

**PENGARUH DESAIN TANGGUL LUAR NCICD TERHADAP KEJADIAN TSUNAMI
KRAKATAU 1883**
***THE EFFECT OF DESIGN NCICD OUTER SEA DIKE FOR THE OCCURRENCE OF
KRAKATAU TSUNAMI 1883***

**Juventus W.R. Ginting^{1)*}, Ida Ayu Irawati Diah Ratna Putra¹⁾, Eduardo Meyrianso
Simanjuntak¹⁾**

¹⁾Balai Teknik Pantai, Puslitbang Sumber Daya Air
Jl. Gilimanuk – Singaraja KM 122 Gerokgak, Kabupaten Buleleng - Bali

*Corresponden author : juventus.ginting@gmail.com

Diterima: 21 Januari 2020; Direvisi: 5 Februari 2020; Disetujui: 13 April 2020

ABSTRACT

For past five years, the Jakarta coastal area structuring program has been implemented, which is National Capital Integrated Coastal Development (NCICD), or often called PTPIN. One of the arrangements made was the construction of an outer sea dike. KOICA (Korea International Cooperation Agency) is one of the parties involved in designing the form of the outer sea dike. In its report, "The Design Concept of the Outer Sea Dike (OSD)", by KOICA has carried out studies of several alternative forms of sea dike profiles and layouts of embankment plans. From the results of the aforementioned studies, OSD embankment design layouts were obtained. The design offered by KOICA is embankment design with Opened OSD and Closed OSD design as well as a combination of the design with the reclamation islands concept. This study reviews the effect of OSD design and its combination on the Krakatoa Tsunami 1883. The results of numerical models of various OSD designs opened OSD designs are the most effective in reducing the water height level due to the tsunami. The closed OSD design is quite effective in protecting the observation area but in the Nizam Zahman Port area water level has increased. The effect of the reclamation island on the OSD design results in an increase in water level at the observation points.

Keywords: NCICD, Numerical model, tsunami, Krakatau 1883, KOICA, outer sea dike

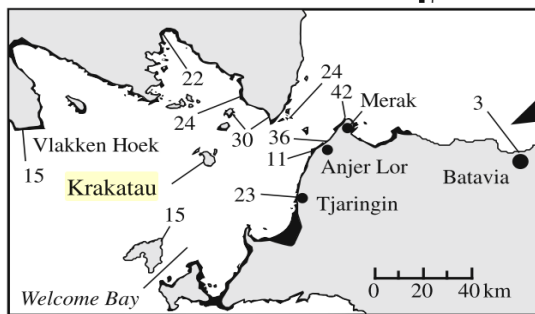
ABSTRAK

Selama lima tahun terakhir, telah dilaksanakan program penataan kawasan pesisir Jakarta yang diintegrasikan dalam suatu Program Pengembangan Terpadu Pesisir Ibukota Negara (PTPIN) atau sering disebut NCICD (*National Capital Integrated Coastal Development*). Salah satu penataan yang dilakukan adalah dengan dibangunnya tanggul luar. KOICA (*Korea International Cooperation Agency*) merupakan salah satu pihak yang ikut dalam mendesain bentuk tanggul luar. Dalam laporannya, "Konsep Desain *Outer Sea Dike (OSD)*", KOICA telah melakukan studi beberapa alternatif bentuk profil tanggul dan layout dari rencana tanggul. Dari hasil kajian tersebut, diperoleh layout desain tanggul OSD. Desain yang ditawarkan oleh pihak KOICA yaitu desain tanggul dengan desain terbuka (*Opened OSD*) dan tertutup (*Closed OSD*) serta kombinasi dari disain tersebut dengan konsep pulau-pulau reklamasi. Studi ini meninjau pengaruh desain OSD beserta kombinasinya terhadap kejadian Tsunami Krakatau 1883. Hasil model numerik dari berbagai desain OSD desain opened OSD merupakan desain yang paling efektif dalam mengurangi ketinggian muka air akibat dari tsunami. Pada disain closed OSD cukup efektif melindungi daerah observasi tetapi di daerah Pelabuhan Nizam Zahman ketinggian muka air mengalami peningkatan. Pengaruh pulau reklamasi pada disain OSD mengakibatkan kenaikan muka air di titik-titik observasi.

Kata Kunci: NCICD, Model numerik, tsunami, Krakatau 1883, KOICA, tanggul luar

PENDAHULUAN

Letusan Gunung Krakatau yang terjadi pada 26-27 Agustus 1883 adalah salah satu letusan eksplosif terbesar yang dikenal umat manusia. Letusan tersebut merupakan satu-satunya letusan yang memiliki informasi sejarah terperinci tentang kejadian tsunami yang disebabkan oleh letusan gunung berapi. Sampai saat ini, mekanisme yang menghasilkan tsunami selama erupsi masih diperdebatkan (Bryant, 2014). Gunung Krakatau ini terletak di Selat Sunda antara Pulau Sumatera dan Pulau Jawa (Gambar 1). Kitab Raja-Raja Jawa yang menggambarkan letusan sebelumnya, menyebut Krakatau sebagai Gunung Kapi. Kemudian, gunung berapi itu meledak dan menciptakan gelombang laut yang menggenangi daratan dan membunuh banyak orang di seluruh bagian utara Selat Sunda.



Sumber: Bryant, 2014

Gambar 1 Posisi Gunung Krakatau dan efek dari terusan Krakatau

Potensi kejadian tsunami di Selat Sunda juga pernah terjadi pada tanggal 22 Desember 1883. Tsunami yang diakibatkan oleh longsor yang terjadi di sebagian badan Gunung Anak Krakatau tercatat mengakibatkan gelombang tsunami yang terjadi di Selat Sunda. Tercatat ketinggian muka air sekitar 0,9 m di daerah Marina Jambu (Cinangka), 0,35 m di daerah Ciwandan (Anyer), 0,36 m di daerah Kota Agung, dan 0,28 m di daerah Pelabuhan Panjang. Dampak yang diakibatkan oleh tsunami tersebut antara lain adalah kerusakan rumah, penginapan, warung, dan perahu nelayan. Selain itu, terdapat korban jiwa yaitu sekitar 431 orang meninggal, 7.200 orang luka-luka 15 orang hilang, dan 46.648 orang mengungsi (BMKG, 2019).

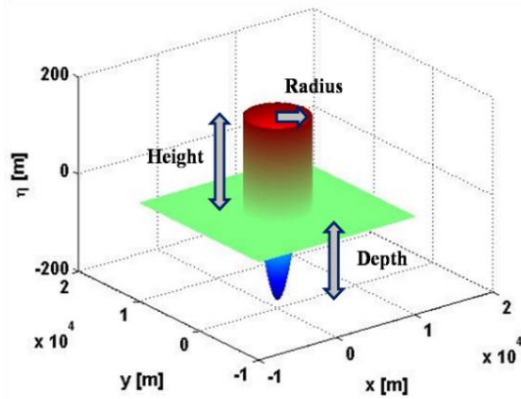
Jakarta sebagai ibu kota negara, saat ini merupakan pusat dari banyak aktifitas berskala internasional dan nasional. Selain itu, lebih dari separuh penduduk Jakarta tinggal di daerah pesisir. Aktifitas perekonomian utama perkotaan juga banyak berkembang di kawasan pesisir. Daerah Jakarta yang terletak di daerah delta juga memiliki kerawanan terhadap banjir yang tinggi baik dari luapan sungai maupun dari banjir yang diakibatkan oleh pasang surut (Kemenko et al., 2014). Selama

lima tahun terakhir, telah dilaksanakan program penataan kawasan pesisir Jakarta yang diintegrasikan dalam suatu Program Pengembangan Terpadu Pesisir Ibukota Negara (PTPIN) atau sering disebut NCICD. Program ini merupakan hasil kerjasama antara Kementerian Koordinator Perekonomian, Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Bappenas, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian Lingkungan Hidup, dan Pemerintah Provinsi DKI Jakarta serta kementerian/lembaga terkait lainnya. Salah satu tahapan dalam penanganan banjir di Jakarta adalah program stage-B yaitu dengan membangun tanggul lepas pantai yang menutup Teluk Jakarta menggunakan tanggul luar menjadi kolam retensi. Tanggul luar ini diharapkan sebagai solusi jangka panjang terhadap banjir yang terjadi.

KOICA dalam laporan konsep desain *Outer Sea Dike (OSD)*, telah melakukan studi beberapa alternatif bentuk profil tanggul serta layout dari rencana tanggul OSD (KOICA 2018). Dari hasil kajian yang dilakukan oleh KOICA, diperoleh layout desain tanggul OSD. Desain yang ditawarkan oleh pihak KOICA yaitu desain tanggul dengan desain terbuka (*Opened OSD*) dan tertutup (*Closed OSD*) serta dilengkapi dengan konsep reklamasi yang ditawarkan oleh pihak KOICA.

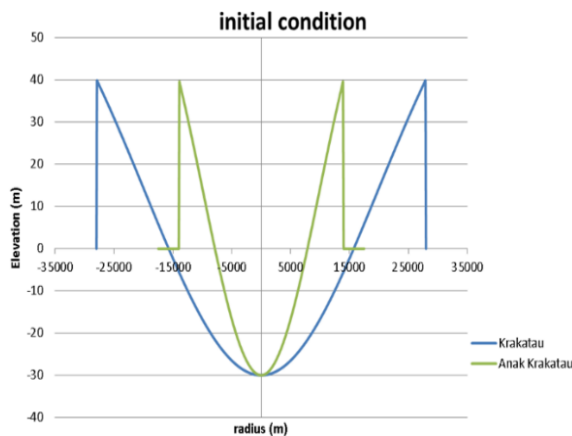
Pada penelitian terdahulu (Bachtiar dkk., 2017), sumber tsunami (ketinggian muka air) pada model numerik tersebut adalah berasal dari sumber artifisial dimana ketinggian muka air yang dihasilkan berdasarkan fungsi matematik Gaussian *curve* (Gambar 2). Sumber artifisial tersebut merupakan data ketinggian muka air yang menjadi input *initial condition* sumber tsunami dalam model numerik (Gambar 3). Skenario erupsi Gunung Krakatau 1883 menggunakan radius *initial condition* sejauh 28 km. Jika terjadi tsunami akibat erupsi Gunung Anak Krakatau maka hipotesisnya adalah radius initial condition yang digunakan sekitar separuh dari *initial condition* Gunung Krakatau yaitu 14 km. Model yang digunakan adalah *Variational Boussinesq Model (VBM)* dengan *boundary condition Sommerfeld*.

