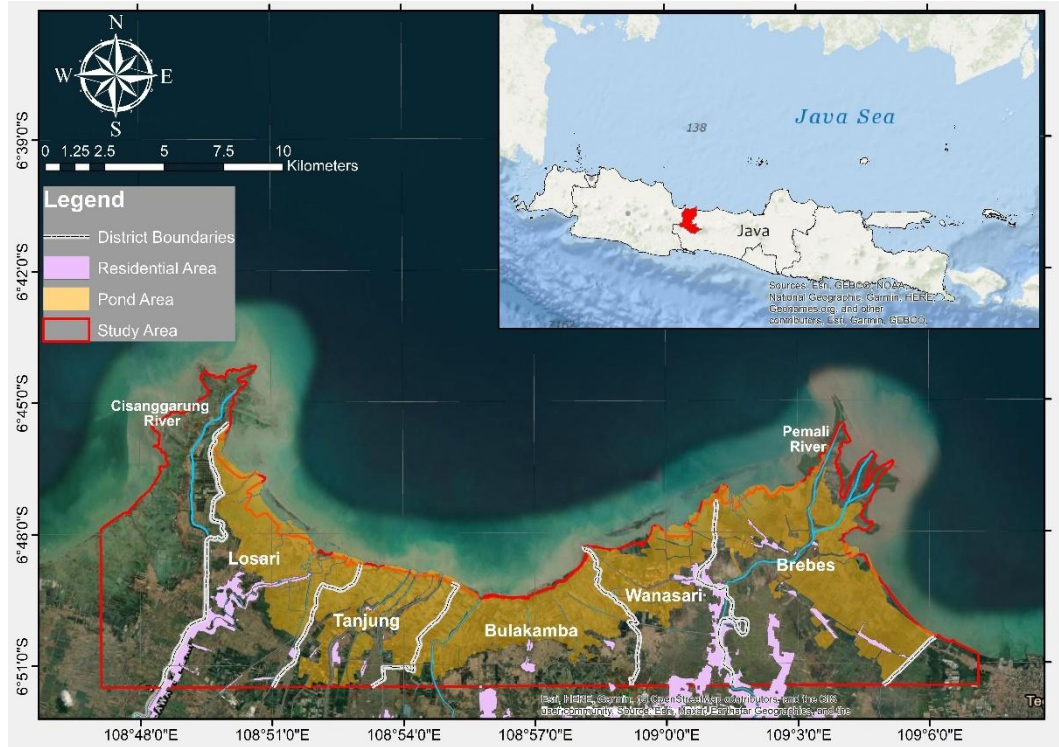


BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Studi



Gambar 3.1 Lokasi Studi Pesisir Brebes.

Wilayah studi berlokasi di pesisir Brebes, pantai utara Jawa Tengah, Indonesia, yang meliputi lima kecamatan: Losari, Tanjung, Bulakamba, Wanasari, dan Brebes. Wilayah ini dibatasi oleh Sungai Cisanggarung di sebelah barat dan Sungai Pemali di sebelah timur, serta berhadapan langsung dengan Laut Jawa yang memiliki kedalaman rata-rata sekitar 40 meter (Apriansyah et al., 2023). Hidrodinamika Laut Jawa dipengaruhi oleh angin musiman dan proses pasang surut. Pola angin di wilayah ini terutama dikendalikan oleh sistem Monsun Asia-Australia (Pradana, 2024).

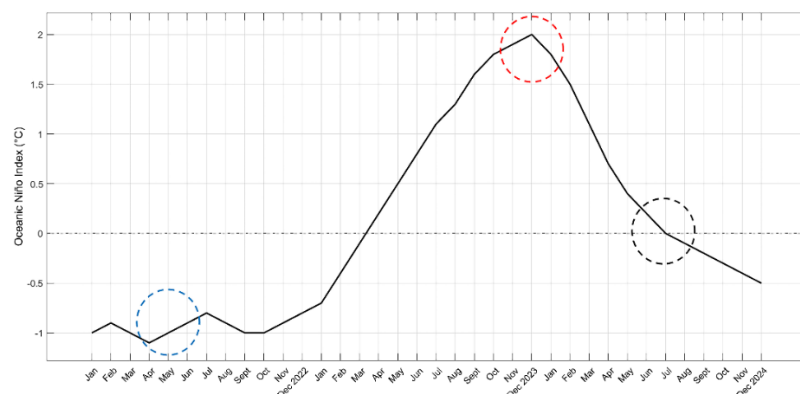
Selama musim dingin boreal (Desember hingga Februari), angin muson barat laut atau muson Asia membawa angin dari Eurasia ke Australia. Sebaliknya, angin muson tenggara atau angin muson Australia selama musim panas boreal (Juni hingga Agustus) membalikkan aliran ini. Fase transisi terjadi pada bulan Maret-Mei (Transisi 1) dan September-November (Transisi 2), di mana angin secara bertahap bergeser. Angin musonal ini menyebabkan pola arus yang mengangkut air yang

lebih segar dan hangat dari Laut Cina Selatan melalui Selat Karimata selama angin muson barat, dan air yang lebih dingin dan asin dari Laut Jawa bagian timur selama muson timur.

Garis pantai Brebes terdiri dari dua jenis pantai utama: berpasir dan berlumpur (Solihuddin et al., 2020). Pantai berpasir, yang mencakup sekitar 20% dari garis pantai, terutama ditemukan di sepanjang Pantai Bulakamba dan bagian timur delta Sungai Pemali. Sebaliknya, pantai berlumpur, yang mencakup 80% sisanya, terkonsentrasi di Losari, Tanjung, Wanasari, Kaliwlingi, dan daerah-daerah lain di sekitar delta Sungai Pemali. Daerah berlumpur ini sangat rentan terhadap erosi, sebuah masalah yang diperparah dengan meluasnya konversi hutan bakau menjadi tambak.

Topografi wilayah pesisir Brebes pada umumnya datar dan dataran rendah, yang mendukung aktivitas pertanian dan budidaya perikanan. Namun, hal ini juga membuat daerah ini sangat rentan terhadap peningkatan permukaan air dan intrusi gelombang selama peristiwa cuaca ekstrem. Banjir adalah masalah yang sering terjadi, seringkali meluas ke pemukiman di dekatnya.

Analisis pengaruh ENSO dilakukan dengan pendekatan *event-based simulation* untuk mengevaluasi proses hidrodinamika dan perubahan muka air laut di wilayah studi. Pemilihan periode simulasi didasarkan pada representasi fase ENSO yang berbeda (**Gambar 3.2**), meliputi Mei 2022 (fase La Niña), Desember 2023 (fase El Niño), dan Juli 2024 (fase netral), sehingga dapat menggambarkan variasi respons hidrodinamika akibat perbedaan anomali iklim pada setiap fase.



Gambar 3.2 *Oceanic Niño Index*. Lingkaran biru: La Niña (Mei 2022); lingkaran merah: El Niño (Desember 2023); lingkaran hitam: Neutral phase of ENSO (Juli 2024).

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Dalam Penelitian ini, beberapa data klimatologi dan oceanographi dibutuhkan guna mempelajari peristiwa ENSO dan proses hidrodinamika area pesisir. Ketersediaan data lapangan sangat diperlukan dalam validasi model. Penelitian ini mengintegrasikan analisis deskriptif dan simulasi numerik untuk mengkaji secara komprehensif pengaruh fase ENSO (La Niña, El Niño, dan Netral) terhadap banjir pesisir di Brebes, Indonesia. Analisis deskriptif melibatkan penggunaan metode grafis untuk menginterpretasikan parameter oseanografi seperti SST, pola angin, dan karakteristik gelombang. Dataset ini bersumber dari ERA-5 *Reanalysis Data* yang disediakan oleh *Copernicus Climate Data Store*, yang menyediakan data per jam beresolusi tinggi untuk kondisi atmosfer, permukaan daratan, dan lautan (**Tabel 3.1**).

Data tersebut diunduh dalam format NetCDF yang berisi data time series dengan resolusi per jam, mencakup wilayah antara 20°LS – 20°LU dan 90°BB – 80°BT.

Tabel 3.1 Ringkasan parameter atmosfer dan oseanografi yang digunakan dalam analisis.

Variable	Satuan	Resolusi	Deskripsi
10m <i>u-component of wind</i>	m/s	0,25° × 0,25°	Komponen angin pada ketinggian 10 m yang bergerak pada arah zonal (timur-barat)
10m <i>v-component of wind</i>	m/s	0,25° × 0,25°	Komponen angin pada ketinggian 10 m yang bergerak pada arah meridional (utara-selatan)
<i>Sea surface temperature (SST)</i>	K	0,25° × 0,25°	Suhu air laut dekat permukaan.
<i>Sea level pressure</i>	Pa	0,25° × 0,25°	Tekanan atmosfer yang disesuaikan terhadap ketinggian muka laut rata-rata.
<i>Significant height of combined wind waves and swell</i>	m	0,5° × 0,5°	Tinggi gelombang signifikan (rata-rata sepertiga gelombang tertinggi). Mewakili jarak vertikal puncak–lembah gelombang dan mencakup dua komponen: wind-sea dan swell.

