

Analisis Diagnostik Kerentanan Bencana Banjir Perkotaan di Jayapura Berdasarkan Model Permukaan Digital dari Data Fotogrametri Berbasis UAV

Bangkit Sudrajad^{1*}, Tatang Sutarman¹, dan Choirul Wulan Diesya²

¹Program Studi Geofisika, FMIPA, Universitas Cenderawasih, Indonesia; e-mail: bangkitsudrajad@gmail.com

²Administrasi Umum dan Sistem Informasi, Institut Pemerintah Dalam Negeri (IPDN) Papua, Indonesia

ABSTRAK

Salah satu wilayah di Kota Jayapura yang memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap banjir adalah Pasar Youtefa dan Kali Acai. Meskipun lokasinya dekat Teluk Youtefa, wilayah ini justru sering dilanda bencana banjir. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode pemetaan fotogrametri drone (UAV) untuk menghasilkan Digital Surface Model (DSM) sebagai dasar analisis penyebab kerentanan banjir. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi faktor penyebab banjir berulang berdasarkan parameter elevasi, kemiringan, dan azimuth kemiringan. Misi pemetaan menghasilkan 600 foto udara dan 17 titik kontrol permukaan (GCP). Proses pengolahan meliputi peta orthomosaic, DSM, slope, aspect, catchment area, dan watershed. Perbandingan elevasi DSM dengan GCP menunjukkan akurasi baik dengan nilai error (RMSE) 0,1737. Hasil pemetaan memperlihatkan sebagian wilayah Pasar Youtefa memiliki elevasi lebih rendah dibanding drainase Kali Acai, dengan rata-rata sekitar ≥ 3 meter. Peta slope dan aspect menunjukkan kemiringan dominan ke arah barat, berlawanan dengan arah aliran drainase menuju laut. Analisis watershed mengungkap aliran air hujan cenderung mengarah ke utara, bukan ke Teluk Youtefa sesuai desain saluran Kali Acai. Simulasi banjir berbasis DSM menunjukkan genangan mulai terjadi pada ketinggian air 2 meter dan meluas signifikan pada level 4–8 meter. Dengan demikian, banjir di wilayah ini dipicu oleh kombinasi faktor elevasi rendah, orientasi kemiringan yang tidak mendukung aliran ke laut, serta arah aliran hujan yang tidak sesuai dengan sistem drainase yang ada.

Kata kunci: Bencana banjir, Pemetaan fotogrametri, *Digital Surface Model*, Analisis Diagnostik, Elevasi, Kemiringan

ABSTRACT

ne of the most flood-prone areas in Jayapura City is Youtefa Market and Kali Acai. Although located near Youtefa Bay, this area frequently experiences flooding. A study was conducted using unmanned aerial vehicle (UAV)-based photogrammetry to produce a Digital Surface Model (DSM) for diagnostic analysis of flood vulnerability. The objective was to identify recurring flood factors based on elevation, slope, and slope azimuth parameters. The mapping mission generated 600 aerial photographs and 17 ground control points (GCP). Data processing included orthomosaic maps, DSM, slope maps, aspect maps, catchment areas, and watershed delineation. Comparison between DSM elevation values and GCP measurements showed good accuracy with a root mean square error (RMSE) of 0.1737. Results revealed that parts of Youtefa Market have lower elevation than Kali Acai's drainage system, averaging around ≥ 3 meters. Slope and aspect maps indicated dominant westward slopes, opposite to the intended drainage flow toward the sea. Watershed analysis showed rainfall runoff tends to flow northward rather than toward Youtefa Bay, misaligned with the designed drainage system. Flood simulations using DSM demonstrated inundation beginning at 2 meters of water height and expanding significantly at 4–8 meters. Therefore, flooding in this area is triggered by a combination of low elevation, slope orientation that does not support flow to the sea, and rainfall runoff direction inconsistent with the existing drainage infrastructure.

Keywords: Flood disaster, Photogrammetric Mapping, Digital Surface Model, Diagnostic Analysis, Elevation, Slope

Citation: Sudrajad, B., Sutarman, T., dan Diesya, C. W. (2026). Analisis Diagnostik Kerentanan Bencana Banjir Perkotaan di Jayapura Berdasarkan Model Permukaan Digital dari Data Fotogrametri Berbasis UAV. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(2), 252-262, doi:10.14710/jil.24.2.252-262

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan kerawanan bencana hidrometeorologi seperti banjir, banjir bandang, tanah longsor, dan hujan badai. Pengaruh perubahan cuaca dan iklim tropis serta letak geografis

wilayah Indonesia menyebabkan hampir semua daerah di Indonesia memiliki risiko bencana hidrometeorologi termasuk daerah Papua khususnya Jayapura. Wilayah Jayapura pernah beberapa kali mengalami bencana hidrogeologi yang menyebabkan

kerusakan, korban jiwa, dan kerugian materil yang sangat besar seperti bencana banjir bandang pada tahun 2019 dan bencana banjir di tahun 2022. Bencana banjir yang terjadi pada awal tahun 2022 merendam beberapa wilayah di Kecamatan Abepura. Wilayah yang paling parah terdampak bencana banjir tersebut adalah Pasar Youtefa dan lokasi sekitar Kali Acai yang berada di dekat Teluk Youtefa (Gambar 1). Berdasarkan data dari Kemenko PMK tercatat jumlah korban terdampak bencana banjir yang terjadi di Jayapura pada awal tahun 2022 tersebut sebanyak 1.927 Kepala Keluarga atau 7.005 jiwa dimana terdapat total korban jiwa sebanyak 8 orang meninggal dunia, dan 9 orang luka-luka dengan total kerugian yang diakibatkan mencapai Rp.50 miliar (CNN Indonesia, 2022).

Wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai tersebut dikenal sebagai wilayah yang sering mengalami banjir di Kota Jayapura bahkan hujan deras yang sempat melanda Kota Jayapura di awal tahun 2025 juga sempat menyebabkan banjir atau naiknya muka air di wilayah tersebut. Berdasarkan Peta Risiko Bencana yang dirilis oleh InaRISK BNPB tahun 2024, wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai masuk ke dalam zona wilayah dengan indeks risiko tinggi terhadap bencana banjir dan banjir bandang. Padahal Pasar Youtefa-Kali Acai merupakan wilayah yang dekat dengan laut dimana terdapat Teluk Youtefa di sebelah timur. Hal ini merupakan sebuah anomali karena akumulasi air hujan yang mengalir melalui Kali Acai dan saluran drainase air lainnya semestinya dapat lebih cepat bermuara ke laut melalui pintu air di Dermaga Youtefa sehingga tidak menyebabkan banjir. Berkaitan dengan hal tersebut terdapat hipotesis bahwa selain

pengaruh sistem saluran drainase air yang ada belum maksimal karena banyaknya sampah yang menumpuk di saluran air Kali Acai (Alfons dkk, 2016), terdapat juga pengaruh ketinggian wilayah (elevasi) dan kemiringan (*slope*) sebagai penentu daerah aliran air (*watershed*) di sekitar wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai yang belum difasilitasi oleh saluran drainase air. Akibatnya aliran air hujan (*watershed*) terakumulasi atau tergenang di wilayah yang memiliki elevasi rendah dan tidak bisa mengalir ke laut.

