

Analisis Kekuatan Struktur Ladder Bucket Wheel Dredger Untuk Penambangan Timah Bawah Laut

Rachman Setiawan dan Ilham Mubaroq

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132
E-mail: rachmans@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak

Dengan semakin berkurangnya cadangan timah di darat, saat ini penambangan mineral mulai merambah ke dasar laut. Teknologi untuk penambangan lepas pantai turut berkembang dari penggalian lepas pantai yang dilengkapi dengan fasilitas pengolahan mineral awal di atas kapal hingga diperoleh kemurnian tertentu. Selama ini peralatan yang dipakai untuk menambang adalah kapal keruk tipe *Bucket Chain Dredgers* (BCD). Teknologi ini memiliki keterbatasan pada kedalaman keruknya. Usaha untuk memodifikasi kapal keruk tipe ini untuk kedalaman yang lebih tinggi berkonsekuensi pada penambahan berat dan ukuran *Ladder* dan daya penggerak rantai ember, yang pada akhirnya berimbas ke biaya konstruksi maupun biaya operasional. Salah satu alternatif tipe kapal keruk yang akan dikembangkan adalah *Bucket Wheel Dredger* (BWD), yaitu dengan memanfaatkan roda ember untuk membongkar tanah in-situ, dan mengangkat bahan tambang menggunakan pompa lumpur hingga ke dek kapal untuk diolah di fasilitas pengolahan. Salah satu aspek kritis dalam modifikasi ini adalah struktur *Ladder*. Dengan fungsi dan pembebanan yang berbeda, dan juga karena kondisi struktur lama yang dipandang tidak layak, maka struktur yang lama diurai, rancangan struktur diajukan dan dibangun sesuai dengan teknologi BWD. Sebagai bagian dari proses penelaahan rancangan (*design review*) sebelum pembangunan *Ladder*, analisis kekuatan struktur dilakukan untuk menjamin bahwa rancangan struktur mampu mengatasi berbagai kondisi pembebanan selama operasional penambangan. Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga berdasarkan tiga kasus pembebanan ekstrim, yaitu: Penggalian, Pengereman dan Posisi Atas. Analisis elemen hingga dengan hasil berupa distribusi tegangan dan deformasi. Posisi kritis diketahui berada pada daerah bawah struktur dekat penggantung *Ladder*, yang mencapai 110 MPa, dengan faktor keamanan 1,85 terhadap tegangan luluh material SM490YA, untuk kasus Pengereman. Sementara defleksi maksimum terhitung sebesar 32,9 mm, yang dianggap masih aman untuk *Ladder* dengan sepanjang 85,5 m. Oleh karena itu, rancangan dianggap telah aman dan dapat direalisasikan ke produksi. Selain itu, dari perhitungan gaya penggalian, diperkirakan bahwa konstruksi roda ember memiliki keterbatasan yang menyebabkan keterbatasan kemampuan menggali tanah keras.

Keywords: *off-shore mining*, timah, kapal keruk, analisis elemen hingga

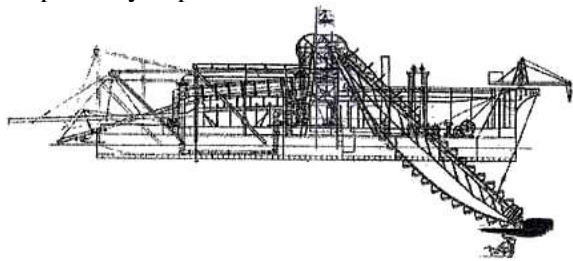
Pendahuluan

Indonesia saat ini adalah produsen bijih timah terbesar kedua di dunia setelah RRC. Cadangan timah di Indonesia dan sekitarnya terletak pada apa yang disebut sebagai "Sabuk Timah" (Tin Belt), yang terhampar dari panta timur Indo-Cina hingga perairan Kepulauan Bangka-Belitung dan di barat Kalimantan Selatan. Dengan meningkatnya kebutuhan akan produk elektronika dan produk konsumen lainnya, permintaan timah dunia juga meningkat secara signifikan, yang ada akhirnya mendongkrak harga timah dunia. Industri penambangan dan pengolahan timah di Indonesia tercatat dimulai sejak jaman kolonial pada tahun 1852, ketika van den Berg menandatangani

