat sebanyak 7 (tujuh) sayatan. Dari data Minescape berupa hasil olahan data kontur dan penampang sayatan diekspor ke software AutoCad untuk dibuatkan layout peta. Data kontur dari hasil pengukuran ground survey dan hasil pemetaan drone di overlay sehingga bisa terlihat perbandingan bentuk morfologi dari kedua sumber data tersebut. Menggunakan software geoteknik (Slide 6.0) dilakukan Input data geometri lereng dari model 3D hasil drone, kemudian melakukan simulasi Faktor Keamanan (FS) aktual dari lereng yang telah mengalami perubahan morfologi dan membuat kalibrasi FS dengan kondisi nyata melalui analisis inverse (back analysis). Peta kemiringan lereng dibuat menggunakan ArcGis untuk mengidentifikasi perbedaan antara pengolahan data yang diperoleh dari hasil pemetaan lapangan (ground survey) dengan pemetaan menggunakan teknologi drone (UAV). Dari file Digital Terrain Model (DTM) menggunakan ArcToolbox pada software ArcGis dilakukan pengolahan data atau raster dengan fitur Spatial Analysis Tool → Sruface → Slope

3. Hasil dan Pembahasan

A. Hasil Penelitian

Pemetaan drone di menggunakan DJI Air 2S yang merupakan drone atau Unmanned Aerial Vehicle (UAV) jenis komersil yang tidak memiliki fitur khusus untuk pemetaan dimana jika drone khusus mapping dilengkapi dengan fitur RTK (Real Time Kinematic) dimana drone bisa memungkinkan memperbaiki data posisi GPS secara real time saat drone terbang, sehingga data yang diterima pada remote posisi atau koordinat sudah terkoreksi secara otomatis dan drone RTK memiliki penerima GNSS (Global Navigation Satelilite System) yang terhubung dengan stasiun pangkalan, stasiun pangkalan akan memberikan data koreksi ke drone, dan drone akan bisa memperbaiki data posisi yang dikumpulkan.

Dari pemetaan menggunakan drone DJI Air 2S dihasilkan fotogrametri yang dilakukan pengolahan data menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape dan dimasukan koordinat titik GCP (Ground Control Point) yang diketahui nilai koordinatnya (x , y dan z) dimana titik GCP dipasang dengan pemetaan lapangan (ground survey) menggunakan alat Total Station, kemudian dari data koordinat asli dari titik GCP dibandingkan dengan koordinat hasil plotting titik GCP pada fotogrametri didapatkan hasil nilai perbandingan titik GCP berdasarkan koordinat survei dan koordinat drone. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan Nilai Koordinat (X, Y dan Z) Hasil Pemetaan Drone dengan Ground Suvei

NO. GCP	LABEL PATOK	KOORDINAT				ALTITUDE	
		X	X	Y	Y	Z	Z
		Survei	Drone	Survei	Drone	Survei	Drone
		(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)
GCP 1	HS 54	492702,88	492703,00	9939276,45	9939276,00	12,77	13,21
GCP 2	HS 300	492830,95	492831,00	9939515,43	9939515,00	16,95	16,86
GCP 3	HS 111	492775,52	492776,00	9939836,78	9939837,00	19,21	19,38
GCP 4	P 04	492633,73	492634,00	9939899,72	9939900,00	17,96	19,79
GCP 5	P 03	492438,23	492438,00	9940034,98	9940035,00	19,86	21,84

Jika melihat tabel 1 adanya selisih koordinat (x , y dan z) untuk titik GCP yang digunakan sebagai titik ikat fotogrametri maka diperlukan pengujian ketelitian posisi mengacu pada perbedaan koordinat (X,Y, dan Z) antara titik uji pada gambar atau peta dengan lokasi sesungguhnya dari titik uji pada permukaan tanah. Pengukuran akurasi menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) atau circular error.

Uji ketelitian posisi dilakukan hingga mendapatkan tingkat kepercayaan peta 90% Circular Error dan Linear Error. Uji ketelitian posisi ditentukan dengan menggunakan titik uji yang memenuhi ketentuan obyek yang digunakan sebagai titik uji, yaitu dapat diidentifikasi dengan jelas di lapangan dan di peta yang akan diuji, merupakan objek yang relatif tetap tidak berubah bentuk dalam jangka waktu yang singkat; dan memiliki sebaran yang merata di seluruh area yang akan

diuji. Adapun hasil pengujian ketelitian menggunakan rumus RMSE (Root Mean Square Error) sebagai berikut:

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{data_i} - X_{cek_i})^2 + (Y_{data_i} - Y_{cek_i})^2}{n}}$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{data_i} - Z_{cek_i})^2}{n}}$$

Keterangan:

RMSE r : RMSE komponen horisontal

RMSE z : RMSE komponen vertikal

n : jumlah pengamatan

X : koordinat Easting (UTM)

Y : koordinat Northing (UTM)

Z : koordinat tinggi (ortometrik)

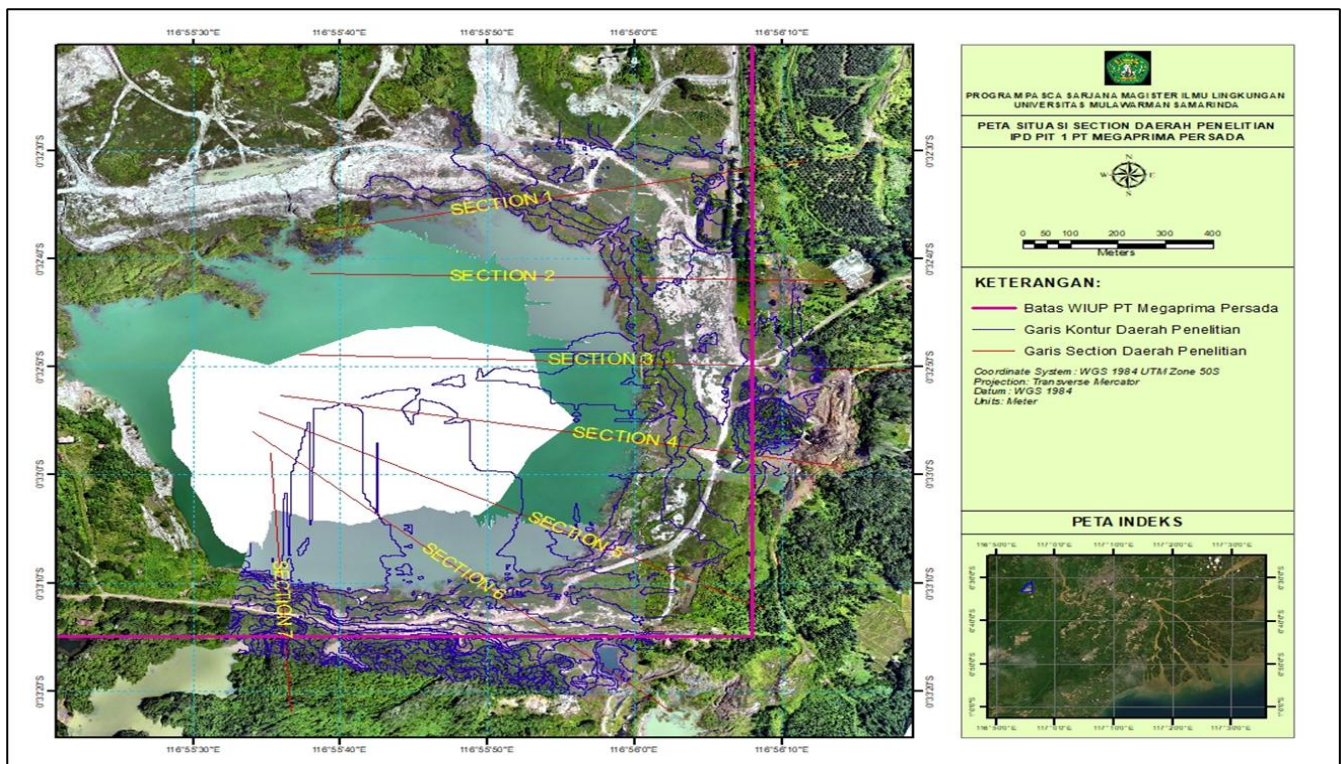
Adapun hasil perhitungan ketelitian peta berdasarkan titik 5 (lima) titik GCP yang menjadi titik ikat pemetaan menggunakan drone dapat dilihat pada tabel 2 dan tabel 3.

