

PERANCANGAN MESIN CENTRIFUGAL CASTING UNTUK PIPA STANDAR ANSI B36.19 UKURAN 20 INCHI PRODAK NO. 10s

¹Ilyas muhammad fadhil, S.T, ² Aji gumilar S.T., M.T., I.P.M

^{1,2} Teknik Mesin .Fakultas Teknologi Manufaktur Unjani, Indonesia

*Corresponding Author e-mail: Ilyas.muhammad.fadhil99@gmail.com, aji.gumilar@lecture.unjani.ac.id

Article History

Received: September

Revised: September

Published: October

Key Words:

Centrifugal Casting
Machine, Machine
Design, Safety
Factor, Work
Efficiency.

Abstract: The title of this research is the design of a centrifugal casting machine for ANSI B36.19 standard pipe size 20 inches product no.10s. The background of this research is, because there are still some shortcomings in the existing centrifugal casting machine. The shortcomings are in work efficiency, where the shortcomings are the design of the machine that is too large, and the motor power is too excessive. The purpose of this study is to design a centrifugal casting machine that is more efficient and optimal in terms of performance. The author uses the Pahl and Beitz method in designing this centrifugal casting machine. The scope of this centrifugal machine research includes the design of the main components, determining the required motor power, and calculating the safety factor. The results of this study indicate that the centrifugal casting machine for ANSI B36.19 standard pipe size 20 inches product no.10s has been in accordance with the objectives. The result of this design is a machine design made using drawing software, determining the ideal motor used, and the safety factor value that is within the safe limit of use. The SIEMENS 1LE0101-2AC43-400B4 motor is the suggested choice of motor used for the centrifugal casting process. The safety factor value obtained is between 0 until 30.

Kata Kunci:

Effisiensi Kerja, Mesin
Centrifugal Casting,
Perancangan Mesin,
Safety Factor.

Abstrack: Judul penelitian ini adalah perancangan mesin centrifugal casting untuk pipa standar ANSI B36.19 ukuran 20 inchi prodak no.10s. Latar belakang penelitian ini adalah, karena masih ditemukan beberapa kekurangan pada mesin centrifugal casting yang telah ada. Kekurangan tersebut terdapat pada efisiensi kerja, dimana kekurangan tersebut adalah desain mesin yang terlalu besar, dan daya motor yang terlalu berlebih. Tujuan dari penelitian ini adalah, untuk merancang sebuah mesin centrifugal casting yang lebih efisien dan optimal dari segi kinerja. Penulis menggunakan metoda Pahl and Beitz dalam melakukan perancangan mesin centrifugal casting ini. Cakupan penelitian mesin centrifugal ini, meliputi desain komponen utama, penentuan daya motor yang dibutuhkan, dan perhitungan faktor keamanan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa mesin centrifugal casting untuk pipa standar ANSI B36.19 ukuran 20 inchi prodak no.10s telah sesuai dengan tujuan. Hasil dari perancangan ini adalah sebuah desain mesin yang dibuat dengan menggunakan software gambar, penntuan motor yang ideal diginakan, dan nilai safety factor yang masuk kedalam batas aman penggunaan. Motor SIEMENS 1LE0101-2AC43-400B4, menjadi saran pilihan motor yang digunakan untuk proses centrifugal casting. Nilai safety factor yang didapat adalah diantara 0 sampai dengan 30.

Pendahuluan

Salah satu perusahaan besar pabrikasi logam di Indonesia adalah PT. Krakatau Steel. Pengecoran menjadi salah satu proses manufaktur yang dilakukan dalam pabrikasi logam, terutama jenis centrifugal casting. Pentingnya proses pengecoran dan penggunaan mesin centrifugal casting di PT. Krakatau Steel, membuat PT. Krakatau Steel melakukan evaluasi teratur terhadap kinerja dari mesin tersebut. Perkembangan teknologi dan tingginya persaingan antar industri manufaktur, membuat hal tersebut perlu dilakukan oleh PT. Krakatau Steel.

Dalam evaluasi yang dilakukan oleh PT. Krakatau Steel terhadap mesin centrifugal casting, ternyata masih ditemukan beberapa kekurangan Kekurangan tersebut diantaranya

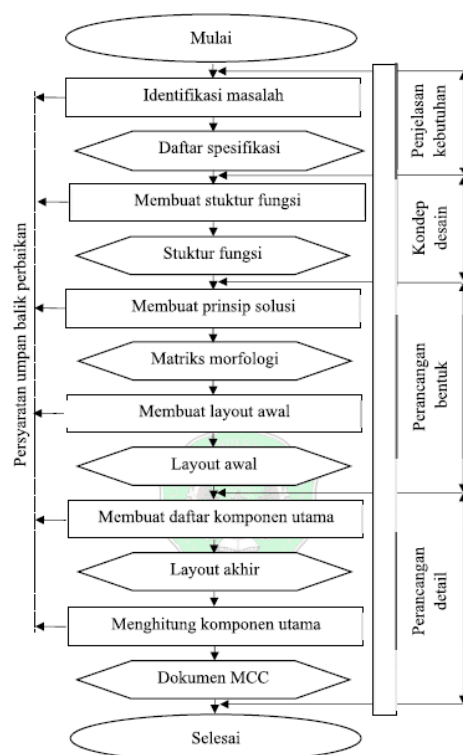


adalah, sistem transmisi yang rentan terkena tumpahan logam cair, dan konstruksi mesin yang terlalu rumit sehingga memerlukan area kerja yang cukup luas. Dari temuan kekurangan-kekurangan tersebut, PT. Krakatau Steel melakukan rencana perancangan ulang untuk mesin centrifugal casting. Dari latar belakang diatas, penulis telah menentukan beberapa rumusan masalah dalam melakukan perancangan mesin centrifugal casting. Rumusan masalah tersebut diantaranya, bagaimana melakukan perancangan yang dapat menghasilkan rancangan mesin centrifugal casting sesuai dengan target dan kriteria yang diharapkan oleh PT. Krakatau Steel.

