

Perancangan alat uji roda gigi menggunakan metode VDI 2221

Dedi Rosa Putra Cupu^{a,1}, Efi Afrizal^a, Ibnu Kaldum^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru

¹dedi.cupu@lecturer.unri.ac.id

ABSTRACT

The transmission system is vital in automotive and industrial applications, including gears. Gears are the most widely transmission components used to transmit the power and rotational speed from the driver component to others. Power is transmitted by contact rolling between two contacting gear surfaces. The contacting area is relatively tiny enough to transmit very high power, resulting in high pressure on the contact surface of the gears. This causes failure on the gear surface, such as pitting and scuffing. To investigate the failures and their causes, a gear test rig is utilized, and this work aims to design a gear test rig using the VDI 2221 method. VDI 2221 is used due to its efficient and systematic design method from the product concept variants. Calculation and design of the components referred to Kiyokatsu Suga and Sularso. Static structural analysis was conducted to determine the strength and safety of the designed gear test. This study's result is a gear test rig design with a maximum von Mises stress of 19.47 MPa at the main frame. Then, a dynamic simulation was carried out, and this designed gear test rig produced a friction coefficient of 0.342.

Keywords: perancangan alat uji rodagigi, *gear test rig*, VDI 2221, analisis struktur dinamik

Received 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

PENDAHULUAN

Roda gigi merupakan komponen mesin yang digunakan untuk mentransmisikan daya dan gerak dari satu komponen penggerak (*driver*) ke komponen yang digerakkan (*driven*). Daya ditransmisikan oleh proses *rolling* kontak antara dua permukaan roda gigi yang bersinggungan. Pada turbin angin dan industri yang menggunakan transmisi roda gigi pada kecepatan rendah, biasanya dilengkapi dengan *planetary gear stage* yang beroperasi pada kecepatan rendah [1]. Transmisi daya berupa torsi yang sangat besar mengakibatkan timbulnya tekanan yang cukup tinggi pada permukaan kontak roda gigi. Hal ini menyebabkan kegagalan pada permukaan roda gigi seperti *micropitting*, *pitting* dan *wear* [1]. Kegagalan lain yang terjadi pada roda gigi adalah *scuffing* di mana salah satunya disebabkan oleh sistem pelumasan yang tidak tepat [2]. Untuk mengamati kegagalan yang terjadi pada roda gigi dan penyebabnya dilakukan pengujian menggunakan alat uji roda gigi atau disebut juga *gear test rig*. Alat uji ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi *lubricant* yang dipakai pada roda gigi seperti koefisien gesek (*coefficient of friction*) dan laju keausan (*wear rate*) yang terjadi pada gigi yang mengalami kontak [3] [4]. Martins et al [5] menggunakan alat uji roda gigi untuk mengevaluasi efisiensi transmisi roda gigi antara *lubricant* berbasis minyak ester dan *lubricant* berbasis minyak mineral yang dijual di pasaran.

Sebelum dilakukan manufaktur alat uji roda gigi, terlebih dahulu dibuat rancangan di mana hasil akhir dari perancangan adalah gambar teknik. Aspek-aspek yang harus dipertimbangkan pada saat melakukan perancangan adalah kenyamanan, kepraktisan, keselamatan/keamanan, kemudahan penggunaan, kemudahan perawatan, kemudahan perbaikan, dan kelayakan, serta keandalan, spesifikasi material, dan struktur atau sistem tenaga berdasarkan fungsinya [6]. Ada beberapa metode yang digunakan dalam konsep perancangan teknik, diantaranya adalah metode VDI 2221 yang digunakan pada penelitian ini. Metode VDI 2221 adalah metode yang dikembangkan oleh persatuan insinyur Jerman dengan pendekatan sistematis terhadap perancangan untuk sistem dan produk teknik [7]. Metode ini dipilih karena dapat memudahkan perancang merumuskan dan mengarahkan berbagai varian perancangan yang ada karena dalam metode tersebut ide-ide yang ada disusun secara efisien dan sistematis.

