

## ASESMEN STRUKTUR DERMAGA TERHADAP POTENSI GELOMBANG, GEMPA DAN TSUNAMI

Eka Faisal Nurhidayatullah<sup>1</sup>, Muhammad Aziz Fajar<sup>1</sup>, Cahyo Dita Saputro<sup>1</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta

Email: eka.faisal@staff.uty.ac.id

### Abstrak

Gelombang, gempa dan tsunami yang berpotensi terjadi merupakan ancaman bagi infrastruktur dermaga. Kerugian yang ditimbulkan akibat kerusakan dermaga mencakup korban jiwa, kerugian ekonomi akibat gangguan distribusi logistik, biaya perbaikan struktur yang rusak, hambatan pendistribusian bantuan bagi para korban pada masa tanggap darurat dan pemulihan. Asesmen struktur dermaga diperlukan guna mengidentifikasi lebih dini apabila terdapat potensi kelemahan dermaga yang diakibatkan oleh beban gelombang, gempa atau tsunami sehingga diharapkan mampu mengurangi risiko serta kerugian. Beban gelombang dan tsunami diperhitungkan dengan metode lateral statik ekuivalen dengan persamaan empiris fisika sesuai dengan ketentuan dan koefisien FEMA 55 & FEMA P646 sedangkan beban gempa diperhitungkan sebagai respons spektrum berdasarkan SNI 1726: 2019. Struktur dimodelkan secara tiga dimensi dengan perangkat lunak SAP 2000. Analisis struktur dikerjakan dengan metode statik dan dinamik linear. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gaya dalam pada elemen struktur dermaga akibat pengaruh gaya gempa cenderung lebih besar apabila dibandingkan dengan gelombang serta tsunami. Perhitungan beban tsunami menggunakan metode lateral statik ekuivalen dengan persamaan empiris fisika cenderung menghasilkan gaya yang relatif kecil sehingga kurang representatif. Rasio gaya dalam ultimit terhadap kapasitas penampang struktur menunjukkan nilai kurang dari satu pada seluruh elemen struktur dengan berbagai skenario kombinasi beban akibat pengaruh lingkungan. Simpangan lateral pada arah x dan y belum melampaui batas izin yang berarti bahwa kondisi struktur termasuk dalam keadaan baik.

**Kata kunci** : Gelombang, Gempa, Tsunami, Asesmen, Kapasitas stuktur bangunan, Simpangan

### 1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terdiri dari ribuan pulau dan termasuk salah satu yang memiliki garis pantai terpanjang di dunia. Apabila dilihat dari kacamata geologi, negara ini terletak pada pertemuan-pertemuan lempeng subduksi yaitu Indo Australia, Eurasia dan Pasifik. Selain itu terdapat beberapa gunung berapi aktif baik yang terletak di daratan maupun dasar laut seperti gunung Krakatau. Kondisi tersebut juga menyebabkan Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi bencana gempa dan tsunami.

Jakarta utara merupakan salah satu wilayah administratif provinsi Jakarta, ibu kota Indonesia sebelumnya. Kawasan ini mempunyai peran strategis sebagai pintu gerbang utama perdagangan dan transportasi maritim, khususnya melalui kompleks pelabuhan peti kemas Tanjung Priok. Sebagai titik transhipmen utama barang impor dan ekspor. Pelabuhan Tanjung Priok memiliki berbagai fasilitas, salah satu fasilitas yang terdapat dalam pelabuhan adalah dermaga. Dermaga merupakan infrastruktur dalam industri maritim yang berperan sebagai titik hubungan antara transportasi laut dan darat. Dermaga tidak hanya menjadi tempat pemuatan dan pemindahan kargo, tetapi juga berperan sebagai pusat

kegiatan bongkar muat kapal, pengapalan, dan distribusi barang (Triatmodjo, 2010).

Jakarta utara merupakan wilayah dengan potensi bencana gempa dan tsunami akibat aktivitas vulkanik gunung anak Krakatau di Selat Sunda. Aktivitas vulkanik gunung berapi tersebut dapat mengakibatkan terjadinya gempa serta gelombang tinggi hingga wilayah Jakarta utara. Selain itu, bencana gempa dan tsunami dapat dipicu oleh adanya zona megathrust yaitu pertemuan antara lempeng Indo-australia dan Eurasia dengan mekanisme subduksi di selatan selat sunda. Gempa megathrust merupakan jenis gempa bumi yang terjadi di zona subduksi, di mana satu lempeng tektonik menyusup di bawah lempeng tektonik lainnya. Ini terjadi karena tekanan yang terakumulasi dari gerakan lempeng tektonik yang berlangsung selama puluhan hingga ratusan tahun. Gempa megathrust sering kali memiliki magnitudo melebihi 8,0 skala Richter sehingga berpotensi memicu terjadinya gelombang Tsunami. Elevasi Jakarta yang sebagian besar berada di bawah ketinggian 1 hingga 2 meter di bawah permukaan laut menjadi faktor risiko yang signifikan apabila terjadi tsunami. Berdasarkan historis, bencana gempa dengan magnitudo yang besar yaitu 7,4 SR yang memicu gelombang tsunami mencapai ketinggian 3 meter sebelumnya pernah terjadi di wilayah laut Banten. BMKG mencatat bahwa

tsunami yang dihasilkan dari gempa tersebut menimbulkan kerusakan cukup luas di wilayah pesisir Banten (CNN Indonesia, 2019). Gelombang besar yang menerjang pantai dan daratan merusak bangunan warga dan sarana umum serta menimbulkan banyak korban jiwa.

Gempa dan tsunami yang berpotensi terjadi merupakan ancaman yang nyata bagi struktur bangunan. Bencana tersebut dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada infrastruktur pantai salah satunya dermaga. Kerusakan dermaga sebagai salah satu infrastruktur pantai dapat menimbulkan kerugian signifikan mencakup korban jiwa, penundaan pengiriman barang (logistik), biaya perbaikan struktur yang rusak, potensi kerugian ekonomi akibat gangguan dalam distribusi hingga menghambat pendistribusian bantuan logistik bagi para korban pada masa tanggap darurat dan pemulihan.

