

ANALISIS TEGANGAN KOMPONEN POROS, RODA GIGI LURUS DAN RODA GIGI MUKA MESIN MOLEN SEMEN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Aditya Hutomo, Agung Setyo Darmawan

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Transmisi adalah proses meneruskan dan mengubah kecepatan putaran suatu komponen menjadi kecepatan putaran yang diinginkan pada elemen transmisi lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil antara perhitungan matematis (manual) dengan metode elemen hingga pada perancangan roda gigi lurus dan memeriksa keamanan komponen hasil rancangan. Pengujian dilakukan pada poros dengan bahan S30C, spur gear dan face gear dengan bahan besi cor nodular. Proses pemodelan komponen menggunakan software Solidworks 2020 dan analisis metode elemen hingga menggunakan software Ansys 2021 R1. Hasil perhitungan matematis (manual) didapat nilai tegangan geser poros 1,611 N/mm², tegangan maksimum spur gear sebesar 69,033 N/mm², dan tegangan maksimum face gear sebesar 19,265 N/mm². Hasil analisa metode elemen hingga didapat nilai tegangan geser poros 1,6613 N/mm², tegangan maksimum spur gear sebesar 71,827 N/mm², dan tegangan maksimum face gear sebesar 20,221 N/mm². Perbandingan proses simulasi dengan perhitungan matematis (manual) didapat penyimpangan maksimum sebesar 4,727 %. Harga penyimpangan ini dapat diterima karena lebih kecil dari 5 % dan komponen hasil rancangan aman digunakan karena tegangan yang bekerja lebih kecil dari tegangan yang diizinkan.

Kata Kunci: Transmisi, Roda Gigi Lurus, Metode Elemen Hingga, Ansys

Abstract

Transmission is the process of forwarding and changing the rotational speed of a component to the desired rotational speed of other transmission elements. This study aims to compare the results between mathematical calculations (manual) with the finite element method in straight gear design and check the safety of the components of the design results. Tests were carried out on shafts made of S30C, spur gears and face gears made of nodular cast iron. The component modeling process uses Solidworks 2020 software and the finite element method analysis uses Ansys 2021 R1 software. The results of mathematical calculations (manually) show that the shaft shear stress is 1,611 N/mm², the maximum spur gear stress is 69,033 N/mm², and the face gear maximum stress is 19,265 N/mm². The results of finite element analysis showed that the shaft shear stress was 1,6613 N/mm², the maximum spur gear stress was 71,827 N/mm², and the face gear maximum stress was 20,221 N/mm². Comparison of the simulation process with mathematical (manual) calculations obtained a maximum deviation of 4,727 %. The value of this deviation is acceptable because it is less than 5% and the designed components are safe to use because the working voltage is less than the permissible stress.

