

Analisis Struktur Dermaga Tipe Jetty Terhadap Beban Tumbukan Kapal Dengan Memperhitungkan Pengaruh Pasang Surut Menggunakan Metode Slope-Deflection

Humisar Pasaribu¹, Kevin Febrian Sirait²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Universitas HKBP Nommensen, Medan
humisar.pasaribu@uhn.ac.id

Abstract

Jetty-type piers are port infrastructure that plays an important role in supporting ship loading and unloading activities, so it is necessary to plan structures that are able to withstand environmental and operational loads safely. One of the environmental factors that has a significant influence is the fluctuation of sea level elevation due to tides, which can affect load distribution, hydrostatic pressure, and deformation of dock structures. This study aims to analyze the response of the deformation of the jetty type pier structure to the berthing load by considering the influence of tides of seawater, and compare the results of the analysis using the slope-deflection method with computer software simulations. The analysis was carried out on a two-dimensional portal structure with a container ship berthing load of 40,000 DWT as a reference load. Three loading conditions were analyzed, namely the berthing condition without hydrostatic pressure, the berthing condition with hydrostatic pressure at high tide (High Water Level / HWL), and the berthing condition with hydrostatic pressure at low water level (LWL). The calculation results showed that the largest structural deformation occurred in the berthing condition without the influence of hydrostatic pressure, while the HWL condition produced the least deformation. The deformation difference between tidal and tidal conditions was 2.83% for the slope-deflection method. Comparison with the results of computer simulations showed an average difference in deformation of 2.168%. The results of this study are expected to be a technical reference in dock planning that is more adaptive to tidal conditions and the dynamics of the aquatic environment.

Keyword: Dock, tide, load berthing, deformation, slope-deflection

Abstrak

Dermaga tipe jetty merupakan infrastruktur pelabuhan yang berperan penting dalam mendukung aktivitas bongkar muat kapal, sehingga diperlukan perencanaan struktur yang mampu menahan beban lingkungan dan operasional secara aman. Salah satu faktor lingkungan yang berpengaruh signifikan adalah fluktuasi elevasi muka air laut akibat pasang surut, yang dapat memengaruhi distribusi beban, tekanan hidrostatik, dan deformasi struktur dermaga. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons deformasi struktur dermaga tipe jetty terhadap beban tumbukan kapal (berthing load) dengan mempertimbangkan pengaruh pasang surut air laut, serta membandingkan hasil analisis menggunakan metode slope-deflection dengan simulasi perangkat lunak komputer. Analisis dilakukan pada struktur portal dua dimensi dengan beban berthing kapal peti kemas berkapasitas 40.000 DWT sebagai beban rujukan. Tiga kondisi pembebanan dianalisis, yaitu kondisi berthing tanpa tekanan hidrostatik, kondisi berthing dengan tekanan hidrostatik pada saat pasang (High Water Level/HWL), dan kondisi berthing dengan tekanan hidrostatik pada saat surut (Low Water Level/LWL). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa deformasi struktur terbesar terjadi pada kondisi berthing tanpa pengaruh tekanan hidrostatik, sedangkan kondisi HWL menghasilkan deformasi paling kecil. Selisih deformasi antara kondisi pasang dan surut sebesar 2,83% untuk metode slope-deflection. Perbandingan dengan hasil simulasi komputer menunjukkan perbedaan rata-rata deformasi sebesar 2,168%. Hasil

penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan teknis dalam perencanaan dermaga yang lebih adaptif terhadap kondisi pasang surut dan dinamis lingkungan perairan.