Asesmen struktur dermaga diperlukan guna mengidentifikasi lebih dini apabila terdapat potensi kelemahan dermaga yang diakibatkan beban gempa dan tsunami sehingga diharapkan mampu mengurangi risiko kecelakaan, meningkatkan efisiensi operasional, serta mengembangkan dermaga yang tangguh terhadap ancaman gempa dan tsunami hingga memperpanjang masa layanan struktur dermaga.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa penelitian terdahulu sudah membahas terkait asesmen kondisi bangunan tepi pantai akibat gelombang tsunami diantaranya yaitu (Pringgana, G. dkk, 2023) (Nayak S, et al, 2013 ) dan (Ario, dkk, 2023). Penelitian yang dilakukan oleh ketiganya menggunakan model beban tsunami dinamik percepatan terhadap waktu. (Pringgana, G. dkk, 2023) membuat model beban dinamik dengan cara mengabungkan persamaan empiris beban tsunami berdasarkan peraturan dari berbagai peneliti di beragam negara dari India, Jepang hingga Amerika. Sedangkan (Ario, dkk, 2023) memodelkan beban tsunami dinamik dengan pendekatan probablistik analisis. Analisis model beban dinamis seperti yang telah dijabarkan oleh beberapa peneliti terdahulu cenderung rumit dan memerlukan data yang kompleks. Analisis dengan cara tersebut cukup menyulitkan dan tidak praktis bagi perancang maupun konsultan. Meskipun hasil analisis beban dinamik tsunami pada penelitian-penelitian sebelumnya sudah memalui metode ilmiah yang komprehensif

belum memunculkan metode validasi guna mengukur tingkat akurasi beban gelombang tsunami yang diperoleh. Selain itu tinjauan objek asesmen pada sebagian besar penelitian sebelumnya hanya berfokus pada bangunan tepi pantai berupa gedung baik fasilitas publik maupun evakuasi.

Makalah ini berusaha menyajikan persamaan sederhana dengan menganalisis gaya gempa tsunami menggunakan metode statik lateral elivalen, sehingga baik metode maupun persamaan empirisnya diharapkan lebih aplikatif. Proses validasi hasil analisis dikerjakan dengan membandingkan gaya lateral statik tsunami dengan gaya gempa dan gelombang. Selain itu objek penelitian berfokus pada bangunan pantai jenis dermaga yang jarang dibahas pada penelitian sebelumnya.

### 2.1 Gelombang

Gelombang laut dapat menimbulkan gaya lateral yang signifikan pada struktur dermaga, terutama saat gelombang mencapai ketinggian maksimumnya. Gaya lateral tersebut dapat menyebabkan gaya geser dan momen lentur pada struktur dermaga terutama kolom atau tiang pancang. Persamaan empirik untuk menghitung gaya lateral akibat pengaruh gelombang laut dijabarkan sebagai berikut:

$$F_z = F_{dmax} (\cos\omega t)\cos\omega t - F_{imax}\sin\omega t(1)$$

Keterangan:

$F_{dmax}$  = Gaya drag maksimum (kN)  
 $F_{jmax}$  = Gaya inersia maksimum (kN)  
 $F_z$  = Gaya gelombang total (kN)  
 $\omega$  = Frekuensi Gelombang (Hz)  
 $t$  = Waktu (detik)

Beban arus pada struktur dermaga mengacu pada gaya-gaya yang dihasilkan oleh gerakan air laut yang dapat mempengaruhi kestabilan dan integritas dermaga. Arus laut dapat menyebabkan gaya hidrodinamik yang bertindak pada dermaga. Persamaan gaya arus menurut (OCDI, 2024).

$$F_d = 0,5C_d\rho AU^2 \quad (2)$$

Keterangan:

$F_d$  = Gaya drag akibat arus (kN)  
 $C_d$  = Koefisien drag  
 $\rho$  = Massa jenis air laut (kN/m<sup>3</sup>)  
 $A$  = Luas penampang (m<sup>2</sup>)  
 $U$  = Kecepatan arus (km/jam)

## 2.2 Gempa

Gaya gempa yang bekerja pada bangunan dipengaruhi oleh dua variabel yaitu percepatan gelombang dan berat bangunan. Gaya gempa pada struktur dermaga diperhitungkan dengan metode statik dan dinamik linear berdasarkan SNI 1726: 2019 (BSN (1) , 2019) dengan persamaan:

$$V = C_s \cdot W \quad (3)$$

Keterangan:

$C_s$  = Koefisien response seismik  
 $W$  = Berat seismik efektif (kN)

## 2.3 Tsunami

Beban tsunami merupakan beban yang dipengaruhi oleh gaya-gaya yang diakibatkan oleh gelombang tsunami seperti hidrodinamik, uplift, pembendungan puing, benturan, dan gaya gelombang. Gaya-gaya tsunami yang bekerja pada struktur dermaga diperhitungkan dengan metode statik ekivalen dengan pendekatan rumus empiris fisika dengan ketentuan dan koefisien mengacu pada FEMA 55 (FEMA, 2011) dan FEMA P646 (FEMA , 2019).

### 1) Gaya Hidrodinamik

$$F_d = \left(\frac{1}{2}\right) \times \rho_s \times C_d \times D \times (hu)^2 \max \quad (4)$$

Keterangan:

$(hu)^2 \max$  = Momentum permasa unit  
 $\rho_s$  = Kerapatan fluida (kN/m<sup>3</sup>)  
 $C_d$  = Koefisien drag  
 $F_d$  = Gaya Hidrodinamik (kN)

### 2) Gaya Gelombang

$$F_d = 1,5 F_s \quad (5)$$

Keterangan:

$F_s$  = Gaya gelombang (kN)  
 $F_d$  = Gaya hidrodinamik (kN)

### 3) Gaya Benturan

$$F_t = 1,3 u_{\max} \sqrt{K m d (1 + c)} \quad (6)$$

Keterangan:

$U_{\max}$  = Kecepatan aliran maksimal (km/jam)  
 $K$  = Kekakuan puing  
 $md$  = Massa puing (Ton)  
 $c$  = Koefisien massa hidrodinamik  
 $F_t$  = Gaya benturan (kN)

### 4) Gaya Pembendungan Puing

$$F_d = \left(\frac{1}{2}\right) \times \rho_s \times C_d \times B d \times (hu)^2 \max \quad (7)$$

Keterangan:

$F_d$  = Gaya pembendungan (kN)  
 $\rho_s$  = Kerapatan fluida (kN/m<sup>3</sup>)  
 $C_d$  = Koefisien drag  
 $(hu)^2 \max$  = Momentum permasa