Keywords: Transmission, Spur Gear, Finite Element Method, Ansys

1. PENDAHULUAN

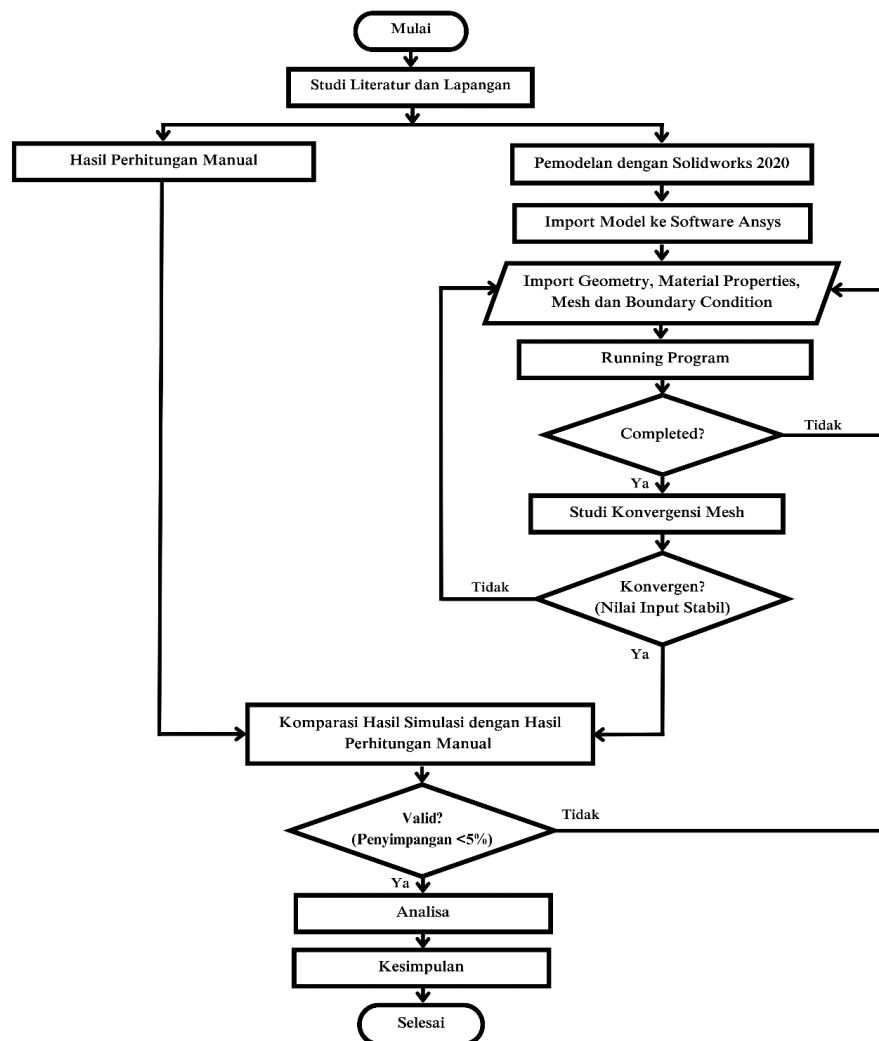
Mesin molen semen merupakan alat yang digunakan untuk melakukan proses pengadukan semen dan pasir, dengan menggerakkan drum yang dilengkapi pisau spiral yang bergerak secara rotasional dengan bantuan motor penggerak yang ditransmisikan.

Sistem transmisi bertujuan untuk meneruskan daya ke mesin pemakai daya, sehingga pemakai daya tersebut dapat bekerja menurut kebutuhan yang diinginkan. Salah satu elemen komponen yang digunakan untuk sistem transmisi adalah roda gigi. Dibandingkan dengan jenis elemen sistem transmisi lain, roda gigi memiliki performa yang dapat mencegah slip, dan daya yang ditransmisikan lebih besar. Sistem kerja roda gigi dalam proses transmisi daya adalah dengan meneruskan daya akibat adanya singgungan komponen yang berputar.

Pada penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya menganalisa tegangan pada roda gigi lurus dari material stainless steel dengan dikenai daya maksimum 10kW, dengan kecepatan putaran 3000 rpm. Metode yang diimplementasikan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan persamaan Hertz dan analisis metode elemen hingga memakai Ansys 16.0. Dari hasil analisa perhitungan dengan persamaan Hertz dan simulasi didapatkan nilai tegangan maksimum yang terjadi sebesar 4,206 MPa dengan deformasi maksimal sebesar 0,0006689 mm. Berdasarkan penelitian ini, maka kombinasi antara perhitungan secara matematis manual dan proses simulasi menggunakan metode elemen hingga memiliki nilai yang selaras dan dapat digunakan sebagai metode komparasi.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah perhitungan matematis manual dilakukan berdasarkan variabel hitung yang telah ditentukan, kemudian diproses dengan *software Microsoft Excel*, Pemodelan dari komponen transmisi roda gigi lurus menggunakan *Software SolidWorks 2020* dan simulasi permasalahan menggunakan *Software Ansys*. Dari kedua hasil dilakukan komparasi perhitungan konvensional dan pemodelan komputerisasi hasil simulasi. Adapun prosedur penelitian yang akan dilakukan maka dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses perhitungan manual dan simulasi dari komponen Shaft, Spur Gear dan Face Gear dijelaskan sebagai berikut.

