

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Perancangan Dudukan Rangka Alat Uji Twin Disk

##### 4.1.1 Hasil Konsep Desain dan Kriteria Evaluasi

Pada tahap awal perancangan alat uji Twin Disk, dikembangkan tiga alternatif desain yang dievaluasi berdasarkan parameter teknis dan praktis. Evaluasi dilakukan menggunakan metode *Weighted Objective Matrix (WOM)*, yaitu metode pengambilan keputusan multikriteria yang memberikan bobot pada setiap aspek evaluasi sesuai tingkat kepentingannya.

Kriteria yang digunakan dalam proses ini meliputi:

- Kemudahan Pembuatan,
- Efisiensi Biaya,
- Stabilitas Rangka,
- Kemudahan Integrasi Sensor, dan
- Fleksibilitas Modifikasi.

Setiap kriteria memiliki parameter penilaian sebagai berikut:

**Tabel 4.1** Parameter Matriks Penilaian dengan Metode WOM.

| Kriteria                   | Parameter                                     | Skor      |
|----------------------------|-----------------------------------------------|-----------|
| Kemudahan Pembuatan        | Sulit – Sedang – Mudah                        | 5 – 7 – 9 |
| Efisiensi Biaya (Rp)       | >20 juta – 10–20 juta – <10 juta              | 5 – 7 – 9 |
| Stabilitas Rangka          | Kurang stabil – Stabil – Sangat stabil        | 5 – 7 – 9 |
| Kemudahan Integrasi Sensor | Sulit dipasang – Mudah dipasang – Plug & play | 5 – 7 – 9 |
| Fleksibilitas Modifikasi   | Sulit diubah – Perlu penyesuaian – Modular    | 5 – 7 – 9 |

Setelah parameter penilaian untuk masing-masing kriteria ditentukan, dilakukan proses evaluasi terhadap tiga alternatif desain berdasarkan skor pada setiap kriteria yang telah ditetapkan. Skor tersebut kemudian dikalikan dengan bobot masing-masing kriteria untuk memperoleh nilai total tertimbang dari setiap desain. Hasil lengkap dari proses evaluasi ini disajikan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Penilaian Alternatif Desain dengan Metode WOM.

| Kriteria                   | Bobot (%)  | Desain 1   | Desain 2    | Desain 3   |
|----------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Kemudahan Pembuatan        | 25         | 8          | 6           | 7          |
| Efisiensi Biaya            | 20         | 7          | 5           | 8          |
| Stabilitas Rangka          | 20         | 9          | 7           | 9          |
| Kemudahan Integrasi Sensor | 15         | 7          | 6           | 7          |
| Fleksibilitas Modifikasi   | 20         | 8          | 6           | 7          |
| <b>Total Skor</b>          | <b>100</b> | <b>7.8</b> | <b>6.99</b> | <b>7.6</b> |

Berdasarkan hasil evaluasi, Desain 1 dipilih sebagai desain akhir karena memperoleh nilai skor tertinggi, yaitu sebesar 7,8. **Gambar 4.1** adalah visualisasi dari hasil pemilihan desain.



**Gambar 4. 1** Rancangan Desain 1

Desain ini menunjukkan keunggulan pada aspek kestabilan rangka dan kemudahan integrasi sensor, sekaligus tetap mempertahankan efisiensi biaya dan kemudahan fabrikasi. Dengan keunggulan tersebut, Desain 1 dinilai paling layak untuk direalisasikan dalam tahap pembuatan dan pengujian alat uji Twin Disk.

#### 4.1.2 Spesifikasi Komponen Utama

Dalam proses perancangan dan pembangunan alat uji Twin Disk, pemilihan komponen dilakukan secara cermat berdasarkan kebutuhan teknis, ketersediaan di pasaran, serta efisiensi dalam integrasi sistem.

Komponen utama yang digunakan meliputi motor penggerak, sistem transmisi, poros, disk uji, dan rangka penopang. Tiap komponen memiliki spesifikasi dan fungsi tersendiri yang mendukung performa alat dalam mengukur torsi gesek dan memvisualisasikan keausan permukaan akibat gaya gesek.

a. Motor Penggerak

Motor yang digunakan adalah motor listrik tiga fasa dengan spesifikasi daya 1,5 kW (2 HP) dan kecepatan nominal 1400 rpm. Motor ini mampu menghasilkan torsi yang memadai untuk menciptakan perbedaan kecepatan antara dua disk (slip ratio), serta memberikan putaran yang stabil dan konsisten pada disk bagian bawah selama proses pengujian berlangsung.

b. Pulley dan Sistem Transmisi

Sistem transmisi menggunakan pulley yang dibuat dari material baja berkekuatan tinggi, yang difabrikasi melalui proses pembubutan presisi. Proses ini bertujuan untuk memastikan keseimbangan rotasi dan meminimalkan getaran selama alat beroperasi. Pulley dihubungkan dengan flat belt yang memungkinkan transmisi daya antarporos secara efisien dan stabil.

c. Poros Atas dan Bawah

Poros atas dan bawah dibuat dari material baja S45C, dengan proses pembubutan untuk memperoleh dimensi yang presisi dan kompatibel dengan komponen seperti bearing dan pulley. Slot pasak juga dibuat untuk memastikan posisi pulley terkunci dengan baik. Poros bawah berfungsi untuk memutar disk, sedangkan poros atas menopang disk statis dan menerima beban selama pengujian.

d. Disk Uji

Disk uji dalam sistem ini terbuat dari baja AISI 1045 dengan diameter 200 mm, sesuai referensi dalam penelitian sebelumnya. Material ini dipilih karena karakteristik kekuatan dan ketahanannya terhadap gesekan serta kemampuannya untuk menunjukkan tanda-tanda keausan material secara

visual akibat pengujian. Salah satu disk dipasang secara tetap (statis), sementara disk lainnya diputar oleh sistem transmisi.

e. Rangka Penopang

Struktur rangka utama dibuat dari besi siku L berukuran  $40 \times 40$  mm melalui proses pemotongan dan pengelasan untuk membentuk rangka penopang yang kokoh. Rangka ini menopang seluruh sistem, termasuk motor, transmisi, poros, disk, dan sensor. Kestabilan rangka menjadi faktor penting untuk menjaga konsistensi hasil pengujian dan menghindari gangguan dari getaran saat operasi.

