

Pemodelan Penjalaran Tsunami Akibat Erupsi Gunung Anak Krakatau Beserta Skenario *Dike*, Studi Kasus Teluk Jakarta

Nur Chasanah, Haryo Dwito Armono, Sujantoko, dan Juventus Welly Radianta Ginting
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: armono@oe.its.ac.id.

Abstrak—Gunung Anak Krakatau merupakan gunung api aktif di Indonesia. Gunung Anak Krakatau terus memperlihatkan aktifitas vulkanik, hal ini dibuktikan oleh tsunami pada 22 Desember 2018 yang di akibatkan oleh erupsi Gunung Anak Krakatau. Jakarta sebagai ibukota negara dan memiliki jumlah penduduk terpadat di Indonesia sudah sewajarnya memiliki rencana mitigasi dini untuk mengurangi dampak dari bencana tsunami. Sejalan dengan usaha mitigasi tersebut, Pemda DKI Jakarta mengemukakan rencana tata ruang wilayah Jakarta tahun 2030 yang dikenal sebagai *Master Plan NCICD (National Capital Integrated Coastal Development)*. Panduan *Master Plan NCICD* memiliki proyek utama dalam pengembangan pesisir Teluk Jakarta yaitu dengan pembangunan tanggul laut. Akan tetapi menurut penelitian sebelumnya, desain tanggul laut *Master Plan NCICD* yang berbentuk garuda dinilai kurang efektif dalam segi *hydraulic*. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan penjalaran tsunami yang disebabkan oleh erupsi Gunung Anak Krakatau ke Teluk Jakarta. Selain itu, penelitian dilanjutkan dengan memodelkan skenario jamak tsunami *dike* sebagai upaya dalam mereduksi ketinggian tsunami yang sampai ke Teluk Jakarta. Adapun kondisi awal kenaikan muka air laut merujuk pada tsunami akibat erupsi Gunung Krakatau tahun 1883. Pemodelan tsunami dilakukan dengan bantuan *software MIKE 21*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan penjalaran tsunami selama 6 jam, dan diperoleh ketinggian elevasi muka air 1.437 meter pada titik validasi. Sedangkan tinggi elevasi muka air dari data validasi adalah 1.451 meter. Pemodelan dengan skenario *dike* dapat mengurangi tinggi elevasi muka air di dalam area *dike* masing – masing adalah 100% untuk skenario *dike 1* (tipe *dike* tertutup), 99.58% untuk skenario *dike 2* (tipe *dike* semi tertutup dengan 1 gap), 86.26% untuk skenario *dike 3* (tipe *dike* terbuka dengan 11 gap).

Kata Kunci—Gunung Anak Krakatau, *NCICD Jakarta*, Tanggul Laut, Tsunami, *Tsunami Dike*.

I. PENDAHULUAN

BERADA dalam *ring of fire* menjadikan Negara Indonesia kaya akan gunung berapi, Indonesia memiliki gunung api terbanyak di dunia, yaitu 129 gunung aktif (15% dari seluruh gunung api di dunia). Salah satu gunung api aktif di Indonesia adalah Gunung Anak Krakatau yang berlokasi di Selat Sunda, Lampung. Gunung Krakatau meletus dahsyat pada tahun 1883, letusan tersebut menjadi letusan gunung api terdahsyat pada abad ke-19 setelah meletusnya Gunung Tambora pada tahun 1815. Letusan Gunung Krakatau 1883 menyebabkan tsunami besar yang menyapu hampir seluruh pantai di Lampung dan Banten. Gelombang tsunami diiringi oleh besarnya material magma dan batuan panas yang dimuntahkan oleh Krakatau telah



Gambar 1. Konsep Tanggul Laut *Master plan NCICD*.

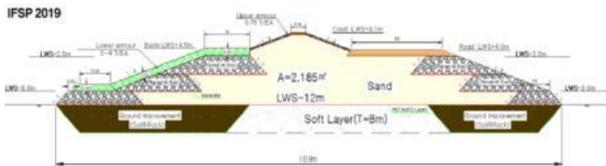
menewaskan sekitar 36.000 jiwa disertai dengan hancurnya berbagai pondasi penopang kehidupan masyarakat [1].

Menurut Verbeek dalam jurnal yang ditulis oleh Sutawidjaja (2006), penelitian mengenai tsunami yang diakibatkan letusan Gunung Krakatau tahun 1883 di simulasikan dengan inisiasi awal pembangkitan gelombang dengan ledakan phreatomagmatik. Ketika hasil simulasi di analisis, terlihat gelombang tsunami mengalami penjalaran dan bertransformasi ke segala arah. Gelombang tsunami menyebar ke arah selatan menuju Samudera Hindia dan sebagian gelombang terdifraksi ke arah *onshore*. Gelombang tsunami juga menyebar ke arah utara, bepropagasi ke arah Laut Jawa, dan sebagian gelombang mengalami pembelokan hingga ke Teluk Jakarta. Gelombang tsunami yang sampai ke Teluk Jakarta mengalami deformasi gelombang, sehingga menurut hasil simulasi tinggi gelombang maksimum yang sampai di Teluk Jakarta adalah 3.8 m dan tinggi gelombang minimum adalah 0.4 m.

Jakarta adalah ibukota negara Indonesia yang menjadi pusat segala pengembangan infrastruktur yang mendukung perekonomian Indonesia. Namun, sebagai salah satu kota penting di Indonesia, Jakarta memiliki permasalahan pengelolaan wilayah pesisir yang kompleks. Permasalahan pesisir Jakarta telah mengarah pada degradasi lingkungan yang memiliki pengaruh negatif, diantaranya meningkatnya banjir rob, menurunnya ketersediaan air bersih, menurunnya kualitas dan kuantitas hasil perikanan serta dampak negatif lainnya. Pemda DKI Jakarta melalui Perda No.1 Tahun 2012 mengenai Rencana Tata Ruang Wilayah DKI 2030 mengemukakan satu program utama yang dikenal sebagai rencana pembangunan tanggul laut. Rencana ini juga dikenal sebagai *Master Plan NCICD (National Capital Integrated Coastal Development)*. Panduan *Master Plan NCICD* memiliki proyek utama dalam pengembangan pesisir Jakarta yaitu dengan pembangunan tanggul laut.



Gambar 2. Jatuhnya Material Erupsi.



