

Beban Vertikal Gelombang pada *Deck* Dermaga di Pelabuhan Marore, Provinsi Sulawesi Utara

Paulus Benny Sumurung Saragi Sidabalok*

Program Magister Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung
E-mail: paul.sidabalok@gmail.com

Rildova

Program Studi Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung
E-mail: rildova@ocean.itb.ac.id

Abstrak

Sejumlah literatur menawarkan formulasi untuk memprediksi beban vertikal gelombang pada dermaga, namun terdapat rentang perbedaan hasil yang mengakibatkan tingkat kepercayaan yang berbeda (McConnell, Kirsty, William Allsop, and Ian Cruickshank, 2004). Pada studi ini, simulasi dilakukan dengan model numerik menggunakan ANSYS Fluent 17.2 Academic Release dengan modul Volume of Fluid (VOF), model turbulensi SST $k-\omega$, dan solver PISO. Keluaran model ini berupa seri waktu tekanan total rata-rata pada sisi yang dipilih. Pengaturan model numerik didahului dengan validasinya terhadap model fisik dan numerik dari studi terdahulu. Pengaturan model yang telah divalidasi kemudian digunakan sebagai dasar pemodelan yang diterapkan untuk kondisi perairan dan geometri dermaga yang sebenarnya, dalam empat kondisi tinggi gelombang. Keluaran tekanan total rata-rata maksimum kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan dari formulasi lainnya, untuk melihat kecenderungan studi terdahulu yang mendekati hasil pemodelan. Diperoleh bahwa hasil yang paling mendekati formulasi yang ditawarkan oleh Ito dan Takeda (1967) pada OCDI dengan rentang selisih $-12%$ hingga $+29%$. Keluaran tekanan maksimum ini juga dibandingkan terhadap peningkatan tinggi gelombangnya, sehingga dapat dibuat hubungan linear sederhana untuk mewakili perhitungan beban akibat gelombang. Diperoleh bahwa beban akibat gelombangnya paling mendekati formulasi yang ditawarkan oleh Elghamry dan Wang (1971) dan Overbeek dan Klabbers (2000) dengan rentang selisih $-32%$ hingga $+6%$.

Kata-kata Kunci: Dermaga, ANSYS Fluent, gelombang, beban vertikal, volume of fluid

Abstract

Several literatures offered formulations of vertical wave loads on deck. However, the range of results led to various levels of confidence in the use of these formulations. This study performed simulations using ANSYS Fluent 17.2 Academic Release with Volume of Fluid (VOF) module, SST $k-\omega$ turbulence model, and PISO solver. The output was a time series of average total pressure on the selected side. The setting of the numerical model is preceded by validation of the physical and numerical models from previous studies. The validated model was then used as the basis for modeling, which was applied to the actual water conditions and pier geometry in four wave height conditions. The maximum average total pressure was then compared with the results from other formulations to evaluate the trend which was close to previous studies. It was found that the results were closest to the formulation offered by Ito and Takeda (1967) on OCDI, with a difference of $-12%$ to $+29%$. This maximum pressure output was also compared to the increase in wave height, so a simple linear relationship can be made to represent the wave load. It was found that the load was closest to the formulation offered by Elghamry and Wang (1971) and Overbeek and Klabbers (2000), with a difference of $-32%$ to $+6%$.

Keywords: Pier, ANSYS fluent, wave, uplift, volume of fluid

1. Pendahuluan

Beban ekstrem yang diterima suatu struktur dapat membuat kerusakan struktural jika struktur tidak didesain untuk menghadapi beban tersebut. Salah satu beban ekstrim yang sering kali diabaikan dalam perencanaan dermaga tipe *jetty* di Indonesia adalah ketahanan struktur terhadap beban vertikal dan horizontal akibat gelombang yang mencapai *deck*

(struktur atas) dermaga. Beban akibat gelombang yang bergerak vertikal mencapai struktur atas dermaga disebut dengan beban *uplift*.

Dalam perancangan desain dermaga tipe *jetty*, pengabaian perhitungan beban *uplift* ini sering dilakukan karena metode-metode perhitungan beban tersebut merupakan perhitungan empiris. Berbagai metode perhitungan itu juga memberikan hasil yang

* Penulis Korespondensi: rildova@ocean.itb.ac.id

jauh berbeda yang dapat berpengaruh signifikan dalam perancangan struktur dermaga. Selain perbedaan metode-metode perhitungan, hal yang menjadi hambatan adalah penentuan karakteristik gelombang yang sebenarnya mungkin atau akan terjadi di perairan di bawah dermaga. Perbedaan penentuan tinggi dan periode gelombang akan mengakibatkan penentuan besaran beban *uplift* yang berbeda pula.

Fenomena terjadinya beban *uplift* ini merupakan hempasan (*slam*) yang diperkirakan cukup besar, tetapi terjadi dalam waktu yang sangat singkat dan berulang. Contoh kejadian benturan antara gelombang dengan struktur atas dermaga tipe deck-on-pile yang berhasil didokumentasikan ditunjukkan pada **Gambar 1**, yang berlokasi di Pelabuhan Marore, Kabupaten Kepulauan Sangihe, Provinsi Sulawesi Utara.

Tujuan utama dari studi ini adalah untuk mengembangkan pemahaman yang lebih baik dari proses beban gelombang vertikal pada *platform* pelabuhan. Pemahaman dilakukan dengan menentukan perhitungan yang lebih sesuai untuk digunakan sebagai penentuan beban vertikal akibat tumbukan gelombang pada struktur atas dermaga tipe *deck-on-pile* (*open type*), terutama untuk jenis geometri dermaga beton konvensional yang ada di Indonesia. Pemahaman tersebut juga didukung dengan simulasi yang dilakukan dengan pemodelan numerik.

2. Teori dan Metodologi

Untuk mencapai tujuan penelitian ini, studi literatur yang lebih luas perlu dilakukan. Hasil dari studi ini akan menghasilkan sejumlah metode untuk menentukan beban gelombang vertikal dan sejumlah rekomendasi bagaimana untuk meminimalisasi efek pada *platform*. Selain perbandingan metode perhitungan, dipertimbangkan juga hasil-hasil uji model yang pernah dilakukan, baik itu uji model fisik maupun model numerik.

Dalam perencanaan sebuah dermaga, ada beberapa metode perhitungan, yang dapat digunakan untuk memperkirakan beban tumbukan gelombang (*wave impact* atau *wave slamming*) yang mungkin diterima oleh struktur. Ketika gelombang mencapai struktur *deck* (*platform* horizontal), interaksi yang akan terjadi antara gelombang dan *platform*:

1. Hempasan gelombang aktual, berubah dengan cepat, tekanan tumbukan berdurasi cepat; diikuti dengan

2. Tekanan *uplift* positif yang berubah dengan lambat; diikuti dengan
3. Tekanan hisap negatif yang berubah dengan lambat.

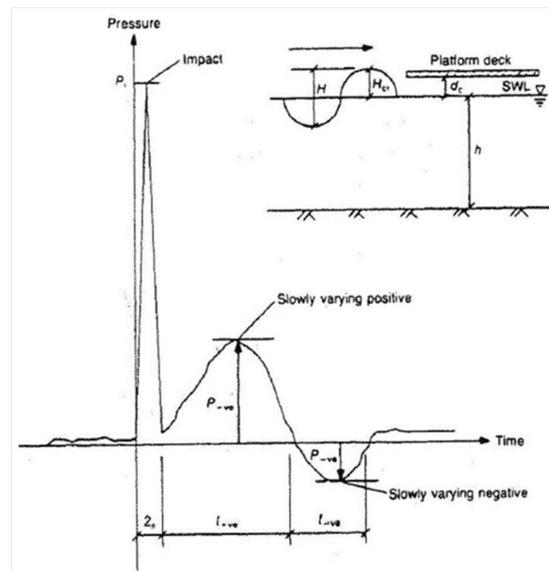
Skema terjadinya tekanan yang diterima oleh *platform* akibat gelombang dalam seri waktu, disketsakan oleh Shih dan Anastasiou (1992) seperti pada **Gambar 2**.

