

Modifikasi *Submersible Dredge Pump Gearbox* dengan Daya 1,25 MW

Bagus Budiwanoro*, Toto Hardianto, dan Bangsa Mahardika

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganeca 10
Bandung, Indonesia

*budiwan@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak

Bucket wheel dredger merupakan kapal keruk yang digunakan untuk melakukan kegiatan eksplorasi timah. *Gearbox* yang dirancang merupakan salah satu peralatan yang terdapat pada *submersible dredge pump unit* yang berfungsi untuk mengisap tanah, pasir ataupun timah yang berada didasar laut hasil gerusan *bucket wheel*. Beberapa kali mengalami kerusakan akibat *gearbox* eksisting memberikan alasan untuk melakukan modifikasi dari *gearbox* eksisting. Modifikasi yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan hasil rancangan *gearbox* yang lebih baik kinerjanya berdasarkan kriteria yang telah ditentukan. Komponen yang dirancang diantaranya roda gigi berdasarkan Standar AGMA 2001-D04:2005, poros berdasarkan kriteria kegagalan lelah *Modified Goodman*, *bearing* berdasarkan standar SKF, *gearbox housing* berdasarkan geometri motor listrik dan pompa sentrifugal, serta sistem pendinginan *gearbox* berdasarkan kemampuannya untuk menyerap panas yang dihasilkan oleh roda gigi dan *bearing*. Dari perancangan yang dilakukan, didapatkan faktor keamanan roda gigi sebesar 1,23 dan 1,44 dengan penggunaan material AISI 4320, faktor keamanan poros sebesar 1,48 dan 3,86 dengan penggunaan material AISI 4340, penggunaan *spherical roller bearing* pada titik A, B, dan C, serta penggunaan *spherical roller thrust bearing* pada titik D untuk menahan beban dinamik aksial maksimum sebesar 242,8 kN dan beban radial sebesar 38,8 kN. Lalu, penggunaan material AISI 1010 *Galvanized Steel* pada *gearbox housing* untuk mencegah korosi akibat air laut dan menggunakan air laut sebagai media pendinginan utama dengan kemampuan pendinginan sebesar 10,82 kW untuk pendinginan natural dan 70,25 kW untuk pendinginan paksa.

Kata kunci : *Gearbox*, roda gigi, poros, *bearing*, *housing*, pendinginan.

Pendahuluan

Sampai dengan saat ini, *bucket wheel dredger* yang digunakan oleh PT. Timah (Persero) Tbk belum dapat beroperasi secara maksimal dikarenakan sering terjadinya kerusakan, baik yang diakibatkan oleh faktor lingkungan maupun kesalahan manusia. Berdasarkan data statistik mengenai kerusakan yang mengakibatkan *bucket wheel dredger* tidak dapat beroperasi, dapat disimpulkan bahwa komponen *gearbox* merupakan komponen yang paling berkontribusi besar pada jam stop produksi *bucket wheel dredger*.

Kerusakan yang terjadi pada *gearbox* diakibatkan oleh pembebanan dan temperatur yang terjadi melebihi kapasitas yang dapat ditahan oleh komponen pada *gearbox*. Selama ini, kerusakan yang terjadi pada *gearbox* disolusikan dengan mengganti komponen-komponen yang rusak. Proses penggantian komponen yang rusak membutuhkan waktu yang sangat lama dan melalui tahapan yang tidak sedikit. Selain menyita waktu yang lama untuk membongkar dan kemudian memasang kembali, membutuhkan sumber daya manusia yang tidak sedikit, juga ketersediaan cadangan komponen yang

rendah sehingga harus menunggu cukup lama dalam proses pemesanan komponen yang rusak karena dibeli secara *import*. Terlebih lagi proses produksi harus dihentikan selama proses penggantian komponen yang mengakibatkan keuntungan perusahaan berkurang atau bahkan menjadi kerugian bagi perusahaan.

Solusi ini dinilai sangat tidak efektif dan efisien karena kerugian yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan dengan keuntungan yang didapatkan. Oleh karena itu, PT. Timah (Persero) Tbk berencana melakukan solusi jangka panjang yaitu dengan membuat satu set *gearbox* yang dapat diproduksi di dalam negeri sehingga ketika terjadi kerusakan pada komponen *gearbox*, satu set *gearbox* cadangan sudah siap untuk menggantikan *gearbox* yang rusak. Sehingga, hal ini akan mengurangi kerugian yang terjadi karena jam stop produksi *bucket wheel dredger* akan berkurang.