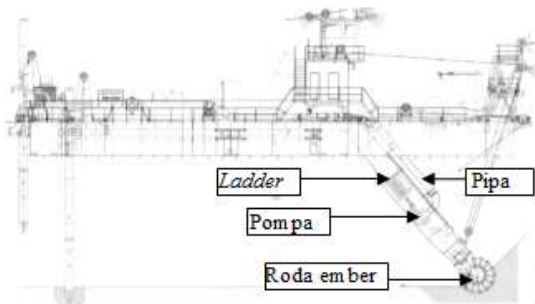
perjanjian dengan penguasa Riau untuk menambang timah di kepulauan Bangka-Belitung, dengan menggunakan cara yang manual (Sujitno, 1996). Penambangan timah modern tidak lagi menggunakan cara manual, melainkan dengan menggunakan berbagai peralatan dan teknologi terkini. Salah satu peralatan penambangan untuk penambangan di kubangan tambang (*pit mining*) adalah kapal keruk tipe *Bucket Chain Dredger* (BCD), seperti pada Gambar 1. Dengan kapal keruk, cadangan in-situ di dasar kubangan dikeruk menggunakan ember keruk yang saling terhubung membentuk rantai ember yang diputar Pemutar atas hingga mencapai bagian atas kapal keruk. Rantai ember ini ditopang oleh *Ladder* yang sekaligus dipakai untuk mencapai berbagai kedalaman keruk. Di atas dek kapal keruk, bahan tambang diolah hingga kemurnian yang

lebih tinggi sebelum diangkut ke darat untuk diolah lebih lanjut di fasilitas peleburan timah.

Dengan semakin berkurangnya cadangan timah di darat, saat ini penambangan mineral mulai merambah ke lepas pantai. PT TAMBANG TIMAH, sebagai sebuah perusahaan penambangan timah nasional telah melaksanakan penambangan bawah laut selama beberapa dekade, dengan menggunakan teknologi kapal keruk tipe BCD tersebut di atas, setelah dimodifikasi sehingga dapat dioperasikan di laut lepas. Akhir-akhir ini, cadangan timah lepas pantai yang belum ter gali telah mencapai kedalaman yang lebih tinggi lagi. Dengan adanya rantai ember yang memiliki berat yang signifikan, kedalaman keruk kapal keruk tipe BCD terbatas hingga kurang lebih 50 m. Usaha untuk memodifikasi kapal keruk tipe ini untuk kedalaman yang lebih tinggi telah dilakukan, dan terbukti berkonsekuensi pada berat dan ukuran *Ladder* dan daya penggerak rantai ember, yang pada akhirnya berimbas ke biaya konstruksi maupun biaya operasional.



Gambar 1. Kapal keruk tipe *Bucket chain Dredger*



Gambar 2. Kapal keruk tipe *Bucket Wheel Dredger*



Gambar 3. Roda ember (*Bucket wheel*) produksi IHC, Belanda.

Salah satu alternatif tipe kapal keruk yang akan dikembangkan untuk menggantikan kapal keruk tipe BCD adalah *Bucket Wheel Dredger* (BWD), yaitu dengan memanfaatkan roda ember untuk membongkar tanah in-situ, dan mengangkat bahan tambang menggunakan pompa lumpur hingga ke dek kapal untuk diolah di fasilitas pengolahan, seperti terlihat pada Gambar 2. Sedangkan, peralatan penggalian BWD dapat dilihat pada Gambar 3.

Sebagai proyek rintisan, perusahaan menerapkan teknologi ini dengan memodifikasi kapal keruk tipe BCD menjadi BWD, yaitu dengan mennggantikan peralatan keruk termasuk *Ladder* dengan BWD. Salah satu aspek kritis dalam modifikasi ini adalah struktur *Ladder*. Dengan fungsi dan pembebanan yang berbeda, dan juga karena kondisi struktur lama yang sudah tidak layak pakai, maka struktur yang lama diputuskan untuk dibongkar, dan rancangan struktur diajukan dan dibangun sesuai dengan tekonologi BWD.

Sebelum pembangunan, analisis kekuatan struktur dilakukan untuk menjamin bahwa rancangan struktur mampu mengatasi berbagai kondisi pembebanan selama operasional penambangan.

