

Analisis Dampak Kekasaran Tutupan Lahan Berdasarkan Citra Satelit terhadap Simulasi Tsunami di Pesisir Pandeglang

¹Teuku Muhammad Rasyif, ²Alvianto Raihanputra

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie

Jl. HR Rasuna Said, Kuningan, Jakarta, 12940, Indonesia

Alamat e-mail: teuku.rasyif@bakrie.ac.id

Info Artikel

Abstrak

Kata Kunci :

Tsunami;
Tutupan lahan;
Citra satelit;

Indonesia merupakan salah satu negara yang sangat rawan tsunami. Wilayah pesisir Pandeglang berada pada risiko tinggi karena lokasinya yang dekat dengan zona megathrust Sunda. Pemodelan genangan tsunami yang akurat sangat penting untuk mitigasi bencana. Namun, data tutupan lahan dengan resolusi tinggi sering kali terbatas, sehingga menimbulkan tantangan dalam prediksi yang andal. Penelitian ini menganalisis pengaruh kekasaran permukaan lahan yang diperoleh dari multi-sumber citra satelit terhadap hasil simulasi tsunami. Citra Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI, dan Sentinel-2 digunakan dan diklasifikasikan menggunakan Object-Based Image Analysis (OBIA) yang dikombinasikan dengan algoritma Random Forest untuk menghasilkan peta tutupan lahan dan menetapkan koefisien kekasaran untuk tiap kelas tutupan lahan. Nilai-nilai ini kemudian diterapkan sebagai data kekasaran dalam model COMCOT untuk mensimulasikan penyebaran tsunami di pesisir Pandeglang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa citra Landsat 8 menghasilkan jarak genangan terjauh sebesar 1,868 km, diikuti oleh Landsat 5 sebesar 1,660 km, dan Sentinel-2 sebesar 1,547 km. Perbedaan ini disebabkan oleh resolusi dan tingkat detail klasifikasi tutupan lahan, yang memengaruhi representasi kekasaran permukaan dalam model. Temuan ini menunjukkan bahwa sumber citra satelit dan kualitas informasi kekasaran permukaan secara signifikan memengaruhi pemodelan genangan tsunami. Hal ini menekankan pentingnya pemilihan dataset satelit yang tepat dan estimasi kekasaran permukaan lahan yang akurat dalam melakukan simulasi tsunami untuk perencanaan pesisir dan pengurangan risiko bencana.

Abstract

Keywords:

Tsunami;
Land cover roughness;
Satellite imagery

Indonesia is one of the most tsunami-prone countries in the world. The Pandeglang coastal area is particularly at risk due to its proximity to the Sunda megathrust zone. Accurate tsunami inundation modeling is critical for disaster mitigation. However, high-resolution of land cover roughness data are often limited, posing challenges for reliable predictions. This study investigates the influence of land cover roughness derived from multi-source satellite imagery on tsunami simulation outcomes. Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI, and Sentinel-2 images were employed and classified using Object-Based Image Analysis (OBIA) combined with the Random Forest algorithm to produce detailed land cover maps and assign Manning's roughness coefficients for each class. These coefficients were then applied as Manning's data in the COMCOT model to simulate tsunami propagation along the Pandeglang coastline. Simulation results indicate that Landsat 8 imagery produces the farthest inundation distance of 1.868 km, followed by Landsat 5 at 1.660 km, and Sentinel-2 at 1.547 km. The observed variations are attributed to differences in spatial resolution and the level of detail in land cover classification, which affect the representation of surface roughness in the model. The findings demonstrate that both the source of satellite imagery and the quality of roughness information have a significant impact on tsunami inundation modeling. This underscores the importance of carefully selecting satellite datasets and accurately estimating land

PENDAHULUAN

Indonesia yang terletak di pertemuan tiga lempeng utama—Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik memiliki kerentanan tinggi terhadap bencana tsunami. Tsunami merupakan salah satu fenomena alam paling merusak di wilayah pesisir karena dapat menyebabkan perpindahan massa air laut secara besar akibat aktivitas seismik, erupsi gunung berapi, atau longsor bawah laut. Dalam konteks ini, pemetaan paparan bahaya menjadi elemen penting untuk mendukung kesiapsiagaan dan penilaian risiko terhadap aset serta populasi di wilayah pesisir. Analisis tersebut membutuhkan data spasial yang akurat mengenai area genangan, kawasan terbangun, dan distribusi penduduk guna memperkirakan tingkat kerentanan wilayah terdampak.

Perkiraan luas wilayah genangan umumnya diperoleh melalui pemodelan numerik tsunami berbasis topografi (Fukui et al., 2022). Teknologi Light Detection and Ranging (LiDAR) memungkinkan penyajian data topografi beresolusi tinggi untuk mendukung peta genangan yang presisi (McClean et al., 2020). Namun, keterbatasan ketersediaan data LiDAR di banyak wilayah Indonesia sering kali mengharuskan pemetaan bahaya tsunami bergantung pada data elevasi dengan resolusi lebih rendah. Dalam kondisi tersebut, model kekasaran permukaan lahan (Land Cover Roughness/LCR) berperan penting karena menjadi faktor utama yang memengaruhi perilaku aliran tsunami di daratan. LCR menggambarkan hambatan permukaan terhadap aliran air, yang ditentukan oleh jenis dan kepadatan tutupan lahan di suatu wilayah.

