

Pemodelan *Run Up* Tsunami Selat Sunda Menggunakan *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH)

Ananda Nur Izza¹, Desy Nur Fitriani², Thalia Anindya Ardine³,
Dian Candra Rini Novitasari^{4*}

^{1,2,3,4}UIN Sunan Ampel Surabaya
izzaharianto3001@gmail.com¹, desynf34@gmail.com², thaliaardine10@gmail.com³, diancrini@uinsa.ac.id^{4}*

Abstract. The tsunami that occurred in the Sunda Strait in December 2018 caused extensive damage in the coastal areas of Banten and Lampung. This event was triggered by the collapse of Mount Anak Krakatau, which suddenly displaced water masses without being preceded by a tectonic earthquake, so its generation mechanism differs from that of a typical tsunami. In this study, the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method was used, utilizing Sunda Strait bathymetry data to construct a simulation domain, while the tsunami source was represented by fluid deformation around Mount Anak Krakatau. This study aimed to model the propagation and run-up of the tsunami to understand the distribution of the resulting wave energy. The simulation results showed that the tsunami waves tended to propagate northeast and southeast, with a high energy concentration towards the coasts of Banten and Lampung. Although limitations in particle resolution and numerical parameters made run-up values less accurate, the SPH method was able to qualitatively describe the fluid dynamics at the wave generation and propagation stages. This approach shows potential as a tool for studying the characteristics of non-tectonic tsunamis and supporting disaster mitigation efforts in coastal areas.

Keywords: Bathymetry, Propagation, Run Up, Smoothed Particle Hydrodynamics, Sunda Strait Tsunami.

Abstrak. Tsunami yang terjadi di Selat Sunda pada Desember 2018 menyebabkan kerusakan besar di wilayah pesisir Banten dan Lampung. Peristiwa ini dipicu oleh runtuhnya tubuh Gunung Anak Krakatau yang memindahkan massa air secara tiba-tiba tanpa didahului gempa tektonik, sehingga mekanisme pembangkitannya berbeda dari tsunami pada umumnya. Dalam penelitian ini digunakan metode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) dengan memanfaatkan data batimetri Selat Sunda untuk membangun domain simulasi, sementara sumber tsunami direpresentasikan melalui deformasi fluida di sekitar Gunung Anak Krakatau. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan propagasi dan run up tsunami guna memahami penyebaran energi gelombang yang dihasilkan. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa gelombang tsunami cenderung menjalar ke arah timur laut dan tenggara, dengan konsentrasi energi tinggi menuju pesisir Banten dan Lampung. Meskipun terdapat keterbatasan resolusi partikel dan parameter numerik yang membuat nilai run up belum sepenuhnya akurat, metode SPH mampu menggambarkan dinamika fluida secara kualitatif pada tahap pembangkitan dan propagasi gelombang. Pendekatan ini menunjukkan potensi sebagai alat untuk mengkaji karakter tsunami non-tektonik serta mendukung upaya mitigasi bencana di kawasan pesisir.

Kata Kunci: Batimetri, Propagasi, Run Up, Smoothed Particle Hydrodynamics, Tsunami Selat Sunda.

1 Pendahuluan

Indonesia termasuk salah satu negara dengan tingkat kerentanan tsunami tertinggi di dunia. Letak geografis Indonesia yang berada pada pertemuan tiga lempeng besar yaitu Indonesia-Australia, Eurasia, dan Pasifik serta keberadaan banyak gunung api aktif di sepanjang Cincin Api Pasifik [1]. Kombinasi faktor geologis tersebut menjadikan wilayah pesisirnya sangat rawan terhadap berbagai jenis tsunami, baik yang dipicu gempa tektonik, letusan gunung api bawah laut, hingga longsoran dasar laut [2].

Secara umum, tsunami merupakan jalaran gelombang laut berenergi besar yang diakibatkan adanya gangguan tiba tiba di dasar laut, seperti gempa bumi tektonik, letusan gunung api bawah laut, longsoran bawah laut, maupun jatuhnya meteor [3]. Berbeda dengan gelombang biasa yang ditimbulkan oleh angin di permukaan laut, tsunami memiliki panjang gelombang (*wavelength*) yang sangat besar, dapat mencapai ratusan kilometer, serta kecepatan rambat yang tinggi hingga ratusan kilometer per jam di lautan dalam [4]. Secara fisika, tsunami dapat dijelaskan sebagai gelombang panjang (*long wave*) yang terbentuk akibat perpindahan volume air secara mendadak [5]. Karakteristik tersebut membuat tsunami mampu menjalar jauh dari sumbernya, kemudian mengalami amplifikasi ketika memasuki kawasan pesisir[6].