Tujuan

Merancang ulang/modifikasi *submersible dredge pump gearbox* yang meliputi:

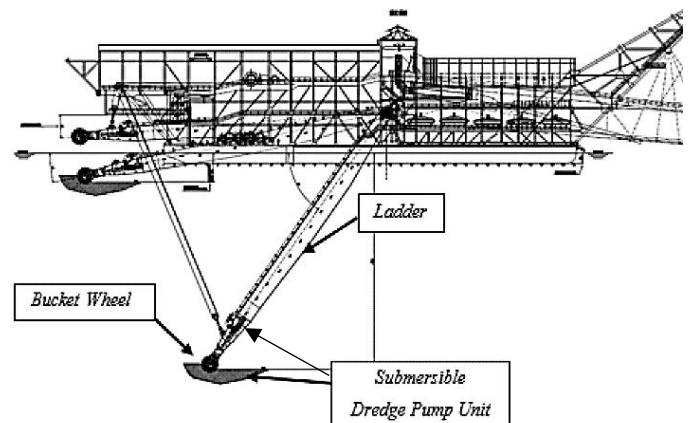
- Menganalisis dan memverifikasi fungsi dan kekuatan roda gigi.
- Memverifikasi dan merancang ulang poros.
- Menentukan tipe *bearing* yang tepat.
- Memodifikasi *gearbox housing* untuk menyesuaikan rancangan poros dan *bearing*.
- Merancang sistem pendinginan.

Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Ruang lingkup dari perancangan ulang *submersible dredge pump gearbox* yang dilakukan meliputi aspek mekanikal dan termal. Sedangkan batasan masalah pada perancangan ulang yang dilakukan yaitu perhitungan kekuatan mekanik hanya dilakukan pada komponen roda gigi, *bearing*, dan poros, tidak termasuk komponen *gearbox housing*.

Bucket Wheel Dredger

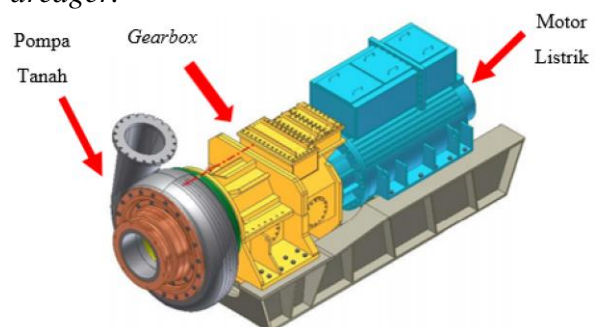
Bucket wheel dredger merupakan salah satu kapal yang digunakan untuk melakukan kegiatan eksplorasi timah di lepas pantai. Sistem yang digunakan *bucket wheel dredger* adalah sistem *bucket wheel* yang akan digerakkan oleh motor hidrolik untuk menghasilkan gerak berputar yang digunakan untuk menggerus tanah ataupun pasir yang terdapat di dasar laut. Tanah ataupun pasir yang telah tergerus kemudian akan dihisap oleh pompa sentrifugal yang digerakkan oleh motor listrik yang selanjutnya akan diproses hingga menghasilkan timah.



Gambar 1 Bucket Wheel Dredger Kundur 1 [1]

Submersible Dredge Pump Unit

Submersible dredge pump unit merupakan sistem yang digunakan untuk mengisap tanah ataupun pasir yang telah digerus oleh *bucket wheel*. Keseluruhan unit ini diletakkan pada *ladder bucket wheel dredger*.



Gambar 1 Submersible Dredge Pump [2]

Gearbox yang dimodifikasi merupakan *gearbox* yang terdapat pada *submersible dredge pump unit*.

Acuan Perancangan

Perancangan ulang yang dilakukan mengacu pada *standard, recommended practice, ataupun guidelines* untuk menjamin kualitas dan keamanan hasil rancangan. Acuan rancangan ulang yang digunakan diantaranya:

- Standar AGMA 2001-D04:2005 untuk komponen roda gigi
- Kriteria kegagalan lelah *Modified Goodman* untuk komponen poros
- Standar SKF untuk komponen *bearing*

Permasalahan pada *Gearbox*

Sampai dengan saat ini, *bucket wheel dredger* yang dioperasikan di PT. Timah (Persero) Tbk tidak dapat beroperasi secara maksimal. Kerusakan terjadi secara berulang-ulang dan mengakibatkan kerugian yang tidak sedikit khususnya kerugian waktu dan finansial. Tabel 1 merupakan data historis kerusakan total yang terjadi pada komponen-komponen *bucket wheel dredger* dari tahun 2012 sampai dengan 2015.