Citra satelit menjadi sumber utama dalam penyusunan model LCR melalui proses identifikasi dan klasifikasi tutupan lahan (Behrens et al., 2021). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa model LCR beresolusi tinggi dapat meningkatkan ketelitian estimasi genangan hingga 30–50% (Kaiser et al., 2011). Penutup lahan yang lebih kasar, seperti vegetasi lebat atau area padat bangunan, memberikan hambatan lebih besar terhadap aliran tsunami, sehingga mengurangi kecepatan serta jarak penyebaran gelombang. Meski demikian, kajian mengenai pengaruh resolusi spasial citra satelit terhadap hasil simulasi genangan masih jarang dilakukan secara mendalam. Selain itu, kondisi atmosfer seperti tutupan awan sering kali membatasi keandalan model LCR multiresolusi (Bayas et al., 2015).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penggunaan citra multi-sumber menjadi solusi penting. Analisis spektrum pantulan pada citra satelit memungkinkan pembedaan berbagai jenis penutup lahan seperti permukiman, vegetasi, lahan terbuka, dan perairan. Setiap material di permukaan bumi memiliki karakteristik pantulan elektromagnetik yang berbeda, sehingga memungkinkan identifikasi tutupan lahan secara akurat. Penelitian terdahulu, seperti Amra et al. (2025), telah memanfaatkan Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI, dan Sentinel-2 untuk analisis multitemporal dan multiresolusi, yang terbukti efektif dalam pemetaan kekasaran permukaan dan validasi batas genangan tsunami di wilayah Aceh.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menilai pengaruh resolusi citra satelit terhadap hasil simulasi model kekasaran penutup lahan dalam genangan tsunami dengan menggunakan perangkat lunak COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model). Wilayah studi difokuskan di Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten, yang dikenal sebagai salah satu kawasan paling rawan tsunami di Indonesia. Analisis dilakukan dengan memanfaatkan citra multi-sumber (Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI, dan Sentinel-2) untuk

membangun model LCR. Tahapan penelitian meliputi klasifikasi berbasis objek, perhitungan nilai kekasaran untuk setiap kelas penutup lahan, serta validasi hasil antar sumber data. Nilai kekasaran yang dihasilkan digunakan sebagai input dalam simulasi tsunami menggunakan COMCOT. Selanjutnya, hasil simulasi dibandingkan untuk mengevaluasi perbedaan jarak genangan tsunami yang dihasilkan oleh variasi resolusi citra, sehingga dapat diketahui sejauh mana kualitas dan ketelitian data satelit memengaruhi hasil pemodelan genangan tsunami di wilayah pesisir Pandeglang.

TINJAUAN PUSTAKA

Pemodelan Hidrodinamika

Program Cornell Multigrid Coupled Tsunami (COMCOT) digunakan pada penelitian ini untuk mensimulasikan gelombang tsunami. Program ini dikembangkan oleh ilmuwan di Cornell University yang dipimpin oleh Profesor Philip Liu dan Profesor Y. Tony Song. COMCOT merupakan pemodelan numerik dengan metode skema leapfrog finite difference (waktu) dan skema upwind (spasial) untuk menyelesaikan persamaan air dangkal. Dari kedua skema tersebut akan dihasilkan hasil numerik yang lebih akurat sehingga penyebaran tsunami dari laut hingga daratan dapat menggunakan pemodelan 2 dimensi horizontal. COMCOT mampu menyelesaikan persamaan air dangkal baik dalam bentuk linear yang biasanya digunakan untuk laut dalam dan non-linear untuk wilayah perairan dangkal dan interaksi dengan pesisir. Pendekatan ini memungkinkan simulasi yang realistis terhadap perubahan elevasi air dan kecepatan aliran gelombang tsunami ketika mendekati daratan. Persamaan Shallow Water Equation (SWE) yang digunakan dalam COMCOT dapat dinyatakan sebagai berikut (Wang, 2009):

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y = 0 \quad (3)$$

Dimana η menunjukkan elevasi permukaan air (m). t menyatakan waktu (s). d merupakan kedalaman air (m). Fluks debit pada arah x dan y dinyatakan dengan P dan Q (m^2/s). Koefisien gaya Coriolis akibat rotasi Bumi dilambangkan dengan f . H menunjukkan total kedalaman air (m). F_x dan F_y merujuk pada gaya yang dihasilkan oleh gesekan dasar masing-masing pada arah x dan y . g adalah gaya gravitasi bumi.

Data Paparan Berbasis Satelit

Data paparan berbasis satelit merupakan informasi penginderaan jauh yang fundamental dalam analisis risiko bencana, khususnya untuk identifikasi dan klasifikasi tutupan lahan. Peran strategisnya terletak pada kemampuannya memetakan karakteristik permukaan bumi secara spasial dengan resolusi tinggi, sehingga mendukung estimasi paparan dan kerentanan wilayah terdampak tsunami. Pemanfaatan citra satelit memungkinkan penentuan koefisien kekasaran Manning dalam model hidrodinamika tsunami. Sehingga, akurasi data tutupan lahan sangat berpengaruh terhadap validitas simulasi genangan, terutama dalam memprediksi ketinggian air dan kecepatan aliran (Antoni et al., 2018; Tursina et al., 2022). Penggunaan sensor satelit seperti Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI, dan Sentinel-2 MSI telah terbukti penting dalam klasifikasi

