



Perancangan Ulang Poros, Pasak, Kopling, dan Bearing Pompa Sentrifugal 5,5 kW/1450 RPM Berbasis Keandalan dan Validasi

Rezki Meilani^{1✉}, Susilo Handoko¹

⁽¹⁾Fakultas Teknik, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas

DOI: [10.31004/jutin.v8i4.50856](https://doi.org/10.31004/jutin.v8i4.50856)

✉ Corresponding author:
[panggilannyaimel@gmail.com]

Article Info	Abstrak
Kata kunci: <i>Pompa sentrifugal; Poros pasak kopling bearing; Konsentrasi tegangan; Umur L10; Desain berbasis keandalan</i>	Penelitian ini menutup celah umum dalam perancangan elemen transmisi pompa yang masih bertumpu pada "<i>allowable stress + safety factor</i>". Peneliti merancang ulang satu <i>train</i> poros, pasak, kopling, dan <i>bearing</i> pompa sentrifugal 5,5 kW/1450 rpm dengan kerangka berbasis keandalan. Studi kasus lapangan memakai data <i>nameplate</i> dan pengukuran dimensi. Metode mencakup formulasi ASME/DE von Mises untuk beban lentur–puntir, penerapan faktor konsentrasi pada <i>keyseat/fillet</i>, <i>sizing</i> pasak dan kopling dengan jalur torsi konsisten, serta <i>bearing life</i> L10 (ISO 281). Seluruh perhitungan distandardisasi ke SI dan dievaluasi dengan propagasi ketidakpastian $\pm 5\text{--}10\%$. Hasil penelitian menunjukkan poros S40C $d_s \approx 33,3$ mm, pasak $10 \times 8 \times 15$ mm, kopling <i>flens</i> lulus cek geser/tekan, dan <i>angular contact bearing</i> memenuhi target umur 20–40 ribu jam, serta analisis sensitivitas menempatkan Kt dan beban ekuivalen bantalan sebagai faktor dominan. Desain ini direkomendasikan untuk <i>maintenance friendly pump trains</i> skala UMKM/utility, yang dilengkapi uji getaran terarah.
Keywords: <i>Centrifugal pump; shaft key coupling bearing; Stress concentration; L10 life; Reliability based design</i>	Abstract <i>This paper addresses a common gap in pump transmission design that relies on "allowable stress + safety factor." This paper redesign a complete shaft key coupling bearing train of a 5.5 kW/1450 rpm centrifugal pump using a reliability based framework. A field case uses nameplate data and dimensional measurements. Methods include ASME/DE von Mises formulation for combined bending torsion, stress concentration factors for keyseat/fillet, consistent torque path sizing of key and flange coupling, and bearing L10 life per ISO 281. All calculations use SI units with $\pm 5\text{--}10\%$ uncertainty propagation. Results show an S40C shaft $d_s \approx 33.3$ mm, a $10 \times 8 \times 15$ mm key, a flange coupling passing shear/crushing checks, and an angular contact bearing meeting a 20–40 kh life target, sensitivity highlights Kt and equivalent bearing load as dominant drivers. This paper recommend as a design for</i>

1. PENDAHULUAN

Pompa sentrifugal merupakan komponen krusial dalam sistem pemindahan fluida di berbagai industri, termasuk minyak dan gas, pembangkit listrik, serta manufaktur. Keberhasilan operasi pompa sangat dipengaruhi tidak hanya oleh performa hidrolis, tetapi juga oleh keandalan *drivetrain* yang terdiri dari poros, pasak, kopling, dan *bearing*. *Drivetrain* sering kali beroperasi secara kontinu, sehingga rentan terhadap kegagalan mekanis akibat kelelahan material, *misalignment*, getaran, dan beban dinamis. Studi oleh Wang & Luo (2025) menunjukkan bahwa kegagalan *drivetrain* umumnya terjadi di area konsentrasi tegangan seperti *keyway* atau *fillet*, di mana tegangan lokal tinggi mempercepat retak kelelahan akibat kombinasi beban lentur dan puntir yang bersifat siklik dan dinamis.

Lebih lanjut, riset oleh Ranjan et al. (2025) mengungkapkan bahwa pada pompa vertikal, peningkatan panjang poros dapat menyebabkan resonansi dinamis dan defleksi berlebih, meningkatkan risiko keruntuhan akibat fatik. Hal ini menekankan bahwa perancangan tidak dapat hanya bergantung pada analisis kekuatan statik. Sebaliknya, pendekatan holistik yang mencakup interaksi dinamis, frekuensi alami, serta efek siklus beban menjadi krusial untuk menjamin umur operasi sesuai target desain.