Tabel 1 Data Historis Kerusakan Peralatan BWD [3]

No.	Peralatan	Total (jam)	%
1.	<i>Gearbox Pompa Tanah</i>	6137	43%
2.	<i>Gearbox Bucket Wheel</i>	1696	12%
3.	<i>Gland Pump</i>	1304	9%
4.	Pompa Tanah	604	4%
5.	<i>Hydraulic System</i>	703	5%
6.	<i>Bucket Wheel System</i>	568	4%
7.	<i>Moorin Winch</i>	321	2%
8.	<i>Washing Plant</i>	148	1%
9.	Reparasi Mingguan	748	5%

10.	Lain-Lain (Cuaca Buruk dsb)	694	5%
11.	<i>Pipeline</i>	488	3%
12.	Motor Pompa Tanah	477	3%
13.	Listrik	241	2%
	Jumlah	14128	100%

Berdasarkan data statistik mengenai kerusakan yang mengakibatkan *bucket wheel dredger* tidak dapat beroperasi, dapat disimpulkan bahwa komponen *gearbox* merupakan komponen yang paling berkontribusi besar pada jam stop produksi *bucket wheel dredger*. Lalu berdasarkan data kerusakan *gearbox* dapat disimpulkan bahwa permasalahan yang terjadi selama ini yaitu:

1. Kerusakan *bearing*, dengan kata lain *bearing* yang digunakan saat ini tidak dapat menahan beban yang terjadi.
 2. Temperatur minyak pelumas terlalu tinggi, dengan kata lain panas yang dihasilkan tidak dapat didinginkan sepenuhnya oleh media pendingin.
- Gambar 3 merupakan dokumentasi kerusakan *bearing* yang diakibatkan oleh beban dan temperatur yang terlalu tinggi.



Gambar 2 Dokumentasi Kerusakan Bearing [3]

Solusi Permasalahan

Selama ini, kerusakan yang terjadi pada *gearbox* disolusikan dengan mengganti komponen-komponen yang rusak. Solusi yang dilakukan dinilai sangat tidak efektif dan efisien. Solusi yang dilakukan juga merupakan solusi jangka pendek, karena perbaikan dilakukan hanya dengan mengganti komponen yang rusak dengan komponen baru tanpa adanya analisis secara mendalam dan perubahan yang signifikan.

Solusi jangka panjang yang akan dilakukan yaitu dengan membuat satu set *gearbox* dengan maksud ketika terjadi kerusakan pada komponen *gearbox*, satu set *gearbox* cadangan sudah siap untuk menggantikan *gearbox* yang rusak. Hal ini akan mengurangi kerugian yang terjadi karena jam stop produksi *bucket wheel dredger* akan berkurang.

Gearbox yang akan dirancang ulang harus dapat menjadi solusi permasalahan yang ada yaitu dengan:

1. Memodifikasi desain *gearbox* sedemikian rupa sehingga beban-beban yang diterima komponen-komponen *gearbox* seperti bearing, dapat ditahan.
2. Menambahkan sistem pendinginan yang memanfaatkan air laut untuk mencegah temperatur minyak pelumas terlalu tinggi.

Kriteria Rancangan

Setelah menganalisis permasalahan yang ada serta menentukan solusi yang akan dilakukan. Kriteria rancangan diperoleh dari tujuan dan syarat rancangan (*Design, Requirement, and Objective, DR&O*).

Berikut adalah DR&O yang menjadi panduan dalam melakukan perancangan *gearbox* yaitu:

1. Mampu meneruskan daya sebesar 1,255 MW.
2. Mampu menghasilkan kecepatan keluaran sebesar 440 rpm dengan kecepatan masukan sebesar 1000 rpm.

3. Memiliki dimensi *housing* yang sama seperti *gearbox* yang digunakan saat ini.
4. Dapat dioperasikan dalam keadaan terendam air laut.
5. Mampu bekerja dalam segala sudut kerja *ladder bucket wheel dredger* dengan maksimum kemiringan 55 derajat.
6. Mampu menahan segala beban yang terjadi.
7. Dilengkapi dengan sistem pendinginan yang memanfaatkan air laut.

Perancangan Ulang *Gearbox*

Berikut ini merupakan tahapan yang dilakukan dalam melakukan modifikasi *gearbox*, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3 Diagram Alir Perancangan Ulang

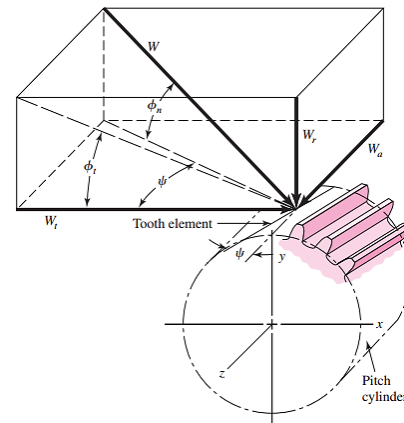
Sebelum dilakukan modifikasi, terlebih dahulu dilakukan evaluasi untuk setiap komponen *gearbox*, yang hasilnya dicantumkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Evaluasi Rancangan Eksisting

