

PENGARUH BEBAN-IMPAK KAPAL TERHADAP BANGUNAN PENGAMAN PILAR JEMBATAN *FENDER* (IMPACT LOAD EFFECT OF BARGE TO BRIDGE PIER *FENDER*)

N. Retno Setiati¹⁾, Bagus Aditya W²⁾

^{1),2)} Puslitbang Jalan dan Jembatan
^{1),2)} Jalan A.H. Nasution No. 264 Ujungberung, Bandung
¹⁾ e-mail: retno.setiati@pusjatan.pu.go.id
²⁾ e-mail: bagus.aditya@pusjatan.pu.go.id
Diterima: 07 Januari 2013; disetujui: 01 April 2013

ABSTRAK

Tumbukan kapal terhadap jembatan sering terjadi dan dapat mengakibatkan kerusakan maupun keruntuhan struktur jembatan. Runtuhnya jembatan dapat berakibat pada kerugian baik dari segi nilai ekonomis ataupun korban jiwa. Untuk mengurangi resiko terjadinya kerusakan tersebut diatas, perlu dirancang bangunan pengaman pilar jembatan terhadap lalu-lintas kapal. Sistem pelindung jembatan harus didesain tidak hanya melindungi struktur jembatan tetapi juga digunakan untuk melindungi kapal dan lingkungan yang dapat mengakibatkan kerusakan. Penulisan ini bertujuan untuk mengidentifikasi beberapa ketentuan dalam kriteria desain terkait fender sesuai dengan kondisi dan lokasi jembatan tersebut. Sistem pengamanan jembatan di lokasi sungai berbeda dengan sistem pengamanan di laut. Dalam penulisan ini dibahas contoh studi kasus bangunan pengaman pada Jembatan Kutai Kartanegara yang berupa pile supported system. Analisis dilakukan dari evaluasi lalu-lintas air dan analisis terhadap struktur bangunan. Metodologi yang digunakan terdiri dari menentukan karakteristik lalu-lintas sungai Mahakam, jalur pelayaran, kecepatan impact rencana, energi impact tongkang, dan analisis struktur dari bangunan pengamanan Jembatan Kutai Kartanegara. Dari analisis diperoleh bahwa dengan beban impact sebesar 682,59 kN akibat tongkang tipe 300 feet menghasilkan defleksi (pergerakan) maksimum pada fender sebesar 0,12 meter artinya bahwa fender yang tertumbuk tongkang tidak diperkenankan menyebabkan terjadinya defleksi lebih dari 12%.

Kata kunci: tongkang, bangunan pengaman, pilar, impact, perpindahan, panjang keseluruhan kapal, bobot mati kapal

ABSTRACT

Lately frequent boat collision on bridges resulted in the collapse of the bridge structure. The collapse of the bridge can result in a loss of economic value or loss of life. To reduce the risk of damage a fender should be designed to protect pier of the bridge against boat traffic. The bridge protection system must be designed to protect the bridge structure and also to protect the ship and the environment that can cause severe damage. This paper aims to identify some of the provisions of the relevant design criteria in accordance with the conditions and fender bridge location. Protective systems in river bridge location are different from the protective system in the sea. In this paper a case study is discussed on river pier protections of Kutai Kartanegara Bridge pile supported system. Analysis of the evaluation of the traffic is included the analysis of the structure of the pier. The methodology used consists of determining the characteristics of the Mahakam River traffic, cruise lines, high-impact plans, energy collision ship (barge), to the analysis of the structure of the pier protection of Kutai Kartanegara Bridge. From the analysis is found that the impact load of 682.59 kN due to the vessel (barge) type 300 feet produce a deflection (movement) on the fender of a maximum 0.12 meters, that means that if the fender is crushed by barge, deflection of the fender shall not be more than 12%.

Keywords: barge, fender, pier, impact, deflection, Length Over All (LOA), Dead Weight Tonnage (DWT)

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan salah satu wujud terpenting dari sarana pelayanan publik dalam bentuk barang yang dipergunakan sebagai fasilitas umum. Keberadaan jembatan menjadi sangat penting, karena tercermin hubungan antar wilayah yang melancarkan akses ekonomi, sosial, dan budaya. Eksistensi sebuah jembatan mencerminkan sebuah komitmen penguasa mengenai perlindungan/jaminan keamanan yang diberikan kepada pengguna jembatan terhadap bahaya alam, terutama sungai besar. Maka, di balik ambruknya sebuah jembatan, sebenarnya tak hanya semata-mata runtuhnya sebuah bangunan fasilitas umum atau suatu konstruksi, namun juga terputusnya akses ekonomi, sosial, dan budaya, serta gagalnya perlindungan negara terhadap rakyat yang menggunakan jembatan tersebut. (Riawan, W 2011)

Pada era modern sungai masih memiliki peran penting dalam masyarakat. Transportasi sungai yang semakin berkembang meningkatkan daya angkut dan kapasitas kapal. Dengan semakin ramai angkutan sungai juga mengakibatkan sering terjalinya tumbukan antara kapal dengan jembatan terutama pada bagian pilar dan gelagar. Semakin tinggi kemampuan angkut suatu perahu maka meningkat pula tingkat kerusakan yang terjadi pada suatu jembatan. Terdapat banyak tumbukan kapal terhadap pilar jembatan yang mengakibatkan terjadinya kegagalan pada struktur jembatan. Runtuhnya pilar jembatan dapat berakibat pada kerugian baik dari segi nilai ekonomis ataupun korban jiwa.