### 5) Gaya Uplift

$$F_u = \left(\frac{1}{2}\right) \times C_u \times \rho_s \times A_f \times U_v^2 \quad (8)$$

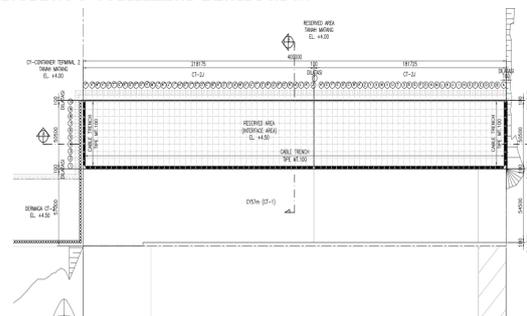
Keterangan:

$U_v$  = Estimasi kecepatan vertikal (km/jam)  
 $F_u$  = Gaya uplift (kN)  
 $\rho_s$  = Kerapatan fluida (kN/m<sup>3</sup>)  
 $A_f$  = Luas area (m<sup>2</sup>)  
 $C_u$  = Koefisien nilai

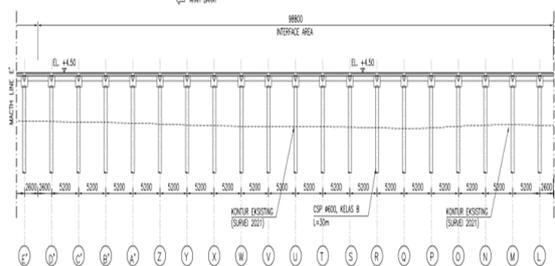
## 3. METODOLOGI

### 3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian merupakan struktur dermaga interface terminal Kalibaru.



Gambar 1. Tampak atas struktur dermaga interface (Sumber: DED Project, 2019)



Gambar 2. Potongan struktur dermaga (Sumber: DED Project, 2019)

### 3.2 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Kali Baru, Cilincing, Kali Baru, Jakarta Utara, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 14110. Koordinat 6°05'22.7"S 106°55'20.2"E.



Gambar 3. Lokasi Penelitian  
Sumber: (Dwi, 2015)

### 3.3 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

#### 1. Studi literatur

Informasi yang komprehensif melalui studi literatur diperlukan guna mendapatkan hasil penelitian yang otentik dan mutakhir. Studi literatur dalam penelitian adalah langkah penting yang melibatkan pengumpulan, analisis, dan interpretasi karya-karya ilmiah dan sumber informasi yang relevan dengan topik yang sedang diteliti.

#### 2. Pengumpulan data

Penelitian menggunakan data primer maupun sekunder. Data sekunder yang digunakan yaitu *Detailed Engineering Design (DED)*, hasil uji tanah lapangan oleh tim geoteknik, data hasil uji tarik material baja, dan hasil uji tekan material beton, serta data seismisitas daerah lokasi objek penelitian. Sedangkan data primer diketahui melalui survei langsung ke lapangan. Dengan melakukan survei lapangan secara langsung diharapkan pemodelan dan pembebanan struktur akan identik dengan kondisi eksisting bangunan.

#### 3. Pembebanan

Potensi beban yang bekerja pada struktur dermaga perlu dipertimbangkan secara holistik. Tipe beban yang diperhitungkan pada penelitian ini yaitu:

##### a. Beban Mati

Beban mati merupakan beban yang besarnya tetap dan tidak berubah seiring berjalan waktu dari awal hingga akhir masa layan. Hal ini termasuk berat sendiri elemen

struktural seperti plat lantai, balok, kolom/tiang pancang, serta *pilecap*.

##### b. Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang berubah seiring masa layan. Termasuk beban hidup pada struktur dermaga yaitu aktivitas manusia atau barang-barang yang bergerak di atas bangunan truk, petikemas, hingga *reach stacker*.

##### c. Beban Gelombang

Gelombang laut dapat menimbulkan gaya lateral yang signifikan pada struktur dermaga, terutama saat gelombang mencapai ketinggian maksimumnya. Gaya lateral tersebut dapat menyebabkan gaya geser dan momen lentur pada struktur dermaga terutama kolom atau tiang pancang.

##### d. Beban Arus

Beban arus pada struktur dermaga mengacu pada gaya-gaya yang dihasilkan oleh gerakan air laut yang dapat mempengaruhi kestabilan dan integritas dermaga. Arus laut dapat menyebabkan gaya hidrodinamik yang bertindak pada dermaga. Persamaan gaya arus menurut (OCDI, 2024).

##### e. Beban Angin

Angin dapat menyebabkan gaya lateral yang signifikan pada struktur dermaga, terutama pada bidang-bidang vertikal. Dalam penelitian beban angin diperhitungkan sesuai ketentuan SNI 1727:2020 (BSN (2), 2020).

##### f. Beban Tsunami

Beban tsunami merupakan beban yang dipengaruhi oleh gaya-gaya yang diakibatkan oleh gelombang tsunami seperti hidrodinamik, uplift, pembendungan puing, benturan, dan gaya gelombang. Gaya-gaya tsunami yang bekerja pada struktur dermaga diperhitungkan dengan metode statik ekuivalen dengan pendekatan rumus empiris fisika dengan ketentuan dan koefisien mengacu pada FEMA 55 (FEMA, 2011) dan FEMA P646 (FEMA, 2019).

##### g. Beban Gempa

Beban gempa adalah beban yang dihasilkan oleh guncangan yang berasal dari dalam tanah akibat aktivitas seismik lempeng tektonik maupun sesar. Beban gempa diperhitungkan sebagai beban horisontal statik ekuivalen dan dinamik respons spektrum sesuai dengan ketentuan SNI 1726: 2019 (BSN (1), 2019).

#### 4. Pemodelan dan analisis struktur

Pemodelan dan analisis struktur dikerjakan secara tiga dimensi (3D) dengan bantuan *software* SAP2000 V14. Analisis struktur dengan

model 3D dianggap lebih lebih realistis sehingga gaya dalam maupun perilaku struktur yang diperoleh mirip dengan kondisi eksisting struktur bangunan.

5. Pemeriksaan gaya geser dasar dan rasio partisipasi massa

SNI 1726: 2019 mensyaratkan bahwa dalam analisis dinamik linear respons spektrum perlu terpenuhi syarat gaya geser dasar hasil analisis struktur dinamik ( $V_{dinamik}$ ) lebih besar dari gaya geser dasar analisis struktur gaya gempa statik ( $V_{statik}$ ) atau  $V_{dinamik} \geq V_{statik}$ . Selain itu peraturan tersebut juga mengharuskan supaya tingkat partisipasi ragam analisis dinamik response spektrum melebihi atau sama dengan 90%.