Meskipun gempa tektonik sering dianggap sebagai pemicu utama, Indonesia memiliki sejarah penting terkait tsunami non-tektonik, salah satunya peristiwa tsunami Selat Sunda pada 22 Desember 2018. Bencana ini terjadi akibat runtuhan tubuh Gunung Anak Krakatau yang memicu gelombang tsunami tanpa didahului gempa tektonik. Peristiwa tersebut menewaskan lebih dari 400 orang dan menyebabkan kerusakan parah di pesisir Banten dan Lampung. Berdasarkan hasil survei lapangan, tinggi gelombang mencapai 1-6 meter dengan jarak genangan hingga 200 meter dari garis pantai [2]. Fenomena ini menunjukkan pentingnya pengembangan model prediksi tsunami yang dapat menggambarkan penyebaran dan potensi genangan secara akurat, bahkan untuk tsunami non-tektonik.

Dalam konteks Selat Sunda, kondisi batimetri di sekitar Gunung Anak Krakatau juga berperan penting dalam menentukan arah dan kecepatan penjalaran gelombang tsunami. Survei yang dilakukan oleh Subekti dkk. tahun 2020 menunjukkan adanya perubahan bentuk dasar laut pasca letusan termasuk pendangkalan di sekitar gunung [7] . Informasi batimetri seperti ini menjadi dasar penting dalam pemodelan tsunami karena memengaruhi bagaimana gelombang merambat dan mencapai pantai.

Berbagai penelitian di Indonesia telah melakukan pemodelan tsunami menggunakan pendekatan numerik. Misalnya, penelitian oleh Amirudin dkk. tahun 2021 yang menggunakan model TUNAMI-N2 untuk menganalisis *run up* dan peta genangan di Sumatera Barat [8] , sementara Priadi dkk pada tahun yang sama meneliti potensi *run up* tsunami di Pangandaran menggunakan model sumber Gempa [9]. Penelitian lain memanfaatkan analisis berbasis GIS untuk membuat peta potensi genangan di wilayah Bantul [10]. Meskipun pendekatan ini memberikan gambaran makro yang baik, model berbasis *grid* sering kali kurang mampu merepresentasikan pergerakan fluida secara detail terutama saat berinteraksi dengan topografi pantai yang kompleks.

Kondisi ini menunjukkan perlunya metode pemodelan yang lebih lentur dan mampu menggambarkan perubahan gelombang secara lebih halus. Karena itu, penelitian ini menggunakan metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), yakni pendekatan berbasis partikel yang tidak memerlukan grid tetap dan lebih fleksibel untuk mensimulasikan aliran fluida bebas, termasuk gelombang tsunami dan proses genangan. Dalam SPH, air digambarkan sebagai kumpulan partikel yang bergerak mengikuti kontur dasar laut dan permukaan daratan, sehingga detail interaksi gelombang dengan topografi dapat terlihat dengan lebih jelas.

Pendekatan tersebut diterapkan menggunakan data batimetri Selat Sunda yang terlebih dahulu diolah menjadi peta spasial sebagai dasar simulasi. Data ini kemudian dimanfaatkan untuk mensimulasikan penyebaran tsunami akibat letusan Gunung Anak Krakatau, sebuah jenis tsunami vulkanik yang masih jarang diteliti dibandingkan tsunami yang bersumber dari gempa bumi. Melalui simulasi ini, penelitian bertujuan untuk menggambarkan pola penjalaran gelombang, memperkirakan luas area yang berpotensi tergenang, serta memvisualisasikan dinamika pergerakan tsunami dari waktu ke waktu. Dengan begitu, penelitian ini tidak hanya menawarkan alternatif pemodelan yang lebih detail dibandingkan pendekatan berbasis grid, tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai potensi dampak tsunami vulkanik sebagai dasar perencanaan mitigasi di wilayah pesisir Selat Sunda.

2 Metode Penelitian

2.1 Data Penelitian

Data yang digunakan meliputi:

- a. Data batimetri wilayah Selat Sunda dan pesisir sekitar sebagai kondisi dasar model
- b. Data konfigurasi sumber tsunami dari longsoran Gunung Anak Krakatau yang memicu tsunami
- c. Data topografi pesisir untuk memperkirakan *run up* gelombang

Lokasi penelitian adalah Selat Sunda dengan fokus pada area yang terdampak tsunami 22 Desember 2018, mencakup:

- a. Koordinat: 105.0° - 106.0° Bujur Timur, 5.5° - 6.5° Lintang Selatan
- b. Luas area: *Approximately* $110 \text{ km} \times 110 \text{ km}$
- c. Kedalaman maksimum: 50 meter
- d. Garis pantai: Pesisir Banten (Anyer, Carita, Labuan) dan Lampung (Kalianda, Rajabasa)

Sumber Tsunami:

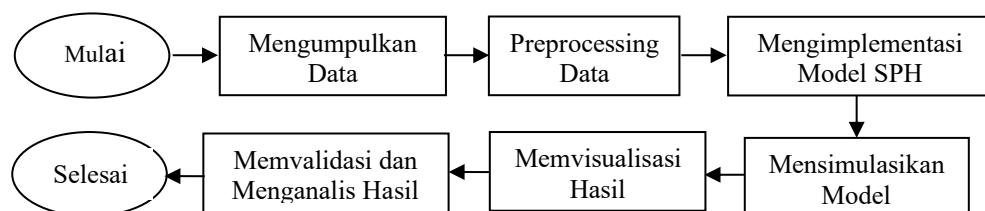
- a. Lokasi: Gunung Anak Krakatau (-6.102° S, 105.423° E)
- b. Mekanisme: Longsoran vulkanik akibat erupsi dan destabilisasi lereng.

