

Pemodelan *Terrain Digital* dan Pemetaan Arah Aliran Air Permukaan pada Kawasan Hutan Mangrove menggunakan Data *Point Cloud Lidar*

Arinda Tasya Avrianti¹⁾, Bambang Kun Cahyono^{2*)}

¹⁾ Program Studi Sarjana Teknik Geodesi, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

²⁾ Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Corresponding Author: Bambang Kun Cahyono (Email: bambangkun@ugm.ac.id)

Abstract

Excessive exploitation and land use changes have damaged and depleted mangrove forests in Indonesia. To support mangrove forest planning and management, digital terrain modeling and surface water flow mapping are essential. These activities take place in the coastal region of Kinabuhutan Village, North Sulawesi Province, and involve the utilization of LiDAR point cloud data, aerial orthophotos, and terrestrial measurement coordinates. The digital terrain model is created by processing ground-classified LiDAR point cloud data using the Binning method. Hydro-topographic editing, including hydro-conditioning, hydro-enforcement, and hydro-flattening, is performed to improve the representation of water bodies in the model. After editing, the accuracy of the digital terrain model is tested using terrestrial measurement coordinates. The model that meets the accuracy requirements is then used as input for determining surface water flow directions using the D8 algorithm, suitable for areas with relatively simple and non-complex topography. These activities successfully classify the LiDAR point cloud data into ground and non-ground classes. The resulting digital terrain model achieves vertical accuracy within Class 1 of a 1:5000 scale map, with a 90% confidence level. The hydrological analysis produces a surface water flow direction map, providing comprehensive information about the direction and order of water flow. This information enhances understanding of the hydro-topographic conditions in the mapped area.

Keywords: *Water Flow Direction, DTM, LiDAR, Mangrove*

1. Latar Belakang

Hutan mangrove merupakan salah satu komponen utama dari ekosistem kawasan pesisir. Umumnya, hutan mangrove terletak di daerah pantai yang memiliki lumpur dan air yang tenang (gelombang laut tidak besar). Selain itu, juga sering disebut dengan hutan pasang surut karena terdapat di daerah yang

dipengaruhi oleh pasang surut air laut (Noor dkk., 2012).

Berdasarkan Peta Mangrove Nasional Tahun 2021 yang resmi dirilis oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, dapat diketahui bahwa total luas hutan mangrove di Indonesia adalah sekitar 3.364.076 Ha atau mencapai 20,37% dari total mangrove dunia. Luas hutan mangrove

tersebut bahkan jauh lebih tinggi dibandingkan dengan luas hutan mangrove di beberapa negara lainnya, seperti Brazil (1,3 juta Ha), Nigeria (1,1 juta Ha), Australia (0,97 juta Ha), dan Bangladesh (0,2 juta Ha) (Kominfo RI, 2022).

Hutan mangrove memiliki peran penting dari berbagai aspek. Secara biologis, hutan mangrove menyediakan habitat alami yang nyaman dan aman untuk berbagai biota laut, seperti tempat memijah, tempat asuhan, dan tempat mencari makanan. Secara ekologis, mangrove membantu menjaga keseimbangan ekosistem di sekitarnya dan berperan sebagai kawasan perlindungan dari bencana alam seperti banjir, badai, tsunami, dan angin topan. Secara ekonomi, hutan mangrove dapat dimanfaatkan sebagai tempat wisata dan rekreasi, sumber kayu bakar, bahan kayu bangunan, dan bahan untuk kayu lapis (Wayan dan Dharmawan, 2014).

Namun, eksploitasi dan konversi lahan yang berlebihan telah menyebabkan kerusakan dan hilangnya hutan mangrove di sejumlah kawasan pesisir Indonesia. Ilman dkk. (2016) melaporkan bahwa mangrove di Indonesia telah dieksploitasi secara sistematis sejak tahun 1800, terutama untuk pengembangan tambak dan penebangan kayu. Pada akhir 1960-an, Indonesia kehilangan lebih dari 200.000 Ha atau setidaknya 50% dari hutan mangrove terutama di Jawa dan Sumatera. Laju kehilangan semakin meningkat pada tahun 1970 ketika eksploitasi mangrove bergeser ke pulau-pulau baru di luar Jawa, terutama Kalimantan dan Sulawesi, karena kebijakan untuk meningkatkan produksi dan perluasan tambak skala besar. Dalam 30 tahun, sekitar 800.000 Ha hutan mangrove diperkirakan telah hilang. Temuan tersebut diperkuat oleh Deputi Bidang Perencanaan dan Evaluasi Badan Restorasi Gambut dan Mangrove (2022), yang mencatat bahwa sekitar 700.000 Ha hutan mangrove di Indonesia telah mengalami deforestasi, terutama akibat konversi lahan mangrove menjadi tambak di areal penggunaan lain (APL) (KLHK RI, 2022).

Kerusakan dan hilangnya kawasan hutan mangrove memiliki konsekuensi yang

berdampak pada ketidakseimbangan ekosistem di wilayah pesisir (Salam dkk., 2018). Melihat kondisi yang terjadi, diperlukan adanya restorasi dan konservasi mangrove untuk menjaga kelestarian dan keseimbangan ekosistem di wilayah pesisir. Untuk memulai langkah restorasi dan konservasi mangrove, penting untuk melaksanakan proses perencanaan dan pengelolaan kawasan mangrove berdasarkan pada data dan informasi yang akurat (KLHK RI, 2021).

Sayangnya, ketersediaan data dan informasi sebagai dasar perencanaan dan pengelolaan kawasan mangrove di Indonesia masih belum memadai (Rahadian dkk., 2019). Padahal, peran data topografi seperti *Digital Terrain Model* (DTM) yang dibentuk dari *point cloud* hasil perekaman LiDAR sangat penting dalam proses perencanaan dan pengelolaan kawasan mangrove. Data *point cloud* hasil perekaman LiDAR memiliki akurasi vertikal kurang dari 20 cm (Schmid dkk., 2012), sehingga DTM yang dihasilkan dari data tersebut dapat memberikan informasi detail mengenai kondisi topografi permukaan tanah di kawasan hutan mangrove. Dengan tingkat akurasi dan kerapatan yang tinggi, DTM LiDAR dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam perumusan kebijakan dan strategi pengelolaan yang tepat (Knight dkk., 2009). Selain itu, DTM LiDAR juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan pertimbangan dalam penentuan area prioritas penanaman mangrove (Worthington dkk., 2020).

Dalam proses perencanaan dan pengelolaan kawasan mangrove, selain data topografi, informasi hidrologi seperti arah aliran air permukaan juga diperlukan. Informasi arah aliran air permukaan sangat berguna dalam proses penentuan lokasi yang tepat untuk penanaman mangrove, tanpa harus melakukan pengumpulan data lapangan, sehingga proses perencanaan dapat dilakukan dengan lebih efektif (Uemaa dkk., 2018). Selain itu, informasi arah aliran air permukaan juga dapat memberikan pemahaman tentang dinamika hidrologi di kawasan hutan mangrove. Untuk menghasilkan informasi hidrologi tersebut,

dilakukan proses analisis spasial pada DTM LiDAR, yang telah terbukti kualitasnya dalam menggambarkan kondisi topografi permukaan tanah di kawasan hutan mangrove secara detail. Dengan menggunakan DTM LiDAR sebagai data masukan, diharapkan dapat menghasilkan informasi arah aliran air permukaan yang akurat dan representatif, sehingga pola dan pergerakan air di kawasan tersebut dapat dipahami dengan lebih baik (Amin dkk., 2018).