6. Analisis perbandingan gaya dalam

Perbandingan gaya dalam akibat pengaruh beban gelombang, gempa dan tsunami diperlukan guna melihat seberapa signifikan dampak masing-masing beban terhadap elemen struktur dermaga. Perbandingan ditinjau pada gaya dalam yaitu gaya aksial, gaya geser dan momen.

7. Analisis kapasitas struktur

Pemeriksaan kapasitas struktur diperlukan guna mengidentifikasi tingkat efisiensi serta keamanan elemen struktur dermaga terhadap berbagai kombinasi beban yang kemungkinan terjadi baik akibat pengaruh layan maupun lingkungan. Pemeriksaan tersebut dilakukan pada struktur utama pemikul gaya seismik bangunan yaitu elemen balok dan kolom/tiang pancang mengacu pada pedoman SNI 2847: 2019 (BSN, 2019) dan (Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB, 2013).

8. Pemeriksaan simpangan struktur

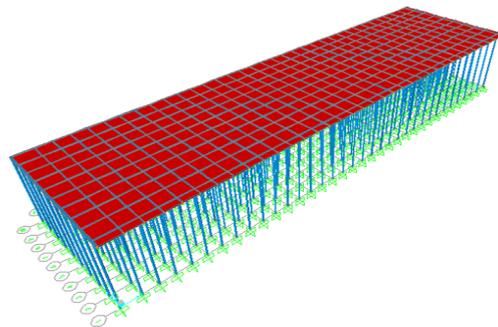
Kolom atau tiang pancang yang menerima gaya lateral akibat arus gelombang pasang, gempa maupun tsunami akan berdeformasi secara horisontal. Simpangan dapat menjadi parameter ampuh untuk mengetahui bagaimana kinerja struktur bangunan dermaga. Analisis simpangan struktur sesuai dengan SNI 1726:2019.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pemodelan Struktur

Struktur dermaga dimodelkan sesuai dengan kondisi eksisting berdasarkan pada data sekunder

yaitu *Detailed Engineering Design* (DED), hasil uji tarik baja tulangan dan uji tekan beton yang juga didukung oleh data primer berupa observasi lapangan dan wawancara terkait kondisi bangunan eksisting. Pemodelan elemen struktur baik balok, kolom/tiang pancang maupun pelat dikerjakan secara 3D terintegrasi dengan bantuan software SAP 2000.



Gambar 4. Pemodelan 3D struktur dermaga

### 4.2. Pembebanan

Berbagai beban yang berpotensi terjadi pada struktur dermaga perlu diperhitungkan untuk kemudian dikombinasikan dengan beban lainnya sesuai dengan kondisi realitas yang terjadi di lapangan. Jenis beban yang diperhitungkan pada struktur dermaga adalah sebagai berikut:

1. Beban gravitasi

Beban gravitasi terdiri dari dua jenis yaitu beban mati dan beban hidup. Termasuk ke dalam beban mati yaitu berat sendiri struktur (balok, kolom dan pelat lantai) dan beban mati tambahan (aspal). Berat sendiri diperhitungkan dengan memodelkan massa jenis material dan dimensi elemen-elemen struktur bangunan pada software SAP 2000 secara terintegrasi sedangkan beban mati tambahan diberikan sebagai beban merata pada model struktur. Beban hidup merupakan beban yang bekerja sementara dan berubah-ubah selama masa layan struktur dermaga. Beban hidup diberikan berdasarkan ketentuan SNI 1725:2016 (BSN 3, 2016) dan dari hasil observasi lapangan. Beban hidup yang diterapkan pada struktur dermaga yaitu air hujan = 0,5 kN/m<sup>2</sup>, truk = 500 kN, reach stacker = 78 Ton, petikemas tipe 40 ft sebesar = 27 Ton.

2. Beban Gelombang

Gelombang air laut yang tinggi dapat menimbulkan pengaruh gaya lateral signifikan pada struktur dermaga. Beban gelombang diperhitungkan dengan metode hindcasting menggunakan data historis angin dan cuaca yang diperoleh dari data base NOAA (NOAA, 2024).

Data parameter gelombang yaitu tinggi, periode dan arah gelombang diperoleh melalui pemodelan numerik menggunakan data historis cuaca dan angin dengan bantuan perangkat lunak WRPlot v8.0.2. Data parameter gelombang diolah dengan persamaan (1) hingga didapatkan gaya lateral gelombang sebesar  $F_z = 1,68 \text{ kN}$ . Gaya lateral tersebut kemudian diberikan pada titik tangkap gaya struktur kolom searah dengan gelombang air laut.

### 3. Beban Arus

Arus aliran air laut dapat memicu terjadinya gaya hidrodinamik pada struktur dermaga. Data kecepatan arus air laut sebesar  $U = 0,514 \text{ m/s}$  yang diperoleh dari jurnal pengukuran kecepatan air laut oleh PT. PP digunakan untuk menghitung besaran gaya hidrodinamik. Berdasarkan data kecepatan air laut yang dihitung dengan persamaan (2) diperoleh gaya hidrodinamik sebesar,  $F_d = 7,72 \text{ kN}$ . Sama seperti gaya akibat pengaruh gelombang, gaya akibat arus air laut diberikan sebagai gaya lateral pada titik berat tiang pancang atau kolom.

### 4. Beban Angin

Beban angin yang bekerja pada struktur bangunan bersumber dari tekanan angin akibat pengaruh kondisi topografi lingkungan setempat. Pembebanan angin dihitung sesuai dengan ketentuan American Society of Civil Engineer (ASCE, 2017) dan National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2024). Dari hasil perhitungan diperoleh beban lateral merata sebesar  $4,4 \text{ kN/m}$  untuk angin tekan dan  $2,2 \text{ kN/m}$  untuk angin hisap.

### 5. Beban Tsunami

Beban akibat gelombang tsunami yang dapat mempengaruhi stabilitas dan integritas struktur dermaga dikategorikan dalam 5 jenis, yaitu:

#### a. Gaya Hidrodinamik

Gaya hidrodinamik terjadi akibat aliran air yang bergerak sedemikian cepat sehingga memberikan beban lateral yang besar pada elemen struktur dermaga terutama kolom. Gaya hidrodinamik diperhitungkan sebagai beban lateral yang diberikan secara merata pada sepanjang tiang kolom menggunakan persamaan (4) sebesar  $F_d = 11,571 \text{ kN/m}$ .