2.1 Studi terdahulu

Sebuah percobaan telah dilakukan Ito dan Takeda (1967), yang digunakan dalam *Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan* oleh The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (2010), pada model dermaga tipe terbuka (*open-type wharves*) dengan skala untuk menentukan beban *uplift* pada jembatan. Percobaan model dilakukan untuk gelombang tegak dengan tinggi gelombang 40 cm dengan periode 1,0 detik dan 2,4 detik serta kedalaman 56 cm dan 60 cm. Rata-rata dari hasil nilai puncak beban *uplift* akibat gelombang standing yang diperoleh dari percobaan, dapat diperkirakan dengan **Persamaan (1)**.

$$p = 4 \rho_0 g H \tag{1}$$

Dimana P adalah rata-rata nilai puncak beban *uplift* (kN/m^2), ρ_0 adalah massa jenis air laut (1.03 ton/m^3), g



Gambar 2. Tipikal seri waktu tekanan akibat hempasan gelombang (Shih dan Anastasiou, 1992)



Gambar 1. Fenomena terjadinya benturan gelombang dengan struktur atas dermaga di pelabuhan Marore, provinsi Sulawesi Utara (PT Rayasurverindo Tirtasarana, 2014)

adalah akselerasi gravitasi (9.81 m/s^2), H adalah tinggi gelombang datang (m) (H_{max}).

Coastal Engineering Manual (CEM) mengusulkan perumusan gaya hempasan untuk struktur lepas/tergantung di atas air. Perumusan ini didasarkan pada struktur/member yang terkena osilasi aksi gelombang. Pada skenario ini, gaya uplift tidak dapat diturunkan secara teoritis karena kerumitan intraksi struktur terhadap fluida. Namun, penggunaan koefisien hempasan (*slamming*) dapat digunakan secara empiris pada **Persamaan 2** berikut untuk memperkirakan besar gaya *uplift*.

$$F_U = C_U A_z \gamma_w \left(\frac{w^2}{2g} \right) \quad (2)$$

Dimana F_U adalah gaya *uplift* gelombang pada struktur (kN), C_U adalah koefisien hempasan yang diturunkan dari uji laboratorium, A_z adalah luas proyeksi struktur solid pada bidang horizontal (m^2), γ_w adalah spesifik gravitasi fluida (kg/m^3), w adalah kecepatan partikel fluida komponen vertikal pada ketinggian objek (m/s), dan g adalah percepatan gravitasi (m/s^2). Pada studi lain, Tickell (1994) melaporkan coefisien hempasan C_U untuk struktur deck berkisar antara 2 sampai 20.

DNV RP C205 (2010) menawarkan 2 metode perhitungan gaya tumbukan vertikal akibat gelombang, yaitu dengan metode pendekatan yang telah disederhanakan, dan dengan metode momentum.

1. Metode Penyederhanaan

Metode ini dikembangkan menggunakan *deck* tipa kotak sederhana. Formulasi yang diusulkan oleh *code* ini adalah:

$$F_v = \frac{1}{2} \rho C_v A v_z^2 \quad (3)$$

dimana F_v adalah total gaya vertikal (N), ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), C_v bernilai 5 untuk gelombang datang tegak lurus *deck* dan bernilai 10 untuk gelombang miring 45° terhadap *deck*, A adalah luas area terkena fluida (m^2), v_z adalah kecepatan partikel vertikal di titik kontak fluida-*deck* (m/s).

2. Metode Momentum

Gaya tumbukan vertikal pada metodel ini diberikan dengan mengombinasikan dampak tingkat perubahan momentum dan gaya seret (*drag*). Dengan memperkirakan area kontak fluida dan *deck* pada pelat sepanjang L dan lebar B , dan dengan asumsi gelombang menjalar searah panjang pelat, gaya tumbukan vertikal yang diusulkan adalah:

$$F_v(t) = \frac{d}{dt} (M_{a,z} w) + \frac{1}{2} \rho B L C_D w |w| \quad (4)$$

$$\text{added mass: } M_{a,z}(t) = \rho \frac{\pi}{8} B L^2 \left[1 + \left(\frac{L}{B} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

dimana F_v adalah total gaya vertikal (N), $w = w(t)$ adalah kecepatan vertikal fluida di sisi bawah *deck* (m/s), $L = L(t)$ adalah panjang area kontak fluida (m), B adalah lebar struktur, C_D bernilai 2 adalah koefisien seret (*drag*).

Dalam penelitiannya, untuk gelombang periodic dengan kedalaman konstan, Elghamry (1971) dan Wang (1970) mengajukan pendekatan untuk gaya *uplift* tergantung pada tinggi gelombang, jarak *deck*, dan kemiringan gelombang atau perioda. Dari teori gelombang Stoke, diturunkan formula:

$$F_v = c_1 c_2 \frac{\gamma_w H \lambda}{2} \sqrt{1 + \frac{3r^2}{1+r^2}} \quad (6)$$

dimana F_v adalah total gaya *uplift* pada sisi bawah *deck* per unit lebar (N/m), C_1 adalah faktor koreksi akibat kemiringan gelombang, C_2 adalah faktor koreksi akibat jarak *deck* dengan muka air, $\Delta H/H$ adalah faktor koreksi akibat kemiringan gelombang, h adalah jarak *deck* dengan muka air tenang (m), d adalah kedalaman air (m), γ_w adalah berat spesifik air (N/m^3), H adalah tinggi gelombang (m), L adalah panjang gelombang (m), λ adalah panjang plat horizontal (m), dan $r = \pi/L$.

Penelitian lain dilakukan oleh French (1971) dengan menggunakan fragmen foto. French mendapati tekanan puncak yang cepat-bervariasi terdistribusi pada porsi yang sangat kecil pada bentang *platform* pada waktu tertentu, membuat hal itu menjadi perhatian ketika kekuatan member individual struktur dipertimbangkan. Tekanan lambat-bervariasi yang mengikutinya menjadi perhatian jika mempertimbangkan kekuatan struktur sebagai satu kesatuan.

Penelitian mengacu pada struktur eksisting lainnya dilakukan oleh Broughton dan Horn (1987) pada *platform* Ekofisk, Norwegia, yang terpengaruh akibat penurunan dasar laut, sehingga *platform deck* menjadi dapat dikenai oleh aksi gelombang. Broughton dan Horn mencoba mendefinisikan besar dan intensitas gaya-gaya gelombang ini. Mereka memprediksikan secara teoritis interaksi antara gelombang dengan sisi bawa *deck*. Formulasi yang dibangun, mengikuti Von Kármán dan Wang, adalah:

$$F_v = \frac{1}{4} \rho_w \quad (7)$$

dimana F_v adalah gaya vertikal ke atas per satuan lebar (N/m), ρ_w adalah massa jenis air (kg/m^3), C adalah kecepatan gelombang (m/s), menurut teori gelombang Stoke's Orde-5, v adalah kecepatan partikel vertikal (m/s), B adalah panjang *deck* yang terkena air (ct) (m), dan t adalah urutan waktu (s).

Shih dan Anastasiou (1992) kemudian melakukan penelitian sejenis, meenggunakan tes model dan solusi semi-empiris terhadap masalah tumbukan gelombang. Shih dkk adalah yang pertama kali melihat permasalahan ini dalam 3-dimensi, menekankan pentingnya arah, pada bidang horizontal, pada sudut yang benar terhadap arah propagasi. Mereka mendapati bahwa durasi dan besar tumbukan sangat terpengaruh oleh udara yang terperangkap/terbawa. Shih dkk. mengajukan batas atas empiris berikut untuk nilai maksimum tekanan tumbukan:

gelombang *regular*:

$$P_i = (1.8 - \text{hingga} - 7.6) \rho_w g H \quad (8)$$

gelombang *irregular*:

$$P_i = (4.0 - \text{hingga} - 8.0)\rho_w g H_s \quad (9)$$

Nilai tekanan tumbukan maksimum di atas diturunkan dari pembacaan aktual dari transduser tekanan di bawah *deck* model. Shih dan Anastasiou tidak membahas bidang kontak tekanan ini, sehingga tidak diketahui apakah gaya tumbukan dianggap terjadi pada seluruh *deck* atau tidak.

