Journal of Science and Engineering

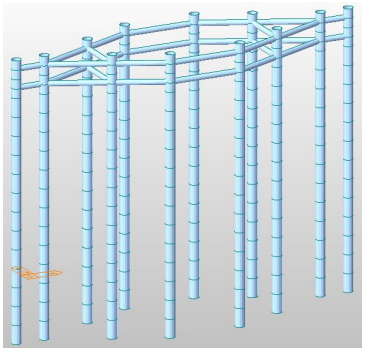
Full Paper

ANALISIS KAPASITAS TIANG PANCANG TERHADAP BEBAN IMPAK PADA STRUKTUR PELINDUNG PILAR JEMBATAN

Putri Nurul Kusuma Whardani[1*], Veriza Agistin[2], Ade Nurdin[3] Fadhol Yudhagama
[1] Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi
[2] Program Studi Manajemen Rekayasa Konstruksi, Politeknik Negeri Padang, Padang
[3] Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi
[4]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

*Corresponding author
putrinurulwhardani@unja.ac.id

Graphical Abstract



Abstract

The Batanghari I Bridge in Jambi Province is a strategic piece of infrastructure that spans a busy river shipping lane frequently traversed by heavily loaded coal barges. The bridge's pier protection structures (fenders), particularly at piers 5 and 6, have experienced multiple direct collisions with barges. This raises concerns about the pile foundation system's capacity within the fender structure to withstand impact loads. This study aims to analyze the structural capacity of pile foundations under barge impact loads using a numerical approach. The method employed involves mathematical modeling using the MIDAS Civil software, with input data consisting of secondary sources such as barge specifications, soil data, and the geometry of the fender structure. The impact load is calculated based on the provisions of the Ministry of Public Works and Housing Circular No. 12/SE/M/2015, using a design barge with a length of 270 feet and a full load of 5,200 tons. The impact energy is calculated at 39,169.22 Joules, resulting in a lateral impact force of 472.95 kN, which increases to 756.72 kN after applying the live load factor. The modeling results indicate that a D1000 steel pile with a length of 30 meters possesses sufficient structural capacity to withstand the impact load from the design barge. The study concludes that the existing fender structure remains viable for continued use.

Keywords: Bridge fender, Impact load, Barge, Pile foundation

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur vital yang berfungsi menghubungkan dua wilayah terpisah oleh sungai, laut, atau lembah. Salah satu jembatan utama di Provinsi Jambi adalah Jembatan Batanghari 1, yang melintasi Sungai Batanghari dan menjadi bagian dari jalur transportasi utama. Panjang jembatan ini ± 513 m dengan 9 bentang dan terdapat 8 pilar. Pilar ini dilindungi oleh struktur pelindung atau disebut fender dengan tipe tiang pancang yang gunanya untuk menjaga kestabilan dan keselamatan struktur jembatan. Fender dirancang untuk menyerap dan meredam energi tumbukan.

Jembatan Batanghari 1 merupakan salah satu jalur pelayaran sungai yang dilintasi oleh kapal tongkang batu bara bermuatan besar. Lintasan utama pelayaran yang sering dilewati oleh kapal tongkang yaitu pada pilar ke – 5 dan pilar ke – 6. Akibat dari lalu lintas kapal, fender pada pilar ke – 5 dan ke – 6 sering mengalami benturan dari tongkang tersebut. Berdasarkan data dari Balai Pelaksanaan Jalan Nasional (BPJN) Provinsi Jambi, pada tahun 2024 sudah 3 (tiga) kali terjadi tabrakan pada jembatan tersebut khususnya pada fender pilar ke – 5 dan ke – 6 [2]. Kejadian ini menyebabkan terjadinya kerusakan fender yang cukup parah serta menimbulkan

kekhawatiran terhadap kemampuan struktur fender terutama tiang pancang sebagai elemen utama penahan beban impak dalam menjalankan fungsinya secara efektif.

Gambar 1. Sketsa Lokasi Kerusakan Fender Jembatan Batanghari 1 [2]

Sistem fender yang efektif harus mampu menyerap energi kinetik dari kapal dan mendistribusikannya ke struktur pendukung tanpa merusak elemen utama jembatan [7]. Apabila kapasitas struktur pelindung, khususnya tiang pancang sudah tidak mencukupi, maka risiko kerusakan pilar jembatan dapat meningkat signifikan.