<i>Mean wave direction</i>	<i>Degree true</i>	$0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$	Arah rata-rata datangnya gelombang, dihitung dari seluruh frekuensi dan arah spektrum gelombang.
<i>Mean wave period</i>	s	$0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$	Periode rata-rata gelombang: waktu antara dua puncak gelombang berturutan. Dihitung dari seluruh frekuensi dan arah spektrum gelombang, termasuk wind-sea dan swell.

Dalam analisis numerik, khususnya dalam pembuatan domain model, data-data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Garis Pantai

Data garis pantai diperoleh dari hasil pengolahan citra satelit Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 Level 2. Ekstraksi garis pantai dilakukan dengan memanfaatkan Band 3 (Visible Green, 0,525 – 0,600 μm) dan Band 5 (Near-Infrared, 0,845 – 0,885 μm) yang memiliki resolusi spasial 30 meter.

2. Batimetri

Data batimetri yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Batimetri Nasional (BATNAS) dengan resolusi spasial sekitar 180 meter. Data BATNAS merupakan hasil integrasi berbagai survei hidrografi yang dikompilasi oleh Pusat Kelautan dan Lingkungan Pantai – Badan Informasi Geospasial (PKLP-BIG). Dengan cakupan yang luas dan tingkat ketelitian yang baik, data ini dianggap cukup representatif untuk menggambarkan kondisi kedalaman perairan dangkal pada wilayah studi.

3. Topografi

Data topografi wilayah daratan Kabupaten Brebes diperoleh dari Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) dengan resolusi spasial sekitar 8,1 m. DEMNAS merupakan data hasil integrasi beberapa sumber elevasi, seperti IFSAR, TERRASAR-X, dan ALOS PALSAR, yang telah dikoreksi dan distandardisasi oleh Badan Informasi Geospasial (BIG). Data ini digunakan untuk menggambarkan kerentanan wilayah terhadap banjir rob pada model HEC-RAS.

4. Data Tutupan Lahan

Data tutupan lahan wilayah Brebes diperoleh menggunakan data citra satelit Sentinel-2 Land Cover Explorer. Data ini penting untuk menentukan koefisien kekasaran menggunakan nilai Manning pada model. HEC-RAS Mapper *User's Manual* merekomendasikan nilai Manning berdasarkan kelas penutup lahan NLCD (*National Land Cover Database*) sebagai acuan untuk analisis dataran banjir, seperti pada **Tabel 3.2**

Tabel 3.2 Nilai Manning (n) berdasarkan Kelas Penutup Lahan NLCD

NLCD	Deskripsi	Rentang Kekasaran Manning (n)	Rata-rata Manning
95	<i>Emergent Herbaceous Wetlands</i>	0,05 – 0,085	0,07
90	<i>Woody Wetlands</i>	0,04 – 50,15	0,10
82	<i>Cultivated Crops</i>	0,020 – 0,05	0,03
81	<i>Pasture/Hay</i>	0,025 – 0,05	0,04
72	<i>Sedge/Herbaceous</i>	0,025 – 0,05	0,04
71	<i>Grassland/Herbaceous</i>	0,025 – 0,05	0,04
52	<i>Shrub/Scrub</i>	0,07 – 0,16	0,12
51	<i>Dwarf Scrub</i>	0,025 – 0,05	0,04
43	<i>Mixed Forest</i>	0,08 – 0,20	0,14
42	<i>Evergreen Forest</i>	0,08 – 0,16	0,12
41	<i>Deciduous Forest</i>	0,10 – 0,20	0,15
31	<i>Barren Land (Rock/Sand/Clay)</i>	0,023 – 0,030	0,03
24	<i>Developed, High Intensity</i>	0,12 – 0,20	0,16
23	<i>Developed, Medium Intensity</i>	0,08 – 0,16	0,12
22	<i>Developed, Low Intensity</i>	0,06 – 0,12	0,09
21	<i>Developed, Open Space</i>	0,03 – 0,05	0,04

NLCD	Deskripsi	Rentang Kekasaran Manning (n)	Rata-rata Manning
11	<i>Open Water</i>	0,025 – 0,05	0,04

Sumber: (HEC-RAS 2D User 's Manual, 2023)

Ketersediaan data lapangan digunakan untuk proses validasi model, terutama guna meningkatkan keandalan hasil simulasi numerik. Data yang digunakan dalam validasi model merupakan data sekunder yang meliputi:

1. Data Pasang Surut

Data pengukuran diperoleh dari stasiun pengamatan Cirebon, yang merupakan titik pengamatan pasut terdekat dengan lokasi studi. Data diakses melalui portal resmi Badan Informasi Geospasial (BIG).

2. Rekapitulasi kejadian banjir rob

Data kejadian banjir diperoleh dari Badan Perencanaan Pembangunan, Riset dan Inovasi Daerah (Bapperida) Kabupaten Brebes. Data tersebut meliputi koordinat titik genangan dan kedalaman.

3.3 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa aplikasi sebagai berikut:

1. Microsoft Office

Microsoft Office digunakan untuk menyusun laporan dan mengolah data yang digunakan dalam penelitian.

2. MATLAB UNSIL Lisence

Program ini digunakan dalam analisis deskriptif untuk memvisualisasikan setiap pengaruh setiap fase ENSO terhadap SST dan pola pergerakan angin.

3. Ocean Data View

Aplikasi ini digunakan untuk proses ekstraksi data-data ERA-5 dari format netCDF ke dalam format txt. Ekstraksi ini memberikan kemudahan dalam proses pengolahan data.

4. MIKE 21 Student Lisence

Aplikasi ini digunakan untuk mensimulasikan proses hidrodinamika pesisir dan gelombang laut berdasarkan input data angin, pasang surut, dan gelombang yang telah diproses.

5. HEC-RAS

Aplikasi ini digunakan untuk mensimulasikan proses dan mekanisme banjir rob akibat gelombang di area pesisir yang merupakan keluaran dari model MIKE 21.

6. ArcGIS Trial Version

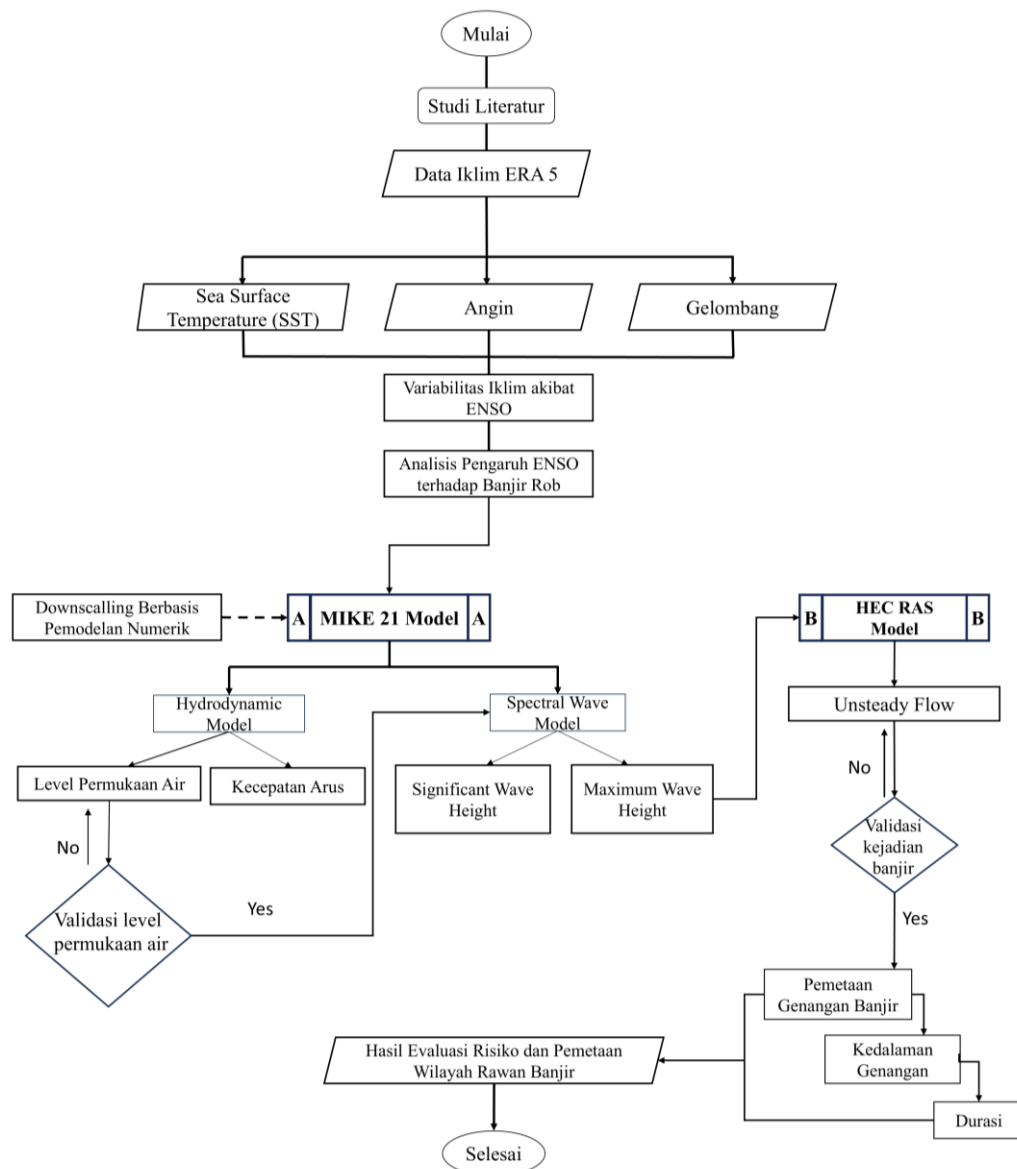
Aplikasi ini digunakan untuk mendigitasi garis pantai dan batimetri sebagai input pada model MIKE 21, serta mengolah data DEM untuk kebutuhan pemodelan pada HEC-RAS. Selain itu, ArcGIS dimanfaatkan untuk menganalisis dan memvisualisasikan data spasial hasil pemodelan genangan dari HEC-RAS. Lebih lanjut, aplikasi ini juga digunakan dalam analisis morfologi untuk menilai tingkat kerentanan wilayah terhadap banjir rob.