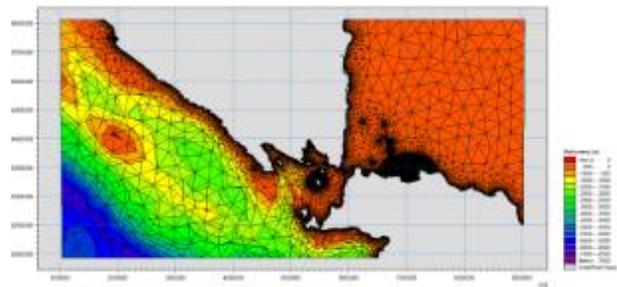
Gambar 3. Layout tempat sampung tsunami dike

Konsep tanggul laut yang dicanangkan dalam *Master Plan NCICD* sejalan dengan usaha mitigasi bencana untuk meminimalisir kemungkinan gelombang tsunami akibat erupsi Gunung Anak Krakatau. Design tanggul laut yang akan di bangun di lepas laut di Teluk Jakarta diusung dengan konsep Garuda. Konsep ini disebut sebagai lambang negara, kepala garuda menghadap ke arah utara dan sayap melintang ke arah barat dan timur. Bachtiar dkk (2017) telah menguji coba design tanggul laut tersebut dari segi *hydraulic*. Menurut penelitiannya, layout tanggul berbentuk garuda tersebut kurang optimum dalam mereduksi tinggi gelombang tsunami yang menjalar ke Teluk Jakarta. Hasil simulasi menunjukkan tinggi gelombang maksimum terdeformasi ke arah kepala garuda yang berbentuk cekung hingga mencapai elevasi maksimum 11 m dan elevasi minimum 6 m.

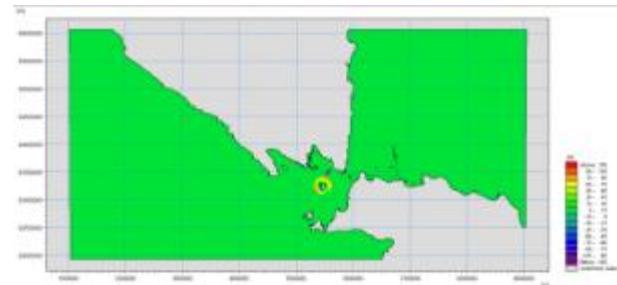
Berdasarkan latar belakang tersebut, dalam penelitian ini kami memodelkan penjalaran gelombang tsunami akibat erupsi Gunung Anak Krakatau dengan bantuan perangkat lunak *MIKE 21*. Dari hasil analisa ini diharapkan dapat menunjukkan tinggi gelombang tsunami pertama yang mencapai Teluk Jakarta dan waktu penjalaran dari Selat Sunda ke Teluk Jakarta. Pemodelan dilakukan melalui simulasi numerik yang bersumber dari *initial condition* Tsunami Krakatau 1883. Simulasi dilanjutkan dengan pemodelan tanggul laut yang berfungsi sebagai *tsunami dike* sebagai upaya mitigasi bencana yang sejalan dengan program *NCICD* yang dicanangkan pemerintah.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Simulasi model digunakan dengan mengaplikasikan metode *nested*, dimana hasil simulasi model detail disimulasikan dari hasil simulasi model global. Data yang dimasukkan ke dalam model detail berupa kenaikan muka air hasil simulasi model global. Model global mencakup Selat Sunda dan Teluk Jakarta, sedangkan model detail berupa model dengan cakupan area Teluk Jakarta. Model dibangun dengan konfigurasi *unstructure-grid* dimana domain model mengikuti profil garis pantai yang kompleks dengan resolusi grid kasar ke arah lepas pantai dan lebih



Gambar 4. Domain Model Global.

Gambar 5. *Initial Condition* Model Global

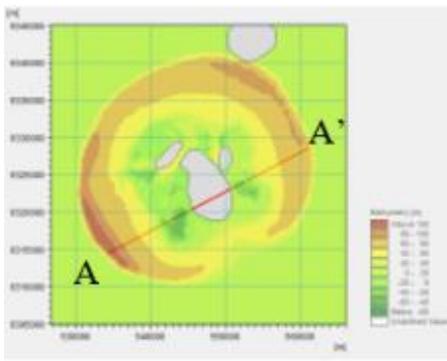
detail ke arah pantai. Hal ini berfungsi untuk mengefektifkan waktu komputasi.

A. Tinjauan Pustaka

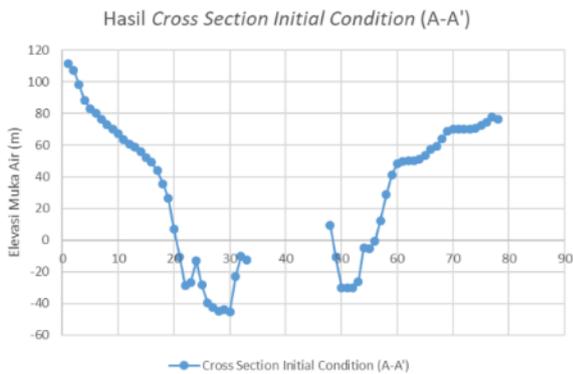
Gunung Anak Krakatau (286.63 m dpl) adalah gunung berapi strato tipe A, Gunung Krakatau merupakan salah satu dari empat gugusan pulau yang terletak di Selat Sunda. Berdasarkan hasil pengukuran topografi [2], selama 21 tahun Gunung Krakatau mengalami penambahan luas daratan dan ketinggian. Pada 1983 luasnya adalah 156,75 ha dengan ketinggian 201,5 m dpl maka pada tahun 2004 berturut – turut adalah 212,5 ha dan 286,63 m dpl.

Sutawidjaja (2006) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa pada tahun 2040 kemungkinan akan terjadi kembali letusan dahsyat yang disamakan dengan letusan Gunung Krakatau 1883. Pernyataan tersebut didasarkan pada analisis batuan lava yang menghasilkan komposisi silika yang terus meningkat setiap waktu. Lelehan lava tersebut memasuki persentase silika 54.77% terhitung pada bulan Juli 1996. Apabila peningkatan persentase silika terjadi secara konsisten dan diasumsikan meningkat satu persen dalam sepuluh tahun, maka untuk mencapai persentase silika 68% (besarnya persen silika ketika terjadi letusan Gunung Krakatau 1883) dibutuhkan waktu 140 tahun.