3.1 Perhitungan Manual

Proses perhitungan manual yang digunakan untuk mentransfer Daya (P) sebesar 750 Watt dan putaran (N) 1450 rpm akan dibahas pada bab ini. Pembahasan perhitungan manual meliputi perhitungan *shaft*, *spur gear* dan *Face gear*.

3.1.1 Perhitungan Manual Shaft

Proses perhitungan poros pada roda gigi lurus dengan diameter (Dp) sebesar 25 mm seperti berikut :

1. Torsi yang ditransmisikan dihitung dengan persamaan berikut (Khurmi dan Gupta, 2005).

$$T = \frac{P \times 60}{2 \times \pi \times N} \quad \dots(1)$$

$$T = \frac{750 \text{ Watt} \times 60}{2 \times 3,14 \times 1450 \text{ rpm}}$$

$$T = 4,941796 \text{ Nm}$$

$$T = 4941,796 \text{ Nmm}$$

2. Tegangan geser yang terjadi pada poros, dihitung dengan persamaan berikut (Khurmi dan Gupta, 2005).

$$\tau_P = \frac{16 \times T}{\pi \times (D_P)^3} \quad \dots(2)$$

$$\tau_P = \frac{16 \times 4941,796 \text{ Nmm}}{3,14 \times (25\text{mm})^3}$$

$$\tau_P = 1,611 \text{ N/mm}^2$$

3. Poros menggunakan material S30C (baja karbon untuk konstruksi mesin) (Sularso, 2004) dengan kekuatan tarik bahan (σ_b) sebesar 568,786 N/mm², dengan diketahui faktor keamanan bahan sebagai berikut :

$$s_{f_1} = 6,0$$

$$s_{f_2} = 2,0$$

Dimana :

s_{f_1} = Faktor keamanan dari batas kekuatan tarik bahan, untuk material S30C dengan pengaruh massa dan paduan baja digunakan faktor keamanan sebesar 6,0 (Sularso, 2004).

s_{f_2} = Faktor keamanan yang digunakan jika poros terdapat alur pasak atau dibuat bertangga, faktor keamanan diambil antara nilai 1,3-2,0 (Sularso, 2004).

Maka tegangan geser bahan yang diizinkan, τ_b , dihitung dengan persamaan berikut (Sularso, 2004).

$$\tau_b = \frac{\sigma_b}{s_{f_1} \times s_{f_2}} \quad \dots(3)$$

$$\tau_b = \frac{568,786 \text{ N/mm}^2}{6,0 \times 2,0}$$

$$\tau_b = 47,399 \text{ N/mm}^2$$

Jadi, $\tau_p < \tau_b$ atau $1,611 \text{ N/mm}^2 < 47,399 \text{ N/mm}^2$.

Material S30C aman digunakan sebagai komponen poros.

3.1.2 Perhitungan Manual Spur Gear & Face Gear

Spur Gear menggunakan material besi cor nodular dengan kekuatan tarik (σ_u) 704,101 N/mm², kekuatan luluh (σ_y) 510 N/mm² dan modulus elastisitas (E) 9358,31 N/mm².

Diketahui :

Lebar Spur Gear (b) = 10 mm

Jumlah gigi pada Spur Gear (T_p) = 12

Jumlah gigi pada Face Gear (T_G) = 43

Modul gigi (m) = 5,5

Sudut tekan gigi (θ) = 20°

Direncanakan sebagai berikut :