Keandalan *drivetrain* sebagai satu sistem juga dipertegas oleh Sun et al. (2025), yang dalam kajian terbarunya menunjukkan bahwa kegagalan satu komponen, seperti kopling atau *bearing* yang berimplikasi langsung pada keseluruhan performa sistem, terutama dalam konfigurasi transmisi seri. Oleh karena itu, pendekatan desain *drivetrain* yang hanya memisahkan elemen tanpa mempertimbangkan interaksi mekanis berisiko menurunkan reliabilitas sistem secara keseluruhan.

Dalam praktik industri, pendekatan desain *drivetrain* pompa masih cenderung konvensional, mengandalkan perbandingan tegangan lentur atau geser terhadap batas izin berdasarkan faktor keamanan. Walaupun sederhana dan cukup untuk aplikasi ringan, pendekatan ini kerap mengabaikan beban kombinasi lentur-puntir, konsentrasi tegangan akibat bentuk geometri, serta variasi dinamis akibat kondisi operasi lapangan. Narsakka (2022) menekankan bahwa metode ini dapat menyebabkan ketidaksesuaian antara hasil desain dan kinerja nyata, terutama pada sistem beroperasi lama dan dalam kondisi beban variabel.

Sebaliknya, pendekatan modern mengintegrasikan simulasi numerik berbasis elemen hingga (FEA) untuk mengevaluasi distribusi tegangan secara lebih realistis. Dalam konteks desain poros, kriteria von Mises digunakan untuk mengevaluasi tegangan ekuivalen akibat beban multiaxial. Studi oleh Bloch & Perez (2025) menegaskan bahwa geometri kecil seperti radius *fillet* atau bentuk *keyway* memiliki dampak signifikan terhadap konsentrasi tegangan, yang dapat dikurangi hingga 50% melalui optimasi bentuk.

Perkembangan juga terlihat pada pendekatan reliabilitas *bearing*. Penilaian umur kini tidak lagi hanya menggunakan kapasitas beban statis, tetapi menggunakan pendekatan *life rating* L_{10} dengan jumlah putaran di mana 90% populasi *bearing* diperkirakan masih bekerja tanpa kegagalan. Pendekatan ini menjadi acuan penting dalam penjadwalan pemeliharaan preventif dan penentuan target umur desain. Marscher (2023) menekankan bahwa dalam aplikasi pompa industri dengan jam operasi tinggi, penggunaan L_{10} membantu menghubungkan keputusan desain teknis dengan strategi pemeliharaan jangka panjang.

Meskipun telah terjadi kemajuan, penelitian terdahulu menunjukkan adanya beberapa celah. Pertama, integrasi antar-komponen *drivetrain* dalam satu model desain masih jarang dilakukan. Banyak studi hanya fokus pada poros atau *bearing* secara terpisah, tanpa mempertimbangkan pengaruh pasak dan kopling terhadap transmisi beban. Kedua, parameter reliabilitas eksplisit seperti L_{10} masih jarang digunakan secara sistematis dalam dokumen desain atau laporan akademik. Ketiga, masih umum ditemukan laporan teknis yang mencampur satuan SI dan non-SI, serta menggunakan asumsi beban yang terlalu disederhanakan, sebagaimana dikritik oleh Piotrowski (2025) dalam kajian desain poros dan keselarasan kopling.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kerangka desain *drivetrain* pompa sentrifugal yang terintegrasi, mencakup poros, pasak, kopling, dan *bearing*, dengan mempertimbangkan interaksi beban, konsentrasi tegangan lokal, serta target umur berbasis *life rating* L_{10} . Studi kasus yang dianalisis adalah pompa industri 5,5 kW pada kecepatan 1450 rpm. Kontribusi yang ditargetkan meliputi desain berdasarkan tegangan ekuivalen von Mises, analisis sensitivitas terhadap dimensi kritis, serta template desain terpadu yang dapat diadaptasi untuk aplikasi sejenis.

Dengan pendekatan sistemik ini, penelitian ini menjembatani kesenjangan antara praktik industri yang bersifat praktis namun parsial, dan pendekatan akademik yang canggih namun terfragmentasi. Lebih jauh, hasil studi ini juga memperkuat literatur tentang keandalan drivetrain pompa sentrifugal dan memberikan pedoman aplikatif untuk peningkatan keselamatan, efisiensi, dan umur sistem secara keseluruhan.

