

**ANALISIS KEGAGALAN STRUKTUR LADDER PADA KAPAL ISAP PRODUKSI***Analysis of Ladder Structure Failure in Cutter Suction Dredger***Hariyono<sup>1,a</sup> dan Jefri Aldo<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Teknik Perkapalan, Politeknik Batulicin, Jl. Malewa Raya, Tanah Bumbu, Kalimantan Selatan, Indonesia<sup>2</sup>Teknik Manufaktur, Politeknik Batulicin, Jl. Malewa Raya, Tanah Bumbu, Kalimantan Selatan, Indonesiae-mail: <sup>a</sup>hariyono.ismail07@gmail.com

Diterima: 22 November 2022; Direvisi: 26 Januari 2023; Disetujui: 27 Januari 2023

**Abstrak**

Riset ini bertujuan untuk menganalisis kegagalan struktur *ladder* pada Kapal Isap Produksi (KIP) Timah 19 yang telah mengalami patah *ladder* mengakibatkan beberapa komponen dan peralatan *ladder* seperti *cutter* hilang di dasar laut, salah satu penyebabnya yaitu pengaruh model *bracing* yang dipasang pada konstruksi pondasi katrol *ladder* sehingga menimbulkan biaya yang sangat besar untuk perbaikan *ladder* yang patah. Riset dilaksanakan menggunakan *finite element analysis* dengan pemodelan menggunakan bantuan software Ansys. Model *ladder* dibuat sesuai aktual dengan panjang *ladder* 59 meter. Kemudian dibuat masing-masing model *diagonal bracing* dan *x-bracing* khusus pada konstruksi pondasi katrol. Beban yang bekerja pada *ladder* untuk dua model sama yaitu berat pipa dan lumpur sebesar  $1,42 \times 10^5$  N, berat *cutter* sebesar  $0,57 \times 10^5$  N dan *torsi cutter* sebesar  $0,67 \times 10^8$  N.mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada komponen *strut* tepat di bawah pondasi katrol untuk model *diagonal bracing* sebesar  $57,32$  N/mm<sup>2</sup> dibandingkan dengan model *x-bracing* sebesar  $36,88$  N/mm<sup>2</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa konstruksi *brace* yang dipasang pada area katrol *ladder* sangat mempengaruhi nilai tegangan sehingga untuk meminimalisir kegagalan struktur *ladder* khususnya pada area katrol sebaiknya menggunakan konstruksi *x-bracing* karena memiliki nilai tegangan minimum dibandingkan konstruksi *diagonal bracing* yang terpasang saat ini pada KIP.

**Kata kunci:** *ladder, kapal isap produksi, finite element analysis***Abstract**

*This research aims to analyze the failure of the ladder structure on the Kapal Isap Produksi (KIP) Timah 19 which has experienced a broken ladder resulting in several components and ladder equipment such as cutters being lost on the seabed, one of the causes is the influence of the bracing model installed on the ladder pulley foundation construction resulting in high costs and very big for broken ladder repair. The research was carried out using finite element analysis with modeling using the help of Ansys software. The ladder model is made according to the actual length of the ladder 59 meters. Then made each special diagonal bracing and x-bracing models on the pulley foundation construction. The loads acting on the ladder for the two models are the same, namely the weight of the pipe and mud of  $1,42 \times 10^5$  N, the weight of the cutter is  $0,57 \times 10^5$  N and the torque of the cutter is  $0,67 \times 10^8$  Nmm. The results of the analysis show that the maximum stress occurs in the strut component just below the pulley foundation for the diagonal bracing model of  $57,32$  N/mm<sup>2</sup> compared to the x-bracing model of  $36,88$  N/mm<sup>2</sup>. These results indicate that the brace construction installed in the ladder pulley area greatly affects the stress results so as to minimize the failure of the ladder structure, especially in the pulley area, it is better to use x-bracing construction because it has a minimum stress value compared to the diagonal*

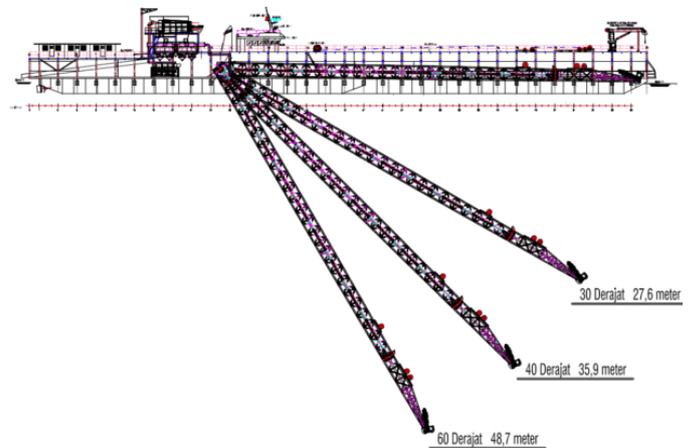
*bracing construction currently installed on KIP.*