#### 4.1.3 Sensor dan Sistem Elektronik

Sistem elektronik pada alat uji Twin Disk mengintegrasikan beberapa komponen utama untuk akuisisi dan visualisasi data. Sensor torsi yang digunakan adalah Dynamic Torque Sensor DYN-200 yang memiliki output RS-485 dan dihubungkan ke Arduino Uno melalui modul konverter MAX485. Sensor ini berfungsi untuk mengukur torsi gesek yang terjadi selama pengujian dan mengirimkan data secara digital.

Selain itu, sistem dilengkapi dengan rotary encoder yang digunakan untuk mencatat jumlah putaran poros yang berkaitan dengan perhitungan slip ratio. Baik rotary encoder maupun sensor torsi dihubungkan ke Arduino Uno sebagai pusat pengolahan data, yang kemudian menampilkan hasil pembacaan secara langsung melalui LCD I2C sebagai antarmuka visual.

Untuk pencatatan data secara digital dan analisis lanjutan, sistem ini terintegrasi dengan PLX-DAQ, memungkinkan pengiriman data secara real-time ke Microsoft Excel.

#### 4.1.4 Penempatan Komponen dalam Rangka

Desain penempatan komponen pada rangka alat uji Twin Disk disusun dengan mempertimbangkan distribusi massa, kestabilan struktur, dan kemudahan akses terhadap sensor dan sistem elektronik, guna mendukung efisiensi perawatan serta keandalan selama proses pengujian.

Berdasarkan desain visual dan konstruksi aktual, berikut adalah penempatan serta fungsi utama dari masing-masing komponen:



a. Motor Penggerak

Motor listrik tiga fasa dipasang secara horizontal di sisi kiri atas rangka padaudukan baja yang kokoh. Posisi ini memungkinkan transmisi daya yang efisien menuju sistem penggerak utama, sambil menjaga pusat gravitasi sistem tetap stabil.

b. Pulley Atas dan Bawah dengan Flat Belt

Dua buah pulley dipasang masing-masing pada poros atas dan poros bawah. Keduanya dihubungkan oleh flat belt yang berfungsi untuk mentransmisikan putaran dari motor ke poros bawah dan diteruskan ke poros atas. Penggunaan flat belt dipilih karena area kontakannya yang luas, sehingga menghasilkan transmisi torsi yang lebih halus dan minim selip.

c. Poros Bawah dan Dudukan Bearing

Poros bawah dipasang secara horizontal sejajar dengan motor dan ditopang oleh dua dudukan bearing yang telah dibubut secara presisi. Poros ini berperan sebagai penggerak utama disk bawah selama pengujian berlangsung.

d. Poros Atas dan Rumah Beban

Poros atas diposisikan vertikal tepat di atas poros bawah, membentuk sistem kontak langsung antara disk atas dan bawah. Rumah beban yang terpasang pada poros atas dapat diberi beban tambahan secara modular untuk mensimulasikan gaya normal selama proses pengujian.

e. Sensor Torsi (DYN-200)

Sensor torsi tipe DYN-200 dipasang pada poros bawah, di antara disk uji dan dudukan bearing. Lokasi ini memungkinkan pengukuran torsi gesek secara langsung dan minimnya gangguan mekanis serta mempermudah pengkabelan menuju sistem kendali.

f. Arduino Uno dan Modul MAX485

Sistem elektronik dikendalikan oleh Arduino Uno yang terhubung ke sensor melalui modul komunikasi MAX485. Seluruh sistem kontrol ini diletakkan di dalam kotak elektronik kecil yang ditempatkan di bagian bawah atau samping rangka, terlindung dari getaran dan panas motor.

g. Power Supply dan Manajemen Kabel

Power supply 24 V 5 A dipasang di bagian belakang atau sisi bawah rangka. Penataan kabel dilakukan menggunakan ducting dan cable ties untuk menjaga kerapian, keamanan sistem, serta menghindari interferensi dengan bagian mekanis.

#### 4.2 Analisis Hasil Kekuatan Rangka Dudukan Twin Disk

Analisis kekuatan dilakukan untuk mengetahui besarnya deformasi (*lendutan*), tegangan (*stress*), dan *factor of safety* yang terjadi pada struktur alat uji twin disk akibat beban yang bekerja. Proses analisis ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *SolidWorks 2023 General Simulation* yang bagian *statis*. Dari hasil simulasi yang dilakukan, jenis material yang digunakan dalam percobaan simulasi terbagi menjadi empat jenis material, yaitu baja, stainless steel, besi cor, dan *epoxy resin*. Diperoleh nilai tegangan (*stress*) terbaik pada jenis material besi cor. Hal ini sesuai dengan proses analisis matriks pemilihan keputusan yang telah dijelaskan pada proses studi perancangan, di mana sifat mekanik besi cor diperoleh dari *material library* SolidWorks, sedangkan data sifat mekanik serat karbon diperoleh dari *datasheet Mitsubishi Materials*.