Komponen	Eksisting	Keterangan
Roda Gigi	Faktor keamanan memenuhi kriteria	Tidak dilakukan perancangan ulang
Poros	Faktor keamanan memenuhi kriteria	Dilakukan modifikasi yang menyesuaikan ukuran bearing
Bearing	Tidak mampu menahan beban yang terjadi	Dilakukan pemilihan tipe bearing yang tepat
Gearbox Housing	Terjadi korosi	Dilakukan modifikasi dan diberikan rekomendasi material
Sistem Pendinginan	Dalam kondisi terburuk panas tidak dapat didinginkan	Dilakukan perancangan sistem pendinginan

Analisis dan Verifikasi Roda Gigi

Analisis roda gigi yang dilakukan mengacu pada standar AGMA. Sedangkan material roda gigi yang dipilih adalah AISI 4320 dengan mempertimbangkan kekuatan, keterbuan, dan ketersediaannya. Terlebih dahulu dilakukan analisis gaya pada roda gigi yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4 Gaya yang Bekerja pada Gigi di Roda

Gigi Miring [6]

Berdasarkan Gambar 5, maka besar gaya yang ditransmisikan oleh roda gigi sebesar

$$W_t = \frac{60000 \times P}{\pi \times d_p \times n_i} = 99,87 \text{ kN}$$

Selanjutnya dilakukan analisis tegangan pada roda gigi yang mengacu pada standar AGMA 2001-D04:2005. Tegangan *bending* pada roda gigi dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma = W_t K_o K_v K_s \frac{P_d}{F} \frac{K_m K_B}{J} \quad (1)$$

Maka, besar tegangan *bending* untuk roda gigi *pinion* dan *driven* sebesar

$$\sigma_p = 46131,8884 \text{ lbf/in}^2$$

$$\sigma_g = 46513,14367 \text{ lbf/in}^2$$

Tegangan kontak pada roda gigi dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma_c = C_p \sqrt{W_t K_o K_v K_s \frac{K_m C_f}{d_p F I}} \quad (2)$$

Maka, besar tegangan kontak untuk roda gigi *pinion* dan *driven* sebesar

$$\sigma_{c,p} = 166129,38 \text{ lbf/in}^2$$

$$\sigma_{c,g} = 110801,92 \text{ lbf/in}^2$$

Setelah dilakukan perhitungan tegangan, selanjutnya faktor keamanan *bending* dan kontak dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$S_F = \frac{S_t Y_N}{\sigma_{all} K_T K_R} \quad (3)$$

Maka, besar faktor keamanan *bending* untuk roda gigi *pinion* dan *driven* sebesar

$$S_{F,p} = 1,43$$

$$S_{F,g} = 1,44$$

Lalu, besar faktor keamanan kontak untuk roda gigi *pinion* dan *driven* sebesar

$$S_{H,p} = 1,23$$

$$S_{H,g} = 1,88$$

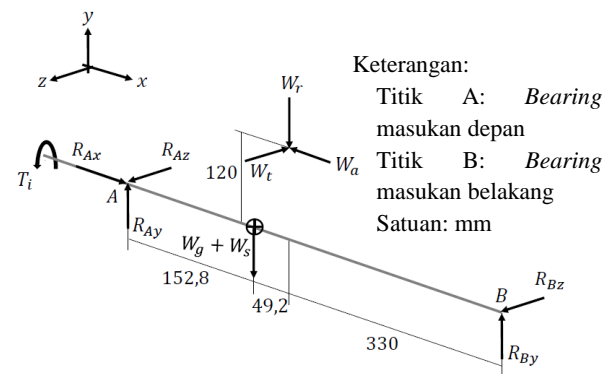
Besar faktor keamanan hasil perhitungan lebih besar dibandingkan dengan faktor keamanan yang telah ditetapkan oleh AGMA, maka roda gigi telah memenuhi kriteria. Tabel 3 merupakan tabel hasil analisis roda gigi yang dilakukan.

Tabel 3 Data Hasil Analisis Roda Gigi

Roda Gigi		Pinion	Driven
Material		AISI 4320	
Gaya (kN)	Total	107,92	
	Tangensial	99,87	
	Radial	36,91	
	Aksial	17,61	
Tegangan (MPa)	<i>Bending</i>	406,17	403,59
	Kontak	1374,5	899,65
Faktor Keamanan	<i>Bending</i>	1,43	1,44
	Kontak	1,23	1,88

Perancangan Ulang Poros

Perancangan ulang poros yang dilakukan diawali dengan menentukan *layout* geometri poros. Lalu dilanjutkan dengan memilih material, menganalisis gaya, dan tegangan pada poros. Jika hasil analisis tidak memenuhi kriteria yang telah ditentukan, maka akan dilakukan modifikasi rancangan poros. Gambar 6 dan 7 merupakan diagram benda bebas poros yang digunakan untuk melakukan analisis gaya.