Setelah konsep perancangan selesai dilakukan dengan memilih salah satu desain berdasarkan matriks keputusan, maka dilakukan perhitungan dari masing-masing elemen yang digunakan seperti pemilihan daya dan kecepatan motor, dimensi dan material poros, bantalan (*bearing*) dan lain-lain. Adapun perhitungan elemen mesin merujuk kepada teori Kiyokatsu Suga and Sularso [8]. Analisis struktur dilakukan secara manual dan simulasi secara statik dengan

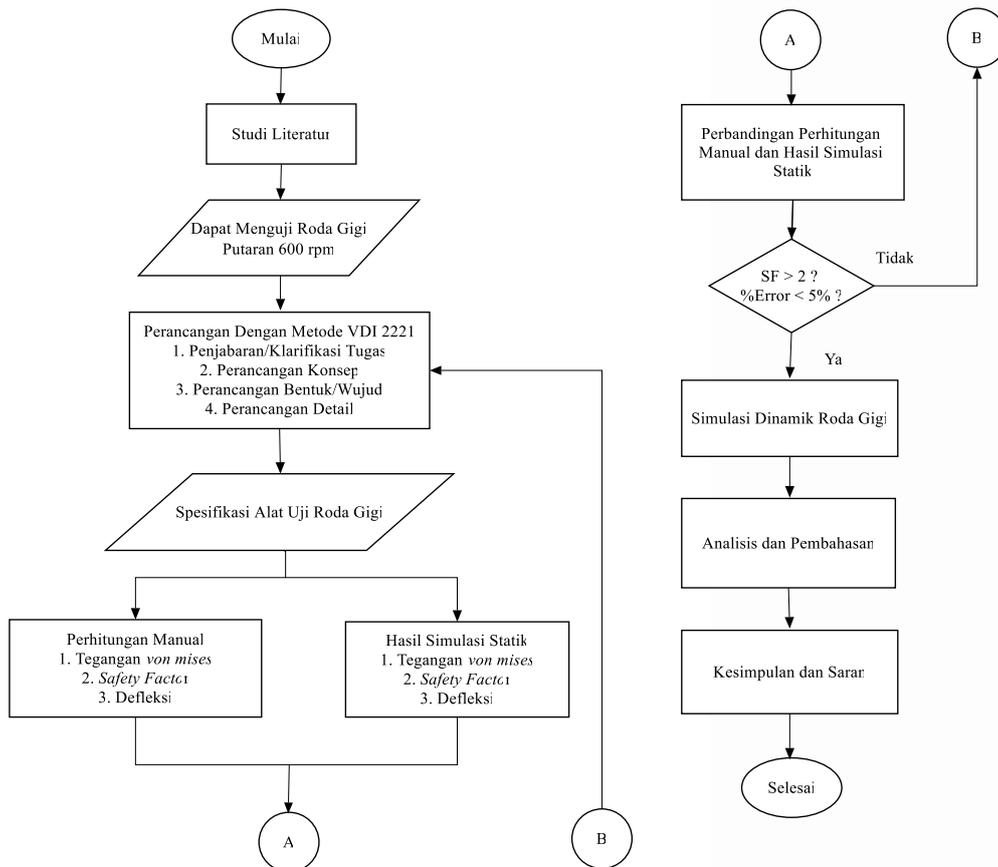
menghitung tegangan *von mises*, defleksi dan *safety factor*.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode Perancangan VDI 2221

Secara umum, prosedur penelitian dilaksanakan sesuai dengan diagram alir seperti pada Gambar 1. Perancangan dilakukan dengan menggunakan metode VDI 2221 dimana terdapat empat kegiatan yaitu: (i) penjabaran/klarifikasi tugas,

(ii) perancangan konsep, (iii) perancangan bentuk, dan (iv) perancangan detail. Langkah penjabaran tugas memuat daftar ide/keinginan untuk membuat uji roda gigi dengan spesifikasi sebagaimana tertuang dalam Tabel 1. Dari daftar ide tersebut maka disusun secara sistematis daftar lengkap spesifikasi awal alat dengan membagi menjadi dua kategori yaitu *Demand* (D) atau permintaan yang harus ada dan *Wishes* (W) atau yang diharapkan atau hal yang tidak harus ada seperti pada Tabel 2.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Daftar ide/kehendak alat uji roda gigi

No.	Daftar Ide/Kehendak
1	Menghasilkan alat uji yang dapat menguji roda gigi dengan mudah
2	Aman dalam pengoperasian alat uji
3	Material yang digunakan mudah didapatkan
4	Konstruksi alat uji sederhana dan mudah dalam perawatan
5	Biaya pembuatan alat uji murah
6	Proses pembuatan alat uji mudah
7	Mudah dan cepat dalam mengganti spesimen uji
8	Putaran spesimen roda gigi dapat dikontrol
9	Beban dapat diberikan