Dengan banyaknya kejadian benturan yang terjadi, evaluasi terhadap kapasitas fender tiang pancang sangat diperlukan. Namun, karena tidak tersedia data inspeksi visual atau non-deskruktif terkait kondisi aktual tiang, maka analisis dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak MIDAS, dengan memanfaatkan data sekunder berupa data tanah, spesifikasi tiang, dan karakteristik tongkang rencana.

1.2. Tinjauan Pustaka

Fender merupakan sistem proteksi struktural terhadap benturan kapal, yang terdiri dari elemen penahan gaya impak seperti tiang pancang, struktur atas, dan penyerap energi. Sistem ini harus mampu menyerap energi benturan tanpa menyebabkan kerusakan struktural pada bagian utama jembatan [7]. Hal ini sejalan dengan AASHTO (2014), yang menekankan pentingnya mempertimbangkan arah tumbukan, massa kapal, dan karakteristik sungai dalam desain struktur pelindung [1].

Di Indonesia, pedoman perencanaan struktur pelindung terhadap tumbukan kapal diatur dalam Surat Edaran Menteri PUPR No. 12/SE/M/2015, yang menyatakan bahwa beban impak rencana harus didasarkan pada [5]:

1. Jenis kapal/tongkang rencana, yakni kapal terbesar yang sering melintasi di jalur tersebut.
2. Karakteristik jalur pelayaran, seperti lebar sungai, kedalaman, kecepatan arus, dan frekuensi pelayaran.
3. Kecepatan impak rencana, yang biasanya berkisar 1-2 m/s tergantung kondisi sungai.
4. Energi impak, dihitung dengan rumus energi kinetik:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

dimana,
E = energi impak (*joule*)
m = massa tongkang termasuk muatan (kg)
v = kecepatan tumbukan (m/s)

5. Gaya impak (*force impact*), dihitung untuk mengevaluasi kapasitas struktur terhadap tumbukan.

Penelitian terdahulu oleh Putra et al. (2019) menggunakan model numerik SAP2000 berdasarkan SE PUPR 12/2015 [8] dan menunjukkan bahwa tongkang dengan muatan besar dapat menghasilkan gaya tumbukan signifikan pada tiang pancang. Sementara itu, Wulandari (2020) menggunakan metode serupa dengan fokus pada sistem fender di jembatan pelabuhan dan menemukan bahwa elemen vertikal (tiang pancang) merupakan bagian paling kritis terhadap beban impak lateral [9].

Dalam penelitian ini, pendekatan perhitungan beban impak mengikuti SE Menteri PUPR No. 12/SE/M/2015, dan pemodelan numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak MIDAS berbasis data sekunder dari proyek jembatan dan pelayaran di Sungai Batanghari.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan hasil studi awal, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apakah kapasitas tiang pancang pada fender pilar ke – 5 dan ke – 6 Jembatan Batanghari 1 masih mencukupi untuk menahan beban impak dari tongkang batu bara bermuatan besar?
2. Bagaimana respons struktural (tegangan dan deformasi) tiang pancang terhadap tumbukan berdasarkan simulasi numerik dengan perangkat lunak MIDAS?

Rumusan ini disusun berdasarkan pendekatan perhitungan impak kapal sesuai SE PUPR No.12/SE/M/2015 dan penelitian sebelumnya oleh Putra et al (2019) yang menekankan pentingnya pemodelan numerik dalam mengevaluasi ketahanan struktur terhadap tumbukan lateral [8].

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kapasitas tiang pancang fender pilar ke – 5 dan ke – 6 Jembatan Batanghari 1 terhadap beban impak dari tongkang batu bara.
2. Mengevaluasi respons tegangan dan deformasi struktur tiang pancang berdasarkan data sekunder melalui pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak MIDAS.

1.5. Lingkup Peneltian

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi sebagai berikut.

1. Objek penelitian dibatasi pada fender pilar ke – 5 dan ke – 6 Jembatan Batanghari 1, karena keduanya merupakan jalur utama lintasan tongkang dan paling sering mengalami tumbukan (BPJN Provinsi Jambi, 2024).
2. Data yang digunakan merupakan data sekunder, meliputi data tanah, spesifikasi teknis tiang pancang, dan data tongkang rencana berdasarkan referensi pelayaran setempat.
3. Analisis struktur dilakukan dengan metode numerik menggunakan perangkat lunak MIDAS Civil.
4. Tidak dilakukan pengujian atau inspeksi kondisi aktual tiang di lapangan; kondisi diasumsikan sesuai desain awal, yang menjadi salah satu keterbatasan dalam penelitian ini.
5. Aspek yang dianalisis hanya meliputi respon teknis struktural, tidak mencakup aspek operasional, ekonomi, maupun lingkungan.