2.2 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pemodelan numerik untuk menganalisis fenomena *run up* tsunami di Selat Sunda menggunakan metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). Desain

penelitian bersifat simulatif-eksperimental dengan validasi terhadap data observasi tsunami Anak Krakatau 22 Desember 2018.

Penelitian ini dimulai dari pengumpulan data, dilanjutkan dengan *preprocessing* untuk menyiapkan data batimetri, topografi, dan parameter lainnya agar siap digunakan dalam pemodelan. Tahap berikutnya adalah implementasi model SPH, di mana data yang telah diproses dimasukkan ke dalam sistem dan digunakan untuk menjalankan simulasi model tsunami. Setelah simulasi selesai, hasilnya kemudian diproses lebih lanjut melalui visualisasi untuk melihat pola penjalaran gelombang dan area genangan. Tahap akhir mencakup validasi dan analisis hasil, yang bertujuan mengevaluasi kesesuaian model serta menafsirkan dinamika tsunami dari sumber hingga dampak di wilayah pesisir. Dengan alur tersebut, penelitian ini memberikan gambaran yang komprehensif dan terstruktur sesuai langkah kerja dalam *flowchart* berikut.



Bagan 1 Flowchart Penelitian *Run up Tsunami*

2.3 Metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH)

Metode SPH merupakan pendekatan numerik berbasis partikel yang dikembangkan pertama kali untuk simulasi astrofisika, dan kemudian diadaptasi untuk berbagai fenomena fluida, termasuk gelombang bebas dan tsunami [11]. SPH menggunakan pendekatan Lagrangian, di mana fluida dimodelkan sebagai kumpulan partikel yang masing-masing membawa sifat fisik seperti massa, kecepatan, densitas, dan tekanan. Pendekatan ini menggunakan sekelompok partikel yang diposisikan pada interval yang tidak teratur untuk menggambarkan pergerakan fluida. Masing-masing partikel ini memiliki karakteristik khusus seperti energi, kecepatan, tekanan, kepadatan, dan massa. Dalam metode ini, sifat-sifat setiap partikel untuk kenaikan waktu tertentu diperkirakan berdasarkan sifat-sifat partikel terdekat dalam area pengaruh yang ditentukan. Formulasi SPH, yang tidak terpengaruh oleh susunan partikel sewenang-wenang, memungkinkan metode ini untuk menangani deformasi yang signifikan tanpa memerlukan perawatan permukaan. Kemampuan ini secara luas dianggap sebagai aspek yang paling menarik dari pendekatan ini [12]. Metode ini menawarkan beberapa keuntungan dalam simulasi fluida, yang dapat diringkas sebagai berikut:

- a. SPH memungkinkan simulasi aliran permukaan bebas, memungkinkan pemodelan perilaku fluida pada batas dan antarmuka, sehingga sangat cocok untuk fenomena seperti gelombang, percikan, dan interaksi fluida-struktur [13].
- b. Melalui kemajuan berkelanjutan, metode SPH telah mencapai peningkatan penting dalam kemampuan beradaptasi, stabilitas, dan akurasi, menjadikannya pilihan yang andal untuk simulasi fluida [14].

- c. Keserbagunaan SPH terbukti dalam penerapannya yang luas di berbagai skala, mulai dari sistem kecil hingga skenario skala besar dan bahkan skala astronomi. Ini dapat secara efektif menangani sistem fluida diskrit dan kontinu [14].

Aplikasi SPH mencakup berbagai aspek fisik fluida seperti viskositas, gaya eksternal, gaya internal, kepadatan, dan sebagainya antarmuka [13].

2.4 Teori Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Dalam SPH, fluida dimodelkan sebagai kumpulan unsur fluida (partikel) yang masing-masing telah dikaitkan dengan besaran fisik yang relevan (posisi, kecepatan, massa, massa jenis, dll). Persamaan Euler untuk fluida ideal tanpa disipasi dapat dituliskan sebagai:

$$\rho = \frac{dv}{dt} = -\nabla P + f \quad (1)$$

di mana v adalah kecepatan, ρ adalah kepadatan, P adalah tekanan, dan f dapat berupa beberapa gaya eksternal per satuan volume yang diterapkan pada fluida (misalnya gravitasi). Secara umum P akan menjadi beberapa fungsi dari ρ dan energi termal. Dalam hal ini kita akan menganggap fluida bersifat politropik, artinya kita memiliki hubungan sederhana antara tekanan dan kepadatan:

$$P = kp^{1+1/n} \quad (2)$$

di mana k beberapa konstanta dan n adalah indeks politropika.