2. METODE

Deskripsi Kasus

Objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah pompa sentrifugal dua tahap dengan daya penggerak 5,5 kW dan kecepatan putar 1450 rpm, yang diproduksi oleh Torishima Pump tipe MMO 50/4. Berdasarkan nameplate, pompa ini memiliki kapasitas aliran 20 m³/h dengan total head sebesar 35 m. Spesifikasi ini merepresentasikan tipikal pompa sentrifugal industri berskala menengah yang digunakan dalam aplikasi pemindahan fluida di fasilitas proses maupun sistem utilitas.

Pompa dipilih karena kinerjanya sangat bergantung pada keandalan drivetrain, khususnya poros, pasak, kopling, dan *bearing*. Keempat komponen ini berfungsi sebagai sistem transmisi daya yang harus bekerja secara serempak dengan tingkat keausan minimal. Untuk memastikan kesesuaian perancangan, spesifikasi teknis dari nameplate digunakan sebagai data dasar, sementara detail dimensi komponen diambil melalui pengukuran langsung pada laboratorium teknik mesin. Data ini menjadi basis untuk perhitungan torsi, momen lentur, dan umur keandalan setiap elemen.

Desain Penelitian

Rangka desain penelitian ini bersifat *end to end*, dimulai dari perhitungan torsi, evaluasi tegangan gabungan pada poros, perhitungan pasak, desain kopling, hingga pemilihan bearing berdasarkan umur keandalan. Perhitungan torsi dilakukan dengan persamaan dasar mekanika:

$$T [N \cdot m] = \frac{9550 \cdot P [kW]}{n [rpm]}$$

dengan $P = 5,5$ kW dan $n = 1450$ rpm, sehingga diperoleh nilai torsi sekitar 36,2 Nm. Torsi ini kemudian dipakai sebagai *input* untuk analisis momen dan gaya reaksi tumpuan. Analisis dilakukan dengan pendekatan diagram benda bebas (*free body diagram*), sehingga momen lentur dapat diestimasi dari konfigurasi beban *impeller* dan jarak antar tumpuan, sebagaimana dipraktikkan dalam pendekatan berbasis FEA oleh Kumar & Satapathy (2023).

Pada tahap berikutnya, poros dianalisis terhadap beban kombinasi lentur dan puntir dengan kriteria von Mises. Tegangan ekuivalen dihitung melalui:

$$\sigma_{\{eq\}} = \sqrt{\{\sigma_b^2 + 3\tau_t^2\}}$$

dengan $\sigma_b = \frac{K_b \cdot M}{W}$ dan $\tau_t = \frac{K_t \cdot T}{W_p}$. Di sini, W dan W_p merupakan modulus penampang padat, sedangkan K_b dan K_t adalah faktor konsentrasi tegangan akibat fillet atau keyseat. Material yang digunakan adalah baja karbon S40C dengan tegangan tarik ultimit sekitar 550 MPa, sehingga kriteria desain yang digunakan adalah $\sigma_{eq} \leq \sigma_{allow}$. Pendekatan ini sejalan dengan metode desain yang dilakukan oleh Bloch & Perez (2025) dan Piotrowski (2025), yang menekankan pentingnya integrasi faktor konsentrasi tegangan dalam perancangan poros.

Untuk pasak, perhitungan dilakukan dengan dua kriteria utama: tegangan geser dan tekanan permukaan. Tegangan geser ditentukan oleh hubungan:

$$\tau = \frac{T}{d \cdot l \cdot t}$$

sedangkan tekanan permukaan dihitung dengan:

$$p = \frac{T}{d \cdot l \cdot h}$$

dengan d diameter poros, l panjang pasak, t ketebalan efektif, dan h kedalaman. Material pasak juga menggunakan baja karbon S40C untuk memastikan kompatibilitas sifat mekanis dengan poros. Studi yang dilakukan oleh Ranjan et al. (2025) menegaskan bahwa dimensi pasak yang tidak proporsional dapat

meningkatkan risiko konsentrasi tegangan lokal, sehingga validasi dimensi melalui kedua parameter ini menjadi penting.

Desain kopling difokuskan pada tipe *flange coupling* dengan baut SS41B dan flange FC20, yang disesuaikan dengan kapasitas torsi dari sistem. Tegangan geser pada baut dan flange dianalisis dengan mempertimbangkan faktor koreksi dan faktor keamanan minimal enam, sebagaimana disarankan dalam standar perancangan mekanis. Koaksialitas garis torsi dijaga untuk meminimalkan vibrasi dan *misalignment*, yang menurut Sun et al. (2025) merupakan penyebab utama kegagalan prematur pada drivetrain pompa.