Penelitian tersebut (Bachtiar et al., 2017) hanya berfokus pada Tsunami Krakatau 1883 dengan asumsi bahwa amplitudo gelombang tsunami akibat Anak Krakatau tidak lebih besar dari Tsunami Krakatau 1883. Menurut Maeno & Imamura (2011), dengan menggunakan model DPF (*Dense Pyroclastic Flows*), ketinggian muka air yang sampai di Teluk Jakarta atau dahulu disebut Batavia berkisar 1,5 m dengan waktu estimasi tiba tsunami selama 2 jam dan 30 menit. Berdasarkan hasil model tersebut, ternyata Teluk Jakarta cukup terdampak jika kejadian tsunami ini terjadi.



Sumber: Bachtiar dkk., 2017

Gambar 2 Sumber tsunami artifisial berdasarkan Gaussian Function



Sumber: Bachtiar et al., 2017

Gambar 3 Initial condition tsunami untuk skenario erupsi Gunung Krakatau dan skenario erupsi Gunung Anak Krakatau

Selain itu pada penelitian terdahulu (Azhar et al., 2019) sudah dilakukan pegujian material pelindung tebing tanggul dengan membandingkan alternatif *armor* batu, kubus beton, dan *tetrapods* yang ditinjau dari segi aspek karakteristik hidraulik serta stabilitas pada struktur berkemiringan dengan *berm*. Dari konsep desain tanggul luar tersebut, akan dilakukan model numerik untuk melihat pengaruh desain tanggul OSD terhadap kejadian tsunami Krakatau 1883 mengingat posisi tanggul OSD berada di Teluk Jakarta. Dimana pada daerah tersebut memiliki potensi kejadian episenter gempa yang cukup sering di sekitar Selat Sunda

Menurut BMKG (2019), berdasarkan laporan tersebut terdapat tujuh kejadian gempa dari tahun 416 sampai dengan 22 Desember 2018. Kejadian gempa pertama terjadi di Laut Jawa dengan Magnitude gempa sebesar 7,5, selanjutnya gempa

kedua terjadi pada 18 Maert 1853 di Laut Jawa dengan besaran *magnitude* yang tidak tercatat. selanjutnya yang dibahas pada paper ini merupakan kejadian tsunami 26 Agustus 1883 di selat sunda. kejadian kelima terjadi pada tanggal 17 Maret 1930 di selat Sunda juga pernah tercatat terjadi kejadian tsunami. selanjutnya kejadian gempa tanggal 16 Desember 2963 dengan *magnitude* gempa sebesar 6,5 dengan sumber tsunami berasal dari Banten. Selanjutnya kejadian terbaru terjadi pada tanggal 22 Desember 2018 dimana sumber Tsunami berasal dari Gunung Anak Krakatau. Oleh sebab itu, dalam desain layout, tanggul OSD diharapkan juga dapat mengamankan Teluk Jakarta dari potensi kejadian tsunami yang terjadi di Selat Sunda.

METODOLOGI

Pemodelan numerik dilakukan untuk mengkaji desain trase tanggul luar terhadap potensi tsunami Anak Krakatau. Model yang digunakan adalah model hidrodinamika dengan persamaan pembangun model hidrodinamika ini terdiri dari persamaan kontinuitas dan persamaan gerak dalam arah x dan y.

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

Persamaan gerak dalam arah x dan y

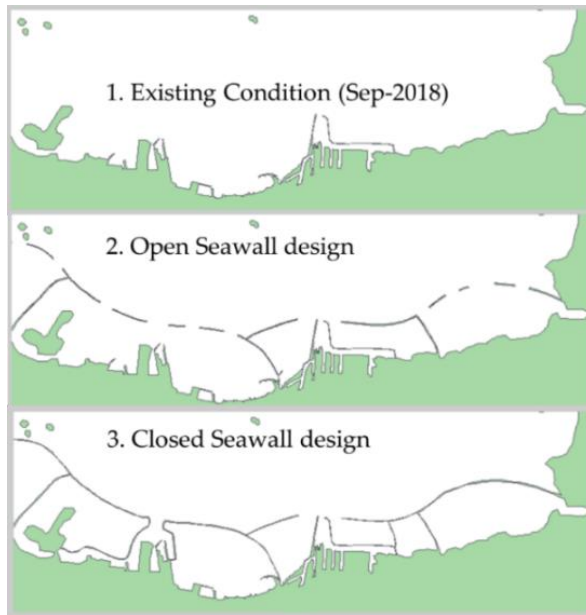
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{uv}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gu\sqrt{u^2+v^2}}{c^2 \cdot h^2} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{uv}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gv\sqrt{u^2+v^2}}{c^2 \cdot h^2} = 0 \tag{3}$$

dimana : $h(x,y,t)$ adalah kedalaman air (m), $\partial (x,y,t)$ adalah variabel yang bervariasi terhadap waktu dan ruang, $\zeta (x,y,t)$ adalah elevasi permukaan (m), $u, v (x,y,t)$ adalah kecepatan dalam arah -x dan -y, $c (x,y)$ adalah chezy resistance ($m^{1/2}/s$), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2).

Pemodelan ini dilakukan dengan menggunakan data BATNAS (Batimetri Nasional) dari BIG (Badan Informasi Geospasial) yang memiliki resolusi data 185 m x 185 m. Untuk desain tanggul, data layout struktur tanggul laut yang digunakan adalah data dari *Korean International Cooperation Agency* (KOICA) tahun 2018. Model numerik dijalankan untuk melihat kondisi hidrodinamika (ketinggian muka air dan waktu tiba ketinggian muka air) untuk kondisi eksisting Teluk Jakarta dan kondisi Teluk Jakarta dengan diterapkan tanggul laut tipe

terbuka (*Opened OSD*) dan tanggul laut tipe tertutup (*Closed OSD*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 serta ditambahkan dengan konsep reklamasi yang akan diusulkan oleh KOICA.

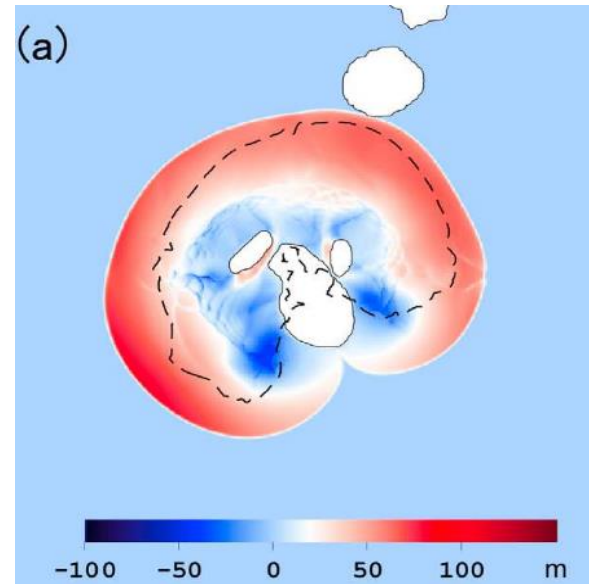


Sumber: Bachtiar dkk, 2017

Gambar 4 Skenario model skala Teluk Jakarta

Kronologi kejadian Tsunami Krakatau 1883 secara lengkap dan detail dijelaskan dalam Verbeek (1884), Symons (1888) dan Sef dan Rampino (1981). Mekanisme pembangkitan tsunami ini menjadi perdebatan ilmuwan. Menurut Latter (1981), ada kemungkinan sepuluh mekanisme pembangkitan tsunami akibat aktifitas vulkanik. Kesepuluh mekanisme tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 yang disarikan oleh Bryant (2002). Untuk Tsunami Krakatau 1883, mekanisme yang mungkin hanya empat yaitu *basal surge*, *pyroclastic flow*, *submarine explosion*, dan *caldera formation*. Hipotesis *basal surge* tidak bertahan terlalu lama dalam perdebatan. Mekanisme *caldera formation* didukung oleh literatur-literatur awal seperti Verbeek (1884). Penelitian yang lebih baru menunjukkan bahwa Tsunami Krakatau 1883 dibangkitkan oleh *submarine explosion*. Hipotesis ini didukung oleh penelitian Yokoyama (1981), Yokoyama (1987), dan Nomanbhoy & Satake (1995). Mekanisme *pyroclastic flow* didukung oleh riset Carey et al. (1996). Penelitian Maeno & Imamura (2011) membandingkan ketiga hipotesis tersebut. Hasil pemodelan numerik untuk Tsunami Krakatau 1883 dengan tiga sumber yang berbeda menunjukkan model dengan sumber tsunami *pyroclastic flow* memiliki hasil verifikasi yang paling baik. Oleh karena itu, mekanisme pembangkitan untuk Tsunami Krakatau 1883 yang digunakan adalah mekanisme *pyroclastic flow*. Sehingga, untuk input *initial condition* (kondisi

awal), ketinggian tsunami berasal dari Maeno & Imamura (2011) dengan model tipe *dense-type pyroclastic flow* (DPF) 10-8b dapat dilihat pada Gambar 5.