Tabel 2. Spesifikasi awal alat uji roda gigi

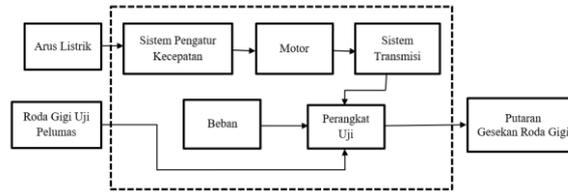
No.	Parameter	Spesifikasi	Demand (D)/Wishes (W)
1		Dimensi perancangan	D
2		Panjang	D
3	Geometri	Lebar	D
4		Tinggi	D
5		Tidak memerlukan tempat yang luas	W
6		Menggunakan motor listrik	D
7	Gaya	Beban dapat diberikan	D
8		Putaran spesimen roda gigi dapat dikontrol	D
9	Energi	Energi berasal dari listrik	D
10		Energi yang digunakan kecil	W
11		Material yang digunakan mudah didapatkan	D
12	Material	Material tahan lama	D
13		Komponen tidak mudah rusak	D
14		Ergonomi	Aman dalam pengoperasian alat uji
15	Perakitan	Mudah dan cepat dalam mengganti spesimen uji	D
16	Perawatan	Konstruksi alat uji sederhana dan mudah dalam perawatan	W
17	Biaya Produksi	Biaya pembuatan alat uji murah	W

Tabel 3. Abstraksi perancangan roda gigi

No.	Parameter	Spesifikasi	D/W
1		Dimensi perancangan	D
2	Geometri	Panjang	D
3		Lebar	D
4		Tinggi	D
5		Menggunakan motor listrik	D
6	Gaya	Beban dapat diberikan	D
7		Putaran spesimen roda gigi dapat dikontrol	D
8	Energi	Energi berasal dari listrik	D
9		Material yang digunakan mudah didapatkan	D
10	Material	Material tahan lama	D
11		Komponen tidak mudah rusak	D
12	Ergonomi	Aman dalam pengoperasian alat uji	D
13	Perakitan	Mudah dan cepat dalam mengganti spesimen uji	D



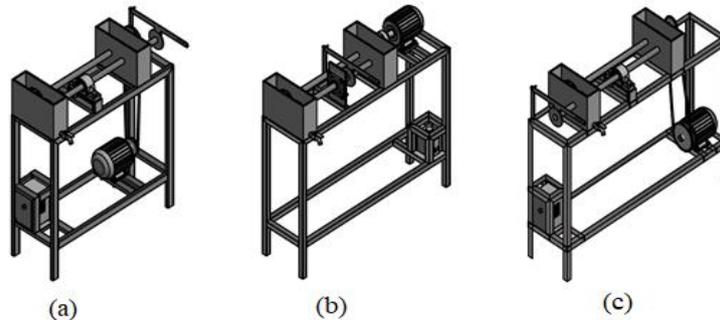
Gambar 2. Struktur fungsi alat uji



Gambar 3. Sub struktur fungsi alat uji

Tabel 4. Matriks morfologi

No.	Prinsip Solusi Sub Fungsi	Konsep		
		1	2	3
1	Pengatur Kecepatan	VFD (<i>Variable Frequency Drive</i>)	Slide Regulator	VSD (<i>Variable Speed Drive</i>)
2	Motor	Motor AC	Motor AC	Motor DC
3	Sistem Transmisi	Sabuk V	Kopling	Rantai
4	Pembebanan	Rem Blok	Rem Blok	Rem Blok
5	Rangka	Besi Persegi Panjang <i>Hollow</i>	Besi Persegi <i>Hollow</i>	Besi Siku



Gambar 4. Variasi konsep alat uji

Langkah kedua pada metode perancangan VDI 2221 adalah perancangan konsep. Daftar spesifikasi awal alat uji yang telah dibuat kemudian dihilangkan semua pernyataan yang bersifat *Wishes* (W) sehingga membentuk abstraksi seperti pada Tabel 3. Selanjutnya menentukan struktur fungsi dari produk yang akan dibuat untuk menyatakan bagaimana alur kerja dari produk tersebut. Struktur fungsi adalah hubungan secara umum antara input dan output suatu sistem teknik yang akan menjalankan satu tugas tertentu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dari diagram tersebut maka dapat dibuat menjadi beberapa sub struktur fungsi yang akan digunakan dalam menyusun matriks morfologi alat uji (Gambar 3).