Teknologi Penambangan Lepas Pantai

Kapal keruk adalah sebuah peralatan yang memiliki kemampuan untuk mengeruk, memindahkan dan membuang sejumlah material di bawah air dalam waktu tertentu. Kapal keruk dapat dibagi menjadi Kapal Keruk Mekanikal, dan Kapal Keruk Hidrolik, keduanya dibedakan berdasarkan cara pemindahan material dari dasar perairan ke atas kapal (Vlasbom, 2003). Kapal keruk mekanikal mengangkat dan mengangkut bahan galian dari dasar laut secara mekanik, melalui ember-ember. Sedangkan, tipe hidrolik, mengangkat bahan tambang dengan menggunakan pompa lumpur (*slurry pump*). Yang termasuk dalam kategori kapal keruk mekanik adalah: *Bucket Chain Dredger* (BCD), *Grab Dredger*, dan *Hydraulic Crane Dredger*. Sementara, tipe kapal keruk hidrolik termasuk: *Plain Suction Dredger*, *Trailing Suction Hopper Dredger* (TSHD), *Cutter Suction Dredger* (CSD), dan *Bucket Wheel Dredger* (BWD). Berdasarkan kemampuan pergerakannya kapal keruk dibedakan menjadi kapal keruk stasioner dan kapal keruk berpengerak (*self-propelled*). Kapal keruk *self-propelled* digerakan propeler, sementara kapal keruk stasioner digerakan dengan motor pada sistem *mooring*. Berdasarkan populasinya, kapal keruk stasioner merupakan jenis yang paling banyak dibuat.

Dalam makalah ini, rancangan kapal keruk *Bucket Wheel Dredger* (BWD), yang menjadi fokus analisis. Bentuk dan operasi dari BWD menggunakan pemotong berbentuk roda dengan sejumlah ember di sekelilingnya, yang disebut roda ember (*bucket wheel*). Untuk meningkatkan kemampuan penetrasi ke tanah in-situ, ujung roda keruk dilengkai dengan gigi dengan material

yang tahan aus. Roda ember digerakkan oleh motor hidrolis berkekuatan 585 kW dengan putaran maksimal 13 rpm. Bahan gali yang telah dibongkar oleh Roda ember yang sekaligus tercampur dengan air laut akan dihisap oleh pompa pendam (submersible pump) berkekuatan 1230 kW untuk mengangkat lumpur dengan kapasitas mencapai lebih dari 5400 m³/jam campuran air dan bahan gali. Campuran tersebut dialirkan melalui pipa berdiamater 600mm, menuju saringan di atas dek kapal untuk selanjutnya diolah dengan menggunakan serangkaian fasilitas pencucian bahan tambang.

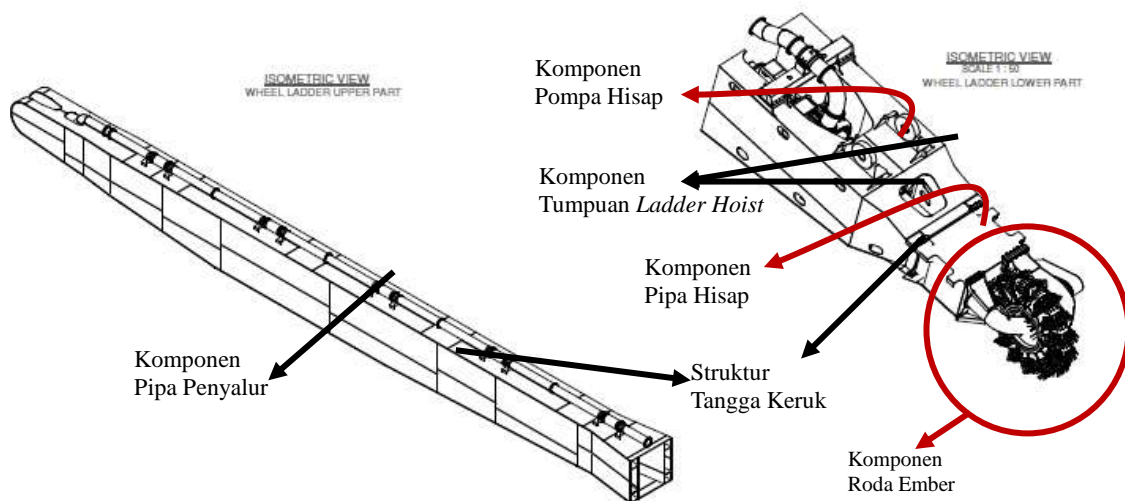
Sebagai proyek rintisan, perusahaan menerapkan teknologi ini dengan memodifikasi kapal keruk tipe BCD menjadi BWD, yaitu dengan mennggantikan peralatan keruk termasuk *Ladder* dengan BWD, sementara ponton, struktur utama dan fasilitas pengolahan bahan tambang masih dipertahankan. Karena fungsi dan pembebanan struktur *Ladder* BWD berbeda dari BCD, dan kondisi teknis struktur *Ladder* lama yang sudah tidak layak digunakan, maka perusahaan memutuskan untuk membongkar struktur lama dan mengganti dengan struktur baru dengan rancangan yang baru juga. Rancangan struktur *Ladder* dibuat oleh IHC, kontraktor internasional penyedia teknologi BWD, sementara pembangunannya dilaksanakan oleh perusahaan galangan kapal di dalam negeri. Sebelum struktur *Ladder* dibangun, analisis kekuatan struktur dilakukan untuk menjamin bahwa rancangan struktur mampu mengatasi berbagai kondisi pembebanan selama operasional penambangan. Hal ini merupakan salah satu kegiatan penelaahan rancangan (*design review*).