Sumber: Maeno & Imamura, 2011

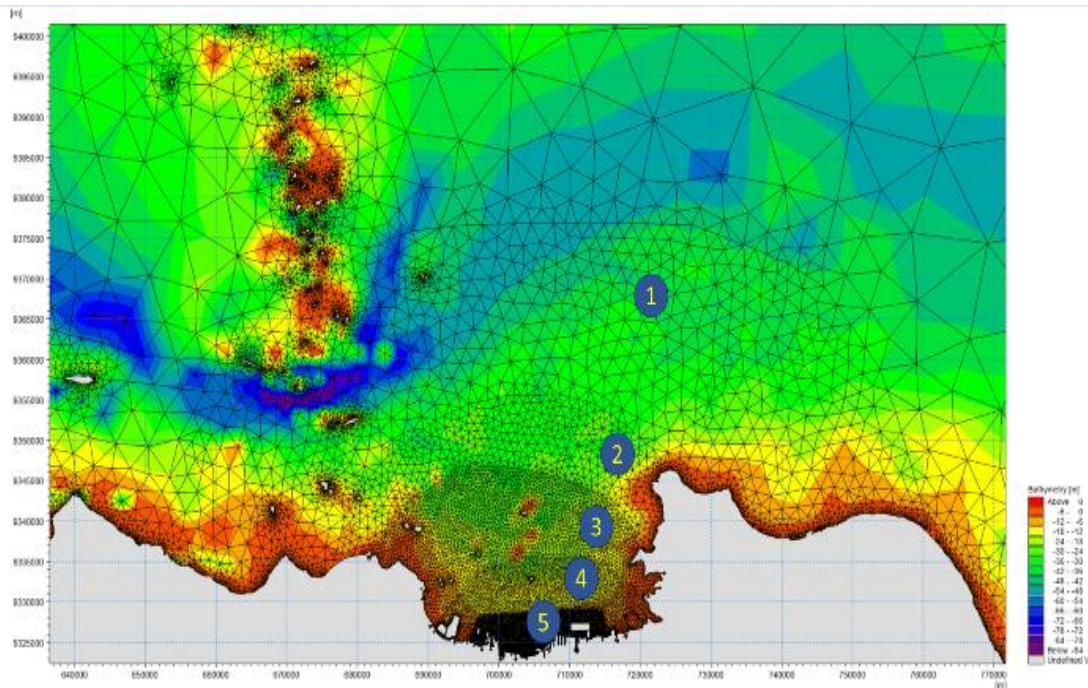
Gambar 5 Input initial condition pada model tsunami

Pemodelan numerik ini mensimulasikan interaksi ketinggian muka air akibat tsunami dengan desain layout tanggul yang dirancang oleh KOICA. Model ini mensimulasikan penjalaran ketinggian muka air hingga sampai ke daerah pantai. Untuk memperoleh hasil model yang akurat, model ini menggunakan *triangular mesh*. Ukuran *grid* yang digunakan pada model ini paling besar $1,3 \times 10^8 \text{ m}^2$ dan yang paling kecil 900 m^2 . Model numerik ini menggunakan *nesting grid* dimana grid di daerah yang ditinjau mempunyai ukuran *mesh* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *grid* utama. Model tsunami ini menggunakan 5 *nesting grid*. Resolusi model semakin tinggi di daerah dekat pantai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Nilai CFL bertujuan untuk mengamankan skeman skplisit dalam model hidrodinamika. Nilai CFL ditentukan besarnya kurang dari satu (Sarker, 2018). Nilai *mannig* laut yang digunakan pada *set-up* model ini memiliki nilai *mannig* $32 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ (Leschka et al., 2009). Untuk *set-up* model akan dijelaskan pada Tabel 2.

Tabel 1 Penyebab tsunami historis yang dibangkitkan oleh aktivitas vulkanis

Mechanism	Percentage of events	Examples	Date	Height (m)
Volcanic earthquakes	22,0	New Hebrides	January 10, 1878	17
Pyroclastic flow	20,0	Ruang, Indonesia	March 5, 1871	25
		Krakatau, Indonesia	August 26-27, 1883	>10
Submarine explosions	19,0	Krakatau, Indonesia	August 26-27, 1883	42
		Sakurajima, Japan	September 9, 1780	6
Caldera formation	9,0	Ritter Island	March 13, 1888	12-15
		Krakatau, Indonesia	August 26-27, 1883	2-10
Landslides	7,0	Unzen Volcano, Japan	May 21, 1792	6-9
Basal surges	7,0	Taal Volcano, Philippines	Numerous	?
Avalanches of hot rock	6,0	Stromboli, Italy	Numerous	?
Lahars	4,5	Mt. Pelée, Martinique	May 21, 1792	4.5
Atmospheric preasure wave	4,5	Krakatau, Indonesia	August 26-27, 1883	<0.5
Lava	1,0	Matavanu Volcano, Samoa	1906-1907	3.0-3.6

Sumber: Bryant 2002



Gambar 6 Triangular Mesh Grid Model

Tabel 2 Tabel (a) Set-up Untuk Mesh Grid dan Tabel (b) Set-up Parameter Untuk Model Numerik

(a)

Triangular Mesh Option	
Max Element	1,3x10 ⁸ m ²
Smallest Allowable	26 deg
Max Number of Nodes	2x10 ⁵
Number of Elements	120.236
Number of Nodes	68.261
Max Area Nesting Grid 1	3,5x10 ⁶ m ²
Max Area Nesting Grid 2	8,5x10 ⁵ m ²
Max Area Nesting Grid 3	1,5x10 ⁵ m ²
Max Area Nesting Grid 4	9x10 ⁴ m ²
Max Area Nesting Grid 5	9.000 m ²

(b)

No. of Time Steps	43.200
Time Steps Interval	0,5 s
CFL Number	0,8
Flood/Dry/and Wetting Depths	0,005/0,05/0,1
Bed Resistance	Constant Manning No. of M = 32 m ^{1/3} /s

Pelaksanaan penelitian

Pelaksanaan model numerik dilakukan beberapa simulasi pada kondisi eksisting dan reklamasi. Simulasi model dilakukan dengan durasi enam jam. Terdapat dua jenis desain tanggul laut yaitu tanggul laut terbuka dan tanggul laut tertutup. Dari kondisi dan desain tanggul tersebut akan disimulasikan sebanyak enam skenario. Tabel 3 menunjukkan skenario untuk simulasi model.

Tabel 3 Skenario Model

No	Skenario
1	Eksisting
2	Eksisting + Tanggul Terbuka
3	Eksisting + Tanggul Tertutup
4	Reklamasi
5	Reklamasi + Tanggul Terbuka
6	Reklamasi + Tanggul Tertutup

Pada model hidrodinamika ini diperoleh informasi ketinggian muka air (m) pada lima kawasan strategis. Lima kawasan strategis tersebut adalah Pelabuhan Muara Angke, Pelabuhan Nizam Zachman, Pantai Ancol, Pelabuhan Tanjung Priok dan Pantai Marunda seperti terlihat pada Gambar 7. Selain pengamatan ketinggian muka air juga dilakukan analisis waktu tiba ketinggian muka air maksimum yang sampai ke titik pengamatan.

Metodologi pelaksanaan penelitian ini dengan menggunakan model numerik. Bagan alir pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 11. Pada tahap awal dilakukan studi pustaka mengenai kejadian atau tsunami yang terjadi di Selat Sunda Pada tahun 1883. Hasil dari studi pustaka tersebut diperoleh *initial condition* berdasarkan paper Maeno dan Imamura (2011). Selanjutnya dilakukan persiapan input model berupa data batimetri yang diperoleh dari BATNAS (Batimetri Nasional). Batimetri Nasional berasal dari pengolahan data altimetri dengan menambahkan data pemeruman (*sounding*) yang

dilakukan oleh BIG, NGDC, BODC, BPPT, LIPI, P3GL dan lembaga lainnya dengan survei single maupun multibeam. Resolusi spasial data BATNAS adalah 6 arc-second dengan menggunakan datum MSL. Selanjutnya dilakukan simulasi model numerik untuk melihat bagaimana proses penjalaran gelombang tsunami dari sumber sampai dengan ke daerah pantai. Pada tahap ini dilakukan verifikasi model dengan melakukan pengaturan pada nilai *bottom roughness* (gesekan dasar) agar sama dengan hasil ketinggian muka air yang diamati oleh Verbeek (1884). Dari hasil model yang terverifikasi tersebut akan dirunning ulang untuk beberapa skenario sesuai dengan Tabel 3. Hasil dari simulasi tersebut akan diperoleh ketinggian muka air untuk masing-masing titik observasi.

Verifikasi model numerik dilakukan pada saat kondisi eksisting. Hasil model yang sudah diverifikasi dapat dilihat pada Gambar 9. Secara umum, ketinggian muka air yang dihasilkan mendekati dengan ketinggian muka air yang tercatat oleh Verbeek (1884). Perhitungan ketinggian muka air dengan menggunakan model numerik jika dibandingkan dengan data Verbeek terdapat keterlambatan fasa sekitar 30 menit dimana fasa model lebih cepat jika dibandingkan dengan fasa Verbeek (1884). Perbandingan hasil model numerik dengan model Maeno & Imamura, (2011) juga menunjukkan perbedaan fasa dan *noise data*. Namun, secara umum model numerik dianggap terverifikasi.

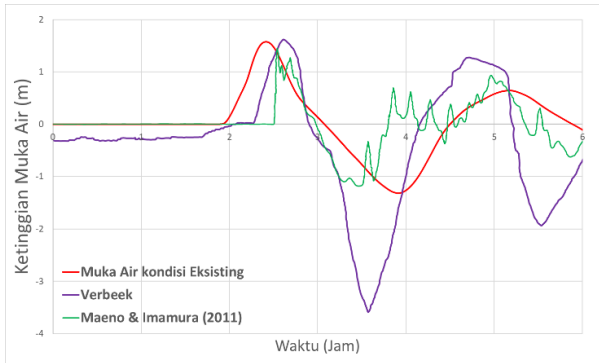


Sumber: Google Earth

Gambar 7 Daerah Observasi di Lima Kawasan Strategis

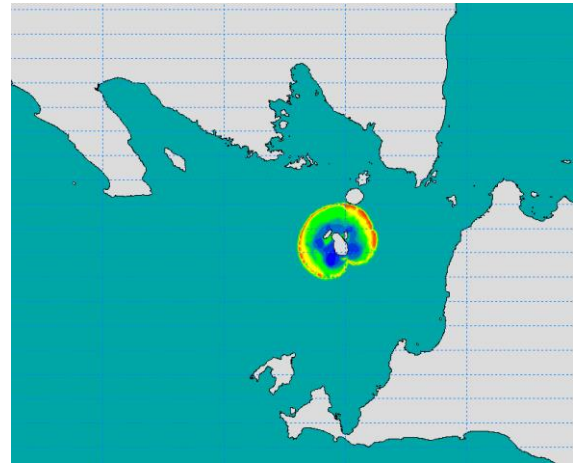
Data Hasil Percobaan

Pelaksanaan simulasi model numerik ini dilakukan dengan menggunakan 6 skenario model seperti pada (Tabel 3). Input model yang berupa *initiala condition* berupa ketinggian muka air yang diakibatkan oleh letusan gunung Krakatau dapat dilihat pada Gambar 10. *Initial condition* yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan data input model yang digunakan oleh Maeno dan Imamura (2011).