Berdasarkan uraian hipotesis diatas, maka penulis berinisiatif untuk melakukan penelitian dengan analisis menggunakan metode pemetaan fotogrametri *drone* guna mengetahui pengaruh elevasi dan kemiringan wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai sebagai salah satu faktor yang memicu banjir di wilayah tersebut. Dari penelitian yang pernah dilakukan berkaitan dengan banjir di Kali Acai berdasarkan analisis Hidraulika, salah satu upaya penanganan banjir yang disarankan adalah dengan menerapkan normalisasi dengan menggali dasar sungai (Putra dkk, 2022). Adapun penelitian dengan analisis mitigasi (Kirana dkk, 2025) masih terbatas dengan menggunakan data regional dari citra satelit. Dalam penelitian-penelitian tersebut, peta dan model elevasi (DEM) yang digunakan bersifat regional karena berasal dari observasi satelit sehingga belum merepresentasikan kondisi wilayah Kali Acai secara lokal. Dengan demikian dibutuhkan penelitian yang lebih spesifik untuk menganalisis kerentanan banjir di wilayah tersebut berdasarkan informasi model elevasi permukaan 3D yang lebih spesifik berdasarkan hasil pemetaan fotogrametri jarak dekat menggunakan *drone* (UAV).



Gambar 1. Bencana Banjir di Pasar Youtefa-Kali Acai Tahun 2022 (Detik News, 2022)

Drone atau pesawat nirawak (*unmanned aerial vehicle*) dipilih sebagai instrumen pemetaan fotogrametri karena kemampuan sensornya untuk menangkap citra berdasarkan spektrum panjang gelombang elektromagnetik sinar matahari yang

dipantulkan oleh objek di permukaan (Mousavi dkk, 2025). Selain itu *drone* sebagai alat pemetaan mampu mendaftarkan, melacak posisi, dan mengukur azimuth dari sensor yang terpasang dalam sistem lokal atau koordinat global (Eseinbei, 2009). Dengan demikian

kegiatan penangkapan foto udara untuk pemetaan fotogrametri melalui survei udara (*aerial surveying*) dapat dilakukan secara efektif dan efisien dengan menggunakan *drone* (UAV) karena tidak memakan biaya yang terlalu mahal dan tidak membutuhkan tenaga survei yang banyak.

Data foto udara hasil survei pemetaan fotogrametri menggunakan *drone*/UAV pada penelitian ini nantinya akan diolah menjadi peta model permukaan 3D atau *Digital Surface Model* (DSM) yang dapat merepresentasikan bentuk geometri asli, ketinggian, dan kemiringan semua objek seperti bangunan, bukit, lembah, jembatan, jalan, selokan, dan tanah lapang yang ada di permukaan (Sudrajat dkk, 2025). Dengan demikian dapat dilakukan analisis kerentanan berdasarkan faktor penyebab banjir dari parameter ketinggian (elevasi), kemiringan (*slope*), dan azimuth arah kemiringan (*aspect*). Bahkan pemetaan fotogrametri berbasis UAV ini juga dapat dimanfaatkan dalam mengidentifikasi bahaya banjir akibat pola tutupan lahan yang terus berubah (Wibowo dkk, 2025). Mengingat model permukaan digital (DSM) beresolusi tinggi berbasis UAV mampu memberikan peningkatan substansial dalam akurasi penilaian risiko banjir suatu wilayah (Rana dkk, 2024). Hasil analisis dan luaran dari penelitian ini nantinya diharapkan dapat dijadikan referensi oleh pemerintah Kota Jayapura dalam melakukan upaya mitigasi bencana banjir di wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai melalui perencanaan atau pembangunan saluran drainase air, tanggul, sumur resapan, biopori dan pengembangan kawasan hijau untuk mencegah atau meminimalisir dampak bencana banjir yang berulang terjadi di wilayah tersebut (Patoding dkk, 2022). Berkaitan dengan hal tersebut, maka tujuan dari penelitian ini antara lain: memetakan wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai yang pernah terdampak bencana banjir menggunakan teknik fotogrametri *drone*/UAV; membuat peta orthomosaic dan model permukaan 3D (*Digital Surface Model*) wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai berdasarkan data pemetaan fotogrametri *drone*; dan melakukan analisis kerentanan banjir berdasarkan model permukaan 3D (*Digital Surface Model*) wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan kurang lebih selama 6 bulan, yaitu mulai Bulan April 2025 sampai dengan Bulan September 2025. Lokasi dari penelitian menggunakan metode pemetaan fotogrametri *drone* berada di Kecamatan Abepura, Kota Jayapura tepatnya di wilayah lokasi Pasar Youtefa- Kali Acai. Adapun luas target pemetaan dengan menggunakan instrumen *drone* atau pesawat nirawak (UAV) meliputi luasan kurang lebih sebesar 573.141 m² yang mencakup wilayah Pasar Youtefa, Kali Acai, dan Dermaga Teluk Youtefa. Adapun luas daerah yang diteliti dibatasi pada koordinat 2.613906°-2.610562° LS dan 140.678502°- 140.689342° BT. Selain data rekaman foto udara, data lain yang diambil di dalam

luasan target tersebut adalah data 17 titik kontrol di permukaan tanah atau *ground control point* (GCP) yang diambil menggunakan GPS.

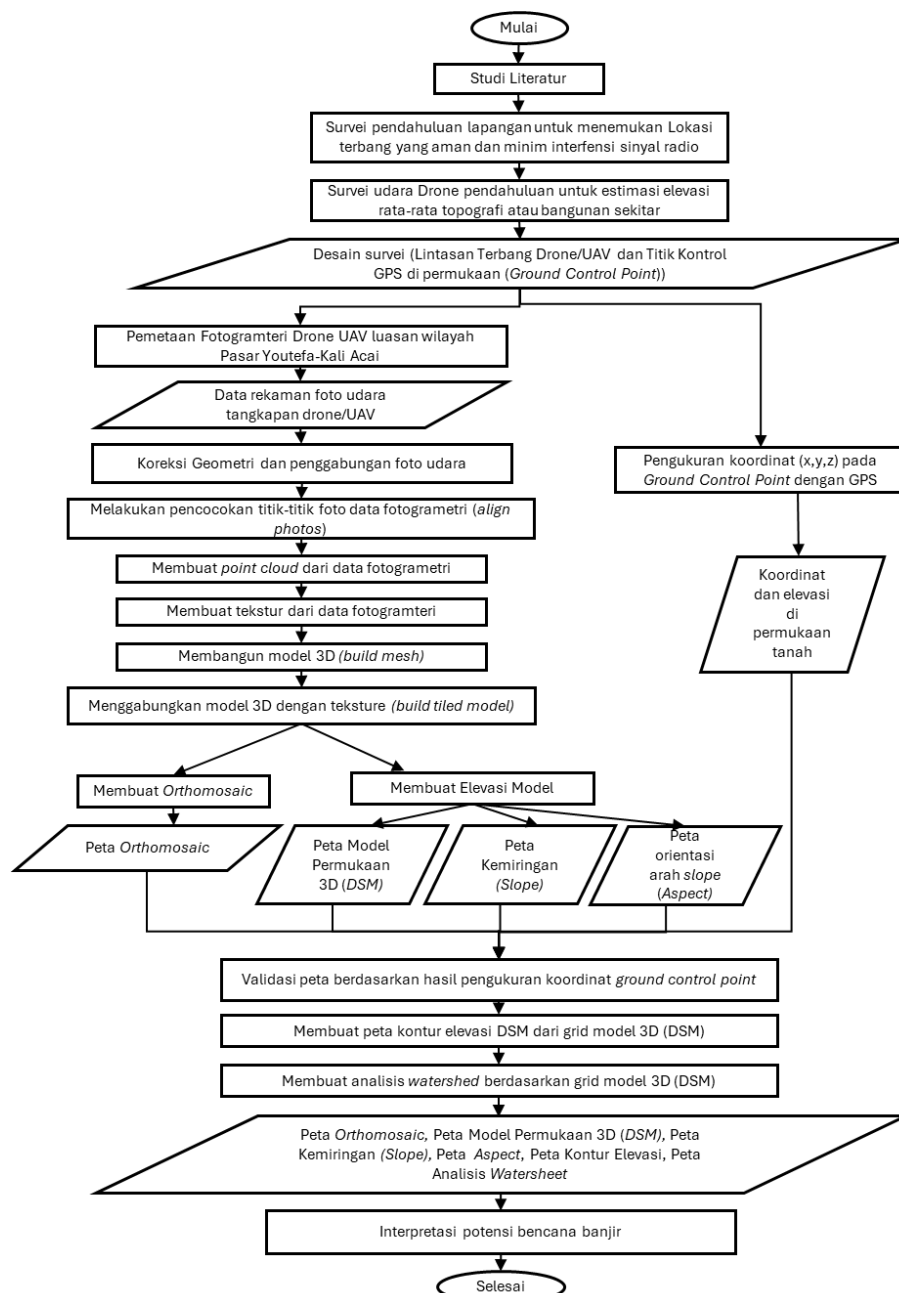
Metode pengambilan data pada penelitian ini adalah pemetaan fotogrametri menggunakan *drone*/UAV untuk menangkap citra gambar sebagai pantulan cahaya terhadap objek yang ada di permukaan. Dalam pemetaan fotogrametri untuk analisis kerentanan banjir, data foto udara yang diambil adalah foto udara tegak. Rancangan jalur terbang *drone* (UAV) pada penelitian ini dapat dilihat pada desain survei (Gambar 3). Rancangan jalur terbang berupa garis-garis sejajar digunakan untuk memastikan tumpang tindih (*overlap*) yang baik antara foto-foto yang diambil (Eisenbeil, 2009). Tumpang tindih (*overlap*) antar foto yang ditargetkan adalah 60%. Selain data potret atau rekaman foto udara yang diambil dengan *drone* tipe Dji Mavic Pro. Data koordinat dan elevasi di permukaan sebagai titik kontrol di permukaan (*ground control point*) diambil sebanyak 17 titik di dalam area pemetaan (Gambar 3). Data koordinat di permukaan ini diukur menggunakan GPS Geodetik Hi-Target V30 Plus. Tujuh belas titik koordinat dan elevasi *ground control point* nantinya digunakan untuk validasi dan atau koreksi hasil peta atau model 3D (DSM) yang dihasilkan dari pemetaan fotogrametri jarak dekat. Selain itu juga dilakukan perbandingan nilai elevasi yang diperoleh dari model digital permukaan dengan data elevasi dari peta DEM pembandingan dan hasil elevasi permukaan menggunakan GPS di lapangan guna mengetahui tingkat akurasi model yang diperoleh (Specht, 2023).