Tujuan dilakukan perancangan mesin centrifugal casting untuk pipa standar ANSI B36.19 size 20 inchi produk no. 10.s adalah untuk mendapatkan desain mesin centrifugal casting yang optimal dari segi desain dan efisiensi kerja, serta untuk mendapatkan daya motor yang ideal. Dengan demikian, diharapkan ketika tujuan penelitian tersebut terpenuhi, dapat menjadi solusi untuk kekurangan-kekurangan mesin centrifugal casting yang telah ada. Dengan adanya penelitian yang dilakukan tersebut, penulis berharap bahwa penelitian ini dapat menjadi solusi bagi permasalahan yang sedang dihadapi oleh PT. Krakatau Steel. Penulis berharap solusi ini dapat menjadi salah satu faktor yang dapat mendorong kenaikan produktifitas di PT. Krakatau Steel. Harapan juga muncul dari penulis untuk para peneliti khususnya mahasiswa program strata-1 teknik mesin. Penulis berharap penelitian ini dapat menjadi gambaran dan referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya dalam bidang konstruksi dan perancangan.

Metode Penelitian

Metode penelitian yang dijadikan referensi bagi penulis dalam penelitian ini adalah, metode perancangan Pahl & Beitz. Dalam metode perancangan Pahl & Beitz, terdapat beberapa tahapan yang harus diselesaikan oleh penulis. Tahapan-tahapan tersebut diantaranya, tahapan penjelasan kebutuhan, tahapan konsep desain, tahapan perancangan bentuk, dan tahapan perancangan detail. Berikut adalah diagram perancangan yang dilakukan oleh penulis.



Gambar 1. Diagram alir perancangan mesin *centrifugal casting*

1. Tahap penjelasan kebutuhan

Tahap ini merupakan tahap pertama yang dilakukan dalam metoda perancangan Pahl & Beitz. Dalam tahap ini dilakukan identifikasi permasalahan-permasalahan yang ada, dan dilakukan juga identifikasi untuk solusi yang diharapkan oleh pengguna. Tahap pertama ini akan menghasilkan dua kriteria solusi dari pengguna, yakni kriteria kebutuhan (D) dan kriteria keinginan (W). Berikut adalah kriteria hasil dari tahapan pertama.

Tabel 1. Kriteria keinginan dan kebutuhan pengguna

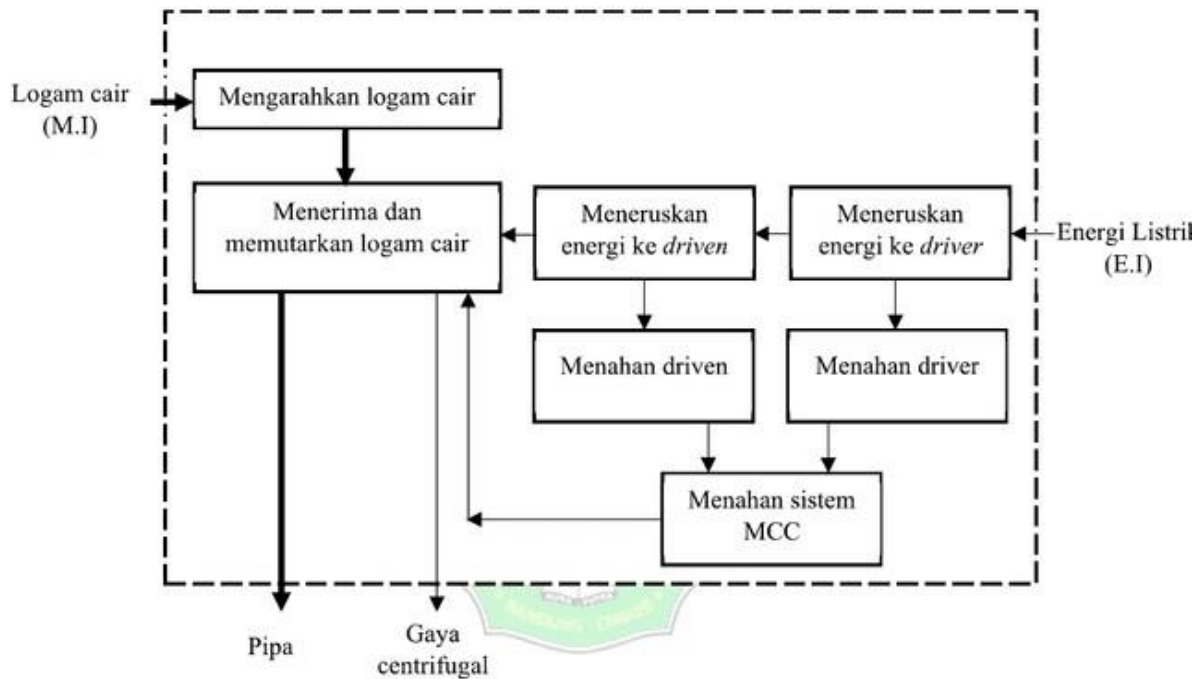
No	Tuntutan Perancangan	Peryaratan	Tingkat kebutuhan
1	Energi	Menggunakan tenaga motor listrik	W
		Panjang lebih dari 3000 mm	D
2	Geometri	Lebar lebih dari 550 mm	D
		Tinggi mesin lebih 600 mm	W
3	Gaya	Mempunyai gaya <i>centrifugal</i>	D
4	Keselamatan	Konstruksi kokoh	D
5	Produksi	Suku cadang murah dan mudah didapat	W
6	Perawatan	Perawatan yang mudah	D
		Perawatan berkala	W
7	Transmisi	Menggunakan transmisi yang mudah dioperasikan	W

2. Tahap konsep desain

Tahap ini merupakan tahap penentuan fungsi kerja dari mesin yang akan dirancang. Dalam tahap konsep desain, perancang perlu memulai dengan membuat sebuah struktur dan sub struktur fungsi mesin. Struktur fungsi mesin adalah gambaran secara umum, yang menjelaskan bagaimana mesin tersebut dapat bekerja. Sub struktur fungsi mesin adalah penjelasan detail terkait cara kerja mesin tersebut.