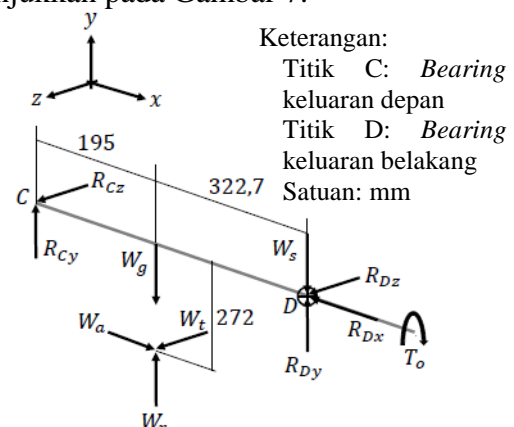
Gambar 5 Diagram Benda Bebas Poros Masukan

Berdasarkan diagram benda bebas di atas, didapatkan besar gaya-gaya yang terjadi pada tumpuan A dan B yang dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 Gaya Tumpuan pada Poros Masukan

Beban		CW	CCW	
Radial	R_{Az}	61,97	61,95	kN
	R_{Ay}	28,157	29,2	kN
	R_{Bz}	37,92	37,92	kN
	R_{By}	10,55	9,5	kN
Aksial	R_{Ax}	17,61	-	kN
	R_{Bx}	-	17,61	kN

Selanjutnya, analisis gaya dilakukan pada poros keluaran dengan diagram benda bebas ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6 Diagram Benda Bebas Poros Keluaran

Berdasarkan diagram benda bebas di atas, didapatkan besar gaya-gaya yang terjadi pada tumpuan C dan D yang dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5 Gaya Tumpuan pada Poros Keluaran

Beban		CW	CCW	
Radial	R_{Cz}	62,28	62,28	kN
	R_{Cy}	20,51	37,27	kN
	R_{Dz}	37,59	37,59	kN
	R_{Dy}	10,1	6,66	kN
Aksial	R_{Cx}	-	17,61	kN
	R_{Dx}	17,61	-	kN

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *alternating* dan *midrange stress* untuk beban *bending*, aksial, dan torsional dengan persamaan berikut:

$$(\sigma)_{bending} = (K_f)_{bending} \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

$$(\sigma)_{axial} = (K_f)_{axial} \frac{N}{A} \quad (5)$$

$$(\tau)_{torsion} = K_{fs} \frac{Tc}{J} \quad (6)$$

Lalu, dilakukan perhitungan nilai *alternating* dan *midrange stress* dalam formulasi Von Mises dengan persamaan berikut:

$$\sigma'_a = \left\{ \left[(\sigma_a)_{bending} + \frac{(\sigma_a)_{axial}}{0,85} \right]^2 + 3[(\tau_a)_{torsion}]^2 \right\}^{0,5} \quad (7)$$

$$\sigma'_m = \left\{ \left[(\sigma_m)_{bending} + (\sigma_m)_{axial} \right]^2 + 3[(\tau_m)_{torsion}]^2 \right\}^{0,5} \quad (8)$$

Maka, didapat nilai *alternating* dan *midrange stress* untuk poros masukan sebesar

$$\sigma'_a = 84,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = 60,3 \text{ MPa}$$

dan untuk poros keluaran sebesar

$$\sigma'_a = 25,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = 40,3 \text{ MPa}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan faktor keamanan berdasarkan kriteria *Modified Goodman* dengan persamaan berikut:

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \quad (9)$$

Maka, didapat nilai faktor keamanan untuk poros masukan sebesar

$$n_f = 1,48$$

dan untuk poros keluaran sebesar

$$n_f = 3,86$$

Tabel 6 merupakan tabel hasil analisis poros yang dilakukan.

Tabel 6 Data Poros Hasil Perancangan Ulang

Poros		Masukan	Keluaran
Material		AISI 4340	
Gaya (kN)	Resultan Titik A	70,31	
	Resultan Titik B	39,36	
	Resultan Titik C	65,57	
	Resultan Titik D	42,72	
Tegangan (MPa)	Alternate	84,7	25,7
	Midrange	60,3	40,3
Faktor Keamanan		1,48	3,86

Pemilihan Bearing

Berikut ini adalah penyebab-penyebab kegagalan *bearing* yang pernah terjadi secara rinci, yaitu:

1. Arah putar motor terbalik, gaya aksial dari pompa sentrifugal mengakibatkan *bearing* C pecah.
2. Arah putar motor terbalik yang mengakibatkan *bearing* B pecah.
3. Besi ikut masuk dalam aliran dan menumbuk pompa sentrifugal yang mengakibatkan *bearing* C pecah.