Pemetaan fotogrametri dengan *aerial surveying* adalah teknik pemetaan melalui foto udara. Fotogrametri jarak dekat adalah teknik yang digunakan untuk memperoleh informasi geometri, seperti posisi, ukuran, dan bentuk dari suatu objek yang difoto (Amiranti, 2016). Teknik pemetaan fotogrametri melibatkan pengukuran grafis dengan menggunakan sinar (Hadi, 2007). Pemodelan 3D melibatkan pembangunan representasi matematis dari permukaan tiga dimensi suatu objek menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape. Jika objek yang dimodelkan adalah objek nyata, maka pengukuran atau observasi dilakukan dengan teknologi survei seperti teknik pemetaan fotogrametri. Model 3D dibentuk menggunakan kombinasi metode *image-based modeling* (Nalwan, 1998 dalam Herianto, 2013). Pemodelan 3D dilakukan dengan mengubah data tidak terstruktur menjadi terstruktur (Suwardhi, dkk., 2016). Model 3D permukaan (DSM) dibentuk dari foto tumpang tindih yang diambil dari dua posisi pemotretan yang berbeda. Model ini direpresentasikan oleh titik-titik tiga dimensi (x, y, z). Untuk membentuk model tiga dimensi, diperlukan proses fotogrametri seperti orientasi dalam, orientasi luar, dan orientasi absolut.

Dari data-data fotogrametri jarak dekat (*close-range fotogrametri*) hasil pengambilan rekaman foto udara tegak menggunakan *drone* dan data koordinat

ground control point (GCP) dipermukaan kemudian dilanjutkan pada tahap pengolahan data. Adapun tahap pengolahan yang dilakukan meliputi: (1) koreksi geometri dan penggabungan foto udara; (2) melakukan pencocokan titik-titik foto udara/ *align photo*; (3) membuat *point cloud*; (4) membuat tekstur dari data fotogrametri; (5) membangun model 3D/ *build mesh*; (6) membuat peta orthomosaic; (7) membuat elevasi model berupa peta model permukaan/ DSM; (8) membuat peta kemiringan; (9) membuat peta azimuth arah kemiringan/ *aspect*; (10) Validasi dan kalibrasi peta berdasarkan data koordinat GCP; (11) membuat analisis *watershed* berdasarkan data grid model 3D permukaan (DSM) menggunakan algoritma *deterministic 8* (D8) dan

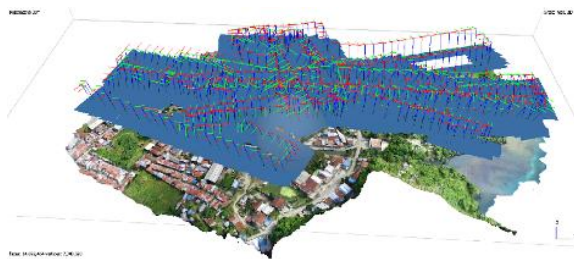
algoritma *fill depression* (pengisian cekungan) untuk memetakan arah aliran air dan batasnya (Li dkk, 2026). Validasi peta dilakukan dengan membandingkan nilai elevasi pada koordinat *GCP* antara hasil yang diperoleh dari hasil pemodelan berdasarkan data UAV terhadap data model elevasi DEMNAS resolusi $\approx 8,34$ m (Iswari dan Anggraini, 2018) dan data elevasi hasil pengukuran GPS di lapangan. Setelah melakukan pengolahan dan validasi, hasil yang diperoleh kemudian disimulasikan dan diinterpretasi guna menganalisis kerentanan banjir di wilayah penelitian. Prosedur kegiatan penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir (*flow chart*) pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir (*Flow Chart*) Prosedur Penelitian Analisis Kerentanan Bencana Banjir Menggunakan Pemetaan Fotogrametri Drone (UAV)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari akuisisi data yang dilakukan di lokasi penelitian melalui pemetaan menggunakan *drone* diperoleh data rekaman foto udara tegak sebanyak 600 foto dan data pengukuran koordinat titik kontrol di darat (*ground control point*) sebanyak 17 titik. Data yang diperoleh tersebut kemudian diolah untuk digabungkan, dikoreksi, dimodelkan, dan dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui penyebab kerentanan bencana banjir di wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai tersebut. Adapun beberapa peta yang dihasilkan dari pengolahan data pemetaan fotogrametri ini meliputi Peta Orthomosaic, Peta Model Permukaan (*Digital Surface Model*), Peta Tingkat Kemiringan (*Slope*), Peta Azimuth Arah Kemiringan (*Aspect*), Peta Cekungan air hujan (*catchment area*), dan *Watershed* (daerah aliran air). Selain itu dilakukan juga simulasi genangan banjir berdasarkan peta 3D atau model elevasi digital permukaan (DSM) guna mengetahui lokasi paling terdampak banjir di wilayah penelitian.



