

EVALUASI JEMBATAN BOKS GIRDER BETON SETELAH MENGALAMI BENTURAN KECELAKAAN KAPAL

Muhamad Saad¹, Heru Purnomo²

¹Mahasiswa, Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik-Universitas Indonesia, Depok, 16424

²Dosen Senior, Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik-Universitas Indonesia, Depok, 16424.

e-mail: muhamad.saad@ui.ac.id¹, herupur@eng.ui.ac.id²

ABSTRACT

A bridge is a structure that connects two places separated by an obstacle. These obstacles are in the form of rivers, seas, ravines, or gaps between buildings. One of them is the sea, where planning must consider the free height of the bridge to prevent being struck by ship traffic. Preventive efforts, however, were not expected due to the sea level exceeding the planned high conditions, which led to an accident where a ship struck the bridge. This condition causes the bridge to experience transverse deformation due to the impact load conditions on the bridge in the transverse direction. The odd behaviour of the bridge, particularly in the compression and tension sections, required a brief further examination. The incident of the ship crashing into the bridge was taken from the case study of the 6 Bareleng Bridge, where the concrete box girder type bridge was affected by LBW APCs. Australian One Ship in 2012. Bridge behaviour was reviewed using non-linear geometric analysis, and the static impact load estimated with the AASHTO Method. The condition of the model is then compared with historical data on bridge damage for structural modelling verification.

Keywords: *Impact vessel, Geometric non-linear analysis, Box girder concrete.*

ABSTRAK

Jembatan adalah sebuah bangunan yang menghubungkan dua tempat yang memiliki rintangan. Kendala tersebut berupa sungai, laut, jurang, atau antar bangunan. Salah satunya laut dimana perencanaan harus memperhitungkan tinggi bebas jembatan agar jembatan tidak tertabrak oleh lalu lintas kapal. Namun upaya pencegahan tersebut tidak dapat diprediksi karena ketinggian air laut melebihi kondisi tinggi yang direncanakan sehingga terjadi kecelakaan dimana jembatan tersebut tertabrak kapal. Kondisi ini menyebabkan jembatan mengalami deformasi melintang akibat kondisi beban tumbukan pada jembatan dengan arah melintang. Perilaku tidak biasa yang terjadi pada jembatan, terutama pada daerah tekan dan tarik jembatan, memerlukan evaluasi lebih lanjut sesaat terhadap jembatan tersebut. Kejadian kapal menabrak jembatan diambil dari studi kasus Jembatan 6 Bareleng dimana Jembatan Tipe Boks Girder Beton terkena Kapal LB. APC. Aussie One pada tahun 2012. Perilaku jembatan ditinjau menggunakan analisis geometri non-linear dan pendekatan beban statik tumbukan kapal metode AASHTO. Kondisi model kemudian dibandingkan dengan data historis kerusakan jembatan sebagai verifikasi pemodelan struktural.

Kata kunci: *Gaya tumbukan kapal, Analisis geometri non-linear, Boks girder beton.*

PENDAHULUAN

Kecelakaan pada jembatan umumnya terjadi disebabkan adanya keteledoran manusia dan pengaruh lingkungan yang tidak bisa diprediksi. Salah satu bentuk kecelakaan yang terjadi adalah tumbukan pada kapal yang mengenai jembatan. Seperti disebutkan oleh Kunz

(1998), tabrakan kapal dengan jembatan jarang terjadi serta terjadi secara acak dan dipengaruhi oleh berbagai kondisi yang kompleks. Perilaku jembatan pada saat tertabrak sangat dipengaruhi oleh kecepatan kapal, sudut kapal, berat dan dimensi kapal serta *boundary condition* yang terjadi pada jembatan existing (A. Irhayim Et All, 2021). Bentuk modeling struktur jembatan yang rigid merupakan

cara simplikasi untuk memisahkan dampak benturan yang terjadi dari interaksi kapal dengan jembatan (Yanchen Song, 2019).

Pada penelitian ini dilakukan pengambilan studi kasus pada Jembatan VI Bareleng tipe boks girder beton yang tertabrak oleh Kapal LB. APC Aussie One tahun 2012. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perilaku jembatan yang tertabrak oleh kapal terhadap kondisi eksisting. Pemodelan gaya tumbukan kapal berdasarkan data historis serta pemodelan struktur jembatan boks girder pada saat tertabrak menjadi tantangan tersendiri.

Pemodelan beban tumbukan kapal didasari gaya hentakan karena friksi F_R serentak dengan gaya hentakan lateral F_{dy} dapat dihitung sebagai berikut:

$$F_R = \mu F_{dy} \dots\dots\dots(1.1)$$

dimana; μ adalah koefisien friksi, direkomendasikan nilai 0.4

AASHTO menyebutkan untuk rekomendasi beban tumbukan kapal dapat dievaluasi sebagai berikut :

$$P_{bow} = 0.12V (DWT)^{0.5} \dots\dots\dots(1.2)$$

dimana : P_{bow} adalah gaya tumbukan yang terjadi pada kapal , V adalah kecepatan kapal dan DWT adalah berat *dead weight tonnage* kapal .