Tujuan utama dari metode SPH adalah untuk mengevaluasi percepatan $\frac{dv}{dt}$ (persamaan gerak) dari setiap partikel (yang akan melibatkan melihat interaksi berpasangan antar partikel) dan memperbarui kecepatan dan posisi partikel dengan setiap langkah waktu menggunakan skema integrator. Metode SPH melakukan perhitungan menggunakan interpolasi integral yang dikenal sebagai aproksimasi kernel. Prinsip dasar dari aproksimasi fungsi $A(r)$ adalah sebagai berikut.

$$A(r) = \int_{\Omega} A(r') W(r - r', h) dr' \quad (3)$$

Dalam konteks ini, di mana x mewakili vektor posisi, δ menunjukkan fungsi pembobotan (kernel), dan h mewakili panjang perataan, yang mengatur sejauh mana domain pengaruh Ω . Panjang perataan (h) adalah variabel yang tergantung pada ruang dan waktu dan digunakan untuk menentukan domain pengaruh untuk partikel-partikel tetangga. Nilai h harus lebih besar dari jarak awal antara partikel (dp). Selain itu, sebagai pedoman umum, dp dapat ditetapkan sekitar 1/10 dari panjang karakteristik terpendek model [11].

Persamaan 3 dapat diubah menjadi diskrit sebagai Persamaan 4, formulasi ini adalah sebuah pendekatan fungsi pada partikel a.

$$A(r) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (4)$$

di mana m_b adalah massa partikel, ρ_b kepadatan partikel dan W_{ab} fungsi pembobotan (kernel).

Dalam metode SPH, turunan suatu fungsi dihitung secara analitis, ini adalah salah satu keunggulan dari metode ini. Berbeda dengan metode lain, turunan suatu fungsi dihitung menggunakan jarak antara partikel titik dan partikel di sekitarnya. Turunan interpolasi ini dapat diperoleh dengan diferensiasi biasa yang ditunjukkan pada Persamaan 4 [15].

$$\nabla A(r) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} \nabla W_{ab} \quad (5)$$

A. Fungsi Kernel

Fungsi kernel Wendland C2 yang digunakan dalam penelitian ini [16]:

$$W(r, h) = \alpha d (1 - \frac{r}{h})^4 (1 + \frac{4r}{h}) \quad (6)$$

untuk $0 \leq r \leq h$

$$W(r, h) = 0$$

untuk $r > h$

dimana:

- $r = |r_i - r_j|$ adalah jarak antar partikel
- h adalah smoothing length
- αd adalah konstanta normalisasi ($\frac{7}{4}\pi h^2$ untuk 2D, $\frac{21}{16}\pi h^3$ untuk 3D)

B. Persamaan State (Equation of State)

Untuk fluida yang dapat dimampatkan secara artifisial [17]:

$$p = B[\frac{\rho}{\rho_0}^\gamma - 1] \quad (7)$$

dimana:

- $B = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma}$ adalah parameter bulk modulus
- $\gamma = 7$ adalah konstanta politropik
- c_0 adalah kecepatan suara referensi
- ρ_0 adalah densitas referensi

C. Artificial Viscosity

Untuk menjaga stabilitas numerik [11]:

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{(-\alpha \mu_{ij} \bar{c}_{ij} + \beta \mu_{ij}^2)}{\bar{\rho}_{ij}} & \text{jika } v_{ij} \cdot r_{ij} < 0 \\ 0 & \text{jika } v_{ij} \cdot r_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

dengan:

$$\begin{aligned} \mu_{ij} &= \frac{h v_{ij} \cdot r_{ij}}{(r_{ij}^2 + \eta^2)} \\ \bar{c}_{ij} &= \frac{(c_i + c_j)}{2} \\ \bar{\rho}_{ij} &= \frac{(\rho_i + \rho_j)}{2} \end{aligned}$$

dimana α dan β adalah parameter viskositas artifisial, dan $\eta^2 = 0.01h^2$ adalah parameter penghalus.

D. Boundary Conditions

Kondisi batas (*boundary condition*) menjadi elemen penting dalam simulasi SPH untuk menghindari pantulan gelombang pada tepi domain. Pendekatan *open relaxation boundary* [15] dan *generating-absorbing boundary condition* [18] memungkinkan gelombang masuk dan keluar secara alami tanpa distorsi. Teknik ini dikembangkan lebih lanjut melalui *relaxation zone method* [17] dan skema *two-way coupling* SPH-FNPF [19], yang banyak

digunakan dalam simulasi gelombang bebas. Untuk kondisi batas solid menggunakan *Dynamic Boundary Conditions* (DBC):

$$\frac{dr_k}{dt} = v_k + \varepsilon \sum_i \left(\frac{v_i}{V_k} \right) \Psi_{ik} u_{ik} \quad (9)$$

dimana Ψ_{ik} adalah fungsi interpolasi dan u_{ik} adalah vektor unit dari partikel k ke partikel i [18].