**Keywords:** *ladder, cutter suction dredger, finite element analysis*

## PENDAHULUAN

Timah adalah sebuah unsur kimia yang ketersediannya begitu melimpah di Indonesia yang menempati urutan kedua setelah China dalam data kandungan timah. Potensi timah di Indonesia sekitar 99% berada di Kepulauan Bangka Belitung dan sisanya tersebar di wilayah Riau, Kepulauan Riau dan Kalimantan Barat (Syarifuddin, dkk., 2022). Asimilasi antara imigran Cina yang didatangkan oleh pemerintah Hindia-Belanda dengan penduduk setempat juga disebabkan oleh penambangan timah yang telah dipergunakan oleh masyarakat Indonesia sejak abad ke-7 (Irzon, 2021). Saat ini Pulau Bangka, Belitung dan Batam adalah penghasil timah tertinggi di Indonesia baik di darat maupun di laut. Pengelola penambangan timah harus sebaik mungkin agar menguntungkan banyak pihak (Hariyono, 2022). Kegiatan usaha eksplorasi timah di Indonesia dilakukan oleh Badan Usaha Milik Negara (BUMN) PT. Timah, Tbk. telah memegang area izin pertambangan sebesar 331.580 ha di daratan dan 184.400 ha di laut (Yulianti, dkk., 2020).

Pertambangan di laut memerlukan sarana seperti kapal. Kapal yang digunakan untuk menambang timah dinamakan Kapal Isap Produksi (KIP) yaitu suatu alat gali atau pemindahan tanah yang dipergunakan untuk menggali lapisan tanah bawah laut, peralatan mekanis dan pengolahan materialnya bertumpu pada sebuah ponton. Lapisan tanah bawah laut yang mengandung pasir timah dipotong dengan menggunakan *cutter*/pemotong (Hariyono, 2022). KIP merupakan kapal dengan tipe *cutter suction dredger*, yang proses penggaliannya menggunakan *cutter* untuk memberai tanah dan menggunakan pompa lumpur untuk menghisap tanah yang terberai melalui pipa yang berada di bawah *cutter* untuk kemudian dialirkan menuju instalasi pencucian sementara yang ada di KIP (PT. Timah, Tbk., 2019). *Ladder* dapat beroperasi pada sudut maksimum 60 derajat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Simulasi kedalaman *ladder* KIP

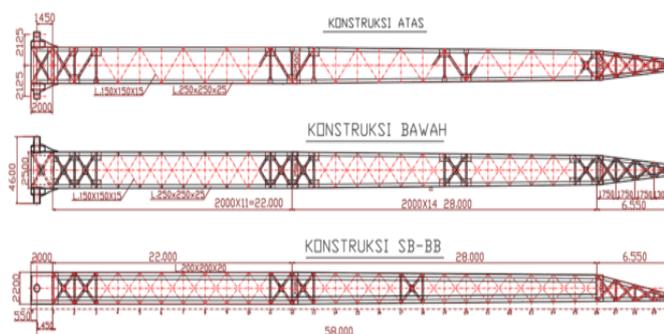
Tahun 2019 Terjadi kegagalan struktur (patah *ladder*) pada KIP Timah 19 yang menyebabkan beberapa konstruksi dan peralatan penunjang seperti *cutter* hilang di dasar laut dan kerusakan bermula di sekitar area katrol, mungkin disebabkan oleh korosi, umur *ladder* maupun kekuatan (struktur) *ladder* (Hariyono, 2022). Dengan ukuran *ladder* yang hampir sama pada KIP Timah 8, *owner* (PT. Timah, Tbk.) mengajukan ke PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero) pada tahun 2020 untuk dilakukan analisis pertambahan panjang *ladder* dari panjang awal 58 meter diperpanjang menjadi 70 meter dan telah dilakukan analisis oleh peneliti sebelumnya ternyata tegangan maksimum terjadi pada area katrol *ladder* akibat pengaruh *model bracing* yang digunakan pada area katrol (Hariyono, 2022). Analisis kekuatan *ladder* harus dilakukan dengan perhitungan yang cermat agar tidak terjadi kegagalan struktur dengan memperhatikan parameter desain seperti beban, sifat material, desain dan proses produksi (Misbah, dkk., 2019). Biaya perbaikan *ladder* yang patah sangat besar yaitu sekitar  $\pm$  6 milyar rupiah. Oleh karena itu, karena KIP Timah 8 dengan panjang *ladder* 58 meter dan KIP Timah 19 dengan panjang *ladder* 59 meter memiliki karakteristik dan dimensi struktur *ladder* yang hampir sama maka peneliti tertarik akan menganalisis kegagalan struktur pada KIP Timah 19 yang telah mengalami patah *ladder* tahun 2019.



Gambar 2. KIP Timah 19 sedang beroperasi

KIP Timah 19 beroperasi di Kepulauan Riau tepatnya di Pulau Kundur, Batam yang merupakan kapal milik PT. Timah, Tbk. yang dapat dilihat pada Gambar 2.

KIP Timah 19 merupakan kapal dengan tipe *cutter suction dredger* dengan proses penggaliannya menggunakan *cutter* untuk memberai tanah dan menggunakan pompa lumpur untuk menghisap tanah yang terberai melalui pipa yang berada di bawah *cutter* untuk kemudian dialirkan ke instalasi pencucian sementara yang ada di KIP (PT. Timah, Tbk., 2019). *Ladder* adalah kerangka baja panjang yang berfungsi sebagai tiang dan tempat penempatan *cutter*, pipa isap, pompa lumpur dan pipa tekan (Salenussa, 2018) seperti pada Gambar 3.