#### b. Gaya Gelombang Tsunami

Gulungan gelombang air laut yang tinggi menghantam struktur dermaga diperhitungkan sebagai gaya lateral dengan persamaan (5) yaitu sebesar  $F_t = 17,356 \text{ kN/m}$ .

#### c. Gaya Benturan

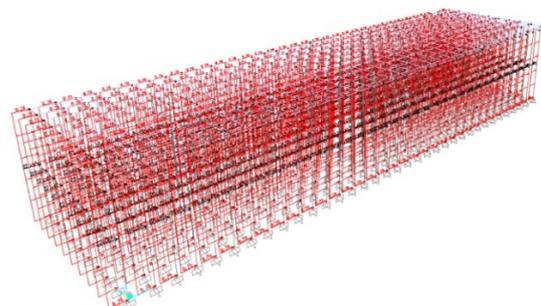
Gelombang tsunami selain mengandung air juga membawa puing-puing (debris) yang berupa batang pohon, batu potongan kayu, kapal dan material lain. Material tersebut berpotensi menyebabkan benturan sehingga meningkatkan gaya lateral pada struktur dermaga secara signifikan. Dengan menggunakan persamaan (6) diperoleh nilai gaya benturan sebesar  $F_t = 221,67 \text{ kN}$  yang diberikan pada tengah tiang kolom.

#### d. Gaya Pembendungan

Gelombang air tsunami yang tumpah dan tertahan oleh elemen struktur dermaga bisa menyebabkan tekanan yang tinggi sebelum kemudian mengalir menuju ke daratan. Gaya pembendungan tersebut diperhitungkan dengan persamaan (7) sebagai beban lateral statik ekuivalen pada pusat tiang kolom yaitu sebesar  $F_d = 231,42 \text{ kN}$ .

#### e. Gaya Uplift

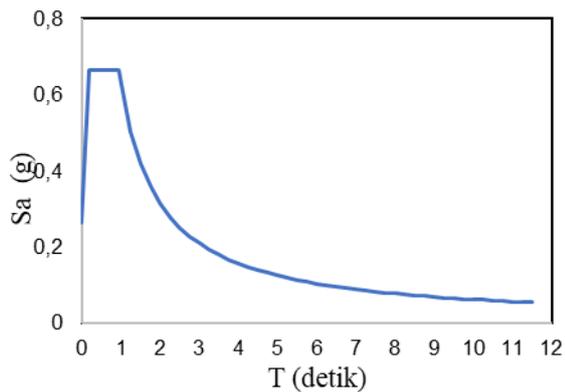
Gelombang tsunami yang membawa air berkecepatan tinggi dengan volume begitu besar dapat memicu timbulnya tekanan air dari bawah ke atas (gaya uplift). Gaya angkat tersebut diperhitungkan dengan persamaan (8) sehingga diperoleh  $F_u = 20,701 \text{ kN/m}$ .



Gambar 5. Ilustrasi beban tsunami pada elemen struktur dermaga

#### 6. Beban Gempa

Beban gempa dihasilkan oleh guncangan yang berasal dari dalam tanah akibat adanya aktivitas lempeng tektonik maupun sesar. Guncangan tersebut diperhitungkan sebagai beban horizontal yang bekerja pada elemen struktur bangunan. Beban gempa diperhitungkan sebagai beban dinamik respons spektrum sesuai dengan ketentuan yang terdapat pada SNI 1726:2019 (BSN (1), 2019) seperti yang dikerjakan oleh (Nurhidayatullah & Kurniati, 2021).



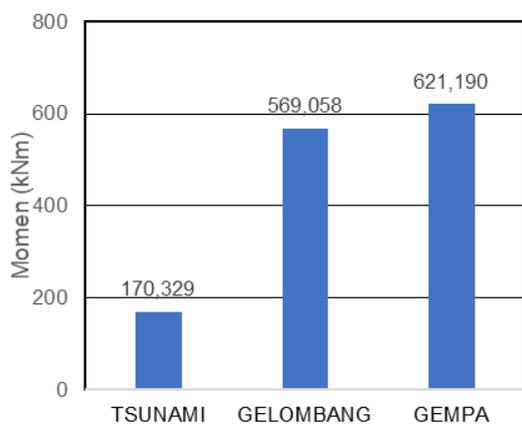
Gambar 6. Respon spektrum gempa

Skenario gempa dinamik yang dianalisis berdasarkan kondisi seismisitas serta klasifikasi situs lokasi objek penelitian menghasilkan respons spektrum dengan nilai PGA = 0,25g, percepatan periode pendek,  $S_s = 0,62g$  dan percepatan periode 1 detik,  $S_1 = 0,56g$ .

### 4.3. Gaya Dalam Struktur Dermaga

Beban-beban yang sudah diperhitungkan diberikan pada model struktur bangunan (Gambar 5.) dengan kombinasi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di SNI 1725: 2016 (BSN 3, 2016). Analisis struktur kemudian dikerjakan dengan metode analisis statik dan dinamik linear dengan bantuan perangkat lunak SAP 2000 V14 hingga diperoleh gaya-gaya dalam dan deformasi. Ditinjau gaya dalam hasil analisis struktur akibat pengaruh kombinasi beban tsunami, gelombang dan gempa pada berbagai elemen struktur.