tutupan lahan (Junaid & Wibowo, 2024). Produk Landsat-5 dan Landsat-8 dari Collection 2 Level-2 telah melalui koreksi geometrik dan atmosferik, menghasilkan data surface reflectance beresolusi 30 meter yang mencakup pita merah, hijau, inframerah dekat, dan inframerah gelombang pendek. Sementara itu, Sentinel-2, sebagai sensor yang lebih modern, memiliki 13 kanal spektral dengan resolusi 10–60 meter, menjadikannya optimal untuk pemetaan penutup lahan secara lebih detail. Pemanfaatan data satelit ini memungkinkan identifikasi area terbangun dan vegetasi secara akurat, yang kemudian digunakan untuk mengevaluasi dampak tsunami terhadap infrastruktur dan lingkungan (Junaid & Wibowo, 2024).

Klasifikasi Tutupan Lahan

Klasifikasi tutupan lahan merupakan metode dasar penginderaan jauh untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan fitur penutup permukaan bumi. Algoritma klasifikasi berperan penting dalam menentukan akurasi peta tutupan lahan (Belgiu & Drăguț, 2016), dan salah satu yang paling banyak digunakan adalah Random Forest, karena kinerjanya stabil pada data citra multispektral dengan heterogenitas tinggi (Rodriguez-Galiano et al., 2012). Implementasinya tersedia di perangkat lunak QGIS melalui plugin DZetsaka, yang mempermudah penerapan klasifikasi berbasis pembelajaran mesin. Akurasi klasifikasi ditingkatkan melalui pemilihan titik sampel representatif dari berbagai kelas penutup lahan, seperti vegetasi rendah, vegetasi tinggi, kawasan terbangun, perairan, dan lahan kosong. Validasi dilakukan menggunakan indeks spektral NDVI, NDWI, NDBI, dan MSAVI2, yang efektif membedakan vegetasi, badan air, dan permukaan terbangun sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1 (Fontana et al., 2023). Indeks tersebut dihitung berdasarkan nilai piksel. *Red* adalah nilai piksel pada saluran spektral merah. *Green* adalah nilai piksel pada saluran spektral hijau. *NIR* adalah nilai piksel pada saluran spektral inframerah dekat. *SWIR* adalah nilai piksel pada saluran spektral inframerah gelombang pendek. Data hasil klasifikasi ini menjadi dasar dalam pengembangan model kekasaran permukaan untuk mengkuantifikasi tingkat kekasaran berdasarkan tipe penutup lahan.

METODE

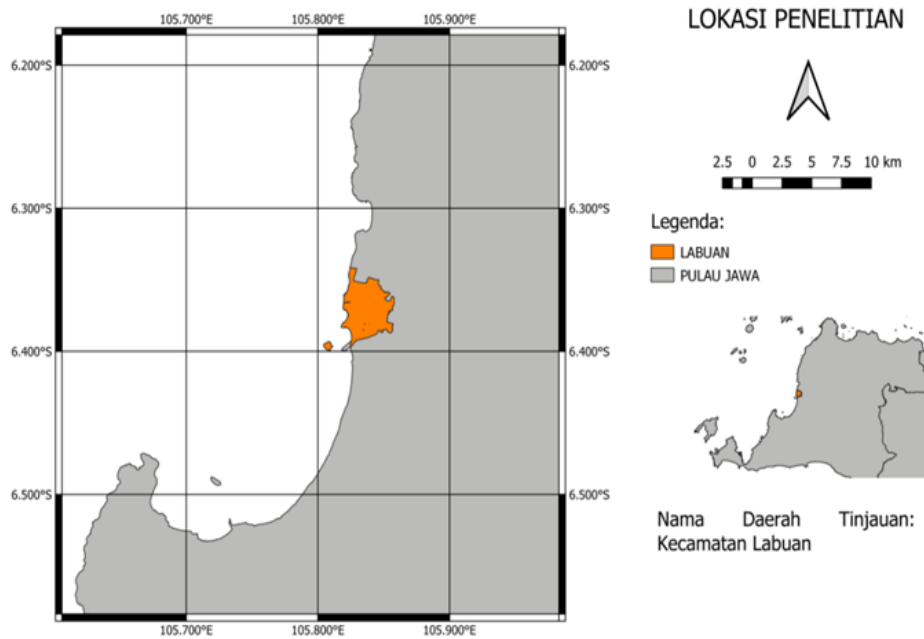
Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian difokuskan di Kecamatan Labuan, Kabupaten Pandeglang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada beberapa pertimbangan ilmiah. Secara tektonik, Labuan terletak di kawasan ring of fire yang dipengaruhi oleh aktivitas seismik tinggi akibat interaksi Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia, sehingga berdekatan dengan zona subduksi dan sesar aktif yang berpotensi memicu gempa bumi dan tsunami. Secara historis, Labuan termasuk dalam wilayah yang terdampak langsung oleh peristiwa tsunami Selat Sunda tahun 2018, yang mengakibatkan kerusakan signifikan pada infrastruktur pesisir dan korban jiwa (Luthfi et al., 2020). Dari sisi demografi, Labuan memiliki luas wilayah 28,827 km² dengan jumlah penduduk mencapai 27.153 jiwa, menjadikannya salah satu kecamatan padat di Kabupaten Pandeglang. Faktor kepadatan penduduk ini meningkatkan tingkat paparan dan kerentanan terhadap bencana tsunami. Selain itu, karakteristik geografis Labuan yang memiliki garis pantai panjang dan terbuka ke arah Selat Sunda memperbesar potensi terjadinya genangan tsunami dengan jangkauan luas. Kondisi ini semakin krusial mengingat kawasan pesisir Labuan juga memiliki peran penting dalam aktivitas ekonomi,

pariwisata, dan perikanan, sehingga potensi kerugian sosial-ekonomi akibat tsunami sangat tinggi.