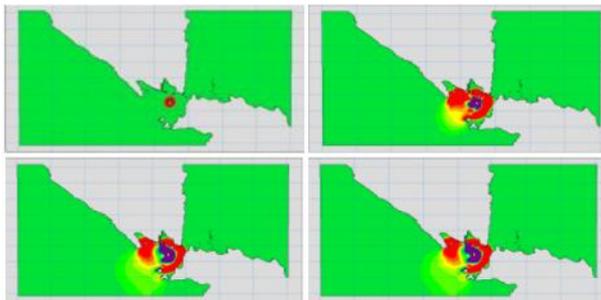
Menurut Sutawidjaja (2006) pada 27 Agustus 1883 Gunung Krakatau mengalami erupsi dan kejadian ini dianggap sebagai kejadian terbesar dalam sejarah meletusnya Gunung Krakatau. Lontaran material vulkanik dengan volume 18 km³, dan tinggi kolom letusan 80 km telah menimbulkan tsunami setinggi 30 meter di sepanjang pantai barat Banten dan pantai selatan Lampung. Stehn (1939) berpendapat bahwa pembentukan kaldera terjadi akibat runtuhnya gunung api atau longsoran di dasar laut oleh pengosongan magma dan gas yang tererupsi. Runtuhan ini menekan air laut sehingga menyebabkan terjadinya tsunami yang menyapu pantai barat Jawa dan pantai selatan Sumatera. Pendapat kedua oleh Yokoyama (1981) yang menyebutkan tsunami terjadi setelah adanya pelepasan energi yang sangat besar. Ia melakukan survei gravimetri di kawasan Krakatau, dan berkeyakinan bahwa tsunami terjadi akibat erupsi material 18 km³ yang menekan air laut.



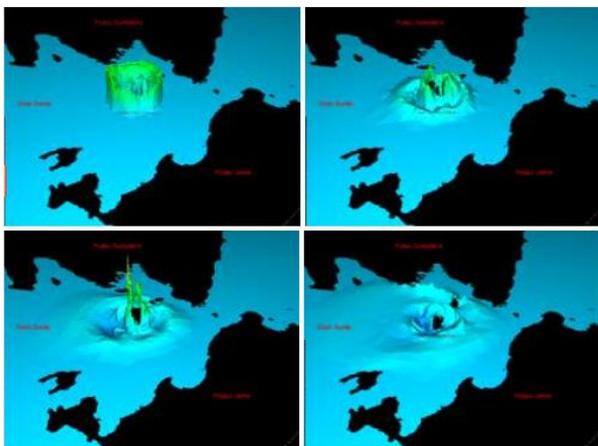
Gambar 6. Garis Potong *Initial Condition*.



Gambar 7. Grafik *Cross Section Initial Condition (A-A')*



Gambar 8. 50 *Step* Pertama dari 864 *Step* Hasil *Running* Penjalaran Gelombang 2 Dimensi.



Gambar 9. 50 *Step* Pertama dari 864 *Step* Hasil *Running* Penjalaran Gelombang 3 Dimensi.

Menurut Imamura dkk (2011) tsunami hasil erupsi Gunung Krakatau pada tahun 1883 disebabkan oleh tiga sebab yaitu runtuhnya kaldera, letusan phreatomagmatic, dan aliran piroklastik. Dari ketiga sebab itu, dilakukan analisa numerik untuk mengetahui penyebab yang paling mungkin untuk membangkitkan tsunami. Dari hasil penelitian, disimpulkan bahwa aliran piroklastik adalah

Tabel 1.
Validasi Elevasi Muka Air

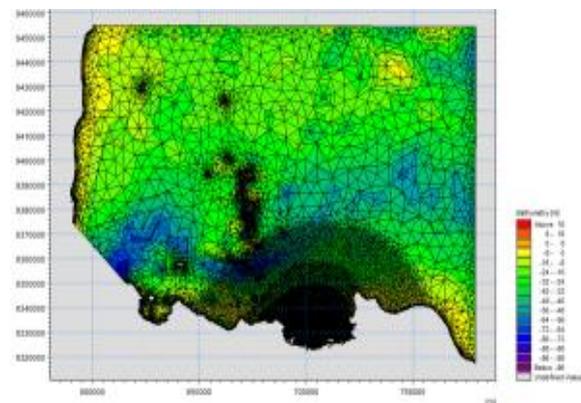
Tinggi Elevasi Muka Air Validasi	Tinggi Elevasi Muka Air Pemodelan
1.45 m	Manning Number 20 0.89030 m
	Manning Number 24 1.0927 m
	Manning Number 28 1.27688 m
	Manning Number 31 1.40111 m
	Manning Number 32 1.44041 m
	Manning Number 33 1.47818 m

Tabel 2.
Koreksi MAPE

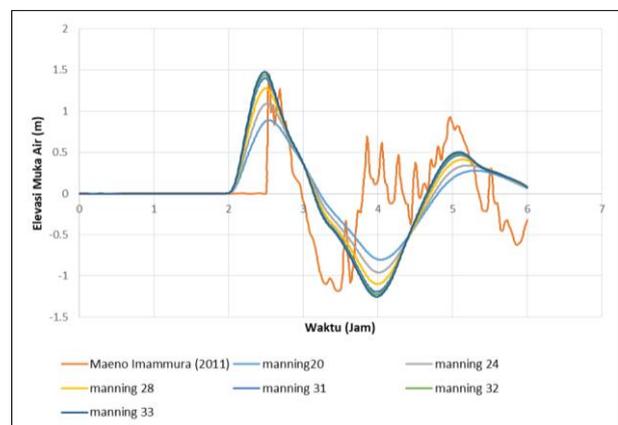
MAPE	Interpretasi
<10%	Sangat Baik
10% - 20%	Baik
20% - 50%	Cukup
>50%	Buruk

Tabel 3.
Validasi Nilai Eddy Viscosity

Nilai Eddy Viscosity	Hasil Koreksi
0.27	14.3451%
0.28	14.3419%
0.29	14.3373%
0.3	14.3336%

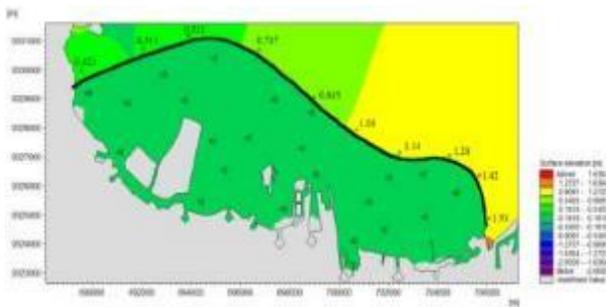


Gambar 10. Domain Model Detail.