Gambar 2. Struktur mesin *centrifugal casting*



Gambar 3. Sub sturktur mesin *centrifugal casting*

3. Tahap perancangan bentuk




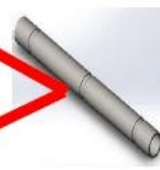





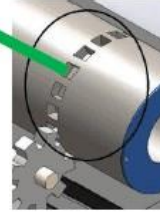
Tahapan ini adalah tahapan untuk menentukan komponen yang memiliki prinsip solusi dari struktur dan sub struktur fungsi mesin yang telah ditentukan. Ditentukan beberapa pilihan komponen, untuk melakukan perbandingan terhadap hasil mesin tersebut. Komponen dipilih berdasarkan keutamaan fungsi, dan pendekatan untuk mencapai tujuan. Pilihan komponen dalam tahap perancangan bentuk, disajikan ddengan matriks morfologi.

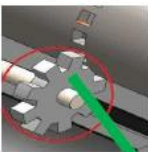

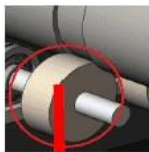

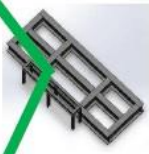



Matriks morfologi adalah sebuah teknik penyajian komponen yang digunakan untuk memnuat kelompok danmengevaluasi ide atau konsep perancangan. Dalam matriks morfologi, komponen disajikan berdasarkan jumlah varian yang telah ditentukan, lalu dipasangkan sesuai dengan tujuan utama dari mesin yang akan dirancang.

Tabel 2. Matriks morfologi mesin *centrifugal casting*

Prinsip solusi Sub fungsi	1	2	3
Mengarahkan logam cair	<p>Tutup depan</p> 		
Menerima dan memutar logam cair	<p>Cetakan 1</p> 	<p>Cetakan 2</p> 	<p>Cetakan 3</p> 
Meneruskan energi ke <i>driver</i>	<p>v-belt</p> 		
Menahan driver	<p>SKF-UCP316</p> 		
Meneruskan energi ke <i>driven</i>	<p>Ring</p> 	<p>alur</p> 	<p>Gigi</p> 

Tabel 3. Evaluasi matriks morfologi mesin *centrifugal casting*

Prinsip solusi Sub fungsi	1	2	3
Mengarahkan logam cair	TUTUP DEPAN 		
Menerima dan memutar logam cair	CETAKAN 	CETAKAN 	CETAKAN 
Meneruskan energi ke driver	 Belt	 FCL	
Menahan driver	 SUPPORT		
Meneruskan energi ke driven	RING 	ARM 	GIGI 

Prinsip solusi / Sub fungsi	1	2	3
Menahan driven	RODA GIGI 	ROL 	ROL 
Menahan sistem MCC	BLOCK BAJA + RANGKABAJA 	RANGKA BAJA 	BLOCK BAJA 
Penggerak utama	MOTOR LISTRIK 	KOMPRESOR 	

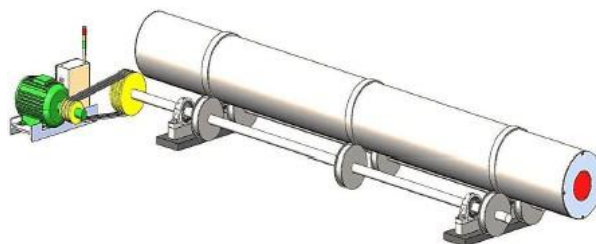
Keterangan warna garis :

Garis orange = varian 1

Garis merah = varian 2

Garis hijau = varian 3

Dari hasil pengelompokan komponen pada table matriks morfologi, penulis mendapat 3 varian rancangan. Varian rancangan tersebut adalah sebagai berikut;