Gambar 8 Hasil Verifikasi Model Numerik

air tersebut tiba pada waktu 2 jam 18 menit setelah terjadi letusan. Ketinggian muka air dapat dilihat pada Gambar 18. Begitu juga untuk daerah di sekitar Nizam Zahman ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,493 m ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 23 menit setelah kejadian letusan. Pada daerah di sekitar Pantai Ancol ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,801 m. ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 26 menit setelah kejadian letusan.

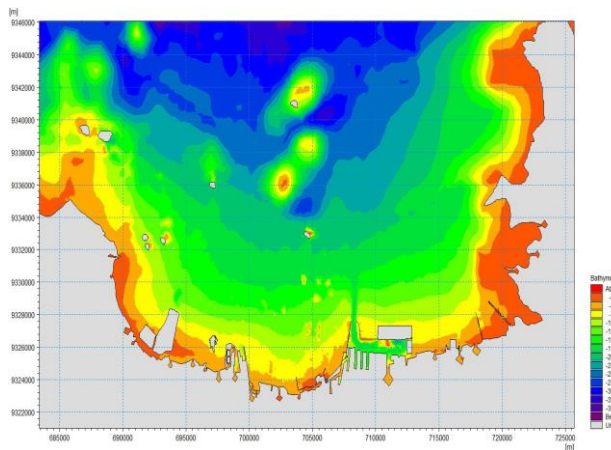


Gambar 10 Input initial condition pada model numerik

HASIL DAN PEMBAHASAN

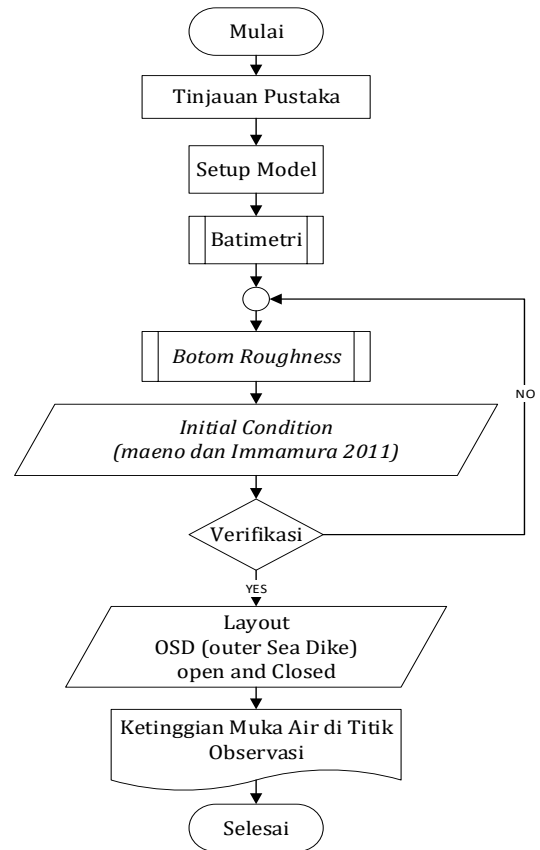
Kondisi Eksisting

Kondisi eksisting merupakan kondisi Teluk Jakarta pada saat tahun 2019. Kondisi garis pantai merupakan pengolahan data antara google earth dan hasil survei Tata Ruang 2017. Kondisi eksisting ini sudah meliputi sebagian pulau reklamasi seperti yang terlihat pada Gambar 9. Dari hasil simulasi model ini diperoleh ketinggian muka air untuk lima daerah observasi.

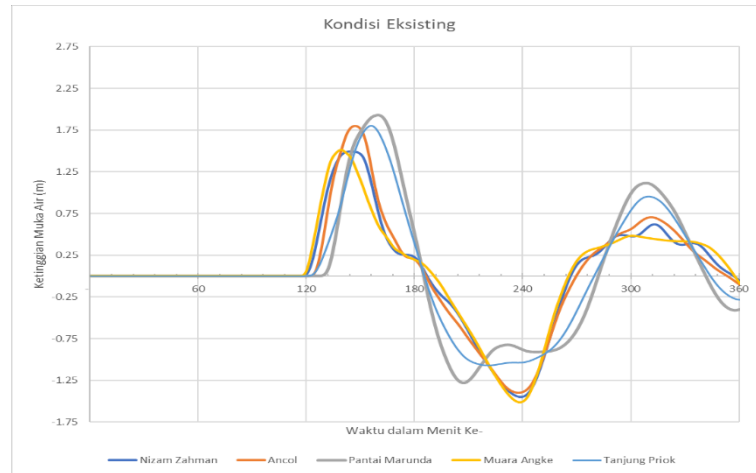


Gambar 9 Batimetri Kondisi Eksisting

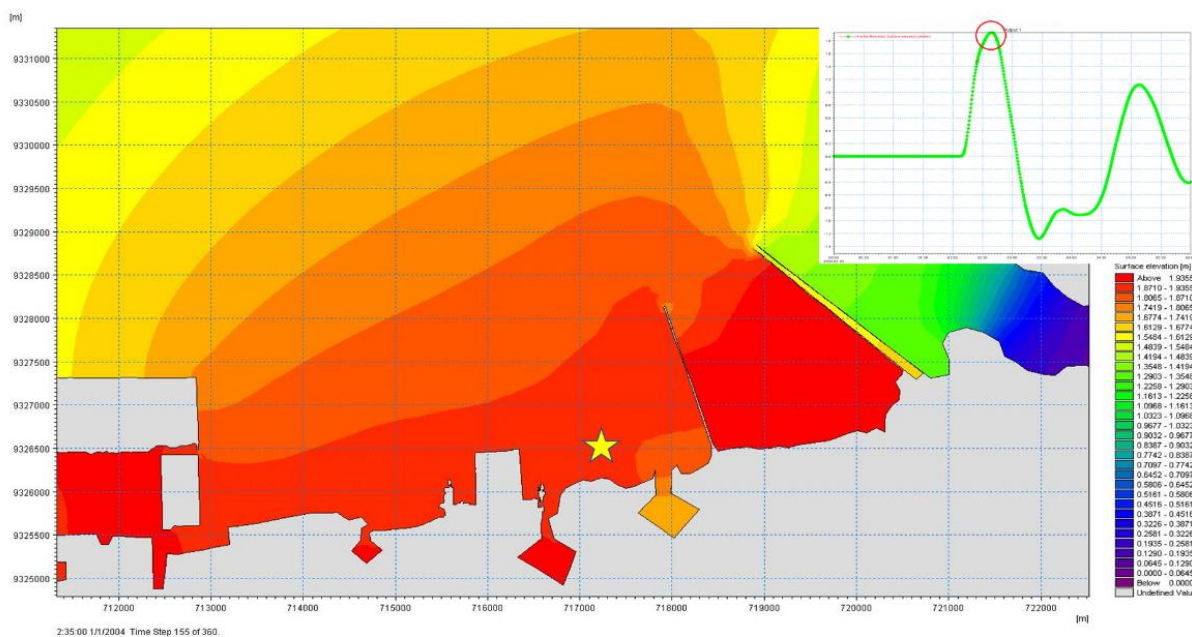
Berdasarkan hasil model numerik di daerah observasi diperoleh hasil. Untuk daerah di Muara Angke ketinggian muka air yang tiba di daerah tersebut sekitar 1,513 m dimana ketinggian muka



Gambar 11 Bagan alir pelaksanaan penelitian



Gambar 12 Grafik elevasi muka air di titik observasi pada kondisi eksisting



Gambar 13 Ketinggian muka air di daerah Pantai Marunda pada kondisi Eksisting

Pada daerah di sekitar Tanjung Priok ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,805 m. Ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 35 menit setelah kejadian letusan. Untuk daerah di sekitar Pantai Marunda ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,926 m. Ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 39 menit setelah kejadian letusan. Ketinggian muka air dapat dilihat pada **Gambar 13**. Kejadian ketinggian muka air untuk masing-masing daerah observasi yang tertinggi berada di sekitar daerah Pantai Marunda

Kondisi Eksisting dengan Tanggul Terbuka

Kondisi ini merupakan desain dengan kondisi eksisting dengan ditambahkan tanggul luar

dengan desain terbuka (*opened OSD*). Kondisi ini menerapkan model dengan kondisi garis pantai tahun 2019 ditambah dengan dengan kondisi *opened OSD*. Hasil model numerik ketinggian muka air untuk masing-masing titik observasi dapat dilihat pada Gambar 14.

Hasil obeservasi ketinggian muka air di daerah Muara Angke ketinggian muka air yang tiba di daerah tersebut sekitar 1,068 m dimana ketinggian muka air tiba pada waktu 2 jam 29 menit setelah terjadi letusan. Ketinggian muka air pada kondisi ini jika dibandingkan dengan ketinggian muka air pada kondisi eksisting menunjukkan ketinggian muka air yang terjadi penurunan sebesar 0,445 m diakibatkan oleh adanya tanggul luar.