Tabel 1. Persamaan yang digunakan untuk metode *Random Forest*.

Index	Persamaan	Aplikasi pemetaan
<i>Normalized difference vegetation index (NDVI)</i>	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	<i>Vegetation</i>
<i>Normalized difference water index (NDWI)</i>	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	<i>Water</i>
<i>Normalized difference built-up index (NDBI)</i>	$\frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$	<i>Built-up areas</i>
<i>Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)</i>	$\frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)}}{2}$	<i>Built-up areas</i>



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian.

Parameter Tsunami

Data batimetri, yang menggambarkan kedalaman dan bentuk dasar laut, diperoleh melalui pengukuran langsung atau penginderaan jauh dari BATNAS (Badan Informasi Geospasial, 2021). Data topografi, yang memuat informasi ketinggian permukaan tanah terhadap permukaan laut melalui garis kontur, diperoleh dari DEMNAS (Badan Informasi Geospasial, 2020). Simulasi tsunami dilakukan menggunakan metode multilayer dengan lima lapisan untuk memperoleh resolusi penyebaran gelombang yang lebih detail. Parameter simulasi yang diterapkan pada model COMCOT dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Informasi parameter yang digunakan untuk simulasi dengan program COMCOT.

Layer	1	2	3	4	5
<i>Latitude (°)</i>	98.00S - 110.81S	103.85S - 108.27S	105.25S - 106.40S	105.54S - 106.20S	105.77S - 100.6S
<i>Longitude (°)</i>	11.09E - 2.77E	8.82E - 4.89E	7.08E - 5.80E	6.59E - 6.22E	6.42E - 6.32E
<i>Grid Size (m)</i>	925	308.33	102.78	25.69	5.14
<i>Numbers of Grid</i>	998 × 1153	1593 × 1418	1464 × 1381	1686 × 1579	1625 × 1362
<i>Parent Grid</i>	-	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
<i>Ratio</i>	-	3	3	4	5
<i>Coor. System</i>	<i>Spherical</i>	<i>Spherical</i>	<i>Spherical</i>	<i>Spherical</i>	<i>Cartesian</i>
<i>SWE Type</i>	<i>Linear</i>	<i>Linear</i>	<i>Linear</i>	<i>Linear</i>	<i>Nonlinear</i>
<i>Time Step</i>	1	0.333	0.111	0.028	0.006

Skenario sumber gempa deterministik diadopsi dari Supendi et al. (2022), dengan distribusi slip homogen pada segmen patahan. Parameter gempa yang digunakan, termasuk magnitudo, strike, dip, rake, dan slip, tercantum pada Tabel 3. Parameter ini digunakan sebagai input awal untuk menghasilkan deformasi dasar laut sebagai kondisi batas awal dalam propagasi tsunami ke wilayah pesisir Labuan. Penelitian ini menggunakan tiga skenario simulasi yang disesuaikan dengan tiga dataset citra satelit: Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI, dan Sentinel-2 MSI. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi pengaruh variasi data tutupan lahan terhadap hasil genangan tsunami dan estimasi kerentanan wilayah pesisir, sehingga memberikan dasar yang lebih akurat untuk analisis risiko bencana (Qüense et al., 2021; Amra et al., 2025).

Tabel 3. Parameter mekanisme gempa (Supendi et al., 2022).

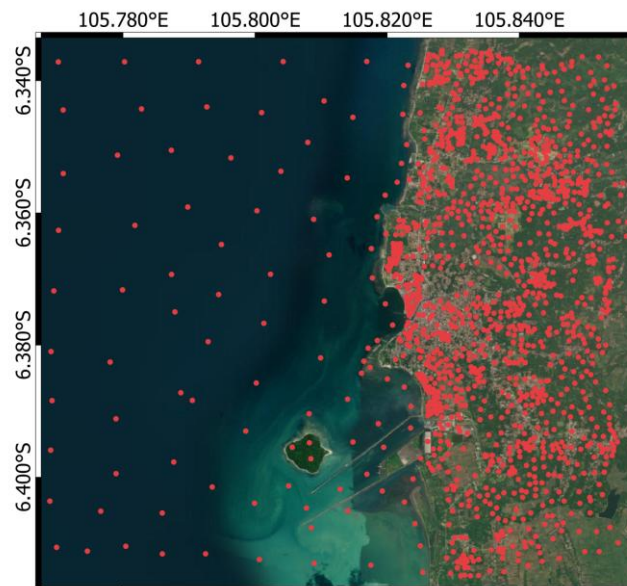
Nama	Mw	<i>Strike (°)</i>	<i>Dip (°)</i>	<i>Rake (°)</i>	<i>Slip (m)</i>
Megathrust 1	8.9	313	18	104	24
Megathrust 2	8.9	297	18	103	20