Gambar 4. Varian 1 mesin *centrifugal casting*

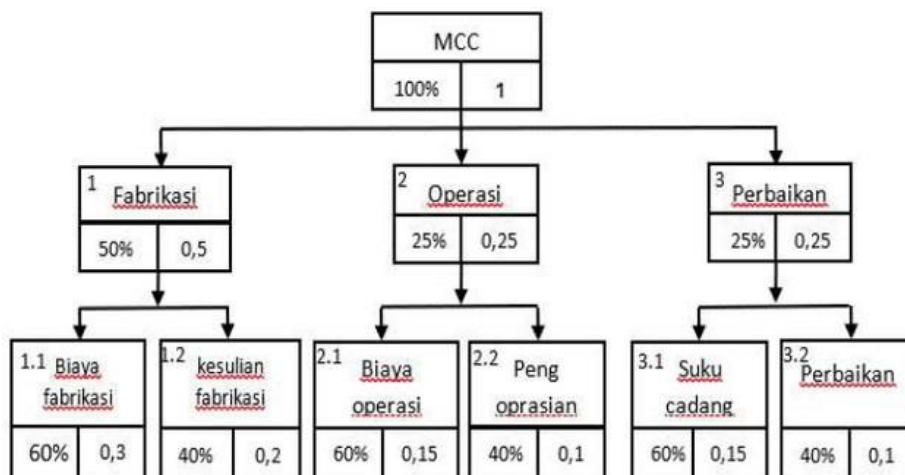


Gambar 5. Varian 2 mesin *centrifugal casting*



Gambar 5. Varian 3 mesin *centrifugal casting*

Setelah mendapatkan sketsa varian untuk mesin *centrifugal casting*, perancang melakukan evaluasi dengan memberika penilaian terhadap setiap varian. Penilaian dilakukan berdasarkan beberapa kriteria yang telah ditentukan, sesuai dengan harapan dan tujuan yang akan dicapai. Penilaian juga dilakukan dengan melakukan diskusi dan wawancara terhadap pengguna, dengan membandingkan kelebihan dan kekurangan dari setiap varian.

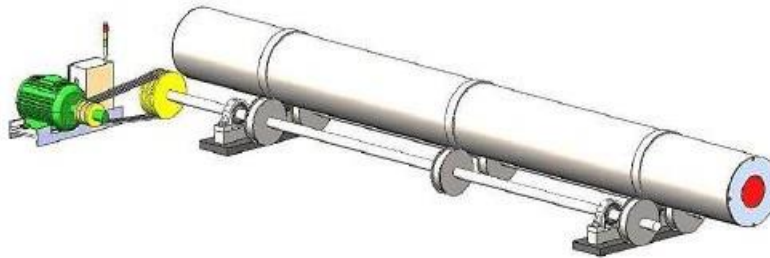


Gambar 6. Diagram penilaian varian mesin *centrifugal casting*

Tabel 4. Penilaian varian mesin *centrifugal casting*

No	Alternatif MCC	Bobot	Parameter	Varian1		Varian 2		Varian 3	
				N	N×B	N	N×B	N	N×B
1	Fabrikasi	0,3	0: sangat mahal						
			1: mahal						
			2: tidak terlalu mahal	3,5	1,05	2	0,6	2,2	0,75
			3: relatif murah						
2	Operasi	0,15	0: sangat mahal						
			1: mahal						
			2: tidak terlalu mahal	3,25	0,48	2,25	0,33	3	0,45
			3: relatif murah						
3	Perawatan	0,1	0: sangat sulit						
			1: sulit						
			2: tidak teralalu sulit	3,5	0,35	2,5	0,25	3	0,3
			3: relatif mudah						
4	Perbaikan	0,1	0: sangat mahal						
			1: mahal						
			2: tidak terlalu mahal	3,5	1,05	2	0,6	2,2	0,75
			3: relatif murah						
5	Operasi	0,2	0: sangat sulit						
			1: sulit						
			2: tdk teralalu sulit	3,5	0,7	1,5	0,33	2,75	0,55
			3: relatif mudah						
6	Perawatan	0,15	0: sangat mahal						
			1: mahal						
			2: tidak terlalu mahal	3,25	0,48	2,25	0,33	3	0,45
			3: relatif murah						
7	Perbaikan	0,1	0: sangat sulit						
			1: sulit						
			2: tidak teralalu sulit	3,5	0,35	2,5	0,25	3	0,3
			3: relatif mudah						
JUMLAH				1	3,53	1,86	2,65		

Setelah melakukan evaluasi terhadap varian mesin *centrifugal casting*, perancang memutuskan satu varian terpilih untuk dilakukan analisis lanjut. Varian terpilih adalah varian yang memberikan nilai terbesar dari segi kelebihan, dan yang paling mendekati sesuai dengan harapan dan keinginan pengguna. Berikut adalah varian terpilih untuk mesin *centrifugal casting*.



Gambar 7. Varian terpilih mesin *centrifugal casting*.

Hasil dan Pembahasan

Pengaturan Kewenangan Pengawasan dalam UU No. 17 Tahun 2023

Setelah mendapatkan varian terpilih, langkah selanjutnya adalah melakukan tahap perancangan detail. Perancangan detail yaitu melakukan analisis terhadap setiap komponen dari varian yang terpilih. Analisis dalam penelitian ini, dilakukan dengan dua metoda. Metoda yang dilakukan adalah dengan perhitungan manual dan pengujian dengan menggunakan *software* analisis *engineering*.

1. Perhitungan massa

Perhitungan massa dilakukan guna mendapatkan data yang akan digunakan dalam analisis *software*. Perhitungan massa dilakukan dengan mengidentifikasi massa semua komponen, berdasarkan referensi yang telah didapat oleh perancang. Referensi tersebut didapat dari katalog prodak, data survey lapangan, dan data dari website penjualan prodak tersebut.

Tabel 5. Massa komponen utama

No	Nama Komponen	Material	Massa (kg)
1	Pipa <i>Stainless Steel</i> 20inci <i>Schedule 10s</i>	<i>AISI 316L</i> <i>Stainless Steel</i>	419,55
2	Cetakan/Drum	<i>SS400</i>	1577,28
3	Tutup Belakang	<i>ASTM A36</i>	21,34
4	Tutup Depan	<i>ASTM A36</i>	17,48
5	Ring Rol	<i>ASTM A36</i>	17,89
6	Rol	<i>ASTM A36</i>	63,69
7	Poros	<i>AISI 316 Annealed</i> <i>Stainless Steel</i>	345,58
8	<i>SKF UCP320</i>		32
9	Dudukan <i>SKF-UCP316</i>	<i>ASTM A36</i>	49,41
10	Dudukan MCC	<i>ASTM A36</i>	157,16
11	<i>1LE0101-2AC43-4BB4</i>	<i>Cast Iron</i>	220
12	<i>Flexible flanged shaft</i> <i>copling</i>	<i>SS400</i>	94,7

2. Perhitungan daya dan pemilihan sabuk

2.1. Perhitungan gaya sentrifugal

Hal pertama yang dilakukan adalah, melakukan perhitungan jumlah massa pada cetakan. Penjumlahan massa pada cetakan, dapat dilakukan dengan membuat table terlebih dahulu. Setelah melakukan pembuatan table, perhitungan dilanjutkan dengan mengubah kecepatan putar menjadi kecepatan sudut, dilanjutkan dengan melakukan perhitungan gaya sentrifugal.