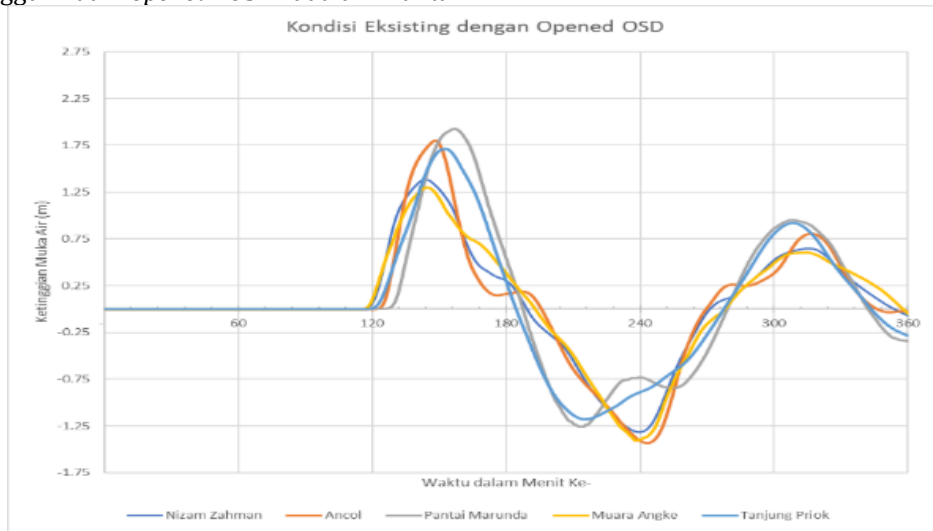
Pada daerah obeservasi di sekitar Tanjung Priok ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,668 m. ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 34 menit setelah kejadian letusan. Dengan adanya tanggul *opened OSD* mempengaruhi ketinggian muka air di pantai Ancol ketinggian muka air turun sebesar 0,136 m

Pada daerah di sekitar Pantai Marunda ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,862 m. ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 39 menit setelah kejadian letusan. Ketinggian muka air dapat dilihat pada **Gambar 15**. Dengan adanya OSD open mempengaruhi ketinggian muka air di pantai Marunda ketinggian muka air turun 0,064 m. Dari hasil model tersebut daerah yang paling berpengaruh terhadap ketinggian muka air dengan adanya tanggul luar *opened OSD* adalah Pantai

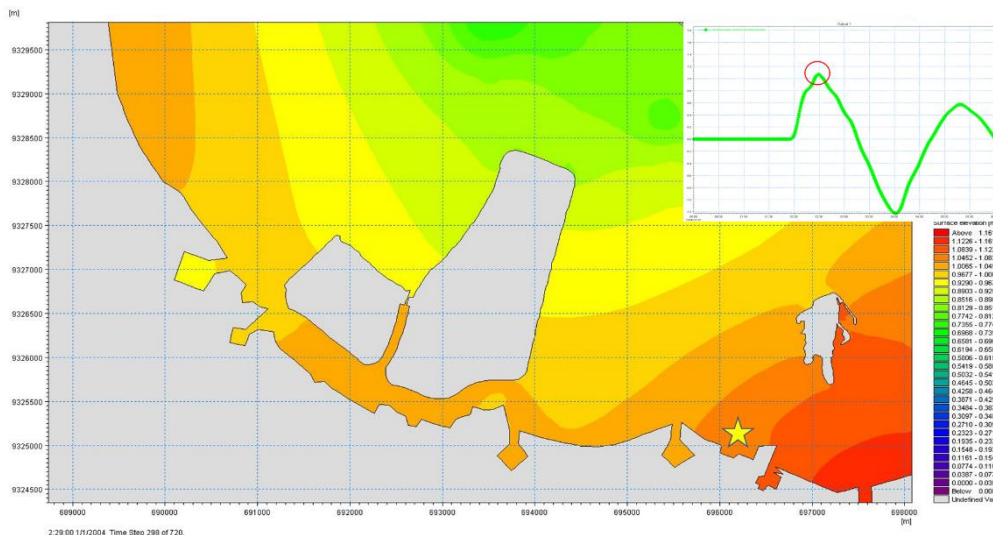
Muara Angke dimana daerah tersebut cukup terlindungi jika terjadi tsunami. Untuk daerah yang mengalami ketinggian muka air tertinggi adalah daerah pantai Marunda.

Kondisi Eksisting dengan Tanggul Tertutup

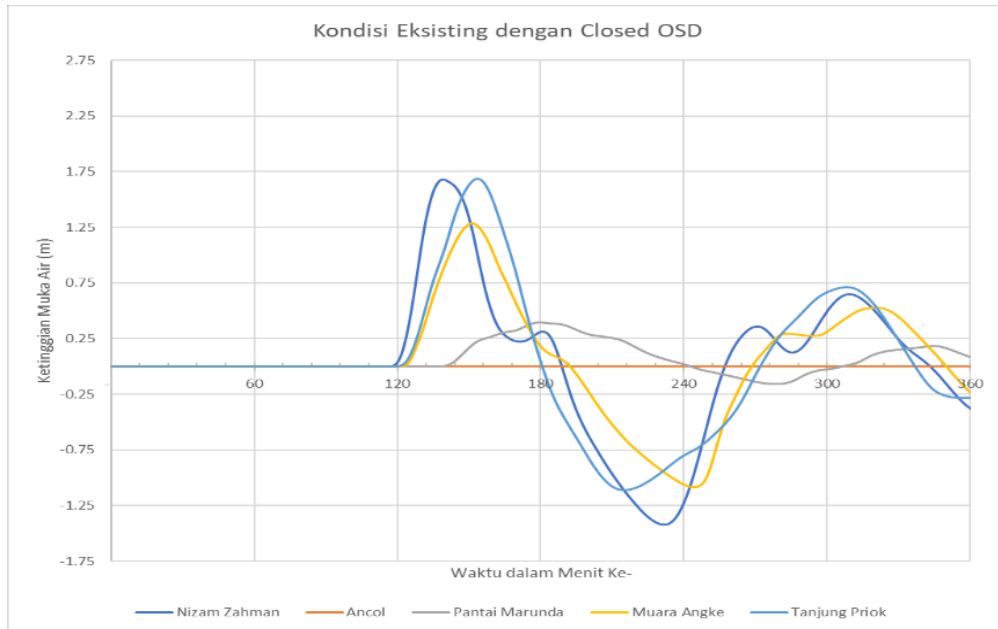
Pada kondisi ini merupakan desain dengan kondisi eksisting dengan ditambahkan tanggul luar dengan desain tertutup (*closed OSD*). Kondisi ini menerapkan model dengan kondisi garis pantai tahun 2019 ditambah dengan *closed OSD*, Perbedaan desain *opened OSD* dan *closed OSD* terletak pada kondisi tanggul dimana ada beberapa daerah dilakukan penutupan dengan tanggul hingga sampai ke pulau reklamasi. Ketinggian muka air dari hasil model numerik dapat dilihat pada **Gambar 16** untuk masing-masing titik observasi.



Gambar 14 Grafik elevasi muka air di titik observasi pada kondisi eksisting dengan Opened OSD



Gambar 15 Ketinggian muka air di daerah Muara Angke pada kondisi Eksisting dengan OSD open



Gambar 16 Grafik elevasi muka air di titik observasi pada kondisi eksisting dengan closed OSD

Berdasarkan hasil observasi pada daerah di Muara Angke ketinggian muka air maksimum yang tiba di daerah tersebut sekitar 1,287 m dimana ketinggian muka air tiba pada waktu 2 jam 31 menit setelah terjadi letusan. Dengan adanya tanggul *closed OSD* berpengaruh terhadap ketinggian muka air di pantai Muara Angke ketinggian muka air turun sebesar 0,225 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting, tetapi jika dibandingkan dengan kondisi *opened OSD* penurunan muka air turun tidak terlalu signifikan.

Hasil observasi pada daerah di sekitar Nizam Zahman ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,677 m ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 18 menit setelah kejadian letusan. Pengaruh dengan adanya *closed OSD* berpengaruh pada ketinggian muka air yang semakin meningkat. Peningkatan ketinggian muka air jika dibandingkan dengan kondisi eksisting sebesar 0,184m dan jika dibandingkan dengan kondisi desain *opened OSD* peningkatan ketinggian muka air sebesar 0,445m

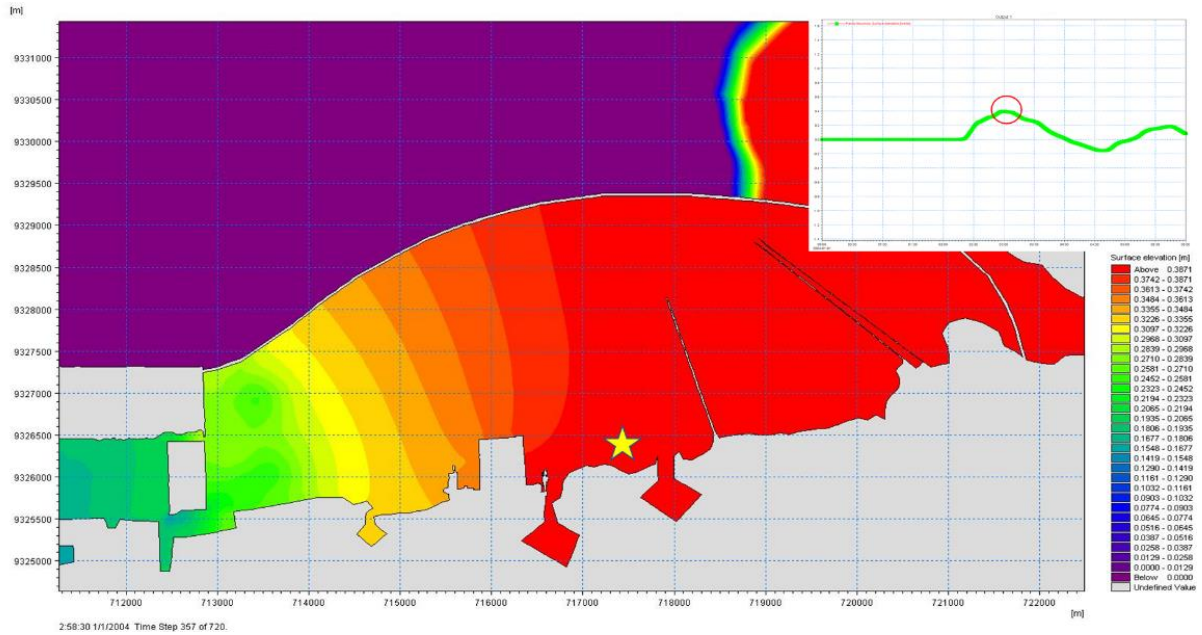
Pada daerah di sekitar Pantai Ancol ketinggian muka air sepenuhnya teredam karena desain tanggul dengan tipe ini melindungi keseluruhan bagian utara Pantai Ancol. Hasil observasi Pada daerah di sekitar Tanjung Priok ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,684 m. ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 33 menit setelah kejadian letusan. Dengan

adanya *closed OSD* mempengaruhi ketinggian muka air di Tanjung Priok. Pengaruh terhadap ketinggian muka air menjadi berkurang sebesar 0,120 m, sedangkan jika dibandingkan dengan ketinggian muka air pada kondisi *OSD open* ketinggian muka air hanya mengalami pengurangan ketinggian sebesar 0,015 m.