Kata Kunci: Dermaga, Pasang Surut, Beban Berthing, Deformasi, Slope-Deflection

1. PENDAHULUAN

Dermaga tipe jetty merupakan salah satu infrastruktur utama pada sistem transportasi laut yang berfungsi sebagai fasilitas sandar kapal untuk kegiatan bongkar muat. Struktur ini harus dirancang agar mampu menahan kombinasi beban operasional kapal dan pengaruh lingkungan perairan secara aman dan berkelanjutan. Salah satu beban dominan yang bekerja pada dermaga adalah beban tumbukan kapal (berthing load), yang besarnya dipengaruhi oleh karakteristik kapal, kecepatan merapat, serta sistem fender yang digunakan. Kegagalan dalam memperhitungkan beban ini dapat menyebabkan kerusakan struktural dan menurunkan umur layanan dermaga[1],[2].

Selain beban berthing, fluktuasi elevasi muka air laut akibat pasang surut memberikan pengaruh signifikan terhadap tekanan hidrostatik yang bekerja pada elemen struktur bawah dermaga. Perubahan tekanan ini dapat mengubah distribusi gaya lateral dan memengaruhi respons deformasi struktur, terutama pada dermaga tipe jetty yang umumnya memiliki struktur terbuka dan kolom-kolom yang terendam air laut[3]. Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa kondisi pasang surut perlu diperhitungkan secara eksplisit dalam analisis struktur dermaga, khususnya untuk pelabuhan yang melayani kapal berkapasitas besar[4],[5],[6].

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada analisis beban berthing atau respons struktur dermaga tanpa mengkaji secara komprehensif pengaruh variasi elevasi muka air laut terhadap deformasi struktur. Selain itu, kajian yang membandingkan pendekatan analitik klasik dengan simulasi numerik dalam mengevaluasi deformasi dermaga akibat kombinasi beban berthing dan tekanan hidrostatik masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (research gap) terkait evaluasi pengaruh pasang surut terhadap respons deformasi dermaga tipe jetty serta keandalan metode analitik klasik dalam merepresentasikan perilaku struktur dibandingkan dengan simulasi berbasis perangkat lunak.

Metode analisis struktur yang umum digunakan dalam perencanaan dermaga meliputi metode analitik klasik dan simulasi numerik berbasis perangkat lunak[7],[8]. Metode slope-deflection masih relevan digunakan sebagai pendekatan analitik karena mampu menggambarkan hubungan antara momen, rotasi, dan perpindahan struktur secara sistematis. Namun, validasi terhadap hasil simulasi perangkat lunak tetap diperlukan untuk memastikan keandalan hasil analisis[9],[10].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pasang surut air laut terhadap deformasi struktur dermaga tipe jetty akibat beban tumbukan kapal (berthing load). Selain itu, penelitian ini secara tegas bertujuan membandingkan hasil analisis deformasi yang diperoleh menggunakan metode slope-deflection dengan hasil simulasi perangkat lunak komputer, sehingga diperoleh gambaran tingkat kesesuaian dan keterbatasan masing-masing metode. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis dalam perencanaan dan evaluasi struktur dermaga yang lebih adaptif terhadap kondisi pasang surut serta dinamika lingkungan perairan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis struktural deterministik untuk mengevaluasi deformasi struktur dermaga tipe jetty akibat beban berthing kapal dengan mempertimbangkan variasi elevasi muka air laut. Metode analisis yang digunakan terdiri atas metode analitik klasik dan simulasi numerik. Analisis analitik dilakukan menggunakan metode slope-deflection, sedangkan analisis numerik dilakukan