Langkah selanjutnya membuat prinsip solusi untuk sub struktur fungsi menjadi matriks morfologi. Pada penelitian ini, konsep yang ditawarkan ada tiga variasi (Gambar 3).

Secara ringkas, pada konsep pertama (Gambar 4.a) alat uji yang dirancang menggunakan motor listrik AC sebagai sumber daya pada alat uji.

Daya dari motor AC berupa putaran ditransmisikan menggunakan sabuk V. Untuk mengatur variasi kecepatan digunakan VFD (*Variable Frequency Drive*). Pembebanan diberikan melalui rem blok tunggal dan letak pembebanan berada di sisi kanan alat uji. Pada konsep ini terdapat bantalan dengan tipe *pillow block bearing*. Sedangkan pada konsep rancangan kedua (Gambar 4.b) sumber daya menggunakan motor listrik AC dimana daya dari motor AC ditransmisikan menggunakan kopling flens sehingga putaran roda gigi sama dengan putaran motor listrik. Untuk pengatur kecepatan menggunakan *slide regulator*. Pembebanan diberikan melalui rem blok tunggal dan letak pembebanan berada di tengah alat uji. Pada konsep ini terdapat bantalan dengan tipe *flange bearing*. Adapun pada konsep rancangan ketiga (Gambar 4.c) menggunakan motor listrik DC sebagai sumber daya pada alat uji. Daya dari motor DC ditransmisikan menggunakan rantai. VSD (*Variable Speed Drive*) digunakan untuk mengatur kecepatan. Pembebanan diberikan melalui rem blok tunggal yang berada di sisi kiri alat uji. Pada konsep ini

terdapat bantalan dengan tipe *pillow block bearing*.

Setelah didapatkan tiga variasi konsep, langkah selanjutnya adalah memberikan penilaian variasi konsep untuk mendapatkan satu konsep terbaik dengan menggunakan matriks keputusan Pugh. Hasil penilaian dari masing-masing konsep dapat dilihat pada Tabel 5. Dari Tabel 5 dapat dilihat konsep kedua memiliki nilai tertinggi yaitu 41, sehingga konsep tersebut yang dipilih dalam penelitian ini. Konsep kedua mendapatkan nilai lebih besar pada kriteria nomor ketiga karena pada konsep kedua memakai kopling pada transmisi sehingga konstruksi alat sederhana dan perawatan tidak terlalu sulit sedangkan konsep pertama dan konsep ketiga memakai sabuk V dan rantai sehingga perlu mempertimbangkan jarak sumbu poros yang menyebabkan konstruksi menjadi rumit. Untuk kriteria nomor 4 konsep kedua mendapatkan nilai lebih besar dari konsep pertama dan konsep ketiga karena pada konsep kedua pengatur kecepatan memakai *slide regulator* yang harganya lebih murah daripada VFD dan VSD.

Langkah selanjutnya adalah melakukan perancangan/perhitungan elemen mesin konsep yang telah dipilih, dimana pada metode VDI 2221 kegiatan ini masuk dalam langkah ketiga perancangan yaitu perancangan wujud (bentuk). Adapun komponen-komponen yang dirancang diantaranya adalah perancangan motor listrik yang digunakan, poros, pasak, kopling, roda gigi yang akan diuji, rem blok tanggal, bearing dan rangka. Rumus-rumus yang digunakan pada perancangan komponen di atas merujuk kepada buku Dasar Perancangan dan Pemilihan Elemen Mesin [8]. Langkah terakhir perancangan metode VDI 2221 adalah perancangan detail yang menghasilkan dokumentasi teknik berupa gambar teknik, *assembly*, daftar komponen dan material.

Perancangan Komponen dan Elemen Mesin

1. Perencanaan pemilihan motor

Dalam merancang alat uji roda gigi langkah pertama dalam menghitung elemen mesin dimulai dengan perancangan motor listrik. Untuk benda yang akan digerakkan motor listrik diantaranya roda gigi 1, roda gigi 3, poros dan kopling. Berdasarkan massa dari perencanaan awal keempat komponen tersebut, diperoleh torsi total sebesar 0.060105 N.m. Adapun putaran maksimum yang

direncanakan adalah 600 rpm sehingga kecepatan sudut dapat dihitung:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (1)$$