Tabel 6. Massa komponen cetakan

Komponen	Massa (Kg)
Pipa <i>Stainless Steel</i>	
20inci <i>Schedule 10s</i>	419,55
Cetakan/Drum	1577,28
3xRing Rol	53.67
Jumlah	2050,50

$$\omega = \frac{2\pi \times 1000 \text{ rpm}}{60} \quad (1)$$

$$\omega = \text{kecepatan sudut}$$

$$\omega = \frac{2\pi \times 1000 \text{ rpm}}{60} = 104,66 \text{ rad/s}$$

$$F_c \text{ Ring Roll} = (m \text{ total} \times \text{kecepatan sudut}^2 \times v \text{ cetakan}) \quad (2)$$

$$F_c \text{ Ring Roll} = \text{gaya sentrifugal (N)}$$

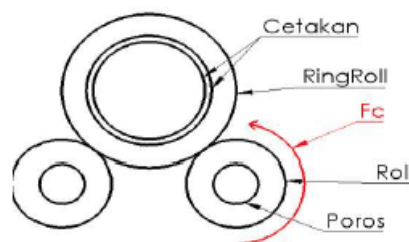
$$m \text{ total} = \text{massa total produk (kg)}$$

$$v \text{ cetakan} = \text{kecepatan cetakan (rpm)}$$

$$F_c \text{ Ring Roll} = (2050,50 \times 104,66^2 \times 0,289)$$

$$F_c \text{ Ring Roll} = 6491111,61 \text{ N}$$

2.2. Perhitungan kecepatan putar pada poros



Gambar 8. Ilustrasi ring dan roll

Tabel 7. Massa poros dan roll

Komponen	Massa (Kg)
poros	345,58
3xRol	190,74
Jumlah	536,32

$$F_c \text{ Ring Roll} = (m \text{ total} \times \text{kecepatan sudut}^2 \times v \text{ roll}) \quad (2)$$