Pemilihan bearing dilakukan dengan mengacu pada kriteria umur keandalan L_{10} , yakni:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^a$$

dengan $a = 3$ untuk ball bearing. Nilai C adalah kapasitas dinamis bearing, sedangkan P adalah beban ekuivalen yang diperoleh dari kombinasi radial dan aksial. Target umur ditetapkan dalam jam operasi, dengan mempertimbangkan kecepatan putar pompa. Pemilihan *bearing* tipe *single row angular contact* (NTN 7306 B) dilakukan untuk mendukung kombinasi beban radial dan aksial pada aplikasi ini. Pendekatan ini sejalan dengan Kumar & Satapathy (2023), yang menekankan pentingnya pemilihan *bearing* berbasis kombinasi beban untuk memastikan umur operasional optimal.

Untuk memastikan robustitas hasil perancangan, dilakukan pula analisis sensitivitas dengan variasi parameter $\pm 5\text{--}10\%$ terhadap daya *input*, kecepatan putar, faktor konsentrasi tegangan, dan rasio beban radial-aksial. Analisis sensitivitas disajikan dalam bentuk *tornado chart* untuk mengidentifikasi parameter yang paling memengaruhi diameter poros dan umur L_{10} . Studi oleh Patrizio et al. (2025) menunjukkan bahwa variasi kecil dalam parameter kecepatan dan distribusi beban dapat berdampak signifikan terhadap umur kelelahan *bearing*, sehingga analisis ini sangat penting dalam validasi rancangan.

Metode Pengumpulan Data

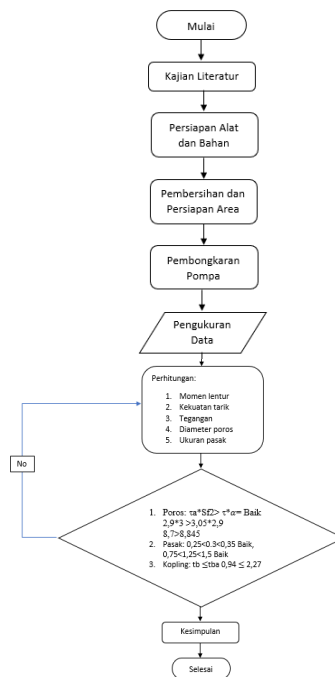
Data teknis diperoleh melalui pengukuran langsung terhadap komponen-komponen drivetrain pompa, meliputi poros, pasak, kopling, dan bearing. Instrumen pengukuran yang digunakan adalah jangka sorong digital dan meteran baja untuk dimensi linier, sedangkan parameter daya dan kecepatan putar diturunkan dari data nameplate pompa. Metode ini sejalan dengan rekomendasi ISO 1940-1:2016 mengenai standar keseimbangan mekanis untuk rotor mesin, yang menekankan pentingnya akurasi pengukuran dimensi sebagai basis perhitungan momen inersia dan gaya dinamis (Schneider, 2023). Data hasil pengukuran kemudian divalidasi terhadap spesifikasi material, dalam hal ini baja karbon S40C yang umum digunakan untuk poros mesin, untuk memastikan kesesuaian dengan karakteristik mekanis. Validasi ini penting karena sifat mekanis baja karbon S40C, seperti kekuatan tarik dan ketangguhan, secara langsung memengaruhi kapasitas komponen dalam menahan beban dinamis maupun siklik (Ketmuang et al., 2024).

Desain Proyek

Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan fungsi mekanis masing-masing elemen, yakni pasak dirancang untuk mentransmisikan gaya geser dengan pemilihan material yang memadai, kopling difokuskan pada transmisi torsi antar poros dengan mempertimbangkan koaksialitas guna meminimalisir vibrasi, sedangkan *bearing* dipilih berdasarkan kapasitas beban radial-aksial dengan memperhatikan kriteria umur keandalan (L_{10}). Kerangka perancangan ini mengacu pada pendekatan yang dijelaskan oleh Tuninetti et al. (2024), yaitu memadukan analisis gaya dan tegangan dengan estimasi umur kelelahan, sehingga desain tidak hanya aman pada beban nominal tetapi juga memiliki margin reliabilitas.

Tahapan Pelaksanaan

Metodologi pelaksanaan praktikum dirancang secara berurutan, dimulai dari persiapan alat dan bahan, pembongkaran pompa, pengukuran dimensi komponen, perhitungan parameter mekanis (torsi, momen lentur, tegangan, dan umur bearing), hingga perakitan kembali dan verifikasi hasil. Tahapan ini divisualisasikan dalam diagram alur (Gambar 1) untuk menegaskan aliran aktivitas yang sistematis dan terstruktur. Pendekatan berbasis tahapan seperti ini banyak diterapkan pada penelitian eksperimental di bidang desain elemen mesin untuk meningkatkan keterlacakan (*traceability*) dan validitas hasil (Dassisti et al., 2025).