sumber: Wikimedia Foundation, Inc., 2007

Gambar 1. Jembatan Jiujiang China ditabrak kapal bermuatan pasir

Gambar 1 memperlihatkan runtuhnya Jembatan Jiujiang China yang ditabrak kapal

bermuatan batubara. Peristiwa serupa terjadi pada Jembatan Ampera. Jembatan Ampera yang menghubungkan Palembang Ulu dan Palembang Ilir saat ini kondisinya memprihatinkan. karena sudah belasan kali jembatan tersebut ditabrak oleh kapal tongkang pengangkut batu bara. Jembatan ini juga pernah terpengang kobaran api yang melahap bangunan liar di bawahnya pada Oktober 2010. Sebagai langkah pencegahan saat ini pada tiang utama Jembatan Ampera dipasang pelindung dari benturan kapal besar. (Riawan, W 2011)

Untuk mengurangi resiko terjadinya kerusakan tersebut di atas, maka perlu dikaji dan dirancang bangunan pengaman pilar jembatan (*fender*) yang sesuai dengan kondisi dan lokasi jembatan tersebut.

KAJIAN PUSTAKA

Runtuhnya suatu jembatan tidak hanya diakibatkan bahaya alam (bencana) atau penurunan kapasitas, akan tetapi dapat juga diakibatkan tertabrak kapal/tongkang yang melintas di bawahnya sehingga menimbulkan kerusakan pada pilar maupun gelagar. Sebagai salah satu contoh, berikut kronologis tertabraknya Jembatan Ampera oleh kapal yang berlayar di bawah melintasi jembatan (Wordpress Org 2008):

1. Bulan Februari 1996, tertabrak tongkang. Akibatnya selubung beton *Pier 3* (tower arah Palembang) rusak. Kerusakan tersebut telah diperbaiki pihak perusahaan Angkutan Batubara (PT. Grasindo Marine).
2. Pada tanggal 9 Februari 2000, pilar 4 tergores 1,5 m dengan lebar 25 cm dan kedalaman 3 cm (tower arah Plaju) tertabrak tongkang *Metriko XVI* berbendera Singapura yang mengangkut muatan 5.500 ton.
3. Pada tanggal 14 Desember 2001, kapal tongkang bermuatan pasir kembali menghantam Jembatan Ampera.
4. Pada tanggal 11 April 2005, kapal tongkang *AP 3008* berukuran 90 x 18 m, bermuatan 7.400 ton batubara menabrak tiang Jembatan Ampera. Tongkang tersangkut di antara dua tiang jembatan.
5. Pada tanggal 18 Maret 2007, tongkang bermuatan menabrak Jembatan Ampera.
6. Pada tanggal 12 November 2007, pukul 19.00 WIB, *fender* arah hilir yang sedang dibangun tertabrak *Tug Boat Marina XI*

sehingga mengakibatkan tiang baja bagian depan roboh dan *bracing* patah.

7. Pada tanggal 23 November 2007 pukul 08.00 WIB, *fender* arah hulu tertabrak Tug Boat Surya Wira dan Teratai yang mengakibatkan tiang baja dan *bracing* patah.
8. Pada tanggal 4 Januari 2008, pukul 11.30 WIB, *fender* arah hulu ditabrak Tug Boat Surya Wira dan Teratai mengakibatkan tiang dan *bracing* penyok.
9. Pada tanggal 13 Januari 2008, pukul 08.00 WIB, *fender* arah hilir ditabrak Tug Boat Mawar dan Equator mengakibatkan tiang 1 dan 3 serta *bracing* patah.
10. Pada tanggal 30 Januari 2008, pukul 08.30 WIB, *fender* arah hulu ditabrak Tug Boat King Fisher dan Teratai mengakibatkan tiang dan *bracing* patah.
11. Pada tanggal 1 Februari 2008, pukul 17.45 WIB, *fender* arah hilir ditabrak Tug Boat United dan Teratai mengakibatkan tiang dan *bracing* roboh dan patah.

Kasus lain terjadi pada Jembatan Jiujiang China dengan kerusakan akibat tertabrak tongkang batu bara pada tanggal 15 Juni 2007. Jembatan Jiujiang didukung oleh beberapa *pier* tambahan pada setiap jarak 50 meter. Setelah *pier* pertama ditabrak tongkang, bagian dari jembatan dengan bentang 100 meter juga ambruk, menyebabkan dua *pier* di sebelahnya secara beruntun runtuh, sehingga akhirnya menyebabkan 100 meter panjang bentang jembatan lainnya ikut runtuh. (Wikimedia Foundation, Inc. 2007)

Pembangunan struktur *fender* dimaksudkan untuk menjaga agar kapal/tongkang yang melintas di bawah jembatan tidak menumbuk secara langsung pilar jembatan yang berakibat kerusakan pada struktur jembatan tersebut. Menurut Supartono (Hidayatullah 2008), konsep perencanaan sangat didukung oleh beberapa faktor yaitu bathimetri (kedalaman dasar sungai), kecepatan arus sungai, penyelidikan tanah, konsep dan kriteria perencanaan, modelisasi struktur, analisis struktur, desain struktur *fender*, dan gambar rencana struktur. Perencanaan dilakukan berdasarkan suatu metode energi dimana energi kinetik dari kapal/tongkang yang menumbuk akan diserap sebagian oleh *fender*.

Prinsip perencanaan *fender*

Perencanaan *fender* berdasarkan dua prinsip sebagai berikut (RSNI T-02-2005, Pembebanan untuk Jembatan):

1. struktur *fender* sebagai peredam energi impact kapal/tongkang sampai ke tingkat kekuatan ijin pilar jembatan;
2. struktur *fender* sebagai pelindung pilar jembatan terhadap energi impact kapal/tongkang.