E. Parameter Simulasi

a. Diskretisasi Domain

Ukuran partikel (dp) dipilih berdasarkan resolusi yang diinginkan dengan rasio $dp/h = 1:2$

Smoothing length:

$$h = 1.3 \times dp \quad (10)$$

Jumlah partikel neighbor: sekitar 50-60 partikel dalam radius $2h$

b. Kriteria Stabilitas

Time step ditentukan oleh kriteria CFL [16]:

$$\Delta t = \min(\Delta t_{CFL}, \Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (11)$$

dimana:

$$\Delta t_{CFL} = 0.3 \times \frac{h}{v_{\max}}$$

(kriteria CFL)

$$\Delta t_f = 0.25 \times \sqrt{\frac{h}{|a_{\max}|}}$$

(kriteria gaya)

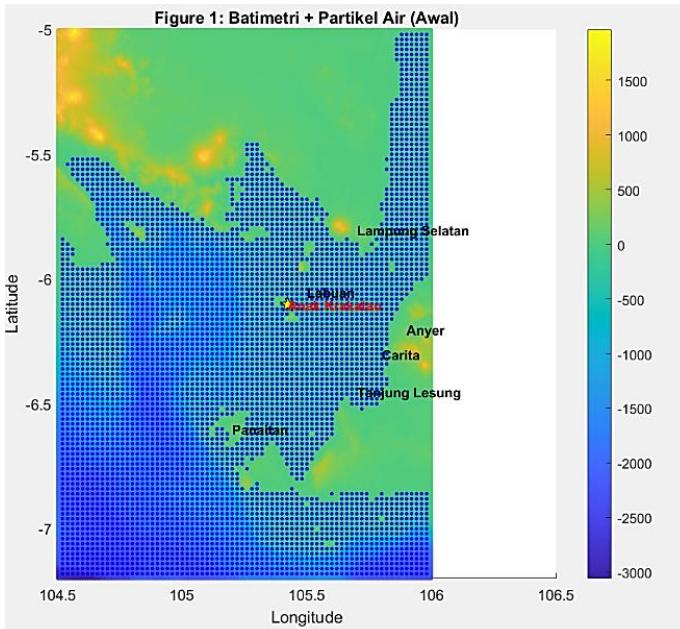
$$\Delta t_{cv} = 0.4 \times \frac{h^2}{v_{\max}}$$

Parameter numerik seperti rasio ukuran partikel terhadap *smoothing length* (umumnya $dp : h \approx 1 : 1.3-2.0$), jumlah partikel tetangga (30-60 dalam radius $2h$), serta langkah waktu (*time step*) berbasis kriteria Courant-Friedrichs-Lowy (CFL) sangat memengaruhi stabilitas simulasi [16]. Kombinasi parameter ini memastikan hasil yang seimbang antara akurasi dan efisiensi komputasi.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Visualisasi Spasial Hasil Simulasi

Untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi spasial hasil simulasi, tiga visualisasi interpretatif disajikan kembali dalam Gambar 1-3. Ketiga *figure* ini berfungsi sebagai peta konseptual yang memperlihatkan bagaimana hasil simulasi dapat diterjemahkan dalam konteks geografis nyata.



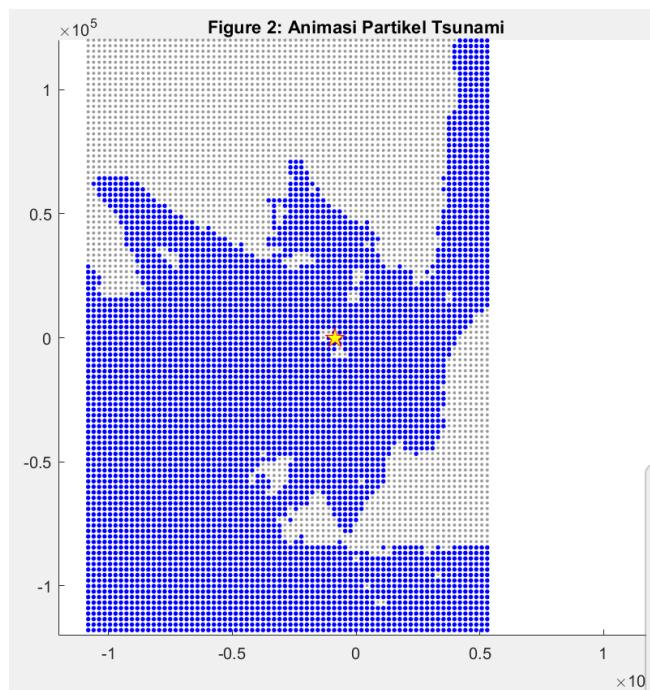
Gambar 1. Kondisi awal domain simulasi SPH