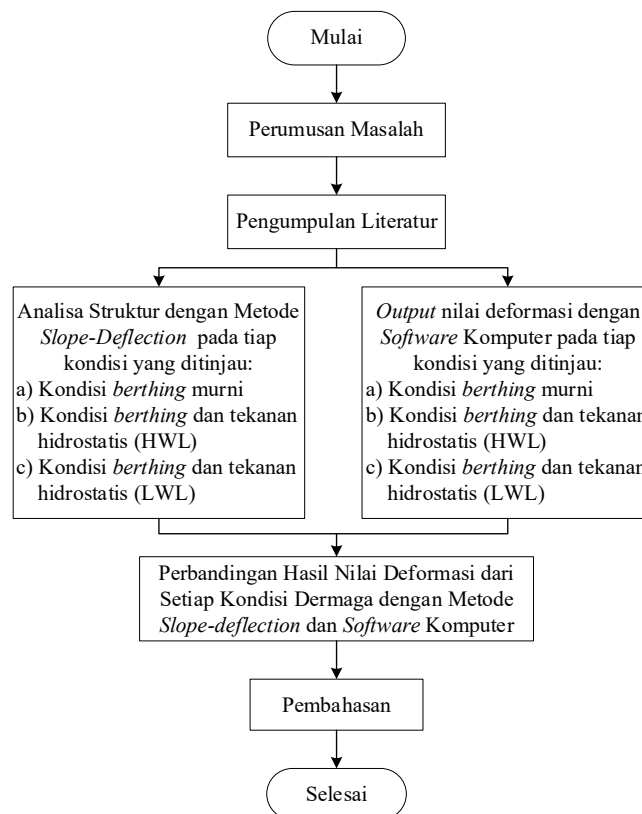
dengan perangkat lunak analisis struktur berbasis metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM). Pendekatan ini digunakan untuk membandingkan respons deformasi struktur pada beberapa kondisi pembebanan secara sistematis.

Objek penelitian adalah struktur dermaga tipe jetty yang dimodelkan sebagai struktur portal dua dimensi berdasarkan data geometrik dan properti material struktur eksisting. Elemen struktur yang dianalisis meliputi kolom dan balok utama dermaga yang menerima beban lateral akibat gaya tumbukan kapal serta tekanan hidrostatik. Kapal rujukan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kapal peti kemas berkapasitas 40.000 DWT yang diasumsikan sebagai kondisi beban maksimum operasional dermaga.

Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan data teknis struktur, karakteristik material, dan data kapal. Selanjutnya dilakukan perhitungan gaya berthing berdasarkan energi tumbukan kapal dan karakteristik sistem fender. Tekanan hidrostatik ditentukan untuk dua kondisi elevasi muka air laut, yaitu kondisi pasang (High Water Level/HWL) dan kondisi surut (Low Water Level/LWL). Struktur kemudian dimodelkan dan dianalisis menggunakan metode slope-deflection untuk memperoleh deformasi analitik, serta dianalisis menggunakan perangkat lunak FEM dengan kondisi pembebanan yang sama.

Instrumen penelitian yang digunakan meliputi data teknis struktur dermaga, persamaan dan formulasi metode slope-deflection, serta perangkat lunak analisis struktur berbasis FEM. Pengolahan data numerik dan perhitungan matriks dilakukan menggunakan aplikasi pengolah data numerik. Analisis data dilakukan dengan membandingkan nilai deformasi maksimum struktur pada kondisi tanpa tekanan hidrostatik, kondisi pasang, dan kondisi surut. Perbedaan hasil deformasi antara metode analitik dan simulasi numerik dianalisis untuk menilai konsistensi hasil, selanjutnya dievaluasi terhadap batas izin deformasi berdasarkan standar perencanaan struktur dermaga.

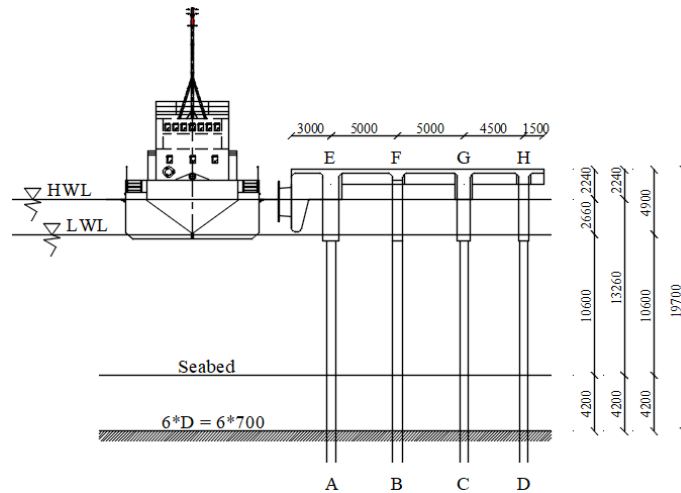
Secara garis besar desain penelitian dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2. Model Struktur