4. Aliran pelumas tersumbat yang mengakibatkan *bearing* C meleleh.

Bearing yang akan dipilih pada perancangan *gearbox* kali ini akan mengacu pada standar SKF. Berdasarkan standar SKF, *rolling bearing* yang mampu menahan beban kombinasi yang baik adalah *spherical roller bearing*. Sedangkan untuk menahan beban aksial yang tinggi adalah *spherical roller thrust bearing*.

Sebelum memilih *bearing* berdasarkan katalog SKF, terlebih dahulu dilakukan perhitungan gaya ekuivalen yang terjadi dan *design life*. Setelah itu, besar *catalogue rating life* dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$C_{10} = a_f P \left[\frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0)(1 - R_D)^{1/b}} \right]^{1/a} \quad (10)$$

Maka, berdasarkan data masukan dan parameter yang telah dihitung sebelumnya didapat besar *catalogue rating life* statik dan dinamik untuk *bearing* A sebesar

$$C_{10, \text{dyn}} = 1626,19 \text{ kN}$$

$$C_{10, \text{stat}} = 1626,19 \text{ kN}$$

untuk *bearing* B sebesar

$$C_{10, \text{dyn}} = 1107,39 \text{ kN}$$

$$C_{10, \text{stat}} = 1080,53 \text{ kN}$$

untuk *bearing* C sebesar

$$C_{10, \text{dyn}} = 782,24 \text{ kN}$$

$$C_{10, \text{stat}} = 782,24 \text{ kN}$$

dan untuk *bearing* D sebesar

$$C_{10, \text{dyn}} = 3078,53 \text{ kN}$$

$$C_{10, \text{stat}} = 10773,02 \text{ kN}$$

Tabel 7 merupakan tabel tipe *bearing* yang dipilih.

Tabel 7 Data Pemilihan Bearing

Bearing	Titik A	Titik B	Titik C	Titik D
Jenis	Spherical Roller Bearing			Spherical Roller Thrust Bearing

Tipe	22 334	22 326	24 034	29 35 2E	29 45 2E
------	-----------	-----------	-----------	----------------	----------------

Modifikasi Gearbox Housing

Geometri *gearbox housing* dirancang berdasarkan geometri motor listrik dan pompa sentrifugal. Selain digunakan sebagai *housing*, *gearbox housing* digunakan juga sebagai peralatan pendinginan karena dioperasikan di dalam laut sehingga berkontak secara langsung dengan air laut. Oleh karena itu, material yang digunakan harus dapat meneruskan panas yang dihasilkan *gearbox* ke air laut dengan baik, dapat menahan laju korosi yang tinggi akibat air laut, dan menahan beban yang diakibatkan oleh arus air laut.

Material yang digunakan untuk *gearbox housing* adalah AISI 1010 yang memiliki kemampuan perpindahan panas yang baik dan umum digunakan pada *housing gearbox*. Lalu, material ini tentunya diberikan perlakuan khusus agar tahan terhadap korosi. Perlakuan khusus yang akan diberikan pada material AISI 1010 adalah dengan melakukan galvanisasi, yaitu memberikan lapisan seng pelindung sehingga baja terlindung dari karat. Material ini dipilih dengan mempertimbangkan kekuatan, ketersediaan, dan keterbuatannya.

Perancangan Sistem Pendinginan

Sebelum dilakukan perancangan sistem pendinginan, terlebih dahulu dilakukan analisis dan verifikasi terkait kemampuan pendinginan *gearbox* saat ini. Pertama-tama, perhitungan panas yang dihasilkan oleh *gearbox* dihitung. Berikut ini merupakan persamaan perhitungan panas yang dihasilkan oleh *bearing* berdasarkan standar SKF.

$$q_{\text{bearing}} = 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \mu P d \cdot n \quad (11)$$

Maka berdasarkan data masukan dan parameter yang telah dihitung sebelumnya,

didapat panas yang dihasilkan *bearing* A, B, C, dan D sebesar

$$q_{bearing} = 5,81kW$$

Berdasarkan hasil pengujian dan operasi di lapangan, pada umumnya roda gigi miring memiliki rentang efisiensi sebesar 94% - 98%. Diasumsikan bahwa rugi-rugi daya yang terjadi semuanya dilepaskan sebagai panas, maka dipilih efisiensi sebesar 94% yang memiliki rugi-rugi terbesar yaitu 6%. Maka, besar panas yang dihasilkan oleh roda gigi sebesar

$$q_{gear} = 6\% \times 1255kW = 75,3kW$$

Jadi, panas total yang dilepaskan oleh *gearbox* sebesar

$$q_{loss} = q_{gear} + q_{bearing} = 81,11kW$$

Saat ini *Gearbox* menggunakan aliran air laut secara natural sebagai media pendinginan utama. Berdasarkan data di lapangan, kecepatan arus air laut minimum di sekitar Sumatera Selatan sebesar 0,066 m/s. Namun, setelah dilakukan analisis perpindahan panas dengan menggunakan hukum pendinginan Newton, panas yang dihasilkan *gearbox* tidak dapat didinginkan sepenuhnya oleh air laut.