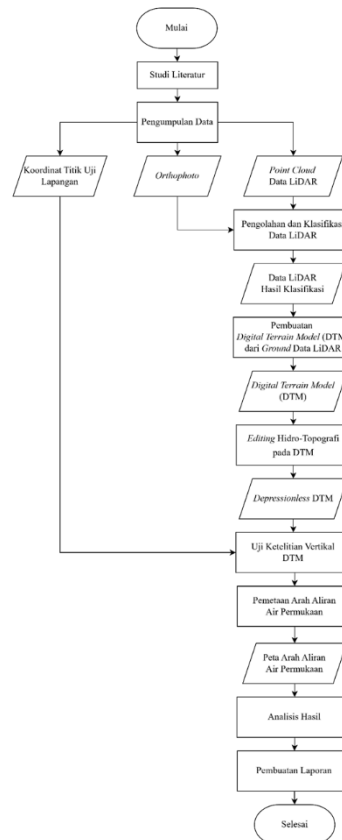
Pentingnya peran data topografi dan informasi hidrologi menunjukkan bahwa keterbatasan data dan informasi berkualitas tinggi memiliki dampak yang cukup signifikan terhadap proses perencanaan dan pengelolaan kawasan hutan mangrove di Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan upaya penyediaan data topografi dan informasi hidrologi yang memiliki akurasi tinggi pada kawasan hutan mangrove. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan data *point cloud* hasil perekaman LiDAR yang telah terbukti memiliki akurasi tinggi untuk menghasilkan informasi yang detail dan representatif mengenai topografi permukaan tanah serta arah aliran air permukaan di kawasan hutan mangrove.

2. Data dan Metode

Data dan Lokasi

Kegiatan pemodelan *terrain digital* dan pemetaan arah aliran air permukaan ini dibatasi pada kawasan hutan mangrove yang berada di wilayah pesisir Desa Kinabuhutan, Kecamatan Likupang Barat, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara. Beberapa jenis data yang digunakan dalam kegiatan ini meliputi data *point cloud* hasil perekaman LiDAR dengan format *.las yang memiliki kerapatan titik sebesar 100 *point/m²*; *orthophoto* hasil kegiatan foto udara dengan format *.tif yang memiliki *Ground Sample Distance* (GSD) sebesar 4 cm/piksel; data koordinat titik uji akurasi (ICP) tersedia dalam format *.xlsx. yang diperoleh dari PT GeoSpatial Nusantara pada tahun 2023. Selain itu, digunakan pula data prediksi pasang surut air laut milik Badan

Informasi Geospasial yang diakses melalui srgi.big.go.id.



Gambar 1. Diagram Alir Pelaksanaan Kegiatan

Langkah pelaksanaan dimulai dengan studi literatur dan pengumpulan data yang dibutuhkan selama kegiatan. Selanjutnya dilakukan pengolahan data seperti berikut:

1. Pengolahan dan Klasifikasi Data LiDAR

Pada proses ini dilakukan *pre-processing* data LiDAR yang meliputi pembuatan *file project*, pengaturan sistem koordinat, manajemen *trajectory*, dan pembuatan *blocks (tiling)*. Selanjutnya, dilakukan proses klasifikasi data LiDAR menggunakan metode semi-otomatis dan manual, yang bertujuan untuk mengklasifikasikan *point cloud* ke dalam dua kelas utama yakni *ground* dan *non-ground*.

2. Pembuatan *Digital Terrain Model* (DTM)

Point cloud data LiDAR yang terklasifikasi sebagai kelas *ground*, akan *diimport* ke dalam *workspace* Global Mapper Pro sesuai sistem koordinat data, yakni UTM Zona 51N. Kemudian, dari *point cloud* data LiDAR yang berhasil *diimport*, dilakukan *create elevation grid* dan *setting* parameter pembentukan DTM (meliputi *grid type*, *grid method*, dan *grid spacing*). Dalam pembuatan DTM, *grid type* yang dipilih adalah *Binning (Minimum Value – DTM)* dan *grid spacing* yang diatur adalah sebesar 1 meter.

3. *Editing* Hidro-topografi pada DTM

DTM yang telah terbentuk dari proses sebelumnya akan diperbaiki tampilan hidro-topografinya dengan proses *editing* yang melibatkan beberapa koreksi DTM seperti penghilangan depresi atau cekungan pada DTM (*hydro-conditioned*), penghapusan fitur yang mengganggu aliran air dan pembuatan 3D *breaklines* di sepanjang fitur badan air (*hydro-enforced*) serta penyesuaian elevasi pada badan air agar konsisten terhadap karakteristik topografi di sekitarnya (*hydro-flattened*).

4. Uji Ketelitian Vertikal DTM

Uji ketelitian vertikal dilakukan dengan menghitung perbedaan nilai koordinat vertikal (tinggi orthometris) antara titik uji pada DTM LiDAR dengan titik uji dari hasil pengukuran secara terestris yang diasumsikan sebagai data

sebenarnya di lapangan. Pengujian ini menggunakan 18 titik uji yang tersebar merata di seluruh area yang dipetakan. Setelah diperoleh perbedaan nilai antara titik uji DTM LiDAR dan titik uji hasil pengukuran terestris, maka dilakukan perhitungan akurasi menggunakan *Root Mean Square Error vertical (RMSE(z))* dan perhitungan *Linear Error (LE)* pada tingkat kepercayaan 90%. Formula yang digunakan dalam uji ketelitian vertikal dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$RMSE_{(z)} = \sqrt{\left(\frac{\sum(Z_{Data(i)} - Z_{Check(i)})^2}{n}\right)} \dots\dots\dots (1)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sum(Z_{Data(i)} - Z_{Check(i)})^2}{n}\right)}$$

$$LE_{(90)} = 1,6499 * RMSE_{(z)} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

Z : nilai tinggi

n : jumlah titik uji

Z_{Data} : tinggi orthometris pada DTM

Z_{Check} : tinggi orthometris lapangan

Adapun kelas ketelitian vertikal data dapat ditentukan berdasarkan aturan klasifikasi yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Ketelitian Data menurut Skala Peta

No.	Skala	Interval kontur (m)	Ketelitian Peta (m)		
			Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
1.	1:1.000.000	400	200	300	500
2.	1:500.000	200	100	150	250
3.	1:250.000	100	50	75	125
4.	1:100.000	40	20	30	50
5.	1:50.000	20	10	15	25
6.	1:25.000	10	5	7,5	12,5
7.	1:10.000	4	2	3	5
8.	1:5.000	2	1	1,5	2,5
9.	1:2.500	1	0,5	0,75	1,25
10.	1:1.000	0,4	0,2	0,3	0,5

Ketelitian	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
Vertikal	0,5 x interval kontur	1,5 x ketelitian kelas 1	2,5 x ketelitian kelas 1

Sumber: BSN, 2015

5. Pemetaan Arah Aliran Air Permukaan

Pemetaan arah aliran air permukaan dilakukan dengan analisis hidrologi menggunakan perangkat lunak ArcMap 10.8. Adapun proses analisis yang dilakukan meliputi *fill*, *flow direction*, *flow accumulation*, *stream order*, dan *stream to feature*.