2. METODOLOGI

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan studi analitis dengan pendekatan numerik, yang bertujuan mengevaluasi kapasitas tiang pancang pada fender jembatan terhadap beban impak tongkang batu bara. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak MIDAS Civil, yang memungkinkan simulasi struktur 3D terhadap beban lateral dinamis. Analisis dilakukan secara linier statik dengan pendekatan energi impak dari benturan sebagai beban lateral.

2.2. Data dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari instansi terkait, meliputi:

1. Data tanah: profil lapisan tanah, nilai SPT, modulus elastisitas tanah, dan kedalaman muka air tanah.
2. Data struktur: dimensi dan konfigurasi tiang pancang, material beton dan baja, jarak antar tiang, dan kedalaman tiang pancang.
3. Data pelayaran dan kapal: dimensi dan berat tongkang batu bara, kecepatan arus sungai, kecepatan lintasan kapal berdasarkan observasi.
4. Peraturan teknis: Surat Edaran Menteri PUPR No. 12/SE/M/2015 sebagai dasar penentuan beban impak rencana.

2.3. Pemodelan Beban Impak

Penentuan gaya impak dilakukan berdasarkan konversi energi kinetik tongkang menjadi gaya statik ekuivalen seperti dijelaskan dalam SE PUPR No. 12/SE/M/2015. Rumus dasar perhitungan energi impak adalah:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

dimana,
E = energi impak (*joule*)
m = massa tongkang termasuk muatan (kg)
v = kecepatan tumbukan (m/s)

Setelah diproses energi impak, nilai ini dikonversi menjadi gaya impak rencana (F) dengan asumsi deformasi tertentu (δ) sebagai berikut:

$$F = \frac{E}{\delta} \quad (2)$$

Nilai δ diasumsikan berdasarkan deformasi efektif struktur fender berdasarkan referensi teknis dan asumsi desain dari PIANC (2002) dan AASHTO (2014).

2.4. Justifikasi Model

Model yang digunakan disesuaikan dengan konfigurasi aktual tiang pancang fender pilar ke -5 dan ke – 6 Jembatan Batanghari 1. Justifikasi model meliputi:

1. Model geometri: tiang pancang dimodelkan sebagai elemen batang (*beam – column*) dengan *fixity* sesuai hasil daya dukung tanah.
2. Material: properti beton dan baja dimasukkan sesuai spesifikasi teknis (f'c dan fy).
3. *Boundary condition*: kondisi perletakan diasumsikan *fix* pada ujung bawah tiang, sesuai kondisi *embedded* dalam tanah.
4. Jenis analisis: analisis linier statik (dengan simulasi lateral loading akibat impak) digunakan sebagai pendekatan konservatif.

2.5. Simulasi dengan MIDAS Civil

Langkah – langkah simulasi dalam MIDAS Civil meliputi:

1. Pembuatan model struktur tiang pancang (*single pile* dan *group pile* sesuai konfigurasi di lapangan).
2. Input properti material (beton dan baja) dan properti tanah (berdasarkan modulus reaksi tanah).
3. Pemberian beban vertikal (beban mati dan hidup dari struktur atas) dan beban lateral (impak tongkang).
4. *Running* simulasi statik linier untuk mendapatkan reaksi tanah, gaya dalam, dan deformasi lateral tiang pancang.
5. Evaluasi hasil terhadap kapasitas tiang, yaitu tegangan maksimum, momen, dan defleksi, dibandingkan dengan kapasitas rencana struktur.

2.6. Teknik Evaluasi Hasil

1. Kapasitas tiang pancang dievaluasi berdasarkan batas momen dan tegangan izin struktur tiang pancang (berdasarkan SNI 2847:2019 dan SNI 8460:2017).
2. Batas deformasi lateral dibandingkan terhadap batas defleksi lateral maksimum tiang pelindung berdasarkan kriteria AASHTO (2014).
3. Faktor keamanan terhadap impak dianalisis dari rasio antara kapasitas maksimum tiang terhadap beban maksimum akibat impak tongkang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perhitungan Beban Impak Tongkang

Perhitungan beban impak pada fender Jembatan Batanghari 1 mengacu pada Surat Edaran Menteri PUPR No. 12/SE/M/2015. Berdasarkan data lalu lintas pelayaran, jumlah tongkang yang melintasi jembatan mencapai 1.140 unit per tahun.