Pedersen dkk. menyajikan formula empiris serupa untuk estimasi gaya tumbukan maksimum sebagai berikut :

$$P_{bow} = P_0 \bar{L} (\bar{E} + (5 - \bar{L}) \bar{L}^{0.6})^{0.5} \text{ for } \bar{E} \geq \bar{L}^{2.6} \text{ and } P_{bow} = 2.24 P_0 (\bar{E} \bar{L})^{0.5} \text{ for } \bar{E} < \bar{L}^{2.6} \dots\dots\dots(1.3)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \bar{L} &= L_{pp} / 275 \text{ m} \\ \bar{E} &= E / 1425 \text{ Mn. m} \\ E &= m_x \cdot V_0^2 / 2 \end{aligned}$$

L_{pp} = panjang kapal (m); m_x = massa dengan penambahan massa (10%) memperhitungkan gerakan longitudinal (10^6 kg); V_0 = kecepatan tumbukan kapal

(m/s); F_0 = referensi gaya akibat kecelakaan dengan nilai 210 MN. Formula yang identik diatas untuk gaya tumbukan busur maksimum diadopsi oleh IABSE, EUROCODE dan AASHTO.

Pemodelan kondisi batas jembatan sangat penting mengingat adanya limitasi berkaitan tumpuan yang diterapkan dalam analisis struktur. Penggunaan kondisi ini didasari dari penggunaan elastomer yang mempunyai property khas. Berdasarkan Australia Standard dibedakan menjadi tiga kekakuan yaitu kekakuan aksial tekan (K_c), Kekakuan geser (K_s) dan Kekakuan Rotasi (K_r). Berikut formula yang digunakan :

$$K_c = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{cn}}} \dots\dots\dots(1.4)$$

$$K_s = \frac{A_r G}{t} \dots\dots\dots(1.5)$$

$$K_r = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{rn}}} \dots\dots\dots(1.4)$$

dimana K_{cn} adalah kekakuan aksial tekan per lapis individu dari elastomer; A_r adalah rerata luasan karet per lapisan ; G adalah modulus geser elastomer ; t adalah tebal elastomer ; K_{rn} adalah kekakuan rotasi dari per lapis individu dari elastomer.

Analisis struktur nonlinear geometri yang menggunakan algoritma metode iterasi Newton Raphson dengan mempertimbangkan linearisasi dimana fungsi Vektor $f(u)$ dari variable vektor u diturunkan sehingga didapatkan fungsi linearisasi sebagai berikut :

$$f(u_o + \Delta u) = f(u_o) + K_t(u_o) \Delta u \dots\dots\dots(1.6)$$

Dengan mempertimbangkan rumus 1.6 dari fungsi vektor $f(u)$. Solusi Δu dari

formula $f(u) = 0$ dapat dicari dengan mengatur $f(u_0 + \Delta u)$ menjadi 0, sehingga $f(u_0) + K_t(u_0) \Delta u = 0 \dots\dots\dots(1.7)$

Aturan $f(u_0)$ adalah Vektor Residu r_0 dan dapat dimasukkan ke poin u_0 sebagai berikut :