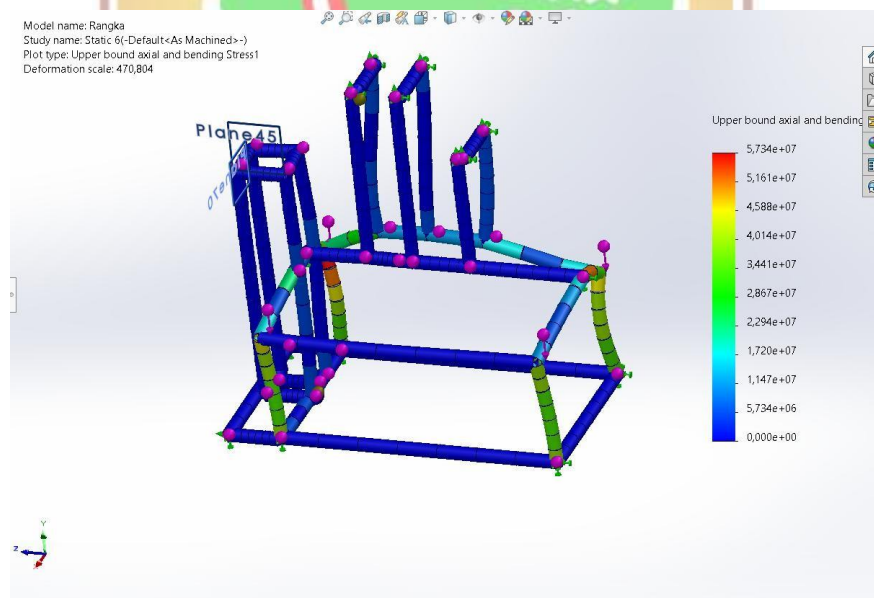
Model alat uji twin disk dianalisis dengan variasi pembebanan (N), yaitu 1000 sampai 10.000. Pada simulasi ini, pembebanan yang diberikan berupa gaya tekan lebih besar dari beban pengujian sebesar 6 kg atau setara 60 N saat kondisi statis dengan penambahan faktor keamanan, sedangkan tumpuan rol (*fixture*) diletakkan pada bagian penjepitan *twin disk* terhadap rangka twin disk serta tumpuan jepit sebagai hubungan *twin disk* terhadap tanah. Data hasil simulasi tegangan maksimum (*maximum stress*), lendutan (*displacement*), dan faktor keamanan (*factor of safety*) pada rangka dudukan twin disk dapat dilihat pada Tabel 4.1, dan data hasil simulasi variasi jenis material rangka dudukan yang lain dapat dilihat pada Lampiran A.

**Tabel 4.3.** Hasil Simulasi Rangka Dudukan Twin Disk.

| No | Pembebanan<br>(N) | <i>Maximum Stress</i> /<br>Tegangan<br>Maksimum (MPa) | <i>Displacement</i> /<br>Lendutan (mm) | <i>Factor of<br/>Safety</i> |
|----|-------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 1000              | 5.73                                                  | 0.02825                                | 26                          |

|    |       |       |         |     |
|----|-------|-------|---------|-----|
| 2  | 2000  | 11.47 | 0.0565  | 13  |
| 3  | 3000  | 17.20 | 0.08475 | 8.8 |
| 4  | 4000  | 22.94 | 0.1130  | 6.6 |
| 5  | 5000  | 28.67 | 0.1412  | 5.3 |
| 6  | 6000  | 34.41 | 0.1695  | 4.4 |
| 7  | 7000  | 40.14 | 0.1977  | 3.8 |
| 8  | 8000  | 45.88 | 0.2260  | 3.3 |
| 9  | 9000  | 51.61 | 0.2542  | 2.9 |
| 10 | 10000 | 57.34 | 0.2825  | 2.6 |

Posisi nilai tegangan maksimum ( $\sigma_{\max}$ ) yang diperoleh pada hasil simulasi rangka dudukan twin disk terdapat pada posisi sumbu y pada kaki penahan rangka dudukan twin disk, berwarna kuning, menunjukkan titik maksimum stres pada pemberian beban sebesar 10.000 N, seperti yang terlihat pada **Gambar 4.2**.



**Gambar 4. 2** Simulasi Rangka Dudukan *Twin Disk*.

Data hasil simulasi pada **Gambar 4.3** menunjukkan respons linier struktur terhadap peningkatan pembebanan, yang tercermin pada kenaikan tegangan maksimum dan lendutan yang proporsional dengan gaya serta penurunan faktor keamanan yang konsisten. Kecenderungan linier tegangan terhadap beban mengindikasikan bahwa material bekerja dalam rezim elastis, sehingga hubungan tegangan–regangan masih mengikuti asumsi elastisitas linier. Laju kenaikan

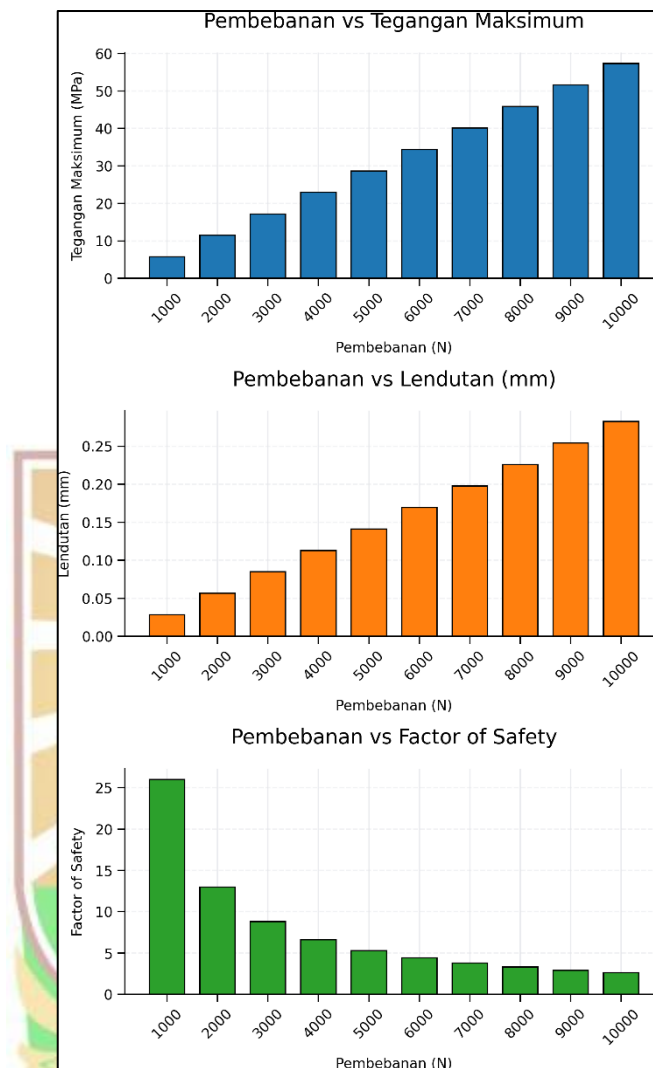
tegangan yang hampir konstan untuk tiap kenaikan beban menguatkan indikasi tidak terjadinya plastisitas pada rentang pembebanan yang diuji. Sejalan dengan itu, lendutan meningkat secara bertahap dengan kemiringan yang stabil, yang konsisten dengan model balok/elemen elastis di mana defleksi berbanding lurus dengan gaya dan dibatasi oleh kekakuan sistem (modulus elastisitas serta momen inersia penampang). Nilai lendutan yang relatif kecil dibandingkan dengan dimensi tipikal komponen menyiratkan bahwa kekakuan struktural masih memadai untuk menjaga kinerja geometrik pada kondisi operasi yang ditinjau.