Kaplan (1992, 1995) juga melihat efek tumbukan gelombang pada balok horizontal dan *deck* rata pada struktur lepas pantai. Gaya vertikal pada struktur *deck* rata diperoleh dari rata-rata kombinasi analisis gaya momentum dan seret (*drag*). Kaplan mendapati kemiripan antara topik ini dan penelitian yang telah dilakukan tentang hampasan (*slamming*) pada bidang rata pada kapal [Kaplan (1987)]. Gaya vertikal ini dibangun dari 3 komponen:

1. Tumbukan aktual (F_i), komponen momentum vertikal, yang dibangun dari:
 - gaya inersia terkait dengan akselerasi fluida ($F_{i,1}$)
 - gaya massa tambahan (*added mass*) terkait dengan kecepatan berubahnya massa tambahan ($F_{i,2}$)
2. Komponen seret (*drag*) (F_d)
3. Komponen apung (*buoyancy*) (F_b)

dengan demikian,

$$F_v = F_{i,1} + F_{i,2} + F_d + F_b \quad (10)$$

Kemudian, Suchithra dan Koola (1995) melakukan eksperimen pada *slab* horizontal pada sebuah saluran gelombang. Tujuannya adalah untuk mempelajari dampak dari frekuensi gelombang, geometri *deck*, dan jarak *deck* terhadap gaya tumbukan vertikal gelombang. Suchithra dkk. mengajukan formulasi berikut untuk gaya tumbukan vertikal:

$$F_i = \frac{1}{2} C_s \rho_w A v^2 \quad (11)$$

dimana F_i adalah gaya tumbukan (N), C_s adalah koefisien hampasan (2.5 – 10.2), A adalah area kontak (m^2), v adalah kecepatan vertikal partikel air (m/s).

Ridderbos (1999), melakukan uji model untuk mempelajari beban tumbukan akibat gelombang pada *jetty*. Ridderbos mengasumsikan besar tumbukan gelombang tergantung pada kecepatan partikel air yang menumbuk *deck* dan arah tumbukan β . Dengan menggunakan formula yang dibuat oleh Wagner, besaran tekanan tumbukan gelombang ditentukan:

$$P_i = \frac{1}{2} \rho_w C_s (\beta) v^2 \quad (12)$$

dimana C_s adalah koefisien tumbukan, yang ditentukan oleh:

$$C_s = 1 + \left(\frac{\pi \cot \beta}{2} \right)^2 \quad (13)$$

Overbeek dan Klabbbers (2000) menjelaskan metode mereka dalam perancangan *jetty platform*. Dua

platform yang telah dibangun dengan metode ini di Karibia dihantam gelombang badai, dan keduanya selamat dengan hanya kerusakan struktural minor. Dari gelombang desain, beban gelombang desain dapat ditentukan dari ketentuan berikut:

Untuk tekanan tumbukan, untuk tiap setrip 1 m lebar, sejajar dengan muka gelombang:

$$P_i = C_s \rho_w g H_{\max} \quad (14)$$

Untuk tekanan lambat-berubah, diasumsikan melampaui bagian tercelup:

$$P_+ = 1.0 \rho_w g (H_{cr} - h) \quad (15)$$

Dimana P_i adalah tekanan tumbukan vertikal (N/m^2), P_+ adalah tekanan positif lambat-berubah (N/m^2), C_s adalah konstanta hampasan, ditaksir sekitar 1,5, H_{\max} adalah tinggi gelombang maksimum (m), H_{cr} adalah tinggi puncak gelombang maksimum terhadap muka air tenang (m), h adalah jarak *clearance deck* (m).

2.2 Pemodelan numerik

Pada studi ini, berdasarkan pemahaman tentang interaksi gelombang dengan struktur yang berada diatas elevasi muka air tenang, penggunaan simulasi biasa dengan metode tekanan statik fluida pada benda dianggap tidak lagi relevan. Literatur-literatur terdahulu banyak menekankan masalah fraksi dari volume air yang juga terpengaruh oleh keberadaan volume udara yang *compressible*. Dengan demikian, komputasi numerik fluida dinamis pada studi ini dilakukan mengikuti metode pemodelan *free-surface*. Secara umum, metode ini dikenal dengan metode *Volume of Fluid*. Ketersediaan perangkat lunak yang dapat menghitung dengan menggunakan metode *Volume of Fluid* cukup banyak. Perangkat lunak ANSYS Fluent Release 17.2 *Academic Version* dipilih untuk mensimulasikan permasalahan interaksi gelombang dengan *deck* dermaga.

Dalam mekanika fluida, pergerakan cairan dan gas dijelaskan dengan pendekatan mekanika kontinum, dimana cairan dikategorikan berdasarkan sifatnya yang terdiri dari sejumlah besar molekul satuan. Persamaan pengatur aliran fluida menjelaskan pernyataan matematis tentang hukum konservasi fisika. Terdapat 3 hukum konservasi dalam dinamika fluida yang menjelaskan aliran:

1. Konservasi massa;
2. Tingkat perubahan momentum sebanding dengan jumlah gaya yang bekerja pada partikel fluida (Hukum Kedua Newton);
3. Tingkat perubahan energy sebanding dengan jumlah penambahan kalor dan tingkat kegiatan yang diselesaikan oleh partikel fluida (Hukum Pertama Termodinamika).

Perhitungan sistematis pada perubahan massa, momentum, dan energy pada elemen fluida di sepanjang *boundary* dan terkait dengan aksi pada sumber di dalam suatu elemen, menghasilkan persamaan aliran fluida dapat diselesaikan dengan

program CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Hukum konservasi massa menjelaskan bahwa tingkat penambahan massa dalam elemen fluida sebanding dengan tingkat aliran massa ke dalam elemen fluida tersebut:

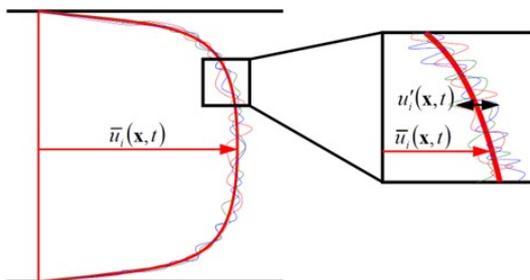
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

atau:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad (17)$$

Pemodelan turbulensi merupakan konstruksi dan penggunaan sebuah model untuk memprediksi efek turbulensi. Sebuah aliran fluida turbulen memiliki banyak sifat pada banyak skala panjang yang berbeda-beda, yang saling berinteraksi satu sama lain. Pendekatan yang umum adalah dengan merata-ratakan persamaan pengatur pada aliran, agar fokus pada skala-besar dan sifat non-fluktuasi pada aliran. Namun demikian, dampak dari skala kecil dan bagian yang berfluktuasi harus tetap dimodelkan.