Dari hasil olahan yang diperoleh, selanjutnya dilakukan proses analisis yang bertujuan untuk mengidentifikasi area yang termasuk dalam zona aliran air dengan orde tinggi, menganalisis pengaruh keberadaan hutan mangrove terhadap aliran air permukaan di sekitarnya serta menentukan lokasi yang ideal untuk penanaman mangrove di masa depan.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengolahan dan Klasifikasi Data LiDAR

Pada bagian sebelumnya, telah dipaparkan terkait tahap pengolahan dan klasifikasi data LiDAR yang meliputi pembuatan file project, pengaturan sistem koordinat, manajemen trajectory, pembuatan blocks data LiDAR dan klasifikasi data dengan metode semi-otomatis serta manual. Seluruh tahapan tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mengolah dan mengklasifikasikan data hasil perekaman LiDAR ke dalam kelas *ground* dan *non-ground*. Namun, karena jumlah *point cloud* LiDAR sangat besar dan tidak memungkinkan untuk dilakukan pengolahan maupun klasifikasi satu per satu, maka *point cloud* tersebut dibagi ke dalam beberapa *block* data LiDAR, yang tiap *blocknya* berukuran 1000 m x 1000 m.

Adapun jumlah *block* data LiDAR yang terbentuk adalah sebanyak lima *block*. Setiap

block memuat jumlah *point cloud* yang berbeda-beda, sebagaimana yang tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Jumlah *Point Cloud* dalam Tiap *Block*

Block Data LiDAR	Jumlah Point Cloud
1	7.106
2	16.562.452
3	121.253.421
4	14.710.118
5	52.311.972

Dari jumlah *point cloud* yang termuat dalam tiap *block*, dapat diketahui bahwa *block* data yang mencakup *point cloud* terbanyak adalah *block* data ke-3, sedangkan *block* data yang mencakup *point cloud* terendah adalah *block* data ke-1.

Selain informasi jumlah titik, dapat diketahui pula kerapatan titik pada tiap *blocknya*. Pada Tabel 3. ditunjukkan hasil dari perhitungan kerapatan titik pada tiap *block data LiDAR*.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Kerapatan Titik

Block Data LiDAR	Kerapatan titik (<i>point/m²</i>)
1	0.015
2	17.267
3	122.331
4	13.929
5	53.402

Dari hasil perhitungan pada Tabel 3. tersebut dapat diketahui bahwa *block* data ke-1 memiliki kerapatan titik paling rendah diantara keempat *block* lainnya, hal tersebut dikarenakan *point cloud* yang termuat di dalam *block* tersebut jumlahnya paling rendah jika dibandingkan *block-block* lain. Kemudian, untuk *block* yang memiliki kerapatan titik paling tinggi adalah *block* data ke-3, yang memuat jumlah *point cloud* paling tinggi jika dibanding keempat *block data* lainnya. Oleh karena itu, dari hasil yang diperoleh, dapat diketahui bahwa jumlah

point cloud yang termuat dalam suatu *block* berbanding lurus dengan kerapatan titik pada *block* tersebut.

Selanjutnya, *point cloud* data LiDAR yang dimuat pada tiap *block* akan diklasifikasikan ke dalam kelas *ground* dan *non-ground*. Metode yang digunakan dalam klasifikasi *point cloud* data LiDAR adalah semi-otomatis dan manual. Secara umum, metode semi-otomatis berguna untuk membantu proses klasifikasi data LiDAR, karena dapat menjalankan serangkaian instruksi atau perintah pengkelasan *point cloud* secara otomatis, kemudian dapat memfasilitasi pengecekan kesesuaian *point cloud* dengan jalur terbangnya dan mengoreksi ketidakakuratan *point cloud* LiDAR akibat adanya pergerakan *roll*, *pitch*, *heading* pada wahana UAV serta memperbaiki kesalahan tinggi akibat kondisi topografi area yang bervariasi. Pengaruh dari proses koreksi yang dilakukan pada data *point cloud* hasil perekaman LiDAR dapat dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Rerata Magnitude

	Sebelum matching dan koreksi	Setelah koreksi HRPm	Setelah Koreksi Z-Shift
Rerata Magnitude	0.008643	0.08382	0.08265

Berdasarkan informasi yang tertera pada Tabel 4. dapat diketahui bahwa sejak sebelum dilakukannya proses *matching* dan koreksi, *point cloud* data LiDAR dan jalur terbang telah menunjukkan kesesuaian yang baik. Hal ini terlihat dari rerata *magnitudenya* yang bernilai sangat kecil (mendekati 0). Kesesuaian antara *point cloud* data LiDAR dan jalur terbang semakin baik setelah dilakukan koreksi HRPm dan *z-shift*. Dengan adanya penurunan rerata *magnitude* sebesar 0,00261 setelah koreksi HRPm, dan penurunan sebesar 0,00117 setelah koreksi *z-shift*, telah membuktikan bahwa koreksi HRPm dan *z-shift* memberikan pengaruh positif dalam meningkatkan kesesuaian *point cloud* data LiDAR dengan jalur terbangnya.

Setelah dilakukan koreksi HRPm dan *z-shift*, maka dilanjutkan dengan reklasifikasi

point cloud data LiDAR. Berdasarkan hasil reklasifikasi tersebut, dapat diketahui bahwa *point cloud* data LiDAR telah diklasifikasi ke dalam dua kelas utama yakni *ground* dan *non-ground*. Namun sayangnya, dari tampilan hasil klasifikasi tersebut masih terdapat beberapa *noise* atau *outliers* yang berada di atas maupun bawah *ground surface*. Oleh karena itu, dilakukan klasifikasi manual untuk menghapus *noise* atau *outliers* yang terdapat pada *point cloud* hasil klasifikasi sebelumnya. Adapun jumlah *point cloud* yang dihapus pada tiap *block* data LiDAR dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Jumlah Point Cloud yang Dihapus Tiap Block Responden

Block Data LiDAR	Jumlah Point Cloud yang Dihapus
1	66
2	1,728
3	2,946
4	398
5	656

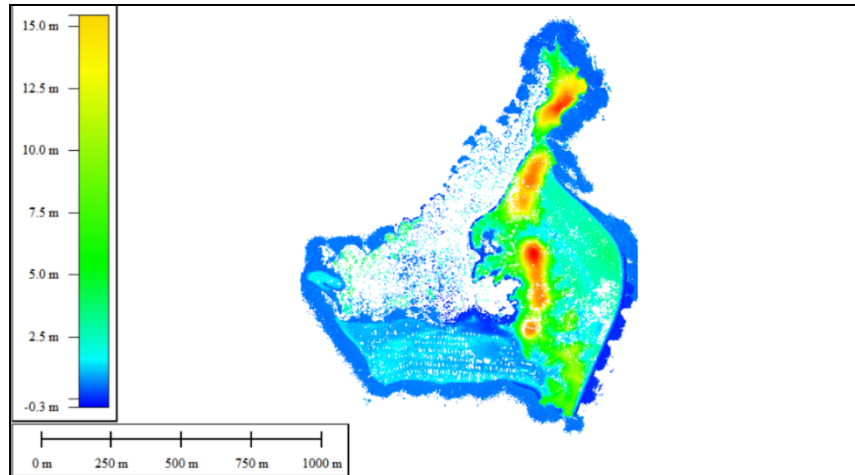
Dari nilai yang tertera pada Tabel 5. tersebut, dapat diketahui bahwa perbedaan jumlah *point cloud* yang dimuat pada tiap *block* dapat mempengaruhi banyak sedikitnya *noise* atau *outliers* yang terkandung di dalamnya. Selain itu, adanya faktor ketidakseragaman dalam pendefinisian garis batas pada *tool Classify Above Line* dan *Classify Below Line* yang digunakan untuk mempermudah proses pendeteksian *noise* atau *outliers* di atas maupun bawah *ground surface*, juga dapat mempengaruhi banyak sedikitnya jumlah *point cloud* yang terdeteksi. Dengan demikian, terdapat banyak faktor yang menyebabkan perbedaan jumlah *point cloud* yang dihapus pada setiap *block* tersebut.