Gambar 1 memperlihatkan kondisi awal domain simulasi yang menampilkan peta batimetri Selat Sunda beserta sebaran partikel air pada tahap inisialisasi. Peta ini menggambarkan wilayah penelitian yang terletak di antara Pulau Jawa bagian barat (Provinsi Banten) dan Pulau Sumatra bagian selatan (Provinsi Lampung), dengan rentang koordinat sekitar 104.5° - 106.5° bujur timur dan -7° - -5° lintang selatan. Sumbu X (*horizontal*) merepresentasikan garis bujur, sedangkan sumbu Y (*vertikal*) menunjukkan garis lintang, yang secara keseluruhan memberikan konteks spasial posisi Selat Sunda sebagai jalur laut penghubung antara Samudera Hindia dan Laut Jawa.

Pada bagian tengah peta tampak titik berwarna kuning dengan label 'Anak Krakatau', yang menandai lokasi pusat sumber tsunami. Titik ini merepresentasikan posisi gangguan awal akibat runtuhan tubuh Gunung Anak Krakatau pada 22 Desember 2018, yang kemudian memicu pergerakan fluida laut di sekitarnya. Di area sekitar titik sumber terlihat sebaran partikel air berwarna biru yang menggambarkan kondisi awal fluida sebelum gelombang terbentuk. Setiap titik mewakili partikel air dalam model SPH yang akan bergerak mengikuti gaya-gaya fluida selama simulasi berlangsung.

Warna pada peta menunjukkan kedalaman dasar laut (batimetri) berdasarkan skala warna di sisi kanan gambar. Warna biru tua hingga biru muda menunjukkan wilayah laut dalam dengan kedalaman antara -1500 hingga -3000 meter di bagian tengah Selat Sunda, sementara warna hijau muda hingga kuning menandakan perairan dangkal dengan kedalaman 0 hingga -500 meter. Bagian daratan ditunjukkan dengan warna oranye hingga coklat, menandakan elevasi positif di atas permukaan laut.

Beberapa wilayah pesisir utama juga tampak pada peta, seperti Anyer, Carita, Tanjung Lesung, Labuan, dan Pandeglang di sisi timur (Pulau Jawa), serta Lampung Selatan di sisi barat laut (Pulau Sumatra). Wilayah-wilayah ini berhadapan langsung dengan posisi Gunung Anak Krakatau dan secara geografis menjadi area paling rentan terhadap dampak gelombang tsunami.

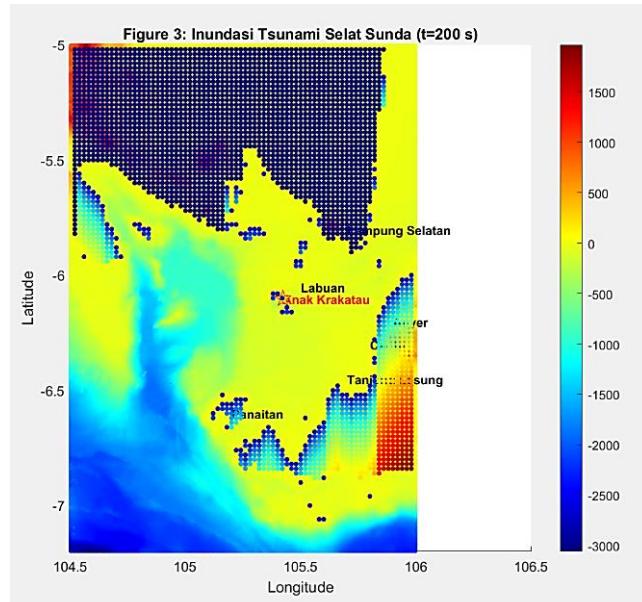


Gambar 2. Evolusi propagasi gelombang tsunami berdasarkan simulasi SPH

Gambar 2 memperlihatkan evolusi pergerakan partikel fluida hasil simulasi *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) pada beberapa tahapan waktu setelah terjadi gangguan di sekitar Gunung Anak Krakatau. Visualisasi ini menampilkan bagaimana energi tsunami terbentuk di sumber, kemudian menyebar secara radial dan berkembang menjadi gelombang yang menjalar menuju pesisir.

Sumbu X dan Y pada peta menunjukkan posisi spasial dalam satuan meter, yang telah dikonversi dari koordinat geografis agar memudahkan representasi dinamika spasial di domain simulasi. Titik-titik biru menggambarkan partikel air laut, sedangkan area putih menunjukkan daratan yang tidak terisi fluida. Di bagian tengah tampak simbol bintang kuning yang menandai posisi Anak Krakatau sebagai pusat inisiasi gelombang.