Di sisi lain, *factor of safety* menunjukkan tren menurun tajam seiring bertambahnya pembebanan. Secara fisik, hal ini mencerminkan berkurangnya margin antara tegangan kerja dan kekuatan izin material ketika gaya eksternal semakin besar. Pada beban rendah, *faktor keselamatan* tinggi menyediakan toleransi yang luas terhadap variasi manufaktur, ketidakpastian material, dan fluktuasi beban. Namun, mendekati beban maksimum yang diuji, nilai FoS turun ke kisaran yang lebih kritis, menandakan bahwa sistem semakin sensitif terhadap ketidakpastian dan potensi degradasi (misalnya akibat fatik, keausan, atau kondisi lingkungan). Walaupun pada titik beban tertinggi sistem masih berada pada batas aman, kecilnya margin keselamatan pada kisaran tersebut menyarankan pembatasan beban operasi nominal di bawah nilai puncak yang diuji, terlebih untuk aplikasi dinamis atau siklik yang cenderung mempercepat akumulasi kerusakan.

Secara keseluruhan, kombinasi tiga metrik tegangan, lendutan, dan faktor keamanan memberikan gambaran komprehensif mengenai integritas struktural: (i) tegangan dan lendutan mengonfirmasi perilaku elastis linier serta kecukupan kekakuan dalam rentang uji; (ii) penurunan *faktor keamanan* mengidentifikasi batas praktis penggunaan yang aman. Dari perspektif desain, hasil ini merekomendasikan penerapan margin operasi yang konservatif terhadap beban puncak, atau bila diperlukan, kapasitas beban yang lebih tinggi melalui penguatan desain melalui pemilihan material dengan kekuatan lebih besar, peningkatan dimensi efektif penampang untuk menaikkan momen inersia dan menurunkan tegangan serta lendutan, atau optimasi detail geometrik untuk memperbaiki alur tegangan. Selain itu, untuk memastikan keandalan jangka panjang, diperlukan verifikasi lanjutan yang memperhitungkan efek fatik, toleransi manufaktur, serta variabilitas material,



mengingat ketiganya dapat memodifikasi respons struktural dibandingkan dengan kondisi ideal elastis linier yang menjadi dasar interpretasi grafik.



**Gambar 4. 3** Grafik Hasil Simulasi Pada Struktur Rangka Dudukan Twin Disk.

### 4.3 Pembuatan dan Perakitan Alat Uji Twin Disk

#### 4.3.1 Proses Pemesinan dan Pembuatan Komponen

##### a. Pembubutan poros atas dan bawah

Poros atas dan bawah terbuat dari baja S45C yang dibubut secara presisi untuk memastikan kesesuaian dengan *flexible coupling* dan *pulley*, dilengkapi dengan alur pasak guna menjamin sambungan yang kuat, mencegah slip, serta menjaga keselarasan putaran dan meminimalkan getaran selama pengujian. Poros dibuat dengan proses

pemesinan (bubut). Diameter awal poros 30 mm dibubut menjadi 25 mm. Detail poros dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.



**Gambar 4. 4** Proses dan Hasil Akhir Proses Pembubutan Poros.

b. Perhitungan elemen dasar proses pemesinan pembubutan poros

Data dan asumsi yang digunakan:

- $n = 510 \text{ rpm}$ ,  $d_o = 30 \text{ mm}$ ,  $d_m = 25 \text{ mm}$ ,  $f$  per pass (diametral):  $f_1 = 2 \text{ mm}$ ,  $f_2 = 2 \text{ mm}$ ,  $f_3$  (finishing) =  $1 \text{ mm} \rightarrow a_p$  (radial):  $1.0 \text{ mm}$ ,  $1.0 \text{ mm}$ ,  $0.5 \text{ mm}$ .
- $s$  (feed per revolution) =  $0,13 \text{ mm/put} \rightarrow V_f = n \cdot s = 66,3 \text{ mm/menit}$ .
- Panjang pemotongan  $L_t = 860 \text{ mm}$  (diasumsikan tanpa allowance approach/overtravel).
- Material: besi cor (grey cast iron).
- Kecepatan potong  $V_c = \pi \cdot d_{avg} \cdot n / 1000 (\text{m/menit})$ . Waktu  $T = L_t / V_f$ .
- MRR (turning):  $Q = a_p \cdot f \cdot V_c (\text{cm}^3/\text{menit})$ .
- Gaya potong utama:  $F_c = k_c \cdot a_p \cdot f$ . Daya potong bersih:  $P_{net} = \frac{F_c \cdot V}{60,000 (\text{kW})}$ . (Setara dengan rumus pabrik:  $P = \frac{V_c \cdot f \cdot a_p \cdot k_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta}$ ).
- Specific cutting force  $k_c$  untuk *Grey Cast Iron* 200 HB: pada  $f = 0,10 \text{ mm/put} \rightarrow k_c = 2110 \text{ MPa}$  dan  $f = 0,20 \text{ mm/put} \rightarrow k_c = 1800 \text{ MPa}$ . Interpolasi linear ke  $f = 0,13 \rightarrow k_c \approx 2017 \text{ MPa}$ .
- Efisiensi mesin untuk daya input:  $\eta = 0,8$  (tipikal  $0,70-0,85$ ).
- Estimasi keausan pahat pakai Persamaan Taylor  $V \cdot T^n = C$ , asumsi karbida ( $n = 0,25$ ). Banyak katalog merekomendasikan basis  $T = 15$

menit pada kecepatan rekomendasi material; untuk besi cor abu turning karbida:  $V_{ref} \approx 330\text{--}450$  m/menit (di sini dipakai 330 m/menit untuk konservatif).