1. Perbandingan reduksi, dihitung dengan persamaan berikut (Khurmi dan Gupta, 2005).

$$G = \frac{T_G}{T_P} \quad \dots(4)$$

$$G = \frac{43}{12}$$

$$G = 3,5833$$

2. Diameter pitch circle, dihitung dengan persamaan berikut (Khurmi dan Gupta, 2005).

- Diameter pitch circle *spur gear*

$$D_P = m \times T_P \quad \dots(5)$$

$$D_P = 5,5 \times 12$$

$$D_P = 66 \text{ mm}$$

- Diameter pitch circle *face gear*

$$D_G = m \times T_G \quad \dots(6)$$

$$D_G = 5,5 \times 75$$

$$D_G = 412,5 \text{ mm}$$

3. Jarak antara pusat roda, dihitung dengan persamaan berikut (Sularso, 2002).

$$L = \frac{D_G + D_P}{2} \quad \dots(7)$$

$$L = \frac{236,5 \text{ mm} + 66 \text{ mm}}{2}$$

$$L = 151,25 \text{ mm}$$

4. Kecepatan pitch line *pinion*, dihitung dengan persamaan berikut (Sularso, 2002).

- Kecepatan pitch circle *spur gear*

$$v_P = \frac{\pi \times D_P \times N}{60} \quad \dots\dots(8)$$

$$v_P = \frac{3,14 \times 66 \text{ mm} \times 1450 \text{ rpm}}{60 \times 1000}$$

$$v_P = 5,0083 \text{ m/s}$$

- Kecepatan pitch circle *face gear*

$$v_G = \frac{\pi \times D_G \times N}{60}$$

$$v_G = \frac{3,14 \times 236,5 \text{ mm} \times 1450 \text{ rpm}}{60 \times 1000}$$

$$v_G = 17,946 \text{ m/s}$$

5. Beban tangensial, dihitung dengan persamaan berikut (Khurmi dan Gupta, 2005).

- Beban tangensial *spur gear*

$$W_{TP} = \frac{P}{v_P} \quad \dots\dots(9)$$

$$W_{TP} = \frac{372,85 \text{ Watt}}{5,0083 \text{ m/s}}$$

$$W_{TP} = 74,446 \text{ N}$$

- Beban tangensial *face gear*

$$W_{TG} = \frac{P}{v_G} \quad \dots\dots(10)$$

$$W_{TG} = \frac{372,85 \text{ Watt}}{17,946 \text{ m/s}}$$

$$W_{TG} = 20,775 \text{ N}$$

6. Faktor bentuk gigi, dihitung dengan persamaan berikut (Osakue & Anetor, 2016).

$$K_f = \frac{2}{\pi \sin 2\theta} \quad \dots\dots(11)$$

$$K_f = \frac{2}{3,14 \times \sin(2 \times 20^\circ)}$$

$$K_f = 0,854$$

7. Tegangan aksial yang diijinkan, dihitung dengan persamaan berikut (Thu & Min, 2018).

$$\sigma_i = \frac{\sigma_y}{S_f} \quad \dots(12)$$

$$\sigma_i = \frac{510 \text{ N/mm}^2}{2,68}$$

$$\sigma_i = 190,299 \text{ N/mm}^2$$

8. Interval Tegangan, dihitung dengan persamaan berikut (Osakue & Anetor, 2016).

- Interval Tegangan *spur gear*

$$\sigma_{HP} = \left[\frac{K_f \times W_{TP} \times (G \pm 1) \times E_P}{b \times D_P} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(13)$$

$$\sigma_{HP} = \left[\frac{0,854 \times 74,446 \text{ N} \times (6,25 \pm 1) \times 9358,31 \text{ N/mm}^2}{8,67 \text{ mm} \times 66 \text{ mm}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{HP} = 69,033 \text{ N/mm}^2$$

Jadi, $\sigma_{HP} < \sigma_i$ atau $69,033 \text{ N/mm}^2 < 190,299 \text{ N/mm}^2$. Material besi cor nodular aman digunakan sebagai komponen *pinion spur gear*.

- Interval Tegangan *face gear*

$$\sigma_{HG} = \left[\frac{K_f \times W_{TG} \times (G \pm 1) \times E_P}{b \times D_G} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(14)$$

$$\sigma_{HG} = \left[\frac{0,854 \times 20,775 \text{ N} \times (3,5833 \pm 1) \times 9358,31 \text{ N/mm}^2}{8,67 \text{ mm} \times 236,5 \text{ mm}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_{HG} = 19,265 \text{ N/mm}^2$$

Jadi, $\sigma_{HG} < \sigma_i$ atau $19,265 \text{ N/mm}^2 < 190,299 \text{ N/mm}^2$. Material besi cor nodular aman digunakan sebagai komponen *face gear*.