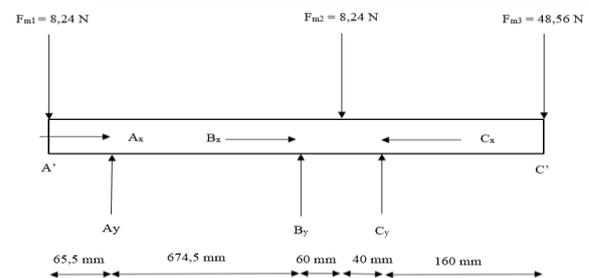
Daya motor listrik dihitung dengan persamaan:

$$P = T \times \omega \quad (2)$$

Pada perhitungan daya motor listrik di atas didapatkan daya sebesar 0.051 HP. Nilai daya motor listrik ini tidak ada di pasaran maka pada perancangan ini mengambil daya motor listrik sebesar 0.25 HP atau 0.186 kW.

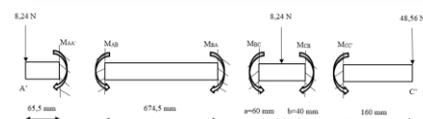
2. Perencanaan poros 1 dan poros 2

Dalam perancangan poros 1, diasumsikan beban yang diterimanya ada tiga beban yaitu roda gigi 1 (0.84 kg), roda gigi 3 (0.84 kg) dan kopling (4.95) kg. Massa dari ketiga beban didapat dari perhitungan massa benda pada perancangan motor listrik sebelumnya. Adapun diagram benda bebas (DBB) dari poros 1 seperti pada Gambar 5.

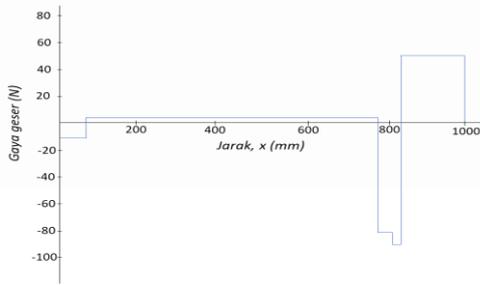


Gambar 5. Diagram benda bebas (DBB) gaya yang bekerja pada poros 1

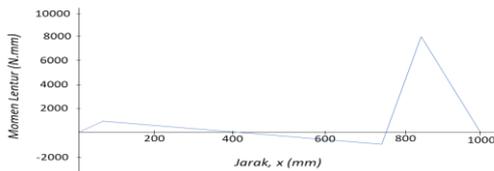
Dari DBB tersebut terdapat enam gaya reaksi yang tidak diketahui, sedangkan persamaan yang digunakan untuk menyelesaikannya hanya ada tiga. Sehingga struktur tersebut dikatakan statis tak tentu. Untuk menyelesaikannya, bagian poros dibagi menjadi beberapa bagian seperti pada gambar 6. Gambar 7 dan 8 menunjukkan diagram gaya geser dan momen lentur poros 1.



Gambar 6. Potongan DBB Bagian Poros 1



Gambar 7. Diagram gaya geser poros 1



Gambar 8. Diagram momen lentur poros 1

Dari hasil perhitungan di atas didapatkan nilai momen lentur maksimum sebesar 7.767.01 N.mm atau 791.74 kg.mm. Momen lentur maksimum ini digunakan untuk menghitung diameter poros. Adapun material poros yang dipilih adalah ST 37 (kekuatan tarik 37 kg/mm², faktor Sf_1 yang diambil 6 dan faktor Sf_2 diambil sebesar 3)

sehingga tegangan geser izin diperoleh sebesar 2.056 kg/mm². Diameter poros 1 dapat dihitung menggunakan persamaan (3) yaitu:

$$d_s \geq \left[\left(\frac{5,1}{\tau b a} \right) \sqrt{(K_m M_R)^2 + (K_t T)} \right] \quad (3)$$

Sehingga diperoleh diameter poros 1 sebesar 18.94 mm. Untuk menyesuaikan ukuran bantalan dan kopleng yang ada di pasaran maka diameter poros 1 diambil sebesar $d_s = 20$ mm.

Dengan menggunakan konsep dan pertimbangan yang sama, diameter poros 2 diperoleh 17.2 mm, sehingga poros 2 diambil sebesar $d_s = 20$ mm.