1. Geometri tiap pass & kecepatan potong

$$V_c = \pi \cdot d_{avg} \cdot n / 1000 (\text{m/menit}) \quad (4.1)$$

**Tabel 4.4** Hasil Perhitungan Kecepatan Potong Proses Pembubutan Poros.

| Benda Kerja   | D awal (mm) | D akhir (mm) | F radial (mm) | D avg (mm) | Vc (m/menit) |
|---------------|-------------|--------------|---------------|------------|--------------|
| 1             | 30,0        | 28,0         | 1,00          | 29,0       | <b>46,46</b> |
| 2             | 28,0        | 26,0         | 1,00          | 27,0       | <b>43,26</b> |
| 3 (finishing) | 26,0        | 25,0         | 0,50          | 25,5       | <b>40,86</b> |

2. Kecepatan pemakanan & waktu pemotongan

$V_f = n \cdot s = 510 \times 0,13 = 66,3$  mm/menit (konstan tiap pass). Waktu per pass  $T = L_t / V_f = 860 / 66,3 = 12,97$  menit (konstan per pass).

**Tabel 4.5** Hasil Perhitungan Kecepatan Pemakanan dan Waktu Pemotongan.

| Benda Kerja  | Vf (mm/menit) | Lt (mm) | T (menit)    |
|--------------|---------------|---------|--------------|
| 1            | 66,3          | 860     | 12,97        |
| 2            | 66,3          | 860     | 12,97        |
| 3            | 66,3          | 860     | 12,97        |
| <b>Total</b> |               |         | <b>38,91</b> |

3. MRR, gaya potong, daya potong, dan konsumsi energi

MRR ( $\text{cm}^3/\text{menit}$ ):  $Q = a_p \cdot f \cdot V_c$ , Gaya potong utama:  $F_c = k_c \cdot a_p \cdot f$  dengan  $k_c \approx 2017 \text{ MPa}$  (dari tabel besi cor abu, interpolasi pada  $f = 0,13$ )., Daya bersih di pahat:  $P_{net} = F_c \cdot V_c / 60,000 (\text{kW})$ . Daya input mesin:  $P_{in} = P_{net} / \eta$ . Energi = daya  $\times$  waktu.

**Tabel 4.6** Hasil Perhitungan MRR, Gaya Daya Potong, dan Konsumsi Energi.

| Pass         | MRR<br>(cm <sup>3</sup> /min) | F <sub>c</sub> (N) | P net<br>(kW) | P (kW,<br>$\eta=0,8$ ) | Energi net<br>(kWh) | Energi<br>(kWh) |
|--------------|-------------------------------|--------------------|---------------|------------------------|---------------------|-----------------|
| 1            | 6,040                         | 262,21             | 0,2031        | 0,2538                 | 0,04390             | 0,05487         |
| 2            | 5,624                         | 262,21             | 0,1891        | 0,2363                 | 0,04087             | 0,05109         |
| 3            | 2,656                         | 131,11             | 0,08927       | 0,11159                | 0,01930             | 0,02413         |
| <b>Total</b> |                               |                    |               |                        | <b>0,10407</b>      | <b>0,13009</b>  |

c. Pembubutan *Pulley*

Pulley terbuat dari aluminium padat dan dibubut presisi untuk membentuk silinder dan lubang pasak, sehingga dapat terkunci kuat pada poros dan berputar stabil saat sistem dijalankan. Detail pulley dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



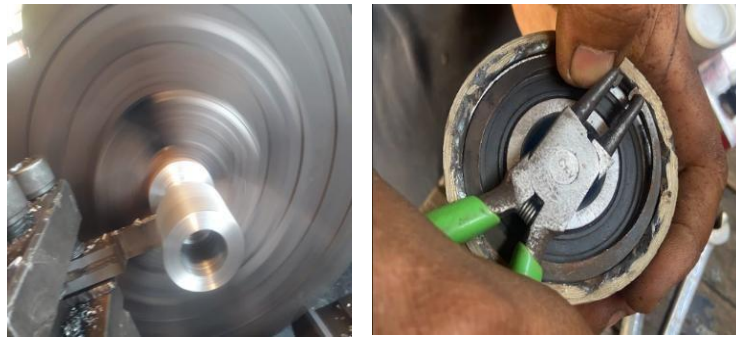
**Gambar 4. 5** Pembuatan *Pulley*.

d. Pembubutan Pipa Dudukan Bearing dan Alur Snap Ring

Pipa besi dibubut pada bagian dalam untuk menyesuaikan diameter luar bearing, lalu dibuat alur snap ring sebagai pengunci agar



posisi bearing tetap stabil selama operasi. Detail dapat dilihat pada **Gambar 4.6.**



**Gambar 4. 6** Proses Pembubutan Pipa untuk Dudukan *Bearing*.

#### 4.3.2 Perakitan Mekanis Twin Disk

##### a. Perakitan Rangka Utama

Rangka utama alat uji terbuat dari besi siku L yang dipotong dan dirakit dengan sambungan las untuk membentuk struktur penyangga yang kuat dan stabil. Detail rangka dapat dilihat pada **Gambar 4.7.**