7. Mendeley

Aplikasi ini digunakan untuk mengelola referensi berupa sitasi dan daftar pustaka dalam laporan ini yang mencakup jurnal ilmiah, buku, dan website.

3.4 Analisis Data

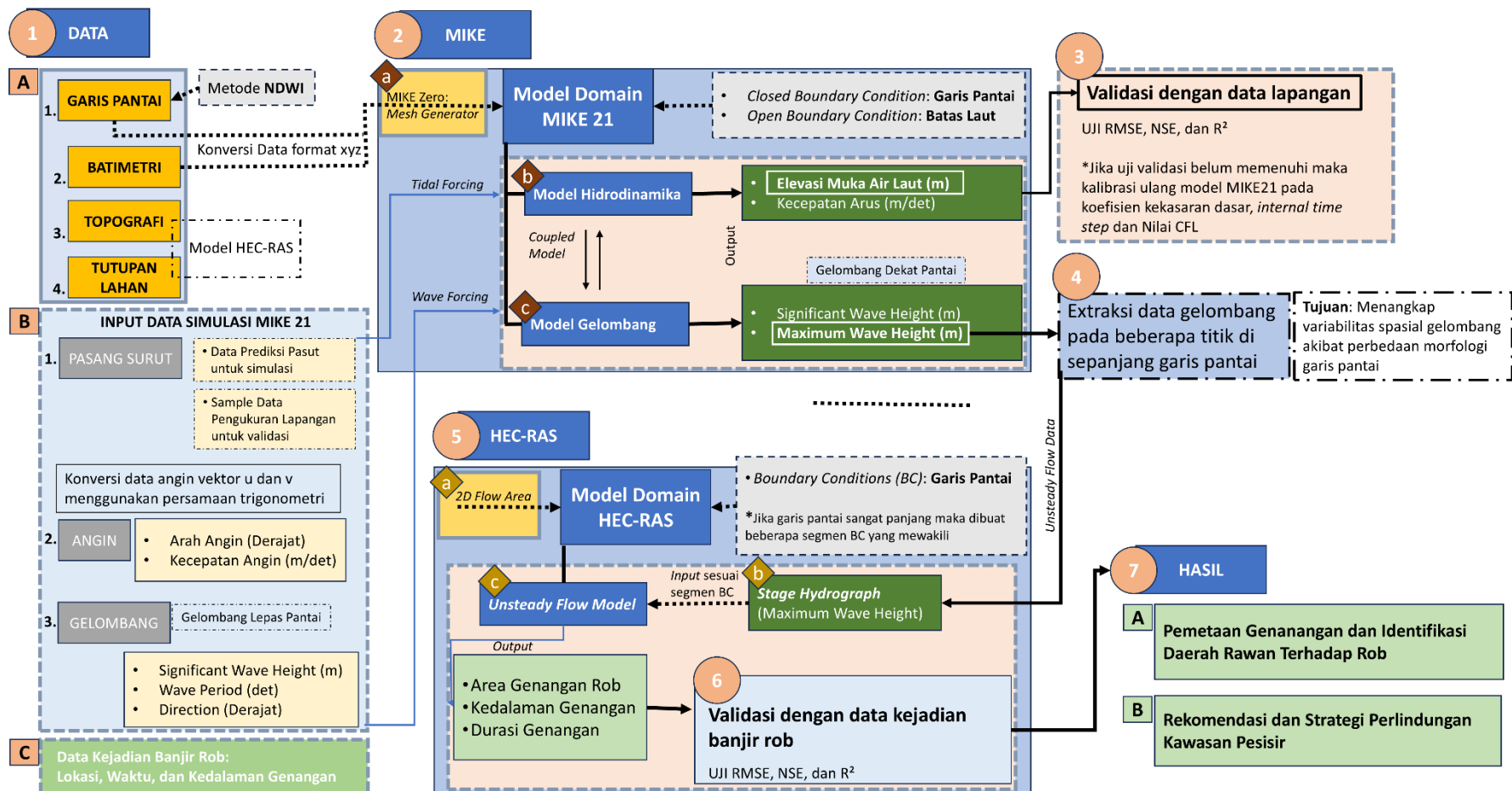
Tahapan dalam pengolahan dan analisis data ini dijelaskan secara terstruktur pada **Gambar 3.3** meliputi integrasi dua model dengan data – data yang diperlukan.



Gambar 3.3 Diagram Alir Pemodelan.

Penjabaran diagram alir pada sub proses A dan B dijelaskan pada **Gambar 3.5** dan **3.6**

Alur Pemodelan dengan integrasi model MIKE dan HEC-RAS digambarkan lebih lanjut pada **Gambar 3.4**. Alur tersebut menjelaskan secara rinci proses pemodelan dengan input data yang digunakan dan detail model yang dijalankan.



Gambar 3.4 Alur Pemodelan Kajian Banjir Rob.

3.5 Teknik Analisis Data

3.5.1 Suhu Permukaan Laut (SST) dan Pola Pergerakan Angin

Analisis deskriptif dilakukan dengan menggunakan *script* Climate Data Toolbox (CDT) pada MATLAB yang tersusun pada **Sub bab 2.3.3**. Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan dan pemetaan suhu permukaan laut rata-rata pada setiap fase ENSO. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi perbedaan distribusi termal perairan yang dapat memengaruhi respon hidrodinamika dan potensi kenaikan muka air laut pada masing-masing kondisi iklim tersebut.

Peta sebaran SST kemudian dioverlay dengan data arah dan kecepatan angin untuk menganalisis keterkaitannya terhadap pola sirkulasi atmosfer pada wilayah studi. Analisis ini dilakukan untuk melihat bagaimana perbedaan distribusi suhu permukaan laut dapat memengaruhi pola pergerakan angin di atasnya, terutama dalam kaitannya dengan proses pembangkitan gelombang menuju wilayah pesisir. Pendekatan ini juga membantu mengidentifikasi kecenderungan angin dominan yang berpotensi memperbesar risiko banjir rob pada setiap fase ENSO.

3.5.2 Arah dan Kecepatan Angin

Data angin yang diperoleh dari *reanalysis dataset* ERA-5 melingkupi komponen $u - wind$ (zonal) dan $v - wind$ (meridional). Data tersebut kemudian diekstrak sesuai dengan koordinat lokasi studi menggunakan *Ocean Data View*. Dalam penelitian ini, data tersebut dikonversi menjadi data arah (degree) dan kecepatan (m/s) menggunakan **persamaan 2.2** dan **2.3**. Proses konversi ini diperlukan agar data angin sesuai dengan format input yang dibutuhkan untuk pemodelan hidrodinamika dan gelombang pada model MIKE 21.

3.5.3 Analisis Data Pasang Surut

Data prediksi pasut tidak dihitung secara manual dengan **persamaan 2.5**, melainkan diperoleh menggunakan MIKE 21 *toolbox*. Proses ini dilakukn dengan input berupa lokasi koordinat, waktu, dan konstituen pasut. Data prediksi ini merupakan hasil simulasi numerik yang menghitung variasi muka air laut berdasarkan komponen harmonik pasang surut dengan resolusi $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Model ini menggunakan kondisi batas laut (*water level boundary*) yang dibangkitkan dari konstituen pasut utama. Dalam konfigurasi model, data pasang surut berfungsi sebagai pembangkit batas laut terbuka (*open boundary forcing*) guna merepresentasikan kondisi fluktuasi muka air laut di wilayah studi.