Reynold menambahkan 6 variabel dalam system persamaan untuk menggunakan model RANS dan menghitung aliran turbulen, hal itu perlu dilakukan untuk mengembangkan model yang menjelaskan dan memprediksi tegangan ini. Model RANS ini menggunakan rata-rata waktu (*ensemble*) yang berikutnya dapat digunakan untuk mengekstrak sifat aliran rata-rata dari kejadian yang spontan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Sketsa hubungan aliran turbulen terhadap aliran rata-rata (ANSYS Fluent User Services Center, 2006)

Untuk model turbulensi yang digunakan pada studi ini. model *standard k- ω* dibuat berdasarkan model *k- ω* Wilcox, yang menggabungkan modifikasi untuk efek bilangan Reynolds rendah, *compressibility*, dan sebaran aliran geser. Satu kelemahan model Wilcox adalah sensitivitas solusinya terhadap nilai *k* dan ω di luar lapisan geser (*shear layer*). Model *standard k- ω* merupakan sebuah model empiris berdasarkan persamaan model transport untuk energi kinetik turbulensi *k* dan tingkat disipasi spesifik ω , yang juga dapat diperkirakan sebagai rasio ϵ terhadap *k*. Namun, kemudian tersedia model modifikasi, yaitu model SST (*Shear-Stress Transport*) *k- ω* , untuk memenuhi keterbatasan model *standard k- ω* .

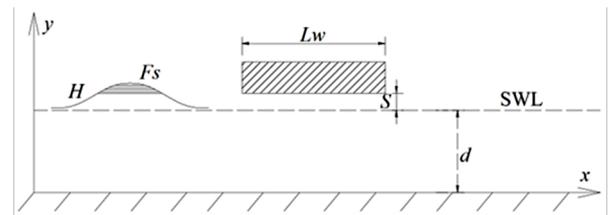
Model SST *k- ω* ini dikembangkan oleh Menter untuk menggabungkan kecepatan dan keakuratan formulasi model *k- ω* pada daerah dekat-dinding (*near-wall*) dengan *freestream* bebas pada model *k- ϵ* pada area jauh dari

boundary, secara efektif. Untuk mencapai hal tersebut, model *k- ϵ* diubah ke dalam sebuah formulasi *k- ω* .

3. Hasil dan Analisa

3.1 Validasi

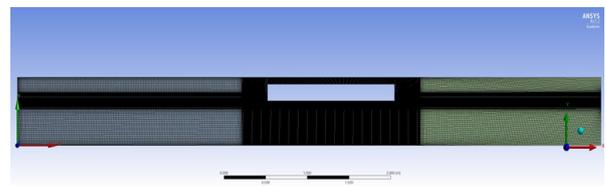
French (1969) telah melakukan eksperimen laboratorium untuk menginvestigasi gaya angkat (*uplift*) akibat gelombang yang bekerja pada sebuah *platform* yang diakibatkan oleh gelombang tunggal (*solitary*) dalam beberapa rasio ϵ . Rasio ϵ diperkenalkan sebagai hubungan perbandingan antara tinggi gelombang dengan kedalaman perairan saat pembangkitan gelombang. Gelombang *solitary* ini sendiri juga merupakan gelombang teoritis yang terjadi di perairan dangkal (*shallow water*). Sketsa persiapan model eksperimen ini ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Persiapan model eksperimen oleh French (1969)

Setelah beberapa percobaan dengan sensitivitasnya, resolusi *grid* pada *mesh* ditentukan sebagai: $dy=0.02$ m, 0.0025 m, dan 0.005 m masing-masing untuk zona udara, zona dekat muka air, dan zona air; $dx=0.005$ m, 0.0025 m, dan 0.02 m masing-masing untuk zona dekat *velocity inlet*, zona komputasi utama, dan zona jauh dari komputasi utama. Sedangkan untuk interval *time step* dipilih $dt=0.0025$ detik [Guoji Xu (2015)]. Gambar *mesh* yang digunakan untuk model validasi ini ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Persiapan model ini pada Fluent menggunakan model turbulen SST *k- ω* dengan nilai konstanta-konstanta model sesuai aturan *default*; *solver* yang dipilih adalah berbasis tekanan (*pressure-based*) untuk aliran *transcient*; skema *Pressure-Implicit with Splitting of Operators* (PISO) [FHWA (2009); Bricker dkk. (2012)] dipilih untuk metode kopel tekanan-kecepatan (*pressure-velocity*); dan skema *PREssure STaggering Option* (PRESTO) dipilih untuk diskritisasi spasial tekanan. Peredaman turbulen dinyalakan dan faktor redamannya diatur sebesar 50. Selain itu, sebagai bagian dari permasalahan 2-fase, metode *Volume of Fluid* (VOF) digunakan untuk menentukan *free surface* dinamis, dengan sub-model saluran terbuka untuk gelombang juga digunakan. Untuk diskritisasi gradien dipilih skema *least square cell based*;

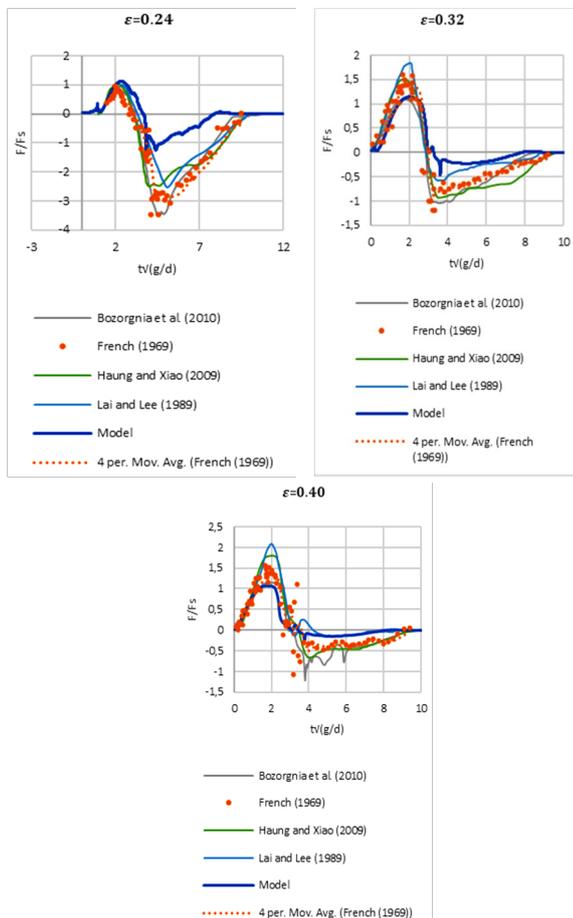


Gambar 5. Mesh yang digunakan pada model validasi

upwind orde-2 untuk syarat adveksi momentum; dan *Geo-Reconstruct* untuk persamaan fraksi volume. *Upwind* orde-2 juga digunakan untuk diskritisasi spasial pada energi kinetik turbulen dan tingkat peluruhan spesifik (*specific dissipation*) [Hirt dan Nichols (1981)]. Pemilihan untuk formulasi *transcient* yaitu *Bounded second-order implicit* [Elhanafi dkk. (2016)]. Hasil validasi model dibandingkan terhadap model terdahulu ditunjukkan pada **Gambar 6**.

3.2 Model dermaga

Pada studi ini, diambil contoh kasus menggunakan kondisi yang ada di Pelabuhan Marore, Sulawesi Utara. Pelabuhan kecil ini berada di pulau kecil di perbatasan Indonesia dengan Filipina, dengan kondisi gelombang tahunan yang cukup besar. Kondisi perairan yang digunakan yaitu kedalaman perairan sebesar 6.5 m, elevasi lantai dermaga setinggi 2.5 m, dan panjang (transversal) dermaga adalah 8 m.



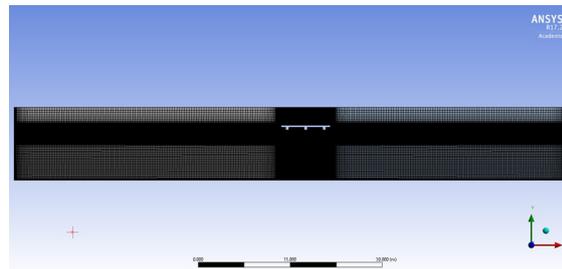
Gambar 6. Perbandingan hasil model dengan studi terdahulu untuk $\epsilon = 0.24$, $\epsilon = 0.32$, dan $\epsilon = 0.40$

Sedangkan tinggi gelombang H dipilih untuk 4 skenario ketinggian yaitu 2.50 m, 2.75 m, 3.00 m, dan 3.05 m. Sketsa geometri dermaga ditunjukkan pada **Gambar 7**. Dengan pengaturan model yang sama pada model validasi, dibuat domain model dermaga seperti ditunjukkan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**.