**Gambar 4. 7** Proses Pemotongan dan Pengelasan Rangka Utama.

##### b. Pemasangan Motor dan Sistem *Pulley*

Motor dipasang pada rangka dengan dudukan besi siku L. Daya diteruskan melalui *flexible coupling* ke poros bawah, lalu ke sistem transmisi pulley dan *flat belt* dengan ketegangan yang disesuaikan, yang dapat dilihat pada **Gambar 4.8.**



**Gambar 4. 8** Motor Tersambung ke Poros Melalui *Flexible Coupling*.

c. Pemasangan Poros dan Disk Uji

Poros horizontal dipasang pada rangka menggunakan bearing tipe duduk untuk menjaga stabilitas rotasi. Ujung poros dibubut agar disk uji dapat dipasang dan dikunci dengan presisi dengan baut Ø16 mm. Disk atas dan bawah diposisikan sebagai pasangan kontak gesek sesuai kebutuhan pengujian, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.9.**



**Gambar 4. 9** Pembuatan *drag* poros dan pemasangan disk uji.

d. Integrasi Sensor dan Sistem Elektronik

Sensor torsi DYN-200 diintegrasikan dengan Arduino Uno melalui modul komunikasi RS-485 (MAX485). Data torsi dikirim secara serial ke laptop menggunakan PLX-DAQ dan ditampilkan

secara real-time dalam Microsoft Excel. Sistem ini memungkinkan pemantauan torsi secara langsung selama proses pengujian berlangsung.

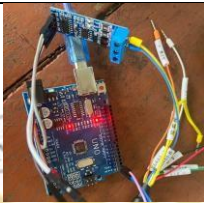
#### 4.3.3 Proses Manufaktur dan Komponen

Setiap komponen diproses dan dirakit sesuai tahapan perancangan yang telah ditentukan untuk membentuk alat uji *Twin Disk* yang siap digunakan.

**Tabel 4.7** Proses Manufaktur dan Komponen.

| No | Komponen                | Gambar                                                                              | Proses 1             | Proses 2                              |
|----|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1  | Poros Atas & Bawah      |    | Pembubutan           | Pembuatan drag untuk twin disk uji    |
| 2  | Pulley                  |   | Pembubutan           | Pengeboran lubang pasak               |
| 3  | Pipa Dudukan Bearing    |  | Pembubutan dalam     | Pembuatan alur snap ring              |
| 4  | Rangka Utama            |  | Pemotongan besi siku | Pengelasan                            |
| 5  | Motor dan Sistem Pulley |  | Pemasangan motor     | Penyambungan dengan flexible coupling |

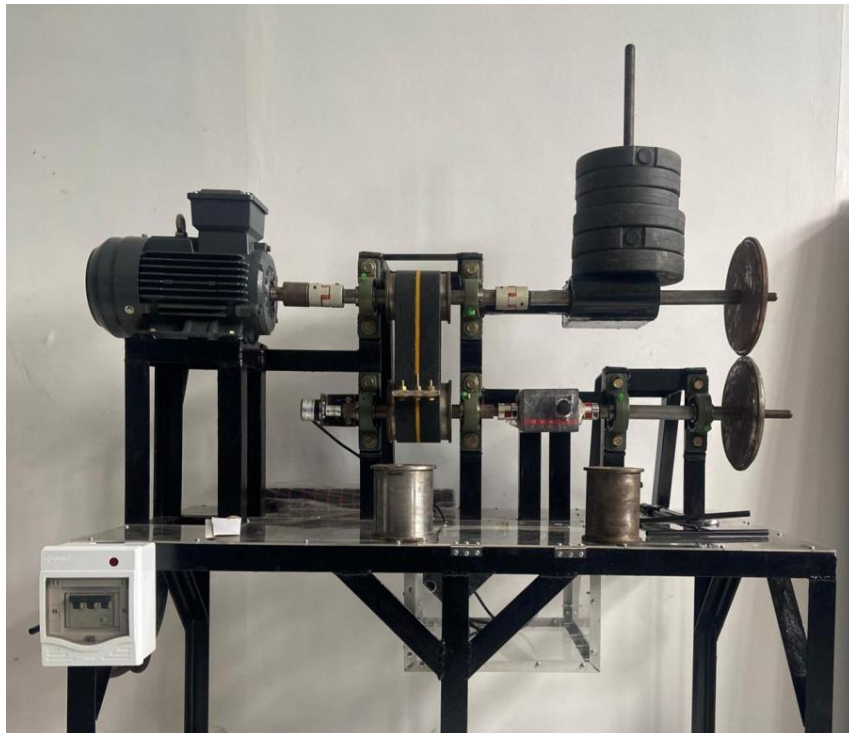


|    |                      |                                                                                     |                                                  |                                              |
|----|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 6  | Disk Uji             |    | Pemotongan baja AISI 1045                        | Pemasangan pada poros                        |
| 7  | Sensor Torsi DYN-200 |    | Instalasi sensor                                 | Koneksi dengan Arduino & MAX485              |
| 8  | Sistem Elektronik    |    | Perakitan Arduino & modul                        | Penataan kabel & instalasi PLX-DAQ           |
| 9  | Bantalan (Bearing)   |   | Pemilihan bearing sesuai kapasitas beban         | Pemasangan pada dudukan poros                |
| 10 | Flat Belt            |  | Pemotongan sesuai panjang                        | Pemasangan pada pulley atas dan bawah        |
| 11 | Flexible Coupling    |  | Pemasangan antara motor dan poros                | Penyetelan untuk kompensasi ketidaksejajaran |
| 12 | Beban                |  | Pemilihan beban sesuai kebutuhan gaya normal (N) | Pemasangan ke rumah beban pada poros atas    |



#### 4.3.4 Hasil Perakitan Alat Uji Twin Disk

Dudukan rangka alat uji twin disk yang telah disimulasikan kemudian dilanjutkan dengan proses pembuatan, perakitan, dan uji fungsi pada dudukan rangka alat uji twin disk. Hasil perancangan dan perakitan dudukan rangka alat uji twin disk skala laboratorium yang digunakan oleh laboran untuk penelitian torsi gesek, dapat dilihat pada 4.10.