Pembuatan Digital Terrain Model (DTM)

Point cloud LiDAR kelas *ground* yang berhasil diekstrak menjadi data berformat .las, digunakan sebagai data masukan dalam proses pembuatan DTM. Oleh karena itu, sebelum dilakukan pembuatan DTM, perlu dilakukan proses *import* .las data LiDAR pada perangkat lunak Global Mapper Pro.

Berikut pada Gambar 2. ditunjukkan tampilan dari *point cloud* kelas *ground* yang berhasil

diimportkan ke dalam *workspace* Global Mapper Pro.



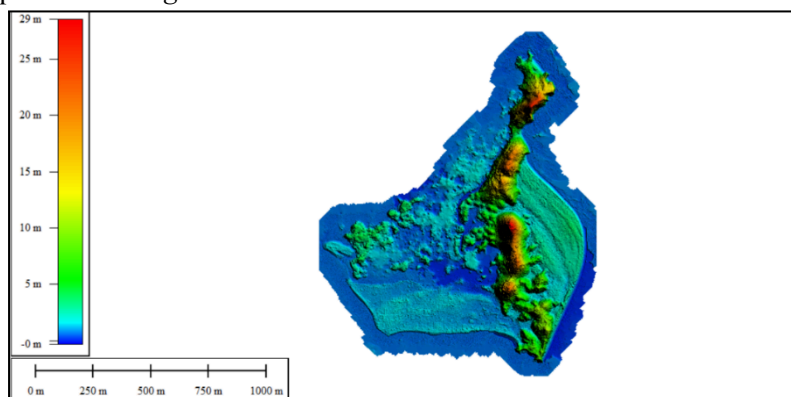
Gambar 2. Tampilan *Point Cloud* kelas *Ground*

Dilihat dari Gambar 2. tersebut, dapat diketahui bahwa *point cloud* menunjukkan elevasi yang beragam. Hal tersebut dapat dilihat dari warna yang ditampilkan pada setiap titiknya, mulai dari titik-titik berwarna biru tua yang mewakili permukaan tanah dengan elevasi terendah hingga titik-titik berwarna merah yang mewakili permukaan tanah dengan elevasi tertinggi.

Selanjutnya dilakukan pembuatan DTM (*generate DTM*) menggunakan *tool Create Elevation Grid*. Meskipun terdapat beberapa pilihan metode pembuatan DTM, namun dalam proses pembentukan *grid* elevasi kali

ini digunakan metode *Binning (Minimum Value – DTM)* dengan *grid spacing* yang diatur sebesar 1 meter. Alasan pemilihan metode tersebut tidak lain karena *Binning* mampu menghasilkan tampilan DTM yang lebih *smooth* dibanding metode lainnya seperti *triangulation*, namun tetap mampu merepresentasikan kondisi permukaan tanah yang dipetakan dengan baik.

Berikut pada Gambar 3. dan Tabel 6. disajikan tampilan dari DTM yang dihasilkan beserta metadata yang melengkapi DTM tersebut.



Gambar 3. DTM yang Dihasilkan Metode *Binning*

Tabel 6. Metadata DTM

Nama Atribut	Nilai Atribut
Sistem Koordinat	Projected (UTM Zona 51N, EPSG: 32651)
Datum	SRGI 2013
Sistem Referensi Tinggi	Geoid (INAGEOID 2020 versi 2.0)
Jumlah kolom baris	1200, 1490
Tinggi, lebar piksel	1 meter, 1 meter
Elevasi minimum	-0,33 m
Elevasi Maksimum	28,53 m
Format Data	TIFF

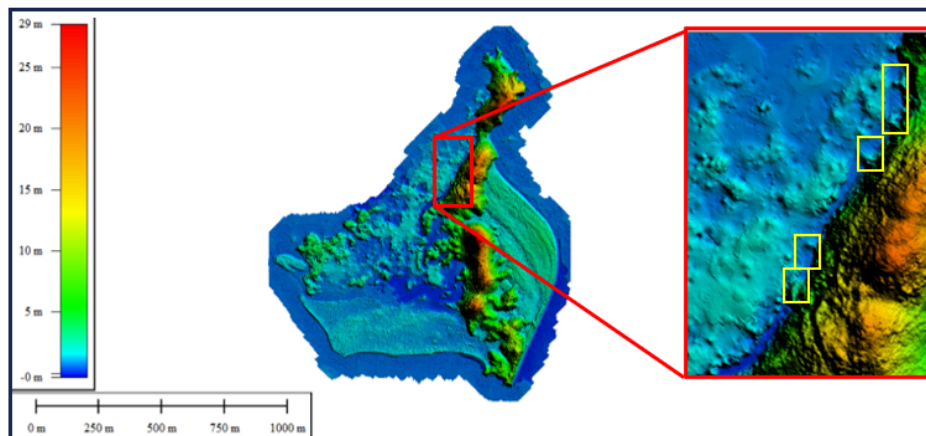
Dari tampilan DTM yang ditunjukkan pada Gambar 3. dapat terlihat adanya dominasi dari warna biru-hijau hampir di seluruh area yang dipetakan, sementara hanya ada beberapa titik area dengan warna kuning-merah. Hal tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar area yang dipetakan memiliki elevasi rendah, sedangkan hanya beberapa bagian yang memiliki elevasi sedang-tinggi. Jika dilihat dari informasi yang tertera pada Tabel 6. dapat diketahui

bahwa ketinggian minimum DTM yang terbentuk adalah -0,33 meter, sementara ketinggian maksimum DTM yang terbentuk adalah 28,53 meter.

Editing Hidro-topografi pada DTM

Untuk menghasilkan model ketinggian yang mampu merepresentasikan kondisi hidrologi di area yang dipetakan, maka dilakukan *editing* hidro-topografi pada DTM yang meliputi kegiatan *hydro-conditioned*, *hydro-enforced* dan *hydro-flattened*. Fokus utama dalam *editing* hidro-topografi DTM ini adalah menghilangkan obstruksi pada badan air yang disinyalir mengganggu pergerakan aliran air, melakukan penyesuaian elevasi badan air untuk memastikan bahwa air benar-benar mengalir dari tempat yang tinggi ke tempat yang rendah, serta menghaluskan permukaan badan air agar tampilannya sesuai dengan karakteristik sebenarnya di lapangan.

Berikut pada Gambar 4. ditunjukkan tampilan salah satu segmen badan air sebelum dilakukan *editing* hidro-topografi pada DTM.