Gambar 3. Susunan Posisi Foto Udara yang di-Plot Sesuai Dengan Koordinatnya



Gambar 4. Desain Survei 17 Titik Kontrol Koordinat di Permukaan (GCP)

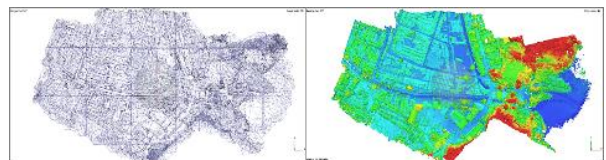
Dari hasil kegiatan survei pendahuluan berupa kegiatan survei terbang pertama menggunakan *drone* diperoleh informasi tentang kondisi topografi wilayah yang akan dipetakan. Dari kegiatan ini diperoleh informasi bahwa di sekitar wilayah target penelitian terdapat beberapa perbukitan terjal di sebelah tenggara dan di sebelah barat laut dekat Dermaga Teluk Youtefa. Adapun ketinggian perbukitan tersebut cukup tinggi pada rantang 60-100 meter. Oleh karena hal tersebut maka dilakukan penyesuaian terhadap desain survei awal pemetaan wilayah penelitian untuk menghindari topografi bukit yang terlalu terjal dan menjulang tinggi tersebut. Hal ini dilakukan guna menjamin keberhasilan dan keamanan penerbangan dimana sesuai regulasi batas ketinggian penerbangan *drone* adalah 120 m sehingga

sebagian dari wilayah topografi perbukitan tersebut tidak diikuti dalam target wilayah yang dipetakan. Dengan demikian desain survei pemetaan ini dibagi menjadi beberapa misi penerbangan. Kegiatan pemetaan kemudian dilakukan dengan beberapa kali misi penerbangan dengan target overlap data foto udara adalah sebesar 50-60%. Adapun dari hasil pemetaan diperoleh data rekaman foto udara sebanyak 600 foto udara dengan resolusi masing-masing foto sebesar 12 Megapixel. Susunan posisi 600 foto udara yang di-plot sesuai posisi pengambilan saat misi penerbangan *drone* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 5. Hasil Pembuatan Point Cloud dari Data Fotogrametri

Selain data foto udara menggunakan *drone*, pada tahap akuisisi data ini juga dilakukan pengukuran kordinat titik kontrol di permukaan atau ground control point (GCP). Pada kegiatan ini dilakukan pengukuran sejumlah 8 titik GCP yang mewakili tiap wilayah yang dipetakan secara proporsional. Beberapa titik kontrol di permukaan (GCP) yang diukur koordinat dan elevasinya dapat dilihat pada Gambar 4. Titik-titik GCP yang terukur digunakan untuk melakukan kalibrasi pada saat koreksi geometri dan georeferensi pembuatan peta dari foto-foto udara. Adapun foto-foto dari atas udara yang diambil menggunakan kamera *drone* memiliki informasi posisi GPS dan sudut pengambilan gambar dari *drone* sehingga dapat digabungkan atau disatukan sesuai dengan data koordinat dan sudut pengambilannya (Gambar 3). Foto-foto udara tersebut kemudian disatukan melalui proses *align photos* atau pencocokan titik-titik foto pada data fotogrametri yang saling tumpang tindih (*overlap*). Setelah proses *align photos*, dilakukan pembuatan kumpulan titik-titik data terpisah atau *point cloud* dari semua foto udara yang dapat mewakili bentuk 3D (Gambar 5).



Gambar 6. Model Bangun Ruang Berupa Visualisasi Wireframe (Kiri); dan Model Bangun Ruang Dengan Tampilan Variasi Warna yang Menunjukkan Perbedaan Elevasi (Kanan)

Data *point cloud* yang ditunjukkan pada Gambar 5 merupakan data tidak terstruktur sehingga dilakukan

proses *gridding* dengan membuat *mesh* atau model bangun ruang agar data tidak terstruktur tersebut berubah menjadi data terstruktur pada sistem koordinat geografis WGS84 yang digunakan. Adapun hasil dari proses pembuatan bangun ruang ini menghasilkan susunan data yang terstruktur sebagaimana yang ditunjukkan oleh tampilan visualisasi 3D *wireframe* (jaring kawat) dan visualisasi model ruang (*mesh*) yang ditunjukkan pada Gambar 6. Model bangun ruang (*mesh*) yang dihasilkan belum memiliki texture gambar yang bagus karena hanya mengandalkan data warna dari point cloud atau tie point sehingga perlu dilakukan proses tersendiri dengan menggunakan seluruh data fotogrametri (600 foto udara) untuk pembuatan tekstur agar dapat diperoleh model dengan tampilan citra gambar yang lebih detail.

Pada tahapan pembuatan texture gambar dilakukan kalibrasi warna. Hal ini diperlukan karena pada saat waktu pemetaan pada setiap misi penerbangan tingkat nuansa warna, kecerahan, saturasi, dan kontras data fotogrametri terpengaruh oleh pencahayaan dari matahari dan cuaca di lokasi penelitian. Oleh karena hal tersebut maka dilakukan

proses kalibrasi warna agar tekstur yang ditampilkan peta menampilkan tampilan nuansa warna, kecerahan, saturasi, dan kontras yang sama. Dari hasil tekstur yang diperoleh kemudian digabungkan dengan cara membuat *tilted model*. *Tiled model* sendiri merupakan model 3D yang dibuat berdasarkan data *point cloud* model *mesh* atau peta kedalaman dan data tekstur. Model 3D yang diperoleh pada tahapan ini menghasilkan model 3D yang lebih detail dan resolusi gambar tekstur yang lebih baik (Gambar 7).

Setelah memperoleh peta model 3D kemudian dilakukan pembuatan peta orthomosaic dan peta model digital permukaan *Digital Surface Model* (DSM) berdasarkan peta model 3D tersebut. Model digital permukaan (DSM) ini juga merupakan informasi geografis yang penting karena memuat informasi yang lebih detail tentang ketinggian (elevasi), kemiringan (*slope*), dan azimuth kemiringan (*aspect*). Dalam memvalidasi hasil elevasi DSM yang diperoleh maka dilakukan perbandingan terhadap nilai elevasi pengukuran GCP di lapangan dan nilai elevasi dari grid model elevasi DEMNAS resolusi 0,27 arc *second* atau sekitar 8,34 meter (Tabel 1).



Gambar 7. Peta Orthomosaic Wilayah Penelitian Hasil Pemetaan Fotogrametri

Tabel 1. Perbandingan Elevasi dari DSM Pemetaan, GCP, dan DEMNAS

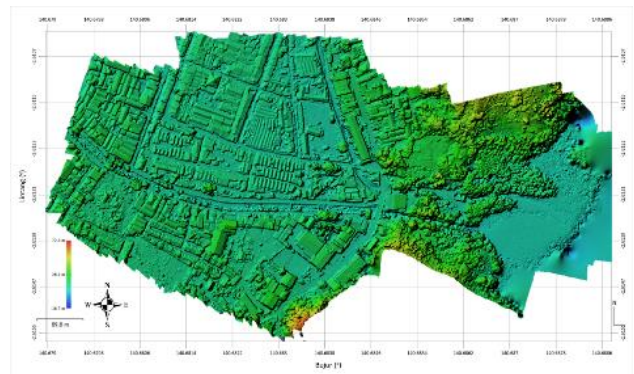
Stasiun GCP	Bujur (°)	Lintang (°)	Elevasi di Permukaan (m)	Elevasi DSM UAV (m)	Elevasi DEMNAS (m)
GCP-1	140.67998	-2.61253	16.50	13.40	1.00
GCP-2	140.68078	-2.61286	13.25	20.44	4.00
GCP-3	140.68119	-2.6124	16.25	16.18	4.00
GCP-4	140.68121	-2.61105	14.50	17.12	3.00
GCP-5	140.68121	-2.61105	14.75	17.12	3.00
GCP-6	140.68126	-2.61191	15.50	14.37	3.00
GCP-7	140.6825	-2.61235	15.00	14.08	4.00
GCP-8	140.6827	-2.61331	13.75	14.95	2.00
GCP-9	140.68339	-2.61351	25.00	20.26	4.00
GCP-10	140.68396	-2.61334	11.00	10.12	4.00
GCP-11	140.68479	-2.61371	24.00	23.59	10.49
GCP-12	140.6848	-2.61277	17.50	13.65	9.51
GCP-13	140.68485	-2.61355	22.50	16.36	9.20
GCP-14	140.68494	-2.61362	24.50	23.02	10.43
GCP-15	140.68508	-2.61327	22.80	24.13	10.28
GCP-16	140.68611	-2.61324	16.40	11.45	12.90
GCP-17	140.68632	-2.61345	21.75	25.99	8.47
RMSE terhadap Elevasi di permukaan :				0.1737	0.8354