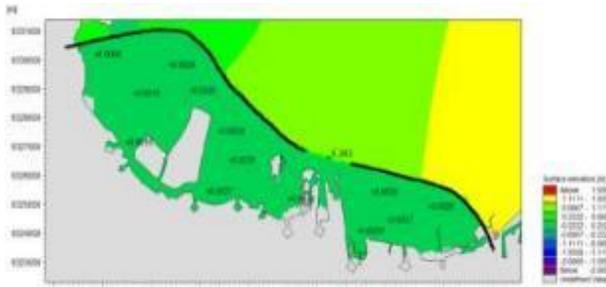


Gambar 11. Grafik Validasi Model Global

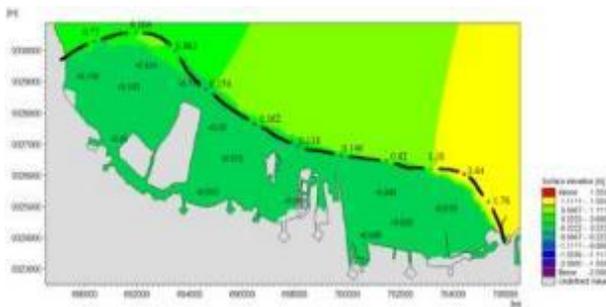
penyebab yang paling mungkin. Aliran piroklastik ini disimulasikan dengan aliran bervolume >5 km³ dan debit rata – rata 107 m³/s yang dialirkan ke air. Penelitian ini membuktikan tinggi tsunami yang dimodelkan hampir sama dengan rekaman pasang surut di Batavia (Jakarta) yaitu 1.4 m dengan periode 2 jam.



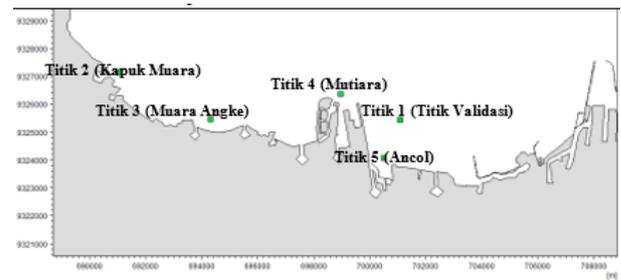
Gambar 12. Persebaran Elevasi Muka Air pada Dike 1.



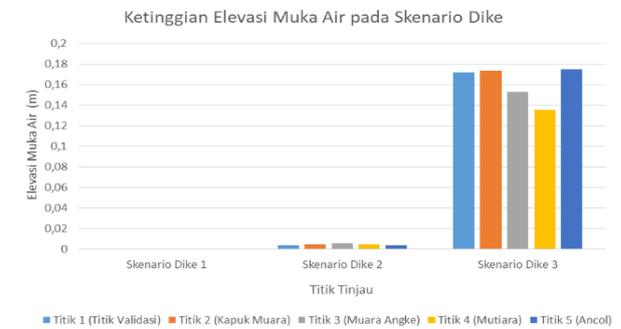
Gambar 13. Persebaran Elevasi Muka Air pada Dike 2.



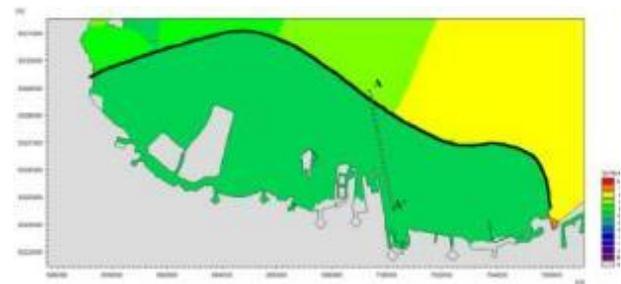
Gambar 14. Persebaran Elevasi Muka Air pada Dike 3



Gambar 15. Lokasi Titik Tinjau.



Gambar 16. Perbandingan Elevasi Setiap Skenario.



Gambar 17. Cross Section A-A'

Tabel 4. Persentase Penurunan Elevasi Muka Air

Skenario Dike	Tipe Tanggul	Persentase rata-rata penurunan elevasi muka air
Skenario Dike 1	Tertutup	
Skenario Dike 2	Semi Terbuka dengan 1 gap	
Skenario Dike 3	Terbuka dengan 11 gap	

Tsunami merupakan serangkaian gelombang air pasang yang bergerak secara cepat ke arah daratan. Tsunami dapat disebabkan oleh gempa bumi atau letusan gunung api laut [3]. Menurut Imamura (1994) gerak gelombang tsunami diekspresikan dengan teori gelombang perairan dangkal. Teori gelombang panjang yang didekati dengan teori pendekatan yang berlaku untuk gelombang dengan kedalaman relatif kecil yang mana percepatan vertikal dari air dapat diabaikan dengan percepatan gravitasi. Berikut persamaan perairan dangkal yang digunakan dalam perangkat lunak MIKE 21 Flow Model FM modul HD [4].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1)$$

Persamaan momentum dalam arah x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) u_s S \quad (2)$$

Persamaan momentum dalam arah y:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) v_s S \quad (3)$$

Dimana :

- x,y = koordinat arah x dan y (°)
- t = waktu (s)
- η = elevasi permukaan air laut (m)
- u_s,v_s = kecepatan partikel air arah x dan y (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)
- f = parameter coriolis
- ρ = densitas air
- S = magnitude discharge

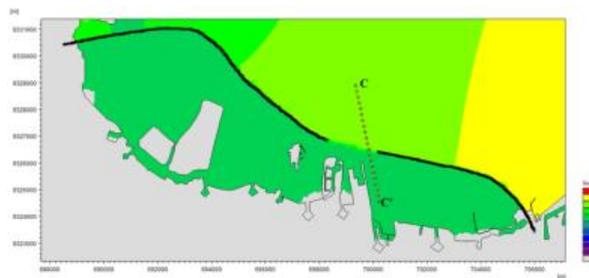
B. Pengumpulan Data

1) Batimetri

Data batimetri untuk sebagian besar area pemodelan bersumber dari GEBCO dan untuk area – area fokus kajian seperti area Gunung Anak Krakatau dan area Teluk Jakarta didapatkan dari digitasi manual.



Gambar 18. Hasil Cross Section A-A'.



Gambar 19. Cross Section C-C'.



Gambar 20. Hasil Cross Section C-C'.