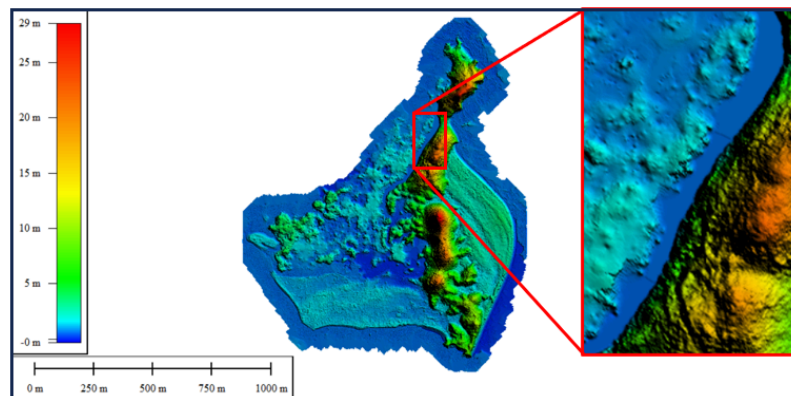


Gambar 4. Tampilan Segmen Badan Air Sebelum *Editing* Hidro-topografi

Dari gambar yang disajikan, dapat terlihat bahwa kenampakan segmen badan air sebelum dilakukan *editing* hidro-topografi masih cukup kasar dan tidak mampu menggambarkan kondisi badan air yang sebenarnya. Jika diperhatikan secara mendetail, terdapat beberapa obstruksi berupa puncak elevasi yang terletak pada

badan air. Hal ini dianggap sebagai anomali yang dapat mengganggu pergerakan aliran air di area tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan *editing* hidro-topografi untuk memperbaiki tampilan badan air pada DTM.

Pada Gambar 5. ditunjukkan tampilan salah satu segmen badan air setelah dilakukan *editing* hidro-topografi pada DTM.



Gambar 5. Tampilan Segmen Badan Air Setelah *Editing* Hidro-topografi

Berdasarkan beberapa gambar yang disajikan, dapat disimpulkan bahwa proses *editing* hidro-topografi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap visualisasi badan air pada DTM. Jika dibandingkan dengan tampilan badan air pada Gambar 4. yang terlihat cukup kasar dan mengandung beberapa obstruksi di beberapa bagian badan air, maka tampilan badan air setelah proses *editing* yang disajikan pada Gambar 5. dianggap mengalami peningkatan yang signifikan karena terlihat lebih halus. Selain itu, elevasi pada DTM setelah *editing* juga terlihat lebih logis dan representatif, menggambarkan kondisi badan air yang sebenarnya dengan lebih baik.

Uji Ketelitian Vertikal

Pengujian ketelitian vertikal data dilakukan dengan menghitung perbedaan nilai koordinat vertikal (tinggi orthometris) antara titik uji pada DTM LiDAR dengan titik uji lapangan yang dianggap benar dan memiliki ketelitian yang lebih tinggi dibanding LiDAR. Pengujian ini dilakukan pada sejumlah titik pada DTM LiDAR yang posisinya bersesuaian dengan koordinat titik uji lapangan. Namun, apabila saat dilakukan pengecekan koordinat posisi, tidak ada satu pun titik pada DTM LiDAR yang berada tepat pada koordinat posisi titik uji lapangan, maka pengujian dilakukan terhadap titik yang berada paling dekat dengan koordinat posisi dari titik uji lapangan. Berikut pada Tabel 7. ditunjukkan hasil perhitungan uji ketelitian vertikal yang dilakukan pada 18 titik pada DTM LiDAR.

Tabel 7. Hasil Uji Ketelitian Vertikal

No	Nama Titik	Z_{ICP} (m)	Z_{DTM} (m)	(DZ) (m)	$(DZ)^2$ (m)
1.	ICP-01_K NB	1,033	1,033	0,006	0,000
2.	ICP-02_K NB	1,289	1,296	-0,007	0,000
3.	ICP-03_K NB	7,156	1,715	0,002	0,000
4.	ICP-04_K NB	1,713	7,150	-0,002	0,000
5.	ICP-05_K NB	1,194	1,191	0,003	0,000
6.	ICP-06_K NB	1,500	1,501	-0,001	0,000
7.	ICP-07_K NB	1,278	1,279	-0,001	0,000
8.	ICP-08_K NB	3,499	3,507	-0,008	0,000
9.	ICP-09_K NB	1,991	1,994	-0,003	0,000
10.	ICP-10_K NB	15,519	15,511	0,008	0,000
11.	ICP-11_K NB	3,392	3,389	0,006	0,000
12.	ICP-12_K NB	18,318	18,311	0,008	0,000
13.	ICP-13_K NB	0,941	0,940	0,001	0,000
14.	ICP-14_K NB	19,696	19,698	-0,002	0,000
15.	ICP-15_K NB	7,886	7,894	-0,008	0,000

No	Nama Titik	Z _{ICP} (m)	Z _{DTM} (m)	(D Z) (m)	(D Z) ² (m)
16.	ICP-0 16_K NB	1,319	1,322	-0,003	0,000
17.	ICP-0 17_K NB	1,763 2	17,63 1	0,001	0,000
18.	ICP-0 18_K NB	3,403	3,395	0,008	0,000
Jumlah					0,001
Rata-rata					0,000
RMSE _(z)					0,005
Akurasi LE90					0,009

Dari hasil pengujian tersebut, dapat diketahui bahwa nilai *RMS Error* yang diperoleh adalah sebesar 0,005 m dan nilai ketelitian vertikal data yang diperoleh pada tingkat kepercayaan 90% (*LE90*) adalah sebesar 0,009 m. Nilai ketelitian vertikal data yang diperoleh (*LE90*) selanjutnya akan menjadi acuan dalam penentuan kelas ketelitian peta menurut SNI 8202:2015. Apabila nilai ketelitian vertikal data yang diperoleh dari pengujian dapat masuk ke dalam syarat minimal ketelitian suatu peta, maka data tersebut dianggap masuk ke dalam kelas ketelitian peta tersebut, dan begitupun sebaliknya. Adapun hasil dari penentuan kelas ketelitian peta yang dilakukan sebelumnya, dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Penentuan Kelas Ketelitian Peta

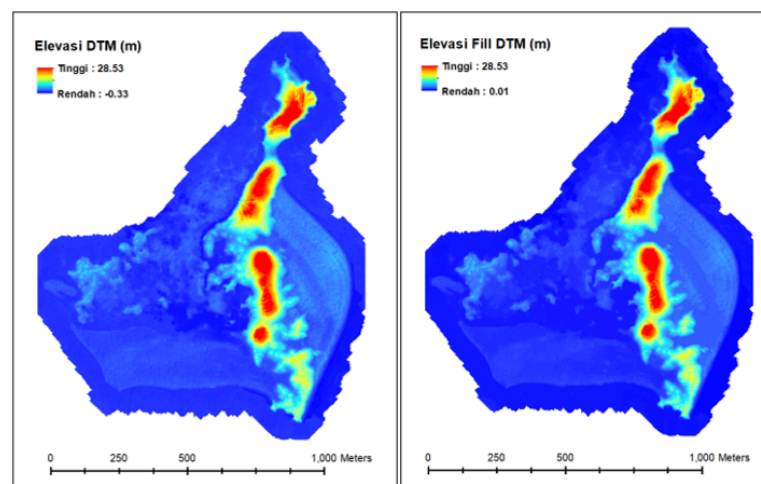
Ketelitian	Nilai LE90 (m)	Ketelitian peta Skala 1:5000		
		Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
Vertikal	0.009	1	1,5	2,5

Berdasarkan Tabel 8. dapat diketahui bahwa nilai ketelitian vertikal data yang diuji (*LE90*) masuk ke dalam kelas 1 ketelitian peta skala 1:5000. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa data LiDAR hasil akuisisi memiliki tingkat ketelitian vertikal yang tinggi dan telah memenuhi kriteria sebagai data masukan (*input*) dalam pembuatan peta dasar skala besar.

Pemetaan Arah Aliran Air Permukaan

Dari beberapa tahapan yang telah dilakukan sebelumnya, diperoleh hasil berupa *Digital Terrain Model* (DTM) yang telah teruji ketelitian vertikal datanya. DTM tersebut kemudian dapat digunakan sebagai data masukan (*input data*) dalam proses pemetaan arah aliran air permukaan yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcMap.