3.5.4 Analisis Data Gelombang

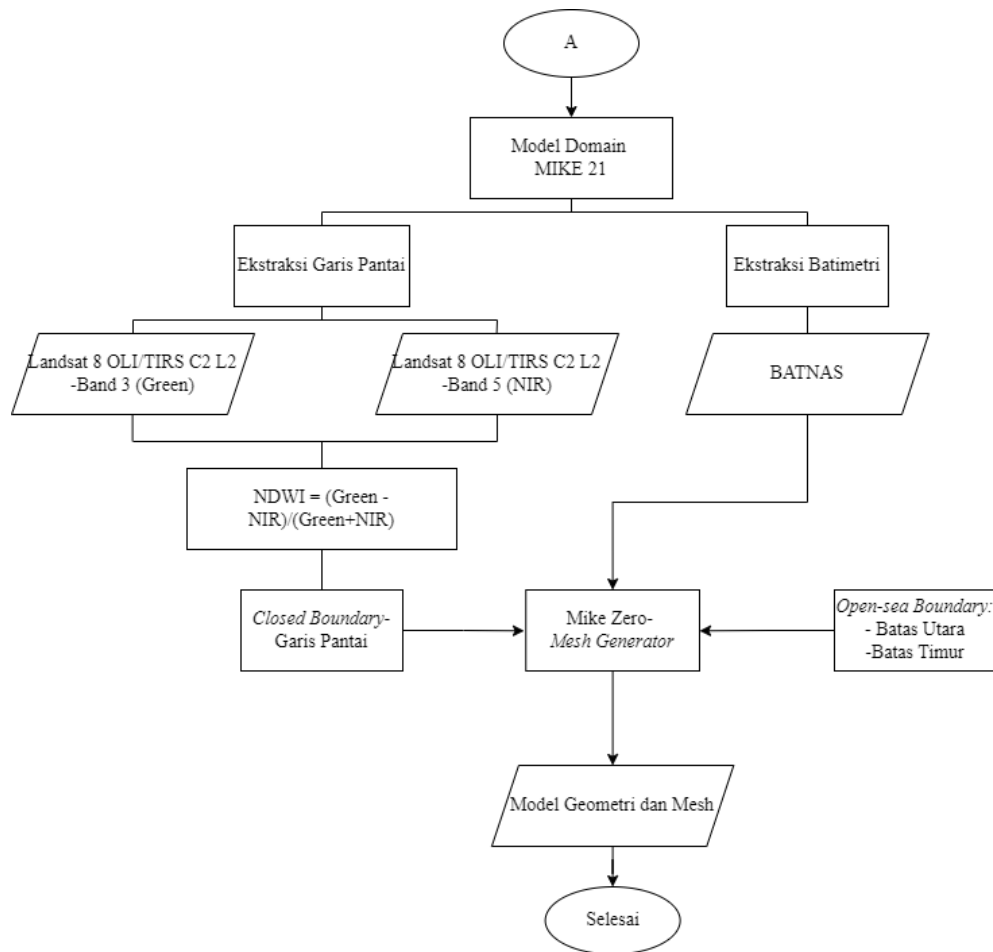
Data gelombang yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari reanalysis dataset ERA-5 dengan resolusi spasial $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Dalam kajian dinamika pesisir, resolusi tersebut tergolong kasar sehingga kurang mampu merepresentasikan kondisi aktual di wilayah pesisir, khususnya untuk simulasi banjir rob yang memerlukan ketelitian spasial lebih tinggi. Oleh karena itu, data gelombang ERA-5 diolah lebih lanjut melalui pemodelan *Spectral Wave Model* pada MIKE 21 berdasarkan **Persamaan 2.14** dan **2.15**. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk melakukan *downscaling* data gelombang sehingga dapat digunakan sebagai input pada simulasi banjir pesisir dengan model HEC-RAS.

3.5.5 Model Setup

Pemodelan menggunakan MIKE 21 dan HEC-RAS dirancang untuk merepresentasikan kondisi hidrodinamika di lapangan sedekat mungkin dengan kondisi aktual. Namun demikian, seperti halnya pendekatan numerik lainnya, model tetap memiliki keterbatasan yang berasal dari penyederhanaan proses fisik, keterbatasan data, serta asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan. Oleh karena itu, hasil simulasi tidak dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara sempurna, tetapi tetap mampu memberikan gambaran yang cukup representatif mengenai pola dan dinamika sistem yang dikaji.

Tahap utama dalam penyusunan model adalah pembuatan domain model yang mereplika area studi dalam bentuk dua dimensi (2D). Domain ini berfungsi sebagai area simulasi tempat berbagai parameter hidrodinamika, seperti elevasi muka air, kecepatan arus, serta pengaruh gaya-gaya eksternal diterapkan dan saling berinteraksi. Interaksi tersebut dihitung secara numerik berdasarkan persamaan dasar hidrodinamika yang digunakan dalam model, yaitu persamaan kontinuitas

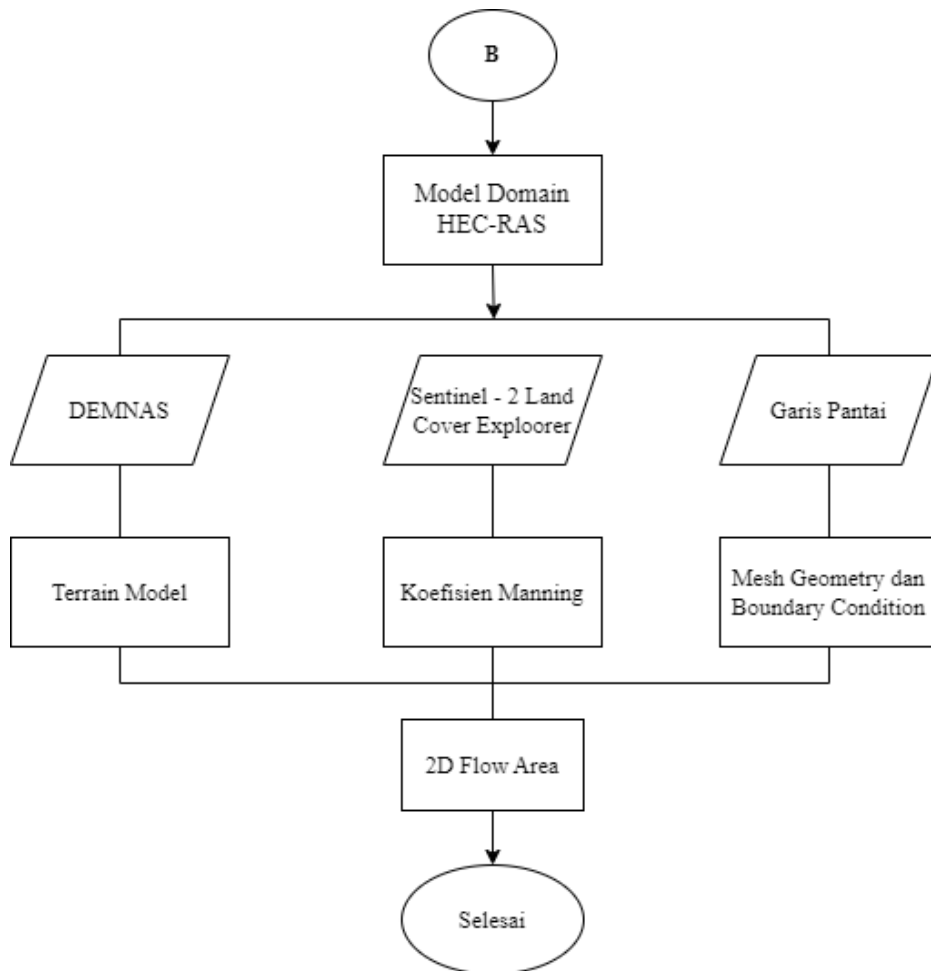
dan momentum sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.11 – 2.12. Proses pembuatan model domain MIKE21 dapat dilihat pada **Gambar 3.5**



Gambar 3.5 Alur Pembuatan Model Domain MIKE 21.

Pada MIKE 21, Model domain dibangun menggunakan *unstructured triangular mesh* dengan jumlah total 3.134 elemen, mencakup area seluas kurang lebih 380.637 ha. Area pesisir memiliki mesh yang lebih rapat untuk menangkap dinamika gelombang dan pasang surut secara detail, sementara area laut lepas dibuat lebih renggang. Pendekatan tersebut diterapkan untuk mengoptimalkan keseimbangan antara kebutuhan akurasi dan efisiensi komputasi.

Pada HEC-RAS, pembuatan model domain dilakukan dengan cara terpisah. langkah-langkah yang dilakukan untuk pembuatan model domain HEC-RAS dapat dilihat pada **Gambar 3.6**



Gambar 3.6 Alur Pembuatan Model Domain HEC-RAS.