Energi impact kapal dihitung berdasarkan perumusan gaya akselerasi ($F=ma$) yaitu:

$$KE = \int F(x)dx \dots\dots\dots (1)$$

$$KE = \frac{C_H x 0,5W(V)^2}{g} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- KE = energi kinetik kapal/tongkang desain (tm)
- F(x) = gaya pelindung struktur F(t) sebagai fungsi lendutan x(m)
- C_H = koefisien hidrodinamis masa air yang bergerak bersama kapal, yang merupakan interpolasi dari:
 - a. 1,05 untuk jarak bebas dasar kapal/tongkang ke dasar perairan $\geq 0,5 \times D_L$
 - b. 1,25 untuk jarak bebas dasar kapal/tongkang ke dasar perairan $\leq 0,1 \times D_L$
- D_L = draft kedalaman kapal pada beban penuh (m)
- W = tonase perpindahan kapal (t), berat total kapal pada beban penuh
- V = kecepatan impact kapal (m/s)
- g = gravitasi (= 9,8m/s²)

Impact kapal/tongkang diperhitungkan ekuivalen dengan gaya impact statis pada obyek yang kaku dengan rumus berikut :

$$P_s = (DWT)^{1/2}(12,5xV) \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- P_s = gaya impact kapal/tongkang sebagai gaya statis ekuivalen (t)
- DWT = tonase berat mati muatan kapal/tongkang (t) = berat kargo, bahan bakar, dan persediaan air
- V = kecepatan impact kapal (m/s)

Dalam keadaan khusus diperlukan analisis dinamis untuk menentukan energi dan gaya impact kapal.

Pengertian *Dead Weight Tonnage* (DWT) secara khusus adalah suatu unit kapasitas kapal untuk kargo, bahan bakar, barang dan awak kapal, yang diukur dalam satuan ton yang setara dengan 1.000 kg. Berat mati (DWT) kapal adalah total berat yang dapat dibawa oleh kapal saat proses pemuatan barang.

Klasifikasi kapal desain

Tipe dan karakteristik kapal yang digunakan dalam dunia transportasi air dibagi dalam dua kategori, yaitu kapal laut yang umum digunakan pada lalu-lintas laut dan tongkang yang digunakan pada lalu-lintas sungai. Klasifikasi kapal dan tongkang dapat dilihat pada Tabel 1.

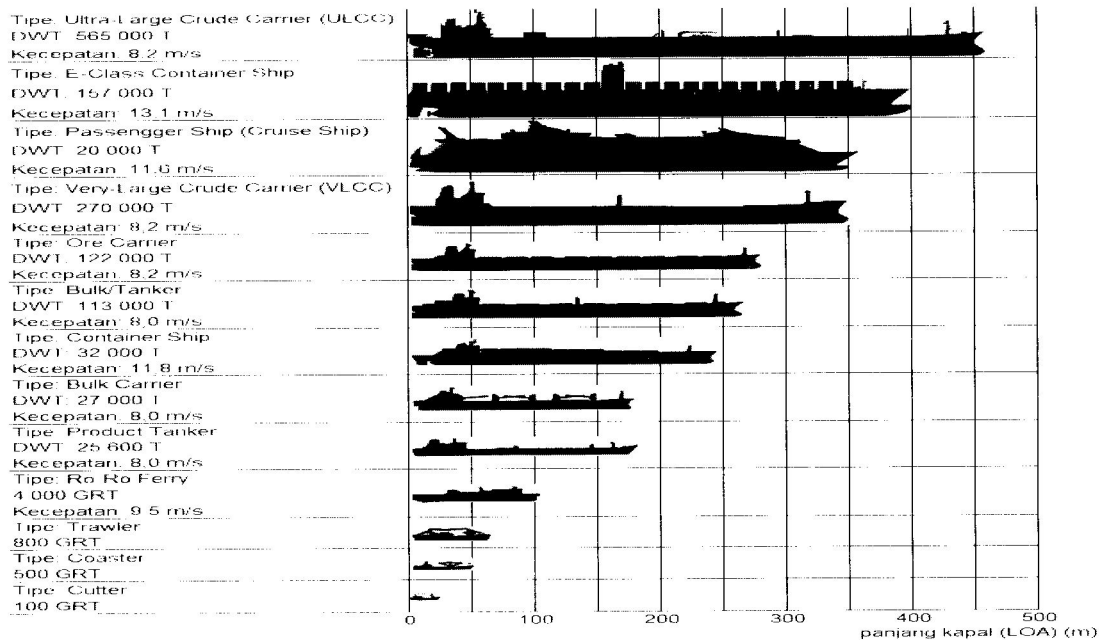
Klasifikasi sistem fender

Sehubungan dengan faktor risiko dalam penentuan kapal/tongkang desain untuk perencanaan beban impact pada pilar. Berbagai tipe, bahan dan fungsi *fender* secara mendasar dijelaskan pada RSNI T-02-2005 (Indonesia,

2005) bahwa *fender* kayu, terdiri dari elemen vertikal dan horisontal dalam kerangka yang dipasang bersatu dengan pilar atau secara terpisah. Energi impact diredam oleh deformasi elastis dan kerusakan elemen kayu. *Fender* kayu digunakan untuk melindungi pilar terhadap gaya impact dari kapal kecil.

1. *Fender* karet, dibuat komersial dalam bentuk aneka ragam. Energi impact diredam oleh deformasi elastis dari elemen karet dalam kombinasi tekanan, lenturan dan geser.
2. *Fender* beton, terdiri dari struktur boks berongga dan ber dinding tipis yang dipasang pada pilar. Permukaan luar *fender* beton dapat dilindungi oleh *fender* kayu. Energi impact diredam oleh tekuk dan kerusakan dinding *fender* beton.
3. *Fender* baja, terdiri dari membran ber dinding tipis dan elemen pengaku dalam kerangka boks pada pilar jembatan. Energi impact diredam oleh tekanan, lentur dan tekuk dari elemen baja dalam *fender*. Permukaan luar *fender* baja dapat dilindungi oleh *fender* kayu.