Pentingnya peran DTM dalam pemetaan arah aliran air permukaan ini melatarbelakangi adanya proses koreksi yang dilakukan terhadap DTM sebelum identifikasi arah aliran air dimulai. Untuk melakukan proses tersebut, digunakan *tool fill* untuk mengisi cekungan yang masih ada pada DTM. Dengan adanya proses *fill*, dapat diperoleh DTM baru yang terbebas dari cekungan, yang disinyalir dapat mengganggu pergerakan aliran air, sehingga aliran air tidak bisa bergerak secara kontinu. Berikut pada Gambar 6. ditunjukkan tampilan DTM sebelum dan sesudah dilakukan proses *fill*.

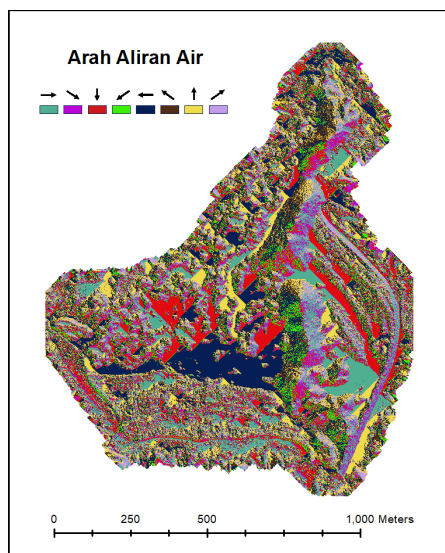


Gambar 6. Tampilan DTM Sebelum (kiri) dan Setelah (kanan) Dilakukan *Fill*

Dari nilai elevasi yang muncul pada Gambar 6. terlihat adanya peningkatan *low value* DTM (nilai terendah pada DTM) setelah proses *fill* dilakukan. Hal tersebut menunjukkan bahwa *tool fill* berhasil mengidentifikasi cekungan yang terdapat pada DTM, kemudian mengisi cekungan tersebut dengan nilai elevasi tertentu, sehingga dapat terbentuk DTM baru yang bebas dari cekungan.

Dengan memanfaatkan DTM yang dihasilkan dari pemrosesan sebelumnya, maka dapat dilakukan proses penentuan arah aliran air untuk setiap piksel yang berada pada raster DTM tersebut. Untuk menentukan arah aliran, digunakan *tool flow direction* yang tersedia dalam perangkat lunak ArcMap. Algoritma yang digunakan dalam proses ini adalah algoritma D8 (*Deterministic 8*), yang menggunakan skema delapan arah mata angin untuk menentukan arah aliran. Algoritma D8 menentukan arah aliran air permukaan berdasarkan prinsip turunan ketinggian tercuram di sekitar piksel yang sedang diproses. Adapun visualisasi arah aliran air permukaan beserta rincian hasil yang diperoleh dari pemrosesan dapat dilihat pada Gambar 7. dan Tabel 9.

Warna	Arah Mata Angin	Jumlah Piksel
Hijau Laut (Teal)	Timur	171.227
Ungu (Purple)	Tenggara	77.278
Merah (Red)	Selatan	271.599
Hijau (Green)	Barat Daya	82.525
Biru Tua (Dark Blue)	Barat	221.012
Cokelat (Brown)	Barat laut	83.174
Emas (Gold)	Utara	164.541
Ungu Muda (lavender)	Timur Laut	79.556



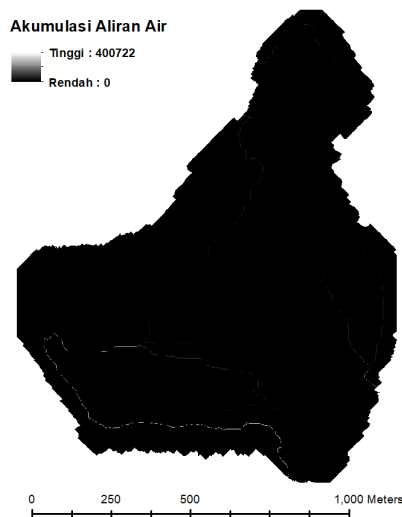
Gambar 7. Arah Aliran Air Permukaan pada Area Studi

Tabel 9. Rincian Hasil Penentuan Arah Aliran Air

Berdasarkan visualisasi arah aliran air yang ditampilkan pada Gambar 7. beserta informasi yang tertera pada Tabel 9. maka dapat diperoleh gambaran yang cukup jelas mengenai arah aliran air yang terdapat pada area studi. Dari delapan warna yang mewakili delapan arah mata angin yang berbeda, warna biru tua (*dark blue*) memuat jumlah piksel yang paling banyak dibanding warna lainnya. Hal tersebut menandakan bahwa pergerakan arah aliran air permukaan pada area studi paling banyak menuju ke arah barat. Selanjutnya, warna yang memuat jumlah piksel terbanyak setelah warna biru tua (*dark blue*) adalah warna merah (*red*), yang mewakili pergerakan aliran air permukaan ke arah selatan. Dari hasil analisis yang dilakukan, keduanya dinilai sangat logis karena kawasan yang berada di arah barat dan selatan area studi memiliki elevasi yang tergolong rendah.

Meskipun, arah aliran air permukaan pada area studi sudah berhasil ditentukan. Namun, proses pengolahan data tidak hanya berhenti sampai disitu saja. Untuk memberikan informasi yang lebih lengkap dan informatif kepada para pembaca, perlu dilakukan beberapa tahap lanjutan, salah satunya adalah perhitungan akumulasi aliran air menggunakan *tool flow accumulation*. Tahap ini penting untuk menggambarkan akumulasi aliran air permukaan dan

memberikan pemahaman yang lebih mendalam terkait distribusi aliran air pada area studi. Berikut pada Gambar 8. ditampilkan hasil *flow accumulation* raster yang diperoleh dari pemrosesan.



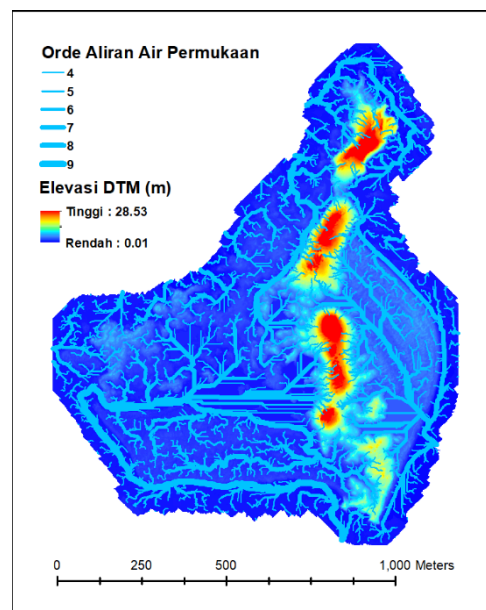
Gambar 8. Akumulasi Aliran Air Permukaan pada Area Studi

Dari informasi yang tertera pada Gambar 8. dapat diketahui bahwa akumulasi aliran air pada area yang dipetakan berada pada rentang nilai 0 hingga 400.722. Tinggi rendahnya akumulasi aliran air di area tersebut, dapat dilihat dari simbol warna yang digunakan. Warna hitam pekat digunakan untuk merepresentasikan area dengan akumulasi aliran yang paling rendah, sedangkan warna putih digunakan untuk merepresentasikan area dengan akumulasi aliran yang paling tinggi. Oleh karena itu, semakin terang warna simbolnya, semakin tinggi aliran air yang terakumulasi di area tersebut, dan begitu pun sebaliknya, semakin gelap warna simbolnya, semakin rendah akumulasi aliran air di area tersebut.