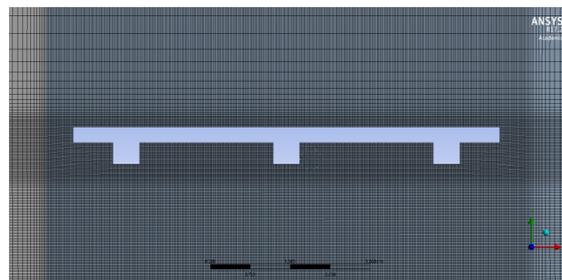
Dalam perambatannya, gelombang yang dimodelkan akan menumbuk dermaga. Cuplikan tumbukan gelombang *solitary* dan kontur tekanannya, yang memberikan tekanan terbesar dan terkecil pada elemen dermaga, ditunjukkan pada **Gambar 10** dan **Gambar 11**. Sedangkan seri waktu tekanan total rata-rata yang terjadi pada sisi pelat ditunjukkan pada **Gambar 12** dan **Gambar 13**.

3.3 Perbandingan

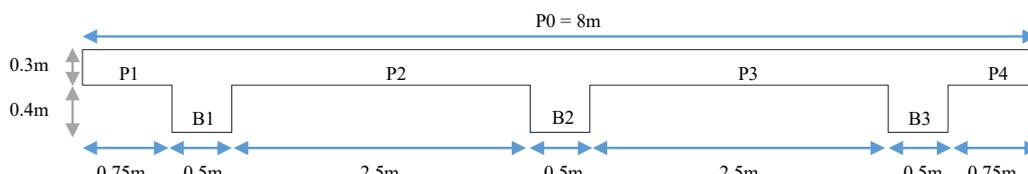
Pembandingan hasil perhitungan berbagai metode diambil dari hasil tekanan total rata-rata yang terjadi pada seluruh sisi horizontal elemen struktur pada domain model numerik. Perlu diperhatikan bahwa tekanan yang diambil merupakan tekanan total rata-rata maksimum, sehingga tekanan lokal untuk segmen yang sangat kecil dapat terjadi lebih besar atau lebih kecil dari keluaran tekanan yang disajikan. Tekanan total tersebut dirata-ratakan sesuai dengan bentang elemen sesuai notasinya, seperti yang telah disketsakan pada gambar sebelumnya. Sedangkan keluaran gaya maksimum 2-dimensi diperoleh dari



Gambar 8. Mesh yang digunakan pada model simulasi dermaga



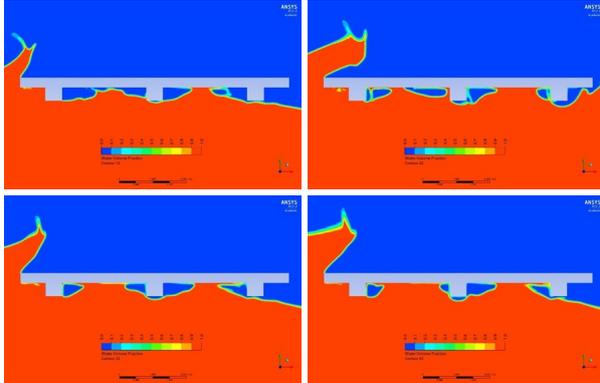
Gambar 9. Mesh yang digunakan pada model simulasi dermaga (perbesaran)



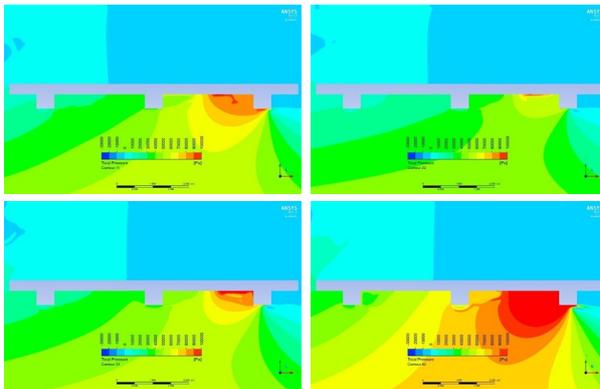
Gambar 7. Notasi dan sketsa penyederhanaan geometri dan ukuran model dermaga 2-dimensi

tekanan rata-rata maksimum suatu sisi elemen dikalikan dengan panjang bentang elemen tersebut dimana tekanan tersebut terjadi.

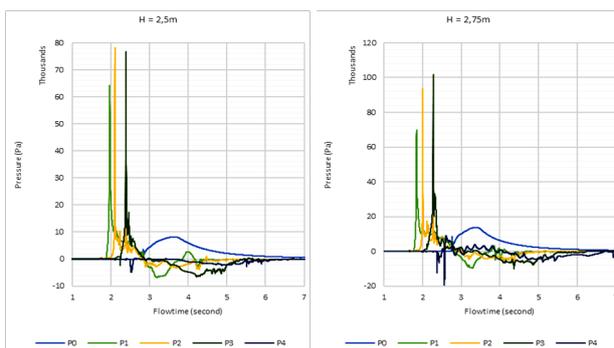
Dari hasil seri waktu yang telah disajikan sebelumnya, diketahui bahwa terdapat 2 pola utama dalam



Gambar 10. Cuplikan kondisi gelombang saat tekanan uplift terbesar terjadi untuk 4 tinggi gelombang



Gambar 11. Cuplikan kontur tekanan saat tekanan uplift terbesar terjadi untuk 4 tinggi gelombang



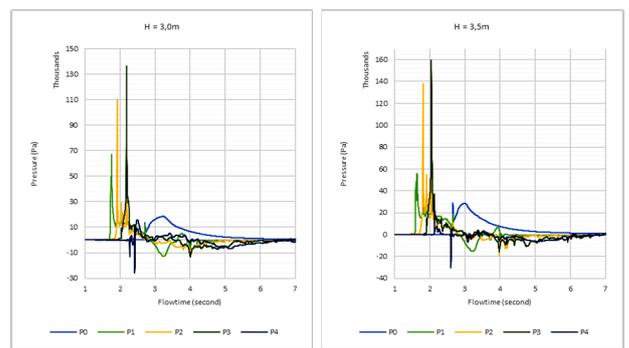
Gambar 12. Seri waktu tekanan total rata-rata pada penampang pelat P0, P1, P2, P3, dan P4 untuk $H = 2.5$ m (kiri) dan $H = 2.75$ m (kanan)

menginterpretasikan beban, yaitu beban yang sangat besar dan sangat cepat, dan beban yang relatif lebih kecil dan lebih lama. Perbandingan hasil model terhadap studi terdahulu pun dilakukan untuk 2 pola tersebut. Beban puncak (*peak*) yang sangat besar dan sangat cepat dipilih dari nilai maksimum yang pernah terjadi selama simulasi pada suatu elemen struktur. Sedangkan beban yang relatif lebih kecil dan lebih lama dipilih dari nilai maksimum dari nilai beban yang telah dihaluskan dengan metode *moving average* periode 500. Perbandingan tekanan dan gaya *uplift* pada model numerik dibandingkan dengan perhitungan manual menurut studi terdahulu disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Kemudian selisih hasilnya terhadap hasil model ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.

3.4 Analisa

Dari beberapa studi terdahulu yang pernah dilakukan, ada banyak yang menghasilkan formulasi tersendiri untuk memperkirakan besar beban yang mungkin terjadi pada suatu struktur yang bergantung di atas air sebagai akibat dari tumbukan gelombang. Perbandingan hasil perhitungan terhadap model dermaga dengan berbagai parameter mendekati kondisi sebenarnya, serta diberikannya segmentasi elemen struktur, diperoleh bahwa formulasi yang ditawarkan Ito dan Takeda (1967) pada OCDI memberikan hasil yang cukup mendekati hasil tekanan tumbukan (*impact pressure*) pada model. Adapun rangkuman hasil model dan perhitungan OCDI beserta selisihnya disajikan pada Tabel 3.