Rancangan *Ladder*

Rancangan awal dari struktur *Ladder* disediakan oleh IHC (IHC, 2011a), dengan gambaran seperti pada Gambar 4. Pada rancangan awal, pelat utama konstruksi dispesifikasikan dari standar Eropa, yaitu S355J2 (1.0577). Namun, karena diperkirakan kesulitan dalam pengadaan, maka diusulkan untuk mengganti material menjadi SM490YA untuk *marine grade*, dengan sifat mekanik sbb.: Kekuatan luluh min. 355 MPa, Kekuatan tarik min. 490 MPa, *Elongation* 19% .

Konstruksi *Ladder* terdiri dari bagian atas dan bawah. Bagian atas dibuat di Indonesia di galangan kapa di dalam negeri, sementara bagian bawah langsung dipasok oleh IHC dan didatangkan dari Belanda. bagian atas terdiri dari konstruksi kotak (*box*) dengan pengaku, dan pipa penyalur bahan tambang di atas *Ladder*. Bagian bawah terdiri dari komponen-komponen antara lain: struktur kotak, roda ember, motor hidrolis penggerak roda ember, pompa pendam, *gearbox* dan motor listrik penggerak pompa, pipa hisap, pipa penyambung ke pipa salur. Kedua bagian disambungkan dengan beberapa baut menjadi satu kesatuan *Ladder*. Ujung atas *Ladder* akan ditumpu pada bantalan bola pada struktur atas kapal, sementara bagian bawah akan terhubung dengan kabel penggantung *Ladder* untuk menaik-turunkan *Ladder* pada posisi kedalaman yang dikehendaki.

Untuk mencapai kedalaman rancang sebesar 60m pada sudut 55 derajat, *Ladder* dirancang dengan panjang total 85,5 meter (jarak dari titik tengah *pivot shaft* ke titik tengah roda ember). Kapal mulai mengeruk dari sudut 12 derajat, dan kondisi posisi atas terjadi pada sudut 4,6 derajat.



Gambar 4. Gambar isometrik struktur *Ladder* bagian atas dan bawah (IHC, 2011a)

Analisis Elemen Hingga

Metode Analisis

Analisis elemen hingga dilakukan pada struktur *Ladder* dengan tujuan memperkirakan tingkat tegangan pada keseluruhan struktur dan defleksi maksimum terhadap tiga kasus pembebanan yang menggambarkan kondisi pembebanan yang ekstrim selama operasional, yaitu:

- Penggalian,
- Pengereman,
- Posisi atas.

Untuk setiap kasus pembebanan, beban-beban operasional dihitung berdasarkan data yang diketahui dan yang diperkirakan selama operasional. Untuk kasus Penggalian, sudut *Ladder* yang paling kritis adalah 55 derajat, sementara untuk kasus pengereman, efek maksimal dari berat dan inersia akan terjadi pada posisi atas, yaitu 4,6 derajat. Demikian juga untuk kasus posisi atas, analisis dilakukan pada sudut *Ladder* 4,6 derajat. Analisis elemen hingga dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS v 11.0.

Pembebanan

Secara garis besar, beban-beban pada *Ladder* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Beban pada *Ladder*

No.	Nama Beban	Penjelasan
1	Berat sendiri, W_{Ladder}	Berat keseluruhan struktur, yang dihitung dari model elemen hingga, dengan faktor untuk memperhitungkan sambungan-sambungan
2	Berat pipa, W_{pipa}	Dimodelkan sebagai beban terdistribusi secara vertikal. Untuk kasus Penggalian, berat pipa akan ditambah dengan berat isi.
3	Berat pompa, W_{pompa}	Berat pompa, termasuk berat pompa dan komponen penggerakannya (motor dan gearbox)
4	Gaya pemotongan, F_{potong} & F_{makan}	Gaya potong adalah gaya pemotongan total pada arah radial, dan gaya makan adalah gaya pemotongan total arah transversal
5	Beban akibat arus	Arus pada struktur ladder akan menyebabkan pressure drag. Kecepatan makan akan menambah beban akibat arus di sisi samping tangga keruk.
6	Berat roda ember, $W_{roda ember}$	Berat dari roda ember dan komponen penggerakannya.