3.2 Perhitungan Simulasi

Hasil simulasi transmisi roda gigi molen semen menggunakan metode elemen hingga dengan komponen yang dianalisa berupa poros, spur gear dan face gear sebagai berikut :

3.2.1 Simulasi Poros

Proses dan hasil simulasi dari pemodelan poros menggunakan metode elemen hingga dibahas pada sub bab berikut.

3.2.2 Studi Konvergensi Poros

Dalam studi konvergensi pada poros dengan diameter (D_p) 25 mm, panjang 380,21 mm dan beban berupa torsi sebesar 4941,796 Nmm.

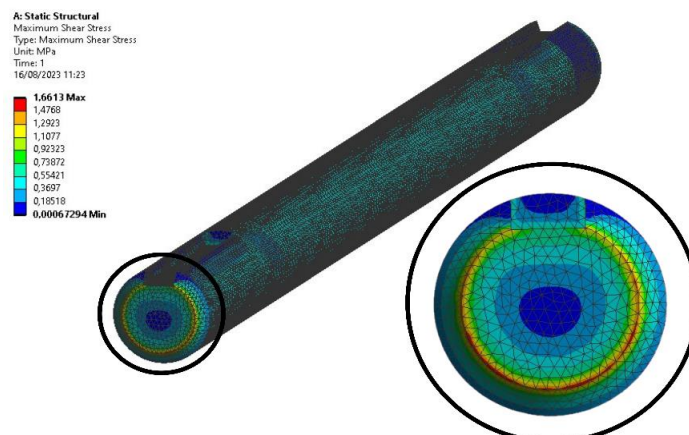
Data properti material yang digunakan pada komponen poros dengan material S30C diketahui Modulus elastisitas $206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, dengan poissons ratio 0,29 (Matweb, 2019).

Pada pengujian ini dibuat mesh dengan variasi ukuran 2; 1,8; 1,6; 1,4; 1,2; 1; dan 0,8 dalam pengujian ini diambil mesh ukuran 0,8 mm dengan tegangan geser pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Studi Konvergensi Ukuran Mesh Poros

Jumlah Elemen	Ukuran Mesh	Tegangan Geser Poros (N/mm^2)
44268	2	5,6946
62936	1,8	4,4927
80905	1,6	3,1611
100687	1,4	1,7699
243426	1,2	1,6613

Hasil simulasi *software* Ansys diperoleh distribusi tegangan geser sebesar $1,6613 \text{ N/mm}^2$, dengan hasil simulasi divisualisasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Visualisasi Tegangan pada Poros

3.2.3 Simulasi Spur Gear

Proses dan hasil simulasi dari pemodelan spur gear menggunakan metode elemen hingga dibahas pada sub bab berikut.

3.2.4 Studi Konvergensi Spur Gear

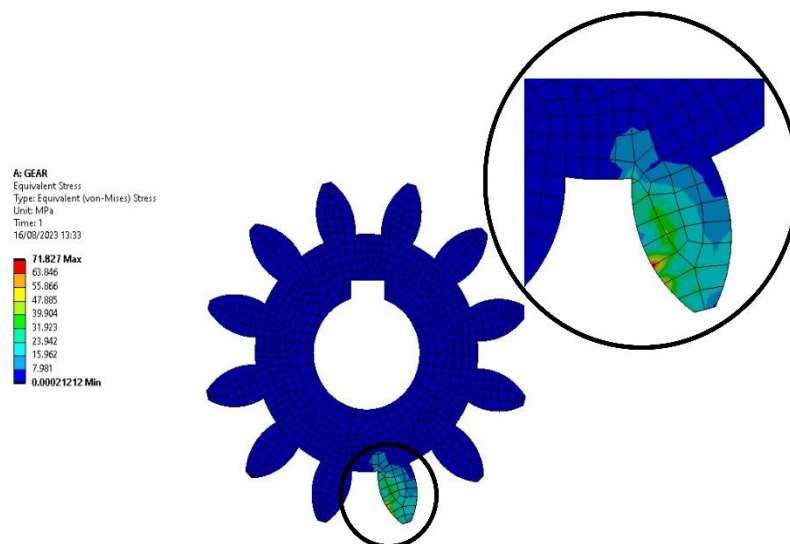
Dalam studi konvergensi pada spur gear dengan modul gigi (m) 5,5, jumlah gigi spur gear 12 gigi, lebar gigi (b) 10 mm, dan beban berupa gaya (W_{TP}) sebesar 74,446 N.