$$F_c \text{ Ring Roll} = \text{gaya sentrifugal (N)}$$

$$m \text{ total} = \text{massa total prodak (kg)}$$

$$v \text{ cetakan} = \text{kecepatan cetakan (rpm)}$$

$$6491111,61 = (536,32 \times \omega^2 \times 0,165)$$

$$\omega = 214 \text{ rad/s}$$

$$214,85 = \frac{2\pi \times v}{60} \quad (3)$$

$$v = 2050,70 \text{ rpm}$$

2.3. Menghitung momen inersia poros

$$I = \frac{1}{2} \times m \text{ poros} \times D^2 \quad (4)$$

$$I = \text{Inersia}$$

$$m \text{ poros} = \text{massa poros (kg)}$$

$$D^2 = \text{Diameterporos (m)}$$

$$I = \frac{1}{2} \times 345,58 \times 0,04^2$$

$$I = 0,27 \text{ kg.m}^2$$

2.4. Menghitung torsi pada poros

$$\tau = I \cdot l \quad (5)$$

$$\tau = \text{Torsi (N.m)}$$

$$I = \text{Inersia poros (N)}$$

$$l = \text{Panjang poros (m)}$$

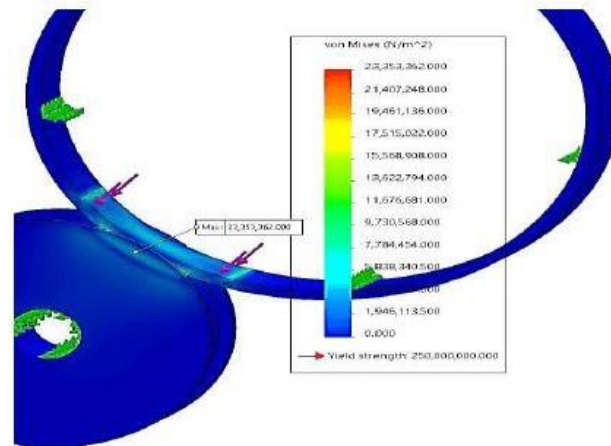
$$\tau = I \cdot l$$

$$\tau = 0,27 \text{ kg} \cdot 214,85 \text{ m}$$

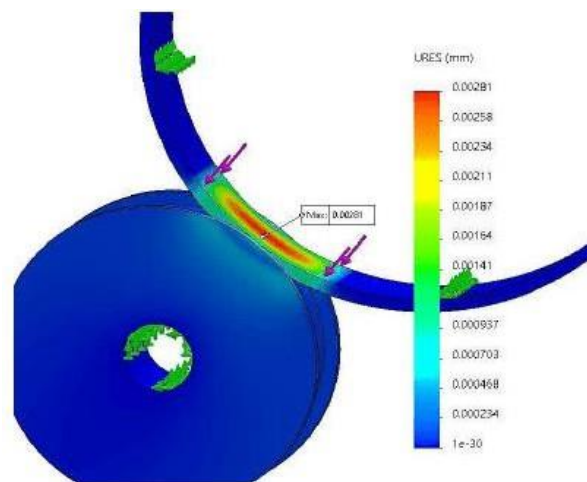
$$\tau = 60,16 \text{ N.m}$$

2.5. Analisis *ring roll* mesin *centrifugal casting*

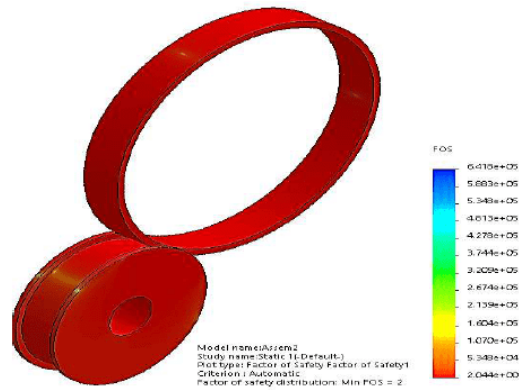
Analisis dilakukan menggunakan software engineering analisis. Hal tersebut dilakukan dengan memasukkan data yang telah didapat dari perhitungan, pada desain gambar yang telah dibuat. Dari hasil analisis, didapat bahwa *ring roll* masih dalam keadaan mampu menahan tegangan yang diberikan. Selain tegangan, analisis juga dilakukan dengan mencari nilai pergeseran (*displacement*) yang terjadi pada ring dan roll. Hasil analisis dari pergeseran (*displacement*), juga menunjukkan hasil yang relative aman. Terakhir adalah melakukan pemeriksaan nilai *safety factor* pada *ring roll*. Nilai untuk *safety factor* didapat 2.



Gambar 9. Analisis tegangan *ring* dan *roll* mesin *centrifugal casting*



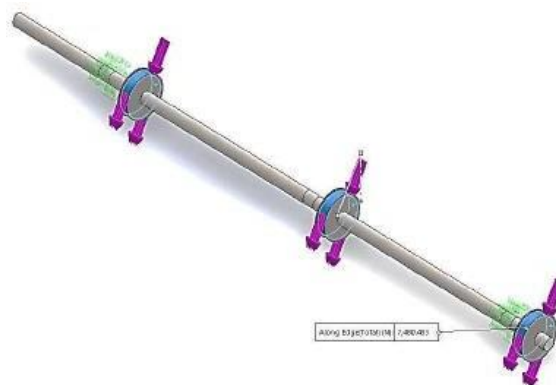
Gambar 10. Analisis pergeseran (*displacement*) *ring* dan *roll* mesin *centrifugal casting*



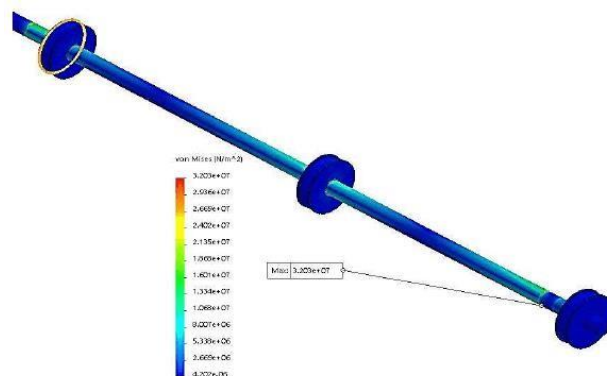
Gambar 11. Analisis factor keamanan (*safety factor*) ring dan roll mesin *centrifugal casting*

2.6. Analisis poros mesin *centrifugal casting*

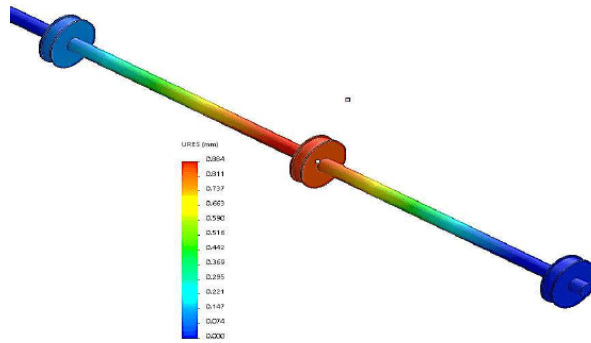
Dari hasil perhitungan, didapat bahwa gaya yang diterima poros secara terpusat adalah sebesar 7480,483 N. Gaya tersebut lalu dimasukkan pada simulasi *software engineering* analisis, untuk mengetahui kekuatan poros tersebut.



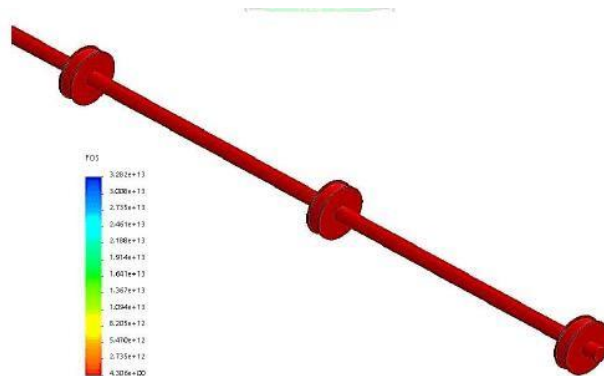
Gambar 12. Pembebanan pada poros mesin *centrifugal casting*



Gambar 13. Analisis tegangan poros mesin *centrifugal casting*



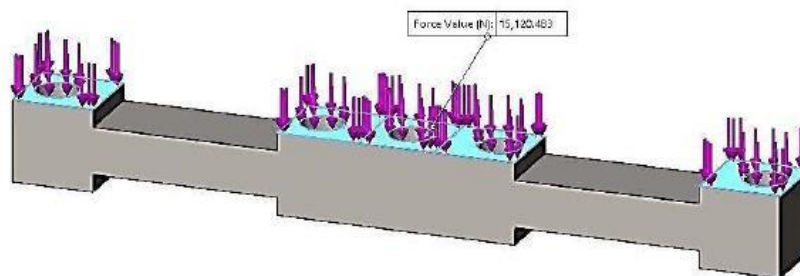
Gambar 14. Analisis perpindahan (*displacement*) poros mesin *centrifugal casting*