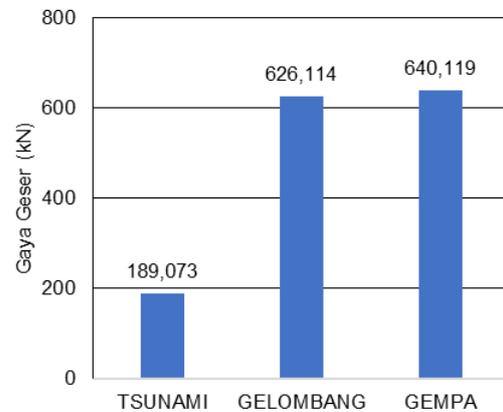
#### a. Perbandingan gaya dalam balok



Gambar 7. Perbandingan momen balok

Gaya dalam momen pada struktur balok akibat pengaruh kombinasi beban gempa cenderung lebih besar dari pada pengaruh

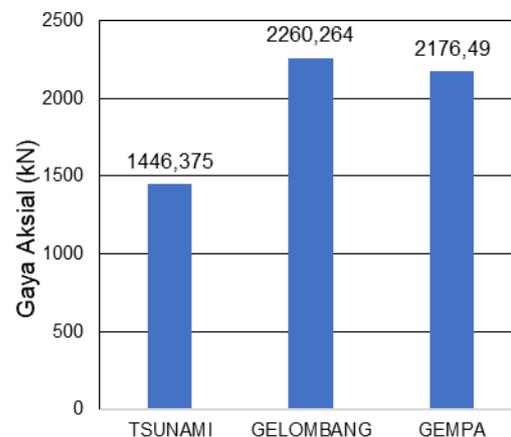
tsunami maupun gelombang. Kombinasi akibat pengaruh beban tsunami menghasilkan momen terkecil apabila dibandingkan dengan yang lainnya.



Gambar 8. Perbandingan gaya geser balok

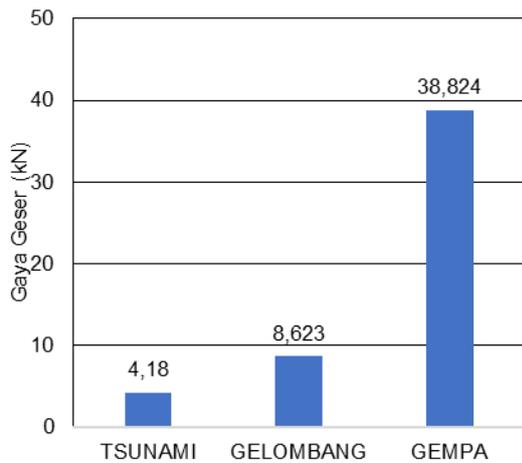
Grafik menunjukkan bahwa nilai gaya geser pada balok akibat pengaruh kombinasi beban gempa relatif lebih besar dari pada tsunami dan gelombang. Gaya geser balok yang dipengaruhi tsunami merupakan gaya geser terkecil.

#### b. Perbandingan gaya dalam tiang pancang



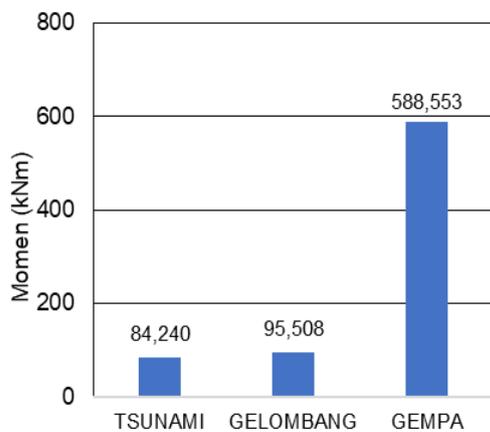
Gambar 9. Perbandingan gaya aksial tiang pancang

Pada grafik tersebut ditunjukkan bahwa nilai gaya aksial tiang pancang akibat pengaruh beban gelombang relatif lebih besar dari pada pengaruh baik beban tsunami maupun gempa. Sedangkan gaya aksial yang dipengaruhi tsunami merupakan gaya aksial terkecil. Gelombang memberikan pengaruh gaya lateral yang cenderung kecil terhadap struktur kolom dermaga sehingga struktur lebih didominasi oleh gaya aksial tekan.



Gambar 10. Perbandingan gaya geser tiang pancang

Nilai gaya geser pada tiang pancang akibat pengaruh kombinasi beban gempa relatif lebih besar dari pada gaya geser yang dipengaruhi oleh tsunami dan gelombang. Gaya geser akibat beban tsunami merupakan yang terkecil. Struktur vertikal seperti kolom atau tiang pancang memang akan lebih didominasi oleh gaya geser apabila gempa dengan skala besar terjadi.



Gambar 11. Perbandingan momen pada tiang pancang

Grafik menunjukkan bahwa nilai momen pada tiang pancang akibat pengaruh beban gempa relatif lebih besar dari pada pengaruh tsunami dan gelombang. Momen akibat pengaruh gelombang lebih kecil dari pada momen akibat gempa. Tsunami memberikan gaya dalam momen paling kecil pada struktur tiang pancang apabila dibandingkan dengan beban lateral yang lain.

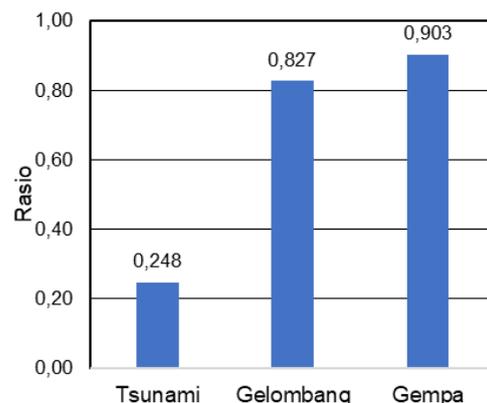
Gaya dalam akibat pengaruh beban lateral baik momen maupun geser pada struktur tiang

pancang didominasi oleh gempa sedangkan tsunami cenderung kecil. Perhitungan gaya lateral akibat pengaruh tsunami dengan metode statik ekuivalen dengan persamaan empiris fisika cenderung menghasilkan gaya dalam yang terlalu kecil sehingga kurang representatif. Analisis beban tsunami dengan metode dinamik seperti yang dikerjakan oleh (Nayak S, et al, 2013 ) dan (Pringgana, G. dkk, 2023) lebih realistis dan menghasilkan gaya dalam yang tidak terlalu kecil.

#### 4.4. Kapasitas Elemen Struktur Dermaga

Gaya dalam pada berbagai komponen struktur seperti tercantum pada pembahasan subbab sebelumnya belum dapat merepresentasikan kondisi elemen struktur beton bertulang akibat beban yang bekerja terhadapnya. Analisis dengan metode statik ekuivalen masih bersifat linear sehingga belum mampu mengetahui tingkat serta pola keruntuhan melalui terbentuknya sendi plastis pada elemen struktur seperti halnya pada analisis nonlinear (Nurhidayatullah, E. F. & Kurniati, D. K. , 2022). Sebagai alternatif, analisis kapasitas penampang struktur linear dapat digunakan untuk mengetahui apakah struktur masih memiliki kekuatan yang cukup untuk mendukung beban-beban tersebut tanpa terjadi deformasi yang berlebihan (keruntuhan). Berbagai variabel yang diperlukan dalam analisis kapasitas penampang struktur meliputi gaya dalam, sifat mekanis material (kuat tekan beton dan kuat leleh baja), dimensi serta konfigurasi penampang struktur beton bertulang.