Keluaran dari simulasi yang dilakukan pada studi ini adalah seri waktu tekanan total (dinamik dan statik) rata-rata terhadap bentang segmentasi sisi elemen struktur. Nilai tekanan maksimum yang terjadi pada seluruh elemen struktur kemudian dilihat hubungannya terhadap 4 skenario tinggi gelombang. Dari grafik tersebut, dihasilkan 3 hubungan yang dianggap dapat mewakili untuk memprediksi tekanan puncak yang



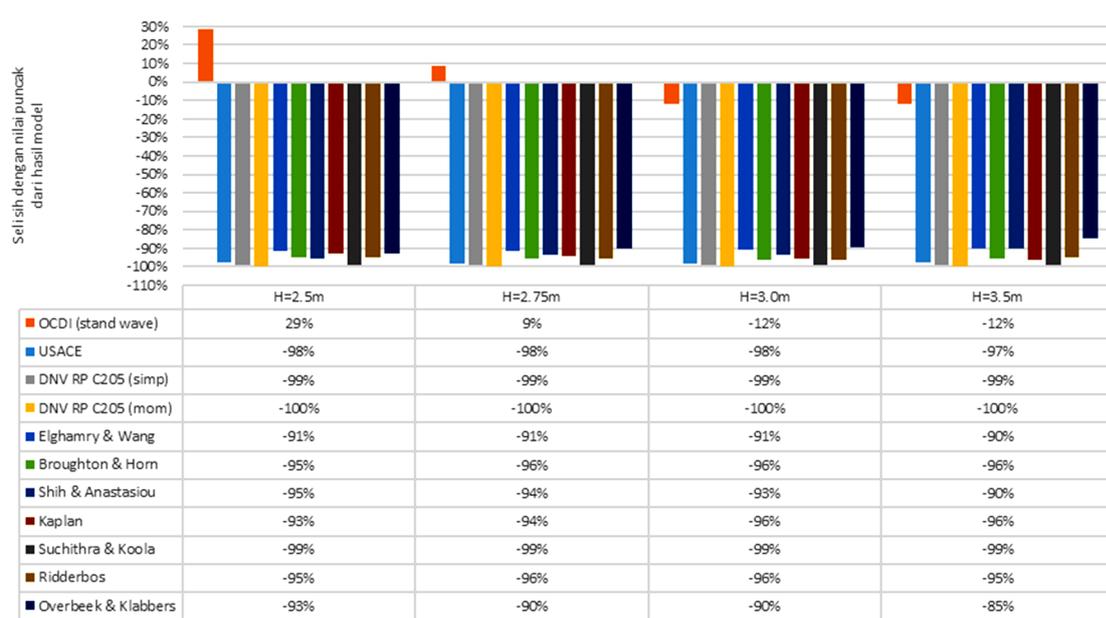
Gambar 13. Seri waktu tekanan total rata-rata pada penampang pelat P0, P1, P2, P3, dan P4 untuk $H = 3.0$ m (kiri) dan $H = 3.5$ m (kanan)

Tabel 1. Perbandingan perhitungan tekanan *uplift* maksimum akibat gelombang

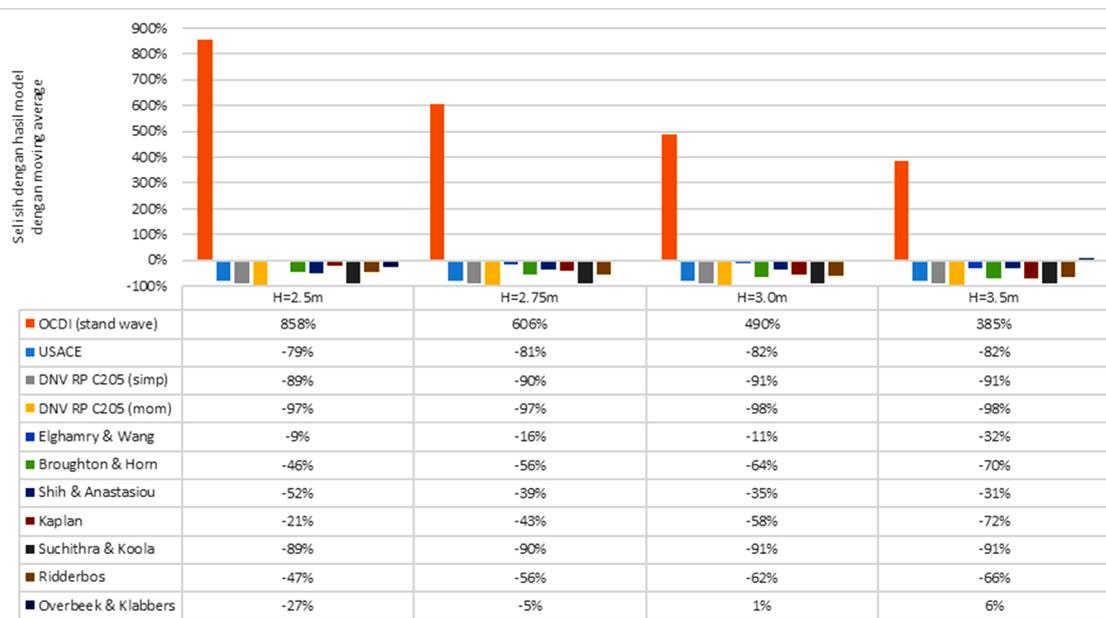
Metode	Uplift Pressure (kPa)			
	H1=2.5m	H1=2.75m	H1=3.0m	H1=3.5m
Model (<i>peak</i>)	78.18	101.61	136.66	159.32
Model (<i>max. of moving average 500 period</i>)	10.50	15.66	20.45	29.00
OCDI (<i>stand wave</i>)	100.55	110.60	120.66	140.77

Tabel 2. Perbandingan perhitungan gaya uplift total akibat gelombang

Metode	Uplift Force (kN/m)			
	H1=2.5m	H1=2.75m	H1=3.0m	H1=3.5m
Model (peak)	348.12	460.45	621.33	690.27
Model (max. of moving average 500 period)	32.87	46.79	63.91	98.45
USACE	7.06	9.07	11.44	17.31
DNV RP C205 (simp)	3.53	4.54	5.72	8.66
DNV RP C205 (mom)	1.06	1.25	1.43	1.62
Elghamry & Wang	29.85	39.22	56.59	67.00
Broughton & Horn	17.75	20.40	23.22	29.31
Shih & Anastasiou	15.69	28.76	41.83	67.97
Kaplan	26.09	26.45	26.84	27.67
Suchithra & Koola	3.60	4.63	5.83	8.83
Ridderbos	17.51	20.62	24.18	32.99
Overbeek & Klabbers	24.13	44.24	64.35	104.57



Gambar 14. Selisih puncak hasil perhitungan tekanan/gaya uplift terhadap hasil model numerik



Gambar 15. Selisih hasil terbesar perhitungan tekanan/gaya uplift setelah dihaluskan dengan hasil terbesar moving average periode 500 terhadap hasil model numerik

Tabel 3. Rangkuman hasil model dan perhitungan tekanan puncak pada model dermaga

Tinggi Gelombang	Tekanan Puncak Vertikal (kPa)		Selisih
	Model	OCDI	
2.50 m	78.18	100.55	29%
2.75 m	101.61	110.60	9%
3.00 m	136.66	120.66	-12%
3.50 m	159.32	140.77	-12%