Untuk kasus penggalian, gaya-gaya pemotongan dihitung berdasarkan metode teoretis yang dikembangkan oleh Miedema (1986). Proses pemotongan pada pasir padat bawah air ditentukan oleh sifat dilatasi (pembesaran) dari pasir. Sifat dilatasi pasir ditunjukkan pada Gambar 5, yang memperlihatkan perubahan susunan butir di area *post-shearing* menjauh dibandingkan area *pre-shearing*. Proses pemotongan dimulai dengan deformasi pasir di zona pergeseran, sehingga volume pori meningkat (dilatasi). Air akan masuk dari permukaan pasir untuk mengisi volume pori yang meningkat. Air akan terus mengalir mengisi volume pori, sehingga memberikan tekanan kepada pori – pori yang sudah terisi air, hasilnya tegangan butir akan meningkat. Dengan mengasumsikan tidak terjadi kavitasi, Miedema memberikan rumus umum untuk gaya pemotongan sebagai berikut,

$$F_{ci} = c_i \cdot \rho_w \cdot g \cdot v_c \cdot h_i^2 \cdot b \cdot \frac{e}{k_m} \quad (1)$$

dengan,

ρ_w = densitas air, (ton/m³)

g = percepatan gravitasi, (m/s²)

v_c = kecepatan potong, (m/s)

h_i = ketebalan awal lapisan yang dipotong, (m)

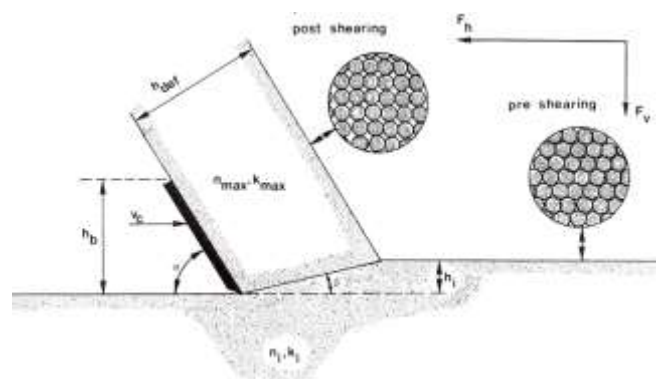
b = panjang tepi pisau, (m)

e = regangan volume, (%)

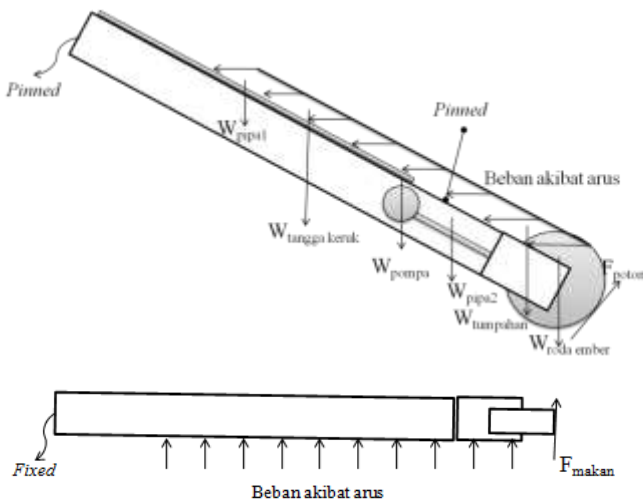
k_m = *weighed permeability*, yang bernilai antara k_i dan k_{max} , (m/s)

c_i = koefisien proporsional, dengan memasukan pengaruh tekanan pada pisau dan zona deformasi, sudut pisau, sudut gesekan internal pasir, sudut antar muka tanah, rasio h_b/h_i , dan laju keausan pisau.

i = indeks untuk arah aksial dan tangensial.



Gambar 5. Mekanisme penggalian tanah in-situ dan notasi untuk perhitungan gaya pemotongan (Miedema, 1986)



Gambar 6. Pembebanan pada *Ladder*: dilihat dari samping, dan dari atas.