Berdasarkan hasil validasi nilai elevasi pada 17 koordinat titik kontrol di permukaan (GCP) pada Tabel 1, nilai elevasi dari model permukaan digital (DSM) hasil pemetaan fotogrametri drone memiliki nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) terhadap nilai elevasi di permukaan sebesar 0,1737. Sedangkan nilai RMSE elevasi dari model elevasi digital DEMNAS terhadap nilai elevasi di permukaan sebesar 0,8354. Hal ini menunjukkan bahwa model elevasi digital permukaan (DSM) hasil pemetaan drone memiliki kecocokan terhadap hasil pengukuran GPS di permukaan yang jauh lebih baik dibandingkan model elevasi DEMNAS. Tingkat akurasi nilai inilah yang dijadikan dasar validasi bahwa model digital permukaan yang diperoleh dari pemetaan dapat dilanjutkan untuk diinterpretasi.

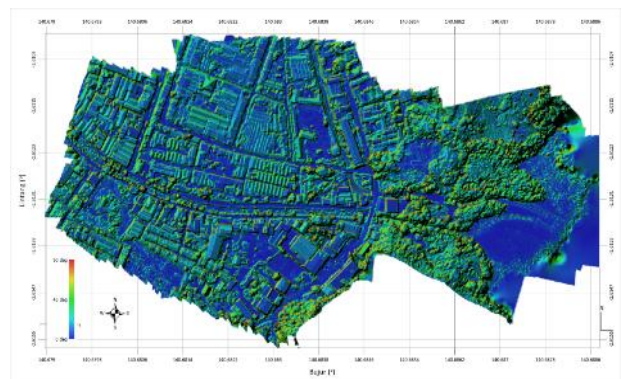
Informasi ketinggian (elevasi), kemiringan (*slope*), dan azimuth kemiringan (*aspect*) dijadikan acuan ketika menangani permasalahan yang terkait dengan banjir, genangan air, dan arah aliran air yang terjadi di lokasi penelitian. Selain itu informasi ketinggian bangunan dari DSM juga dapat menjadi acuan ketika dilakukan pembangunan infrastruktur yang memerlukan informasi ketinggian bangunan sekitar misalnya pembangunan tanggul banjir. Selanjutnya peta orthomosaic dibuat menggunakan data pemrosesan yang sebelumnya telah didapatkan. Peta orthomosaic ini digunakan sebagai peta dasar (*base map*) yang digunakan sebagai patokan dalam melakukan analisis kerentanan banjir di lokasi Pasar Youtefa-Kali Acai. Adapun tampilan hasil Peta Orthomosaic, Peta DSM, Peta Slope, dan Peta Aspect berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 7, Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10. Setelah memperoleh hasil pemetaan fotogrametri tahap berikutnya adalah melakukan analisis diagnostik kerentanan banjir.

Analisis kerentanan banjir di wilayah target penelitian yaitu Pasar Youtefa- Kali Acai dilakukan berdasarkan peta-peta yang sudah diperoleh dari hasil pemetaan. Analisis kerentanan banjir di wilayah penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan analisis meliputi analisis deskriptif, diagnostik, dan simulasi banjir. Analisis deskriptif dilakukan dengan mengkaji parameter elevasi dan kemiringan wilayah berdasarkan Peta DSM (Gambar 8), Peta Slope/ Kemiringan (Gambar 9), dan Peta Aspect / Azimuth Arah Kemiringan (Gambar 10). Sedangkan analisis diagnostik dilakukan dengan melakukan estimasi wilayah-wilayah yang berpotensi menjadi area cekungan air hujan (*catchment area*) dan mengestimasi daerah aliran air atau *watershed* guna mengetahui kemana air dari cekungan-cekungan genangan air hujan yang berpotensi mengalir dan kesesuaiannya dengan saluran drainase air yang sudah ada saat ini. Setelah dilakukan diagnosis selanjutnya dari Peta DSM juga dilakukan analisis simulasi banjir dengan melakukan variasi *level* atau tingkat ketinggian genangan air saat terjadi banjir terhadap peta model 3D permukaan (DSM) sehingga

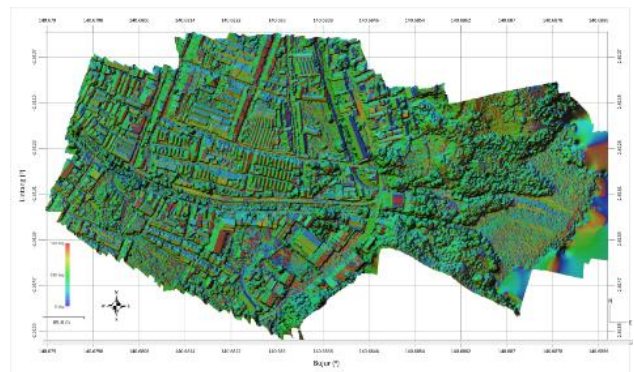
dapat diketahui kerentanan atau area paling terdampak banjir di wilayah penelitian.



Gambar 8. Peta *Digital Surface Model* (DSM) Wilayah Penelitian Hasil Pemetaan Fotogrametri



Gambar 9. Peta *Slope* Wilayah Target Penelitian Hasil Pemetaan Fotogrametri Drone



Gambar 10. Peta *Aspect* Wilayah Target Penelitian Hasil Pemetaan Fotogrametri Drone

Berdasarkan hasil model elevasi dari peta model 3D permukaan (DSM) (Gambar 8) diketahui bahwa elevasi daerah yang dipetakan berkisar antara -16,70 m sampai dengan 72,80 m. Adapun elevasi -16,70 m adalah kedalaman dasar laut di wilayah perairan Teluk Youtefa. Sedangkan ketinggian atau elevasi 72,80 m adalah ketinggian wilayah perbukitan terjal di bagian selatan wilayah yang dipetakan (Gambar 8). Pada wilayah saluran drainase Kali Acai diperoleh nilai elevasi di berkisar antara 2,12 m sampai dengan 5,18 m dengan rata-rata elevasi 3,72 m terhadap rata-rata permukaan air laut. Adapun elevasi tertinggi berada pada lokasi saluran drainase menanjak di

dekat jembatan Jalan Poros menuju Jalan *Ring Road* Jayapura (Gambar 7). Selain itu dari model elevasi hasil pemetaan juga diperoleh bahwa wilayah Pasar Youtefa dan area pemukiman di sekitar Kali Acai memiliki elevasi permukaan tanah rata-rata 3 m. Namun ada berapa wilayah di area Pasar Youtefa yang memiliki elevasi kurang dari 3 m. Hal ini menunjukkan bahwa ada beberapa wilayah pemukiman dan wilayah kompleks Pasar Youtefa wilayah yang memiliki elevasi lebih rendah dibandingkan saluran drainase air Kali Acai.