Gambar 3. Konstruksi *ladder* KIP Timah 19

Pada saat *ladder* digunakan, *ladder* diturunkan pada kedalaman tertentu bertujuan pengoperasian *cutter* dalam penggalian tanah dan pengisapan tanah oleh pipa isap. Setiap KIP mempunyai panjang *ladder* yang berbeda-beda. Panjang *ladder* pada KIP Timah 19 yaitu 59 meter dan mengalami kegagalan

struktur (patah) *ladder* pada saat beroperasi di Pelabuhan Kundur, Batam seperti pada Gambar 4.

Gambar 4. Patah *ladder* KIP Timah 19

Kejadian patah *ladder* pada KIP Timah 19 seperti pada Gambar 4 mengakibatkan beberapa komponen *ladder* hilang di dasar laut. Menurut PT. Timah, Tbk. total konstruksi *ladder* yang hilang di dasar laut ketika terjadi patah *ladder* yaitu 16 meter bersama dengan peralatan penunjang *ladder* seperti *cutter* dan lain-lain.

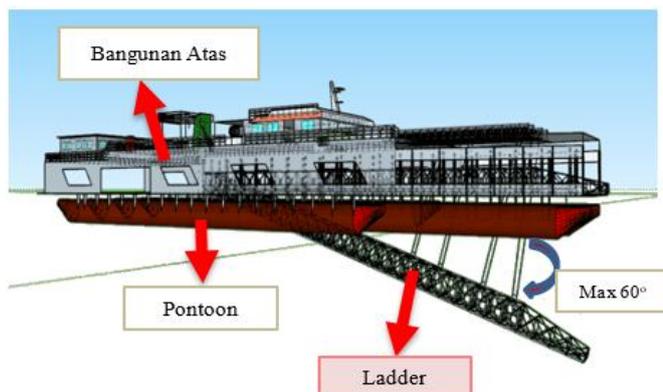
Gambar 5. Upaya perbaikan sementara *ladder* KIP Timah 19

Upaya perbaikan *ladder* yang patah seperti pada Gambar 5 menimbulkan biaya yang sangat besar sekitar  $\pm$  6 milyar rupiah. Akibat kerusakan *ladder* maka menimbulkan biaya yang tinggi yang tentunya membutuhkan analisis yang lebih cermat di sekitar area kerusakan *ladder* agar kejadian tidak terulang kembali.

## METODE

Penelitian ini terfokus pada konstruksi *ladder* KIP Timah 19 khususnya pada area pondasi katrol yang mengalami kerusakan. Pengelompokan beban yang bekerja pada *ladder* KIP Timah 19 yaitu kerja *cutter*, berat lumpur dan pipa, kerja pompa, posisi

*sling*, dan sudut *ladder*. *Ladder* terpasang pada tengah kapal dengan panjang *ladder* menentukan kedalaman maksimum dan sudut maksimum operasi *ladder* yaitu 60 derajat pada kedalaman maksimum galian 48,7 meter pada KIP Timah 19. Untuk mendeksripsikan bentuk umum dari KIP maka dibuat model 3D KIP dengan menggunakan bantuan *software SketchUp* versi *student* seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Simulasi pemodelan KIP

Dalam menganalisis tipe masalah teknik dan matematis dari suatu geala fisis maka digunakan metode numerik yaitu metode *Finite Element Analysis* (FEA) (Alie and Adiputra, 2018).

Pemodelan *ladder* KIP dilakukan dengan bantuan *software Ansys* dengan ukuran *meshing* yang digunakan pada model sebesar 100 mm dan *type meshing* yang digunakan adalah *hexahedral*. Metode analisis yang digunakan adalah FEA dengan melakukan studi *mesh convergence*. Pada FEA, konvergensi berarti sampai pada solusi sebenarnya dari *Partial Differential Equations* (PDE) karena *geometri* atau *domain spasial* digabungkan lebih halus. Proses *mesh convergence* melibatkan pengurangan ukuran elemen dan menganalisis dampak dari proses keakuratan pada sebuah solusi.

Pemodelan dibuat 2 jenis *brace* khususnya pada area pondasi katrol dengan beban yang bekerja pada *ladder* konstan. Kemudian dilakukan hasil analisis struktur berupa tegangan dan pergeseran elemen. Agar simulasi analisis kegagalan struktur *ladder* KIP sesuai dengan realitas maka digunakan data *ladder* yang sudah ada. Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat spesifikasi material yang digunakan

pada *ladder* KIP Timah 19.

Tabel 1. Spesifikasi material

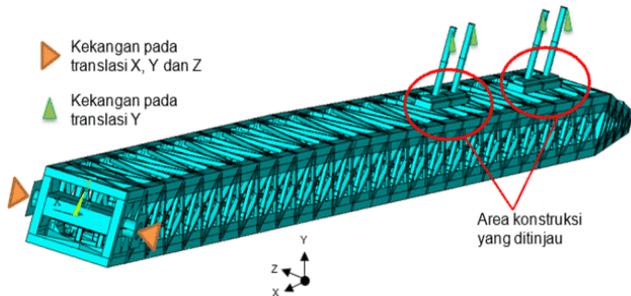
| Elemen                                    | Ukuran (mm)                       |
|---|-----------------------------------|
| <i>Type of ladder</i>                     | <i>Weld joint steel structure</i> |
| <i>Overall length ladder</i> (m)          | 59                                |
| <i>Digging depth</i> (m)                  | 45                                |
| <i>Angle</i> (degree)                     | 45                                |
| <i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )       | 7.850                             |
| <i>Modulus Young</i> (N/mm <sup>2</sup> ) | 210.000                           |
| <i>Poisson's Ratio</i>                    | 0,3                               |
| <i>Yield Strength</i>                     | 370                               |
| <i>Tangent Modulus</i>                    | 675                               |