Tabel 2 Perhitungan Ketelitian Horisontal (CE90) Titik GCP Survei dan Ploting Drone pada Daerah Penelitian

No. Titik	Nama Titik GCP	Label Patok	X	X	(D X)	(D X)^2	Y	Y	(D Y)	(D Y)^2	(D X)^2 + (D Y)^2
			(Koord. Survei)	(Koord. Drone)			(Koord. Survei)	(Koord. Drone)			
1	GCP 1	HS 54	492702,88	492703,00	-0,12	0,02	9939276,45	9939276,00	0,45	0,20	0,22
2	GCP 2	HS 300	492830,95	492831,00	-0,05	0,00	9939515,43	9939515,00	0,43	0,18	0,19
3	GCP 3	HS 111	492775,52	492776,00	-0,48	0,23	9939836,78	9939837,00	-0,22	0,05	0,27
4	GCP 4	P 04	492633,73	492634,00	-0,27	0,07	9939899,72	9939900,00	-0,28	0,08	0,15
5	GCP 5	P 03	492438,23	492438,00	0,23	0,05	9940034,98	9940035,00	-0,02	0,00	0,05
Jumlah											0,88
Rata-rata											0,18
RMSE											0,419
CE90											0,64

Tabel 3 Perhitungan Ketelitian Vertikal (LE90) Titik GCP Survei dan Ploting Drone pada Daerah Penelitian

No.	Nama Titik GCP	Label Patok	ELEVASI		(D Z)	(D Z)^2
			Z (Survei) (M)	Z (Drone) (M)		
1	GCP 1	HS 54	12,77	13,21	-0,44	0,19
2	GCP 2	HS 300	16,95	16,86	0,09	0,01
3	GCP 3	HS 111	19,21	19,38	-0,17	0,03
4	GCP 4	P04	17,96	19,79	-1,83	3,35
5	GCP 5	P03	19,86	21,84	-1,98	3,91
Jumlah						7,49
Rata-rata						1,50
RMSE						1,22
LE90						2,02



Gambar 1 Peta Situasi Section Daerah Penelitian

Penggunaan foto udara untuk back analysis geoteknik didapatkan hasil berdasarkan peta section atau sayatan melintang dari peta kontur topografi pemetaan menggunakan drone, menggunakan software Minescape dibuat sebanyak 7 section bisa dilihat pada lampiran 10 Peta Situasi Section yang menggambarkan garis yang memotong morfologi lereng berdasarkan topografi daerah penelitian IPD Pit 1 yang dipergunakan untuk back anlysis.

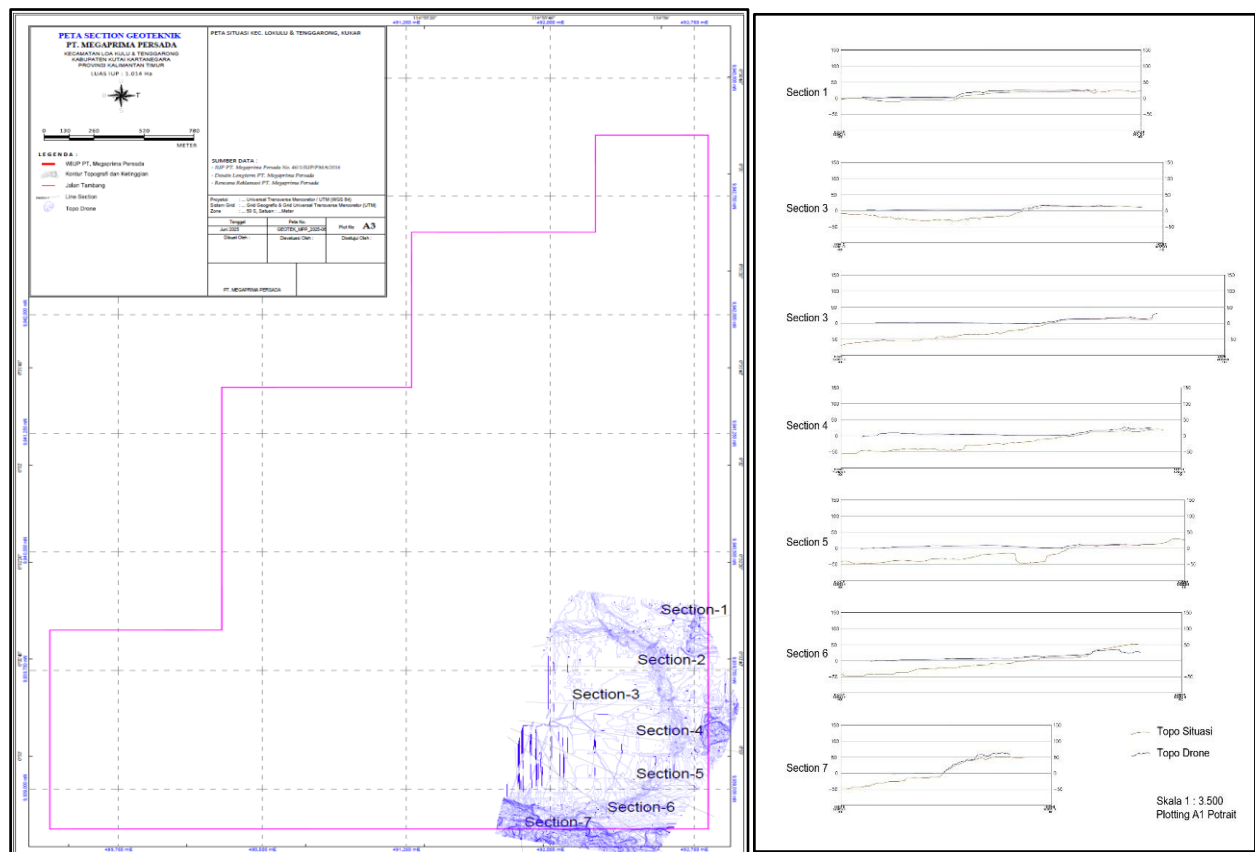
Untuk posisi section dengan situasi foto udara dapat dilihat pada gambar 1. Dari peta topo drone setelah dibuat section atau sayatan sebanyak 7 (tujuh) section didapatkan gambaran secara 2 dimensi (2D) geometri lereng IP Pit 1 dari setiap section untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2. Dari 7 (tujuh) section (gambar 3) yang menggambarkan geometri lereng IPD Pit 1 PT Megaprima Persada dilakukan Analisis Ulang atau Back Analysis Geotekniknya menggunakan parameter atau propertis hasil analisis contoh material pembentuk lereng timbunan area IPD Pit 1 (lihat pada tabel 4) dan memperhitungkan factor pembebanan dari luar dalam hal ini pembebanan dari peralatan mekanis yang digunakan pada tahap reklamasi bisa Adapun jenis, spesifikasi serta berat dari peralatan yang digunakan bisa dilihat pada tabel 5.