Pembuatan model domain area daratan ini menggunakan mesh bujur sangkar (*quadrilateral mesh*) dengan ukuran grid 35 x 35 m, mencakup area seluas $\pm 16.959,33$ ha. Mesh ini diterapkan dalam HEC-RAS untuk mensimulasikan perambatan banjir rob ke arah daratan. Penggunaan mesh bujur sangkar dinilai lebih efisien secara komputasi untuk wilayah datar seperti Kabupaten Brebes, karena mampu merepresentasikan aliran limpasan dan genangan secara sederhana namun akurat. Selain itu, garis pantai Brebes dibagi menjadi sembilan segmen batas. Masing-masing segmen diberikan gaya pembangkit berupa keluaran gelombang dari MIKE 21 untuk merepresentasikan variasi spasial dari *wave setup* dan *run-up* di sepanjang garis pantai. Dengan pendekatan ini, interaksi gelombang-pasang dengan topografi pesisir dapat ditangkap secara lebih realistis sesuai kondisi lapangan.

3.5.6 Model Parameter

MIKE 21/3 *Coupled Model* dikonfigurasi untuk mensimulasikan interaksi antara proses hidrodinamika dan gelombang di wilayah pesisir Brebes selama 31 hari dengan interval 1 jam (total 743 langkah per fase ENSO). Domain model memiliki satu batas daratan dengan panjang sekitar 205,86 km serta dua batas laut terbuka (*open-sea boundaries*). Pada batas laut pertama, diberikan pembangkit berupa konstituen pasang surut hasil prediksi MIKE 21, sementara pada batas laut kedua digunakan deret waktu gelombang lepas pantai dari data ERA-5.

Untuk menjaga stabilitas numerik, model menggunakan langkah waktu internal dinamis antara 0,1–1800 detik yang dikendalikan oleh syarat *Courant–Friedrichs–Lewy* (CFL). Faktor stabilitas sebesar 0,8 dipilih agar nilai $CFL < 1$, sehingga perhitungan tetap stabil. Difusi turbulen direpresentasikan menggunakan nilai eddy viscosity 0,28 m²/s dengan pendekatan Smagorinsky formulation, sementara kekasaran hidraulik di daratan ditetapkan melalui Manning's number = 32 m^{1/3}/s, sesuai rekomendasi Delaney (2018) and Boyden et al. (2021).

Pada modul *Spectral Wave*, mekanisme disipasi yang diperhitungkan meliputi gesekan dasar laut (*seabed friction*), pecah gelombang akibat kedalaman (*depth-induced breaking*), serta *white-capping* (Lihat **persamaan 2.15**). Gesekan dasar laut diparameterisasi menggunakan tinggi kekasaran Nikuradse sebesar 0.04 m (DHI, 2014), sesuai dengan karakter dasar perairan Brebes yang didominasi sedimen pasir-lumpur. Proses pecah gelombang akibat kedalaman mengikuti kriteria Battjes and Janssen (1978) dengan parameter $\gamma = 0,8$ dan $\alpha = 1,0$. Sementara itu, disipasi akibat *white-capping* menggunakan parameter $C_{dis} = 4,5$ dan $\delta = 0,5$, sebagaimana direkomendasikan untuk aplikasi pesisir pada MIKE 21.

Meskipun konfigurasi model telah mengacu pada standar, terdapat ketidakpastian (*uncertainty*) yang melekat dalam pemodelan *spectral wave*. Ketidakpastian ini berasal dari kualitas data, skema parameterisasi (misalnya gesekan dasar, pecah gelombang, dan *white-capping*), dan pendekatan numerik. Berdasarkan studi sensitivitas sebelumnya (Kabling & Odronic, 2010), faktor gesekan dasar laut merupakan parameter dominan yang memengaruhi tinggi

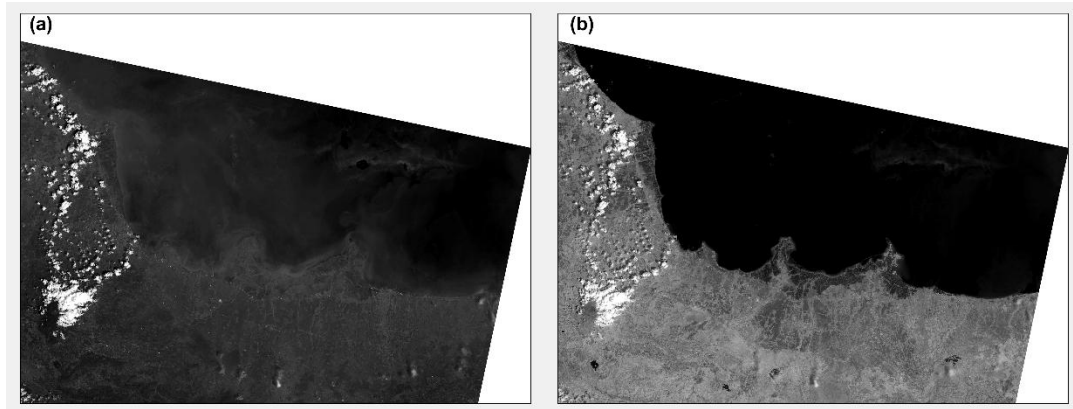
gelombang di perairan dekat pantai. Namun, pada penelitian ini keterbatasan data observasi gelombang di dekat pantai membatasi proses kalibrasi secara langsung.

Pada pemodelan banjir, HEC-RAS 2D *unsteady flow model* dipilih untuk mensimulasikan kejadian banjir rob. Dalam model ini, parameter gelombang didefinisikan sebagai *stage hydrographs* dalam timeseries dengan interval 1 jam. Pengaturan komputasi mencakup beberapa parameter penting seperti *computational interval*, *hydrograph output interval*, *detailed output interval*, dan *mapping output interval*. Dalam penelitian ini, *computational interval* ditetapkan 15 menit, dengan mempertimbangkan kondisi stabilitas Courant (kecepatan aliran dan ukuran grid). Untuk efisiensi penyimpanan data, *hydrograph output interval* diatur 30 menit, sehingga dapat merepresentasikan perubahan muka air dan aliran secara memadai tanpa menghasilkan data yang berlebihan. Selanjutnya, *detailed output interval* diatur 30 menit. *Mapping output interval* ditetapkan 30 menit agar visualisasi genangan banjir di HEC-RAS Mapper dapat menggambarkan dinamika genangan secara jelas.

3.6 Domain dan Konfigurasi Model MIKE 21

Pembuatan domain model dimulai dari penentuan *boundary* atau batas – batas area simulasi. Boundary ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu *land boundary* atau batas darat dan *open-sea boundary* atau batas laut bebas. Proses digitasi batas daratan dilakukan dengan metode *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Data citra satelit Landsat 8 yang digunakan merupakan citra tahun 2023, dengan asumsi bahwa tidak terjadi perubahan garis pantai yang signifikan pada periode 2022 – 2024 yang menjadi rentang waktu simulasi dalam penelitian ini. Dengan demikian, garis pantai hasil ekstraksi tersebut dianggap representatif untuk digunakan sebagai batas darat pada seluruh skenario simulasi.

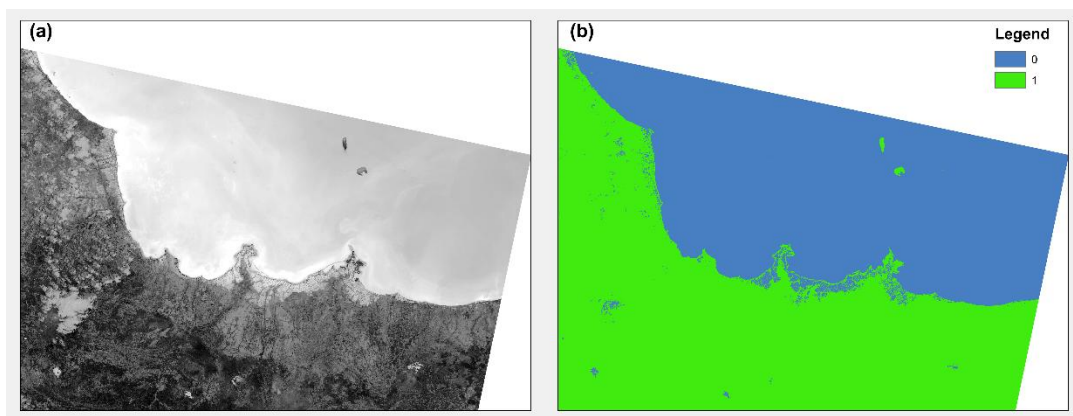
Dalam perhitungan NDWI, digunakan Band 3 (Green) dan Band 5 (Near Infrared, NIR) dari Landsat 8 sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.7 Citra Landsat 8 Tahun 2023. (a) Band 3, Green; (b) band 5, NIR.

Kedua band tersebut diproses menggunakan *Raster Calculator* berdasarkan persamaan NDWI (**Persamaan 2.1**) sehingga dihasilkan peta raster indeks NDWI yang memisahkan antara badan air dan daratan.