2) Kenaikan Muka Air

Pembangkitan tsunami akibat erupsi Gunung Krakatau diakibatkan oleh tumpahan material erupsi Gunung Krakatau ke perairan. Menurut penelitian Maeno, dkk (2011) menyimpulkan aliran piroklastik (jatuhnya material ke air) adalah mekanisme paling memungkinkan untuk pembangkitan tsunami Krakatau 1883. Aliran piroklastik dengan volume 18 km³ dan tinggi kolom 80 km memasuki air dan mampu membangkitkan air pasang tsunami.

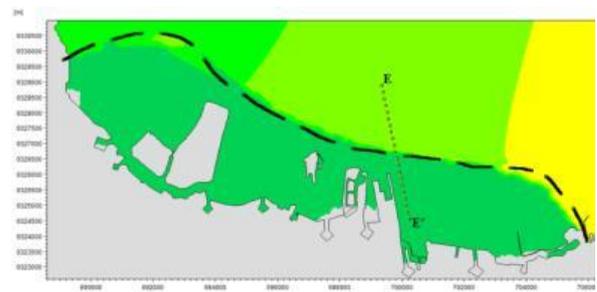
3) Shoreline

Data shoreline atau garis pantai berupa garis pantai bagian selatan pulau sumatra dan bagian barat pulau jawa. Data shoreline ditambah dengan pulau – pulau yang berada dilokasi tersebut dan data shoreline pulau reklamasi. Data shoreline diperoleh dari hasil digit manual dengan sumber google earth. Data shoreline berbentuk format (*.xyz).

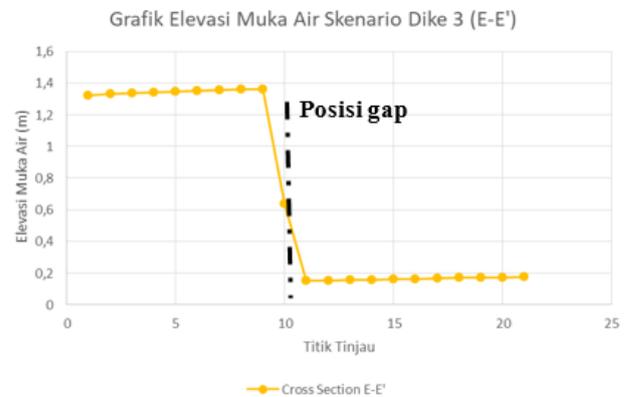
4) Tsunami Dike

Design tsunami dike diperoleh dari Balai Pengembangan dan Penelitian Pantai. Layout tampak samping yang dari dike dapat dilihat pada Gambar 3.

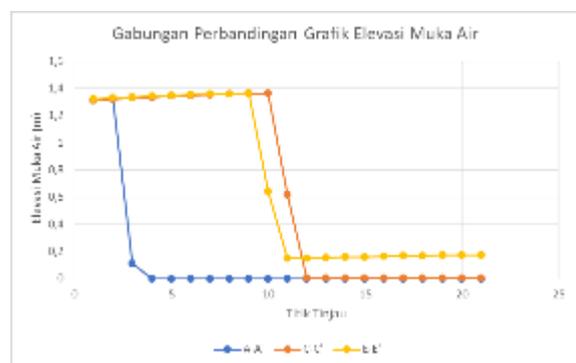
Desain ketinggian struktur tsunami dike yang dimodelkan memiliki beberapa parameter yang mempengaruhi. Diantaranya adalah tidal level, wave run-up height, settlement yang terdiri dari land subsidence dan



Gambar 21. Cross Section E-E'.



Gambar 22. Hasil Cross Section E-E'.



Gambar 23. Gabungan Hasil Cross Section E-E'.

consolidation, freeboard, dan crest level. Data wave run – up dibagi menjadi empat bagian. Bagian wave run - up tertinggi menunjukkan angka 9.1 meter sedangkan wave run – up terendah adalah 7 meter.

Pada penelitian ini, Pre-design yang dimodelkan hanya tampak atas saja dan memiliki 5 tipe tsunami dike, karena keterbatasan ruang pada jurnal ini ada 3 dike yang akan dibahas:

1. Skenario 1
 - Base Case
 - Tipe tanggul tertutup
 - Tinggi tanggul sesuai design dike height
 - Lebar tanggul 6 m
2. Skenario 2
 - Tipe tanggul semi tertutup
 - Memiliki satu pintu untuk jalur pelayaran
 - Kondisi tanggul existing
 - Tinggi tanggul sesuai design dike height
 - Lebar tanggul 6 m
3. Skenario 3
 - Tipe tanggul open dike
 - Tanggul memiliki banyak gap
 - Tinggi tanggul sesuai design dike height
 - Lebar tanggul 6 m

5) Validasi

Data validasi berasal dari jurnal yang berjudul “*Tsunami Generation by a rapid entrance of pyroclastic flow in to the sea during the 1883 Krakatau Eruption, Indonesia*”. Validasi dilakukan dengan membandingkan elevasi muka air dari jurnal dengan elevasi muka air hasil simulasi pemodelan (hasil output *software MIKE 21*).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Daerah Penelitian

Daerah penelitian berlokasi di Teluk Jakarta, perairan yang terletak di sebelah utara Jakarta. Teluk Jakarta secara geografis terletak diantara Tanjung Karawang disebelah timur dan Tanjung Pasir disebelah barat, dan secara administratif terletak di tiga provinsi yaitu Provinsi Banten, DKI, dan Provinsi Jawa Barat. Perairan Teluk Jakarta merupakan perairan dangkal semi tertutup dengan kedalaman rata – rata 15 meter dengan luas 514 km². Perairan Teluk Jakarta memberikan banyak jasa ekologis seperti pelayaran, pelabuhan, turime, dan perikanan. Fokus daerah penelitian kedua adalah Gunung Anak Krakatau. Gunung Anak Krakatau terletak di Selat Sunda, termasuk ke dalam wilayah Lampung Selatan. Gunung Anak Krakatau adalah salah satu gunung api aktif dari 129 gunung api di Indonesia, yang berderet sepanjang 7000 km mulai ujung utara Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, Maluku sampai ke Sulawesi Utara.

B. Pemodelan Global

Secara garis besar pemodelan global dengan menggunakan program MIKE 21 pada tugas akhir ini dibagi menjadi tiga tahapan. Tahapan tersebut antara lain adalah *meshing* dengan menggunakan *mesh generator* (*.mdf), pembuatan file (*.dfsu) sebagai *input* elevasi muka air, dan simulasi hidrodinamika dalam modul HD. Dalam pemodelan ini datum yang digunakan adalah *UTM* (*Universal Transverse Mercator*).