Tabel 2. Sifat mekanik material pasir 0,2 mm (Miedema, 1986)

Parameter	Nilai	Satuan
Φ (<i>Angle of internal friction</i>)	40	derajat
δ (<i>Soil /interface friction angle</i>)	26	derajat
e (<i>Volumetric strain</i>)	10	%
k_m (<i>Weighed permeability</i>)	1×10^{-3}	m/s

Data berikut meliputi pola penggalian dan data roda ember yang dipakai: Kecepatan putar roda ember 10 rpm, lebar penggalian 1 m, Radius roda ember 2,2 m, jumlah ember 15, kecepatan gerak makan 0,33 m/s. Sedangkan koefisien proporsional, c_i , untuk sudut pemotongan, α , tertentu, dan data yang terkait sifat tanah in-situ diperoleh dari Miedema (1986), yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari data-data di atas, diperoleh gaya pemotongan arah tangensial, $F_{ctan} = 1434$ kN dan arah aksial, $F_{caxial} = 647$ kN. Namun, jika dilihat dari spesifikasi peralatan yang dipasang oleh kontraktor, batasan gaya potong yang mampu ditahan oleh konstruksi roda ember, masing-masing untuk arah tangensial dan aksial adalah, 1000 kN dan 280 kN (IHC, 2011b). Oleh karena itu, analisis kekuatan *Ladder* dilakukan berdasarkan batasan peralatan roda ember ini. Konsekuensinya, untuk karakteristik tanah galian sebagaimana dipakai dalam perhitungan, yaitu in-situ kaksa, peralatan diperkirakan tidak kuat. Hal ini akan berimbas pada kapasitas yang diperkirakan turun.

Saat penggalian, diasumsikan pipa sudah terisi lumpur secara penuh, dengan perkiraan berat pipa dan isinya sebesar 720,1 kN, dikurangi efek boyansi, sementara ketika posisi pemeliharaan pada *Ladder* di atas, pipa diasumsikan kosong, maka berat mencapai 374,2 kN.

Selama penggalian, arus laut memberikan gaya dorong pada struktur *Ladder*, yang sebanding dengan luasan proyeksi, koefisien hambat, laju arus laut, laju gerak BWD, dan massa jenis air laut. Dengan asumsi arus laut 2 m/s, maka diperoleh tekanan hambat arus sebesar 2,39 kPa.

Kasus pembebanan kedua terkait dengan pemosisian *Ladder* pada kedalaman tertentu. Dari beberapa skenario pembebanan, maka skenario pengereman yang merupakan pembebanan yang paling ekstrim di antara kategori pemosisian *Ladder*. Proses pengereman melibatkan inersia yang diakibatkan oleh perlambatan saat diturunkan, dengan perlambatan maksimum diperkirakan terjadi sesaat setelah tangga keruk sampai di posisi kedalaman rendah. Perlambatan kritis pada *wire rope* diperkirakan sebesar $0,2 \text{ m/s}^2$. Dengan jumlah puli 12, maka perlambatan yang terjadi pada *Ladder* adalah $0,0167 \text{ m/s}^2$.

Kasus pembebanan ketiga adalah saat *Ladder* pada posisi di atas untuk keperluan pemeliharaan. Dengan posisi *Ladder* yang hampir horisontal, seluruh gaya berat akan tegak lurus/lateral terhadap panjang *Ladder*, di samping sudah tidak adanya gaya apung dari air laut. Dengan posisi seperti ini, dikhawatirkan defleksi struktur akan melebihi batas yang dibolehkan.

Pemodelan Elemen Hingga

Ladder dimodelkan dengan geometri pelat dan batang langsung di fasilitas *pre-processor* perangkat lunak ANSYS v 11.0, yang selanjutnya dimodelkan menggunakan tipe elemen SHELL63, elemen shell elastis yang memiliki kemampuan *membrane* dan *bending*, dengan 4 nodal tiap elemennya, dan tiap nodalnya memiliki 6 derajat kebebasan yaitu translasi dan rotasi nodal dalam arah x , y , dan z . Batang didefinisikan dengan tipe elemen BEAM4, yang memiliki karakteristik elemen dengan 2 buah node juga dengan 6 derajat kebebasan (ANSYS, 2007). Untuk sifat elastis material, digunakan asumsi material baja pada umumnya, yaitu modulus elastisitas 207 GPa, Poisson's ratio 0,29, dan massa jenis 7850 kg/m^3 . Dari pemodelan geometri, diperoleh perkiraan massa struktur *Ladder* sebesar 447,8 ton. Tumpuan didefinisikan pada *pivot shaft* di ujung atas tangga keruk, dan pada tumpuan sistem *ladder hoist*.



Gambar 7. Model elemen hingga dan posisi tumpuan.