Lebih lanjut berdasarkan peta *slope* atau kemiringan (Gambar 9) dan peta *aspect* atau azimuth arah kemiringan (Gambar 10) yang diperoleh dari hasil pemetaan fotogrametri diketahui bahwa wilayah penelitian didominasi oleh area permukaan tanah datar dengan kemiringan mendekati sudut 0°. Terdapat beberapa wilayah perbukitan dan atap bangunan yang memiliki sudut kemiringan berkisar 10-45°. Wilayah permukaan tanah yang memiliki kemiringan berkisar antara 10-45° berada di wilayah timur khususnya area perbukitan di dekat Teluk Youtefa. Sedangkan sudut 90° pada peta *slope* (Gambar 10) menunjukkan geometri bentuk tegak dari dinding bangunan atau infrastruktur di lokasi penelitian. Dari peta kemiringan (Gambar 9) dan peta orthomosaic (Gambar 7) diketahui juga bahwa pada saluran drainase kali acai terindikasi keberadaan endapan atau penumpukan sampah yang menyebabkan pendangkalan di saluran drainase Kali Acai. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian analisis kualitas sistem drainase di sekitar wilayah penelitian yang telah mengalami pendangkalan akibat sedimentasi dan penumpukan sampah (Ilham dkk, 2025). Berdasarkan peta *aspect* atau azimuth arah kemiringan diketahui bahwa wilayah penelitian memiliki azimuth arah kemiringan dominan ke arah barat (180°) (Gambar 10). Meskipun demikian, beberapa wilayah yang memiliki bentuk geometri 3D dengan arah kemiringan 0° atau 360° menunjukkan azimuth arah kemiringan ke arah timur. Deskripsi kondisi elevasi, kemiringan, dan azimuth arah kemiringan ini kemudian dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh parameter elevasi dan kemiringan terhadap potensi terjadinya bencana banjir dengan melakukan estimasi area cekungan potensial genangan air dan analisis daerah aliran air (*watershed*).

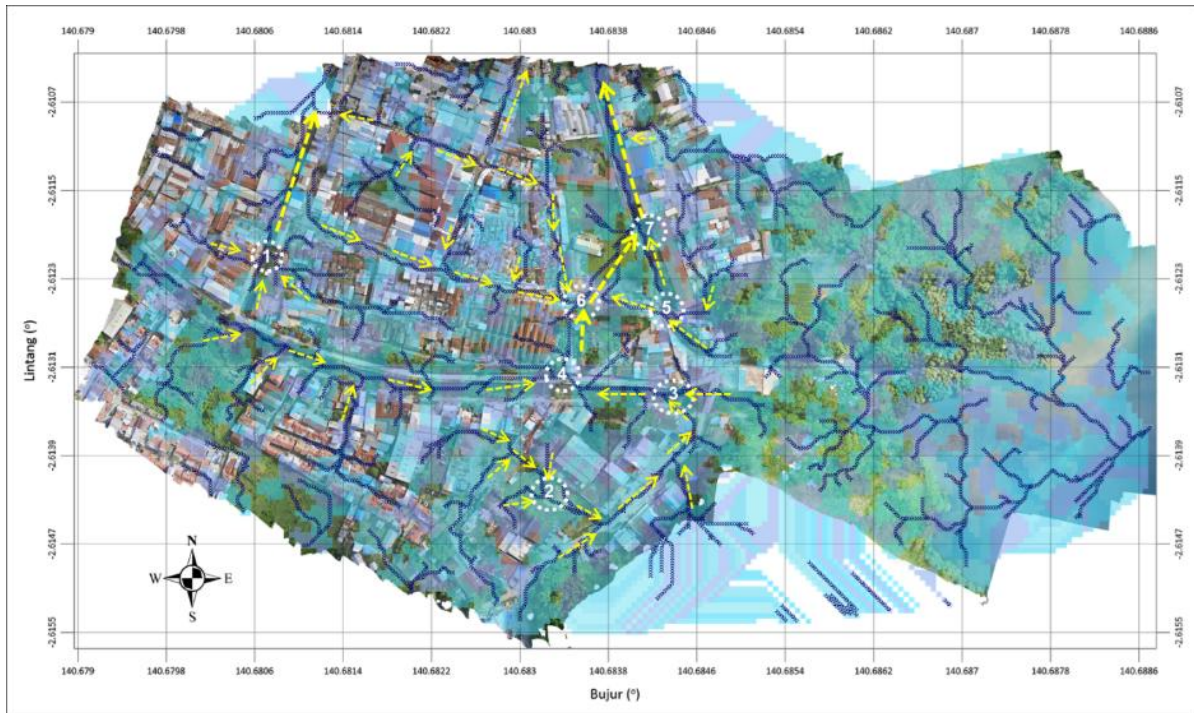
Peta hasil analisis area cekungan air hujan (*catchment area*) dan hasil analisis daerah aliran air (*watershed*) berdasarkan model 3D permukaan hasil pemetaan fotogrametri dapat dilihat pada Gambar 11. Berdasarkan Gambar 11, diketahui bahwa arah vektor akumulasi aliran air hujan (*watershed*) pada saluran drainase Kali Acai lebih justru berpotensi mengalir ke arah utara dibandingkan mengalir ke arah barat menuju laut di Teluk Youtefa. Hal ini ditunjukkan dengan teridentifikasinya 6 titik kumpul akumulasi aliran air (*watershed*) yang mengalir ke arah utara baik melalui selokan atau drainase air maupun melalui wilayah permukaan tanah (Gambar 11). Peta

hasil analisis area cekungan air hujan (*catchment area*) dan peta hasil analisis daerah aliran air (*watershed*) berdasarkan model 3D permukaan hasil pemetaan fotogrametri dapat dilihat berturut-turut pada Gambar 11. Berdasarkan peta tersebut terlihat bahwa di wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai yang diteliti terdapat beberapa wilayah padat cekungan air hujan. Beberapa wilayah padat cekungan air hujan (*catchment area*) antara lain: (1) saluran drainase air Kali Acai dari arah timur ke barat; (2) saluran drainase air dari arah utara ke selatan di sebelah jalan raya; dan (3) wilayah kompleks ruko atau perumahan di bagian tenggara wilayah penelitian dekat turunan jalan raya. Selain wilayah tersebut terlihat juga cekungan air hujan di wilayah perbukitan di sebelah barat yang dekat dengan area perairan laut Teluk Youtefa. Wilayah cekungan air hujan ini menunjukkan area yang berpotensi menangkap dan mengalirkan aliran air hujan yang terakumulasi di setiap wilayah. Aliran air yang tertangkap dan terkumpul pada area cekungan air hujan ini kemudian dicari keterkaitannya dengan melihat arah aliran air hujan (*watershed*) menggunakan algoritma *deterministic 8* (D8) dengan menentukan arah aliran air dari suatu titik/piksel elevasi grid DSM menuju 8 sel tetangga yang memiliki elevasi rendah (Li dkk, 2026). Hal ini dilakukan guna mengetahui kemana arah aliran akumulasi air hujan berkumpul (Gambar 11).