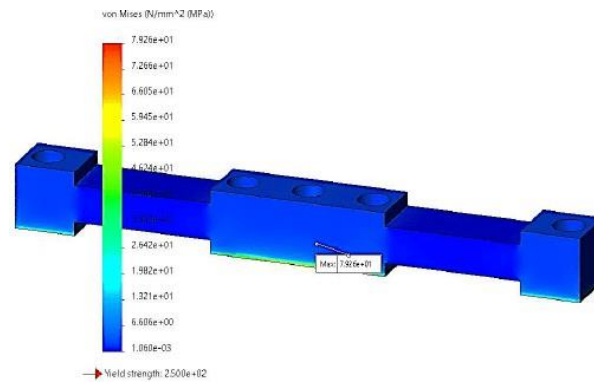
Gambar 15. Analisis faktor keamanan (*safety factor*) poros mesin *centrifugal casting*

2.7. Analisisudukan bantalan mesin *centrifugal casting*

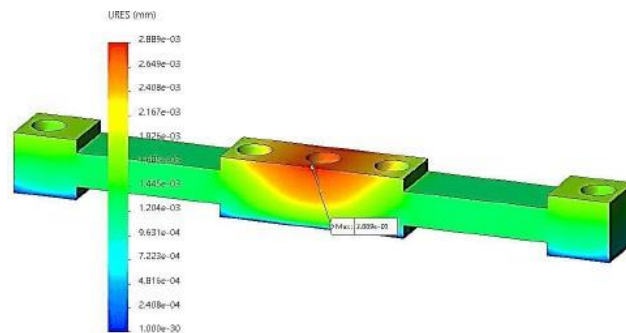
Tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis untuk dudukan bantalan pada mesin centrifugal casting. Analisis dilakukan dengan tiga pemeriksaan, yaitu pemeriksaan tegangan, perpindahan, dan faktor keamanan. Material yang digunakan untuk dudukan bantalan mesin centrifugal casting adalah SKF-UCP316. Material tersebut memiliki kekuatan sebesar 400 Mpa.



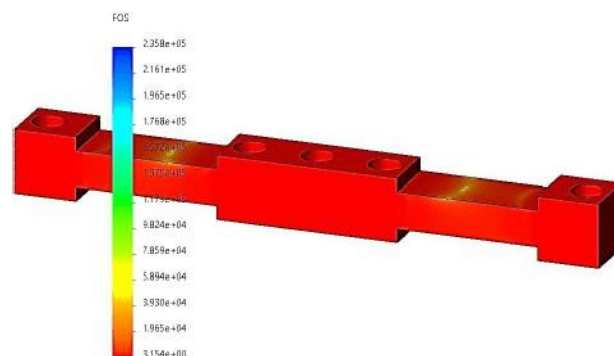
Gambar 16. Pembebanan pada dudukan bantalan mesin *centrifugal casting*



Gambar 17. Analisis teganganudukan bantalan mesin *centrifugal casting*



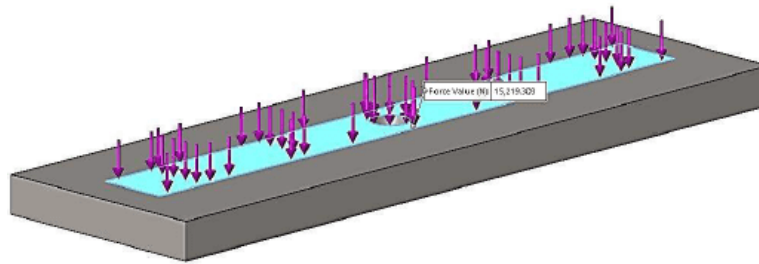
Gambar 18. Analisis pergeseran (*displacement*)udukan bantalan mesin *centrifugal casting*



Gambar 19. Analisis factor keamanan (*safety factor*)udukan bantalan *centrifugal casting*

2.8. Analisisudukan mesin *centrifugal casting*

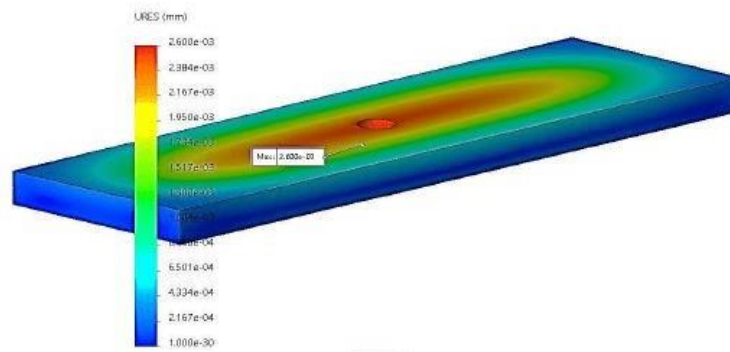
Tahapan terakhir adalah melakukan analisis untuk dudukan mesin *centrifugal casting*. Analisis juga dilakukan dengan tiga pemeriksaan, yaitu pemeriksaan tegangan, pergeseran, dan faktor keamanan. Material yang digunakan untuk dudukan mesin *centrifugal casting* adakah ATSM A36. Material tersebut memiliki kekuatan sebesar 420 Mpa.