Besar kecepatan arus air laut minimum agar dapat mendinginkan panas yang dihasilkan *gearbox* dapat dihitung dengan menentukan Reynold, Nuselt, dan koefisien konveksi berdasarkan persamaan berikut:

$$R_{eL} = \frac{\rho_s \cdot v_s \cdot L}{\mu_s} \quad (12)$$

$$N_{uL} = 0,0296 \cdot R_e^{4/5} \cdot P_r^{1/3} \quad (13)$$

$$h = N_{uL} \cdot \frac{k_s}{L} \quad (14)$$

Dengan menggunakan persamaan 12, 13, dan 14, maka didapat besar kecepatan arus air laut minimum sebesar

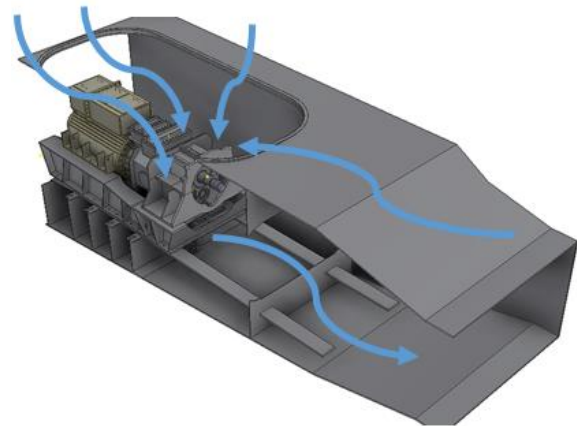
$$v_s = 0,9 \frac{m}{s}$$

Untuk memperoleh kecepatan arus air laut sebesar 0,9 m/s, maka ditambahkan

pompa yang berfungsi untuk meningkatkan kecepatan air laut, yang posisinya ditempatkan di sekitar *gearbox* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 9.

Gambar di bawah ini merupakan ilustrasi aliran pendinginan melalui air laut. Adapun metode pendinginan yang diaplikasikan pada *gearbox* yaitu

- Sirkulasi minyak pelumas
- Pendinginan air laut yang meliputi:
 - Konveksi air laut
 - Konveksi paksa pompa air laut



Gambar 7 Ilustrasi Aliran Air Laut di Dalam Ladder

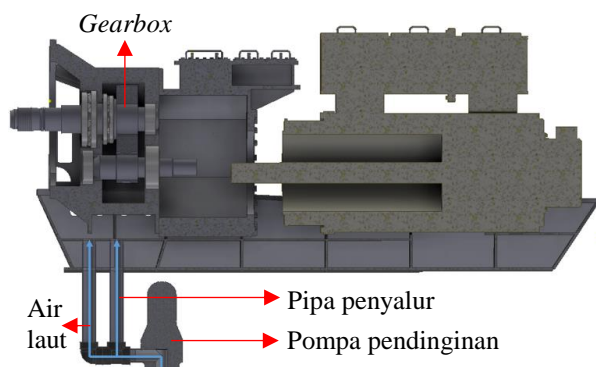
Dengan melakukan analisis perpindahan panas, analisis laju aliran, dan kemudian melakukan perhitungan pemilihan pompa didapat hasil rancangan sistem pendinginan yang dirangkum pada Tabel 8 di bawah ini.

Tabel 8 Sistem Pendinginan Hasil Rancangan

Sistem Pendinginan		
Metode Pendinginan	Sirkulasi minyak pelumas	
	Pendinginan air laut	
Jenis Pelumas		MASRI RG 150
Pompa	Minyak Pelumas	Kracht Gear Pump
	Air Laut	Grundfos Submersible Pump
	Konveksi air laut	10,82

Kemampuan Pendinginan (kW)	secara natural	
	Konveksi paksa pompa air laut	70,25

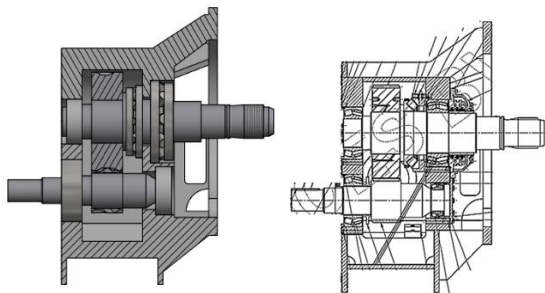
Lalu, Gambar 9 merupakan hasil rancangan sistem pendinginan yang dilakukan.