Tabel 1. Jenis, dimensi, dan tonase kapal



(Sumber: AASHTO 2010 dan Wikipedia.org 2008)

Sistem penyangga tiang pancang (*pile supported system*)

Sistem yang didukung oleh tiang, dapat digunakan untuk meredam beban impact.

Kelompok tiang yang dihubungkan oleh *cap* yang kaku adalah suatu struktur pelindung dengan tahanan tinggi terhadap gaya impact kapal. Tiang individual dan tiang yang

dihubungkan oleh *cap* yang fleksibel dapat digunakan juga sebagai pelindung pilar. Kelompok tiang dapat terdiri dari tiang vertikal yang menahan energi dengan lenturan, atau tiang miring yang menahan energi dengan tekanan dan lenturan. Deformasi plastis dan kerusakan tiang diijinkan dengan syarat kapal terhenti sebelum menabrak pilar, atau dampak diredam sampai tingkat kekuatan pilar dan pondasi. Struktur tiang pelindung dapat dibuat secara berdiri sendiri, atau dipasang pada pilar. Tiang kayu, baja, atau beton dapat digunakan sesuai kondisi lapangan, beban dampak dan pertimbangan ekonomis.

Dolphin (Hemming 1981)

Dolphin merupakan struktur sel sirkular dari turap baja yang dipancang, dan diisi beton serta ditutup dengan *cap* beton. *Dolphin* dapat dibuat dari komponen beton pracetak, atau dipracetak secara keseluruhan di luar lapangan dan kemudian dibawa mengapung ke lokasi. Tiang pancang kadang-kadang digabung dalam desain sel. Prosedur perencanaan *dolphin* berdasarkan perubahan energi yang terjadi selama pembebanan dampak rencana. Hubungan dan korelasi energi-simpangan dikembangkan untuk mekanisme peredaman berikut:

1. Kerusakan bagian depan kapal.
2. Terangkatnya bagian depan kapal.
3. Gesekan antara kapal dan *dolphin*.
4. Gesekan antara kapal dan dasar sungai.
5. Geseran *dolphin*.
6. Rotasi *dolphin*.
7. deformasi *dolphin* dibatasi kurang dari $\frac{1}{2}$ diameter sel serta deformasi plastis dan runtuh parsial diperbolehkan terjadi pada sel.

Pulau buatan

Fender pulau sekeliling pilar jembatan adalah proteksi sangat efektif terhadap dampak kapal. Pulau terdiri dari pasir atau batuan dengan permukaan luar dari batuan pelindung berat untuk menahan gelombang dan arus. Geometri pulau sesuai dengan kriteria berikut:

1. Dampak kapal diredam melalui pulau sampai ke tingkat kapasitas lateral pilar dan pondasi pilar;
2. Dimensi pulau sedemikian rupa agar penetrasi kapal ke dalam pulau tidak menyebabkan sentuhan kapal pada pilar.

Fender terapung

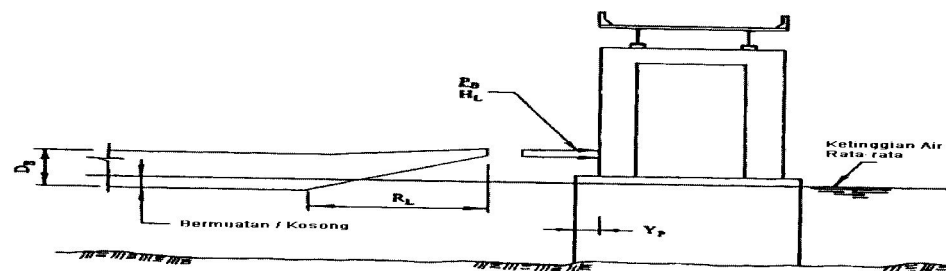
Fender terapung terdapat dalam berbagai system, yaitu:

1. Sistem jaringan kabel: kapal berhenti oleh sistem kabel terjangkar dalam dasar perairan yang diberi pelampung di depan pilar;
2. Ponton terjangkar: ponton terapung yang terjangkar dalam dasar perairan di depan pilar untuk meredam dampak kapal.

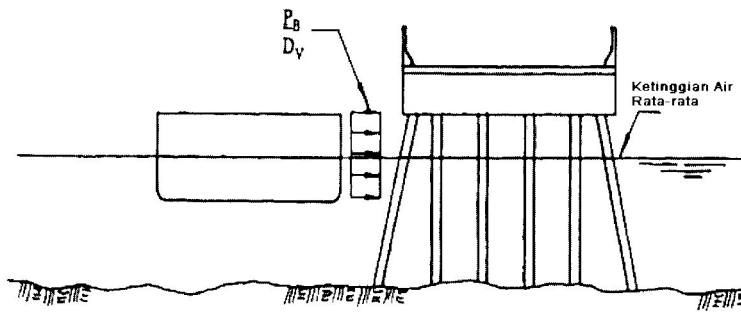
Model pembebanan (Knott 1990)

Beberapa model pembebanan dampak kapal/tongkang terhadap struktur jembatan terdiri dari:

- a. Beban dampak kapal terpusat.
- b. Beban dampak kapal terbagi merata.
- c. Beban dampak tongkang terpusat.
- d. Beban dampak tongkang terbagi merata.