1) Meshing Pemodelan Global

Meshing pada pemodelan ini berdasarkan *flexible mesh* dengan menggunakan *mesh generator* dari MIKE 21. Tahapan dalam *meshing* yang pertama kali dilakukan adalah mengimpor data *shoreline* ke dalam *mesh generator*. Pembuatan *mesh* pada pemodelan global ini ditentukan oleh beberapa parameter yakni luas elemen *mesh* maksimum 500 x 106 m², sudut *mesh* minimum sebesar 26 derajat, serta jumlah titik maksimum 100 x 10³, *smoothing* dan jumlah iterasi 10 kali.

2) Domain Model Global

Setelah *meshing* berhasil dilakukan pemodelan berlanjut dengan membuat file berekstensi (*.mesh) yang akan digunakan sebagai domain model global. File domain merupakan hasil dari interpolasi *mesh* terhadap nilai batimetri.

3) Initial Condition

Pembuatan *initial condition* memiliki tahapan yang sama seperti pembuatan domain. File *initial condition* merupakan hasil interpolasi *mesh* terhadap nilai digitasi kenaikan muka air akibat erupsi Gunung Anak Krakatau.

Untuk lebih menunjukkan kenaikan muka air laut dengan lebih jelas, dapat dilihat dari hasil *cross section A-A'*.

Hasil dari *cross section (A-A')* pada Gambar 6. *initial condition* di tunjukkan oleh grafik pada Gambar 7. Pada

bagian tengah grafik terdapat gap (nilai yang tidak terisi) yang menunjukkan bahwa bagian tersebut adalah daratan atau area Gunung Anak Krakatau.

C. Running Model Global

Running model dilakukan pada modul *hydrodynamic Flow Model FM MIKE 21*. Dalam simulasi ini waktu yang digunakan adalah 6 jam dengan *time step* interval 5 detik dan jumlah *time step* sebanyak 864. Untuk proses kalibrasi pada pemodelan global, parameter *bed resistance* dan *eddy viscosity* di input dengan beberapa nilai yang berbeda.

Model global di *running* dengan 6 nilai *manning number* yang berbeda, dengan 1 nilai *eddy viscosity* yang sama. Setelah menemukan nilai *manning number* yang memiliki nilai koreksi paling kecil terhadap data validasi, nilai *manning number* tersebut akan di *running* kembali dengan 5 nilai *eddy viscosity* yang berbeda untuk mencari nilai koreksi yang lebih mendekati data validasi.

D. Hasil Simulasi 2 Dimensi Model Global

Setelah *running* berhasil dilakukan, hasil *running* akan mengeluarkan *output* berupa penjalaran tsunami. *Output* penjalaran tsunami tersimpan dalam file berformat ‘.dfsu’ dengan jumlah 864 *time step*. Gambar 8 adalah dokumentasi 50 *step* pertama hasil penjalaran gelombang.

E. Validasi Model Global

Validasi dilakukan dengan mengekstrak grafik gelombang pada titik tinjau di Teluk Jakarta. Grafik ini diperoleh dari file (*.dfsu) yang mana file ini merupakan salah satu *output* dari *running* model. Dalam koordinat UTM titik tinjau memiliki nilai *Easting* 701091.346171 dan *Northing* 9325432.752811. Titik ini berdekatan dengan Pelabuhan Mutiara.

Gambar 11 merupakan perbandingan grafik hasil *running* dengan nilai *manning number* yang berbeda, gabungan grafik tersebut di plot bersama dengan grafik validasi.

Evaluasi hasil simulasi dilakukan dengan perbandingan ketinggian gelombang hasil simulasi dengan gelombang validasi. Ketinggian yang hampir sama dengan gelombang validasi adalah hasil yang akan di kalibrasi ulang bersama dengan koefisien *eddy viscosity*. Dengan menggunakan evaluasi dengan perbandingan ketinggian gelombang, diantara 5 nilai *manning number* yang telah dimodelkan memiliki koreksi paling baik sebesar dengan *manning number* 32 m^(1/3)/s. Perbandingan tinggi gelombang dapat dilihat pada Tabel 1.

Manning number 32 m^(1/3)/s kemudian di setting kembali dengan 5 *eddy viscosity*. Evaluasi hasil simulasi dilakukan dengan perhitungan presentase rata – rata kesalahan absolut atau Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Menurut Heizer dan Render (2015) dalam penelitian Haviz (2019) disebutkan MAPE didapat dari selisih absolut antara data pengukuran dan data hasil simulasi dibanding dengan data pengukuran, dikali seratus persen. Persamaan dari kriteria MAPE adalah sebagai berikut :

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{|h_o - h_1|}{h_o} \right) \times 100\% \quad (4)$$

Dimana,

ho= Data Pemodelan

h1= Data Hasil Simulasi

n = Jumlah Data

Hasil koreksi setiap nilai *eddy viscosity* yang telah selesai di *running* dapat dilihat pada Tabel 3.

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa hasil koreksi dari nilai eddy viscosity 0.3 adalah yang terkecil, yaitu sebesar 14.3336%.

F. Pemodelan Detail

Pembuatan pada model detail memiliki langkah – langkah yang sama dengan pembuatan model global. Pembuatan model detail ini bertujuan untuk lebih mendetailkan proses komputasi dengan memperkecil luas area meshing.

1) Meshing Pemodelan Detail

Parameter pembuatan mesh pada pemodelan detail terdiri dari luas elemen mesh maksimum $26 \times 106 \text{ m}^2$, sudut mesh minimum sebesar 26 derajat, serta jumlah titik maksimum 100×10^3 , smoothing dan jumlah iterasi 10 kali.

Untuk mengefektifkan waktu komputasi, mesh dibuat teliti pada fokus daerah penelitian saja yaitu daerah Teluk Jakarta. Cara yang digunakan adalah membuat arc sebagai batasan mesh yang ingin di detailkan. Batasan mesh di Teluk Jakarta dibagi menjadi 3 bagian mesh dengan maximum area 10.000 m^2 , 30.000 m^2 , 70.000 m^2 , 300.000 m^2 , 700.000 m^2 .