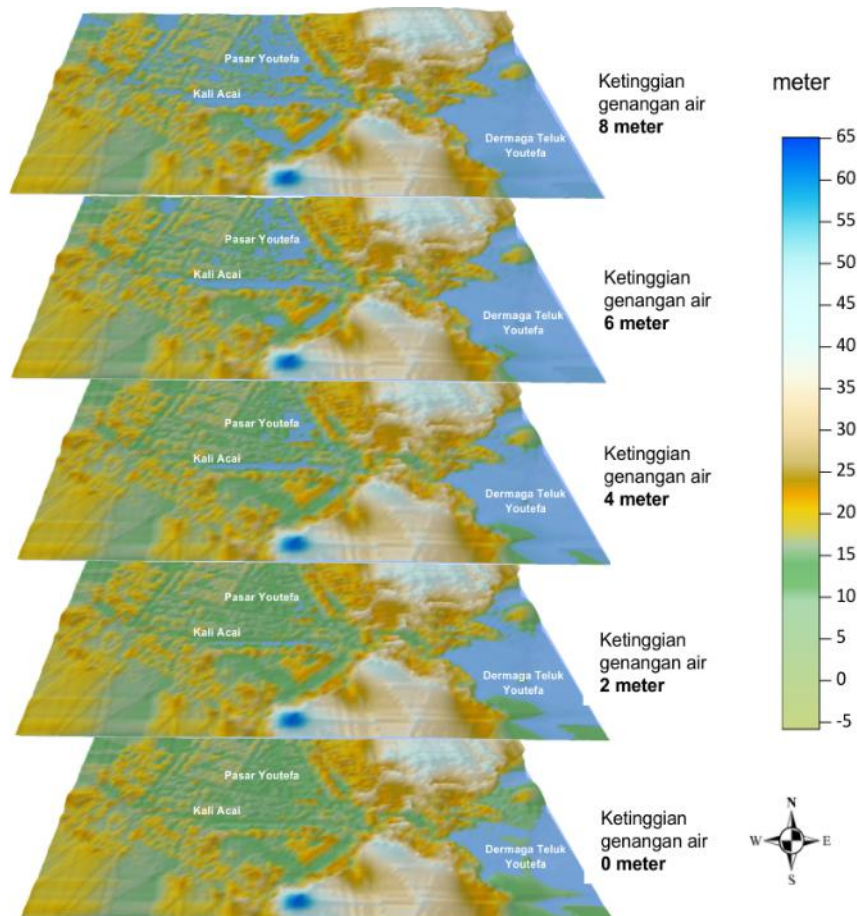
Hasil analisis deskripsi dan analisis diagnosis berdasarkan model 3D permukaan hasil pemetaan fotogrametri *drone* yang telah dipaparkan menunjukkan secara jelas keterkaitan pengaruh parameter ketinggian dan kemiringan terhadap potensi bencana banjir di wilayah Pasar Youtefa. Wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai merupakan wilayah dataran rendah dengan elevasi permukaan tanah yang mendekati elevasi rata-rata permukaan air laut. Selain itu ditemui beberapa wilayah di area Pasar Youtefa memiliki elevasi lebih rendah dibandingkan elevasi saluran drainase air sehingga air yang terakumulasi di Kali Acai berpotensi meluap dan mengalir di wilayah tersebut (Gambar 11). Hal ini sesuai dengan hasil analisis peningkatan debit banjir yang meningkat di tahun 2024 menjadi 100,41 m³/detik oleh karena pengaruh alih fungsi lahan (Kirana dkk, 2025), sehingga akumulasi debit banjir tidak dapat tertampung lagi di penampang saluran drainase air Kali Acai. Selain itu kondisi azimuth arah kemiringan wilayah yang cenderung ke arah barat menyebabkan aliran air dari saluran drainase Kali Acai tidak optimal mengalir ke arah timur menuju laut melalui pintu Air di Dermaga Teluk Youtefa. Hal ini terjadi karena kondisi kemiringan wilayah dengan arah aliran air yang diharapkan tidak sesuai. Lebih lanjut berdasarkan analisis area cekungan air hujan dan aliran air hujan diketahui bahwa aliran air hujan yang terakumulasi justru mengalir ke arah utara. Dengan demikian hal ini menjelaskan mengapa bencana banjir dapat terjadi di wilayah penelitian. Setelah diketahui pengaruh parameter ketinggian dan kemiringan wilayah selanjutnya dilakukan simulasi bencana

banjir berdasarkan peta model 3D permukaan hasil pemetaan fotogrametri *drone* guna mengetahui kerentanan atau risiko ketika terjadi genangan air

hujan sehingga dapat diketahui potensi kejadian bencana banjir di wilayah penelitian (Gambar 12).



Gambar 11. Peta Hasil Analisis Daerah Aliran Air (*Watershed*)



Gambar 12. Simulasi Bencana Banjir Berdasarkan Peta Model 3D Permukaan (DSM) Hasil Pemetaan Fotogrametri *Drone*

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dengan menaikkan level genangan air hujan ketika terjadi banjir pada ketinggian air 0 m, 2 m, 4 m, 6 m, dan 8 m, terlihat bahwa wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai mulai terdampak banjir ketika genangan air hujan mencapai level ketinggian 2 m terhadap rata-rata permukaan air laut. Adapun wilayah yang pertama terdampak adalah jalan di pinggir saluran Kali Acai dekat pertigaan jalan raya dan juga area terminal dan halaman dekat pintu masuk Pasar Youtefa. Kemudian pada level ketinggian air di 4 m genangan banjir menyebar ke arah utara di area Pasar Youtefa sebelah barat. Selanjutnya pada Level ketinggian air di 6 meter, dampak banjir mulai melebar ke arah utara dan arah barat Pasar Youtefa-Kali Acai, dan juga melebar ke kompleks pertokoan di arah tenggara. Pada level ketinggian air di elevasi 8 meter, dampak banjir semakin meluas ke seluruh wilayah Pasar Youtefa dan Pemukiman di Pinggir Kali Acai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa kegiatan pemetaan fotogrametri menggunakan UAV/drone yang dilakukan di Pasar Youtefa-Kali Acai yang pernah terdampak bencana banjir dapat terlaksana dengan baik dengan menghasilkan data rekaman 600 foto udara dan data data 17 titik koordinat *ground control point* (GCP). Peta Orthomosaic dan Peta Model 3D Permukaan (DSM) Luas Wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai yang dihasilkan dari pengolahan data fotogrametri menggunakan drone dapat digunakan sebagai bahan analisis kerentanan banjir berdasarkan parameter elevasi dan kemiringan wilayah. Lebih lanjut dari hasil analisis kerentanan banjir melalui berdasarkan Peta Model 3D Permukaan (DSM) diperoleh hasil bahwa terdapat beberapa faktor penyebab terjadinya banjir di wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai antara lain: (1) azimuth kemiringan wilayah adalah ke arah barat sehingga berlawanan dengan arah aliran air yang diarahkan menuju laut melalui Dermaga Teluk Youtefa di arah timur; (2) terdapat wilayah Pasar Youtefa yang memiliki elevasi tanah yang lebih rendah dibandingkan rata-rata elevasi saluran drainase air Kali Acai sehingga dapat menyebabkan genangan air mengalir ke wilayah tersebut; (3) daerah aliran air hujan (*watershed*) di wilayah penelitian menunjukkan bahwa akumulasi aliran air dari cekungan air hujan (*catchment area*) lebih cenderung mengalir ke arah utara dibandingkan ke arah timur sehingga sesuai dengan hasil simulasi genangan banjir wilayah paling berpotensi tergenang adalah sepanjang wilayah di sebelah utara saluran drainase Kali Acai.