Tabel 1. Data Lalu Lintas Tongkang Batu Bara [2]

LOA (feet)	Draft (m)	Jumlah (buah)
330	5,3	96
300	4,8	251
270	4,5	486
230	3,06	187
180	2,75	120
Jumlah		1140

Sesuai pedoman, tongkang rencana ditentukan sebagai 10% dari total lalu lintas tahunan, yaitu 114 unit yang masih dibawah batas 200 unit sebagaimana diatur dalam SE tersebut. Tongkang rencana yang digunakan dalam analisis memiliki panjang 270 feet (82,296 m) dan berat penuh 5.200 ton. Kecepatan pelayaran disesuaikan dengan kondisi lapangan, yaitu lebar lintasan pelayaran yang tidak memenuhi persyaratan minimum, sehingga kecepatan maksimum ditetapkan sebesar 4 m/s. Arus sungai ditentukan sebesar 0,25 m/s dan kedalaman sungai pada lokasi tumbukan 15 meter.

Dengan mempertimbangkan kedalaman bebas di bawah tongkang (*clearance* > 0,5 draft), maka koefisien hidrodinamik (CH) diambil sebesar 1,05. Perhitungan energi impak menggunakan rumus:

$$KE = 500\ x\ CH\ x\ M\ x\ v^2$$

$$KE = 500\ x\ 1{,}05\ x\ 5{,}2\ x\ (3{,}787836)^2$$

$$KE = 39.169{,}22\ joule$$

Energi impak ini kemudian digunakan untuk menghitung gaya impak horizonal (PB) dengan rumus empirik dari SE PUPR:

$$PB = 60\ x\ a_B\ x\ R_B$$

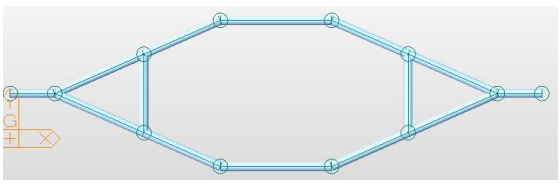
Dengan hasil akhir, gaya impak utama yaitu 472,95 kN dan gaya lateral terhadap fender (arah tegak lurus pelayaran) sebesar 236,48 kN. Beban impak kemudian dikalikan dengan faktor 1,6 untuk memperhitungkan efek beban hidup, sesuai ketentuan tambahan dalam perencanaan struktur fender.

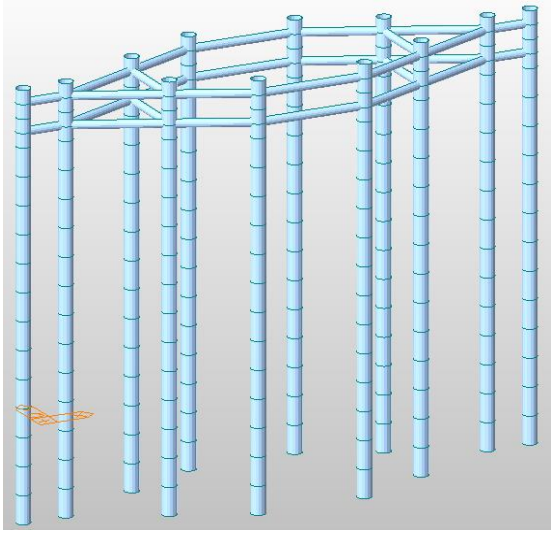
3.2. Hasil Pemodelan dan Analisis Struktur

Pemodelan struktur dilakukan dengan memperhatikan kondisi aktual susunan tiang pancang fender. Tiang pancang baja digunakan dengan spesifikasi:

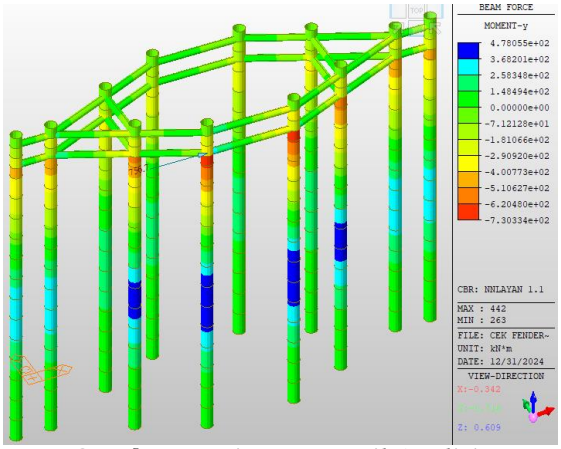
- Diameter : 1000 mm (D1000)
- Material : Baja fy 420 Mpa
- Panjang : 30 meter
- Susunan tiang :12 tiang dalam konfigurasi melingkar
- Jarak antar tiang : 5 meter

Analisis struktur dilakukan dengan kondisi yaitu model tiang lurus (eksisting).