Gambar 8 Hasil Rancangan Sistem Pendinginan

Perbandingan Hasil Rancangan dengan Eksisting

Setelah komponen-komponen utama gearbox seperti roda gigi, poros, dan bearing telah dirancang dan dibuat *solid model*-nya, selanjutnya komponen-komponen dirakit. Gambar 10 merupakan perbandingan antara gearbox hasil perancangan ulang dengan gearbox yang saat ini digunakan oleh PT. Timah (Persero) Tbk.



Gambar 9 Gambar Potongan Gearbox. Gearbox Hasil Perancangan Ulang (kiri); Existing Gearbox (kanan)

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perancangan ulang yang telah dilakukan, didapatkan hasil rancangan ulang *submersible dredge pump gearbox* dengan rincian sebagai berikut:

- Hasil analisis dan verifikasi roda gigi *pinion* dan *driven* adalah sebagai berikut:
 - Roda gigi eksisting masih memenuhi kriteria
 - Tidak dilakukan perancangan ulang roda gigi
- Hasil analisis dan verifikasi poros masukan dan keluaran yang telah memenuhi kriteria-kriteria yang telah ditentukan adalah sebagai berikut:
 - Poros eksisting masih memenuhi kriteria yang telah ditentukan
 - Terdapat modifikasi yang mengikuti ukuran *bearing*
- Hasil perhitungan dan penentuan tipe *bearing* pada titik A, B, C, dan D yang telah memenuhi kriteria yang telah ditentukan adalah sebagai berikut:
 - Bearing* eksisting tidak mampu menahan beban yang terjadi
 - Tipe *bearing* yang digunakan berbeda dengan eksisting
 - Bearing* hasil pilihan dapat menahan beban yang terjadi
- Berikut ini merupakan keterangan hasil modifikasi *gearbox housing* diantaranya:
 - Tidak ada perubahan pada dimensi luar *housing*
 - Terdapat modifikasi pada bagian dalam *housing*
 - Direkomendasikan penggunaan material AISI 1010 Galvanized Steel
- Hasil perancangan sistem pendinginan yang telah memenuhi kriteria-kriteria yang telah ditentukan adalah sebagai berikut:
 - Kemampuan pendinginan eksisting tidak memenuhi kebutuhan
 - Media pendinginan yang digunakan masih sama

- Sistem pendinginan hasil rancangan memanfaatkan konveksi paksa yang dihasilkan pompa

Referensi

- [1] H. I. Wibowo, "Sebuah Cerita," 24 November 2014. [Online]. Available: <http://sebuahcerita27.blogspot.co.id/2014/11/catatan-perjalanan-menyapa-tambang.html> . [Diakses 2 Maret 2016].
- [2] P. Timah, Dokumentasi Gearbox, 2015.
- [3] E. S. IHC, General Arrangement Plan, 2011.
- [4] P. Timah, Rencana Modifikasi BWD Kundur 1.
- [5] P. S. IHC, Arrangement, 2011.
- [6] R. G. Budynas dan K. Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design Ninth Edition, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [7] P. Timah, History Kerusakan BWD Kundur 1, 2015.
- [8] D. Dolkemade, "Kundur 1 Bucket Wheel Dredge Project," 2011.
- [9] "www.elginfasteners.com," Elgin Fastener Group, [Online]. Available: <http://elginfasteners.com/resources/materials/material-specifications/alloy-steel-grade-4320/> . [Diakses 17 April 2016].
- [10] "www.azom.com," AZO Materials, [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772> . [Diakses 17 April 2016].
- [11] SKF, SKF Spherical Roller Bearings, 2016.
- [12] SKF, SKF Spherical Roller Thrust Bearings, 2016.
- [13] "National Centers for Environmental Information," National Oceanic and Atmospheric Administration, [Online]. Available: <https://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/GOMclimatology/gomregcl.pl?parameter=t> . [Diakses 4 April 2016].
- [14] "Grundfos Product Center," Grundfos USA, [Online]. Available: <https://product-selection.grundfos.com/catalogue.html> . [Diakses 12 Mei 2016].
- [15] G. Maitra, Handbook of Gear Design Second Edition, Tata McGraw-Hill, 2011.
- [16] F. Incropera, T. Bergman, L. Adrienne dan D. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer Seventh Edition, Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [17] A. Basuki, "Aspek Material Dalam Perancangan," 2015.
- [18] H. Surbakti, "Pemodelan Pola Arus di Perairan Pesisir Banyusin, Sumatera Selatan," 2011.
- [19] Pertamina, "Industrial Gear Oils," *Pertamina Lubricants Guide*, 2016.