Data Citra Satelit

Citra satelit merupakan visualisasi citra yang menggunakan berbagai panjang gelombang untuk merekam dan mendeteksi energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh permukaan bumi, sehingga menghasilkan gambaran objek yang diamati (Lillesand et al., 2015). Teknologi ini memungkinkan pengamatan permukaan bumi dari luar angkasa secara kontinu, memberikan informasi detail mengenai kondisi geografis dan tutupan lahan. Pada penelitian ini, data citra satelit digunakan untuk analisis tata guna lahan, khususnya dalam mengidentifikasi jenis-jenis tutupan lahan di wilayah pesisir Pandeglang. Data Landsat 5 TM dan Landsat 8 OLI diperoleh dari *Earth Explorer* milik United States Geological Survey (USGS, 2024), yang merupakan sumber terpercaya untuk data citra satelit historis dan terkini. Sedangkan data Sentinel-2 diunduh melalui *Copernicus Open Access Hub* milik European Space Agency (ESA, 2024), yang menyediakan data dengan resolusi tinggi dan frekuensi akuisisi lebih sering, sangat relevan untuk analisis dinamis tutupan lahan.

Klasifikasi GCP (*Ground Control Point*)

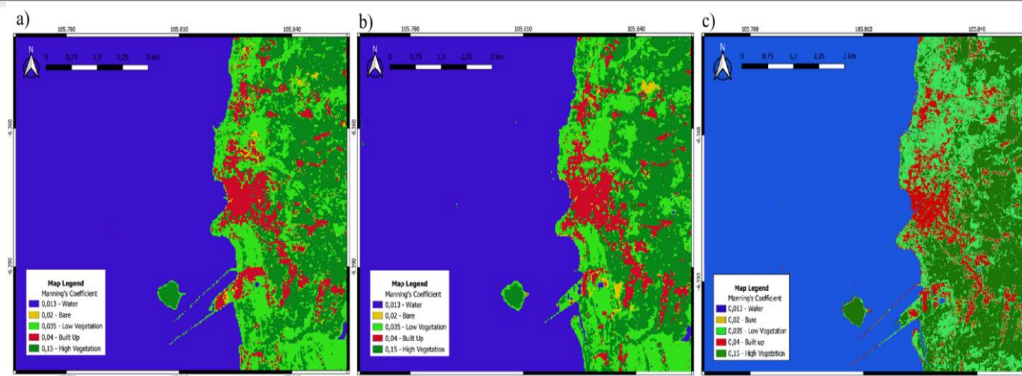
Ground Control Point (GCP) merupakan titik-titik dengan koordinat geospasial yang diketahui secara presisi di permukaan bumi. GCP juga dimanfaatkan sebagai data acuan (*ground truth*) untuk mengevaluasi akurasi pemodelan tutupan lahan dengan metode *random forest* berbasis citra satelit. Informasi yang diperoleh dari setiap GCP meliputi koordinat geografis serta klasifikasi tutupan lahan pada titik tersebut. Penentuan jenis tutupan lahan dilakukan melalui interpretasi citra satelit menggunakan *Google Earth*. Data GCP memberikan representasi kondisi tutupan lahan aktual yang digunakan sebagai pembanding terhadap hasil klasifikasi *random forest*. Perbandingan ini memungkinkan pengukuran akurasi model secara kuantitatif dengan *confusion matrix*. Lokasi titik GCP yang digunakan untuk validasi ditunjukkan pada Gambar 2. Titik-titik ini mencakup berbagai jenis tutupan lahan yang representatif, memastikan validasi komprehensif terhadap model klasifikasi (Tursina et al., 2022).



Gambar 2. Lokasi titik GCP yang digunakan untuk membandingkan hasil pemodelan dan kondisi lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Tutupan Tata Guna Lahan**

Klasifikasi citra satelit menggunakan algoritma *Random Forest* menghasilkan peta tutupan lahan yang terbagi ke dalam lima kelas utama, yaitu *water*, *bare*, *low vegetation*, *built-up*, dan *high vegetation* (dapat dilihat pada Gambar 3). Hasil klasifikasi menunjukkan distribusi spasial tutupan lahan yang konsisten pada ketiga sumber citra (Landsat 5, Landsat 8, dan Sentinel-2), meskipun terdapat variasi detail spasial seiring peningkatan resolusi citra. Kawasan pesisir Labuan didominasi oleh kelas *low vegetation* dan *high vegetation*. Sementara itu, distribusi kawasan terbangun mencapai sekitar 5% dari total wilayah, dengan konsentrasi yang relatif tinggi di area pesisir dan dekat garis Pantai. Setiap hasil klasifikasi menghasilkan skenario distribusi kekasaran yang berbeda. Ketiganya digunakan sebagai input pada model COMCOT untuk mensimulasikan penjararan dan inundasi gelombang tsunami di daratan.



Gambar 3. Hasil klasifikasi tutupan lahan: (a) Landsat 5, (b) Landsat 8, dan (c) Sentinel-2.