Gambar 2. Beban dampak tongkang terpusat pada pilar (AASHTO 2010)

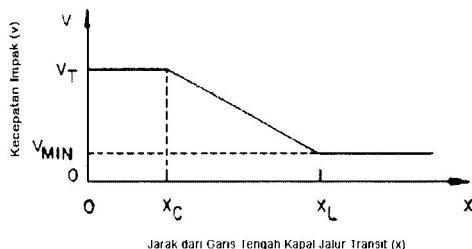


Gambar 3. Beban impact tongkang terbagi merata pada pilar (AASHTO 2010)

Gambar 2 dan 3 di atas adalah konsep beban impact akibat tongkang yang menabrak pilar jembatan.

Berdasarkan data kecelakaan yang terjadi, kecepatan impact diluar wilayah jalur pelayaran berbentuk segitiga. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa kapal/tongkang yang berjalan menyimpang dan menabrak pilar yang jauh dari jalur pelayaran bergerak lebih lambat dari pada menabrak pilar yang lebih dekat dengan jalur pelayaran. Batas kecepatan rencana dengan nilai sama dengan kecepatan arus sejauh tiga kali panjang total kapal (3 LOA). Pemilihan kecepatan impact rencana merupakan salah satu parameter desain yang sangat penting. Kecepatan rencana harus mencerminkan tipikal kecepatan dari kapal rencana pada jalur pelayaran dengan kondisi lingkungan yang tipikal. Kecepatan rencana tidak boleh berdasarkan nilai ekstrim berdasarkan kejadian ekstrim seperti banjir dan kondisi alam yang ekstrim lainnya. Kapal yang berlayar pada kondisi tersebut tidak mencerminkan situasi rerata tahunan. Kecepatan impact rencana dapat ditentukan berdasarkan gambar 4 berikut:

Kecepatan impact rencana (AASHTO 2010)



Gambar 4. Distribusi kecepatan impact rencana (AASHTO 2010)

Keterangan:

V = kecepatan impact rencana (m/dt)

- V_T = tipikal kecepatan pelayaran pada jalur pelayaran dengan kondisi lingkungan normal tetapi digunakan lebih dari V_{min} (m/dt).
- V_{MIN} = kecepatan impact rencana minimum, lebih besar dari kecepatan arus rerata tahunan pada lokasi jembatan (m/dt)
- X = adalah jarak terhadap pilar dari garis tengah jalur pelayaran (mm)
- X_C = jarak terhadap tepi jalur pelayaran (mm)
- X_L = adalah jarak 3 kali panjang total kapal rencana (mm).

Energi impact kapal/tongkang (Maunsell 1978)

Energi kinetik yang diserap dari kapal/tongkang yang bergerak pada impact tidak eksentrik dengan memperhitungkan koefisien massa hidrodinamik dapat dilihat dalam persamaan (2).

Massa kapal harus berdasarkan kondisi kapal bermuatan dan termasuk massa kosong kapal dan memperhitungkan massa kargo untuk kapal bermuatan (DWT). Nilai koefisien massa hidrodinamik untuk jarak bersih sedang dapat diinterpolasi dari nilai dibawah ini:

1. Untuk jarak bersih dasar jalur pelayaran terhadap bagian bawah kapal lebih dari 0,5 draft ($\geq 0,5 \times Draft$), $C_H = 1,05$.
2. Untuk jarak bersih dasar jalur pelayaran terhadap bagian bawah kapal lebih dari 0,5 draft ($\leq 0,1 \times Draft$), $C_H = 1,25$.

Draft adalah kedalaman alur pelayaran yang dilalui oleh kapal/tongkang, biasanya dalam satuan meter.

Gaya impact kapal/tongkang

Gaya impact yang bekerja pada struktur pada umumnya digunakan sebagai berikut:

1. Beban desain 100 % apabila arah impact sejajar dengan arah pergerakan kapal.

2. Beban desain 50 % apabila arah impact tegak lurus dengan arah pergerakan kapal.
3. Untuk kestabilan secara keseluruhan, beban impact yang digunakan berupa beban terpusat pada muka air tinggi rata-rata.
4. Untuk gaya impact lokal, beban impact yang digunakan berupa beban terbagi merata setinggi haluan kapal atau setinggi bidang kontak untuk tongkang.

Untuk desain bangunan atas, desain beban impact diterapkan secara transversal dengan arah sejajar arah kapal/tongkang.

Gaya impact kapal/tongkang

Hubungan energi dengan gaya dapat diuraikan sebagai berikut:

Gaya impact kapal pada pilar adalah seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4).

$$P_s = 0,98(DWT)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{V}{16} \right] \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan:

P_s = gaya impact statik ekuivalen kapal (MN)

DWT adalah bobot mati kapal (ton)

V = kecepatan tumbukan kapal (knot)

Gaya impact tongkang pada pilar adalah sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (5), (6), dan persamaan (7).

Untuk $a_B < 0,1$ m

$$P_B = 60 \{ a_B \} \{ R_B \} \dots \dots \dots (5)$$

Untuk $a_B > 0,1$ m

$$P_B = \{ 6 + 1,6 a_B \} \{ R_B \} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

P_B = gaya impact statik ekuivalen (MN)

R_B = rasio $B_B/10,67$ (m)

B_B = lebar tongkang (m)

a_B = kerusakan lambung tongkang (m)

Hubungan antara kerusakan lambung tongkang dengan energi impact yang menyebabkan kerusakan dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$a_B = \left\{ \left[1 + 1,3 \times 10^{-7} \times KE \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \left\{ \frac{3,1}{R_B} \right\}$$

.....(7)

Keterangan:

KE = energi kinetik akibat impact (J atau Nm)

HIPOTESIS

Perencanaan bangunan pengaman jembatan (*fender*) sangat dipengaruhi besarnya energi kinetik (beban impact) akibat kapal/tongkang yang melintas di bawah jembatan.