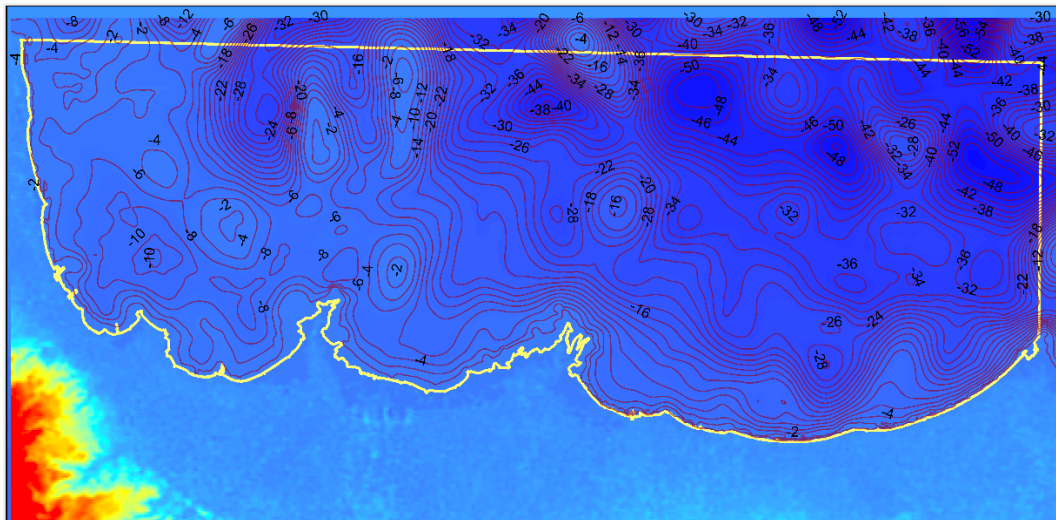
Nilai NDWI kemudian diklasifikasikan dengan cara melakukan *thresholding*, di mana nilai 0 merepresentasikan badan air dan nilai 1 merepresentasikan daratan. Hasil klasifikasi ini digunakan sebagai dasar untuk proses digitasi garis pantai, sehingga batas daratan yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi aktual. Garis pantai yang diperoleh memiliki total panjang 205,86 km, melingkupi pesisir Cirebon, Brebes, dan Tegal.



Gambar 3.8 Hasil Raster Calculator. (a) Raster Indeks NDWI; (b) Klasifikasi Badan Air dan Daratan.

Batas area yang didapatkan kemudian menjadi acuan dalam proses ekstraksi data batimetri perairan yang bersumber dari BATNAS. Proses ekstraksi dilakukan menggunakan software ArcGIS dengan mengaplikasikan kontur pada data

batimetri. Data ini kemudian diekstraksi menjadi data x , y , dan z yang merepresentasikan koordinat dan kedalaman setiap titik ekstraksi. Seluruh data spasial, meliputi garis pantai dan data batimetri perairan ditransformasikan ke dalam sistem proyeksi WGS 1984 UTM Zona 49S untuk memastikan konsistensi sistem koordinat serta memungkinkan integrasi yang akurat antara data garis pantai, mesh model, dan batas domain.



Gambar 3.9 Kontur Batimetri Area Simulasi.

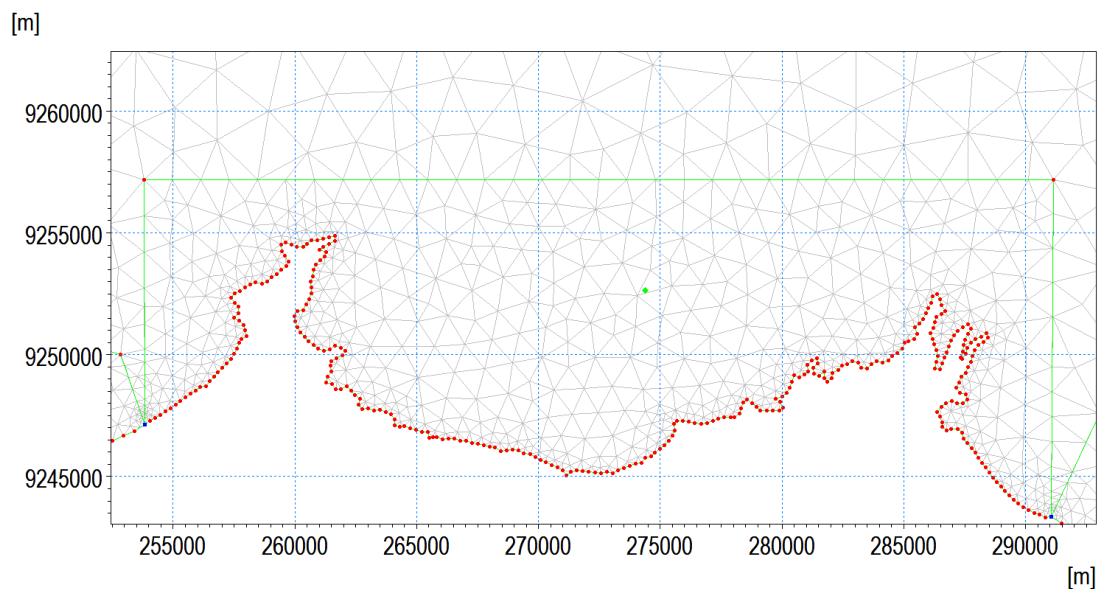
Hasil digitasi garis pantai dan data batimetri yang telah dikonversi ke dalam format titik berkoordinat (x, y, z) selanjutnya diintegrasikan dan diproses menggunakan *mesh generator* untuk membentuk domain komputasi model. Pada tahap ini, data xyz digunakan sebagai dasar untuk membangun *unstructured triangular mesh* yang merepresentasikan geometri wilayah studi, di mana garis pantai berfungsi sebagai batas darat (*land boundary*) dan data batimetri sebagai kontrol elevasi dasar laut.

Dalam pembuatan model, perairan didefinisikan dengan angka 0, batas darat didefinisikan menggunakan angka 1 dan batas laut didefinisikan dengan angka lebih dari 1.

Dua batas laut terbuka (*open boundaries*) didefinisikan masing-masing pada sisi utara dan selatan domain. Kedua batas ini diberi *boundary conditions* berupa time series pasang surut dan parameter gelombang, yang berfungsi sebagai input gaya utama dalam simulasi hidrodinamika dan transformasi gelombang.

Sebaliknya, garis pantai ditetapkan sebagai batas tertutup (*closed boundary*), di mana komponen kecepatan aliran normal terhadap batas ditetapkan nol. Kondisi ini memastikan bahwa tidak terjadi aliran massa yang melintasi batas daratan, sehingga garis pantai berfungsi sebagai penghalang fisik yang membatasi perambatan aliran dan gelombang.

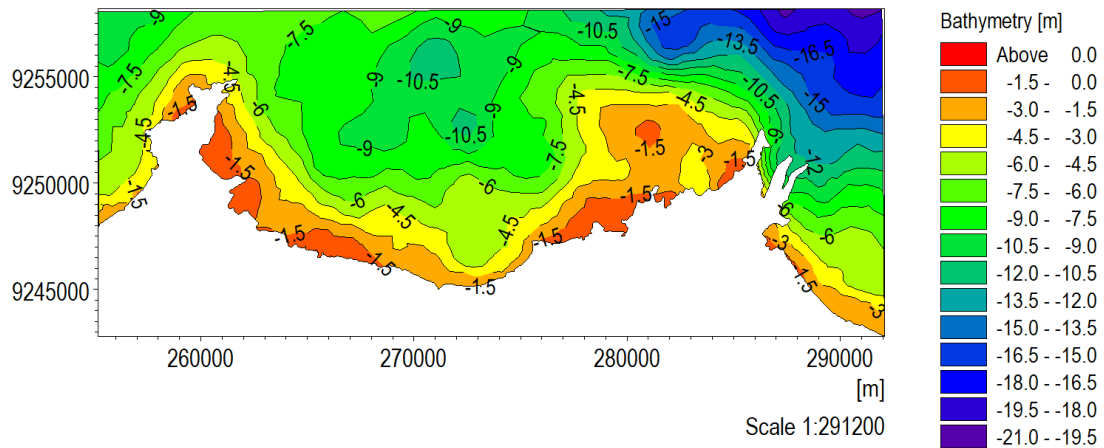
Model domain memiliki luas kurang lebih 380.637 ha. Kepadatan mesh di sekitar lokasi studi dirancang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah perairan lepas, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut. Pendetailan ukuran elemen mesh di area ini bertujuan untuk meningkatkan resolusi spasial dalam merepresentasikan proses hidrodinamika dan transformasi gelombang di zona pesisir yang kompleks. Sebaliknya, mesh dengan ukuran elemen yang lebih besar diterapkan di wilayah laut lepas guna mengurangi beban komputasi. Pendekatan gradasi mesh ini memungkinkan tercapainya keseimbangan antara akurasi numerik dan efisiensi waktu komputasi, karena elemen dengan resolusi tinggi membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar dibandingkan elemen beresolusi rendah.