Tabel 2. Komponen konstruksi *ladder*

| Elemen                                 | Ukuran (mm)    |
|--|----------------|
| <i>Bracket</i>                         | 400 x 400 x 12 |
| <i>Doubling plate diagonal bracing</i> | 500 x 572 x 12 |
| <i>Doubling plate x-bracing</i>        | 400 x 400 x 12 |
| <i>X-bracing pada ladder</i>           | 150 x 150 x 15 |
| <i>Diagonal bracing</i>                | 150 x 150 x 15 |
| <i>Strut</i>                           | 200 x 200 x 20 |
| <i>Diameter shaft ladder</i>           | 140            |
| <i>Shaft ladder plat</i>               | 20             |
| <i>X-bracing pada ladder</i>           | 100 x 100 x 10 |

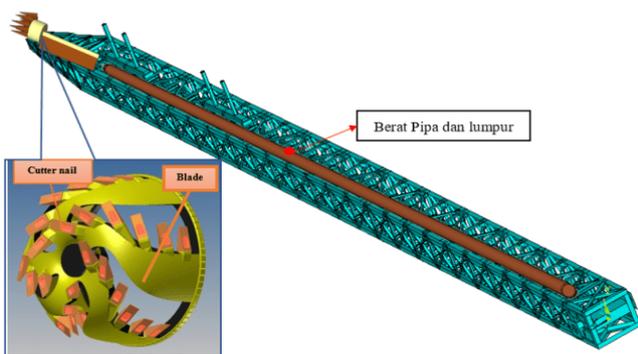
Jenis data pada penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder adalah data yang diperoleh dari sumber-sumber yang berhubungan dengan objek penelitian, diantaranya gambar konstruksi *ladder* dan material yang digunakan. Sumber data penelitian diperoleh dari KIP Timah 19 dan Kantor PT. Timah, Tbk. yang berlokasi di Pulau Kundur, Batam. Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat komponen dan ukuran yang digunakan pada KIP Timah 19.

Pemodelan ini menggunakan sumbu x, y, dan z. Sumbu x positif menunjukkan lebar *ladder*, sumbu y positif menunjukkan tinggi *ladder*, dan sumbu z menunjukkan panjang *ladder*. seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Posisi sumbu dan pekekangan pada model *ladder*

Pemasangan tumpuan pada model dilakukan pada titik di kedua ujung shaft *ladder* dengan kekangan yang diberikan pada titik tersebut yaitu kekangan pada translasi x, translasi y dan translasi z. Terdiri dari empat katrol yang dibuat empat titik pada model yang diberikan kekangan pada translasi y. Kemudian akan dilakukan pembebanan sesuai kondisi aktual seperti Gambar 8.



Gambar 8. Pembebanan pada *ladder* KIP

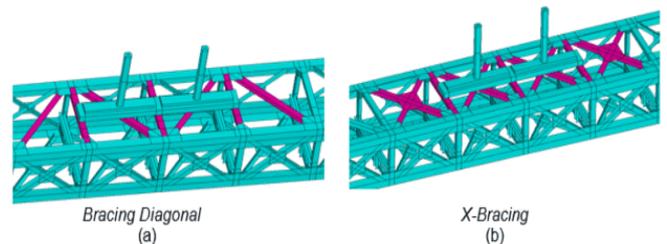


Gambar 9. Konstruksi *ladder* KIP Timah 19 yang mengalami gagal struktur pada *brace* pondasi katrol

Gambar 8 merupakan pembebanan pada *ladder*

KIP yaitu terdiri dari berat pipa, torsi *cutter* dan berat *cutter*. Ini sangat penting untuk mengamati beban beban yang bekerja pada *ladder* karena apabila salah dalam perhitungan maka akan berdampak seperti Gambar 9 yang mengalami kegagalan struktur/patah *ladder*.

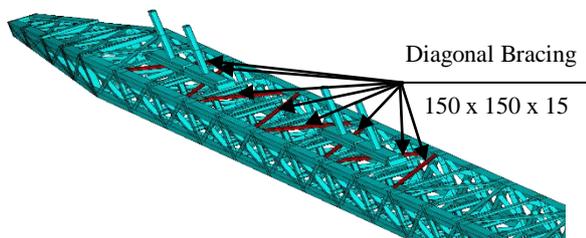
Gambar 9 menunjukkan kegagalan struktur *ladder* pada KIP Timah 19 tahun 2019 dengan kerusakan bermula pada area pondasi katrol *ladder*. Anggota kolom yang mengalami luluh dan kapasitasnya mulai berkurang dengan peningkatan defleksi dan beban maksimum dapat dianggap sebagai kekuatan batas (Alie and Latumahina, 2019). Oleh karena itu pada KIP Timah 19 telah dilakukan analisis pertambahan panjang *ladder* oleh peneliti sebelumnya dan ternyata tegangan maksimum terjadi pada konstruksi pondasi *ladder*. Sehingga untuk meminimalisir kegagalan struktur maka dibuat pondasi *ladder* dengan model *bracing diagonal* sesuai aktual dan model *x-bracing* seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. (a) Pemodelan konstruksi brace area *ladder* sesuai aktual *bracing diagonal*; dan (b) pemodelan alternatif dengan *x-bracing*