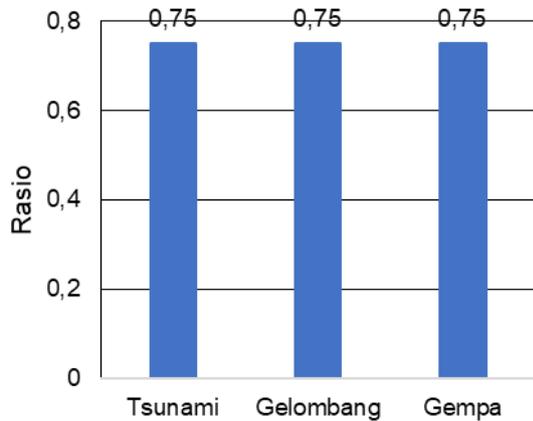
##### a. Analisis Kapasitas Penampang Balok



Gambar 12. Rasio momen balok

Grafik menunjukkan bahwa nilai rasio momen pada balok akibat pengaruh kombinasi beban gempa relatif lebih besar dari pada oleh tsunami dan gelombang. Rasio momen balok

menunjukkan angka kurang dari 1 dari seluruh simulasi beban yang diberikan. Nilai rasio tersebut berarti bahwa elemen penampang struktur balok masih berada dalam kondisi baik.

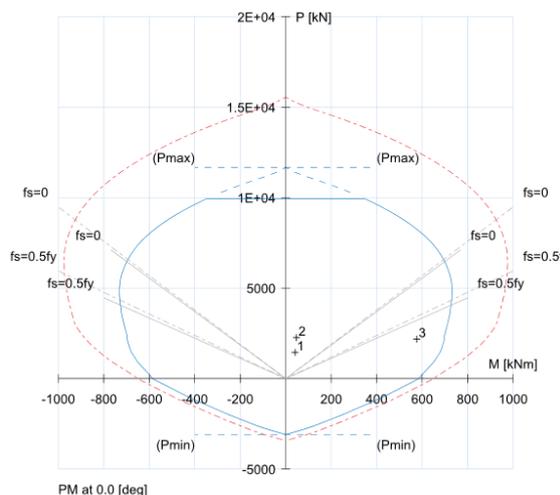


Gambar 13. Rasio gaya geser balok

Rasio gaya geser akibat pengaruh beban tsunami, gelombang, dan gempa memiliki cenderung mempunyai nilai yang sama yaitu 0,75. Nilai rasio menunjukkan kurang dari angka 1 yang berarti bahwa elemen penampang struktur balok masih berada dalam kondisi baik tidak berpotensi mengalami kegagalan geser.

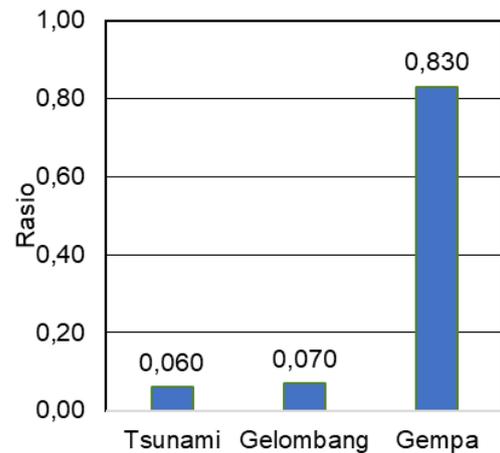
b. Analisis Kapasitas Tiang Pancang

Kapasitas tiang pancang beton bertulang diperhitungkan dengan metode diagram Mn-Pn.



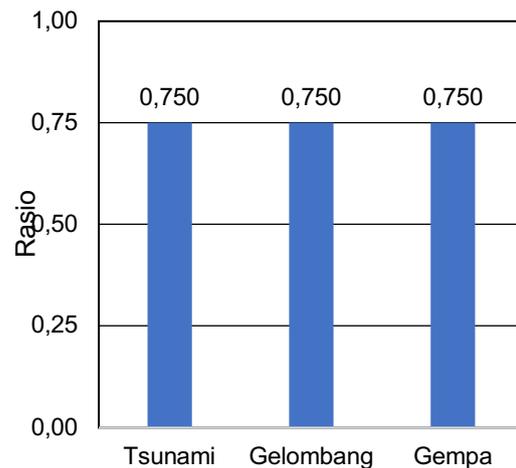
Gambar 14. Grafik Mn-Pn tiang pancang

Berdasarkan diagram dapat diketahui nilai momen nominal ( $M_n$ ) dan gaya aksial nominal ( $P_n$ ) yang dapat dikerahkan oleh struktur tiang pancang dermaga pada berbagai skenario beban yang terjadi.



Gambar 15. Rasio Mn-Pn tiang pancang

Nilai rasio kombinasi gaya aksial dan momen pada balok akibat pengaruh gaya gempa relatif lebih besar dari pada tsunami dan gelombang. Seluruh rasio menunjukkan bahwa struktur tiang pancang berada dalam kondisi baik pada saat beerbagai jenis beban berkerja.



Gambar 16. Rasio geser tiang pancang

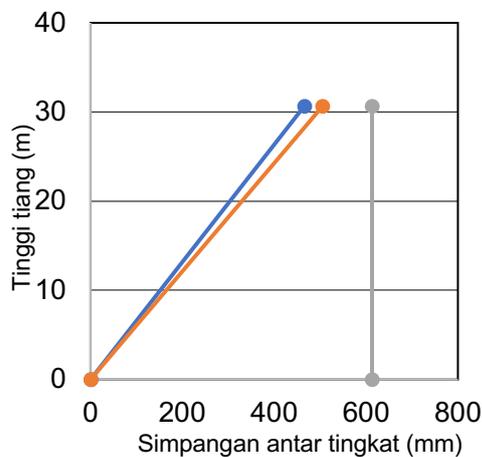
Rasio geser tiang pancang menunjukkan bahwa pengaruh beban gempa menimbulkan efek geser yang sama dengan tsunami maupun gelombang memiliki nilai terkecil. Rasio geser menunjukkan nilai  $< 1$  yang berarti bahwa tidak berpotensi mengalami kerusakan baik pada material beton maupun baja akibat pengaruh berbagai beban lingkungan yang berpotensi terjadi.