METODOLOGI

Analisis struktur dilakukan dengan mengambil studi kasus terhadap bangunan pengaman (*fender*) pada Jembatan Kutai Kartanegara yang terletak di sungai Mahakam. Tipe *fender* yang terpasang berupa *pile supported system*. Metode analisis dilakukan dari evaluasi lalu-lintas air sampai dengan analisis terhadap struktur bangunan.

Berdasarkan teori (Greiner Engineering Sciences, Inc. 1983), pemilihan desain tongkang rencana dilakukan dengan dua metode yaitu:

Metode I

Syarat yang harus dipenuhi adalah:

1. Jembatan kelas I atau jembatan penting. Desain ukuran kapal harus sedemikian sehingga jumlah tahunan kapal yang lebih besar dari kapal desain maksimal 5% dari total jumlah tahunan seluruh kapal yang dapat menumbuk elemen jembatan, akan tetapi jumlah kapal yang lebih besar tidak boleh lebih dari 50 buah.
2. Jembatan kelas II atau jembatan biasa. Desain ukuran kapal harus sedemikian sehingga jumlah tahunan kapal yang lebih besar dari kapal desain maksimal 10% dari total jumlah tahunan seluruh kapal yang dapat menumbuk elemen jembatan, akan tetapi jumlah kapal yang lebih besar tidak boleh lebih dari 200 buah.

Metode II

Syarat yang harus dipenuhi dalam analisis dengan menggunakan metode II adalah:

1. Jembatan kelas I atau jembatan penting. Frekuensi keruntuhan tahunan maksimum/*maximum annual frequency* (AF_{max}) harus sama dengan atau lebih kecil dari 0,01 dalam 100 tahun ($AF = 0,0001$).
2. Jembatan kelas II atau jembatan biasa. Frekuensi keruntuhan tahunan maksimum/*maximum annual frequency*

(AF_{max}) harus sama dengan atau lebih kecil dari 0,1 dalam 100 tahun ($AF = 0,001$).

HASIL DAN ANALISIS

Penentuan analisis statistik tongkang rencana yang berlayar di Sungai Mahakam

Tabel 2 menunjukkan karakteristik lalu-lintas dari tongkang pada sungai Mahakam dalam satu tahun. *Length Over All (LOA)* adalah panjang keseluruhan kapal yang diukur dari ujung haluan kapal terdepan sampai pada ujung belakang buritan kapal.

Tabel 2. Ukuran dan jumlah tongkang yang melintasi Jembatan Kutai Kartanegara

No	Panjang total meter	LOA feet	Jumlah buah
1	100,58	330	96
2	91,44	300	251
3	82,30	270	486
4	70,10	230	187
5	54,86	180	120
Jumlah			1140

Sumber : Bina Marga (2010)

Berdasarkan metode I, untuk jembatan biasa desain tongkang sedemikian sehingga jumlah tahunan tongkang 10% dari total jumlah tongkang tahunan.

$$10\% \times 1140 = 114 \text{ buah} < 200 \text{ bh}$$

Karena kriteria 10% dari total jumlah tongkang tahunan lebih kecil dari jumlah maksimum 200 buah, maka tongkang yang digunakan adalah untuk ukuran 91,44 meter (300 feet). Ukuran tongkang ditentukan dari jumlah kumulatif tongkang yang ke 114.

Karakteristik jalur pelayaran Sungai Mahakam (Sumber: Bina Marga 2010)

Lebar total Sungai Mahakam 370 meter, dengan lebar jalur pelayaran 250 meter. Jarak antar pilar pada jalur pelayaran adalah 270 meter.

Penentuan kecepatan dampak rencana

Kecepatan pelayaran untuk lalu-lintas dua jalur dengan kecepatan (5 – 8) m/dt memiliki lebar minimum 6,7 LOA. Dalam analisis digunakan tongkang terbesar yaitu panjang tongkang 100,58 meter (330 feet). $6,7 \times 100,58 = 673,90$ meter.

Karena lebar minimum tidak terpenuhi maka kecepatan yang melintasi diperkecil. Kecepatan pelayaran (3 – 4) m/dt untuk dua lajur pelayaran memiliki lebar minimum 3,5 LOA. $3,5 \times 100,58 = 352,04$ meter.

Karena lebar minimum jalur pelayaran untuk lalu-lintas dua lajur lebih besar dari lebar jalur pelayaran di sekitar jembatan, maka jalur pelayaran hanya dapat digunakan untuk satu lajur.

Kecepatan pelayaran (5 – 8) m/dt untuk satu lajur pelayaran memiliki lebar minimum 3,2 LOA. $3,2 \times 100,58 = 321,86$ meter.

Lebar minimum untuk kecepatan (5 – 8) m/dt > lebar jalur pelayaran (270 m), maka kecepatan kapal yang melintas diperkecil.

Kecepatan pelayaran (3 – 4) m/dt untuk satu lajur pelayaran memiliki lebar minimum 1,6 LOA. $1,6 \times 100,58 = 160,93$ meter.

Untuk lebar jalur pelayaran 270 m, maka kecepatan maksimum tongkang ukuran panjang 100,58 meter (330 feet) pada saat melalui jembatan adalah 4 m/dt.

Kecepatan arus sungai pada jalur pelayaran adalah 0,25 m/dt.

Untuk analisis kecepatan dampak rencana sesuai dengan Gambar 4.

X_C sesuai dengan lebar jalur pelayaran dari as jalur pelayaran yaitu $250/2 = 125$ m

X_L merupakan 3 kali LOA yaitu $3 \times 100,58 = 301,75$.