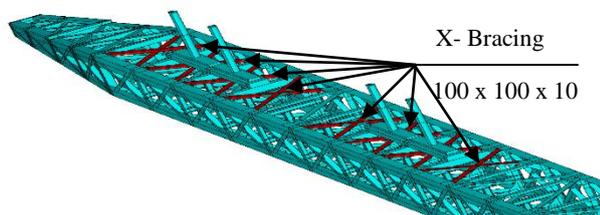
Gambar 10 menunjukkan dua model konstruksi pondasi *ladder* berbeda yang akan dianalisis. Pada Gambar 10(a) menunjukkan model dengan menggunakan *bracing diagonal* sesuai dengan kondisi aktual di lapangan dengan ukuran 150 x 150 x 15 dan model pada Gambar 10(b) menunjukkan model dengan menggunakan konstruksi *x-bracing* dengan ukuran 100 x 100 x 10 sebagai alternatif konstruksi pada area pondasi *ladder*. Pembebanan dibuat sama sesuai aktual untuk dua model yang berbeda kemudian nantinya akan dilakukan analisis tegangan yang bekerja khususnya pada area pondasi *ladder* KIP Timah 19. Tegangan izin berdasarkan

rules BKI (BKI, 2019) yang hasilnya dapat menjadi pertimbangan bagi desainer kapal dan acuan penelitian (referensi) dalam bidang analisis pondasi katrol *ladder* KIP.



Gambar 11. Model dan ukuran *diagonal bracing* pada *ladder*

Berdasarkan Gambar 11 dapat dilihat pemodelan dan ukuran dibuat sama sesuai aktual dengan menggunakan *diagonal bracing* pada area katrol KIP Timah 19. Berdasarkan penelitian sebelumnya didapatkan tegangan maksimum terjadi pada area katrol sehingga peneliti akan mengubah model *brace* dengan menggunakan *x-bracing* seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Model dan ukuran *x-bracing* pada *ladder*

Berdasarkan Gambar 12 dapat dilihat pemodelan dan ukuran *x-bracing* pada area katrol KIP Timah 19. Kondisi aktual yang terpasang pada area katrol *ladder* menggunakan *diagonal bracing* dengan ukuran 150 x 150 x 15 dan akan dianalisis dengan model yang berbeda yaitu menggunakan *x-bracing* dengan ukuran 100 x 100 x 10 dengan mempertimbangkan harga material tidak jauh berubah namun konstruksi dimodelkan berbeda dengan kondisi aktual.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian dilakukan perhitungan beban *ladder* yaitu berat pipa dan lumpur seperti persamaan (1) dan (2), berat *cutter* dan *torsi cutter*

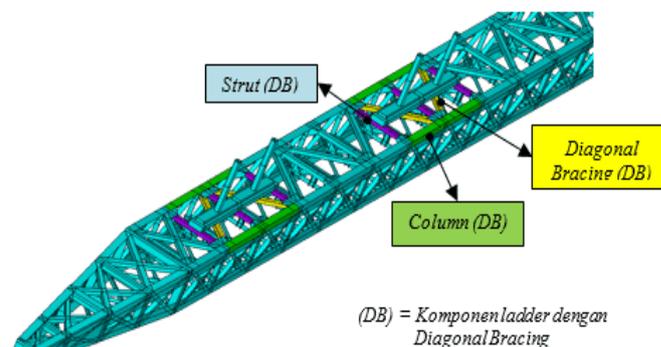
pada persamaan (3).

$$W_p = (\pi R^2) \times L \times B_{jb} - (\pi r^2) \times L \times B_{jb} \quad (1)$$

$$W_B = V_p \times \gamma_b \quad (2)$$

$$M_T = \frac{P}{2\pi n} \quad (3)$$

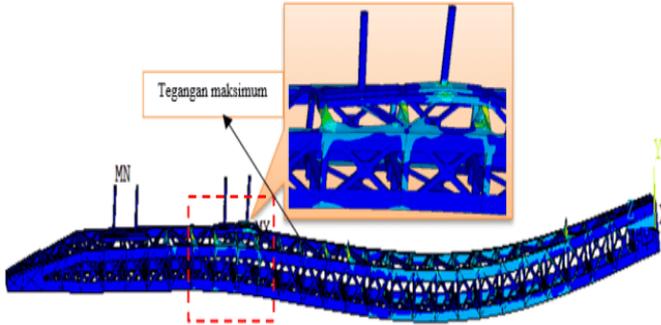
Simulasi numerik teknologi untuk kapasitas regangan tekuk pipa baja dengan persamaan konstitutif dari bahan pipa baja diperkenalkan untuk melakukan simulasi yang tepat pada tekuk perilaku pipa baja dalam kondisi tekanan internal dan lentur (Feng, et al., 2021). Berdasarkan persamaan 1, 2, dan 3 didapatkan hasil berat pipa dan lumpur yaitu  $1,42 \times 10^5$  N, berat *cutter* sesuai berat aktual yaitu  $0,57 \times 10^5$  N dan *torsi cutter*  $0,67 \times 10^8$  N.mm. Akibat beban pipa, beban *cutter* dan *torsi cutter* maka berdasarkan hasil analisis tegangan maksimum terjadi pada konstruksi area katrol. Berdasarkan Gambar 9 KIP Timah 19 mengalami patah *ladder* pada sekitar area katrol untuk itu akan dianalisis lebih lanjut komponen struktur *ladder* yang mengalami tegangan maksimum pada model *ladder* KIP Timah 19. Agar memudahkan maka dibagi komponen seperti Gambar 13.