3. Perencanaan roda gigi

Roda gigi yang digunakan pada pengujian ini adalah roda gigi pada transmisi sepeda motor dengan bahan baja paduan SCM440H dengan detail data seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Dimensi roda gigi yang akan diuji

Parameter	Pinion	Gear
Jumlah Gigi	20	20
Sudut Tekan (°)	20	20
Rasio Gear	1	1
Modul (mm)	4,5	4,5
Diameter Kepala (mm)	99	99
Diameter Kaki (mm)	79,51	79,51
Diameter Lingkaran Jarak Bagi (mm)	90	90
Lebar Gigi (mm)	20	20

Perancangan Detail

Langkah keempat dalam perancangan metode VDI 2221 adalah perancangan detail. Langkah ini meliputi dokumentasi teknik berupa gambar teknik, daftar komponen, assembly. Adapun dokumentasi teknik dalam perancangan ini dapat dilihat dalam lampiran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

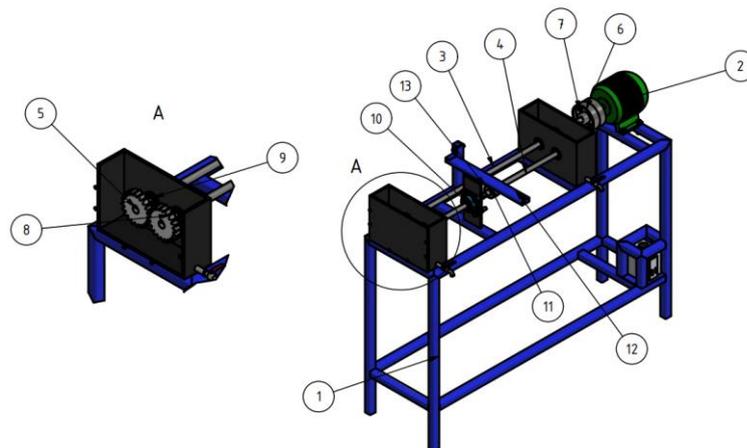
Hasil Perancangan

Berdasarkan perancangan dengan metode VDI 2221, konsep yang didapatkan adalah konsep 2.

Kemudian konsep 2 tersebut dilanjutkan dengan menghitung elemen mesin untuk mengetahui dimensi alat uji roda gigi. Adapun gambar alat uji dan dimensi hasil perancangan dapat dilihat pada Gambar 9 dan keterangan gambar pada Tabel 7.

Analisis statis manual dan simulasi

Pada penelitian ini, setelah merancang alat uji dilanjutkan dengan analisis struktur secara perhitungan manual dan simulasi. Adapun hasil yang didapatkan dari perhitungan manual dan simulasi dapat dilihat pada Tabel 8.



Gambar 9. Konsep alat uji yang dipilih

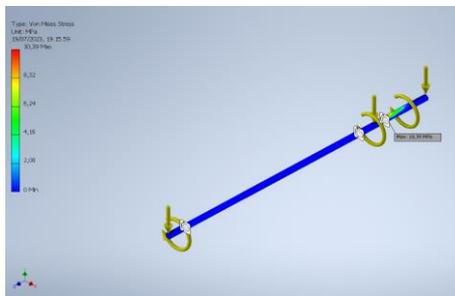
Tabel 7. Keterangan komponen pada alat uji

No.	Komponen	Spesifikasi
1	Rangka	30 mm x 30 mm x 2 mm
2	Motor Listrik	1/4 HP
3	Poros 1	Ø20 mm x 1000 mm
4	Poros 2	Ø20 mm x 800 mm
5	Pasak	7 mm x 7 mm x 25 mm
6	Kopling	Ø112 mm x 40 mm
7	Baut Kopling	M10 x 4 pcs
8	Roda Gigi Uji	20 Gigi x Modul 4,5 mm
9	Bantalan 6204	Ø20 mm x 47 mm
10	Bantalan UCF 204	Ø20 mm x 86 mm x 33,3 mm
11	Blok Rem	31,8 mm x 21,1 mm
12	Tuas Pembebanan	395,5 mm
13	Disk	Ø50 mm x 31,8 mm

Tabel 8. Hasil perhitungan analisis struktur statis secara manual dan simulasi

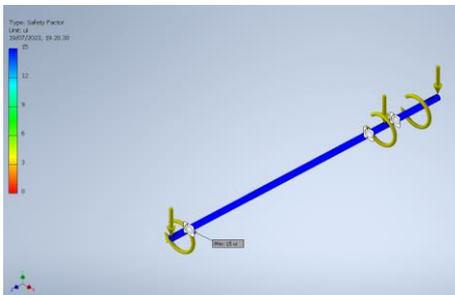
No.	Bagian Komponen	Hasil Analisis	Tegangan Von Mises (MPa)	Defleksi (mm)	Safety Factor
1	Poros 1	Manual	9,91	0,038	34,3
		Simulasi	10,39	0,0364	15
		Error %	4,62	4,4	128,6
2	Poros 2	Manual	6,43	0,013	52,9
		Simulasi	6,285	0,0128	15
		Error %	2,31	1,25	252,6