Berdasarkan as-built drawing struktur dermaga pada Project Asahan oleh PT Indonesia Asahan Aluminum, model struktur dermaga yang berupa portal bidang yang menjadi pengukuran dalam pengerjaan penelitian ini dapat digambarkan dalam potongan melintang sebagai berikut:



Gambar 2. Model Struktur

Adapun dimensi tiang kolom baja berdiameter 700 mm dengan ketebalan 12 mm, dan juga dimensi balok sebesar $800 \times 1100 \text{ mm}^2$ dengan kuat tekan beton $f'_c = 20 \text{ MPa}$. Dari data-data ini, dapat diperoleh nilai properti kolom dan balok yang diperlukan dalam analisis, yaitu:

Tabel 1. Properti Kolom dan Balok

Kolom	Diameter dalam (mm)	676
	Inersia (m^4)	0.001535107
	Modulus elastisitas (kN/m^2)	200000000
Balok	Inersia (m^4)	0.088733333
	Modulus elastisitas (kN/m^2)	21019038.99

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1. Perhitungan Gaya Sandar (*Berthing Forces*)

Kapal yang diangkat menjadi kapal referensi untuk perhitungan dalam penelitian ini adalah kapal peti kemas (Container Ship) berukuran 40.000 DWT. Seperti namanya, kapal ini adalah kapal yang khusus untuk mengangkut peti kemas.

Tabel 2. Karakteristik kapal peti kemas
(Sumber : Triatmodjo, 2010)

Kapasitas Angkut (DWT)	Displacement G (ton)	Panjang total Loa (m)	Panjang garis air Lpp (m)	Lebar B (m)	Draft (m)	Juml. Peti kemas
100.000	133.000	326	310	42,8	14,5	7.100
90.000	120.000	313	298	42,8	14,5	6.400
80.000	107.000	300	284	40,3	14,5	5.700
70.000	93.600	285	270	40,3	14,0	4.900
60.000	80.400	268	254	32,3	13,4	4.200
50.000	67.200	250	237	32,3	12,6	3.500
40.000	53.900	230	217	32,3	11,8	2.800
30.000	40.700	206	194	30,2	10,8	2.100
25.000	34.100	192	181	28,8	10,2	1.700
20.000	27.500	177	165	25,4	9,5	1.300
15.000	20.900	158	148	23,3	8,7	1.000
10.000	14.200	135	126	20,8	7,6	600
7.000	1.300	118	109	20,1	6,8	400

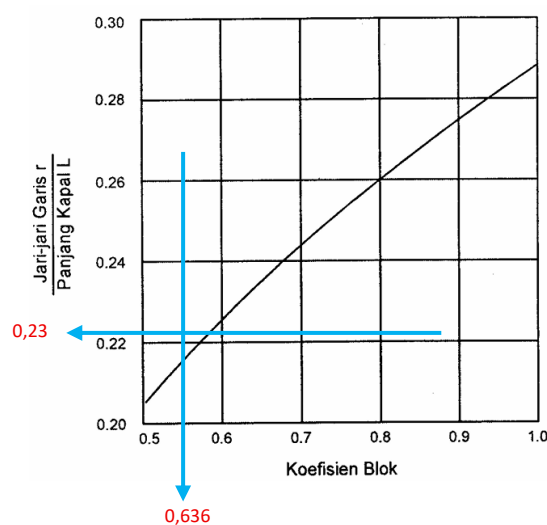
Pada tabel 2, diperoleh dimensi kapal yang akan digunakan dalam perhitungan kapasitas fender, dimana:

$$W/G : 53.900 \text{ ton}; \quad L_{pp} : 217 \text{ m}; \quad B : 32,3 \text{ m}$$

$$L_{oa} : 230 \text{ m}; \quad d : 11,8 \text{ m}$$

1. Koefisien blok kapal (C_b).

$$C_b = \frac{W}{L_{pp} \cdot B \cdot d \cdot \gamma_o} \Rightarrow \frac{53.900 \text{ ton}}{217 \text{ m} \cdot 32,3 \text{ m} \cdot 11,8 \text{ m} \cdot 1,025 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}} = \underline{\underline{0,636}}$$



Gambar 3. Jari-jari putaran disekeliling pusat berat kapal.
(Sumber : Triatmodjo, 2010)

$$\frac{r}{L_{oa}} = 0,23 \Rightarrow r = 0,23 \cdot 230 \text{ m} = \underline{\underline{52,9 \text{ m}}}$$

2. Koefisien massa (C_m).

$$C_m = 1 + \frac{\pi \cdot d}{2C_b \cdot B} \Rightarrow 1 + \frac{\pi \cdot 11,8 \text{ m}}{2(0,636) \cdot 32,3 \text{ m}} = \underline{\underline{1,9}}$$

3. Koefisien eksentrisitas (C_e).

$$l = \frac{1}{4} \cdot L_{oa} \Rightarrow l = \frac{1}{4} \cdot 230 \text{ m} = \underline{\underline{57,5 \text{ m}}}$$

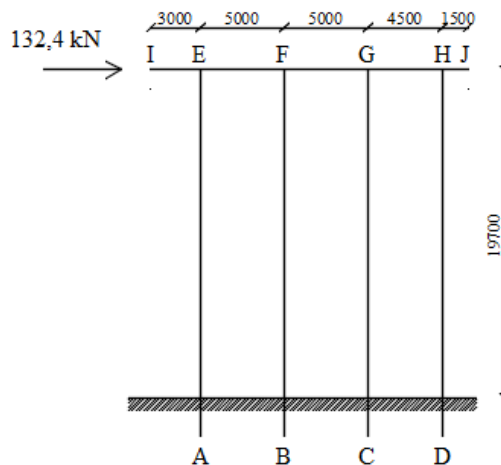
$$C_e = \frac{1}{1 + (l/r)^2} \Rightarrow \frac{1}{1 + (57,5 \text{ m}/52,9 \text{ m})^2} = \underline{\underline{0,46}}$$

4. Energi benturan kapal (E).

$$E = \frac{W \cdot V^2}{2} C_m \cdot C_e \cdot C_s \cdot C_c$$

$$E = \frac{53.900 \text{ ton} \cdot (0,12 \text{ m/s})^2}{2} 1,9 \cdot 0,46 \cdot 1 \cdot 1 = \underline{\underline{339 \text{ kNm}}}$$

3.2. Analisis Struktur Dermaga dengan Beban *Berthing* Tanpa Pengaruh Tekanan Hidrostatik



Gambar 4. Struktur dengan beban *berthing* murni

Nilai dari *fixed-end moments* berasal dari beban yang bekerja di tengah bentang. Pada gambar 4, dapat terlihat bahwa tidak ada gaya yang bekerja di tengah bentang. Maka tiap elemen struktur tidak memiliki *fixed-end moment*.

$$FEM_{EA} = FEM_{FB} = FEM_{GC} = FEM_{HD} = 0$$

$$FEM_{AE} = FEM_{BF} = FEM_{CG} = FEM_{DH} = 0$$

3.3. Persamaan Slope-Deflection

Titik-titik dimana terdapat tumpuan jepit akan memiliki nilai $\theta=0$, maka $\theta_A=\theta_B=\theta_C=\theta_D=0$. Maka diperoleh 5 (lima) buah degrees of freedom struktur, yaitu $\theta_E, \theta_F, \theta_G, \theta_H$ dan ψ . Berdasarkan bagian tabel 2., dapat dibentuk persamaan slope-deflection untuk setiap elemen struktur.