Gambar 13. Pembagian komponen konstruksi *ladder* pada model pondasi katrol *diagonal bracing*

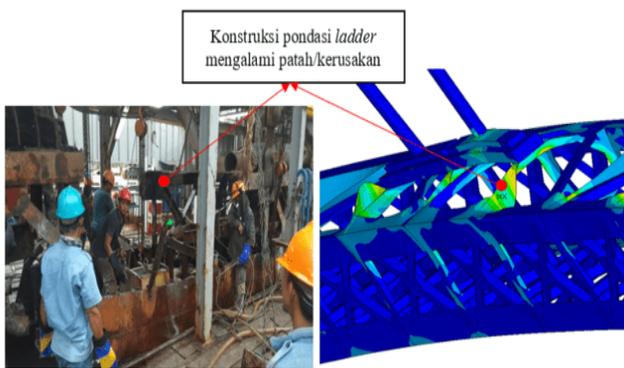
Berdasarkan Gambar 13 pembagian komponen pada model pondasi katrol *diagonal bracing* yang akan dianalisis yaitu terdapat tiga komponen konstruksi yaitu *diagonal bracing*, *column* dan *strut*. Dalam menganalisis struktur baja diperlukan hubungan tegangan-regangan untuk menentukan sampai mana batas kekuatan dari struktur tersebut (Wulandari, dkk., 2021). Defleksi adalah perubahan bentuk pada balok akibat adanya pembebanan vertikal

yang diberikan pada balok atau batang (Pratama, dkk., 2022).

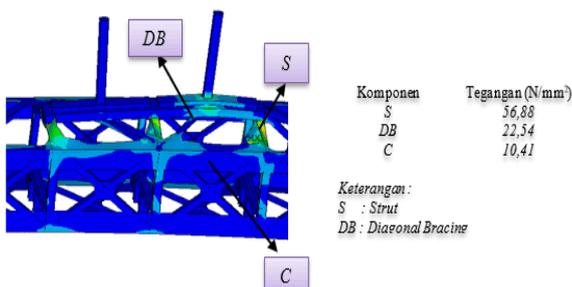


Gambar 14. Perilaku dan distribusi tegangan kerja pada struktur ladder dengan model pondasi katrol *diagonal bracing*

Berdasarkan Gambar 14 distribusi tegangan maksimum terjadi pada *strut* pondasi ladder berjarak 35 meter dari poros *shaft ladder* seperti pada Gambar 15.



Gambar 15. Kondisi aktual dengan hasil analisis menggunakan *software Ansys*



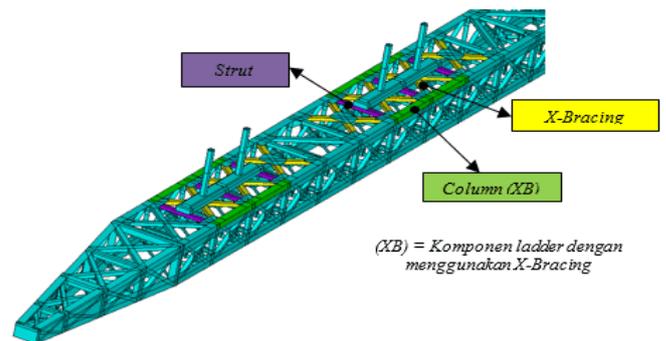
Gambar 16. Nilai tegangan pada komponen area katrol dengan model pondasi *diagonal bracing*

Berdasarkan Gambar 15 dari hasil analisis ternyata tegangan maksimum terjadi pada area pondasi katrol tepatnya berada pada *strut* yang melebihi batas izin material sehingga memicu terjadinya patah ladder pada KIP Timah 19. Agar

tidak terulang kejadian yang sama maka peneliti akan mengubah konstruksi pondasi katrol dengan menggunakan *x-bracing* yang sebelumnya menggunakan *diagonal bracing*. Masing-masing nilai tegangan pada konstruksi pondasi ladder dengan *diagonal bracing* terlihat seperti pada Gambar 16.

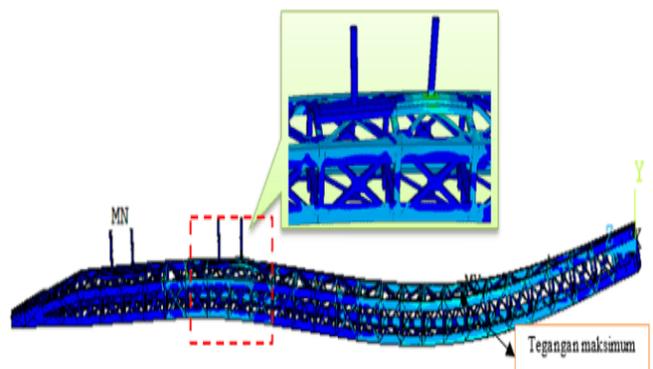
Berdasarkan Gambar 16 tegangan maksimum terjadi pada *strut* tepat berada di bawah katrol sebesar 56,88 N/mm<sup>2</sup>. Untuk model ladder menggunakan model *diagonal bracing* pada pondasi katrol jarak tegangan maksimum adalah 35 meter dari *shaft ladder*. *Strut* memiliki nilai tegangan maksimum karena paling besar menahan berat pipa dan struktur ladder.