Meskipun proses *flow accumulation* telah berhasil memperhitungkan akumulasi aliran air di area tersebut, namun, data luaran yang dihasilkan dianggap belum cukup informatif bagi pengguna. Oleh karena itu, untuk menghasilkan peta aliran air yang lebih informatif, diperlukan proses penetapan orde aliran menggunakan *tool stream order* yang

bertujuan untuk memudahkan identifikasi dan pemahaman terhadap karakteristik aliran air di area tersebut. Selanjutnya, hasil *stream order* perlu dikonversi ke dalam format vektor menggunakan *tool stream to feature* untuk mempermudah interpretasi visual. Hal ini dikarenakan, data yang tersaji dalam format raster memiliki keterbatasan dalam hal visualisasi data yang bervariasi. Padahal, untuk merepresentasikan orde aliran yang berbeda, diperlukan penggunaan variasi simbol yang memudahkan interpretasi. Oleh sebab itu, penting dilakukan proses *stream to feature* yang berguna untuk memudahkan pembaca dalam memahami informasi yang terkandung di dalam peta.

Pada Gambar 9. ditunjukkan orde aliran air permukaan yang dihasilkan beserta topografi area yang dipetakan.



Gambar 9. Orde Aliran Air Permukaan beserta Topografi Area yang Dipetakan

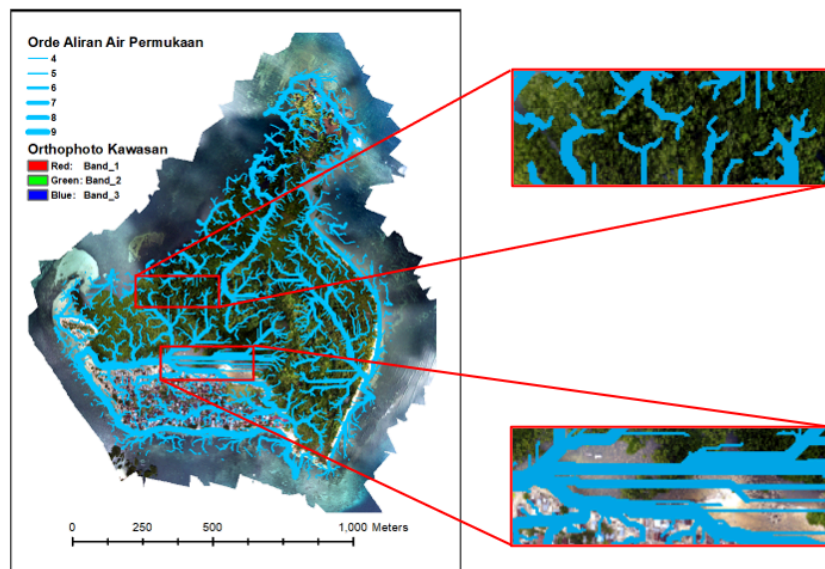
Dari ketebalan garis yang terlihat pada Gambar 9. dapat diketahui bahwa aliran air dengan orde tinggi (8-9) cenderung mendominasi bagian barat dan selatan area yang memiliki elevasi rendah. Jika dikorelasikan dengan arah aliran air permukaan yang telah dihasilkan sebelumnya, maka terdapat kesesuaian diantara kedua hal tersebut. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tinggi

rendahnya orde aliran di suatu kawasan, menunjukkan banyak sedikitnya aliran air permukaan yang bergerak menuju ke arah tersebut.

Analisis Data Hasil Olahan

Berdasarkan hasil olahan yang diperoleh, dapat diketahui bahwa aliran air permukaan di Desa Kinabuhutan bergerak sesuai kaidah hidrologi yang berlaku. Dari orde aliran air yang ditunjukkan pada Gambar 9, terlihat bahwa orde aliran dengan tingkatan rendah (orde 4-5) cenderung mendominasi area yang memiliki elevasi tinggi sedangkan orde aliran dengan tingkatan tinggi (orde 8-9) cenderung mendominasi kawasan sungai, rawa serta beberapa badan air lainnya, yang secara karakteristik topografi memiliki elevasi rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa elevasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tinggi rendahnya orde aliran di area yang dipetakan.

Namun, apabila dianalisis lebih lanjut, tinggi rendahnya orde aliran di kawasan tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh elevasi, akan tetapi juga dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi. Hal ini terbukti dari orde aliran air permukaan yang berhasil diidentifikasi pada kawasan hutan mangrove di wilayah pesisir Desa Kinabuhutan. Meskipun elevasi di kawasan tersebut tergolong rendah, namun orde aliran airnya tidak termasuk dalam kategori tinggi, karena mangrove memiliki kemampuan yang signifikan dalam mengendalikan pergerakan air. Akar-akar mangrove yang kompleks membentuk jaringan yang kuat di sekitar pesisir dan daerah rawa. Jaringan akar ini mampu memperlambat pergerakan aliran air dan mampu mengurangi potensi terjadinya erosi di area pesisir (Wenehen, 2021). Perbedaan orde aliran air di kawasan hutan mangrove akan terlihat semakin jelas jika dibandingkan dengan orde aliran air di kawasan yang tidak ditanami oleh vegetasi apapun, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbedaan Orde Aliran Air Permukaan di Kawasan Mangrove (Atas) dengan Kawasan Non-Vegetasi (Bawah)

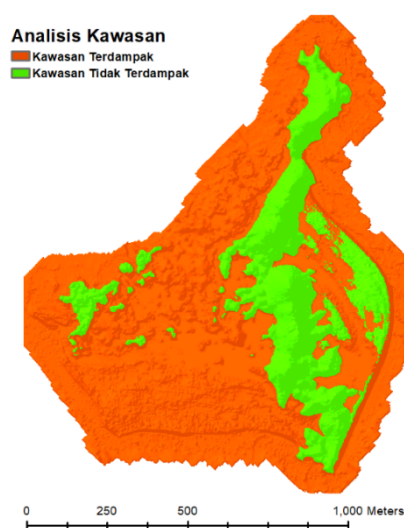
Dari perbedaan orde aliran air permukaan yang ditunjukkan pada Gambar 10, terlihat jelas bahwa mangrove memiliki kemampuan yang signifikan dalam mengendalikan pergerakan air permukaan. Hal ini dapat diamati dari pola aliran yang terbentuk di kawasan tersebut, yang

menunjukkan pola aliran yang menyebar (dendritik) dengan orde aliran yang rendah. Berbeda halnya dengan kawasan non-vegetasi yang tidak memiliki kemampuan dalam pengendalian pergerakan aliran air. Pola aliran yang terbentuk di kawasan non-vegetasi menunjukkan pola

aliran yang sejajar (parallel) dengan orde aliran yang tinggi.