Gambar 20. Pembebanan padaudukan mesin *centrifugal casting*



Gambar 21. Analisis tegangan dudukan mesin *centrifugal casting*



Gambar 22. Analisis pergeseran (*displacement*) dudukan mesin *centrifugal casting*



Gambar 23. Analisis faktor keamanan (*safety factor*) dudukan mesin *centrifugal casting*.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perancangan mesin centrifugal casting untuk produk pipa standar ANSI B36.19 dengan ukuran 20 inci, penulis menyimpulkan bahwa desain mesin centrifugal casting yang terpilih adalah varian pertama. Motor ideal yang digunakan untuk mesin ini adalah motor merek Siemens dengan nomor pesanan 1LE0101-2AC43-400B4, yang memiliki daya sebesar 15 kW. Selain itu, faktor keamanan untuk komponen utama mesin centrifugal casting menunjukkan bahwa ring roll memiliki faktor keamanan sebesar 2, poros sebesar 4,3, dudukan bantalan sebesar 3,1, dan dudukan mesin sebesar 20. Nilai tersebut termasuk dalam batas aman dengan rentang faktor keamanan untuk mesin centrifugal casting yang berada di antara 0 hingga 30.

Dalam penelitian ini, penulis mengakui adanya beberapa kekurangan dan memberikan saran untuk penelitian lanjutan dengan topik serupa. Penulis menyarankan untuk meningkatkan jumlah data pengambilan hingga lebih dari lima, guna meningkatkan akurasi hasil perhitungan. Selain itu, disarankan untuk menggunakan dua perangkat lunak analisis teknik guna memperoleh perbandingan nilai yang lebih akurat. Penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini, termasuk orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan dukungan dan doa, Universitas Jenderal Achmad Yani (Unjani) yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan penelitian ini, seluruh dosen Program Studi Teknik Mesin Unjani yang menjadi rekan diskusi dalam menyelesaikan penelitian, PT. Krakatau Steel yang bersedia menjalin kerja sama demi kelancaran penelitian ini, serta mahasiswa Teknik Mesin atas nama M. Ilyas yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian. Penulis sangat menghargai bantuan dan dukungan dari semua pihak yang telah terlibat.

Referensi

- Agus, S. (2018). Optimasi Desain. Malang: Universitas Widyagama Malang.
- Federal, P. (2017, December 12). About Federal Pipe Centrifugal Casting Machine Co., Ltd. Retrieved from Federal Pipe Centrifugal Casting Machine Co., Ltd: <https://www.centrifugalcastmachine.com/about/>
- Shigley, J., & Mitchell, L. D. (1986). Perencanaan Teknik Mesin (Mechanical Engineering Design); Alih Bahasa Gandhi Harahap. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Joko, A. P. (2010). APLIKASI METODE ELEMEN HINGGA (MEH) PADA STRUKTUR RIB BODI ANGKUTAN PUBLIK. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Tekno, L. U. (2015). Training Modul Autodesk Inventor Professional 2015. Jakarta: PT. Tekno Logika Utama.
- J. Ahmad, A. ul Hasan, T. Naqvi, and T. Mubeen, "A Review on Software Testing and Its Methodology," *Manag. J. Softw. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 32–38, 2019, doi: 10.26634/jse.13.3.15515.
- T. Miyachi, M. Iida, T. Fukuda, and T. Arai, "Nondimensional maximum pressure gradient of tunnel compression waves generated by offset running axisymmetric trains," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 157, 2016.
- S. B. Yao, D. L. Guo, Z. X. Sun, D. W. Chen, and G. W. Yang, "Parametric design and optimization of high speed train nose," *Optimization and Engineering*, vol. 17, no. 3, 2016.
- X. Sun, X. Han, C. Dong, and X. Li, "Applications of Aluminum Alloys in Rail Transportation." [Online]. Available: www.intechopen.com.
- "An Introduction to Structural Optimization."
- Y. C. Ku et al., "Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to

- minimize the tunnel micro-pressure wave,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 42, no. 6, 2010.
- J. Lee and J. Kim, “Approximate optimization of high-speed train nose shape for reducing micropressure wave,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 35, no. 1, 2008.
- S. Krajnović, “Shape optimization of high-speed trains for improved aerodynamic performance,” *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*, vol. 223, no. 5, 2009.
- S. Krajnović, “Shape optimization of high-speed trains for improved aerodynamic performance,” *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*, vol. 223, no. 5, 2009.
- K. Cui, X. P. Wang, S. C. Hu, T. Y. Gao, and G. Yang, “LNEE 148 -Shape Optimization of High-Speed Train with the Speed of 500kph.”
- S. Yao, D. Guo, and G. Yang, “Three-dimensional aerodynamic optimization design of high-speed train nose based on GA-GRNN,” *Sci China Technol Sci*, vol. 55, no. 11, 2012.
- Y.-C. Ku, M.-H. Kwak, H.-I. Park, and D.-H. Lee, “Multi-Objective Optimization of High-Speed Train Nose Shape Using the Vehicle Modeling Function,” 2010.
- V. V. Vytla, P. G. Huang, and R. C. Penmetsa, “Multi Objective Aerodynamic Shape Optimization of High Speed Train Nose Using Adaptive Surrogate Model,” 2010. *Surya I, dan Heru S B R / EE Conference Series 06 (2023)641*
- S. B. Yao, D. L. Guo, Z. X. Sun, G. W. Yang, and D. W. Chen, “Multi-objective optimization of the streamlined head of high-speed trains based on the Kriging model,” *Sci China Technol Sci*, vol. 55, no. 12, 2012.
- “ANSYS Workbench Documentation.” E. A. Shams and A. Rizaner, “A novel support vector machine based intrusion detection system for mobile ad hoc networks,” *Wirel. Networks*, vol. 24, no. 5, pp. 1821–1829, 2018, doi: 10.1007/s11276-016-1439-0.