Semua data sesuai tabel 5 dan tabel 6 diperoleh berdasarkan hasil analisis sebelumnya yaitu pada Laporan Kajian Geoteknik, Hidrologi dan Geohidrologi yang dilakukan oleh PT Agri Natur Indonesia di wilayah IUP PT Megaprima Persada tahun 2021 Dari hasil Back Analysis didapatkan data simulasi lereng IPD Pit 1 antara lain tinggi lereng tunggal dalam satuan meter, tinggi lereng keseluruhan dalam satuan meter, sudut lereng tunggal (*slope*) dalam satuan derajat atau persen lereng, sudut lereng keseluruhan (*overall slope*) dalam satuan derajat atau persen lereng, koefien gempa, perhitungan beban luar dalam hal ini pembebanan dari peralatan yang digunakan, perhitungan nilai Faktor Keamanan (FK/FS) Statis, perhitungan nilai Faktor Keamanan (FK/FS) Dinamis, Probalitas Kelongsoran (Probalitiy of Failure/PoF) dalam satuan persen dan untuk standar nilai FK dan PoF menggunakan ketentuan peraturan yang berlaku untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 4.

Di Indonesia terdapat peraturan atau regulasi yang mengatur terkait pengelolaan geoteknik di kegiatan pertambangan yang tertuang didalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor : 1827.K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan Yang Baik tertanggal 7 Mei 2018, dimana terkait pengelolaan geoteknik terdapat pada Lampiran II Pedoman Pengelolaan Teknis Pertambangan. (Tabel 4)

Tabel 4 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (Consequences of Failure / CoF)	Kriteria dapat diterima (Acceptance Criteria)		
		Faktor Keamanan (FK Statis) (Min)	Faktor Keamanan (FK Dinamis) (Min)	Probabilitas Longsor (Probability of Failure) (maks) PoF (FK≤1)
Lereng Tunggal	Rendah s.d Tinggi	1,1	Tidak ada	25 – 50%
Inter-ramp	Rendah	1,15 – 1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2 – 1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2 – 1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2 – 1,3	1,0	15 – 20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3 – 1,5	1,1	5%



Gambar 2

Peta Stiuasi Section Drone dan Penampang (Section) Lereng Timbunan IPD Pit 1

Tabel 5 Rekapitulasi Propertis Material Pembentuk Lereng Daerah Penelitian

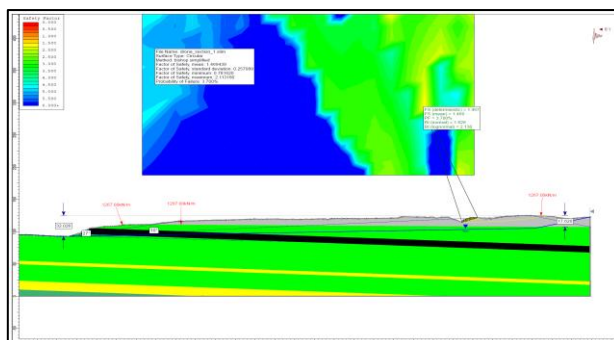
Litologi	Parameter	Unit	Mean	Std. Deviation	Rel Minimum	Rel Maximum
claystone	Unsaturated Und Weight	kN/m ³	17,76	3,92	7,36	5,54
	Saturated Und Weight	kN/m ³	21,03	2,56	4,97	3,77
	Cohesion	kPa	98,79	51,31	82,79	98,21
	Internal Friction Angle	°	44,74	16,45	33,54	17,19
Siltstone	Unsaturated Und Weight	kN/m ³	16,33	3,22	4,33	7,17
	Saturated Und Weight	kN/m ³	20,12	1,99	2,62	4,28
	Cohesion	kPa	54,78	41,40	48,16	103,22
	Internal Friction Angle	°	23,97	9,49	10,42	30,35
sandstone	Unsaturated Und Weight	kN/m ³	17,60	4,25	7,56	5,24
	Saturated Und Weight	kN/m ³	20,60	3,40	8,45	3,80
	Cohesion	kPa	109,95	40,73	70,95	42,78
	Internal Friction Angle	°	37,22	11,66	20,63	24,01
Carb_Claystone	Unsaturated Und Weight	kN/m ³	18,93	1,10	0,95	1,20
	Saturated Und Weight	kN/m ³	21,62	0,89	0,53	1,03
	Cohesion	kPa	37,40	29,29	19,92	33,63
	Internal Friction Angle	°	22,17	7,81	8,03	7,56
Disposal	Unsaturated Und Weight	kN/m ³	16,41	0,05	0,03	0,05
	Saturated Und Weight	kN/m ³	19,85	0,13	0,15	0,07
	Cohesion	kPa	20,66	4,86	10,06	7,06
	Internal Friction Angle	°	8,23	4,56	4,63	7,68
Coal	Unsaturated Und Weight	kN/m ³	10,11	0,22	0,15	0,25
	Saturated Und Weight	kN/m ³	12,03	0,16	0,12	0,18
	Cohesion	kPa	63,01	21,17	24,01	15,99
	Internal Friction Angle	°	45,45	14,17	15,72	11,78

Saturated Und Weight	kN/m ³	20,84	2,21	4,14	3,22
Cohesion	kPa	75,23	40,68	55,46	69,46
Internal Friction Angle	°	32,03	11,35	18,16	19,78

Tabel 6 Nilai Pembinaan Dari Peralatan Mekanis

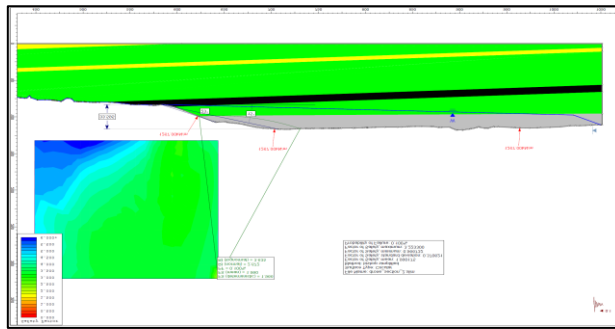
No	Jenis Peralatan	Spesifikasi	Berat (kg)	Berat (kN/m ²)
1	Exavator	KOMATSU PC400	43.000,00	421,69
2	Bulldozer	CATERPILAR D6-R	21661	212,42
3	Motor Greader	KOMATSU 120	12.400,00	121,60
4	Dumptruck	HINO-260	26.000,00	254,97
5	Fuel Truck	HINO-260	26.000,00	254,97
TOTAL			129.061,00	1.265,66

Adapun hasil simulasi kajian ulang geoteknik lereng timbunan IPD Pit 1 Selatan berdasarkan dari 7 (tujuh) sayatan (section) yang menggambar secara 2 dimensi lereng yang terbentuk pada daerah penelitian. Adapun hasil kajian ulang pada section dari penampang hasil drone adalah sebagai berikut:



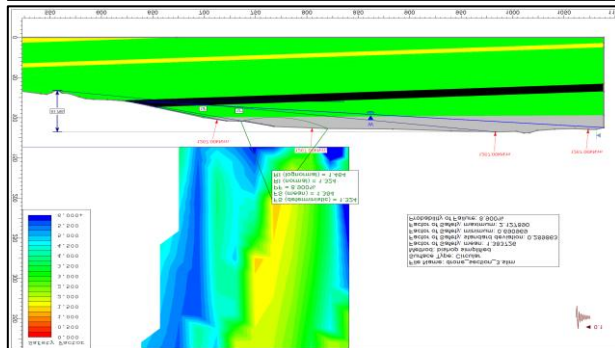
Gambar 4.