V_T merupakan kecepatan maksimum pada jalur pelayaran yaitu 4 m/dt.

V_{MIN} merupakan kecepatan arus sungai yaitu 0,25 m/dt.

Untuk $X < 125$ m; $V = V_T = 4$ m/dt

Untuk $125 \text{ m} \leq X \leq 301,75$ m;

$$V = 4 - \left[X - 125 \left(\frac{4 - 0,25}{301,75 - 125} \right) \right] \dots\dots(8)$$

Untuk $X > 301,75$ m; $V = V_{MIN} = 0,25$ m/dt

Penentuan energi dampak tongkang

Tongkang yang melalui jembatan selalu dalam kondisi penuh, total berat yang digunakan sebesar berat penuh tongkang. Berat penuh tongkang rencana 91,44 meter (300 feet) adalah 7500 ton. Kedalaman sungai 15 meter. Berdasarkan persamaan (3), diperoleh:

Massa kapal (M) adalah dalam satuan Mg, sehingga massa kapal sebesar 7,5 Mg;

C_H adalah koefisien massa hidrodinamik.

Jarak bersih dasar jalur pelayaran terhadap bagian bawah kapal adalah:

$$15 - 4,8 = 10,2 \text{ meter} > 0,5 \times 4,8 = 2,4 \text{ meter}$$

Untuk jarak bersih > 2,4 meter, maka $C_{II} = 1,05$

Jarak pilar terhadap as jembatan adalah $270/2 = 135$ meter.

Kecepatan tongkang pada jarak 135 meter adalah:

$$V = 4 - \left[(X - 125) \left(\frac{4 - 0,25}{301,75 - 125} \right) \right] \dots\dots(9)$$

$$V = 4 - \left[(135 - 125) \left(\frac{4 - 0,25}{301,75 - 125} \right) \right]$$

$$V = 3,79 \text{ m/dt}$$

Energi impact tongkang pada pilar jembatan adalah:

$$KE = 500 \times 1,05 \times 7,5 \times \{3,79\}^2 = 56558,64 \text{ J}$$

Penentuan gaya impact tongkang

Kerusakan yang terjadi akibat impact tergantung dari energi kinetik (KE) dan lebar relatif tongkang rencana. Tongkang dengan panjang 91,44 meter (300 feet) memiliki lebar 24,38 meter (80 feet).

Kedalaman kerusakan pada tongkang akibat impact adalah dapat ditentukan berdasarkan persamaan (7).

R_B adalah rasio lebar tongkang, $B_B/10,67$

$$R_B = 24,38/10,67 = 2,285 \text{ meter}$$

$$a_B = \left([1 + 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot KE]^{\frac{1}{2}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{3,1}{R_B} \right) \quad (10)$$

$$a_B = \left([1 + 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot 56558,64]^{\frac{1}{2}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{3,1}{2,285} \right)$$

$$a_B = 0,00498 \text{ m}$$

Gaya impact yang terjadi pada tongkang tergantung dari kedalaman kerusakan yang terjadi dan rasio lebar tongkang.

Gaya impact untuk $a_B < 0,1$ m berdasarkan persamaan (5) adalah:

$$P_b = 60 (a_B) (R_B)$$

$$P_b = 60 (0,00498) (2,285)$$

$$P_B = 0,6822758 \text{ MN} = 682,28 \text{ kN}$$

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil dan analisis diperoleh data sebagaimana tercantum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil analisis data

No	Persamaan	Besaran	Satuan
1	Gaya impact	682,28	kN
2	Energi impact	56558,64	J
3	Kecepatan impact	0,25	m//det

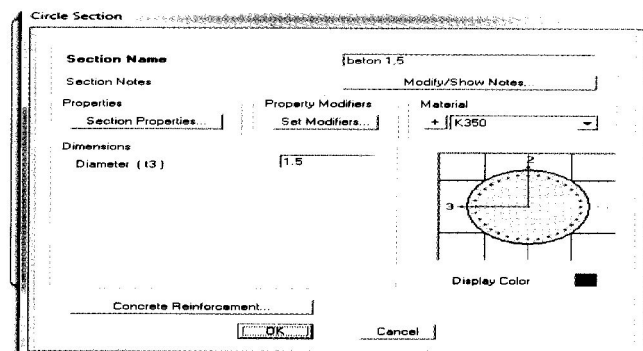
Dari Tabel 3 diperoleh besar gaya tumbukan yang diterima oleh struktur sebesar 682,28 kN. Gaya tumbukan yang bekerja pada struktur digunakan untuk menganalisis struktur. Struktur pelindung menggunakan sistem penyangga tiang pancang (*pile supported system*) sesuai dengan desain Jembatan Kutai Kartanegara.

Gaya tumbukan yang bekerja pada struktur digunakan untuk menganalisis struktur. Ditentukan dari data teknis bahwa:

1. Tebal pelat pengaku 2,0 m.
2. Diameter pipa 1,5 m.
3. Tulangan tiang pancang .
4. Berat volume beton bertulang 2,4 ton/m³.
5. Mutu beton pelat pengaku f_c' 30 MPa.
6. Mutu beton tiang pancang f_c' 30 MPa.
7. Jepit berada pada kedalaman 31 meter dari pangkal tiang.
8. Jepit berada pada kedalaman 30 meter dari muka air.

Data teknis dan gaya impact tersebut dianalisis dengan menggunakan program bantu (*SAP = Structural Analysis Program*).