2) Domain Model Detail

Untuk membuat domain dibutuhkan interpolate *mesh* dengan kombinasi batimetri. Setelah file selesai diinterpolate, file di *export* menjadi domain dengan format file (*.mesh).

3) Initial Condition Model Detail

Initial condition pada model detail tidak perlu dibuat lagi. Initial condition pada model detail dikondisikan dengan memakai initial condition pada model global. Adapun cara melakukannya adalah dengan meng-extract file initial condition pada model besar kemudian file tersebut dikeluarkan pada salah satu boundary condition pada model detail. Dalam pemodelan ini, initial condition akan dikelarkan pada boundary condition yang berbatasan dengan Selat Sunda. File initial condtion memiliki format (*.dfs1)

G. Running Pemodelan Tsunami Dike

Untuk melakukan running pada pemodelan detail dibutuhkan file dengan format (*.mesh), (*.dfsu), dan file digitasi tsunami dike. File dengan format (*.mesh) dibuat dengan area yang lebih kecil yaitu meliputi wilayah Teluk Jakarta dan perairan di atasnya. Hal ini bertujuan agar meshing yang dilakukan bisa lebih detail dan akurat. File dengan format (*.dfsu) diambil dari initial condition model global yang kemudian dikeluarkan pada salah satu boundary condition pada model detail. Kemudian untuk file digitasi tsunami dike merupakan file berformat (*.xyz) yang merepresentasikan tipe skenario dike.

H. Persebaran Elevasi Muka Air dalam Skenario Dike

Peta persebaran elevasi muka air ini menunjukkan hasil ekstrak data simulasi pemodelan detail dengan adanya pengaruh skenario dike 1. Skenario dike 1 merupakan tipe tanggul tertutup yang tidak memiliki gap. Tanggul di pasang menutupi bagian barat Teluk Jakarta. Tanggul tersebut memiliki panjang 20 km yang membentang dari Pantai Ancol (batas timur) sampai Pelabuhan Angke (batas barat). Dengan adanya skenario dike 1 yang di pasang mengakibatkan penjalaran gelombang tsunami tidak dapat masuk ke dalam area dalam tanggul. Hal ini menyebabkan ketinggian elevasi di dalam area tanggul adalah 0 m. Peta persebaran elevasi muka air yang di tampilkan adalah elevasi muka air pada time step ke 360 dari total 864 time

step. Gambar 12 adalah peta persebaran elevasi muka air pada skenario dike 1.

Skenario *dike 2* merupakan tipe tanggul semi terbuka dan memiliki satu gap. Gap ini berfungsi sebagai jalur pelayaran dan satu – satunya pintu keluar masuk air. Skenario *dike 2* memiliki total panjang tanggul sebesar 19 km dan panjang gap pada tanggul sebesar 1900 meter. Elevasi muka air penjalaran tsunami berhasil di reduksi dengan adanya tanggul, sehingga ketinggian elevasi muka air di dalam area dike mengalami penurunan. Peta persebaran elevasi muka air yang di tampilkan adalah elevasi muka air pada *time step* ke 360 dari total 864 *time step*. Gambar 13 adalah peta persebaran elevasi muka air pada skenario dike 2.

Skenario dike 3 merupakan tipe tanggul terbuka dan yang paling banyak memiliki gap, yaitu 11 gap. Gap ini berfungsi sebagai jalur pelayaran dan pintu keluar masuk air. Skenario dike 2 memiliki total panjang tanggul sebesar 19 km dan panjang gap masing – masing sebesar 600 m. Elevasi muka air penjalaran tsunami berhasil di reduksi dengan adanya tanggul, sehingga ketinggian elevasi muka air di dalam area dike mengalami penurunan. Peta persebaran elevasi muka air yang di tampilkan adalah elevasi muka air pada time step ke 360 dari total 864 time step. Gambar 14 adalah peta persebaran elevasi muka air pada skenario dike 3.

I. Perbandingan Tinggi Elevasi Muka Air

Dari hasil persebaran tinggi elevasi muka air pada masing – masing dike, analisis dilanjutkan dengan membandingkan elevasi muka air pada 3 skenario dike. Analisis ini bertujuan untuk melihat keefektifan tanggul dalam meredam tsunami. Untuk analisis, diambil titik tinjau yang kemudian dilakukan ekstrak dan pengolahan data pada titik tersebut. Hasil dari pengolahan data pada titik tinjau adalah elevasi muka air maksimum. Elevasi muka air maksimum nantinya akan dibandingkan antar skenario dike. Titik tinjau yang akan dianalisis berjumlah lima titik. Titik – titik tersebut merupakan titik yang berdekatan dengan lokasi – lokasi strategis di Teluk Jakarta, seperti halnya Pelabuhan dan kawasan pariwisata. Gambar 15 menunjukkan lokasi dari titik tinjau.

Setelah menentukan titik tinjau, maka data hasil *running* pemodelan detail dapat di ekstrak sesuai koordinat *UTM* dari titik tinjau yang telah di tentukan. Hasil ekstrak data yang berupa ketinggian elevasi maksimum tiap skenario *dike* dapat dilihat pada Gambar 16.

Pada skenario *dike 1* semua titik tinjau memiliki elevasi maksimum 0 cm, hal ini disebabkan oleh tipe skenario *dike 1* adalah tipe tertutup, sehingga air tidak dapat melewati *dike*. Skenario *dike 3* memiliki rata – rata tinggi elevasi muka air yang paling tinggi diantara skenario *dike* lain, hal ini disebabkan banyaknya gap yang ada pada skenario *dike 3* sehingga air dapat mudah masuk ke area dalam *dike*. Pada skenario *dike 3* memiliki rata – rata tinggi elevasi muka air terendah diantara skenario *dike* yang lain, hal ini disebabkan oleh skenario *dike 3* merupakan *dike* dengan tipe semi tertutup, yang hanya memiliki satu gap saja.

J. Grafik Cross Section

Grafik *cross section* dibuat dengan tujuan untuk menggambarkan proses penjalaran tsunami menuju *dike* hingga aliran air yang masuk ke dalam *dike*. Adapun lokasi *cross section* adalah koordinat *UTM Easting* 699002.63056 *Northing* 9330617.0206 (Titik utara), *Easting* 700364.01085 *Northing* 9323896.8369 (Titik Selatan) dan diantara titik

tersebut terdapat 19 titik dengan jarak 220 m per titik. Lokasi ini dipilih karena terletak pada posisi strategis yaitu center gap. Lokasi tersebut akan digunakan dalam semua skenario *dike* untuk mengekstrak data. Data yang akan dibandingkan adalah berupa elevasi muka air maksimum pada masing – masing titik.