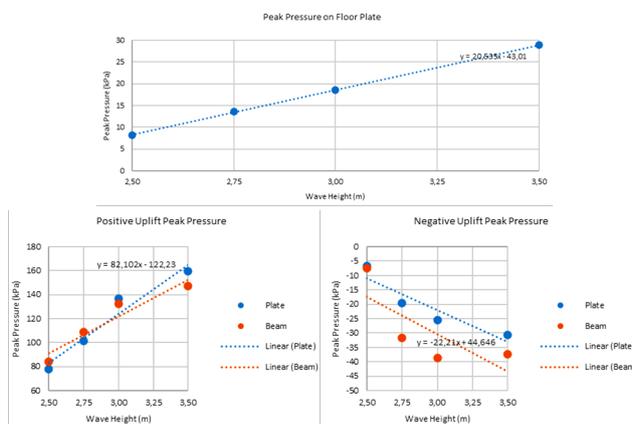
dapat terjadi. Hubungan tersebut, dengan mengacu pada Gambar 16, disajikan sebagai:

Untuk tekanan dari atas lantai dermaga sebagai akibat dari limpasan air:

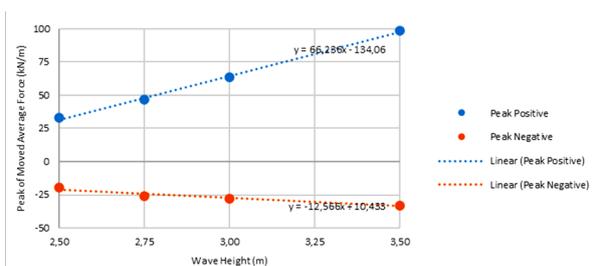
$$P_{peak} = 20.5H - 43 \quad (18)$$

Untuk tumbukan tekanan uplift positif sebagai tekanan air laut di bawah dermaga pada pelat dan balok:

$$P_{peak}^+ = 82.1H - 122 \quad (19)$$



Gambar 16. Hubungan tekanan puncak (peak) terhadap tinggi gelombang yang terjadi pada pelat dan balok



Gambar 17. Hubungan gaya total puncak yang diterima struktur (moved average) positif dan negatif terhadap tinggi gelombang

Tabel 4. Rangkuman hasil model dan perhitungan gaya lambat-bervariasi maksimum vertikal total pada model dermaga

Tinggi Gelombang	Gaya Lambat-Bervariasi Maksimum Vertikal Total pada Struktur (kN/m)				
	Model	Elghamry & Wang (1971)	Selisih	Overbeek & Klabbers (2000)	Selisih
2.50 m	32.87	29.85	-9%	24.13	-27%
2.75 m	46.79	39.22	-16%	44.24	-5%
3.00 m	63.91	56.59	-11%	64.35	1%
3.50 m	98.45	67.00	-32%	104.57	6%

Untuk tekanan uplift negatif sebagai dampak dari fenomena vakum di bawah dermaga pada pelat dan balok:

$$P_{peak}^- = -22.2H + 45 \quad (20)$$

dimana:

P_{peak} = tekanan puncak terjadi dalam waktu yang sangat singkat (kPa)

H = tinggi gelombang datang (m)

Pendekatan untuk beban dengan durasi yang lebih lama (disebut sebagai beban lambat-bervariasi, *slowly-varying*) diperoleh dengan menghaluskan seri waktunya dengan metode *moving average* perioda 500. Masing-masing nilai maksimum untuk beban ini kemudian dibandingkan lagi dengan hasil perhitungan berbagai metode menurut studi-studi terdahulu. Dari perbandingan tersebut diperoleh metode yang memiliki selisih terkecil terhadap hasil model adalah formulasi yang ditawarkan Elghamry dan Wang (1971), serta Overbeek dan Klabbers (2000).

Formulasi menurut Elghamry dan Wang memberikan selisih terkecil untuk tinggi gelombang yang hampir sama dengan elevasi dermaga, sedangkan Overbeek dan Klabbers memberikah selisih yang lebih kecil untuk gelombang yang lebih tinggi. Adapun rangkuman hasil model numerik, perhitungan manual, dan selisihnya disajikan pada Tabel 4. Hubungan tinggi gelombang terhadap gaya vertikal positif lambat-bervariasi yang dihasilkan, dengan mengacu pada Gambar 17, adalah:

$$F_{max}^+ = 66.2H - 134 \quad (21)$$

dan terhadap gaya vertikal negatif lambat-bervariasi adalah:

$$F_{max}^- = -12.6H + 11 \quad (22)$$

dimana:

F_{max} = gaya vertikal lambat-bervariasi per satuan lebar dermaga (kN/m)

H = tinggi gelombang datang (m)

4. Kesimpulan dan Rekomendasi

4.1 Kesimpulan

1. Simulasi dengan modul *Volume of Fluid* (VOF) menunjukkan benar adanya lonjakan tekanan yang sangat besar dengan durasi sangat singkat pada saat muka gelombang pertama mengenai struktur dermaga.
2. Untuk perkiraan terhadap hasil tekanan tumbukan (*impact pressure*) pada model, hasil formulasi yang

ditawarkan Ito dan Takeda (1967) pada OCDI memberikan hasil yang paling mendekati, dengan rentang selisih dari -12% hingga +29%.

3. Untuk perkiraan terhadap hasil gaya lambat bervariasi (*slowly-varying*) pada model, hasil formulasi yang ditawarkan Elghamry dan Wang (1971) serta Overbeek dan Klabbers (2000) memberikan hasil yang paling mendekati, dengan rentang selisih -32% hingga +6%.
4. Spesifik pada kondisi perairan dan geometri struktur yang digunakan pada studi ini, estimasi terhadap tekanan *uplift* dapat disederhanakan dalam persamaan seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan (19)** dan **(20)**.
5. Spesifik pada kondisi perairan dan geometri struktur yang digunakan pada studi ini, estimasi terhadap gaya gelombang lambat-bervariasi dapat disederhanakan dalam persamaan seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan (21)** dan **(22)**.

4.2 Rekomendasi

1. Perlu dilakukan simulasi model numerik untuk cakupan 3-dimensi. Dalam bentuk 3-dimensi, dapat dilihat pengaruh keberadaan tiang pancang, panel fender, pile cap, dan elemen struktur lainnya yang dapat mengganggu pergerakan perambatan gelombang di bawah struktur.
2. Perlu diperiksa pengaruh tumbukan besar sesaat terhadap struktur, yang akan dapat mengangkat struktur dari fondasi atau sambungannya, atau hanya akan merusak material permukaan elemen struktur.
3. Dalam kondisi sebenarnya, kondisi dasar perairan di depan dermaga umumnya kasar dan memiliki kemiringan. Perlu dilakukan pula simulasi lain untuk mengetahui pengaruh kelandaian kedalaman perairan dan kekasarannya terhadap gelombang dan interaksinya terhadap struktur di atasnya.
4. Studi ini dilakukan hanya untuk 1 jenis geometri dermaga dan pada 1 ketinggian clearance. Perlu dilakukan simulasi lain dengan jenis geometri yang berbeda dan pada ketinggian clearance yang berbeda pula, untuk mendapatkan formulasi yang lebih presisi.
5. Model fisik untuk bentuk dermaga juga perlu dilakukan sebagai sudut pandang lain tentang beban yang mungkin bekerja pada karakteristik gelombang dan struktur yang dimaksud.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian untuk tulisan ini sebagian didanai dari Program Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi (P3MI) Institut Teknologi Bandung tahun 2020 melalui Kelompok Keahlian Teknik Lepas Pantai, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan. Bantuan ini sangat kami apresiasi.