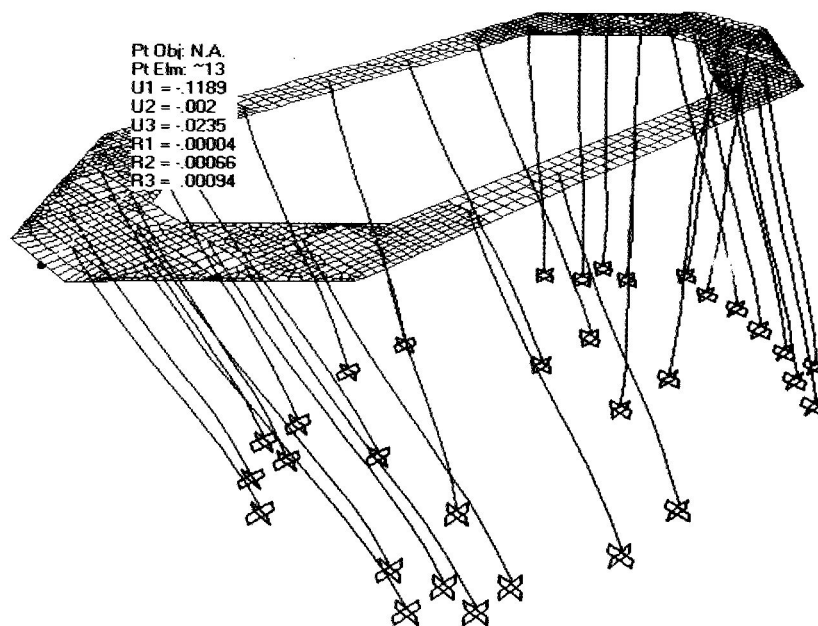
Untuk penampang tiang pancang menggunakan beton mutu 30 MPa (K-350) dengan diameter 1,5 meter (lihat Gambar 5).



Gambar 5 : Dimensi tiang pancang (SAP 2000 v 14)

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	K350
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	24028
Mass per Unit Volume	0.245
Units: Tonf, m, C	
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	2534563.6
Poisson's Ratio, U	0.2
Coefficient of Thermal Expansion, A	9.900E-06
Shear Modulus, G	1056068.2
Other Properties for Concrete Materials	
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	3059.1486
<input type="checkbox"/> Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Gambar 8. Karakteristik beton (output program SAP 2000 v 14 2013)



Gambar 9. Defleksi pada bangunan pengaman

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan arus lalu-lintas yang terjadi di sungai Mahakam, *fender* yang tertabrak tongkang tidak boleh melebihi defleksi maksimum sebesar 0,1 meter. Penentuan tipe *fender* dari suatu jembatan sangat dipengaruhi oleh karakteristik dari lalu-lintas sungai yang melewati jembatan tersebut.

Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam pemilihan sistem *fender*:

1. *Fender* harus memiliki kemampuan penyerapan energi kinetis lebih besar dibanding energi kinetik yang terjadi akibat dampak tongkang ke *fender*.
2. Tekanan yang timbul dari sistem *fender* tidak boleh melebihi kemampuan menahan tekanan dari lambung tongkang (badan tongkang).

Fender yang ideal adalah yang mampu mengabsorpsi energi kinetik yang sebesar-besarnya dan mengubah ke bentuk gaya reaksi sekecil-kecilnya ke konstruksi jembatan.

Saran

Dalam pemilihan *fender* harus diingat akan adanya energi dampak yang diabsorpsi *fender* dan gaya reaksi yang harus ditahan oleh pilar jembatan.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 2010. *Guide Specifications for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, 2nd Ed. AASHTO. Washington, DC.
- Bina Marga. Kementerian Pekerjaan Umum. 2010. *Laporan Hasil Survei Jembatan Kutai Kartanegara*.
- Greiner Engineering Sciences, Inc. 1983. *Study of Pier Protection Systems for Bridges*, prepared for Maryland Transportation Authority, Baltimore. Maryland. Amerika.
- Hemming, W.C. Desember 1981. *Fendering Problems in the Third Coast Guard District*. Bridge and Pier Protective Systems and Devices Conference Proceedings. Stevens Institute of Technology. Amerika.
- Hidayatullah Adronafis. 2008. [Http://adronafis.blogspot.com/2008/11/14-tiang-untuk-jembatan-ampera.html](http://adronafis.blogspot.com/2008/11/14-tiang-untuk-jembatan-ampera.html)
- Knott, M. A. and Larsen, O. Damgaard. 1990. *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*. Federal Highway Administration, US Department of Transportation. Publ. No. FHWA-RD-91-006. Amerika.
- Maunsell and Partners and Brady, P.J.E. 1978. *Second Hobart Bridge – Risk of Ship Collision and Methods of Protection*. Technical Report prepared for Department of Main Roads. Tasmania. Australia.
- Puslitbang Jalan dan Jembatan. Kementerian Pekerjaan Umum. RSN1 T-02-2005. *Pembebanan Untuk Jembatan*.
- SAP 2000 version 14.00. 2013. *Integrated Solution for Structural Analysis and Design*, CSI.
- Wikimedia Foundation, Inc. 2007. [Http://en.wikipedia.org/wiki/Collapse_of_Jiujiang_Bridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Collapse_of_Jiujiang_Bridge).
- Wikipedia. org. 2008. http://en.wikipedia.org/wiki/Seawise_Giant.
- Wordpress.org. 2008. [Http://infokito.wordpress.com/2008/02/18/peristiwa-tertabraknya-jembatan-ampera/#more-1333](http://infokito.wordpress.com/2008/02/18/peristiwa-tertabraknya-jembatan-ampera/#more-1333).
- Riawan Tjandra. 2011. [Http://www.tempo.co/read/kolom/2011/12/15/496/Berkaca-pada-Runtuhnya-Jembatan](http://www.tempo.co/read/kolom/2011/12/15/496/Berkaca-pada-Runtuhnya-Jembatan).