Seiring bertambahnya waktu, partikel air mulai menyebar dari titik sumber ke segala arah. Warna biru yang lebih padat menunjukkan konsentrasi partikel yang tinggi, ini mengindikasikan akumulasi energi di sekitar sumber. Sementara pola penyebaran yang melebar menggambarkan proses propagasi gelombang ke arah pantai. Arah penjalaran dominan terlihat menuju timur laut dan tenggara, mengikuti konfigurasi batimetri yang mengarahkan energi ke wilayah pesisir Banten dan Lampung



Gambar 3. Kondisi akhir simulasi pada $t = 200$ detik yang memperlihatkan sebaran partikel air

Gambar 3 menampilkan hasil akhir simulasi pada waktu $t = 200$ detik, atau sekitar tiga menit setelah peristiwa runtuhan tubuh Gunung Anak Krakatau. Visualisasi ini memperlihatkan pola sebaran partikel air yang telah menjalar dari pusat sumber menuju wilayah pesisir di sekitarnya, memberikan gambaran mengenai potensi area genangan (*inundation zone*) di sepanjang pantai Selat Sunda.

Peta menggunakan sistem koordinat geografis (longitude-latitude) yang menampilkan cakupan area dari pesisir Banten di timur hingga Lampung Selatan di barat. Warna biru tua hingga biru muda menggambarkan laut dalam dengan kedalaman mencapai lebih dari 3.000 meter, sementara gradasi hijau, kuning, hingga cokelat muda menandai area laut dangkal dan daratan. Sebaran titik-titik biru di dekat garis pantai menunjukkan partikel air yang telah mencapai Daratan yang mengindikasi terjadinya *run up*.

Arah penjalaran gelombang terlihat jelas menuju timur laut dan tenggara, konsisten dengan bentuk topografi dasar laut yang mengarahkan energi ke pesisir Anyer, Carita, dan Tanjung Lesung di sisi Jawa, serta Kalianda dan Rajabasa di sisi Sumatra. Daerah dengan kontur landai menunjukkan genangan yang lebih luas, sedangkan wilayah dengan elevasi tinggi relatif terlindungi. Secara keseluruhan, peta ini menggambarkan dengan baik interaksi antara dinamika fluida hasil simulasi dan morfologi pesisir yang memengaruhi distribusi energi tsunami.

3.2 Diskusi Kritis

Secara umum, hasil pemodelan menunjukkan bahwa metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) mampu menggambarkan dinamika tsunami dengan cukup baik dari sisi kualitatif, khususnya dalam menelusuri pola penjalaran gelombang dan penyebaran energi di kawasan pesisir. Kelebihan utama metode ini terletak pada kemampuannya untuk menangani bentuk geometri yang kompleks tanpa harus bergantung pada struktur *grid* yang kaku. Meski demikian,

model ini masih memiliki keterbatasan, terutama pada aspek kalibrasi parameter numerik dan tingkat ketelitian resolusi partikel, sehingga hasil kuantitatif seperti estimasi *run up* dan kecepatan partikel belum sepenuhnya mencerminkan kondisi sebenarnya.

Untuk pengembangan selanjutnya, model dapat disempurnakan dengan meningkatkan resolusi data batimetri, menyesuaikan nilai *smoothing length*, serta memperbaiki kondisi batas agar lebih mendekati keadaan lapangan. Proses validasi juga penting dilakukan dengan menggunakan data hasil observasi lapangan maupun model numerik berbasis *grid*, sehingga reliabilitas hasil simulasi dapat teruji secara empiris.

Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi dalam memperkaya pemahaman tentang karakter tsunami non-tektonik seperti peristiwa Selat Sunda 2018 melalui pendekatan berbasis partikel, sekaligus membuka peluang pengembangan model SPH yang lebih presisi dan terkalibrasi di masa mendatang.

4 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) dapat digunakan untuk menggambarkan dinamika penjalaran gelombang tsunami di Selat Sunda secara kualitatif. Berdasarkan hasil simulasi, pola propagasi energi gelombang cenderung mengarah ke timur laut dan tenggara, terutama menuju pesisir Banten dan Lampung. Temuan tersebut sejalan dengan konfigurasi batimetri wilayah yang memengaruhi arah dan intensitas gelombang. Pendekatan berbasis partikel seperti SPH terbukti mampu merepresentasikan interaksi fluida dengan topografi yang kompleks tanpa memerlukan struktur *grid* tetap, sehingga relevan untuk analisis tsunami non-tektonik seperti peristiwa Gunung Anak Krakatau tahun 2018.

Meskipun demikian, hasil kuantitatif seperti nilai *run up* dan kecepatan partikel masih menunjukkan perbedaan dengan data lapangan. Hal ini terutama disebabkan oleh keterbatasan resolusi partikel, pemilihan *time-step*, serta kondisi batas yang belum sepenuhnya terkalibrasi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk memperbaiki aspek numerik model dengan meningkatkan resolusi spasial, menyesuaikan panjang *smoothing length*, dan melakukan validasi terhadap data observasi maupun model berbasis *grid*.