Pada Section 1 (Drone) didapatkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) Dinamis adalah 1,47 artinya nilai > 1 maka lereng pada section 1 masih stabil



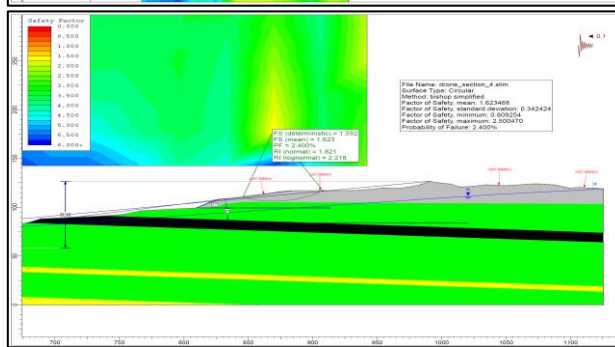
Gambar 5.

Pada Section 2 (Drone) didapatkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) Dinamis adalah 1,99 artinya nilai > 1 maka lereng pada section 2 masih stabil



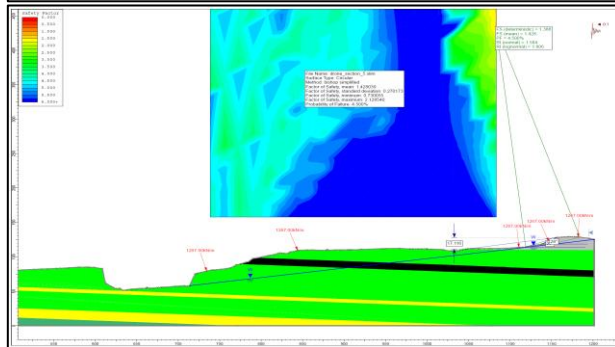
Gambar 6.

Pada Section 3 (Drone) didapatkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) Dinamis adalah 1,38 artinya nilai > 1 maka lereng pada section 3 masih stabil



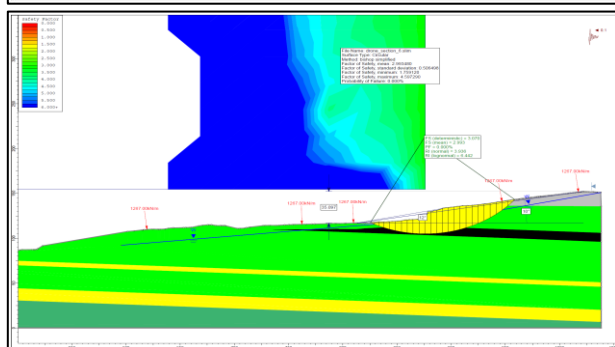
Gambar 7.

Pada Section 4 (Drone) didapatkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) Dinamis adalah 1,62 artinya nilai > 1 maka lereng pada section 4 masih stabil



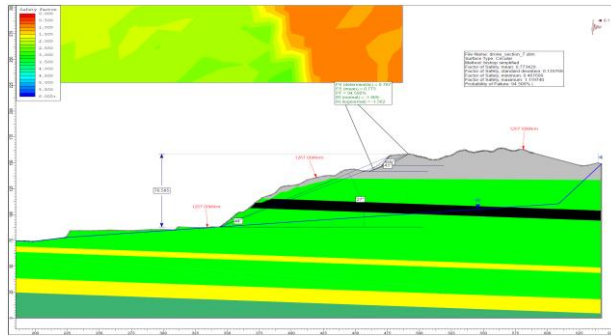
Gambar 8.

Pada Section 5 (Drone) didapatkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) Dinamis adalah 1,43 artinya nilai > 1 maka lereng pada section 5 masih stabil



Gambar 9.

Pada Section 6 (Drone) didapatkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) Dinamis adalah 2,99 artinya nilai > 1 maka lereng pada section 6 masih stabil



Gambar 10.

Pada Section 7 (Drone) didapatkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) Dinamis adalah 0,77 artinya nilai < 1 maka lereng pada section 7 masih berpotensi longsor dengan nilai PoF 94,50%.

Berdasarkan hasil analisa menggunakan *software slide* didapatkan nilai Faktor Keamanan (FK) antara 0,77 – 2,99 dimana terdapat areal yang berpotensi terjadi pergerakan lereng atau longsor dikarenakan material penyusun lereng nya adalah material timbunan dimana nilai FK 0,77 dengan potensial kelongsoran 94,5%. Untuk lebih jelasnya rekapitulasi hasil analisis dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 7 Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan Sayatan Hasil Pemetaan Drone

Section	Material	Tinggi Lereng Tunggal (m)	Tinggi Lereng Keseluruhan (m)	Lereng Tunggal (°)	Lereng Keseluruhan (°)	Koefisien Gempa	Pembebanan Unit (kN/m ²)	Faktor Keamanan (FK Dinamis)	Probabilitas Kelongsoran (PoF %)
Section Drone-1	Claystone, Sandstone, Material Timbunan	6,08	32,03	27,00	10,00	0,10	1267,00	1,47	3,70
Section Drone-2		8,99	33,60	23,00	15,00	0,10	1267,00	1,99	0,10
Section Drone-3		6,22	51,76	24,00	12,00	0,10	1267,00	1,38	8,90
Section Drone-4		10,00	68,19	27,00	9,00	0,10	1267,00	1,62	2,40
Section Drone-5		10,00	17,50	28,00	9,00	0,10	1267,00	1,43	4,50
Section Drone-6		10,00	41,20	12,00	10,00	0,10	1267,00	2,99	0,00
Section Drone-7		14,35	70,59	44,00	27,00	0,10	1267,00	0,77	94,50

B. Pembahasan

1. Ketelitian Foto Udara Yang Digunakan Untuk Monitoring Lereng

Berdasarkan perhtiungan nilai ketelitian menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) atau circular error. Nilai yang di ketelitian secara horizontal dan vertikal jika mengacu pada nilai CE90 adalah 0,64 meter dan nilai LE90 adalah 2,02 meter (lihat tabel 2 dan tabel 3) jika mengacu kepada tabel 7 Ketelitian Geometri Peta (Standart Peraturan Kepdirjen Minerba nomor: 17.K/HK.02/DJB.S/2023) pada skala 1 : 5.000 untuk nilai CE90 masuk kedalam Kelas 1 dimana secara horizontal kurang dari 1,5 meter sedangkan untuk nilai ketelitian vertikal LE90 masuk kedalam Kelas 3 dimana ketelitian lebih dari 2 meter. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan drone apabila ditunjang dengan titik ikat dan perangkat keras drone yang berteknologi tinggi tidak menutup kemungkinan pemantauan penggunaan drone bisa lebih efektif dan efisien, secara lingkungan tidak akan menimbulkan dampak dibanding dengan pemetaan lapangan (ground survey) jika dilakukan pada areal reklamasi terkadang harus mengganggu tanaman reklamasi apabila sensor alat yang digunakan terhalang oleh vegetasi yang lebat. Penggunaan titik ikat atau ground control point (GCP) yang banyak dan detail akan meningkatkan akurasi data yang diperoleh baik ketelitian secara horizontal maupun vertikal.