Gambar 3.10 Grid dan Mesh Perairan Brebes.

Area dalam rentang koordinat berikut ditetapkan sebagai fokus utama analisis hasil simulasi (Kotak dengan garis putus, **Gambar 3.11**). Meskipun demikian, domain pemodelan dibuat lebih luas daripada area analisis untuk

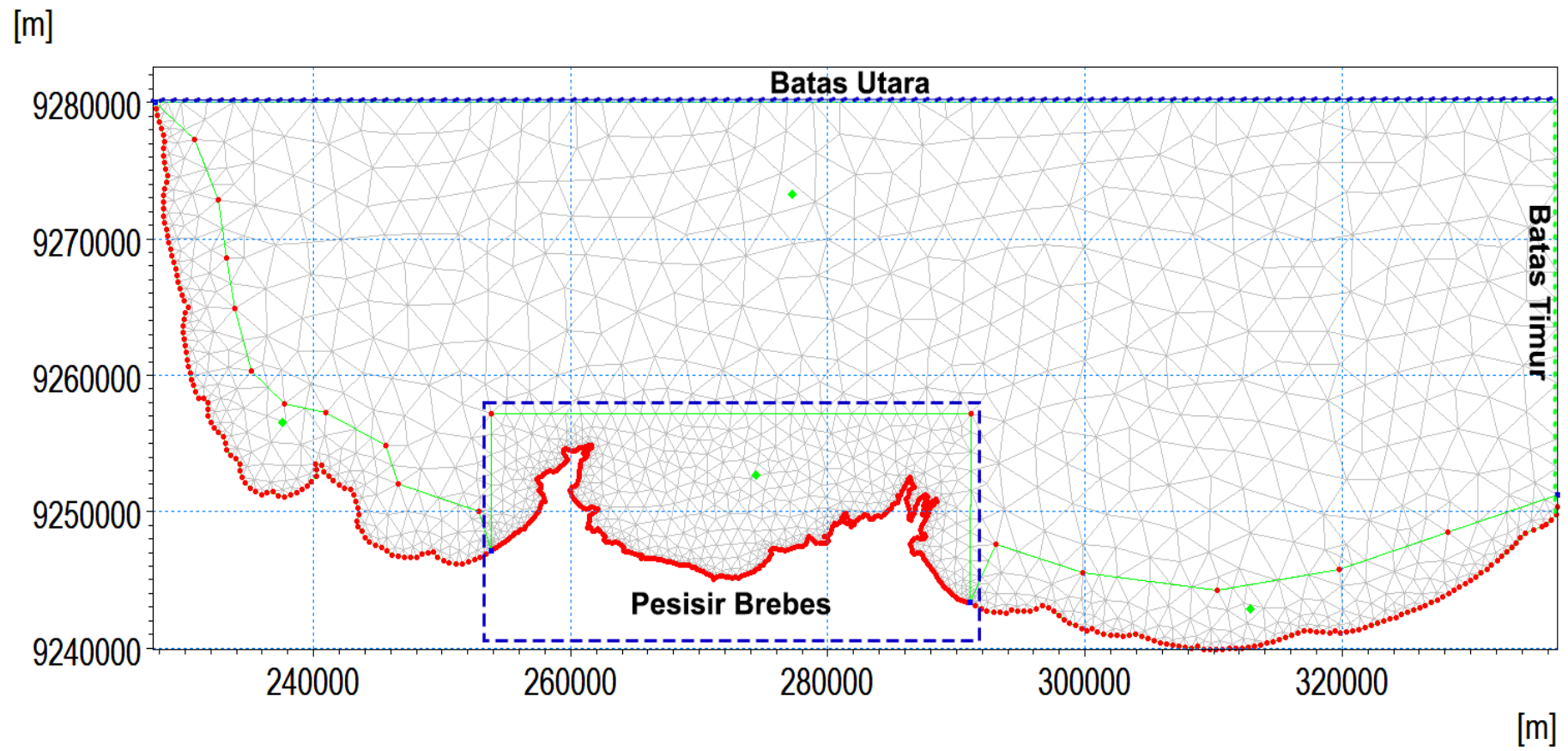
memastikan bahwa proses pembangkitan dan propagasi gelombang serta dinamika hidrodinamika dapat tersimulasikan secara utuh sebelum memasuki wilayah kajian. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan pengaruh *boundary effects* yang dapat terjadi jika batas boundary berada terlalu dekat dengan area kajian.



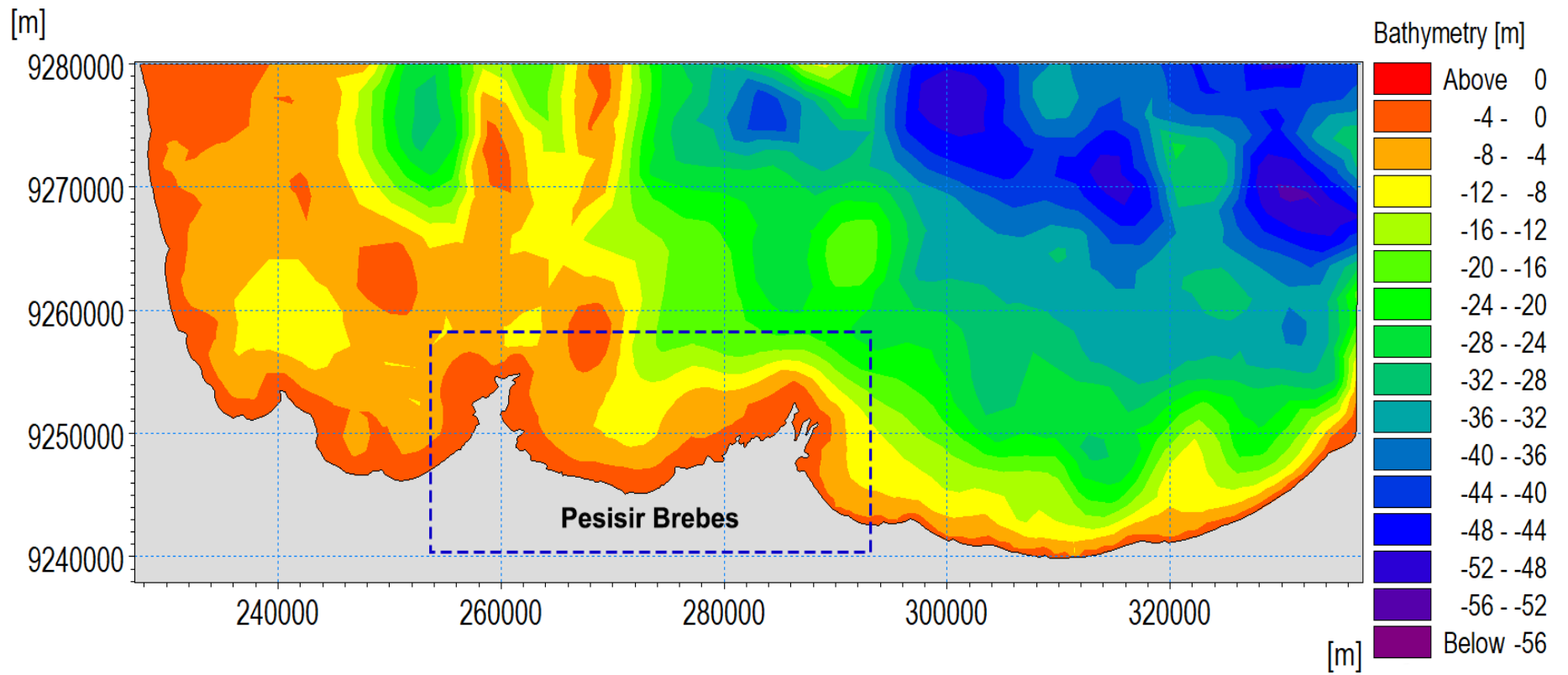
Gambar 3.11 Batimetri Perairan Brebes.

Dalam domain ini, kondisi fisik wilayah studi direpresentasikan dalam bentuk grid atau mesh dua dimensi (2D) yang memuat informasi topografi dan batimetri. Data elevasi dasar tersebut menjadi dasar bagi model untuk menghitung perubahan muka air, kecepatan arus, serta interaksi berbagai gaya hidrodinamika pada setiap elemen grid selama periode simulasi.

Selain berperan sebagai ruang komputasi, domain juga menjadi tempat penerapan berbagai input model lainnya. Parameter seperti kondisi batas pasang surut, data gelombang, gaya angin, serta parameter gesekan dasar diterapkan pada domain sehingga dapat berinteraksi secara numerik di dalam sistem model. Dengan demikian, domain tidak hanya menggambarkan batas wilayah simulasi, tetapi juga menentukan bagaimana data masukan diproses dan didistribusikan dalam model. Oleh karena itu, penentuan ukuran dan konfigurasi domain yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa proses hidrodinamika yang terjadi di wilayah kajian dapat direpresentasikan secara realistis dalam simulasi.