Gambar 2. Pemodelan Struktur Fender



Gambar 3. Diagram Hasil Analisis

Dari hasil analisis dengan beban impak aktual, didapatkan bahwa:

1. Tiang baja D1000 mampu menahan beban impak sebesar 472,95 kN.
2. Tegangan maksimum yang terjadi masih di bawah batas yield material.
3. Deformasi lateral pada kepala tiang masih dalam batas aman berdasarkan deformasi AASHTO (2014).

3.3. Pembahasan Teknis

Hasil perhitungan gaya impak sebesar 472,95 kN termasuk dalam kategori beban dinamis yang signifikan. Meskipun kapasitas tiang pancang baja cukup memadai, namun dalam kondisi aktual di lapangan, faktor-faktor seperti keausan material, korosi, atau kerusakan terdahulu belum diperhitungkan. Oleh karena itu, pemodelan berdasarkan data desain saja bersifat konservatif dan perlu ditindaklanjuti dengan inspeksi langsung atau pengujian nondestruktif di lapangan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi analisis terhadap kapasitas tiang pancang pada struktur pelindung Jembatan Batanghari 1, yang dilakukan melalui pendekatan pemodelan numerik dengan perangkat lunak MIDAS dan mengacu pada ketentuan dalam Surat Edaran Menteri PUPR No. 12/SE/M/2015, maka dapat disimpulkan beberapa poin penting sebagai berikut.

1. Tongkang rencana yang digunakan dalam analisis memiliki panjang 270 feet (82,296 m) dan berat penuh 5.200 ton. Berdasarkan data pelayaran, jumlah tongkang rencana sebesar 114 unit per tahun telah memenuhi ketentuan dalam SE Menteri PUPR No. 12/SE/M/2015, sehingga layak digunakan sebagai dasar perhitungan beban impak.
2. Energi impak rencana dihitung sebesar 39.169,22 Joule, dengan gaya impak utama yang bekerja pada fender sebesar 472,95 kN. Setelah memperhitungkan beban hidup sesuai pedoman (faktor pengali 1,6), total gaya impak yang harus ditahan struktur mencapai 756,72 kN.
3. Hasil pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak menunjukkan bahwa tiang pancang baja D1000 yang digunakan pada fender Jembatan Batanghari I memiliki kapasitas struktur yang mencukupi untuk menahan gaya impak tongkang rencana, baik dari segi kekuatan material maupun deformasi lateral.

Analisis dilakukan menggunakan data sekunder tanpa inspeksi kondisi aktual tiang pancang, sehingga asumsi kondisi struktur dianggap sesuai desain awal. Oleh karena itu, hasil penelitian ini bersifat konservatif dan perlu didukung oleh investigasi lapangan atau pengujian nondestruktif untuk mendapatkan evaluasi yang lebih komprehensif.

REFERENCES

[1] AASHTO. (2014). *LRFD Bridge Design Specifications* (7th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
[2] Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Provinsi Jambi. (2024). *Laporan Inspeksi Jembatan Batanghari I Tahun 2024* [Dokumen tidak dipublikasikan].
[3] Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
[4] Das, B. M. (2010). *Principles of Foundation Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
[5] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Surat Edaran Menteri PUPR No. 12/SE/M/2015 tentang Pedoman Perencanaan Struktur Pelindung Pilar Jembatan dari Tumbukan Kapal*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
[6] MIDAS IT. (2017). *MIDAS/Civil User Manual: General Bridge Design System for Engineers*. MIDAS Information Technology Co., Ltd.
[7] PIANC. (2002). *Guidelines for the Design of Fender Systems*. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure.
[8] Putra, A. R., Susilo, H., & Prasetyo, R. (2019). Analisis Struktur Fender Jembatan Akibat Tumbukan Tongkang Menggunakan SAP2000. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(2), 89–96.
[9] Wulandari, S. (2020). Evaluasi Kapasitas Struktur Fender Pelabuhan terhadap Beban Impak Kapal Menggunakan Metode Numerik. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 14(1), 55–64.