Pada pengujian ini dibuat mesh dengan variasi ukuran 2; 1,8; 1,6; dan 1,4 dalam pengujian ini diambil mesh ukuran 1,4 mm dengan hasil tegangan geser diperlihatkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Studi Konvergensi Ukuran Mesh Spur Gear

Jumlah Elemen	Ukuran Mesh	Tegangan Von Mises (N/mm ²)
22165	2	39,648
31710	1,8	55,151
46444	1,6	72,729
65645	1,4	71,827

Hasil simulasi software Ansys diperoleh distribusi tegangan von mises sebesar 71,827 N/mm², hasil simulasi divisualisasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Visualisasi Tegangan pada *Spur Gear*

3.2.5 Simulasi Face Gear

Proses dan hasil simulasi dari pemodelan face gear menggunakan metode elemen hingga dibahas pada sub bab berikut.

3.2.6 Studi Konvergensi Face Gear

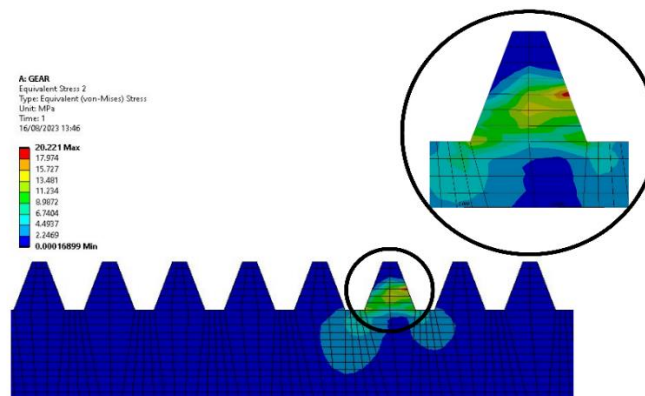
Dalam studi konvergensi pada spur gear dengan modul gigi (m) 5,5, jumlah gigi spur gear 43 gigi, lebar gigi (b) 10 mm, dan beban berupa gaya (W_{TG}) sebesar 20,775 N.

Pada pengujian ini dibuat mesh dengan variasi ukuran 2; 1,8; 1,6; dan 1,4 dalam pengujian ini diambil mesh ukuran 1,4 mm dengan hasil tegangan geser diperlihatkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Studi Konvergensi Ukuran Mesh Face Gear

Jumlah Elemen	Ukuran Mesh	Tegangan Von Mises (N/mm ²)
22165	2	24,66
31710	1,8	12,56
46444	1,6	20,279
65645	1,4	20,221

Hasil simulasi software Ansys diperoleh distribusi tegangan von mises sebesar 20,221 N/mm², hasil simulasi divisualisasikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Visualisasi Tegangan pada *Spur Gear*

3.2.7 Validasi perhitungan Manual dengan Simulasi

Penyimpangan dari hasil perhitungan tegangan geser secara manual dengan tegangan geser hasil simulasi diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Perhitungan Manual dengan Hasil Simulasi

No	Komponen	Tegangan Geser	Penyimpangan
----	----------	----------------	--------------

		Perhitungan Manual (N/mm ²)	Hasil Simulasi (N/mm ²)	(%)
1	Poros	1,611	1,6613	3,027
2	<i>Spur Gear</i>	69,033	71,827	3,889
3	<i>Face Gear</i>	19,265	20,221	4,727

Penyimpangan terbesar antara perhitungan manual dan hasil simulasi adalah 4,727%, penyimpangan ini lebih kecil dari 5% dan dapat diterima (Raptis dan Svaidis, 2018).