Maka bisa diperoleh nilai-nilai tiap persamaan, yaitu:

1. Kolom.

$$M_{AE} = \frac{31169,68\theta_E - 93509,03\psi}{2}$$

$$M_{EA} = \frac{62339,36\theta_E - 93509,03\psi}{2}$$

$$M_{BF} = \frac{31169,68\theta_F - 93509,03\psi}{2}$$

$$M_{FB} = \frac{62339,36\theta_F - 93509,03\psi}{2}$$

$$M_{CG} = \frac{31169,68\theta_G - 93509,03\psi}{2}$$

$$M_{GC} = \frac{62339,36\theta_G - 93509,03\psi}{2}$$

$$M_{DH} = \frac{31169,68\theta_H - 93509,03\psi}{2}$$

$$M_{HD} = \frac{62339,36\theta_H - 93509,03\psi}{2}$$

2. Balok.

$$M_{EF} = \frac{1492072\theta_E + 746036\theta_F}{2}$$

$$M_{FE} = \frac{1492072\theta_F + 746036\theta_E}{2}$$

$$M_{FG} = \frac{1492072\theta_F + 746036\theta_G}{2}$$

$$M_{GF} = \frac{1492072\theta_G + 746036\theta_F}{2}$$

$$M_{GH} = \frac{1657857\theta_G + 828929\theta_H}{2}$$

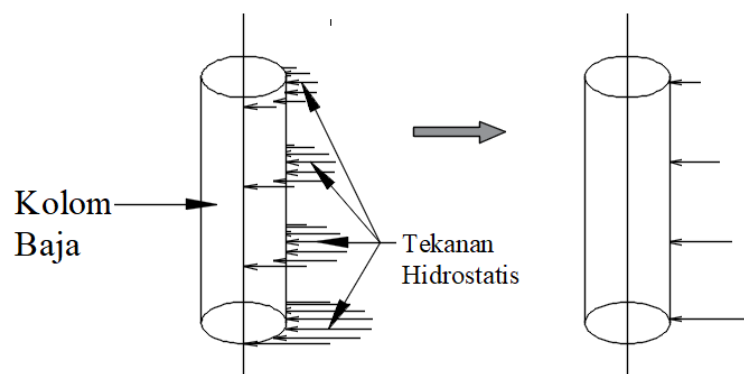
$$M_{HG} = \frac{1657857\theta_H + 828929\theta_G}{2}$$

3.4. Analisis Struktur Dermaga dengan Beban Berthing Dengan Pengaruh Tekanan Hidrostatik Kondisi Pasang atau High Water Level (HWL)

Tekanan hidrostatik seperti yang tertera memiliki variabel h didalamnya. Hal ini menyatakan bahwa semakin besar nilai kedalaman titik yang ditinjau, nilai tekanan hidrostatik juga akan semakin besar berbanding lurus dengan kedalamannya.

$$P = \rho \cdot g \cdot h \Rightarrow 1,025 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 13,26 \text{ m}$$

$$P = \frac{133,33 \text{ kN}}{\text{m}^2}$$



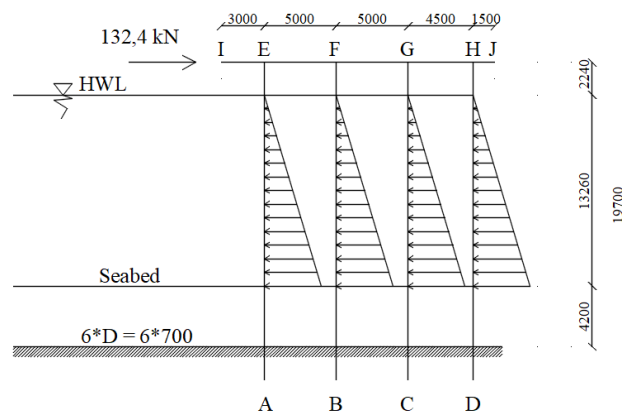
Gambar 5. Ilustrasi tekanan hidrostatik pada kolom