Gambar 3.12 Grid dan Mesh Lokasi Studi MIKE 21.



Gambar 3.13 Mesh dan Batimetri Lokasi Studi MIKE 21.

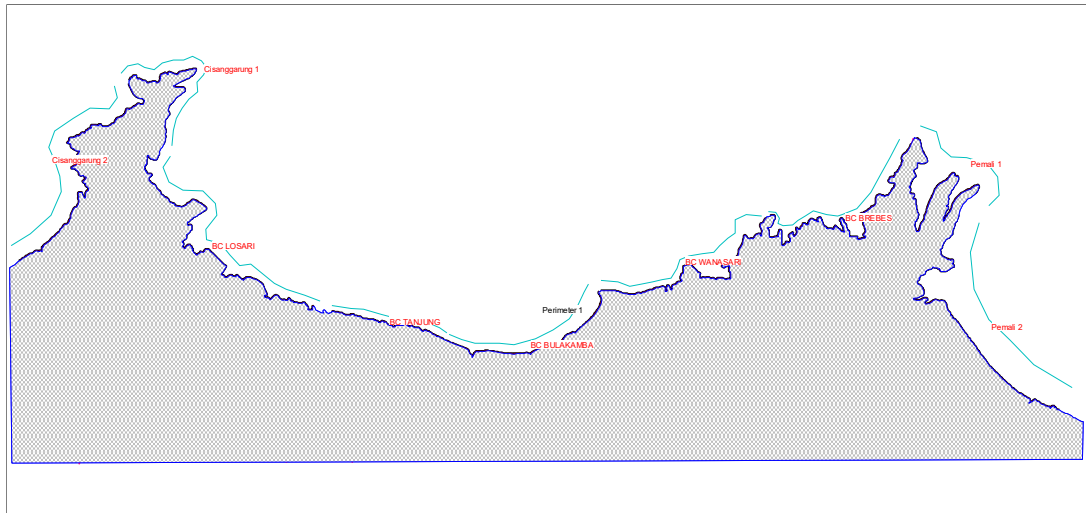
3.7 Konfigurasi Model HEC-RAS dalam Simulasi Banjir Pesisir

Pembangunan domain komputasi HEC-RAS 2D juga memanfaatkan data garis pantai yang diperoleh dari proses sebelumnya. Namun, berbeda dengan MIKE 21 yang mendefinisikan garis pantai sebagai *closed boundary*, pada HEC-RAS 2D garis pantai difungsikan sebagai *boundary condition* dengan input hidrograf muka air (*stage hydrograph*). Data ini berasal dari hasil simulasi hidrodinamika dan gelombang MIKE 21, yang diekstraksi pada titik-titik sepanjang garis pantai dan kemudian digunakan sebagai kondisi batas laut untuk mensimulasikan penjalaran genangan banjir rob ke wilayah daratan dalam model HEC-RAS.

Data garis pantai digunakan sebagai acuan utama dalam pembentukan perimeter berupa poligon yang mendefinisikan *2D Flow Area*, yaitu wilayah komputasi tempat persamaan aliran dua dimensi diselesaikan. Model domain ini memiliki luasan kurang lebih 16.959,33 ha yang meliputi lima kecamatan pesisir di Kabupaten Brebes. Sepanjang garis pantai Brebes, *boundary condition* dibagi menjadi sembilan segmen, yang masing-masing merepresentasikan variasi spasial kondisi muka air laut akibat perbedaan morfologi pantai dan karakteristik hidrodinamika. Segmen boundari yang digunakan meliputi BC Cisanggarung 1 dan 2, BC Losari, BC Tanjung, BC Bulakamba, BC Wanasri, BC Brebes, serta BC Pemali 1 dan 2.

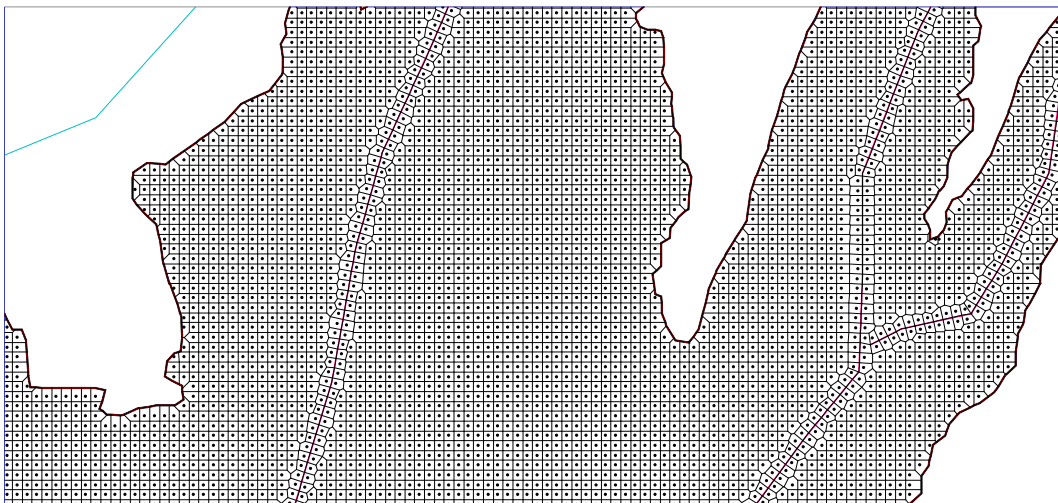
2D Flow Area yang telah terdefinisi oleh perimeter tersebut didiskretisasi menjadi mesh komputasi menggunakan *computational points*. Titik-titik ini membentuk jaringan grid dua dimensi yang tersebar di seluruh area model dan berfungsi sebagai elemen dasar perhitungan numerik dalam simulasi. Pada setiap sel grid, model menghitung parameter hidraulik seperti elevasi muka air, arah serta kecepatan aliran berdasarkan persamaan aliran dua dimensi yang diterapkan dalam Persamaan 2.18. Proses diskretisasi ini memungkinkan dinamika perambatan muka air dari batas laut menuju daratan dapat direpresentasikan secara spasial, sehingga proses masuknya air laut, penyebaran genangan, serta interaksi aliran dengan topografi daratan dapat disimulasikan secara lebih detail. Dengan demikian, konfigurasi mesh komputasi menjadi komponen penting dalam model, karena

tingkat kerapatan grid akan memengaruhi ketelitian model dalam merepresentasikan pola genangan banjir rob di wilayah kajian.



Gambar 3.14 Model Perimeter 2D dan Mesh Grid pada Pemodelan HEC-RAS.

Gambar berikut menunjukkan computational points yang tersebar secara teratur dalam grid. Meskipun debit sungai tidak dimodelkan, alur sungai direpresentasikan melalui *breaklines* pada *2D Flow Area* untuk menjaga bentuk dan elevasi saluran. Dengan demikian, sungai tetap berfungsi sebagai koridor hidraulik yang memungkinkan intrusi air laut saat pasang dan aliran balik saat surut, sehingga proses genangan dan penyurutan banjir rob dapat direpresentasikan.



Gambar 3.15 Detail Computational Points pada Setiap Grid.

Karakteristik permukaan lahan juga mempengaruhi respon hidrodinamika di dalam domain. Data tutupan lahan dioverlay dengan domain komputasi untuk menentukan distribusi spasial koefisien kekasaran Manning (n). Setiap kelas tutupan lahan kemudian dikonversi menjadi nilai Manning's n berdasarkan klasifikasi pada **Tabel 3.2**, sehingga variasi kekasaran permukaan, seperti area terbangun, tambak, lahan terbuka, dan vegetasi, dapat direpresentasikan secara kuantitatif dalam perhitungan aliran dan genangan banjir rob.



Gambar 3.16 Sebaran Data Tutupan Lahan di Pesisir Brebes.

Data DEM selanjutnya diintegrasikan ke dalam *2D Flow Area* sebagai terrain model, yang berfungsi sebagai dasar untuk perhitungan elevasi muka air dan kedalaman genangan pada setiap *computational cell*. Dengan demikian, setiap sel pada grid 2D memiliki nilai elevasi yang merepresentasikan kondisi topografi aktual di wilayah pesisir Brebes, termasuk dataran rendah, tanggul alami, dan alur sungai.

Dengan mengintegrasikan topografi (DEM), tutupan lahan (Manning's n), perimeter *2D Flow Area*, dan *breaklines*, model HEC-RAS 2D mampu merepresentasikan secara spasial dan fisik dinamika genangan banjir rob di pesisir Brebes. Simulasi dilakukan pada setiap fase ENSO untuk menganalisis hasil genangan dengan mengkomparasi kedalaman, luas, dan durasi genangan pada setiap fase.



Gambar 3.17 Model Domain Simulasi HEC-RAS.