1) Cross Section pada Skenario Dike 1

Gambar 17 adalah *cross section* pada skenario *dike 1*, yang ditandai dengan simbol A-A', sedangkan Gambar 18 adalah hasil ekstrak data dari 21 titik pada *cross section* A-A'.

Dari Gambar 18 dapat dilihat bahwa pada titik 1 sampai titik 2 elevasi air masih di atas 1 m, hal ini dikarenakan titik tersebut berada diluar area *dike*. Pada titik ke 3 elevasi air mengalami penurunan dikarenakan titik tersebut mulai memasuki area *dike*. Kemudian titik 4 sampai dengan 21 elevasi muka air sama dengan nol.

2) Cross Section pada Skenario Dike 3

Gambar 19 *cross section* pada skenario *dike 3*, yang ditandai dengan simbol C-C', sedangkan Gambar 20 adalah hasil ekstrak data dari 21 titik pada *cross section* C-C'.

Dari Gambar 20 titik 1 sampai dengan titik 10 tsunami mengalami penjarangan dengan ketinggian elevasi muka air diatas 1 m. Pada titik 11 (titik pada gap) elevasi muka air mulai mengalami penurunan akibat adanya skenario *dike 3*, elevasi muka air tersebut adalah 0.6 m. Pada titik – titik selanjutnya elevasi muka air mengalami penurunan dengan nilai elevasi diatas 0.003 m.

3) Cross Section pada Skenario Dike 5

Gambar 21 *cross section* pada skenario *dike 5*, yang ditandai dengan simbol E-E', dan Gambar 22 *cross section* pada skenario *dike 5*, yang ditandai dengan simbol E-E'.

Dari Gambar 22 titik 1 sampai dengan titik 9 tsunami mengalami penjarangan dengan ketinggian elevasi muka air diatas 1 m. Pada titik 10 (titik pada gap) elevasi muka air mulai mengalami penurunan akibat adanya skenario *dike 5*, elevasi muka air tersebut adalah 0.63 m. Pada titik – titik selanjutnya elevasi muka air mengalami penurunan dengan nilai elevasi diatas 0.13 m.

Skenario *dike 1* dengan *cross section* A-A' memiliki rata – rata air terendah setelah melewati *dike* karena skenario *dike 1* adalah tipe *dike* tertutup. Grafik *cross section* E-E' memiliki rata – rata air tertinggi setelah melewati *dike* karena skenario *dike 3* adalah tipe *dike* terbuka dengan gap terbanyak.

Cross section A-A' adalah yang pertama kali mengalami penurunan elevasi muka air, hal ini disebabkan oleh posisi *dike* yang lebih menjorok ke arah laut yaitu pada titik tinjau 3. Kemudian skenario *dike 3* yang posisi gap berada pada titik tinjau 10. Dan yang terakhir skenario *dike 2* yang posisi gap berada pada titik tinjau 11.

K. Persentase Penurunan Elevasi Muka Air

Nilai persentase bertujuan untuk menggambarkan penurunan elevasi muka air yang terjadi setelah adanya *dike*. Nilai persentase merupakan perbandingan dari elevasi muka

air sebelum adanya *dike* dan setelah adanya *dike*. Nilai elevasi muka air yang dibandingkan merupakan hasil ekstrak data pada titik – titik tinjau yang berada pada area *dike*, sehingga rata – rata penurunan elevasi muka air dapat ditentukan. Perhitungan persentase dilakukan pada masing – masing skenario *Dike*. Hasil persentase penurunan elevasi muka air dapat dilihat pada Tabel 4.

IV. KESIMPULAN

Tsunami akibat erupsi Gunung Anak Krakatau dapat dimodelkan dengan bantuan *software MIKE 21* modul *hydrodynamic pada Flow Model FM*. Adapun kondisi kenaikan muka air pada pemodelan merujuk pada tsunami akibat erupsi Gunung Krakatau 1883. Dari hasil pemodelan penjarangan tsunami yang telah dilakukan, hasilnya tidak jauh berbeda dengan data validasi. Validasi hasil pemodelan dapat dilihat dari hasil running pada titik tinjau yaitu *Easting* 701091.346171525 dan *Northing* 9325432.75281731 (dalam koordinat *UTM*), yang lokasinya berdekatan dengan Pelabuhan Mutiara di Teluk Jakarta. Berdasarkan hasil analisis pemodelan diperoleh ketinggian elevasi muka air 1.437 m sedangkan tinggi elevasi muka air dari data validasi adalah 1.451 m.

Pemodelan *tsunami dike* dengan beberapa skenario adalah sebagai upaya untuk mengurangi ketinggian gelombang tsunami yang sampai di Teluk Jakarta. Adapun skenario *dike* yang dimodelkan terdiri dari 3 tipe, diantaranya adalah *base case* dengan tipe tanggul tertutup, tipe tanggul terbuka dengan 7 gap, tipe tanggul semi terbuka dengan 1 gap, tipe tanggul yang mempertimbangkan rencana reklamasi dengan 5 gap, dan tipe tanggul terbuka dengan 11 gap. Pemodelan dengan skenario *dike* dapat mengurangi tinggi elevasi muka air di dalam area *dike* masing – masing adalah 100% untuk skenario *dike 1* (tipe *dike* tertutup), 99.58% untuk skenario *dike 2* (tipe *dike* semi tertutup dengan 1 gap), 86.26% untuk skenario *dike 3* (tipe *dike* terbuka dengan 11 gap).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Kepala Balai Penelitian dan Pengembangan Pantai yang telah memberikan izin penggunaan *software MIKE 21* dan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Tantri, "Letusan Krakatau 1880: Pengaruhnya terhadap gerakan sosial Banten 1888," *J. Masy. dan Budaya*, vol. 16, no. 1, pp. 191–214, 2014.
- [2] D. Suhadi, A. Karim, A. Dahlan, I. Ridwan, and T. Rukada, *Inventarisasi Topografi Gunungapi Anak Krakatau*. Bandung, Indonesia: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2004.
- [3] B. Triatmodjo, *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset, 2016.
- [4] R. W. Mahardika, A. Ismanto, and P. Purwanto, "Studi perbandingan simulasi flow model FM dan ADCIRC terhadap pola arus pasut perairan Teluk Lembar Lombok," *J. Oceanogr.*, vol. 4, no. 1, pp. 206–214, 2015.