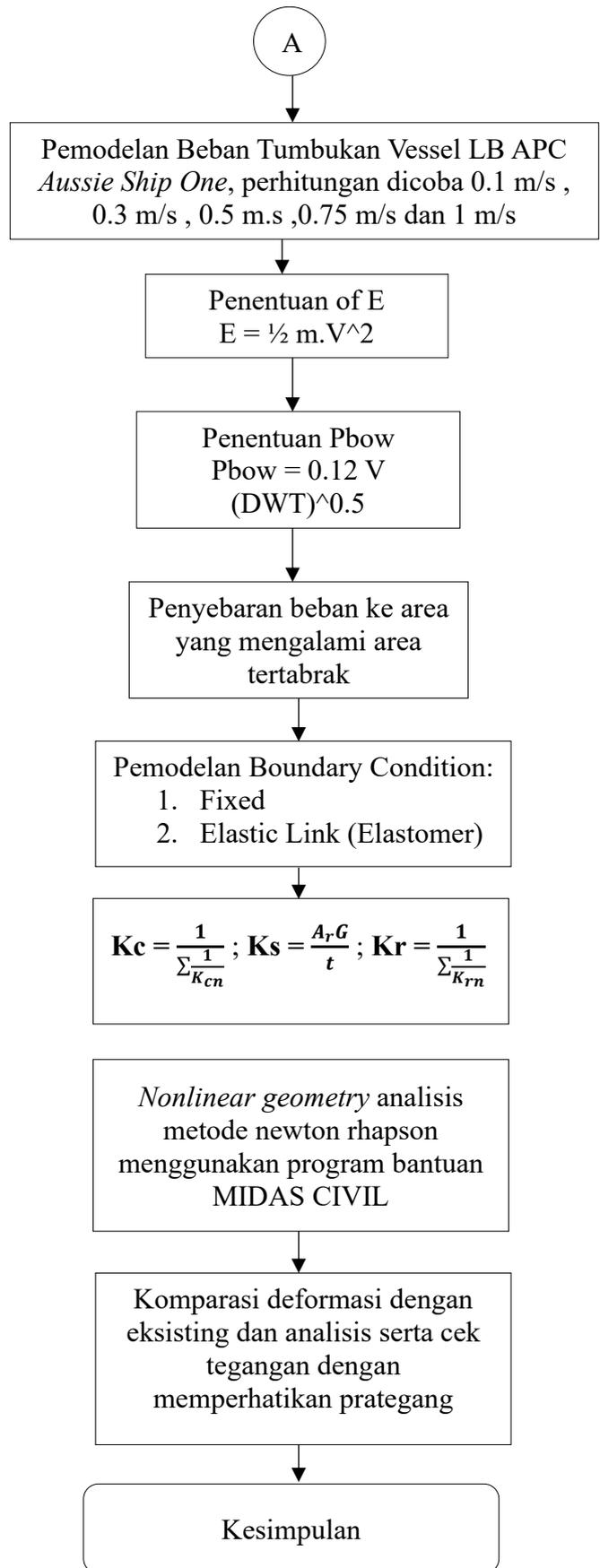
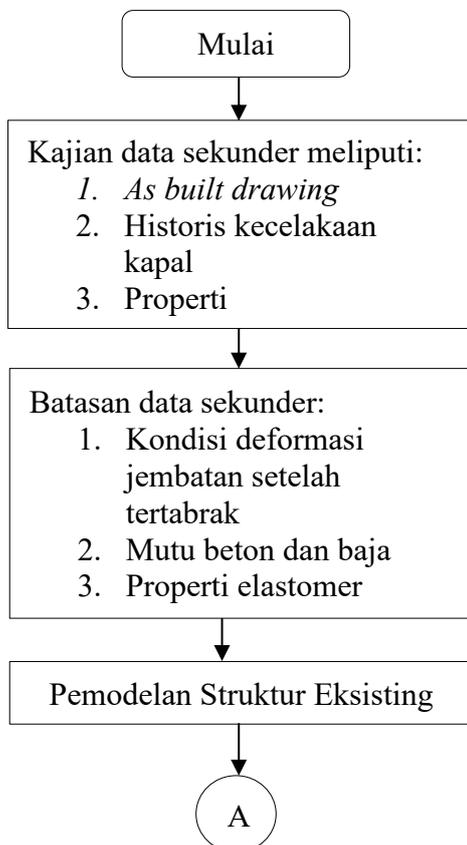
$$f(u_0) : = r_0 = q_t - K(u_0) u_0 \dots\dots\dots(1.8)$$

Pada titik tertentu u_0 , Residu Vektor dihitung secara linear pada formula 1.7 dan 1.8 untuk formula peningkatan *displacement*. Proses iterasi menjadi konvergen menggunakan formula 1.6. Perhitungan ini nantinya akan dibantu menggunakan program bantuan analisis struktur MIDAS CIVIL versi 2018.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dibagi 4 tahap alur yaitu :

1. Kajian data sekunder
2. Penentuan batasan dari data Kajian sekunder
3. Pemodelan struktur
4. Evaluasi dan komparasi



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Pada kajian data sekunder, pencarian dokumen-dokumen dilakukan secara interview dan penemuan data-data historis yang diperlukan. Jembatan merupakan 2 (dua) boks girder beton sejajar yang terdiri dari 3 bentang terpisah (*single span*), masing-masing sepanjang 45-meter dengan lebar 9-meter dan tinggi boks 2.5 meter.

Untuk kejadian tertabrak pada tahun 2012, Berdasarkan informasi yang didapat bahwa akibat kejadian ini sebagian sisi jembatan bergeser sekitar satu meter dan kerusakan terjadi pada siar muai jembatan. Berdasarkan foto yang didapat diestimasi besar perpindahan pada saat kejadian sebesar 880.348 mm. Pada foto tersebut diketahui bahwa posisi kapal berada pada sisi pinggir menjauh ke dalam jembatan dengan jarak kurang lebih 5 meter dari pilar ataupun siar muai. Saat kejadian, kapal dan gekagar jembatan diasumsikan dalam kondisi elastis dimana jembatan mengalami pergeseran yang besar tanpa merusak kapal. Untuk visualisasi kapal penabrak dapat dilihat pada gambar 2. Data kapal yang digunakan ditampilkan pada gambar 3.