**Gambar 4. 10** Alat Uji Twin Disk.

#### 4.4 Uji Fungsi Alat Twin Disk

##### 4.4.1 Metode dan Tujuan Pengujian

Pengujian dilakukan untuk memverifikasi kinerja alat uji Twin Disk dalam membaca torsi gesek akibat kontak antar permukaan disk yang diberikan beban tertentu. Tujuan utama dari pengujian ini adalah memastikan bahwa sistem sensor dan transmisi mampu bekerja secara akurat dan stabil saat beban diterapkan dalam kondisi pengujian yang berbeda. Metode pengujian dilakukan dengan

memberikan beban bertahap mulai dari 2 kg hingga 6 kg secara vertikal pada poros atas yang menekan disk uji atas terhadap disk uji bawah. Pengujian dilakukan dalam dua skenario slip ratio, yaitu:

- Slip ratio 0%: kedua disk berputar bersama tanpa perbedaan kecepatan rotasi (kondisi statis relatif).
- Slip ratio 20%: terdapat selisih kecepatan rotasi antardisk untuk mensimulasikan kondisi gesekan dinamis.

Setiap variasi beban dan slip ratio dicatat untuk mengukur torsi gesek yang dihasilkan menggunakan sensor torsi DYN-200. Data dikirimkan ke PLX-DAQ dan dicatat secara real-time untuk dianalisis lebih lanjut dalam subbab berikutnya.

#### 4.4.2 Hasil dan Tabel Pengujian

##### a. slip ratio 0%

Pengujian pertama dilakukan pada kondisi slip ratio 0% dengan tiga variasi beban. Nilai torsi gesek yang dihasilkan serta perhitungan koefisien gesek ditampilkan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Hasil Pengujian pada Slip Ratio 0%

| No | Beban (kg) | Gaya Normal (N) | Slip Ratio (%) | Waktu (menit) | Torsi Gesek (Nm) | Koefisien Gesek ( $\mu$ ) |
|----|------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|---------------------------|
| 1  | 2.0        | 19.6            | 0              | 5             | 0.2354           | 0.240                     |
| 2  | 4.0        | 39.2            | 0              | 5             | 0.2921           | 0.149                     |
| 3  | 6.0        | 58.8            | 0              | 5             | 0.2966           | 0.101                     |

##### b. slip ratio 20%

Pengujian kedua dilakukan pada kondisi slip ratio 20% dengan beban yang sama. Hasil torsi gesek dan koefisien gesek yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Hasil Pengujian pada Slip Ratio 20%

| No | Beban (kg) | Gaya Normal (N) | Slip Ratio (%) | Waktu (menit) | Torsi Gesek (Nm) | Koefisien Gesek ( $\mu$ ) |
|----|------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|---------------------------|
| 1  | 2.0        | 19.6            | 20             | 5             | 0,295            | 0.301                     |
| 2  | 4.0        | 39.2            | 20             | 5             | 0.366            | 0.187                     |
| 3  | 6.0        | 58.8            | 20             | 5             | 0,371            | 0.126                     |

#### Keterangan Perhitungan Koefisien Gesek:

Koefisien gesek ( $\mu$ ) dihitung menggunakan Persamaan:

$$\mu = \frac{T}{N \times r}$$

Dimana:

$T$  = Torsi gesek (Nm)

$N$  = Gaya normal (N) = massa beban (kg)  $\times$  9,81

$r$  = Jari-jari kontak efektif antar disk (m)

### 4.5 Pengujian Spesimen dan Pengamatan Permukaan Disk

#### 4.5.1 Kondisi Permukaan Sebelum Pengujian

Sebelum pengujian, permukaan disk uji dipastikan bersih, halus, dan bebas cacat untuk menjamin keakuratan pengamatan efek gesekan setelah pengujian, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.11**.

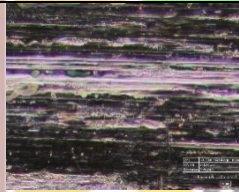


**Gambar 4. 11** Disk Sebelum Diuji.

#### 4.5.2 Ringkasan Observasi Visual

Hasil observasi visual terhadap permukaan disk sebelum dan setelah dilakukan pengujian dirangkum dalam tabel berikut. Pengamatan difokuskan pada perubahan tampilan permukaan, seperti kemunculan goresan atau indikasi keausan yang muncul akibat gesekan selama pengujian.

**Tabel 4.10** Hasil Pengamatan Permukaan Disk Uji

| Kondisi     | Hasil Pengamatan                                                                   | Keterangan                                                                     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Sebelum uji |   | Permukaan halus, tidak ada goresan                                             |
| Setelah uji |  | Goresan longitudinal tampak jelas, menunjukkan keausan akibat gesekan berulang |

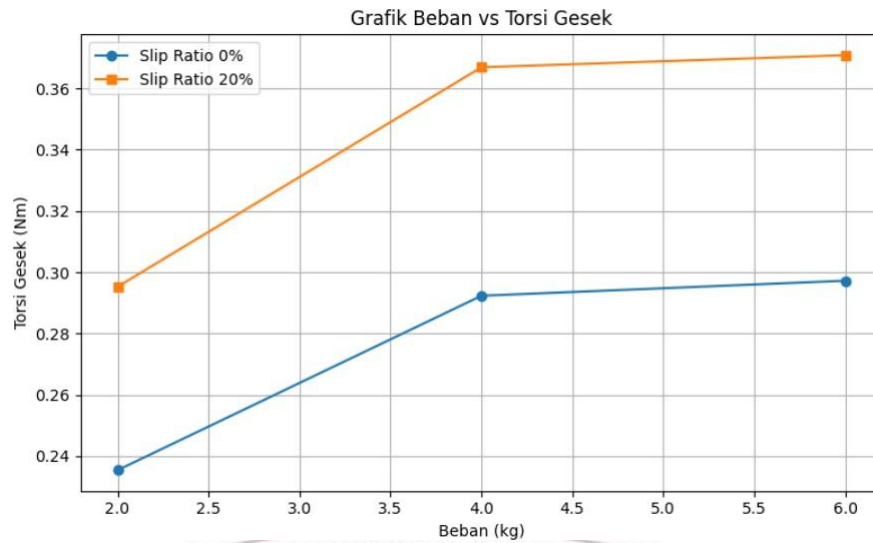
#### 4.5.3 Grafik dan Analisis Torsi Gesek

Untuk memperjelas hubungan antara beban, torsi, dan kondisi slip, dibuat grafik berdasarkan data hasil pengujian. Grafik ini membantu memvisualisasikan kinerja alat uji Twin Disk serta pengaruh slip ratio terhadap torsi gesek dan koefisien gesek.