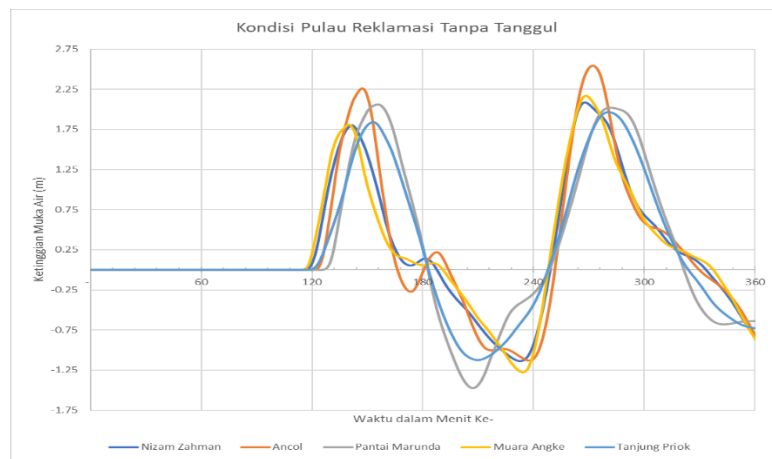
Pada daerah di sekitar Pantai Marunda ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 0,396 m. Ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 59 menit setelah kejadian letusan. Ketinggian muka air dapat dilihat pada Gambar 17. Dengan adanya disain tanggul dengan *closed OSD* mempengaruhi ketinggian muka air di Pantai Marunda. Dengan adanya tanggul *closed OSD* efektif mengurangi ketinggian muka air turun sebesar 1,530 m.

Kondisi Reklamasi

Kondisi reklamasi merupakan kondisi desain *Outer Sea Dike* dengan konsep tanggul terbuka dan tertutup ditambah dengan rencana pulau-pulau reklamasi. Pulau reklamasi tersebut merupakan hasil konsep desain *Outer Sea Dike* dengan reklamasi yang diusulkan oleh KOICA. Dengan asumsi luas lahan baru yang bertambah sebesar 1,586 ha. (KOICA, 2018). Pada model numerik ini yang diterapkan hanya rencana pulau reklamasi saja tanpa ada tanggul luar. Hasil ketinggian muka air hasil simulasi numerik dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 17 Ketinggian muka air di daerah Pantai Marunda pada kondisi Eksisting dengan OSD Closed



Gambar 18 Grafik elevasi muka air di titik observasi pada kondisi hanya pulau reklamasi

Berdasarkan hasil observasi pada daerah Muara Angke ketinggian muka air yang tiba di daerah tersebut sekitar 2,167 m dimana ketinggian muka air tersebut tiba pada waktu 4 jam 27 menit setelah terjadi letusan. Dengan adanya konsep pulau reklamasi yang berasal dari desain OSD mempengaruhi ketinggian muka air maksimum yang terjadi di daerah Muara Angke. Dengan adanya pulau reklamasi mempengaruhi ketinggian muka air sehingga mengalami peningkatan sebesar 0,653 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting, begitu juga dengan kondisi lainnya seperti dengan adanya tanggul luar terbuka dan tertutup ketinggian muka air dengan reklamasi merupa nilai muka air tertinggi. Kejadian tinggi muka air tertinggi pada model numerik ini terjadi pada saat muka air kedua tiba dimana pada skenario tanpa

adanya reklamasi ketinggian muka air tersebut terjadi pada saat muka air pertama tiba.

Hasil observasi pada daerah di sekitar Nizam Zahman ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 2,086 m ketinggian muka air tersebut tiba 4 jam 27 menit setelah kejadian letusan. Pengaruh dengan adanya reklamasi berpengaruh pada ketinggian muka air yang semakin meningkat. Peningkatan ketinggian muka air jika dibandingkan dengan kondisi eksisting sebesar 0,593 m, sama seperti kejadian di Muara Angke muka air tertinggi pada model numerik ini terjadi pada saat muka air kedua tiba dimana pada skenario tanpa adanya reklamasi ketinggian muka air tersebut terjadi pada saat muka air pertama tiba.

Hasil observasi pada daerah di sekitar Pantai Ancol ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 2,542 m dapat dilihat pada Gambar 19. Muka air tersebut tiba 4 jam 31 menit setelah kejadian letusan. Kejadian ketinggian muka air di pantai Ancol merupakan ketinggian muka air tertinggi untuk skenario model dengan pulau reklamasi. Dengan adanya pulau-pulau reklamasi mempengaruhi ketinggian muka air di pantai Ancol ketinggian muka air meningkat sebesar 0,741 m, serta ketinggian muka air yang tiba kedua merupakan ketinggian muka air tertinggi disekitar pantai Ancol.

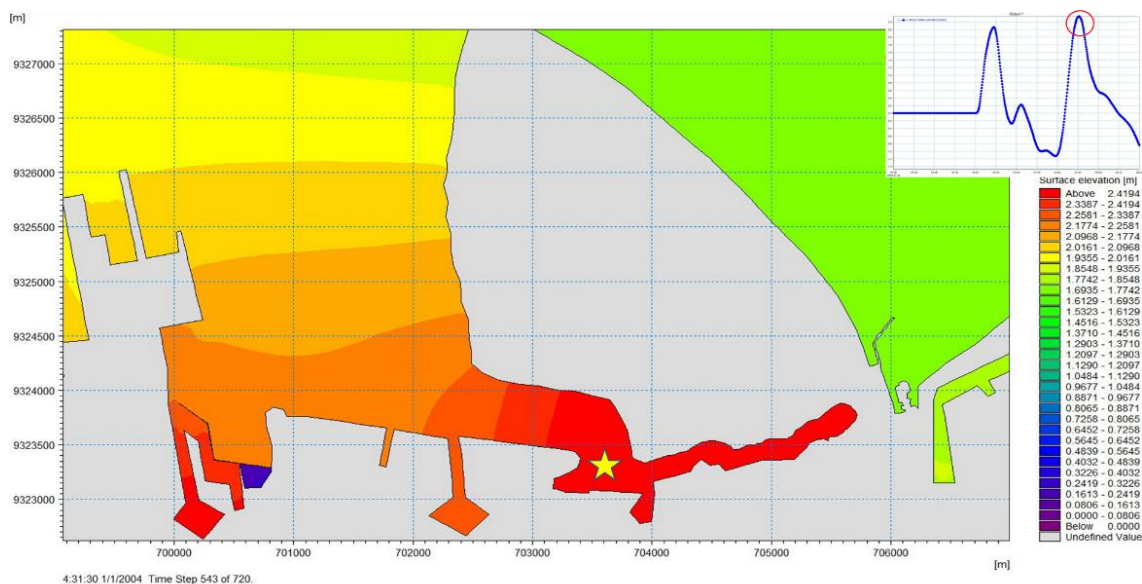
Hasil observasi pada daerah di sekitar Tanjung Priok ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,964 m. ketinggian muka air tersebut tiba 4 jam 40 menit setelah kejadian letusan. Dengan adanya pulau-pulau reklamasi berpengaruh terhadap ketinggian muka air di Tanjung Priok. Terjadi peningkatan ketinggian muka air sebesar 0,159 m. jika dibandingkan dengan ketinggian muka air pada saat kondisi eksisting. Muka air tertinggi pada model numerik ini terjadi pada saat muka air kedua tiba dimana, pada skenario tanpa adanya reklamasi kejadian ketinggian muka air tersebut terjadi pada saat muka air pertama tiba.

Hasil observasi pada daerah di sekitar Pantai Marunda ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 2,167 m. ketinggian muka air tersebut tiba 4 jam 27 menit setelah kejadian letusan. Dengan adanya pulau-pulau reklamasi mempengaruhi ketinggian muka air di Pantai Marunda ketinggian muka air

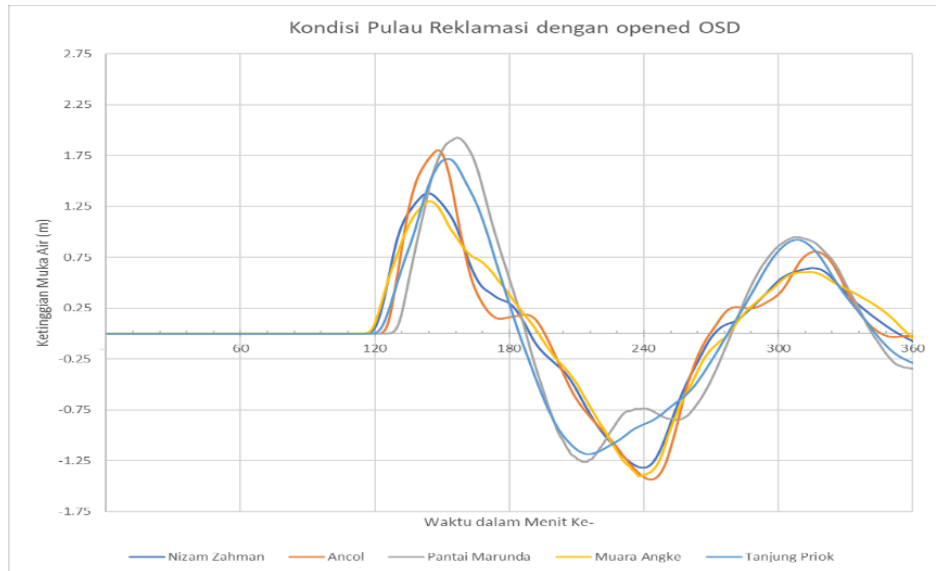
meningkat sebesar 0,240 m. Dimana muka air tertinggi pada model numerik ini terjadi pada saat muka air kedua tiba dimana pada skenario tanpa adanya reklamasi ketinggian muka air tersebut terjadi pada saat muka air pertama tiba.