Kapal yang menabrak adalah *LB APC Aussie Ship One* merupakan kapal jenis *Tug-Pipe Layer* dengan *tonnage* 9627 DWT. Kapal ini dijadikan untuk penyebaran gaya tumbukan dimana adanya eksintrisitas pada titik berat ke lokasi tertabraknya yaitu dibagian sayap jembatan. Perhitungan besar gaya tumbukan menggunakan pendekatan dari AASHTO. Penentuan *center of gravity* (COG) dilakukan dengan menghitung titik center pada kapal. Asumsi menggunakan bagian yang tertabrak. Perhitungan titik berat kapal menggunakan rumus dimana:

$$KG_1 = KG \pm GG_1 \dots\dots\dots(1.9)$$

KG adalah jarak *Keel s/d* Titik *Centre* kapal, KG_1 adalah *Center Of Gravity* (COG) tergantung dari lokasi beban

diatas *freeboard* atau dibawah *freeboard*.

$$GG_1 = \frac{wd}{W} \dots\dots\dots(1.10)$$

W = Ship displacement (9528 T)

w = Ship displacement (5085 T)

d = Jarak KG dengan *Freeboard*

Didapat dalam perhitungan jarak $KG_1 = 15.67$ m. Titik ini merupakan titik pusat massa gaya tumbukan pada kapal. Jika dihitung dengan jarak titik kontak area tertabrak maka terdapat titik eksintrisitas gaya sebesar 5.82 m. Akibat hal ini mengakibatkan beban yang bekerja pada boks girder merupakan gaya lateral dan momen statis akibat eksentrisitas. Untuk skema penyebaran gaya dapat dilihat pada gambar 4.

Hasil gaya tumbukan diberikan efek pembesaran dinamis, pengambilan besaran efek dinamis diambil nilai 1.3 sesuai SNI 1725 Standar Pembebanan Jembatan. Pembesaran faktor kejut hanya diberikan pada gaya lateral. Faktor beban kejut juga mengakomodir pengaruh akibat gaya dorong aliran air. Besar gaya tersebut kemudian didistribusikan ke bagian jembatan yang terkena dampak beban sesuai dengan kecepatan asumsi yang dipakai.

Pemodelan elastomer pada jembatan dimodelkan dengan memperhitungkan kekakuan pada elastomer *secara linear elastic*. Perhitungan kekakuan berdasarkan AS 5100.4:2017 dengan pertimbangan pendekatan *material properties* dari AASHTO LRFD. Dimensi Elastomer yang dipakai adalah 650x650x265 mm dengan hardness 60 IHRD. Kondisi batas dibuat berdasarkan kondisi eksisting dimana bagian tumpuan-tumpuan dibuat terkekang hanya di arah Z, kemudian di bagian pilar dibuat jepit dan untuk bagian elastomer dibuat menjadi *elastic link* (Gambar 5).

Analisis struktur *nonlinear geometry* dibantu dengan program MIDAS CIVIL

berbasis algoritma metode iterasi newton raphson dimana diambil step sebanyak 20 kali dan maksimum iterasi sebanyak 50 kali.

HASIL dan PEMBAHASAN

Berdasarkan perhitungan gaya tumbukan yang dipakai dalam Analisis sebagai berikut :

Tabel 1. Gaya tumbukan kapal

v (m/s)	P bow (MN)	Pbow (Uniform Load) (KN/M)	M Bow (Uniform Load) (KN.m / m)
0.1	1.17	39.0	227.6
0.3	3.51	117.1	682.7
0.5	5.86	195.2	1137.9
0.75	8.79	292.8	1706.8
1	11.71	390.4	2275.7

Perhitungan awal untuk deformasi dengan kecepatan kapal sebesar $V=0.1$ m/s menghasilkan perpindahan dek jembatan terbesar sebesar 115.73 mm. Bentuk deformasi terlihat dimana sisi yang terkena tumbukan kapal (arah pulau Galang) mengalami perpindahan lebih besar dibanding sisi lainnya (Arah pulau Galang Baru). Kondisi ini serupa dengan simulasi kecepatan yang lebih besar dengan besar perpindahan yang meningkat. Perhitungan dilanjutkan berdasarkan kecepatan kapal yang telah ditentukan. Untuk gambar perilaku jembatan akibat tertabrak dapat dilihat pada gambar 6. Hasil dibuat tabulasi rekapitulasi sebagai berikut :