Hasil klasifikasi pada Tabel 4 menunjukkan variasi proporsi tiap kelas tutupan lahan dari ketiga citra satelit. Secara umum, kelas perairan mendominasi dengan nilai di atas 63% pada semua citra. Vegetasi tinggi menempati urutan kedua dengan kontribusi sekitar 16–17%, diikuti oleh vegetasi rendah sebesar 13–14% dan kawasan terbangun sekitar 5%. Lahan terbuka menjadi kelas terkecil dengan proporsi di bawah 1%. Perbedaan persentase antar citra mencerminkan pengaruh resolusi spasial dan sensitivitas sensor terhadap hasil klasifikasi. Landsat 5, dengan resolusi 30 m dan sensor generasi lama, menunjukkan luasan permukiman sedikit lebih besar akibat efek *mixed pixel*. Landsat 8 memberikan hasil yang lebih seimbang antara vegetasi dan lahan terbuka, sedangkan Sentinel-2 dengan resolusi 10 m mampu mengidentifikasi detail permukaan secara lebih presisi, menghasilkan klasifikasi vegetasi dan badan air yang lebih akurat.

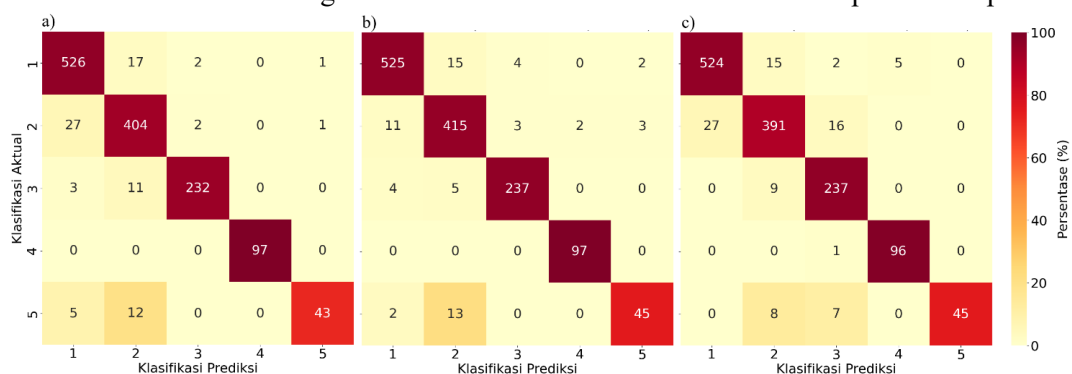
Tabel 4. Perbandingan Persentase Tutupan Lahan pada Tiga Skenario

Kelas	(%) Landsat 5	(%) Landsat 8	(%) Sentinel 2
<i>Water</i>	63.47	63.54	63.6
<i>Bare</i>	0.57	0.71	0.29
<i>Low vegetation</i>	13.93	13.22	14.13
<i>Built-up</i>	5.59	5.53	5.17
<i>High vegetation</i>	16.44	17.01	16.81
Total	100	100	100

Analisis akurasi tutupan lahan

Gambar 4 menampilkan *confusion matrix* untuk klasifikasi citra Landsat 5, Landsat 8, dan Sentinel-2. Kelas 1–5 masing-masing merepresentasikan klasifikasi tutupan lahan, yaitu: *water*, *bare*, *low vegetation*, *built-up*, dan *high vegetation*. Hasil analisis menunjukkan bahwa kelas 1 dan 4 memiliki jumlah piksel yang diklasifikasikan secara benar paling tinggi, sedangkan kelas 2 dan 5 mengalami beberapa kesalahan klasifikasi akibat spektrum yang serupa antar kelas. Dari ketiga data, *overall accuracy* (OA) tertinggi dicapai oleh Landsat 8 sebesar 95,37%, diikuti Landsat 5 sebesar 94,14%, dan Sentinel-2 sebesar 93,49%. Meskipun semua data menunjukkan performa klasifikasi yang sangat baik, Landsat 8 tampil lebih akurat dibandingkan Landsat 5 dan Sentinel-2, yang kemungkinan dipengaruhi oleh faktor resolusi spasial dan spektral, serta kondisi atmosfer pada saat pengambilan citra. Heatmap pada *confusion matrix* memperlihatkan piksel yang diklasifikasikan dengan benar pada diagonal utama berwarna lebih gelap, sementara

kesalahan klasifikasi terlihat pada sel di luar diagonal dengan warna lebih terang, sehingga visualisasi ini membantu mengidentifikasi sebaran kesalahan klasifikasi tiap kelas tutupan lahan.



Gambar 4. Confusion matrix untuk klasifikasi citra: (a) Landsat 5, (b) Landsat 8, dan (c) Sentinel-2.

Tabel 5 menampilkan hasil uji akurasi klasifikasi citra untuk tiga skenario yang melibatkan *Landsat 5*, *Landsat 8*, dan *Sentinel-2*. Nilai akurasi keseluruhan (Overall Accuracy/OA) dan koefisien Kappa menunjukkan performa klasifikasi yang tinggi pada seluruh citra. Citra *Landsat 8* mencatat nilai OA tertinggi sebesar 95,37% dan koefisien Kappa 0,93, diikuti oleh *Landsat 5* dengan OA 94,14% dan Kappa 0,92, serta *Sentinel-2* dengan OA 93,49% dan Kappa 0,91. Nilai OA yang melebihi 90% dan Kappa di atas 0,85 menunjukkan bahwa seluruh hasil klasifikasi berada pada kategori sangat baik menurut standar evaluasi akurasi citra satelit. Performa tertinggi pada *Landsat 8* mengindikasikan tingkat kesesuaian yang lebih kuat antara hasil klasifikasi dan data referensi, yang dapat dikaitkan dengan stabilitas radiometrik dan keseimbangan antara resolusi spasial serta spektral citra. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa citra Sentinel-2 mampu mencapai akurasi keseluruhan sebesar 91.2% dalam klasifikasi tutupan lahan di wilayah perkotaan dan sub-perkotaan, dengan kelas-kelas seperti hutan bakau dan air menunjukkan akurasi produsen dan pengguna yang tinggi (Kotaridis & Λαζαρίδου, 2020).