Tabel 3. Rangkuman pembebanan pada tap kasus pembebanan

Tipe Beban	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
Gaya Potong aksial, kN	280	0	0
Gaya Potong tangensial, kN	1000	0	0
Berat roda ember dll. , kN	588	588	588
Berat Pipa (+isi) , kN	720,1	374,2	374,2
Pressure drag atas, kPa	23,9	23,9	0
Pressure drag samping, kPa	4,1	4,1	0

Catatan:

Kasus 1: Penggalian

Kasus 2: Pengereman

Kasus 3: Posisi Atas

Hasil dan Pembahasan

Analisis elemen hingga menghasilkan distribusi tegangan untuk ketiga kasus pembebanan. Material yang dipakai termasuk dalam kategori material ulet, sehingga teori kegagalan Energi Distorsi Maksimum (kriteria von Mises) dipakai untuk memantau tingkat keamanan struktur. Selanjutnya, tegangan von Mises ini akan dibandingkan dengan kekuatan luluh minimum material, yaitu 355 MPa. Sementara itu, hasil lain dari analisis, yaitu deformasi lateral akan dibandingkan dengan batas defleksi lateral maksimum, sebesar $1/750 \times$ panjang *Ladder*, atau 114 mm.

Pada umumnya, untuk ketiga kasus pembebanan yang disimulasikan, tegangan global terhitung masih jauh di bawah batas kekuatan luluh material. Tegangan puncak terjadi pada daerah *Ladder* bagian bawah, di sekitar tumpuan panggantung *Ladder*. Contoh hasil analisis elemen hingga dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9, masing-masing untuk distribusi tegangan von Mises dan deformasi.

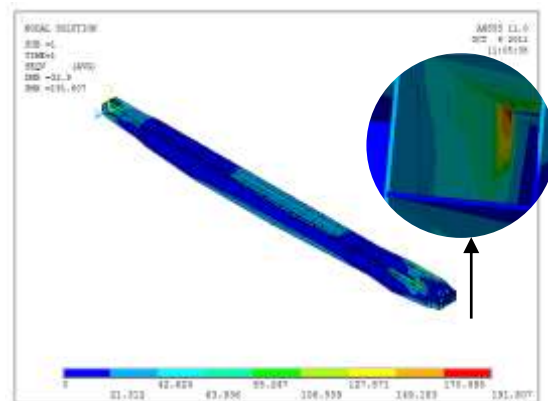
Dari analisis kasus pembebanan penggalian, tegangan rata-rata di keseluruhan pelat struktur antara 20 – 30 MPa, dengan tegangan terbesar sebesar 97,6 MPa, yang terletak di area sambungan antara bagian bawah *Ladder* dengan roda ember. Hal ini diperkirakan adanya konsentrasi tegangan pada daerah yang didominasi tegangan akibat tekuk (*bending stress*) yang tinggi. Deformasi terbesar tercatat sebesar 18,1 mm pada bagian tengah *Ladder*.

Untuk kasus beban pengereman, tegangan von Mises terbesar tercatat cukup tinggi, yaitu mencapai 192 MPa, yang terjadi di sekitar struktur penopang penggantung *Ladder*. Hal ini terjadi akibat efek inersia dari struktur yang cukup besar. Lebih jauh, jika dilihat distribusi tegangan hasil analisis elemen hingga (Gambar 8), nampak bahwa terjadi peningkatan tegangan yang tidak wajar.

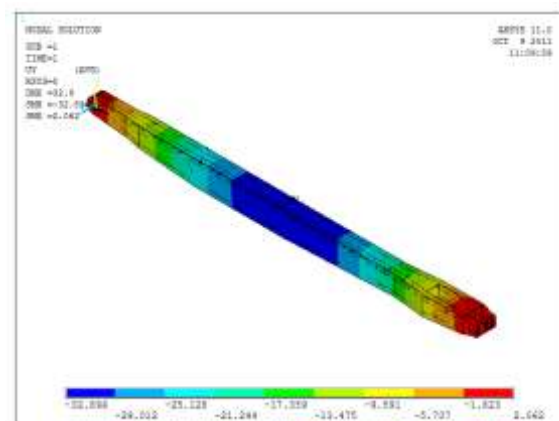
Tegangan seakan terpusat pada satu nodal, sementara tegangan di sekitarnya relatif lebih rendah. Kontour tegangan digambarkan dari interpolasi solusi nodal, sehingga terkesan bahwa terdapat distribusi tegangan tinggi yang meluas, padahal tegangan tinggi, yang notabene tidak wajar, disebabkan oleh singularitas pada satu nodal. Untuk meningkatkan keyakinan akan hasil analisis, perbaikan model elemen hingga dapat dilakukan dengan memeriksa ketersambungan nodal di daerah yang menunjukkan hasil tegangan terkonsentrasi tersebut.