Selain pengembangan teknis, integrasi model SPH dengan data topografi pesisir beresolusi tinggi dan skenario sumber tsunami yang lebih realistik dapat meningkatkan ketepatan hasil simulasi. Pendekatan ini berpotensi memberikan kontribusi penting dalam perencanaan mitigasi bencana pesisir, terutama dalam memahami pola genangan, area berisiko tinggi, serta kebutuhan sistem peringatan dini yang lebih adaptif di wilayah rawan tsunami seperti Selat Sunda.

5 Daftar Pustaka

- [1] A. A. Isdianto and others, “Geohazards assessment in Indonesia: Focus on tsunami vulnerability along the Ring of Fire,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 1123–1140, 2021.
- [2] S. Solihuddin and others, “Field survey and analysis of the 2018 Sunda

- Strait tsunami: Wave characteristics and impacts,” *Pure Appl. Geophys.*, vol. 177, no. 12, pp. 5678–5695, 2020.
- [3] D. Sugawara, “Trigger mechanisms and hydrodynamics of tsunamis,” 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-815686-5.00004-3.
 - [4] J. S. do Carmo, “Tsunamis: geração e riscos,” 2000, doi: 10.14195/1647-7723_7_2.
 - [5] P. Xie and Y. Du, “Tsunami wave generation in Navier–Stokes solver and the effect of leading trough on wave run-up,” *Coast. Eng.*, 2023, doi: 10.1016/j.coastaleng.2023.104293.
 - [6] T. Yulianto, A. F. Rahmah, and R. Amalia, “Clustering Daerah Bencana Alam Di Indonesia Menggunakan Metode Fuzzy C-Means,” vol. 9, pp. 29–39.
 - [7] S. Subekti and others, “Post-tsunami bathymetric changes around Anak Krakatau volcano using multibeam echosounder survey,” *Mar. Geol.*, vol. 428, p. 106289, 2020.
 - [8] A. Amirudin and others, “Numerical modeling of tsunami inundation in West Sumatra using TUNAMI-N2 model,” *J. Geofis. Indones.*, vol. 19, no. 2, pp. 45–62, 2021.
 - [9] P. Priadi and others, “Finite fault source modeling for tsunami run-up estimation in Pangandaran, West Java,” *J. Earthq. Tsunami*, vol. 15, no. 3, p. 2150005, 2021.
 - [10] B. Budiman and others, “GIS-based tsunami inundation modeling for coastal areas in Bantul, Yogyakarta,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 893, p. 12034, 2021.
 - [11] J. J. Monaghan, “Smoothed Particle Hydrodynamics,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 68, no. 8, pp. 1703–1759, 2005, doi: 10.1088/0034-4885/68/8/R01.
 - [12] R. Wahyudi, S. Annas, and Z. Rais, “Analisis Support Vector Regression (Svr) Untuk Meramalkan Indeks Kualitas Udara Di Kota Makassar,” *VARIANSI J. Stat. Its Appl. Teach. Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 104–117, 2023, doi: 10.35580/variansiumm107.
 - [13] P. Angerman, S. Kumar, R. Seto, B. Sandnes, and M. Ellero, “Microstructural smoothed particle hydrodynamics model and simulations of discontinuous shear-thickening fluids,” *Phys. Fluids*, 2023, doi: 10.1063/5.0188444.
 - [14] W. Hu, W. Pan, M. Rakhsha, Q. Tian, H. Hu, and D. Negrut, “A consistent multi-resolution smoothed particle hydrodynamics method,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 324, pp. 278–299, 2017, doi: 10.1016/j.cma.2017.06.010.
 - [15] G. Zhu, “A SPH model with open relaxation boundary for wave generation and absorption,” *Coast. Eng. J.*, vol. 63, no. 1, pp. 1–14, 2021.
 - [16] D. Violeau and B. D. Rogers, “Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) for free-surface flows: Past, present and future,” *J. Hydraul. Res.*, vol. 50,

- no. 1, pp. 1–26, 2012, doi: 10.1080/00221686.2011.637559.
- [17] C. Altomare, J. M. Domínguez, A. J. C. Crespo, M. Gómez-Gesteira, T. Suzuki, and T. Verbrugghe, “Relaxation zone method in SPH-based model for free-surface flow simulations,” *Coast. Eng.*, vol. 152, pp. 103–117, 2019.
 - [18] X. Chang and P. R. Wellens, “A generating-absorbing boundary condition for simulating waves using SPH,” *Comput. & Fluids*, vol. 278, p. 106095, 2024.
 - [19] T. Verbrugghe, C. Altomare, A. J. C. Crespo, J. M. Domínguez, M. Gómez-Gesteira, and P. Troch, “Implementation of open boundaries within a two-way coupling (FNPF-SPH) model for wave interaction,” *Energies*, vol. 12, no. 4, p. 697, 2019, doi: 10.3390/en12040697.