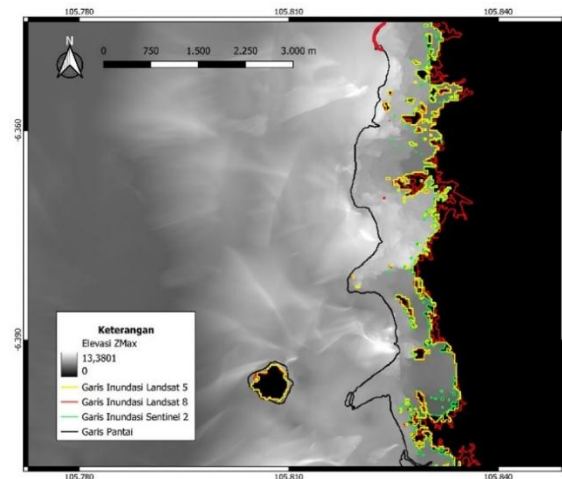
Tabel 5. Perbandingan Uji Akurasi Klasifikasi Citra pada Tiga Skenario.

Skenario	Akurasi Keseluruhan (%)	Koefisien Kappa	Akurasi Produsen (%)	Akurasi Pengguna (%)
Landsat 5	94.14	0.92	94.14	94.14
Landsat 8	95.37	0.93	95.37	95.37
Sentinel 2	93.49	0.91	93.49	93.49

Jarak Inundasi

Pada Gambar 5 ditunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar data citra satelit, khususnya terkait jarak jangkauan genangan tsunami ke daratan. Analisis jarak inundasi dilakukan menggunakan perangkat lunak QGIS dengan membandingkan garis batas genangan yang teridentifikasi pada masing-masing citra. Gradasi warna hitam hingga putih merepresentasikan rentang elevasi dari titik terendah hingga tertinggi. Pada peta, batas genangan ditandai dengan garis berwarna berbeda, yaitu kuning untuk Landsat 5, merah untuk Landsat 8, hijau untuk Sentinel-2, dan hitam untuk garis pantai. Hasil analisis menunjukkan bahwa

genangan terjauh terjadi pada citra Landsat 8 dengan jarak inundasi maksimum mencapai 1,8 km, diikuti oleh Landsat 5 dengan jarak 1,6 km, sedangkan Sentinel-2 menghasilkan jarak inundasi maksimum 1,5 km. Dengan demikian, wilayah terdampak yang teridentifikasi pada Sentinel-2 lebih terbatas dibandingkan dengan citra lainnya. Perbedaan jarak inundasi tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya resolusi spasial Sentinel-2 yang lebih tinggi, sehingga mampu menangkap detail permukaan wilayah dengan lebih baik. Hal ini berdampak pada hasil pemodelan tsunami yang lebih akurat dalam merepresentasikan tinggi gelombang maupun sebaran genangan.



Gambar 5. Jarak inundasi terjauh hasil simulasi tsunami pada tiga skenario yang dianalisis.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi sumber citra satelit dan tingkat resolusi spasial berpengaruh signifikan terhadap hasil simulasi genangan tsunami. Ketiga jenis citra Landsat 5, Landsat 8, dan Sentinel 2 menghasilkan distribusi tutupan lahan dan koefisien kekasaran yang berbeda, yang secara langsung memengaruhi jarak genangan tsunami pada model COMCOT. Citra Landsat 5 memiliki akurasi keseluruhan sebesar 94,14% dengan jarak genangan maksimum 1,6 km, sedangkan Landsat 8 OLI memberikan hasil terbaik dengan akurasi klasifikasi tertinggi (95,37%) dan menghasilkan jarak genangan terjauh, yaitu 1,8 km. Sementara itu, Sentinel 2, meskipun memiliki resolusi spasial lebih tinggi (10 m), menunjukkan akurasi keseluruhan 93,49% dan menghasilkan jarak genangan 1,5 km, yang sedikit lebih pendek dibandingkan dengan Landsat 8 karena perbedaan sensitivitas spektral dalam klasifikasi kekasaran. Hasil ini menegaskan bahwa pemilihan data citra satelit yang tepat serta penentuan nilai kekasaran permukaan yang akurat merupakan faktor kunci dalam meningkatkan reliabilitas model hidrodinamika tsunami. Secara umum, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi analisis tutupan lahan berbasis citra satelit dengan pemodelan numerik dapat menjadi pendekatan efektif dalam mendukung mitigasi dan perencanaan tata ruang pesisir rawan tsunami.