Tabel 8 Ketelitian Geometri Peta

No.	Skala	Interval Kontur (m)	Ketelitian Peta RBI					
			Kelas 1		Kelas 2		Kelas 3	
			Horisontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horisontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horisontal (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

Dalam dunia pemetaan modern, teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau drone telah membawa revolusi signifikan dalam akuisisi data spasial. Dibandingkan dengan survei darat konvensional (ground survey), drone menawarkan efisiensi tinggi, presisi yang kompetitif, serta jangkauan luas dengan biaya operasional yang lebih rendah. Banyak penelitian antara 2019 hingga 2024 telah mengevaluasi performa pemetaan menggunakan drone, terutama dalam konteks topografi, pemetaan wilayah sulit dijangkau, serta aplikasi pemetaan cepat pasca-bencana atau pembangunan infrastruktur.

Penggunaan drone untuk kegiatan monitoring lereng timbunan pada tahap pascatambang bisa menjadi alternatif yang digunakan sebagai pengganti pemantauan dengan system ground survey. Adapun kelebihan penggunaan drone dalam kegiatan monitoring antara lain efisiensi waktu dan biaya, akurasi data tinggi dengan penggunaan *Ground Control Points* (GCP), Akses Real-Time, Peta hasil drone langsung dapat digunakan untuk SIG (Sistem Informasi Geografis), mempermudah pengolahan dan analisis data.

Penggunaan drone dalam monitoring lereng timbunan merupakan terobosan teknologi geospasial yang menawarkan efisiensi dan cakupan yang luas. Namun demikian, penerapannya masih dihadapkan pada sejumlah keterbatasan dan tantangan teknis, terutama pada kondisi topografi ekstrem seperti area tambang dengan elevasi tajam, vegetasi lebat, serta kondisi cuaca yang tidak stabil. Kajian terkini dari literatur ilmiah antara tahun 2019–2024 telah mengidentifikasi isu-isu penting yang perlu diperhatikan dalam operasional drone untuk kebutuhan geoteknik dan monitoring lereng.

Adapun tantangan teknis dan keterbatasan penggunaan drone untuk kegiatan monitoring lereng timbunan antara lain keterbatasan daya baterai dan durasi terbang, ketergantungan pada cuaca dan kondisi angin, resolusi data terbatas di area vegetasi lebat, kesalahan georeferensi tanpa *ground control point* (GCP), risiko crash pada area lereng terjal dan kesulitan dalam integrasi data drone ke model geoteknik 3D.

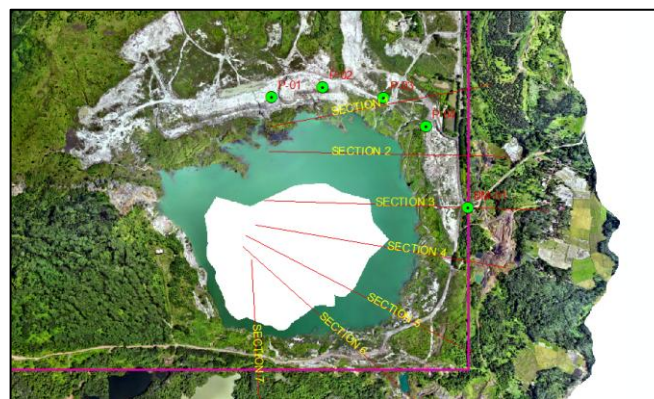
2. Hasil Foto Udara Untuk Back Analysis Geoteknik IPD Pit 1

Dari seluruh section yang dianalisis section 7 drone merupakan section yang paling kritis mengingat jika melihat sudut lereng Tunggal yang terbentuk adalah 44° dengan tinggi lereng Tunggal adalah 14,35 meter dan lereng keseluruhan memiliki tinggi 70,59 meter dengan sudut lereng keseluruhan adalah 27° . Dari analisis nilai FK Dinamis didapatkan nilai 0,77 dengan probabilitas kelongosorannya adalah 94,50% jika melihat secara visual dilapangan pada lereng sudah terjadi longsor dan beberapa titik dan pada dinding lerengnya banyak dijumpai gulir-gulir erosi sehingga berdasarkan ketentuan Kepmen ESDM nomor :

1827.K/30/MEM/2018 masuk dalam katagori Keparahan Longsor termasuk konsekuensi Tinggi apabila, longsor akan mengakibatkan kematian manusia, cidera pada manusia lebih dari 3 (tiga) orang, kerusakan sarana dan prasarana fasilitas pertambangan, terhentinya kegiatan pascatambang, dan kerusakan lingkungan yang berdampak pada sampai keluar batas wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP).



Gambar 11 Lereng pada Section 7 drone IPD Pit 1



Gambar 12 Lokasi titik monitoring lereng area IPD Pit 1

Berdasarkan titik montoring lereng IPD Pit 1 sebanyak 4 (empat) titik pantau tidak melingkupi seluruh lereng yang terbentuk. Pada sisi Selatan area timbunan Pit 1 khususnya pada Lokasi section 4, section 5, section 6 dan section 7 (lihat gambar 12) tidak terpasang titik monitoring lereng.

Lereng pada section 7 berdasarkan analisis telah terjadi longsor akan tetapi tidak ada titik monitoring yang dipasang bisa dilihat pada lampiran 4. Jika melihat tabel 10 lokasi posisi titik pantau P-01, P-02, P-03, P-04 yang terwakili dengan section 1, section 2, dan section 3. Jika melihat periode pemantauan dari bulan Januari sampai dengan bulan Juni 2025 tidak terdapat pergerakan lereng timbunan dimana Sebagian besar titik monitoring menunjukkan perpindahan kecil (< 10 cm), yang umumnya masih dalam ambang toleransi alami untuk lereng timbunan yang belum sepenuhnya terkonsolidasi. Lihat tabel 9.

Tabel 9 Statistik Hasil Monitoring Periode Januari – Juni 2025 area IPD Pit 1 PT Megaprima Persada

Parameter	Nilai Maksimum	Nilai Minimum	Rata-rata
Dif_North (m)	+0.016	-0.015	-0.0007
Dif_East (m)	+0.015	-0.004	+0.0015
Dif_Elev (m)	+0.007	-0.013	-0.0016

Pada areal-aral kritis seperti yang tergambarkan berdasarkan hasil analisis ulang pada section 7 (lampiran 19) Dimana lereng yang terbentuk cukup tinggi dengan kemiringan lereng Tunggol lebih dari 30° (rekomedasi hasil kajian geoteknik) tidak terpasang alat pemantauan (patok pantau) sehingga jika ada pergerakan lereng timbunan tidak bisa terdeteksi secara periodik.