Beban merata per satuan luas tersebut kemudian diubah menjadi beban merata per satuan panjang untuk dilakukan analisis dua dimensi. Maka berdasarkan model struktur, seperti terlihat pada ilustrasi gambar 5, tekanan hidrostatik berubah menjadi:

$$q = P \cdot D \Rightarrow 133,33 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,7 m = 93,33 \frac{kN}{m}$$

$$q = 93,33 \frac{kN}{m} \div (4 \text{ baris} \times 32 \text{ kolom}) = \underline{\underline{0,73 \frac{kN}{m}}}$$

Beban q ini terbagi rata ke semua kolom pada struktur dermaga dimana terdapat 32 kolom disepanjang potongan memanjang struktur dermaga. Maka tiap kolom akan mengalami tahanan sebesar $0,73 \frac{kN}{m}$, seperti pada gambar 6.



Gambar 6. Struktur dengan beban berthing dan tekanan hidrostatik HWL

3.5. Persamaan Slope-Deflection

Persamaan *slope-deflection* untuk kasus model struktur dengan tekanan hidrostatik HWL ini pada dasarnya sama, mengingat tidak adanya perubahan atau perbedaan properti daripada kolom dan balok. Untuk kasus model struktur dengan tekanan hidrostatik HWL ini, hanya perlu menambahkan nilai *fixed-end moments*.

1. Kolom.

$$M_{AE} = \underline{\underline{31169,68\theta_E - 93509,03\psi + 11,75}}$$

$$M_{EA} = \underline{\underline{62339,36\theta_E - 93509,03\psi - 9,29}}$$

$$M_{BF} = \underline{\underline{31169,68\theta_F - 93509,03\psi + 11,75}}$$

$$M_{FB} = \underline{\underline{62339,36\theta_F - 93509,03\psi - 9,29}}$$

$$M_{CG} = \underline{\underline{31169,68\theta_G - 93509,03\psi + 11,75}}$$

$$M_{GC} = \underline{\underline{62339,36\theta_G - 93509,03\psi - 9,29}}$$

$$M_{DH} = \underline{\underline{31169,68\theta_H - 93509,03\psi + 11,75}}$$

$$M_{HD} = \underline{\underline{62339,36\theta_H - 93509,03\psi - 9,29}}$$

2. Balok.

$$M_{EF} = \underline{\underline{1492072\theta_E + 746036\theta_F}}$$

$$M_{FE} = \underline{\underline{1492072\theta_F + 746036\theta_E}}$$

$$M_{FG} = \underline{\underline{1492072\theta_F + 746036\theta_G}}$$

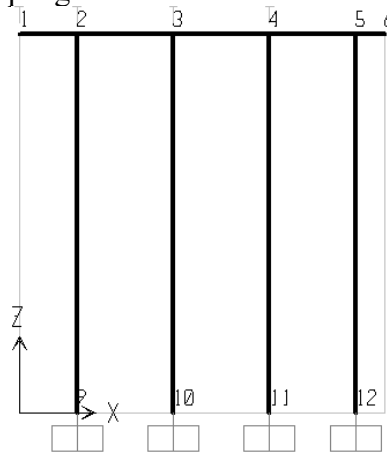
$$M_{GF} = \underline{\underline{1492072\theta_G + 746036\theta_F}}$$

$$M_{GH} = \underline{\underline{1657857\theta_G + 828929\theta_H}}$$

$$M_{HG} = \underline{\underline{1657857\theta_H + 828929\theta_G}}$$

3.6. Analisis Struktur dengan Software Komputer

Analisis dengan perangkat lunak diawali dengan terlebih dahulu memodelkan atau menggambarkan struktur beserta tumpuannya dan dilanjutkan dengan menginput properti material dan penampang.