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis hasil penelitian antara perhitungan matematika (manual) dengan proses simulasi pada komponen transmisi roda gigi lurus maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

- Hasil perancangan transmisi roda gigi lurus dengan menggunakan perhitungan matematika (manual) didapatkan data sebagai berikut.
 - Poros, hasil perhitungan matematika (manual) didapat tegangan geser yang terjadi sebesar 1,611 N/mm².
 - Spur Gear*, hasil perhitungan matematika (manual) didapat tegangan maksimal yang terjadi sebesar 69,033 N/mm².
 - Face Gear*, hasil perhitungan matematika (manual) didapat tegangan maksimal yang terjadi sebesar 19,265 N/mm².
- Hasil perancangan transmisi roda gigi lurus dengan menggunakan simulasi dengan metode elemen hingga didapatkan data sebagai berikut.
 - Poros, hasil simulasi dengan software Ansys dapat diketahui tegangan geser yang terjadi sebesar 1,6613 N/mm².
 - Spur Gear*, hasil simulasi dengan software Ansys dapat diketahui tegangan maksimal yang terjadi sebesar 71,827 N/mm².
 - Face Gear*, hasil simulasi dengan software Ansys dapat diketahui tegangan maksimal yang terjadi sebesar 20,221 N/mm².
- Hasil pemeriksaan keamanan terhadap rancangan simulasi roda gigi didapatkan data sebagai berikut.

- a. Poros, nilai tegangan geser yang bekerja lebih kecil dari tegangan yang diizinkan pada material dengan nilai $1,6613 \text{ N/mm}^2 < 47,399 \text{ N/mm}^2$ Jadi, material S30C aman digunakan sebagai komponen poros.
- b. Spur Gear, nilai tegangan maksimal yang bekerja lebih kecil dari tegangan yang diizinkan pada material dengan nilai $71,827 \text{ N/mm}^2 < 190,299 \text{ N/mm}^2$ Jadi, material besi cor nodular aman digunakan sebagai komponen Spur Gear.
- c. Face Gear, nilai tegangan maksimal yang bekerja lebih kecil dari tegangan yang diizinkan pada material dengan nilai $20,221 \text{ N/mm}^2 < 190,299 \text{ N/mm}^2$. Jadi, material besi cor nodular aman digunakan sebagai komponen Face Gear.

4.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat digunakan untuk pertimbangan penelitian berikutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian masa pakai roda gigi komponen transmisi roda gigi molen semen.
2. Penelitian komponen roda gigi menggunakan variasi material lain.
3. Penelitian komponen roda gigi molen dengan jenis geometri lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, A. P., Ali, S., & Rathore, S. (2022). Finite element stress analysis for shape optimization of spur gear using ANSYS. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1147–1152.
- Arjuna, M., & Darmawan, A. S. (2021). Simulasi Besi Cor Nodular Sebagai Komponen Blok Rem Kereta Api Tipe T358 Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga.
- Baker, A. J., & Pepper, D. W. (2011). *Finite Elements 1-2-3*. McGraw-Hill Companies.
- Bayuseno, A. P. (2010). Penambahan Magnesium-Ferrosilikon Pada Proses Pembuatan Besi Cor Grafit Bulat: Evaluasi Terhadap Peningkatan Sifat Mekanik Dan Impak. *ROTASI*, 12(1), 43-46.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials and engineering* 9th edition. New York: Jonh Wiley and Sons Inc.
- Darmawan, Agung Setyo. 2020. *Ilmu Bahan Teknik*. Cetakan 1. Surakarta : Muhammadiyah University Press
- Darmawan, A. S., Anggono, A. D., Yulianto, A., Febriantoko, B. W., Masyrukan, M., & Hamid, A. (2022). Comparison of Microstructure, Yield Strength, Tensile Strength, and Modulus of Elasticity between Gray Cast Iron and Nodular Cast Iron. *Key Engineering Materials*, 935, 25-32.