##### a. Grafik Beban vs Torsi Gesek

Grafik berikut menunjukkan hubungan antara beban (kg) dan torsi gesek (Nm) pada dua kondisi slip ratio, yaitu 0% dan 20%, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.12**.



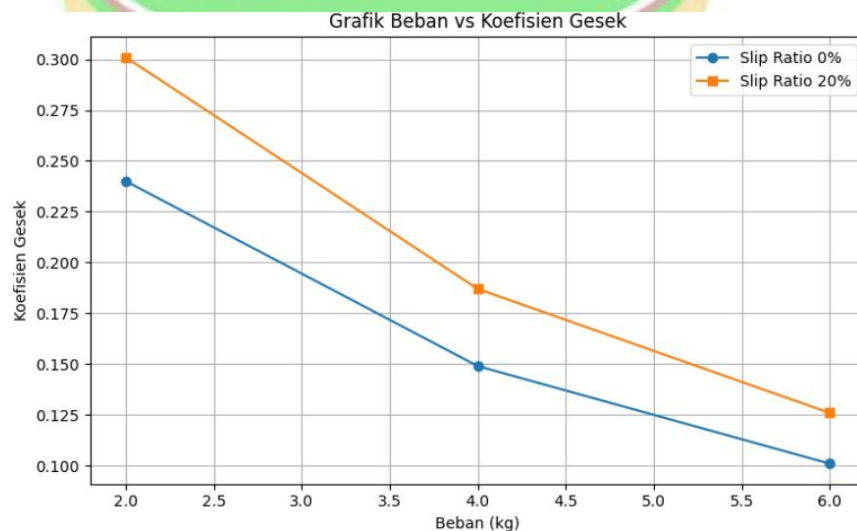


**Gambar 4. 12** Grafik Beban vs Torsi Gesek.

Hasil pengujian menunjukkan tren positif antara beban dan torsi gesek. Selain itu, perbandingan antara dua kurva membuktikan bahwa slip ratio sebesar 20% secara efektif meningkatkan torsi gesek, menyoroti peran penting perbedaan kecepatan putar dalam proses transfer daya.

b. Grafik Beban vs Koefisien Gesek ( $\mu$ )

Grafik ini menunjukkan hubungan antara koefisien gesek dan beban pada slip ratio 0% dan 20%, seperti yang ditampilkan pada **Gambar 4.13**.



**Gambar 4. 13** Grafik Beban vs Koefisien Gesek ( $\mu$ ).

Analisis grafik menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara koefisien gesek dan beban; yaitu, peningkatan beban menyebabkan penurunan koefisien gesek. Di samping itu, pada setiap titik beban, koefisien gesek pada slip 20% selalu lebih besar daripada pada kondisi tanpa slip. Hal ini menyiratkan bahwa slip ratio secara efektif meningkatkan karakteristik gesekan material.

#### c. Analisis Hasil Grafik

Berdasarkan pengamatan terhadap kedua grafik, beberapa temuan utama dapat diidentifikasi:

- 1) Pengaruh Beban terhadap Torsi Gesek: Torsi gesek teramati meningkat seiring dengan bertambahnya beban yang diberikan, menunjukkan adanya korelasi positif antara kedua variabel tersebut pada kondisi slip 0% dan 20%.
- 2) Peran Slip Ratio: Pada beban yang sama, kondisi slip 20% secara konsisten menghasilkan torsi gesek yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi tanpa slip. Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan kecepatan putar antarpiringan berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan torsi gesek.
- 3) Koefisien Gesek: Berdasarkan grafik kedua, terlihat bahwa koefisien gesek ( $\mu$ ) berbanding terbalik dengan beban. Namun, penting untuk dicatat bahwa pada setiap level beban, nilai koefisien gesek pada slip 20% lebih besar daripada slip 0%.
- 4) Validitas Pengujian: Konsistensi hasil pada kedua grafik memberikan validasi terhadap sistem pengukuran dan kinerja alat yang berhasil mendeteksi dan merekam perubahan akibat variasi beban dan slip dengan akurat.

#### 4.5.4 Parameter Performa Alat

Tabel berikut merangkum parameter performa alat uji Twin Disk berdasarkan hasil aktual pengujian dan perbandingan terhadap target spesifikasi perancangan.

**Tabel 4.11** Tabel Parameter Performa Alat Uji Twin Disk.

| No | Parameter Performa                       | Hasil Pengukuran | Standard/Target | Keterangan                                    |
|----|------------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------------------------------|
| 1  | Kecepatan Putar Disk (rpm)               | $\pm 1480$       | 1400            | Melebihi target, namun masih dalam batas aman |
| 2  | Akurasi Sensor Torsi (%)                 | $\pm 0,1$        | $\leq 1$        | Jauh lebih baik dari target                   |
| 3  | Rentang Beban Uji (N)                    | 0 – 60           | 0 – 60          | Sesuai dengan rentang desain                  |
| 4  | Stabilitas Pembacaan Torsi (% fluktuasi) | 1,8              | $\leq 3$        | Stabil                                        |
| 5  | Waktu Respons Sensor                     | Real-time        | Secara langsung | Data terbaca dan tampil secara instan         |