Model *bracing* yang dipasang pada pondasi katrol ternyata sangat mempengaruhi nilai tegangan yang bekerja. Untuk itu, dibuat model lain pada pondasi katrol dengan menggunakan *x-bracing* seperti pada Gambar 17.

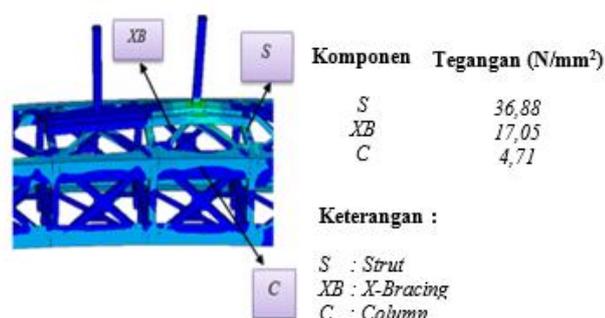


Gambar 17. Pembagian komponen konstruksi ladder pada model *x-bracing*

Berdasarkan Gambar 17 pembagian komponen pada model pondasi katrol *x-bracing* yang akan dianalisis yaitu terdapat tiga komponen konstruksi yaitu *x-bracing*, *column* dan *strut*.

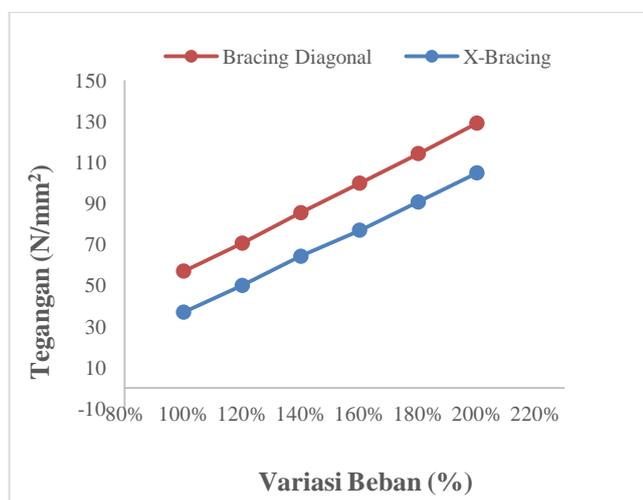


Gambar 18. Perilaku dan distribusi tegangan kerja pada struktur *ladder* dengan model pondasi katrol *x-bracing*



Gambar 19. Nilai tegangan pada komponen area katrol dengan model pondasi *x-bracing*

Berdasarkan Gambar 18 distribusi tegangan maksimum berada pada *strut* berjarak 16 meter dari poros *shaft ladder* dengan nilai tegangan 34,33 N/mm<sup>2</sup> pada beban yang sama yang menandakan bahwa tegangan maksimum tidak lagi terjadi pada pondasi katrol *ladder* dengan model pondasi *x-Bracing*. Distribusi tegangan pada area katrol *ladder* dengan model pondasi katrol *x-bracing* seperti pada Gambar 19.

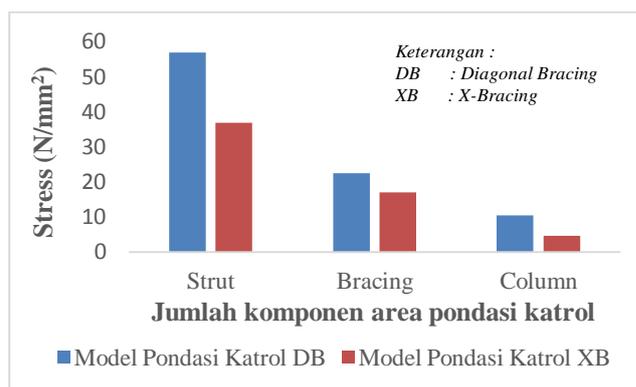


Gambar 20. Perbandingan nilai tegangan berdasarkan variasi beban untuk model *diagonal bracing* dan *x-bracing*

Gambar 19 menunjukkan bahwa model *bracing* yang digunakan pada pondasi katrol sangat mempengaruhi nilai tegangan. Konstruksi *strut* pada model pondasi *diagonal bracing* memiliki nilai tegangan 56,88 N/mm<sup>2</sup> jika dibandingkan model pondasi *x-bracing* nilai tegangan *strut* 36,88 N/mm<sup>2</sup> dengan selisih perbandingan 34,6%. Hasil analisis

berdasarkan variasi pembebanan dapat dibandingkan secara visual dengan grafik untuk model *diagonal bracing* dan model *x-bracing* hanya ditinjau pada konstruksi *strut* area pondasi katrol yang mengalami tegangan maksimum dapat dilihat Gambar 18.