Gambar 7. Pemodelan struktur pada perangkat lunak.

Gambar 8. Konfigurasi properti material baja.

Gambar 9. Konfigurasi penampang kolom.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa fluktuasi elevasi muka air laut akibat pasang surut memberikan pengaruh nyata terhadap deformasi struktur dermaga tipe jetty akibat beban berthing kapal, dengan perbedaan deformasi antara kondisi pasang dan surut sebesar 2,83% berdasarkan metode slope-deflection, sehingga pengaruh tekanan hidrostatik tidak dapat diabaikan dalam analisis struktur dermaga. Perbandingan antara metode analitik slope-deflection dan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga memperlihatkan tingkat kesesuaian yang baik, dengan selisih rata-rata deformasi sebesar 2,168%, yang menegaskan bahwa metode slope-deflection masih relevan sebagai pendekatan analisis awal, sementara simulasi numerik memberikan hasil yang lebih konservatif untuk evaluasi lanjutan. Secara praktis, temuan ini memberikan dasar teknis bagi perencanaan dan evaluasi dermaga tipe jetty yang lebih adaptif terhadap dinamika pasang surut, serta mendukung penerapan kombinasi metode analitik dan numerik guna meningkatkan keandalan dan keselamatan desain struktur pelabuhan.

5. REFERENSI

- [1] C. A. Thoresen, *Port designer's handbook*, vol. 638. ICE publishing London, 2014.
- [2] B. Triatmodjo, "Perencanaan pelabuhan," *Yogyakarta: Beta Offset*, 2010.
- [3] M. F. Humaini and S. Saputro, "DAMPAK KENAIKAN AIR LAUT TERHADAPELEVASI DERMAGA PELABUHAN SUNDA KELAPA," *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan*, vol. 2, no. 1, pp. 30–38, 2024.
- [4] S. Cho, W. Cho, and T. Koo, "Fatigue Assessment of Pier Structures Under Dynamic Forces," *Buildings*, vol. 14, no. 10, p. 3320, 2024.
- [5] S. A. Mukhtar, G. Handoyo, and H. Setiyono, "Studi Batimetri Dan Pasang Surut Untuk Rekomendasi Alur Pelayaran Di Dermaga Pelabuhan Marunda," *Indonesian Journal of Oceanography*, vol. 6, no. 4, pp. 375–382, 2024.
- [6] A. S. Hanun, D. H. Ismunarti, and M. Helmi, "Kajian Elevasi Lantai Dermaga Berdasarkan Integrasi Pengaruh Pasang Surut, Gelombang dan Kenaikan Muka Laut di Pelabuhan Tanjung Emas Kota Semarang," *Indonesian Journal of Oceanography*, vol. 6, no. 4, pp. 368–374, 2024.
- [7] H. Zeng, R. Zhu, Q. Wang, J. Zheng, and J. Zou, "Framework and application of ship berthing methods optimization in high-pile wharf based on surrogate models," *Ocean Engineering*, vol. 300, p. 117420, 2024.
- [8] C. Hou, X. Xu, Y. Zheng, X. Lan, and Z. Zhang, "Investigation of dynamic responses of various bent structures in offshore high-pile wharfs subjected to impact loading," *Ocean Engineering*, vol. 337, p. 121876, 2025.
- [9] P. Lai, "Research methodology for novelty technology," *JISTEM-Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 15, p. e201815010, 2018.
- [10] A. Bieber *et al.*, "In situ structural analysis reveals membrane shape transitions during autophagosome formation," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 119, no. 39, p. e2209823119, 2022.