Tabel 10 Kegiatan Monitoring Lereng Timbunan IPD Pit 1 Periode Januari – Juli 2025

Monitoring Area Pit 1 2025									
Name	15-January-2025 Monitoring			15-February-2025 Monitoring			Dif North	Dif East	Dif Elev
	North	East	Elev	North	East	Elev			
P_01	9940038,323	491915,649	10,984	9940038,337	491915,649	10,997	-0,014	0,000	-0,013
P_02	9940084,233	492153,488	11,541	9940084,247	492153,492	11,534	-0,014	-0,004	0,007
P_03	9940034,991	492438,214	19,830	9940034,991	492438,206	19,828	0,000	0,008	0,002
P_04	9939899,760	492633,719	17,929	9939899,744	492633,704	17,935	0,016	0,015	-0,006

Monitoring Area Pit 1 2025									
Name	15-January-2025 Monitoring			10-Maret-2025 Monitoring			Dif North	Dif East	Dif Elev
	North	East	Elev	North	East	Elev			
P_01	9940038,323	491915,649	10,984	9940038,338	491915,647	10,985	-0,015	0,002	-0,001
P_02	9940084,233	492153,488	11,541	9940084,231	492153,484	11,545	0,002	0,004	-0,004
P_03	9940034,991	492438,214	19,830	9940034,987	492438,211	19,830	0,004	0,003	0,000
P_04	9939899,760	492633,719	17,929	9939899,740	492633,711	17,934	0,020	0,008	-0,005

Monitoring Area Pit 1 2025									
Name	15-January-2025 Monitoring			21-Maret-2025 Monitoring			Dif North	Dif East	Dif Elev
	North	East	Elev	North	East	Elev			
P_01	9940038,323	491915,649	10,984	9940038,340	491915,646	11,000	-0,017	0,003	-0,016
P_02	9940084,233	492153,488	11,541	9940084,250	492153,481	11,557	-0,017	0,007	-0,016
P_03	9940034,991	492438,214	19,830	9940034,992	492438,214	19,832	-0,001	0,000	-0,002
P_04	9939899,760	492633,719	17,929	9939899,744	492633,715	17,936	0,016	0,004	-0,007

Monitoring Area Pit 1 2025									
Name	15-January-2025 Monitoring			05-April-2025 Monitoring			Dif North	Dif East	Dif Elev
	North	East	Elev	North	East	Elev			
P_01	9940038,323	491915,649	10,984	9940038,318	491915,655	10,988	0,005	-0,006	-0,004
P_02	9940084,233	492153,488	11,541	9940084,215	492153,487	11,546	0,018	0,001	-0,005
P_03	9940034,991	492438,214	19,830	9940034,998	492438,218	19,837	-0,007	-0,004	-0,007
P_04	9939899,760	492633,719	17,929	9939899,762	492633,725	17,934	-0,002	-0,006	-0,005

Monitoring Area Pit 1 2025									
Name	15-January-2025 Monitoring			23-April-2025 Monitoring			Dif North	Dif East	Dif Elev
	North	East	Elev	North	East	Elev			
P_01	9940038,323	491915,649	10,984	9940038,361	491915,660	10,990	-0,038	-0,011	-0,006
P_02	9940084,233	492153,488	11,541	9940084,254	492153,493	11,555	-0,021	-0,005	-0,014
P_03	9940034,991	492438,214	19,830	9940034,989	492438,223	19,845	0,002	-0,009	-0,015
P_04	9939899,760	492633,719	17,929	9939899,739	492633,712	17,946	0,021	0,007	-0,017

Monitoring Area Pit 1 2025									
Name	15-January-2025 Monitoring			08-May-2025 Monitoring			Dif North	Dif East	Dif Elev
	North	East	Elev	North	East	Elev			
P_01	9940038,323	491915,649	10,984	9940038,406	491915,671	11,000	-0,083	-0,022	-0,016
P_02	9940084,233	492153,488	11,541	9940084,266	492153,518	11,569	-0,033	-0,030	-0,028
P_03	9940034,991	492438,214	19,830	9940034,984	492438,231	19,862	0,007	-0,017	-0,032
P_04	9939899,760	492633,719	17,929	9939899,724	492633,729	17,962	0,036	-0,010	-0,033

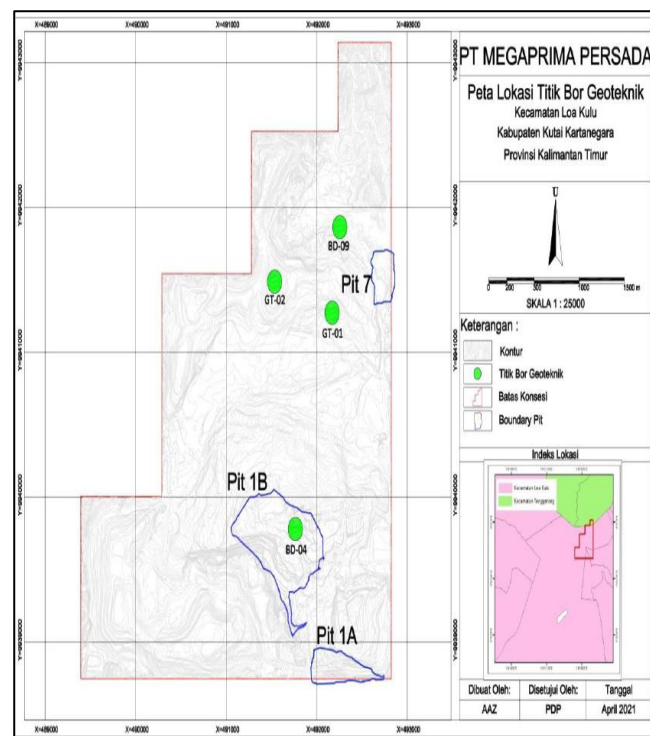
Monitoring Area Pit 1 2025									
Name	15-January-2025 Monitoring			25-June-2025 Monitoring			Dif North	Dif East	Dif Elev
	North	East	Elev	North	East	Elev			
P_01	9940038,323	491915,649	10,984	9940038,408	491915,699	11,002	-0,085	-0,050	-0,018
P_02	9940084,233	492153,488	11,541	9940084,253	492153,539	11,595	-0,020	-0,051	-0,054
P_03	9940034,991	492438,214	19,830	9940034,980	492438,263	19,897	0,011	-0,049	-0,067
P_04	9939899,760	492633,719	17,929	9939899,715	492633,751	17,999	0,045	-0,032	-0,070

3. Diskusi Temuan Penelitian

Perbandingan dengan hasil penelitian terdahulu dimana berdasarkan hasil kajian Geoteknik, Hidrologi dan Geohidrologi yang dilakukan untuk menunjang kegiatan penambangan PT Megaprima Persada Tahun 2021 – 2023 yang dilakukan oleh PT Agri Natur Indonesia dari hasil pemboran geoteknik sebanyak 6 titik dan 3 lokasi sampling pada area disposal dan lereng penambangan

Tabel 11 Lokasi titik pemboran geoteknik PT Megaprima Persada

Tahun	Titik Bor & Lokasi Sampling	Koordinat		Kedalaman (M)
		Easting	Northing	
2011	BDO1	502662	9939980	55,5
	BD02	502671	9939852	56
	BD04	491765	9939781	83,95
	BD09	492256	9941864	130
2017	GT01	492171	9941274	203
	GT02	491536	9941488	203
2018	DISPOSAL			
	BS 1			
	BS 2			



Gambar 13 Sebaran titik pemboran geoteknik PT MPP

Adapun hasil Analisis lereng untuk timbunan atau disposal dilakukan pendekatan dan asumsi permodelan sebagai parameter adalah sebagai berikut:

- 1) Material disposal diasumsikan homogen dengan material dasar adalah material insitu.
- 2) Model lereng menggunakan geometri lereng dengan tinggi lereng tunggal 5 m, sudut 30°, lebar berm 5 m, dan simulasi ketinggian keseluruhan sampai dengan 30 m.
- 3) Simulasi lebar berm dilakukan apabila kondisi lereng menunjukkan kondisi tidak aman.