Berdasarkan Gambar 20 dapat dilihat perbandingan nilai tegangan maksimum dengan variasi beban yang terjadi pada model *ladder* dengan konstruksi pondasi katrol menggunakan *diagonal bracing* dan *x-bracing*. Berdasarkan grafik pada Gambar 20 dapat disimpulkan bahwa penggunaan *x-bracing* pada pondasi katrol memiliki tegangan paling kecil dibandingkan model *diagonal bracing* dengan rata-rata perbandingan 34,6%. Untuk mengidentifikasi beberapa konstruksi yang ikut menahan katrol pada model *diagonal bracing* dan *x-bracing* dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Hubungan antara tegangan dengan komponen struktur area pondasi katrol

Berdasarkan Gambar 21 dapat dilihat kurva tegangan dari beberapa komponen yang berada disekitar katrol untuk model pondasi menggunakan *diagonal bracing* dan *x-bracing*. Komponen *strut* pada model *diagonal bracing* memiliki tegangan paling besar dibandingkan dengan model *x-bracing* dengan selisih perbandingan 34,6%. Pada kondisi aktual pondasi *ladder* menggunakan model *diagonal bracing* sehingga untuk meminimalisir kerusakan *ladder* pada area katrol seharusnya menggunakan konstruksi *x-bracing*.

## KESIMPULAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Finite Element Analysis* yaitu metode



numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik yang timbul dalam rekayasa dan pemodelan matematika sehingga dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa berdasarkan hasil analisis dari beban yang bekerja pada *ladder* KIP Timah 19 yaitu beban pipa, beban *cutter* dan torsi *cutter* untuk model pondasi katrol dengan *diagonal bracing* dan *x-bracing*. Pembebanan dibuat sama sesuai aktual untuk model yang berbeda dengan tegangan yang bekerja masih memenuhi tegangan izin. Model *diagonal bracing* memiliki tegangan lebih besar dibandingkan dengan model *x-bracing* dengan selisih perbandingan 34,6%. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya telah diteliti kekuatan *ladder* sebelum dan setelah diperpanjang dengan tegangan maksimum terjadi pada area katrol *ladder* dengan model pondasi aktual menggunakan *diagonal bracing* sebesar 56,88 N/mm<sup>2</sup>. Kemudian model pondasi katrol dibuat menggunakan *x-bracing* dengan nilai tegangan menjadi 36,88 N/mm<sup>2</sup> yang terjadi pada *strut* pondasi *ladder* sehingga untuk meminimalisir kegagalan struktur *ladder* pada area katrol seharusnya dibuat menggunakan konstruksi *x-bracing*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alie, M. Z. M. & Latumahina, S. I. (2019). Progressive Collapse Analysis of the Local Elements and Ultimate Strength of a Ro-Ro Ship. *International Journal of Technology*, Vol. 10 (5): 1065-1074.
- BKI. (2019). *Rules For Classification and Construction Part 1 Seagoing Ship Volume II Rules For Hull*. PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero), Jakarta.
- Feng, Y., Ji, L., Chen, H., Jiang, J., Wang, X., Ren, Y., Zhang, D., Niu, H., Bai, M. & Li, S. (2021). Research Progress and Prospect of Key Technologies for High-Strain Line Pipe Steel and Pipes. *Natural Gas Industry B*, Vol. 8 (2): 146-153.
- Hariyono. (2022). *Analisis Kekuatan Pertambahan Panjang Ladder Kapal Cutter Suction Dredger*. Thesis. Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Irzon, R. (2021). Penambangan timah di Indonesia: Sejarah, Masa Kini, dan Prospeksi. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, Vol. 17 (3): 179-189.
- Misbah, M. N., Setyawan, D. & Soleh, A. (2019). Perkiraan Umur Lelah Struktur Kapal Berbasis Keandalan dengan Metode Mean Value First Order Second Moment. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, Vol. 16 (2): 74-80.
- Alie, M. Z. M., Adiputra, R. (2018). Investigation of Ship Hull Girder Strength with Grounding Damage. *Makara Journal of Technology*, Vol. 22 (2): 88-93.
- Pratama, M. M. A., Andi, M. F. & Hadhinata, C. (2022). Moment-Curvature Analysis of Graded Concrete Beam with Concrete Strength Disparity Variations. *Jurnal PenSil: Pendidikan Teknik Sipil*, Vol. 11 (1): 20-35.
- PT. Timah, Tbk. (2019). *Laporan Tahunan 2019*. Pangkal Pinang: PT. Timah, Tbk.
- Salenus, H. (2018). *Optimalisasi Unit Penggalan Kapal Isap Produksi di PT. Vactoria Nusa Bahari Desa Penganak Kabupaten Bangka Barat*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya.
- Syarifuddin, A., Arianti, E., Yulfani, R. D., Noor, F. M., Risdianto, A. L. A. & Mustain, M. (2022). Pengaruh Konfigurasi Sudut Sebar dan Panjang Tali terhadap Kinerja Sistem Tambat Kapal Isap Produksi Timah. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, Vol. 15 (2): 61-74.
- Wulandari, A. I., Alamsyah & Agusty, C. L. (2021). Analisis Tegangan Regangan pada Pelat Deck dan Bottom Kapal Ferry Ro-Ro Menggunakan Finite Element Method. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, Vol. 15 (1): 45-52.
- Yulianti, Bani, B. & Albana. (2020). Analisa Pertambangan Timah Di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Jurnal Ekonomi*, Vol. 22 (1): 54-62.

HALAMAN KOSONG