Kondisi Reklamasi dengan Tanggul Terbuka

Kondisi reklamasi merupakan kondisi desain *Outer Sea Dike* dengan konsep tanggul terbuka dan tertutup ditambah dengan rencana pulau-pulau reklamasi. Pulau reklamasi tersebut merupakan hasil konsep desain *Outer Sea Dike* dengan reklamasi yang diusulkan oleh KOICA. Dengan asumsi luas lahan baru yang bertambah sebesar 1,586 ha (KOICA 2018). Pada model numerik ini yang diterapkan disain *opened OSD* dengan ditambah pulau-pulau reklamasi yang diusulkan oleh KOICA Hasil ketinggian muka air hasil simulasi numerik dapat dilihat pada **Gambar 200**. Berdasarkan hasil observasi pada daerah di Muara Angke ketinggian muka air yang tiba di daerah tersebut sekitar 1,296 m dimana ketinggian muka air tersebut tiba pada waktu 2 jam 24 menit setelah terjadi letusan. Dengan adanya konsep reklamasi dan ditambah konsep desain *opened OSD* mempengaruhi ketinggian muka air maksimum yang terjadi di daerah Muara Angke. Ketinggian muka air menurun sebesar 0,217 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting, sedangkan jika dibandingkan dengan kondisi *opened OSD* tanpa pulau reklamasi tanpa reklamasi ketinggian muka air mengalami kenaikan ketinggian air sebesar 0,229 m. Jika dibandingkan *opened OSD* tanpa dan dengan pulau reklamasi terdapat kenaikan muka air akibat adanya pulau reklamasi.



Gambar 19 Ketinggian muka air di daerah Pantai Ancol pada kondisi hanya dengan Pulau-pulau Reklamasi



Gambar 20 Grafik elevasi muka air di titik observasi pada kondisi reklamasi dengan opened OSD

Hasil observasi di daerah sekitar Nizam Zahman ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,382 m ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 23 menit setelah kejadian letusan. Pengaruh adanya pulau-pulau reklamasi dan desain *opened OSD* berpengaruh terhadap ketinggian muka air yang semakin menurun sebesar 0,111 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting, sedangkan jika dibandingkan dengan kondisi dengan disain *opened OSD* tanpa ada pulau-pulau reklamasi terjadi peningkatan ketinggian muka air sebesar 0,120 m. Ketinggian muka air mengalami peningkatan ketinggian jika dibandingkan antara *opened OSD* tanpa dan dengan pulau reklamasi.

Hasil observasi di daerah sekitar Pantai Ancol ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,801 m. Ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 27 menit setelah kejadian letusan. Dengan adanya reklamasi mempengaruhi ketinggian muka air di pantai Ancol ketinggian muka air tidak terlalu mengalami perubahan jika dibandingkan dengan kondisi eksisting. Apabila dibandingkan dengan kondisi *opened OSD* dengan dan tanpa pulau reklamasi ketinggian muka air mengalami peningkatan sebesar 0,342 m.

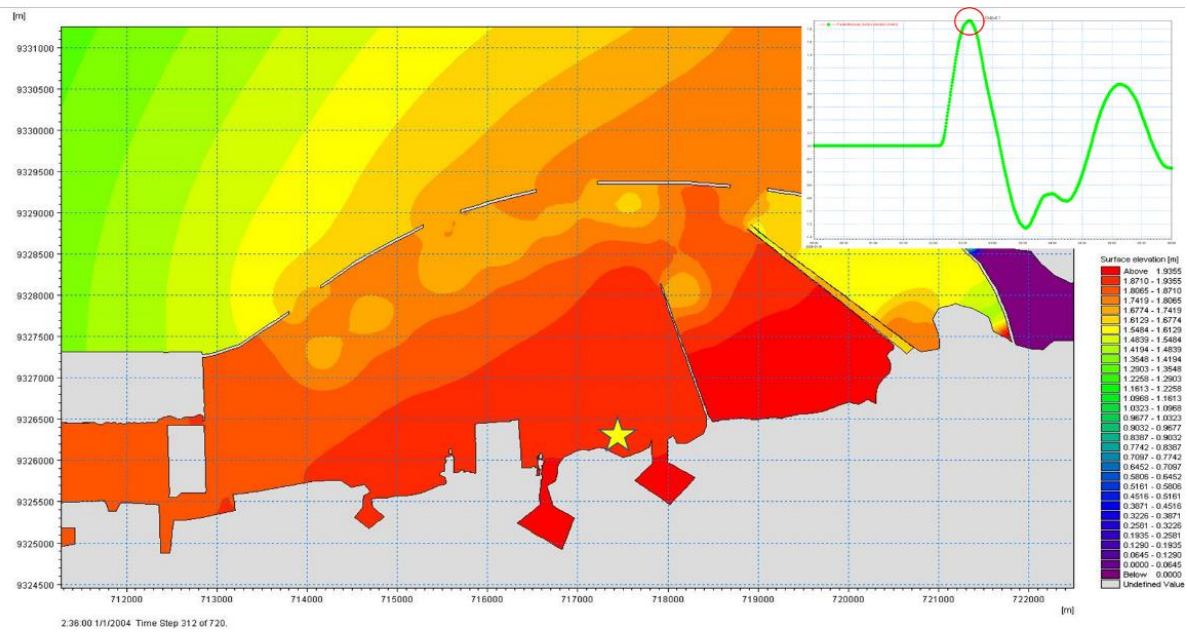
Hasil observasi di daerah sekitar Tanjung Priok ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,713 m. Ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 32 menit setelah kejadian letusan. Terjadi perubahan ketinggian muka air akibat adanya disain *opened OSD* tersebut. Terjadi penurunan ketinggian muka air sebesar 0,091 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting. Sedangkan jika dibandingkan dengan antara kondisi *opened OSD* dengan dan tanpa adanya pulau-pulau

reklamasi terjadi peningkatan ketinggian air sebesar 0,045 m akibat adanya pulau-pulau reklamasi.

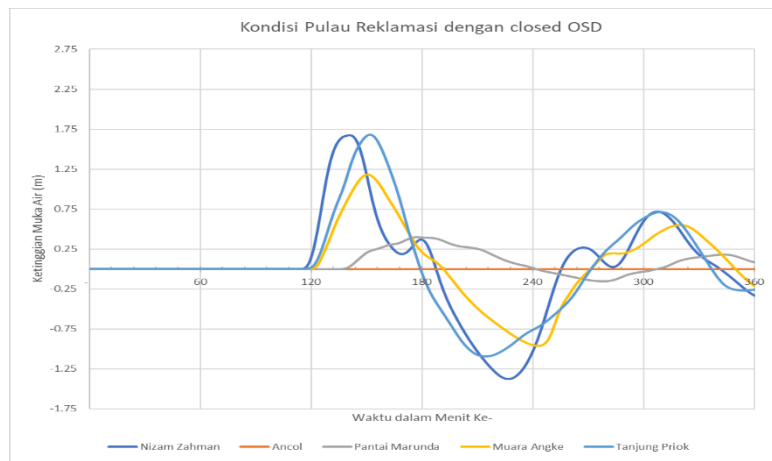
Dari hasil observasi di daerah sekitar Pantai Marunda ketinggian muka air maksimum yang tiba di daerah tersebut sebesar 1,925 m. Ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 36 menit setelah kejadian letusan, dapat dilihat pada Gambar 21. Dengan adanya pulau-pulau reklamasi tidak terlalu mempengaruhi ketinggian muka air di sekitar Pantai Marunda. Tetapi jika dibandingkan dengan disain *opened OSD* dengan adanya pulau-pulau reklamasi dan tanpa pulau-pulau reklamasi terjadi peningkatan ketinggian muka air sebesar 0,063 m akibat adanya pulau reklamasi.

Kondisi Reklamasi dengan Tanggul Tertutup

Kondisi reklamasi merupakan kondisi desain *Outer Sea Dike* dengan konsep tanggul terbuka dan tertutup ditambah dengan rencana pulau-pulau reklamasi. Pulau reklamasi tersebut merupakan hasil konsep desain *Outer Sea Dike* dengan reklamasi yang diusulkan oleh KOICA. Dengan asumsi luas lahan baru yang bertambah sebesar 1,586 ha. (KOICA 2018). Pada model numerik ini yang diterapkan disain *closed OSD* dengan ditambah pulau-pulau reklamasi yang diusulkan oleh KOICA Hasil ketinggian muka air hasil simulasi numerik dapat dilihat pada Gambar 22. Berdasarkan hasil observasi pada di daerah Muara Angke ketinggian muka air yang tiba di daerah tersebut sekitar 1,178 m dimana ketinggian muka air tersebut tiba pada waktu 2 jam 30 menit setelah terjadi letusan. Dengan adanya konsep pulau-pulau reklamasi dan ditambah konsep disain *closed OSD* mempengaruhi ketinggian muka air maksimum yang terjadi di daerah Muara Angke.



Gambar 21 Ketinggian muka air di daerah Pantai Marunda pada kondisi Pulau-pulau Reklamasi dengan Opened OSD



Gambar 22 Grafik elevasi muka air di titik observasi pada kondisi reklamasi dengan Closed OSD

Ketinggian muka air menurun sebesar 0,335 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting. Begitu juga jika dibandingkan dengan kondisi *closed OSD* tanpa adanya pulau-pulau reklamasi terjadi penurunan muka air sebesar 0,109 m. Hasil observasi di daerah sekitar Nizam Zahman ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,675 m ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 20 menit setelah kejadian letusan. Pengaruh dengan adanya pulau-pulau reklamasi dan desain *closed OSD* berpengaruh pada ketinggian muka air yang semakin meningkat sebesar 0,182 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting. Sedangkan jika dibandingkan dengan kondisi *closed OSD* ada dan tanpa reklamasi tidak

terlalu berpengaruh terhadap ketinggian muka air maksimum yang terjadi.