SARAN

Integrasi data beresolusi tinggi seperti LiDAR atau UAV (drone) direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi model kekasaran permukaan, terutama pada kawasan padat bangunan dan vegetasi kompleks yang sulit direpresentasikan oleh citra satelit resolusi

menengah. Selain itu, validasi lapangan yang lebih luas perlu dilakukan untuk memperkaya basis data referensi klasifikasi serta mengurangi potensi kesalahan. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk melakukan simulasi multi-skenario tsunami dengan mempertimbangkan variasi sumber gempa dan arah propagasi gelombang agar diperoleh gambaran risiko yang lebih komprehensif bagi wilayah pesisir Pandeglang. Di samping itu, kolaborasi lintas disiplin antara ahli kebencanaan, penginderaan jauh, dan perencana wilayah menjadi penting untuk menerjemahkan hasil model menjadi kebijakan mitigasi yang berbasis bukti ilmiah. Lebih lanjut, pengembangan model dinamis yang mempertimbangkan perubahan tutupan lahan secara temporal juga perlu dilakukan untuk memahami dampak urbanisasi dan perubahan penggunaan lahan terhadap potensi genangan tsunami di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amra, R., Araki, S., Geiß, C., & Davies, G. (2025). Error-reduced digital elevation models and high-resolution land cover roughness in mapping tsunami exposure for low elevation coastal zones. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101438. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101438>.
- Antoni, S., Bantan, R. A. R., Taki, H. M., Anurogo, W., Lubis, M. Z., Dubai, T. A. A., & Al-Zubieri, A. G. (2018). The extent of agricultural land damage in various tsunami wave height scenarios: Disaster management and mitigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 51, 51–58. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w4-51-2018>.
- Badan Informasi Geospasial. (2020). *DEMNAS: Digital Elevation Model Nasional*. <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/download/peta-demnas>.
- Badan Informasi Geospasial. (2021). *BATNAS: Peta Batimetri Nasional*. <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/download/peta-batnas>.
- Bayas, J. C. L., Ekadinata, A., Widayati, A., Marohn, C., & Cadisch, G. (2015). Resolution vs. image quality in pre-tsunami imagery used for tsunami impact models in Aceh, Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.007>.
- Behrens, J., Løvholt, F., Jalayer, F., Lorito, S., Salgado-Gálvez, M. A., Sørensen, M. B., Abadie, S., ... Vyhmeister, E. (2021). Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps. *Frontiers in Earth Science*, 9, 628772. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.628772>.
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
- European Space Agency. (2024). *Copernicus Open Access Hub: Sentinel-2 data*. <https://scihub.copernicus.eu>.
- Fontana, A. G., Nascimento, V. F., Ometto, J. P., & Amaral, F. H. F. do. (2023). Analysis of past and future urban growth on a regional scale using remote sensing and machine

learning. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 1123254.
<https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1123254>.

Fukui, N., Mori, N., Miyashita, T., Shimura, T., & Goda, K. (2022). Subgrid-scale modeling of tsunami inundation in coastal urban areas. *Coastal Engineering*, 177, 104175. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104175>.

Junaid, M., & Wibowo, A. (2024). Assessing tsunami impacts and enhancing disaster response in Tirtayasa Banten through high-resolution satellite imagery. *Indonesian Journal of Earth Sciences*, 4(2), 45–56. <https://doi.org/10.52562/injoes.2024.1045>.

Kaiser, G., Scheele, L., Kortenhaus, A., Løvholt, F., Römer, H., & Leschka, S. (2011). The influence of land cover roughness on the results of high resolution tsunami inundation modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2521–2540. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2521-2011>.

Kotaridis, I., & Λαζαρίδου, M. (2020). Object-based image analysis of different spatial resolution satellite imageries in urban and suburban environment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2020, 105–112. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xliii-b3-2020-105-2020>.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Luthfi, M., Suppasri, A., & Comfort, L. K. (2020). The 22 December 2018 Mount Anak Krakatau volcanogenic tsunami on Sunda Strait coasts, Indonesia: Tsunami and damage characteristics. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 549–566. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-549-2020>.

McClean, F., Dawson, R., & Kilsby, C. (2020). Implications of using global digital elevation models for flood risk analysis in cities. *Water Resources Research*, 56(10), e2020WR028241. <https://doi.org/10.1029/2020WR028241>.

Qüense, J., Martínez, C., León, J., Aránguiz, R., Inzunza, S., Guerrero, N., Chamorro, A., & Bonet, M. (2021). Land cover and potential for tsunami evacuation in rapidly growing urban areas: The case of Boca Sur (San Pedro de la Paz, Chile). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 69, 102747. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102747>.

Rodríguez-Galiano, V., Chica-Olmo, M., Abarca-Hernández, F., Atkinson, P. M., & Jeganathan, C. (2012). Random Forest classification of Mediterranean land cover using multi-seasonal imagery and multi-seasonal texture. *Remote Sensing of Environment*, 121, 93. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.003>.

Supendi, P., Widiyantoro, S., Rawlinson, N., Yatimantoro, T., Muhari, A., Hanifa, N. R., ... Damanik, R. (2022). On the potential for megathrust earthquakes and tsunamis off the southern coast of West Java and southeast Sumatra, Indonesia. *Natural Hazards*, 116(1), 1315–1336. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05696-y>.

Tursina, T., Syamsidik, S., Kato, S., & Afifuddin, M. (2022). Incorporating dynamics of land use and land cover changes into tsunami numerical modelling for future tsunamis in

Banda Aceh. *E3S Web of Conferences*, 340, 1014.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234001014>.

United States Geological Survey. (2024). *Earth Explorer: Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI datasets*. <https://earthexplorer.usgs.gov>.

Wang, X. (2009). *User manual for COMCOT version 1.7 (first draft)*. Cornell University. Retrieved from https://www.comcot.org/download/COMCOT_v1.7_manual.pdf.