Analisis kapasitas struktur dengan metode statik dan dinamik linear menunjukkan bahwa seluruh komponen struktur dermaga berada dalam kondisi baik apabila memikul beban lingkungan seperti gempa, gelombang maupun tsunami. Tegangan yang terjadi pada komponen

material struktur komposit beton bertulang tidak melampaui batas kekuatannya sehingga tidak menimbulkan kerusakan secara permanen. Untuk mengetahui hirarki dan pola keruntuhan elemen struktur secara lebih realistis akibat beban lingkungan yang eksekif disarankan untuk menggunakan model analisis berbasis nonlinear seperti pushover analysis, progressive collapse maupun non linear time history analysis.

#### 4.5. Simpangan

Simpangan merupakan salah satu parameter powerful pada desain dan asesmen struktur bangunan baik dengan metode analisis berbasis linear maupun nonlinear (Nurhidayatullah & Djawa, 2024).



Gambar 17. Simpangan struktur

Pada saat memikul beban lateral akibat pengaruh lingkungan, struktur berdeformasi secara horizontal tidak melebihi batas simpangan izin sesuai dengan ketentuan SNI 1726: 2019 (BSN (1), 2019). Struktur dermaga dikategorikan dalam kondisi baik yang berarti deformasi yang terjadi pada komponen material penyusun yaitu beton dan baja masih bersifat elastis pada level beban desain. Namun pada saat beban lateral terjadi secara eksekif melebihi kapasitas struktur kerusakan inelastis mulai terbentuk secara daktail sehingga struktur dermaga tidak berpotensi menderita keruntuhan.

#### 5. KESIMPULAN

Berdasarkan riset yang telah dilaksanakan diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

a. Gaya dalam pada elemen struktur balok maupun tiang pancang akibat pengaruh gaya gempa cenderung lebih besar apabila

dibandingkan dengan gelombang serta tsunami. Perhitungan beban tsunami menggunakan metode lateral statik ekuivalen dengan persamaan empiris fisika cenderung menghasilkan gaya yang relatif kecil sehingga kurang representatif. Disarankan untuk menghitung beban tsunami menggunakan metode dinamik supaya lebih realistis dan menghasilkan gaya dalam yang tidak terlalu kecil.

b. Rasio gaya dalam ultimit terhadap kapasitas penampang struktur menunjukkan nilai kurang dari satu pada seluruh elemen struktur dengan berbagai skenario kombinasi beban akibat pengaruh lingkungan.

c. Hasil analisis menunjukkan simpangan lateral pada arah x dan y belum melampaui batas simpangan izin yang berarti bahwa kondisi struktur termasuk dalam keadaan baik.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- Ario, dkk. (2023). Building Vulnerability Analysis Due to Tsunami by Using Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA): A Case Study of Pelabuhan Ratu, Sukabumi. The 15th of Aceh International Workshop and Expo on Sustainable Tsunami Disaster Recovery (The 15th AIWEST-DR 2023). 1 - 9, pp. 11 - 13. Yogyakarta : EDP Sciences . doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344701003>
- ASCE. (2017). Minimum Design Loads And Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-16). American Society of Civil Engineer.
- BSN (1) . (2019). SNI 1726: 2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Jakarta: BSN Press.
- BSN (2). (2020). SNI 1727: 2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Struktur Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Jakarta: BSN.
- BSN. (2019). SNI 2847 : 2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan. Jakarta: BSN Press.
- BSN 3. (2016). SNI 1725-2016 Pembebanan untuk Jembatan. Jakarta, Indonesia : Badan Standardisasi Nasional.
- CNN Indonesia. (2019, Agustus 02). <https://www.cnnindonesia.com/nasional/20190802195025-20-417925/gempa-banten-bmkg-sebut-potensi-tsunami-maksimal-3->

- meter. Retrieved 9 10 , 2024, from <https://www.cnnindonesia.com/>.
- Dwi. (2015, 01 15). <https://petalengkap.blogspot.com/2015/05/peta-lokasi-penting-di-jakarta.html>. Retrieved 09 26, 2024, from <https://petalengkap.blogspot.com/>.
- FEMA . (2019). FEMA P-646:2019 Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2011). FEMA P-55 Coastal Construction Manual . Washington, D.C. , United States of America (USA) : FEMA .
- Nayak S, et al. (2013 ). Assessing tsunami vulnerability of structures designed for seismic loading. International Journal of Disaster Risk Reduction . doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.12.001>
- NOAA . (2024). Wind speed data from coastal buoys. Retrieved 10 02 , 2024 , from National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.ndbc.noaa.gov>
- Nurhidayatullah & Djawa . (2024 , Juli ). Pengaruh Pemilihan Tipe Dinding Geser Terhadap Perilaku Simpangan Antar Tingkat dan Torsi Bangunan. Jurnal Teknik Sipil Unaya, 10 (2), 42-58 . doi: <https://doi.org/10.30601/jtsu.v10i2.5013>
- Nurhidayatullah, E. F. & Kurniati, D. K. . (2022, Juli ). Korelasi Perilaku Struktur Bangunan Berdasarkan Parameter R, Cd dan  $\Omega$  Terhadap Tingkat Kinerja pada Beragam Simulasi Gempa. Jurnal Teknik Sipil Unaya, 8(2), 189 - 203. doi:<https://doi.org/10.30601/jtsu.v8i2.2841>
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniati, D. (2021, Maret). Potensi Kerusakan Bangunan Bertingkat Sedang dengan Skenario Gempa Lebih Besar Sama Dengan 5 SR Sebagai Upaya Mitigasi Kebencanaan di Yogyakarta. Teras Jurnal, 11(1), 125 - 139. doi:<http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i1.409>
- Pringgana, G. dkk. (2023, Agustus 8 - 10 ). Behavior of Building Structure Subject to Tsunami Load. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science , 1 - 9 . doi:[doi:10.1088/1755-1315/1117/1/012039](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1117/1/012039)
- Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB . (2013). Pedoman Teknik Perancangan Struktur Bangunan Tempat Evakuasi Sementara Tsunami. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Triatmodjo, B. (2010). Perencanaan Pelabuhan. Yogyakarta: Beta Offset.