Daftar Pustaka

- Aguíñiga, Francisco, Kevin Matakis, Hector Estrada, Joseph Sai, Pat Leelani, and Jeff Shelden, 2006, *Report Synthesis of Wave Load Design Methods for Coastal Bridges*, Technical Report, Texas Department of Transportation, Texas A&M University, Kingsville.
- ANSYS, Inc., 2013, *ANSYS Fluent Theory Guide. 15.0*, Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS, Inc.
- Bea, R. G., R. Iversen, and T. Xu, 2001, *Wave-in-Deck Forces on Offshore Platforms*, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 123.
- Bhat, Shankar Subraya, 1994, *Wave Slamming on A Horizontal Plate*, Thesis Report, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia.
- Bozorgnia, M, Jiin-Jen Lee, and Frederic Raichlen, 2010, *Wave Structure Interaction: Role of Entrapped Air on Wave Impact and Uplift Forces*.
- Bozorgnia, Mehrdad, 2012, *Computational Fluid Dynamic Analysis of Highway Bridge Superstructures Exposed to Hurricane Waves*, Faculty of The USC Graduate School, University of Southern California, Los Angeles: University of Southern California.
- Bricker, J.D., Kawashima, K., and Nakayama, A., 2012, CFD Analysis of Bridge Deck Failure due to Tsunami, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Tokyo, Japan, March 1-4, pp. 1398-1409.
- Bron, V. A. G., 2013, *Dynamic Analysis of an Open Piled Jetty Subjected to Wave Loading*, Master Thesis, Civil Engineering, Delft University of Technology, Den Haag.
- Broughton, P., and Horn, E., 1987, Ekofisk Platform 2/4C: Re-Analysis Due to Subsidence, *Proc., Institution of Civil Engineers*, London, UK, Part 1, Vol. 82.
- Colleter, Gildas., n.d., *Breaking wave uplift and overtopping on a horizontal deck using physical and numerical modelling*.
- Cuomo, Giovanni, Ken-ichiro Shimosako, and Shigeo Takahashi, 2007, *Wave-in-deck loads on coastal bridges and the role of air*, Elsevier Ltd.
- Cuomo, Giovanni, Matteo Tirindelli, and William Allsop, 2006, *Wave-in-deck loads on exposed jetties*, Elsevier Ltd.

- de Rooij, O. V., 2001, *Wave Impact on Horizontal Platforms*, Final Graduation Report, Faculty of Civil Engineering, TU Delft, Gouda.
- Det Norske Veritas, 2010, *DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads*, Det Norske Veritas.
- ElGhamry, O.A., 1971, Wave Forces on Platform Decks, *Offshore Technology Conf.*, Texas, OTC 1381.
- Elhanafi, Ahmed, Alan Fleming, Zhi Leong, and Gregor Macfarlane, 2016, *Effect of RANS-based turbulence models on nonlinear wave generation in a two-phase numerical wave tank*, Progress in Computational Fluid Dynamics (Inderscience Enterprises Ltd.).
- FHWA, 2009, *Hydrodynamic Forces on Inundated Bridge Decks*, Publication No. FHWA-HRT-09-028, U.S. Department of Transportation, McLean, VA.
- Frei, Walter, 2013, Comsol Blog, September 16, www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application.
- French, Jonathan A., 1969, *Wave Uplift Pressures on Horizontal Platforms*, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena.
- French, Jonathan A., 1971, Wave Uplift Pressures on Horizontal Platforms, *Proc. of The Speciality Conf.: Civil Engineering in the Oceans IV*, Vol. 1, pp 187-202.
- Gaeta, M. Gabriella, Luca Martinelli, and Alberto Lamberti, 2012, *Uplift Forces on Wave Exposed Jetties: Scale Comparison and Effect of Venting*.
- Hirt, C. W., and B. D. Nichols, 1979, Volume of Fluid (VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics (Academic Press, Inc.)*.
- Huang, Wenrui, and Hong Xiao, 2007, *Numerical Modeling of Dynamic Wave Force Acting on Escambia Bay Bridge Deck during Hurricane Ivan*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 135.
- Isaacson, Michael, Norman Allyn, and Colleen Ackerman, 1994, *Design wave loads for a jetty at Plymouth, Montserrat*, Canadian Journal of Civil Engineering.
- Ito, Y., H. Takeda, 1967, *Uplift on Pier Deck due to Wave Motion*, Rept. of PHRI Vol. 6 No. 4, pp. 37-68.
- Kaplan, P., 1992, Wave Impact Forces on Offshore Structures: Re-Examination and New Interpretations, *Offshore Technology Conf.*, Houston, USA, 4-7 May, OTC 6814.
- Kaplan, P., Murray, J.J., Yu, W.C., 1995, Theoretical Analysis of Wave Forces on Platform Deck Structures, *Proc. of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. I-1, ASME.
- Lai, C. P., and Jiin-Jen Lee, 1989, *Interaction of Finite Amplitude Waves with Platforms or Docks*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (ASCE) 115: 19-39. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1989\)115:1\(19\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:1(19)).
- Livermore, Spencer Nathaniel, 2014, *Evaluation of Tsunami Design Codes and Recommendations for Bridges Susceptible to Tsunami Inundation*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington.
- McConnell, Kirsty, William Allsop, and Ian Cruickshank, 2004, *Piers, jetties and related structures exposed to waves: Guidelines for hydraulic loadings*, London: Thomas Telford Ltd.
- Meng, Yanqiu, Guoping Chen, and Shichang Yan, 2010, *Wave Interaction with Deck of Jetty on A Slope*.
- Mohamad, Yanuardy Rahmat, 2015, *Computational Fluid Dynamics Analysis for Hydrodynamic Loading on Subsea Grating*, Dissertation, Subsea Engineering, University of Aberdeen, Aberdeen.
- Olsson, Adam, and Martin Tunlid, 2015, *CFD simulation of wave-in-deck loads on offshore structures*, Master's Thesis, Department of Shipping and Marine Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Overbeek, J., Klabbers, M., 2000, Design of Jetty Decks for Extreme Vertical Wave Loads, *HBG Civiel*, Gouda, The Netherlands.
- Ridderbos, N.L., 1999, *Risicoanalyse Met Behulp van Foutenboom & Golfbelasting Ten Gevolge van 'Slamming' op Horizontale Constructie*, Verslag M1335 deel 2 & 3, WL Delft.
- Sheppard, D. Max, and Justin Marin, 2009, *Wave Loading on Bridge Decks*, Final Report, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville.
- Shih, R.W.K, Anastasiou, K., 1992, A Laboratory Study of The Wave-Induced Vertical Loading on Platform Decks, *Proc. Inst. Civ. Engrs. Wat., Marit. & Energy*, 96, March, pp 19-33, Paper 9778.
- Suchithra, N, and Paul Mario Koola, 1995, A Study of Wave Impact on Horizontal Slabs, *Ocean Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp 687-697.

- Rayasurverindo Tirtasarana, PT, 2014, *Laporan Akhir Survei dan Desain*, Detail Engineering Design (DED) Pelabuhan Marore, Provinsi Sulawesi Utara, Jakarta: Kementerian Perhubungan Republik Indonesia Direktorat Jenderal Perhubungan Laut Satuan Kerja: Peningkatan Fungsi Pelabuhan dan Pengerukan Pusat.
- The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002, *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan.
- Tickell, R. G., 1994, Wave forces on structures, *Coastal, estuarial and harbour engineers reference book*, eds. M. B. Abbott and W. A. Price. E and FN Spon, London, Chapter 28 in, pp. 369-380.
- Tirindelli, Matteo, Giovanni Cuomo, William Allsop, and Alberto Lamberti, 2003, Wave-in-Deck Forces on Jetties and Related Structures, *Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- US Army Corps Engineers, 2002, *Coastal Engineering Manual*, Part VI, Chapter 5, US Army Corps Engineers.
- Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995, *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*, Harlow, Essex: Longman Scientific and Technical.
- Wang, H., 1970, Water Wave Pressure on Horizontal Plate, *Journal of The Hydraulics Division*, Oct.
- Xiao, Hong, Wenrui Huang, and Qin Chen, 2010, *Effects of submersion depth on wave uplift force acting on Biloxi Bay Bridge decks during Hurricane Katrina*, Elsevier Ltd. (Elsevier Ltd.).
- Xu, Guoji, 2015, *Investigating Wave Forces on Coastal Bridge Decks*, Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.