- 4) Kriteria lereng aman yang digunakan menggunakan kriteria dari Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Pendekatan keparahan longsor pada lereng keseluruhan adalah dengan mempertimbangkan (i) Lereng berupa timbunan overburden sehingga lereng tidak difungsikan kembali, (ii) dampak longsor terhadap operasi penambangan yang diprediksi tidak akan mengganggu kegiatan penambangan secara signifikan karena berupa output dump, serta (iii) kemampuan PT MPP dalam menerapkan prosedur pemantauan geoteknik. Berdasarkan pendekatan tersebut maka kriteria kestabilan lereng pada lereng keseluruhan adalah $FK > 1,00$ dan $PL < 20\%$ dengan kriteria keparahan longsor rendah.
- 5) Kondisi muka air tanah pada lereng diasumsikan dalam kondisi setengah jenuh. Didapatkan hasil analisis nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor adalah sebagai berikut:

Tabel 12 Rekapitulasi Hasil Analisis Lereng Disposal

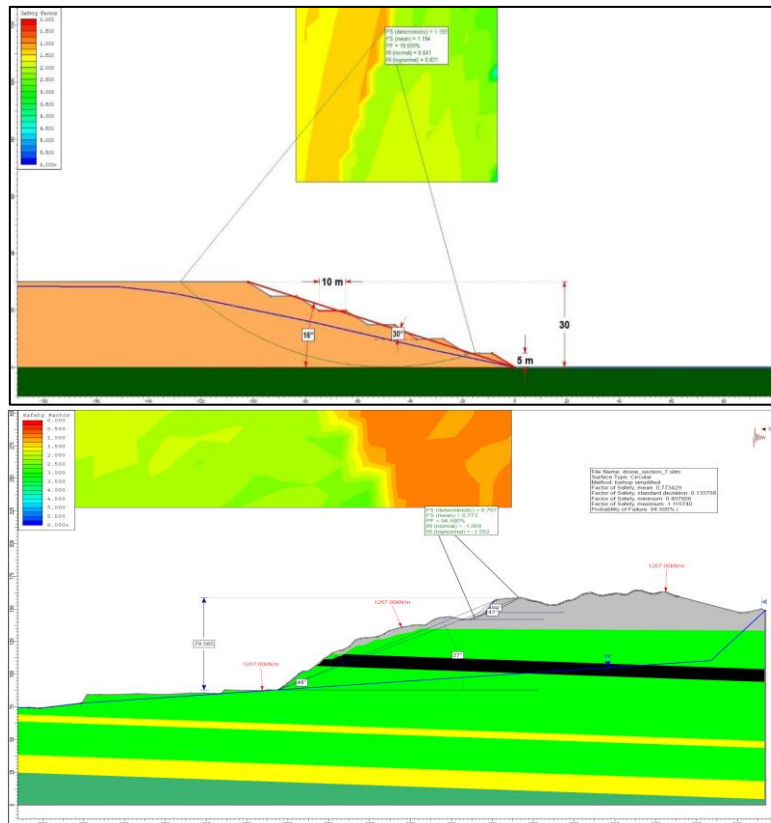
TINGGI JENJANG (M)	SUDUT LERENG TUNGGAL (M)	LEBAR BERM (M)	TINGGI KESELURUHAN (M)	FAKTOR KEAMANAN		PROBABILITAS LONGSOR (%)
				DETERMINISTIK	MEAN	
5	30	5		4,12	4,1	0
			10	1,61	1,61	1
			15	1,31	1,34	7,5
			20	1,22	1,25	13
			25	1,14	1,1	18,2
			30	0,98	0,98	58
		10		1,19	1,19	19

Tabel 13 Perbandingan Faktor Keamanan Topo Drone dan Topo Situasi Ground Survey IPD Pit 1

Material	Tinggi Lereng Tunggal (m)	Tinggi Lereng Keseluruhan (m)	Lereng Tunggal (°)	Lereng Keseluruhan (°)	Koefisien Gempa	Pembebanan Unit (kN/m ²)	Faktor Keamanan (FK Dinamis)	Probabilitas Kelonggorsan (PoF %)
Claystone, Sandstone, Material Timbunan	6,08	26,08	39,00	26,00	0,10	1267,00	1,56	3,00
	6,08	32,03	27,00	10,00	0,10	1267,00	1,47	3,70
	8,99	29,00	35,00	14,00	0,10	1267,00	2,41	0,00
	8,99	33,60	23,00	15,00	0,10	1267,00	1,99	0,10
	6,22	44,62	24,00	12,00	0,10	1267,00	1,80	0,60
	6,22	51,76	24,00	12,00	0,10	1267,00	1,38	8,90
	10,00	59,47	18,00	6,00	0,10	1267,00	1,67	1,90
	10,00	68,19	27,00	9,00	0,10	1267,00	1,62	2,40
	10,00	17,50	28,00	9,00	0,10	1267,00	1,55	1,50
	10,00	17,50	28,00	9,00	0,10	1267,00	1,43	4,50
	10,00	38,37	12,00	10,00	0,10	1267,00	3,32	0,00
	10,00	41,20	12,00	10,00	0,10	1267,00	2,99	0,00
	14,35	52,62	44,00	29,00	0,10	1267,00	1,54	3,20
	14,35	70,59	44,00	27,00	0,10	1267,00	0,77	94,50

Dari kajian geoteknik terdapat kesamaan dalam identifikasi nilai FK apabila tinggi jenjang lebih dari 30 meter nilai $FK < 1$ atau 0,98 pada tabel 10 dan 0,77 pada tabel 11.

Dari analisis tersebut disimpulkan bahwa kondisi lereng timbunan pada area disposal tidak lebih dari 30 meter akan tetapi realisasi aktual lereng yang terbentuk lebih dari 30 meter sehingga ada beberapa titik pada area IPD Pit 1 Selatan berpotensi longsor.



Gambar 14
Interpretasi
Hasil Analisis
Lereng
Disposal
Tinggi 30 m
Lebar Berm
10 m

Gambar 15
Back Analysis
Lereng
Timbunan
Lebih dari 30
Meter.

4. Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan nilai ketelitian menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) atau *circular error*. Nilai yang di ketelitian secara horizontal dan vertikal jika mengacu pada nilai CE90 adalah 0,64 meter dan nilai LE90 adalah 2,02 meter, jika mengacu kepada tabel 2.4 Ketelitian Geometri Peta (Standart Peraturan Kepdirjen Minerba nomor: 17.K/HK.02/DJB.S/2023) pada skala 1 : 5.000 untuk nilai CE90 masuk kedalam Kelas 1 dimana secara horizontal kurang dari 1,5 meter sedangkan untuk nilai ketelitian vertikal LE90 masuk kedalam Kelas 3 dimana ketelitian lebih dari 2 meter. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan drone apabila ditunjang dengan titik ikat dan perangkat keras drone yang berteknologi tinggi tidak menutup kemungkinan pemantauan penggunaan drone bisa lebih efektif dan efisien.

Dari seluruh section yang dianalisis section 7 drone merupakan section yang paling kritis mengingat jika melihat sudut lereng Tunggal yang terbentuk adalah 44° dengan tinggi lereng Tunggal adalah 14,35 meter dan lereng keseluruhan memiliki tinggi 70,59 meter dengan sudut lereng keseluruhan adalah 27° . Dari analisis nilai FK Dinamis didapatkan nilai 0,77 dengan probabilitas kelongsorannya adalah 94,50% jika melihat secara visual dilapangan pada lereng sudah terjadi longsoran di beberapa titik dan pada dinding lerengnya banyak dijumpai gulir-gulir erosi sehingga berdasarkan ketentuan Kepmen ESDM nomor : 1827.K/30/MEM/2018 masuk dalam katagori Keparahan Longsor termasuk konsekuensi Tinggi apabila, longsoran akan mengakibatkan kematian manusia, cedera pada manusia lebih dari 3 (tiga) orang, kerusakan sarana dan prasarana fasilitas pertambangan, terhentinya kegiatan pascatambang, dan kerusakan lingkungan yang berdampak pada sampai keluar batas wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP).