Analisis struktur statis poros 1 dilakukan menggunakan perhitungan manual dan simulasi *software*. Dari hasil perhitungan manual hasil tegangan *von mises* maksimum yang didapatkan sebesar 9.91 MPa. Sedangkan hasil simulasi metode elemen hingga didapatkan tegangan *von mises* maksimum sebesar 10.39 MPa (Gambar 10). Kedua hasil analisis yang didapatkan, dapat diketahui poros 1 masih dapat dikatakan aman karena tegangan *von mises* maksimum baik itu secara perhitungan manual dan simulasi masih berada dibawah tegangan bahan (*yield strength*) sebesar 340 MPa. Suatu rancangan dapat dikatakan aman jika tegangan kerja lebih kecil daripada tegangan bahan [9].



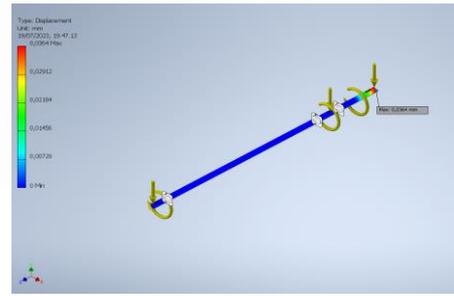
Gambar 10. Tegangan *von mises* pada poros 1

Safety factor minimum poros 1 dari perhitungan manual didapatkan sebesar 34.3 di mana *safety factor* ini didapatkan dari tegangan luluh (*yield strength*) bahan dibagi dengan tegangan *von mises* yang bekerja pada poros sebesar 9.91 MPa. Dengan tegangan luluh bahan sebesar 340 MPa untuk bahan baja ST 37. Sedangkan *safety factor* minimum hasil *Autodesk Inventor 2020 Student* didapatkan 15 (Gambar 11). Dapat disimpulkan bahwa hasil rancangan poros aman karena *safety factor minimum* yang dihasilkan lebih dari 2.



Gambar 11. *Safety factor* minimum poros 1

Untuk defleksi maksimum poros 1 dari perhitungan manual didapatkan 0.038 mm. Sedangkan hasil simulasi diperoleh defleksi maksimum sebesar 0.0364 mm (Gambar 12). Hasil ini menunjukkan bahwa defleksi masih dikatakan aman karena di bawah 1 mm [10].



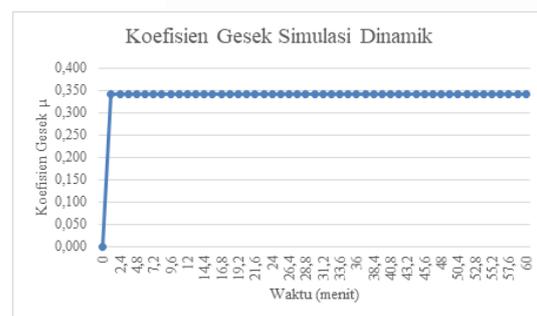
Gambar 12. Defleksi maksimum pada poros 1

Analisis simulasi dinamik alat uji roda gigi

Simulasi dinamik dilakukan dengan menggunakan fitur *dynamic simulation* pada *Autodesk Inventor 2020 Student*. Simulasi dinamik dilakukan untuk mengetahui pergerakan yang terjadi pada alat yang dirancang. Simulasi dinamik dilakukan dengan memberikan kecepatan 600 rpm dan beban tetap 10 kg. Pemberian kecepatan dan beban tersebut dipilih berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan oleh Hidayat et al. [11] sehingga perbandingan hasil simulasi dinamik pada penelitian ini dengan hasil eksperimen dapat dilakukan. Hasil dari simulasi dinamik ini adalah waktu, gaya tangensial dan gaya arah sumbu x. Untuk mendapatkan koefisien geseknya, dilakukan pengolahan data dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) berikut:

$$F_{x'} = \sqrt{(F_x)^2 - (F_t)^2} \quad (4)$$

$$\mu = F_{x'}/F_t \quad (5)$$



Gambar 12. Grafik koefisien gesek simulasi dinamik

Dari gambar 12 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan koefisien gesek pada awal simulasi sampai menit ke-2,4. Secara teoritis, kondisi ini disebut kondisi *running in* yaitu sebuah fenomena yang terjadi setelah awal kontak dalam gerak relatif antara permukaan yang sama-sama baru sampai keadaan *steady state*. Dari menit ke-2,4 dan menit ke-60, koefisien gesek roda gigi mengalami keadaan *steady state* yang menyebabkan koefisien gesek tidak mengalami kenaikan yang

cukup signifikan. Fenomena ini serupa dengan hasil pengujian Hidayat et al. [11]. Dari simulasi didapatkan koefisien gesek *steady state* roda gigi sebesar 0.342. Adapun hasil pengujian [11] diperoleh koefisien gesek sebesar 0.43. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada koefisien gesek jurnal terdapat faktor kekasaran permukaan yang dipertimbangkan. Sedangkan pada aplikasi *Autodesk Inventor 2020 Student* permukaan benda dibuat halus atau rata semuanya.

KESIMPULAN

Pada makalah ini perancangan alat uji roda gigi telah dilakukan menggunakan metode VDI 2221 menghasilkan tiga variasi konsep desain, dimana melalui matriks keputusan Pugh konsep kedua dipilih untuk diproses lebih lanjut. Adapun perencanaan dan perhitungan masing-masing komponen merujuk ke Sularso dan Kuga. Analisis struktur secara statis telah dihitung secara manual dan simulasi menggunakan *Autodesk Inventor 2020 Student version. Software* ini juga digunakan untuk menghitung koefisien gesek alat uji secara simulasi dinamik. Hasil analisis struktur statis pada poros 1 diperoleh tegangan *von mises* maksimum sebesar 9.91 MPa, *safety factor* minimum sebesar 34.3 dan defleksi maksimum sebesar 0.038 mm. Untuk poros 2 didapatkan tegangan *von mises* maksimum sebesar 6.43 MPa, *safety factor* minimum sebesar 52.9 dan defleksi maksimum sebesar 0.013 mm. Simulasi dinamik yang dilakukan selama 60 menit menghasilkan koefisien gesek 0.342.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Riau.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B.-R. Höhn, K. Stahl, J. Schudy, T. Tobie, and B. Zornik, "FZG Rig-based Testing of Flank Load-Carrying Capacity Internal Gears," *Gear Technology*, 2012.
- [2] Liu, H., Liu, H., Zhu, C. and Parker, R.G., "Effects of lubrication on gear performance: A review" *Mechanism and Machine Theory*, 145, p.103701, 2020.
- [3] Mao, K., Chetwynd, D.G. and Millson, M., "A new method for testing polymer gear wear rate and performance" *Polymer Testing*, 82, p.106323, 2020.

- [4] Fernandes, C.M., Marques, P.M., Martins, R.C. and Seabra, J.H., "Gearbox power loss. Part II: Friction losses in gears" *Tribology International*, 88, pp.309-316, 2015.
- [5] Martins, R., Cardoso, N. and Seabra, J., "Gear power loss performance of biodegradable low-toxicity ester-based oils" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 222(3), pp.431-440, 2008.
- [6] Atmadja, C.J., Daywin, F.J., Gozali, L., Doaly, C.O. and Irawan, A.P., "Improving the Capacity of Espresso Machine Using Reverse Engineering Method and VDI 2221 Method" *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 1-13, 2021.
- [7] Harsokoesoemo, D. Pengantar Perancangan Teknik, Edisi kedua, Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2004.
- [8] Sularso and Suga, K., Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, Jakarta: Pradnya Paramita, 1997.
- [9] Salimin, S. and Adha, I., "Perancangan dan Analisa Simulasi Pembebanan Chassis Sepeda Wisata Untuk Dua Penumpang Menggunakan Software Autodesk Inventor 2017. *J. Ilm. Mhs. Tek. Mesin*, 3(3), pp.1-12, 2018.
- [10] Puspitasari, N.A. and Nugraha, M.P., "Simulasi Stress Analysis Pembebanan Statis dengan Bantuan Software SolidWorks pada Hasil Perancangan Ladder Frame Chassis Mobil Listrik Menggunakan Material AISI 4340", Seminar Nasional XX Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri, 2021.
- [11] Hidayat, T., Supriyana, N., Londa, P., Jamari, J. and Setiawan, J.D., "Analisa Running-In Roda Gigi Transmisi Produk Usaha Kecil Menengah" *Rotasi*, 15(2), pp.12-17, 2013.