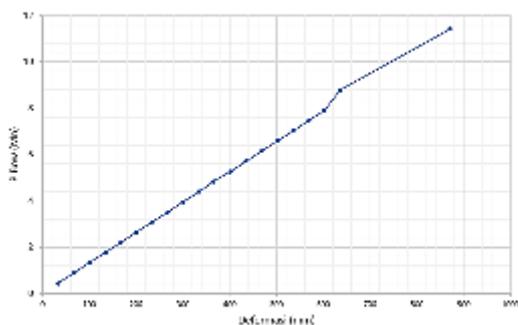
Deformasi pada jembatan boks girder dengan kecepatan yang meningkat menghasilkan hasil deformasi yang linear. Perbandingan dengan data deformasi eksisting menghasilkan bahwa pendekatan nilai terdekat berada pada kecepatan kapal 0.75 m/s. Apabila dibandingkan terhadap deformasi yang

terjadi di lapangan, hasil titik perpindahan terbesar yang terestimasi sebesar 880.348 mm pada sisi arah pulau galang. Terdapat deviasi antara analisis dan lapangan sebesar 9.528 mm. Untuk sisi arah pulau galang baru tidak dapat teridentifikasi besar deformasinya dikarenakan keterbatasan data historis jembatan namun didapat temuan kerusakan pada sambungan ekspansion joint dan trotoar diakibatkan pergeseran jembatan. Berdasarkan analisis menghasilkan nilai perpindahan sebesar maksimum 544.971 mm pada sisi arah pulau Galang Baru. Perbandingan hasil perpindahan dan aktual lapangan berdasarkan data historis bisa dilihat pada gambar 7 dan 8.

Korelasi hubungan antara besar gaya tumbukan dan deformasi dilakukan pada simulasi kecepatan kapal 0.75 m/s. Pengambilan titik deformasi diambil di titik maksimum yaitu pada ujung sisi jembatan arah pulau Galang. Pemodelan jembatan dibatasi dengan tidak memberikan kondisi non-linear material. Berikut adalah grafik korelasi hubungan gaya tumbukan kapal dan deformasi.

Tabel 2. Rekapitulasi hasil deformasi

Kecepatan (m/s)	Deformasi Max (mm)
0.1	115.73
0.3	347.73
0.5	580.05
0.75	870.82
1	1162.10



Gambar 9. Korelasi Gaya Tumbukan vs Deformasi Jembatan untuk Kecepatan kapal 0.75 m/s

Berdasarkan informasi deformasi di lapangan diketahui bahwa lokasi maksimum yang terjadi berada pada area terjadinya gaya tumbukan pada jembatan boks girder (sisi arah pulau Galang). Dengan kecepatan estimasi yang terjadi pada saat tertabraknya kapal sebesar 0.75 m/s. Secara umum dilihat reaksi tegangan setiap sisi penampang pada area tertabrak maksimum menghasilkan nilai yang dideskripsikan pada gambar 10.

Pada area sisi boks girder yang terkena bidang kontak gaya tumbukan menghasilkan tegangan tarik pada posisi atas senilai 0.7 Mpa, namun pada sisi bawah mengalami tegangan tekan sebesar -2 Mpa. Berbeda pada sisi sebelah area tidak terkena bidang kontak mengalami tegangan tekan -1.7 Mpa s/d -2.2 Mpa. Pada Nilai tegangan tersebut kemudian dibandingkan dengan limitasi konservatif dimana tegangan serat tekan terluar yang diizinkan tidak boleh melebihi 0.6 fci dan Jika kekuatan tarik beton yang dihitung melebihi $0.5\sqrt{f_c}$ maka diidentifikasi penampang retak. Diketahui bahwa mutu beton boks girder yang dipakai adalah 40 Mpa sehingga dapat disimpulkan bahwa:

- Tegangan Tarik 0.7 Mpa < 3.162 Mpa artinya dalam kondisi memenuhi izin.

- Tegangan Tekan -2.2 Mpa s/d -1.7 Mpa < 24.8 Mpa artinya masih memenuhi izin.

Berdasarkan hasil diatas diketahui bahwa dari analisis dapat disimpulkan pada saat kejadian tabrakan jembatan dengan kecepatan 0.75 m/s tidak mengalami retak pada area tumbukan sesuai dengan kondisi aktual lapangan.

KESIMPULAN

Evaluasi jembatan boks akibat tertabrak kapal sangat dipengaruhi pemodelan kondisi batas dan besar gaya tumbukan yang dipengaruhi kecepatan, serta analisis non linier yang dipilih. Analisis non-linier geometri, kondisi batas dan model beban tumbukan yang digunakan pada studi ini memberikan hasil yang cukup memuaskan terhadap data historis lapangan yang ada.