5. Daftar Pustaka

- Alsadik, B., Gerke, M., Vosselman, G. (2021). Performance evaluation of drone photogrammetry for monitoring mining environments. *Remote Sensing*, 13(3), 456. <https://doi.org/10.3390/rs13030456>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Statistik Pertambangan Mineral dan Batubara*. Jakarta: Direktorat Jenderal Minerba.

- Restrepo, J. D., Escobar, J., & López, S. A. (2020). UAV-based mapping of vegetation recovery in post-mining landscapes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 267. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8205-x>
- Rossi, L., Noferini, L., & Venturi, S. (2020). High-resolution UAV photogrammetry for slope stability analysis in mining areas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(2), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.02.001>
- Cawood, F. (2020). *The Role of Mining in Sustainable Development*. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120130>
- Harsanto, A., & Yulianto, R. (2021). *Funding Challenges in Post-Mining Rehabilitation: A Case Study in Indonesia*. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(4), 293–305. <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1928445>
- Hidayat, R., & Rahman, A. (2023). *Post-Mining Rehabilitation Strategies in Indonesia: Challenges and Opportunities*. *Journal of Environmental Management*, 300, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113123>
- Lestari, D., Prasetyo, E., & Sari, R. (2023). *Capacity Building for Local Communities in Post-Mining Areas: Lessons Learned from Indonesia*. *Community Development Journal*, 58(1), 12–28. <https://doi.org/10.1093/cdj/bsz053>
- Nurhadi, A., & Rachmawati, D. (2023). *Biodiversity Recovery in Post-Mining Areas: A Case Study in West Kalimantan*. *Environmental Science & Policy*, 135, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.012>
- Prasetyo, E., & Sari, R. (2022). *Regulatory Framework for Post-Mining Management in Indonesia: Challenges and Recommendations*. *Journal of Policy Analysis and Management*, 41(2), 567–584. <https://doi.org/10.1002/pam.22456>
- Santoso, B., & Prabowo, H. (2022). *Community Empowerment in Post-Mining Areas: A Sustainable Approach*. *Journal of Community & Applied Social Psychology*, 32(3), 245–260. <https://doi.org/10.1002/casp.2513>
- Ebrahimi, H., Yu, T., & Zhang, Z. (2025). Developing a spatiotemporal fusion framework for generating daily UAV images in agricultural areas using publicly available satellite data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271624004933>
- Kim, H., & Lee, J. (2024). Airborne Bathymetric Ground Survey for Digital Elevation Model Construction. *Sensors & Materials*. Retrieved from https://sensors.myu-group.co.jp/sm_pdf/SM3784.pdf
- Ruzgienė, B., Kuklienė, L., & Kuklys, I. (2025). The Use of Kinematic Photogrammetry and Ground Survey for Reconstruction of Unique Object with Extreme Topography: A Case Study of Dutchman's Cap, Baltic Seacoast. *Frontiers in Remote Sensing*. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2025.1397513/full>
- Sato, R., Kikuchi, K., & Naruse, H. (2025). Automatic facies classification using convolutional neural network for three-dimensional outcrop data: Application to the outcrop of the mass-transport deposit. *AAPG Bulletin*. Retrieved from <https://pubs.geoscienceworld.org/aapg/aapgbull/article-abstract/109/2/271/651920>
- Zhang, G., & Zhang, J. (2025). High-Precision Photogrammetric 3D Modeling Technology Based on Multi-Source Data Fusion and Deep Learning-Enhanced Feature Learning. *Informatica*. Retrieved from <https://informatica.si/index.php/informatica/article/view/7137>
- Fajar, J. D., & Maulana, L. H. (2019). Kajian Geoteknik untuk Optimalisasi Desain Tambang Batubara Menggunakan Limit Equilibrium Method. *Prosiding Temu Profesi Tahunan*. <https://core.ac.uk/download/pdf/322599594.pdf>
- Hariyadi, S., & Wahyudhi, A. (2019). Kajian Stabilitas Lereng Timbunan Pada PT. Kayan Kaltara Coal. *Jurnal Geologi Pertambangan*. <https://www.academia.edu/download/54703525/134-359-1-PB.pdf>
- Hadian, M. S. D., Cipta, H., & Arief, M. (2023). Pengaruh Elevasi Permukaan Air terhadap Probabilitas Kelongsoran dan Stabilitas Lereng Timbunan di Open Pit X PT. Berau Coal. *Geoscience Journal*. <https://jurnal.unpad.ac.id/geoscience/article/view/53300>
- Wijaya, A. E., & Sulistio, D. S. D. (2022). Analisis Monitoring Pergerakan Lereng Timbunan Quarry Batugamping di PT. Cicatih Putra Sukabumi. *MINING INSIGHT*. <https://journal.itny.ac.id/index.php/mining/article/view/2759>
- Wahyudi, L., Excelsior, T. P., & Wahyudi, U. (2018). Analisis Kestabilan Lereng Dinding Akhir di Pit Baratlaut pada Penambangan Batubara. *KURVATEK*. <https://journal.itny.ac.id/index.php/krvtk/article/download/569/pdf>
- Jalil, A., Gunawan, R., & Wicaksono, E. (2023). Identifikasi Jarak Aman terhadap Lereng Disposol. *Jurnal Penelitian Tambang*. <http://www.jurnal-intan.ac.id/index.php/intan/article/view/169>

Fanani, Y., Astuti, A. D., & Paki, A. K. (2021). Analisis Kestabilan Lereng Tambang CV. Mutiara Timur Berdasarkan Faktor Keamanan. Prosiding Seminar Teknologi. <https://ejournal.itats.ac.id/semitan/article/view/1977>

Afrizal, R., & Ruspianda, R. (2022). Pemanfaatan Drone DJI Phantom 4 Pro dan Aplikasi SIG (ArcGIS) untuk Identifikasi Batas Administrasi Wilayah di Kecamatan Kuantan Tengah. Jurnal Perangkat Lunak, 4(2). <http://ejournal.unisi.ac.id/index.php/jupel/article/view/2425>

Gularso, H., Subiyanto, S., & Sabri, L. M. (2019). Tinjauan Pemotretan Udara Format Kecil Menggunakan Pesawat Model Skywalker 1680 (Studi Kasus: Area Sekitar Kampus UNDIP). Jurnal Geodesi Undip. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/2440>

Pamungkasari, F. L., & Prasetyo, Y. (2019). Analisis Konfigurasi Optimum Kerangka GCP untuk Survei Pemetaan Luasan Besar Menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Jurnal Geodesi Undip. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/22580>

Pangestu, M. I. (2024). Pemanfaatan UAV Tipe Quadcopter untuk Percepatan Pengukuran Bidang Tanah Pertanian. Repository STPN. <http://repository.stpn.ac.id/960/1/AGUNG%20WIDIYANTO.pdf>

Widodo, S., Farida, A., & Maysyurah, A. (2023). Pemanfaatan Teknologi Drone dalam Pemetaan Digital Menggunakan Kerangka Ground Control Point (GCP) di Daerah Irigasi Waibu. Musamus Journal of Civil Engineering, 5(1). <https://ejournal.unmus.ac.id/index.php/civil/article/view/5078>

Yulianyahya, R. W., Sari, D. A. K., & Kurniawan, S. (2023). Sosialisasi Penggunaan Drone untuk Kegiatan Survei Pemetaan Wilayah. SemanticScholar. <https://pdfs.semanticscholar.org/1870/17cbbd992d2a154e86055fef5b0633c8c8b4.pdf>