Berdasarkan temuan pada penelitian ini pemerintah daerah direkomendasikan dapat melakukan beberapa solusi perbaikan jalur drainase aliran air sesuai dengan kondisi azimuth kemiringan dan zona akumulasi genangan air. Adapun solusi yang dapat dilakukan antara lain: memperlebar dan memperdalam saluran drainase Kali Acai dan saluran

darinase pintu air Dermaga Teluk Youtefa supaya jauh lebih rendah elevasinya daripada elevasi permukaan tanah di wilayah Pasar Youtefa; menambah saluran drainase air, membuat sumur biopori dan mengembangkan kawasan hijau pada zona wilayah padat cekungan genangan air hujan (*catchment area*); dan mempertimbangkan alternatif saluran drainase utama menuju laut di sebelah utara wilayah Pasar Youtefa-Kali Acai mengingat aliran air hujan lebih mudah mengalir ke arah utara di bandingkan ke arah timur.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfons, A., Jikwa, S., dan Winarno, T. 2016. Evaluasi Sistem Drainase Sebagai Upaya Penanggulangan Banjir Di Kota Jayapura. *Jurnal PORTAL SIPIL*, 5(1), 52-63. Retrieved from <https://ojs.ustj.ac.id/sipil/article/view/249>.
- Amiranti, A. Y. 2016. Pembuatan Model Tiga Dimensi Menggunakan Foto Jarak Dekat dengan Kombinasi Metode Interaktif dan Otomatis. Skripsi. Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- CNN Indonesia. 2022. Total 7 Ribu Warga Kota Jayapura Terdampak Banjir dan Tanah Longsor. diakses melalui: <https://www.cnnindonesia.com/nasional/20220109143922-20-744360/total-7-ribu-warga-kota-jayapura-terdampak-banjir-dan-tanah-longsor>.
- Detik News. 2022. Foto Udara Pasar Youtefa Jayapura yang Disapu Banjir. Diakses melalui: <https://news.detik.com/foto-news/d-5888123/foto-udara-pasar-youtefa-jayapura-yang-disapu-banjir>.
- Eisenbeil, H. 2009. "UAV Photogrammetry", Thesis Diss, ETH No 18515, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Hadi, B. S. 2007. Dasar-Dasar Fotogrametri. Yogyakarta: Jurusan Pendidikan Geografi
- Herianto. 2013. Studi Pembuatan Model Tiga Dimensi (3D) Dengan Teknik Close Range Photogrammetry. Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika. Institut Teknologi Nasional Malang.
- Ilham, M., Beatrick, M.Y., dan Simbiak, I.T. 2025. Analisis Kualitas Sistem Drainase terhadap Bencana Banjir di Distrik Abepura Kota Jayapura: Studi Kasus : Kelurahan Way Mhorock, Distrik Abepura. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 3(1), 244-254. <https://doi.org/10.61132/venus.v3i1.767>.
- Iswari, M. dan Anggraini, K. 2018. DEMNAS: Model Digital Ketinggian Nasional Untuk Aplikasi Kepesisiran. *Oseana*. 43 (2), 68-80. <https://doi.org/10.14203/oseana.2018.Vol.43No.4.2>.
- Kirana, A.W., Wambrau E.V., dan Wairata J. 2025. Analisis Mitigasi Bencana Banjir Akibat Sedimentasi dalam Perubahan Tata Guna Lahan Kawasan Permukiman Sepadan Kali Acai pada Tahun 2014- 2024. *Konstruksi: Publikasi Ilmu Teknik, Perencanaan Tata Ruang Dan Teknik Sipil*, 3(4), 31-44. <https://doi.org/10.61132/konstruksi.v3i4.1048>.
- Li, J., Wang, H., dan Zhang, Y. 2026. Parallel strategy and scale effect of D8 algorithm for watershed flow accumulation under CUDA architecture. *Yangtze River*, 47(2), 85-94.

- <https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2026.02.008>.
- Mataburu, I. B., Handawati, R., dan Hijrawadi, S. N. 2022. Analisis Wilayah Rawan Banjir DAS Cimanuk Hulu Menggunakan Model Complete Mapping Analysis dan SIG. *Jurnal Georaflesia*, 7(2): 129-140.
- Mousavi, S. M., Rossi, L., dan Toth, E. 2025. RivAlr: A custom-designed UAV-based sensor for real-time water area segmentation and surface velocity estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 128, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.103456>.
- Noor, Firdaus. 2020. Historiografi *drone*: Dari Militer Hingga Sinema. *ProTVF*, 4(2): 185-205.
- Patoding, M. A., Simbiak, I. T., dan Beatrick, M. Y. 2022. Analisis Ketahanan Kota Terhadap Bencana Banjir Di Kota Jayapura. *JURNAL WILAYAH, KOTA DAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN*, 1(1), 11-25. <https://doi.org/10.58169/jwikal.v1i1.30>.
- Pratama, B. H., Hadiani, R.R.R., dan Setiono. 2019. Analisis Banjir Tahunan Kota Surakarta Menggunakan Watershed Modelling System (WMS). *E-Jurnal Materiks Teknik Sipil*, Terbitan September 2019: 294-305. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v7i3.36499>.
- Putra, K., Risaluddin, dan Hidayatullah, A. 2024. Analisis Pemodelan Banjir Sungai Acai Dengan Software HEC-RAS Sebagai Rencana Penanganan Banjir di Kota Jayapura. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20888.78087>.
- Rakuasa, H., Sihasale, D. A., Mehdila, M. C., dan Wlary, A. P. 2022. Analisis Spasial Tingkat Kerawanan Banjir di Kecamatan Teluk Amnbon Baguala, Kota Ambon. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing (JGRS)*, 3(2): 60-69. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2022.v3i2.80>.
- Rana, M., Patel, D., Vakharia, V., dan Singh, S. 2024. UAV-based DEM augmentation using ConSinGAN for efficient flood parameter prediction with machine learning and 1D hydrodynamic models. *Physics and Chemistry of the Earth*, 135, 103675. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103675>.
- Shodiq, A. M., Sobatnu, F., dan Inayah, N. 2022. Analisis Aspek Geometri Genangan Banjir Menggunakan Data Demnas. *Jurnal INTEKA*. 22(1), 1-75. Retrieved from <https://ejurnal.poliban.ac.id/index.php/intekna/article/view/1263>.
- Specht, O. 2023. Land and seabed surface modelling in the coastal zone using UAV/USV-based data integration. *Sensors*, 23(19), 8020. <https://doi.org/10.3390/s23198020>.
- Sudrajad, B., Sutarman, T., dan Diesya, C. W. 2025. Penyediaan Peta Luas Bidang Tanah Wilayah Administrasi PLBN Badau Menggunakan Pemetaan Fotogrametri Drone. (2025). *Jurnal Altifani Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(5), 700-712. <https://doi.org/10.59395/altifani.v5i5.743>.
- Suwardhi, D., Mukhlisin, M., Darmawan, D., Trisyanti, S.W., Brahmantara, B., dan Suhartono, Y. 2016. Survey dan Pemodelan 3D (Tiga Dimensi) untuk Dokumentasi Digital Candi Borobudur.
- Suyudi, B., dan Subroto, T. 2014. "Fotogrametri dan Penginderaan jauh". Yogyakarta: Sekolah Tinggi Pertanahan Nasional, 55293.
- Syauqani, A., Subiyanto, S., dan Suprayogi, A. 2017. Pengaruh Variasi Tinggi Terbang Menggunakan Wahana Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadcopter Dji Phantom 3 Pro Pada Pembuatan Peta Orthofoto. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(1), 249-257. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2017.15388>.
- Wibowo, A., Nugroho, S., dan Prasetyo, R. 2025. UAV mapping for flood routing in steep and densely vegetated areas: Insights from the Contok River Basin, Garang Watershed, Indonesia. *LIMNOTEK: Perairan Darat Tropis di Indonesia*, 31(2), 145-160. <https://doi.org/10.55981/limnotek.2025.5028>.
- Wolf, P., R. 1993. "Elemen Fotogrametri dengan Interpretasi Foto Udara dan Penginderaan Jauh", Penerjemah: Gunadi, Gunawan, T., Zuharnen, Edisi kedua, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.