UCAPAN TERIMAKASIH

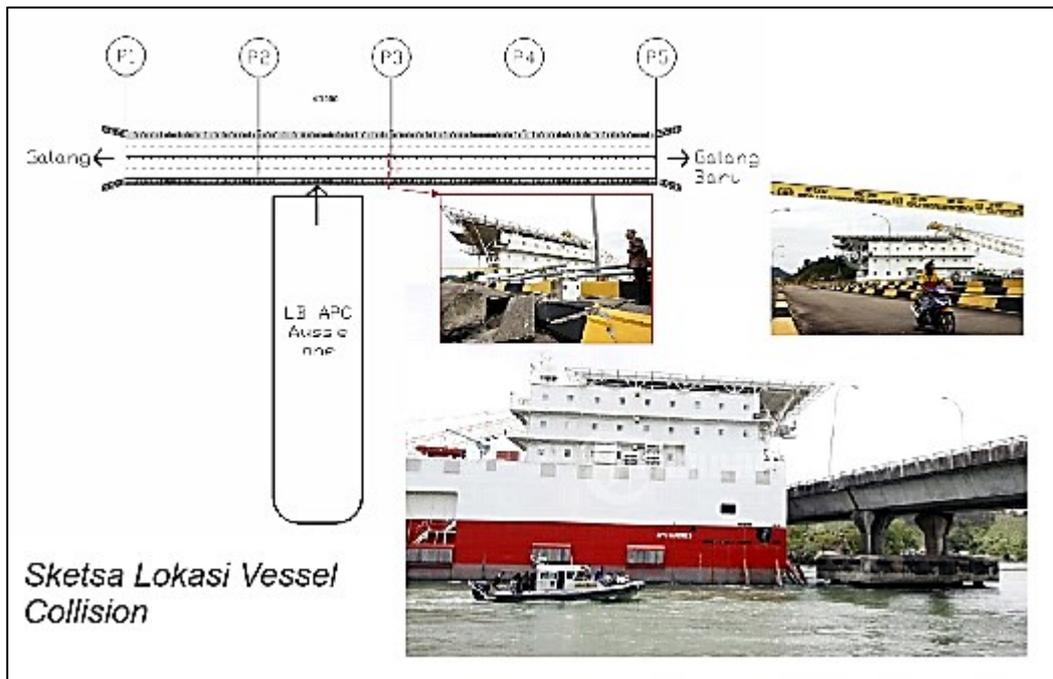
Rasa syukur ini saya panjatkan kepada Allah S.W.T, ibu saya Linawati, PT. Graha Survei Indonesia selaku perusahaan yang membiayai kuliah saya dan BP Batam pak Mirza selaku orang yang membantu saya untuk mendapatkan informasi berkaitan dengan data-data penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

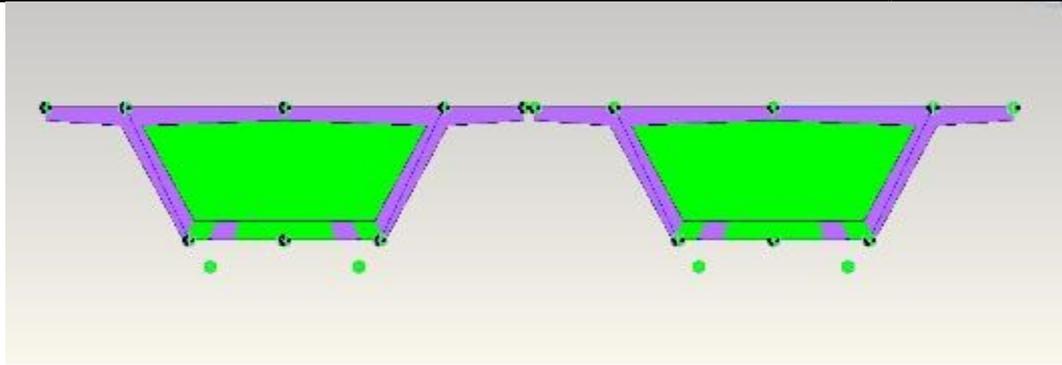
- [1] De Borst, R., Crisfield, M. A., Remmers, J. J. C., & Verhoosel, C. V. (2012). Geometrically Non-linear Analysis. In *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*.
- [2] Efendi, R. (2019). Jembatan Sei Rakyat Pada Ruas Jalan Provinsi Tanjung Sarang Elang (Simpang Ajamu) – Simpang Labuhan Bilik Kabupaten Labuhan Batu Dengan

- Bentang 262 Meter. Doctoral Dissertation.
- [3] EN 1991-1-7. (2006). Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions.
- [4] Graha Survei Indonesia (2022). Laporan Inspeksi Khusus Struktur Jembatan Bareleng Jembatan VI (Raja Kecil) Batam, Kepulauan Riau.
- [5] Irhayyim, A., Gunaratne, M., & Fioklou, A. (2022). Assessment of scoured bridges subjected to ship impact. Structures, 36(December 2021), 635–649.
- [6] Song, Y., & Wang, J. (2019). Development of the impact force time-history for determining the responses of bridges subjected to ship collisions. Ocean Engineering, 187(May), 106182.
- [7] Wilson, U., S.A., R., & Alomaja, J. (2015). Effect of Vessel of Collision on a Bridge pier: Case study of Katsina-Daura Bridge. 2(June), 25–36.
- [8] Mohamed, H. K., & Attia, P. W. A. (2021). Vessel Collision Analysis with Cable-Stayed Bridge Considering different Tower's Bracing System Abstract: 43, 181–192.
- [9] . Zhang, S. (1999). The Mechanics of Ship Collisions. Ocean Engineering Journal - Department of Naval Architecture and Offshore Engineering - Technical University of Denmark, January 1–185.