Pada daerah di sekitar Pantai Ancol ketinggian muka air sepenuhnya teredam karena desain tanggul dengan tipe ini melindungi keseluruhan bagian utara Pantai Ancol dapat dilihat pada Gambar 23. Hasil observasi di daerah sekitar Tanjung Priok ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 1,678 m. ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 31 menit setelah kejadian letusan. Dengan adanya reklamasi dan desain *closed OSD* mempengaruhi ketinggian muka air di Tanjung Priok ketinggian muka air menurun sebesar 0,126 m. jika dibandingkan dengan kondisi eksisting. sedangkan jika

dibandingkan dengan kondisi *closed OSD* tanpa adanya oulaw reklamasi pengaruh perrubahan ketinggian muka air di Tanjung Priok tidak terlalu berpengaruh.

Hasil observasi di daerah sekitar Pantai Marunda ketinggian muka air maksimum yang tiba di sekitar daerah tersebut sebesar 0,4 m. ketinggian muka air tersebut tiba 2 jam 57 menit setelah kejadian letusan. Pengaruh dengan adanya reklamasi mempengaruhi ketinggian muka air di Pantai Marunda ketinggian muka air mengalami penurunan sebesar 1,526 m jika dibandingkan dengan kondisi eksisting. Sedangkan jika dibandingkan dengan kondisi reklamasi pulau-pulau *closed OSD* ketinggian muka air tidak mengalami peningkatan ketinggian muka air yang signifikan.

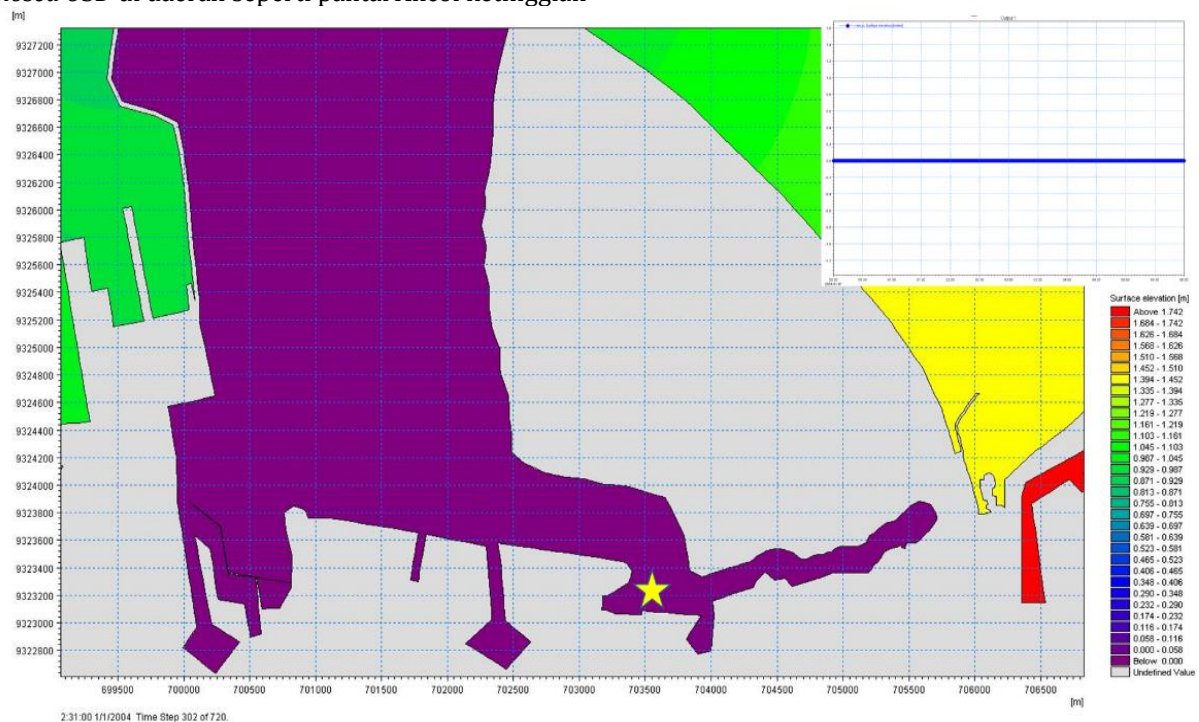
KESIMPULAN

Hasil model numerik terlihat terdapat pengaruh dari jenis disain tanggul OSD terhadap ketinggian muka air yang terjadi di lima daerah observasi. Berdasarkan hasil model numerik diperoleh bahwa disain tanggul yang efektif untuk mengurangi efek ketinggian muka air yang diakibatkan oleh tsunami adalah tanggul dengan disain *opened OSD*. Jika dibandingkan dengan kondisi lainnya tanggul tipe tersebut efektif untuk mengurangi ketinggian muka air tersebut di 5 daerah kajian. Sedangkan jika menggunakan desain *closed OSD* di daerah seperti pantai Ancol ketinggian

muka air tidak dapat memasuki perairan Ancol tetapi disekitar pelabuhan Nizam Zahman ketinggian muka air menjadi lebih tinggi jika dibandingkan dengan keadaan eksisting serta dibanding dengan kondisi *opened OSD* hal tersebut dikarekan disain tanggul *closed OSD* yang membuka dan membentuk kanal sehingga mengakibatkan ketinggian muka air di sekitar pelabuhan Nizam Zahman mengalami peningkatan. Hal tersebut diakibatkan muka air yang terperangkap diujung teluk mengalami pemantulan dan membentuk sebuah gelombang berdiri (*standing wave*).

Apabila hanya pulau-pulau reklamasi yang dirancang oleh KOICA diterapkan maka akan sangat berpengaruh terhadap ketinggian muka air disetiap titik observasi. Dengan peningkatan ketinggian muka air rata-rata 0,478 m. Sedangkan untuk peningkatan muka air tertinggi sebesar 0,741 m di daerah pantai Ancol.

Penerapan pulau-pulau reklamasi dan tanggul tipe *opened OSD* atau *closed OSD* berpengaruh terhadap ketinggian muka air yang akibat tsunami. Penerapan kondisi reklamasi dengan *opened OSD* berpengaruh terhadap ketinggian air jika dibandingkan dengan kondisi eksisting ketinggian muka air rata-rata mengalami penurunan disemu titik pengamatan. Tetapi berbeda dengan keadaan reklamasi dengan *closed OSD* dimana ketinggian muka air ada yang mengalami peningkatan di daerah Pelabuhan Nizam Zahman.



Gambar 23 Ketinggian muka air di daerah Pantai Ancol pada kondisi Reklamasi dengan *closed OSD*

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada Dr. Leo Eliasta, S.T.,M.Sc., serta Huda Bachtiar, S.Si., M.Sc atas bimbingannya selama proses penelitian. Serta kepada teman-teman tim Kegiatan NCICD 2019 yang telah bekerjasama dengan baik sehingga pelaksanaan penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Azhar, R.M., Larasari, A., Husrin, S. & Bachtiar, H. 2019. Hydraulic Responses and Stability of Armor Layer. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 10(1),29–42. <https://doi.org/10.32679/jth.v10i1.603>.
- Bachtiar, H., Badriana, R., Sembiring, L., Adytia, D., Samskerta, I.P., Andonowati, & Van Groesen, E. 2017. Optimasi Desain Rencana Tanggul Lepas Pantai NCICD Di Teluk Jakarta Terhadap Kemungkinan Tsunami Akibat Letusan Gunung Anak Krakatau. *Jurnal Sumber Daya Air*, 13(No.1), 1–10. <https://doi.org/10.32679/jth.v10i1.603>.
- BMKG. 2019. *Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416-2018: Per-Wilayah*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Bryant, E. 2002. Tsunami: The Underrated Hazard. *Physics Today* 55.
- Bryan, E. 2014. *Tsunami: The Underrated Hazard* (3rd ed.). Springer.
- Carey, S., Sigurdsson, H., Mandeville, C. & Bronto, S. 1996. Pyroclastic Flows and Surges over Water: An Example from the 1883 Krakatau Eruption. *Bulletin of Volcanology*, 57(7), 493–511.
- Kemenko, Bappenas, Kementrian PU, KLH, Pemprov DKI. 2014. *Pengembangan Terpadu Pesisir Ibukota Negara*. Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian: 93.
- KOICA. 2018. *Conceptual Design Report of OSD Jakarta, Indonesia National Capital Integrated Coastal Development Consulting Project Conceptual*.
- Latter, J. H. 1981. Tsunamis of Volcanic Origin: Summary of Causes, with Particular Reference to Krakatoa, 1883. *Bulletin Volcanologique*, 44(3), 467–90.
- Leschka, S., Pedersen, C. & Larsen, O. 2009. On the Requirements for Data and Methods in Tsunami Inundation Modelling – Roughness Map and Uncertainties.
- Maeno, F. & Imamura, F. 2011. Tsunami Generation by a Rapid Entrance of Pyroclastic Flow into the Sea during the 1883 Krakatau Eruption, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(9), 1–25.
- Nomanbhoy, N. & Satake, K. 1995. Generation Mechanism of Tsunamis from the 1883 Krakatau Eruption. *Geophysical Research Letters*, 22(4), 509–512.
- Sarker, M. A. 2018. Numerical Modelling of Tsunami in the Makran Subduction Zone—A Case Study on the 1945 Event. *Journal of Operational Oceanography*, 1–18.
- Self, S. & Rampino, M.R. 1981. The 1883 Eruption of Krakatau. *Nature*, 294(5843), 699–704.
- Symons. 1888. The Eruption of Krakatoa and Subsequent Phenomena. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 14(68), 301–7. <https://doi.org/10.1002/qj.4970146809>.
- Verbeek, R D M. 1884. The Krakatoa Eruption. *Nature* 30(757): 10–15.
- Yokoyama, I. 1981. A Geophysical Interpretation of the 1883 Krakatau Eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 9(4), 359–78.
- Yokoyama, I. 1987. A Scenario of the 1883 Krakatau Tsunami. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 34(1–2), 123–32.