- Darmawan, A. S., Yulianto, A., Masyrukan, P. I. P., & Jati, G. N. (2020). Shear yield strength, modulus of rigidity, and modulus of rupture of nodular cast iron on Magnesium Addition. *International Journal*, 8(6).
- Dwulat, R., & Janerka, K. (2023). Evaluation of the Metallurgical Quality of Nodular Cast Iron in the Production Conditions of a Foundry. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 18.
- Firth, A., & Long, H. (2010). A design software tool for conceptual design of wind turbine gearboxes. In *European Wind Energy Conference and Exhibition 2010, EWEC 2010* (Vol. 5, pp. 3568-3578). Sheffield.
- Gupta, K., & Chatterjee, S. (2018). Analysis of design and material selection of a spur gear pair for solar tracking application. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 789-795.
- Hidayat, N. (2013). *SolidWorks 3D Drafting and Design*. Bandung: Informatika.
- Iskandar, H., KIng, M. L., Ali, H., & Krisna, O. (2021). Perancangan Mesin Molen Cor Mini Dengan Kapasitas 50 Kg. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 9(1).
- Isworo, H., & Ansyah, P. R. (2018). *Metode elemen hingga*. Universitas Lambung Mangkurat.
- Jati, G. N., & Darmawan, A. S. (2019). Pengaruh Variasi Kandungan Magnesium (Mg) dalam Proses Pembuatan Besi Cor Nodular terhadap Kekuatan dan Kekakuan Puntir (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Khurmi, R. S., & Gupta, J. K. (2005). *A textbook of machine design*. S. Chand publishing.
- Long, H., Wu, J. Z., & Firth, A. (2011). Improving gearbox design and analysis for offshore wind turbines. *Applied Mechanics and Materials*, 86, 309-312.
- Mohammed, B., Park, T., Kim, H., Pourboghrat, F., & Esmaeilpour, R. (2018). The forming limit curve for multiphase advanced high strength steels based on crystal plasticity finite element modeling. *Materials Science and Engineering: A*, 725, 250-266.
- Naufal, M. I., & Irwanto, I. (2023). Motor Listrik 3 Fasa Sebagai Sistem Penggerak Motor Roll Pada Mesin Case Sealer di Pt. Matahari Megah. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(1), 32-45.
- Osakue, E. E., & Anetor, L. (2016). Spur gear design: Some new perspectives. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(9), 275-286.
- Prasetyo, A. D. A., Darmawan, I. A. S., & Patna Partono, S. T. (2021). Perancangan Ulang Transmisi Roda Gigi Lurus pada Sepeda Motor Honda Astrea Star 85, 8 cc Dengan Daya 6, 27 kW dan Putaran 7.500 rpm dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga dan Bahan Besi Cor Nodular (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).

- Raptis, K. G., & Savaidis, A. A. (2018). Experimental investigation of spur gear strength using photoelasticity. *Procedia Structural Integrity*, 10, 33-40.
- Setyawan, R. D., & Darmawan, A. S. (2019). Pengaruh Variasi Kandungan Magnesium (Mg) dalam Proses Pembuatan Besi Cor Nodular terhadap Kekuatan dan Kekakuan Tarik (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Sularso & Suga, K. (2004). Dasar perencanaan dan pemilihan elemen mesin. Jakarta: Pradya Paramita.
- Tangel, D., Tangkuman, S., & Luntungan, H. (2016). Aplikasi Spreadsheet Pada Perancangan Roda Gigi Lurus. *JURNAL POROS TEKNIK MESIN UNSRAT*, 5(2).
- Thu, M. P., & Min, N. L. (2018). Stress analysis on spur gears using ANSYS workbench 16.0. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 7(8), 208-213.
- Wankhede, A. (2015). Design, modification and analysis of concrete mixer machine. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(12), 6613-6616.
- Zhang, L., Qin, L., Qin, Z., & Chu, F. (2022). Energy harvesting from gravity-induced deformation of rotating shaft for long-term monitoring of rotating machinery. *Smart Materials and Structures*, 31(12), 125008.
- Zschippang, H. A., Weikert, S., Küçük, K. A., & Wegener, K. (2019). Face-gear drive: Geometry generation and tooth contact analysis. *Mechanism and Machine Theory*, 142, 103576.