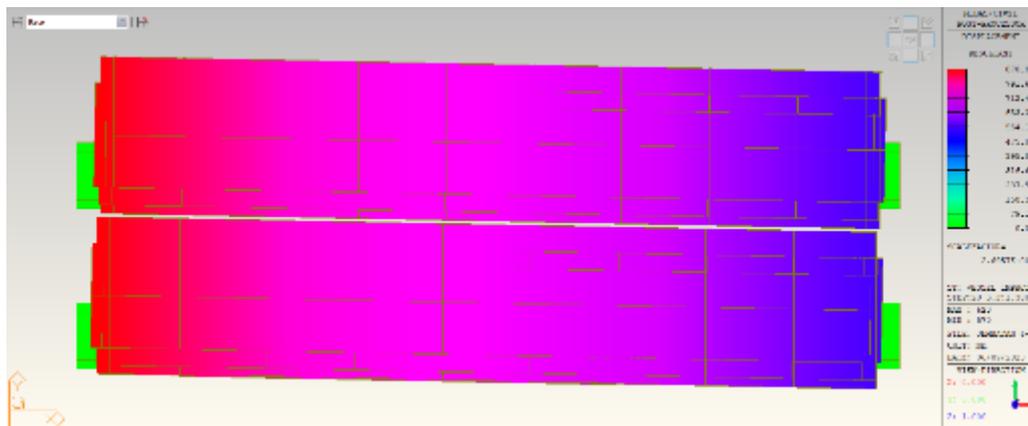
Lampiran Gambar



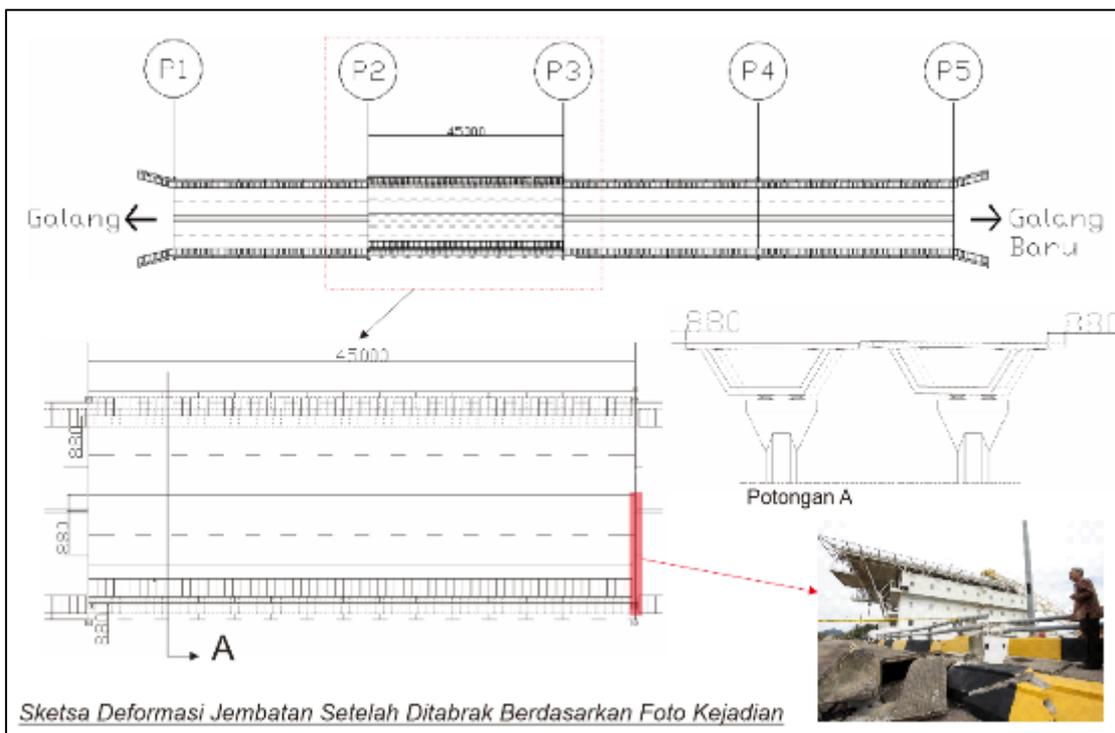
Gambar 2. Sketsa lokasi kejadian



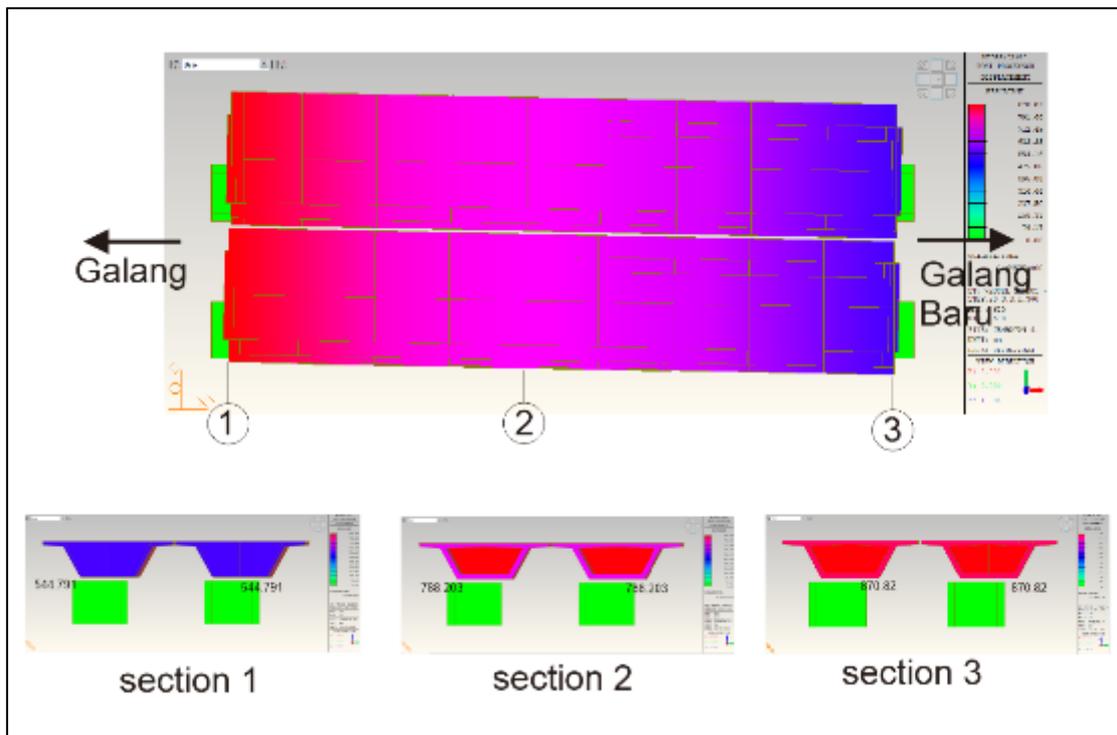
Gambar 5. Boundary Condition pada gelagar boks jembatan



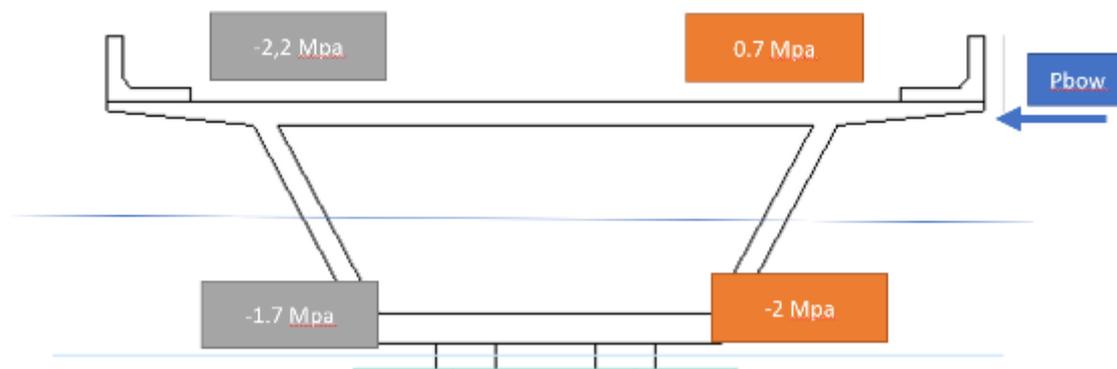
Gambar 6. Deformasi jembatan akibat beban tumbukan



Gambar 7. Deformasi jembatan berdasarkan data historis jembatan



Gambar 8. Perpindahan dek jembatan akibat beban tumbukan kapal dengan kecepatan 0.75 m/s



Gambar 10. Tegangan pada beberapa lokasi di boks jembatan akibat beban tumbukan kapal dengan kecepatan 0.75 m/s



Gambar 11. Perhitungan perpindahan aktual berdasarkan data historis jembatan