Untuk kasus ini, tegangan diyakini terjadi hanya pada kisaran 110 MPa, yang diperoleh dari rata-rata distribusi tegangan di sekitar posisi kritis tersebut. Meskipun demikian, tegangan lokal maksimum tersebut masih di bawah kriteria kegagalan perancangan. Deformasi lateral terbesar yang terjadi adalah 33 mm pada bagian tengah *Ladder* (Gambar 9), yang juga masih di bawah kriteria perancangan.

Sementara itu, analisis terhadap kasus posisi atas menghasilkan lokasi kritis juga di daerah tumpuan penopang *Ladder*, yaitu sebesar 120 MPa. Dengan penjelasan yang sama dengan di atas, tegangan yang terjadi diyakini lebih rendah dari tegangan terkonsentrasi tersebut. Tegangan sebenarnya diyakini terjadi pada kisaran 60 MPa. Deformasi maksimal tercatat sebesar 24,2 mm di tengah struktur. Kedua parameter tersebut masih di bawah kriteria yang diijinkan.



Gambar 8. Distribusi tegangan kasus Pengereman.



Gambar 9. Distribusi deformasi kasus Pengereman.

Tabel 4. Rangkuman hasil analisis elemen hingga untuk ketiga kasus pembebanan

Kasus Pembebanan	Tegangan (MPa), [Faktor Keamanan]	Deformasi (mm)
Penggalian	90 [3,94]	18,1
Pengereman	110 [3,23]	32,9
Posisi Atas	60 [5,92]	24,2

Kriteria:

Tegangan maksimum = 355 MPa.

Deformasi maksimum = 114 mm.

Dari ketiga kasus pembebanan, dapat diketahui bahwa kondisi kritis terjadi pada kasus pengereman dengan faktor keamanan terkecil sebesar 1,85. Hasil analisis elemen hingga dirangkum dalam Tabel 4.

Kesimpulan

Analisis elemen hingga terhadap rancangan struktur *Ladder* telah dilakukan, terhadap tiga kasus pembebanan yang ekstrim, yaitu Penggalian, Pengereman, dan Posisi Atas. Dari ketiga kasus tersebut, kondisi kritis diketahui terjadi pada kasus Pengereman, dengan tegangan maksimum mencapai 110 MPa, atau dengan faktor keamanan sebesar 3,23. Hal ini dinilai mencukupi, lagi pula biasanya pada posisi yang kritis, kemampuan sistem pengereman akan menurun yang menyebabkan perlambatan yang lebih rendah. Hasil analisis elemen hingga memerlukan perbaikan, terutama pada daerah yang memiliki tegangan terkonsentrasi yang diperkirakan tidak menggambarkan kondisi sebenarnya.

Di samping itu, dari perhitungan gaya penggalian, diperoleh hasil bahwa, untuk kondisi penggalian dan karakteristik tanah in-situ sebagaimana dirancang, diperkirakan gaya penggalian melampaui batas kekuatan konstruksi roda ember sebagaimana spesifikasi teknis peralatan dari pabrikan. Oleh karena itu, penggalian tidak akan mencapai maksimal sesuai rancangan, yang berakibat penurunan kapasitas penggalian, khusus untuk kasus penggalian pada tanah in-situ kaksa, dengan kekerasan tinggi.

Referensi

ANSYS Inc. Documentation for ANSYS 11.0 (2007)

China Steel Corp. JIS G3106-2008 Rolled Steels for Welded Structure. URL: www.csc.com.tw/csc_e/pd/spec/mlg_std1_2.pdf (diakses 2011).

IHC Dredgers B.V. Calculation of Forces on Dredging System. Doc. No. 09.965-0312-010 (2011)

IHC Dredgers B.V. Global Arrangement Wheel Ladder. Doc. No. 09.965-0338-020 (2011)

Sujitno, S. Sejarah Timah Indonesia. Gramedia Pustaka Utama (1996)

Miedema, S.A. The Application of a Cutting Theory on a Dredging Wheel. Proc. WODCON XI. Brighton (1986)

Vlasbom, W.J. Introduction to Dredging Equipment. Delft University of Technology. 2003. (Online). URL: (<http://www.dredgingengineering.com/>) (Diakses 1 September 2011).