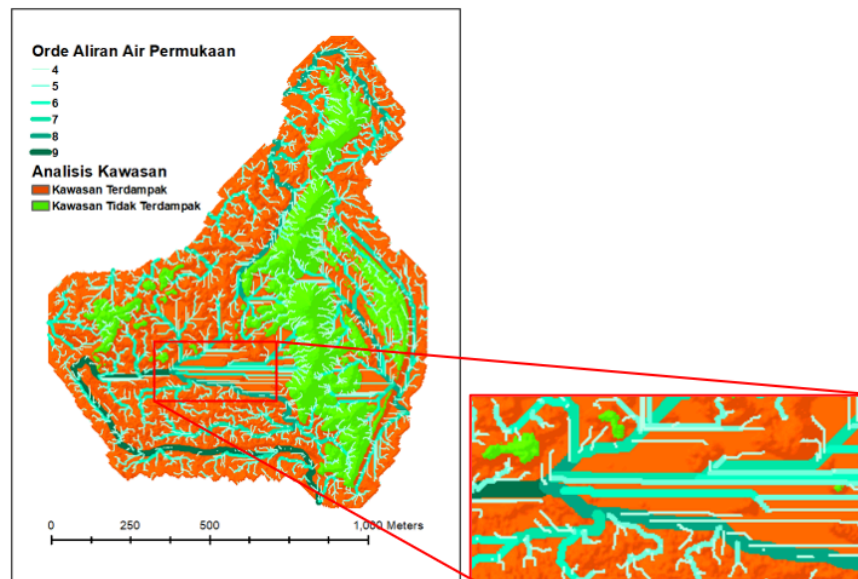
Jika dikaitkan dengan risiko genangan akibat pasang surut, secara logis, kawasan non-vegetasi yang tidak memiliki sistem perakaran yang kuat akan menghadapi risiko yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawasan mangrove. Namun, untuk memberikan gambaran yang lebih detail mengenai risiko terjadinya genangan akibat pasang surut di area tersebut, dilakukan analisis yang mengacu pada nilai pasang surut yang diprediksi oleh Badan Informasi Geospasial (BIG). Dari informasi yang diperoleh melalui laman <https://srgi.big.go.id/>, dapat diketahui bahwa prediksi nilai air pasang astronomik tertingginya (Highest Astronomical Tides) adalah 2,656883 meter. Dari nilai prediksi tersebut, kemudian dilakukan analisis kawasan terdampak air pasang astronomik tertinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

tergenang akibat pasang surut yang lebih tinggi. Untuk mengurangi risiko ini, perlu dilakukan langkah-langkah pengelolaan yang efektif dan dapat diimplementasikan dalam melindungi wilayah pesisir dari dampak genangan pasang surut yang merugikan. Salah satu langkah yang direkomendasikan adalah penanaman mangrove di kawasan yang ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 11. Kawasan Terdampak Air Pasang Astronomik Tertinggi

Dari hasil analisis yang diperoleh, dapat diketahui bahwa kawasan yang terdampak air pasang astronomik tertinggi (*Highest Astronomical Tides*) adalah kawasan dengan ketinggian kurang dari 2,656883 meter. Diantara kawasan yang terdampak, kawasan non-vegetasi dan permukiman pesisir yang berada di Desa Kinabuhutan memiliki risiko



Gambar 12. Rekomendasi Kawasan Ditanami Mangrove

Rekomendasi penanaman mangrove pada kawasan tersebut, didasarkan pada kondisi topografi dan karakteristik aliran air yang mendukung pertumbuhan mangrove. Keberadaan mangrove di lokasi tersebut akan memberikan manfaat ekologis yang signifikan, terutama dalam melindungi permukiman pesisir dari bahaya banjir, kerusakan akibat gelombang air, dan erosi pesisir. Selain itu, mangrove juga berperan sebagai penahan aliran air yang kuat, sehingga penanaman mangrove di kawasan tersebut, diharapkan dapat mengurangi risiko kerusakan dan melindungi daerah pesisir dari dampak negatif pergerakan pasang surut air laut yang kuat. Dengan demikian, penanaman mangrove di lokasi tersebut akan menjadi langkah strategis dalam menjaga ekosistem pesisir dan melindungi masyarakat pesisir dari berbagai ancaman bencana.

KESIMPULAN

Berdasarkan kegiatan yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu dengan menggunakan metode klasifikasi semi-otomatis dan klasifikasi manual, data *point cloud* LiDAR berhasil diklasifikasikan ke dalam dua kelas utama, yaitu *ground* dan *non-ground*. Selanjutnya, penggunaan metode *Binning* (*Minimum Value - DTM*) dalam pembuatan

DTM dari *ground point* LiDAR, yang juga melibatkan proses *editing* hidro-topografi pada DTM tersebut, menghasilkan model *terrain digital* yang detail dan representatif. Selain itu, data DTM LiDAR yang dihasilkan menunjukkan nilai ketelitian vertikal yang memenuhi kelas 1 ketelitian peta dasar untuk skala 1:5000, dengan tingkat kepercayaan sebesar 90%. Terakhir, peta arah aliran air permukaan yang dihasilkan melalui analisis hidrologi menggunakan teknologi GIS memberikan informasi yang lengkap mengenai pola aliran air permukaan di area studi, termasuk arah dan orde aliran airnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, M., Ridwan, & Zulkarnaen, I. (2018). *Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2015). SNI 8202:2015. Diakses dari www.bsn.go.id.
- Ilman, M., Dargusch, P., Dart, P., & Onrizal. (2016). A historical analysis of the drivers of loss and degradation of Indonesia's mangroves. *Land Use Policy*, 54, 448–459. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.03.010>

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia (KLHK RI). (2021). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia tentang Tata Hutan dan Penyusunan Rencana Pengelolaan Hutan serta Pemanfaatan Hutan di Hutan Lindung dan Hutan Produksi.
- KLHK RI. (2022). Tutupan Mangrove Sebagian Besar Hilang Akibat Alih Fungsi Lahan.
- Knight, J. M., Dale, P. E. R., Spencer, J., & Griffin, L. (2009). Exploring LiDAR data for mapping the micro-topography and tidal hydro-dynamics of mangrove systems: An example from southeast Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(4), 593–600. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.10.002>
- Kominfo RI. (2022). Pesan Mangrove Indonesia di G20: Atasi Krisis Iklim.
- Noor, Y. R., Khazali, M., & Suryadiputra, I. N. N. (2006). Panduan pengenalan mangrove di Indonesia. Ditjen PHKA.
- Rahadian, A., Prasetyo, B., Setiawan, Y., & Wikantika, K. (2019). Tinjauan historis data dan informasi luas mangrove Indonesia. *Media Konservasi*, 24(2), 163–178.
- Salam, B. F., Fathoni, F., Witomo, C. M., Rubiantoro, P., Hidayat, F. R., Prabandari, K. A., Anggreni, E. S., Karira, T. S., & Muqtafiah. (2018). Pembangunan dan Dampak Lingkungan di Wilayah Pesisir.
- Schmid, K., Carter, J., Waters, K., Betzhold, L., Hadley, B., Mataosky, R., & Halleran, J. (2012). Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications. Diakses dari www.csc.noaa.gov.
- Uuemaa, E., Hughes, A. O., & Tanner, C. C. (2018). Identifying feasible locations for wetland creation or restoration in catchments by suitability modelling using light detection and ranging (LiDAR) Digital Elevation Model (DEM). *Water (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/w10040464>
- Wenehen, W. (2021). Mangrove: Ekosistem Penting bagi Kawasan Pesisir.
- Worthington, T. A., Andradi-Brown, D. A., Bhargava, R., Buelow, C., Bunting, P., Duncan, C., Fatoyinbo, L., Friess, D. A., Goldberg, L., Hilarides, L., Lagomasino, D., Landis, E., Longley-Wood, K., Lovelock, C. E., Murray, N. J., Narayan, S., Rosenqvist, A., Sievers, M., Simard, M., ... Spalding, M. (2020). Harnessing big data to support the conservation and rehabilitation of mangrove forests globally. *One Earth*, 2(5), 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.04.018>