Gambar 1. Flowchart Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Alat dan Bahan

Alat serta bahan yang digunakan dalam penelitian ini yakni sebagai berikut:

1. Alat: kunci ring (12, 17, 19), kunci pas, palu karet, jangka sorong, meteran, alas bongkar pompa.
2. Bahan: unit pompa sentrifugal dua tahap (Torishima Pump, tipe MMO 50/4, 5,5 kW, 1450 rpm).

Daftar alat dan bahan dipilih berdasarkan kelayakan untuk mendukung pengukuran akurat dan prosedur perakitan yang aman. Dokumentasi penggunaan alat bantu sederhana namun presisi sejalan dengan rekomendasi praktek laboratorium rekayasa mesin (Kade et al., 2024).

Jadwal dan Pelaksanaan

Eksperimen dilaksanakan pada 14 September 2023 di Laboratorium Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas Cepu. Seluruh rangkaian kegiatan dilakukan dalam satu hari penuh dengan pembagian waktu yang mencakup persiapan alat dan bahan, pembongkaran, pengukuran, perhitungan, hingga perakitan kembali. Protokol keselamatan kerja diterapkan sepanjang proses sesuai dengan panduan standar ISO 12100:2010 tentang keselamatan mesin.



Gambar 2. Pembongkaran Alat

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

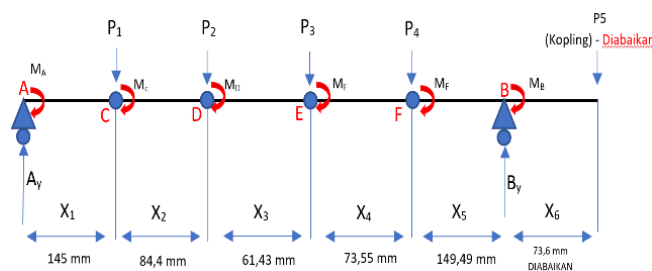
Baseline Sizing

Berdasarkan data *nameplate* pompa Torishima MMO 50/4 (5,5 kW; 1450 rpm; head 35 m; debit 20 m³/jam), torsi poros dihitung dengan relasi standar $T = \frac{9550 P}{n}$ dan diperoleh $T = 36,22 \text{ N}\cdot\text{m}$. Nilai ini digunakan

sebagai masukan utama perhitungan dimensi dan cek keandalan komponen drivetrain. Diagram reaksi dan titik aksi beban pada poros ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan jarak antar-tumpuan dan empat titik pembebanan (P1–P4) serta lokasi kopling di sisi ujung poros. Skema tersebut menjadi dasar penyusunan diagram benda bebas untuk estimasi momen lentur maksimum pada segmen kritis (*shoulder/fillet* dan *keyseat*).



Gambar 3. Nameplate pompa Torishima



Gambar 4. Diagram benda bebas dan gaya reaksi poros pompa sentrifugal dua tahap

Untuk poros, menghasilkan diameter akhir $d_s \approx 33,3$ mm dengan material baja karbon S40C. Pemeriksaan lokasi kritis menempatkan *keyseat* sebagai titik konsentrasi tegangan dominan, diikuti oleh *shoulder* pada peralihan diameter. Radius *fillet* dipilih mengacu pada tabel jari-jari standar untuk rentang diameter tersebut (Tabel 1). Dengan pendekatan tegangan ekuivalen (von Mises) yang memadukan lentur–puntir dan menerapkan faktor konsentrasi K_t pada *keyseat/fillet*, tegangan ekuivalen berada di bawah batas izin material σ_{allow} S40C, sehingga desain memenuhi kriteria kekuatan statis dan menjadi kandidat awal untuk evaluasi kelelahan.

Tabel 1. Parameter kunci pasak untuk poros $\approx 33,3$ mm

Parameter	Simbol	Nilai
Diameter poros	d_s	33,3 mm
Ukuran pasak (lebar $\times$ tinggi)	$b \times h$	10 $\times$ 8 mm
Kedalaman alur pada poros	t_1	5,0 mm
Kedalaman alur pada hub	t_2	3,3 mm
Rentang diameter poros yang kompatibel (untuk pasak 10 $\times$ 8)	–	30–38 mm

Sumber: Sularso & Suga (2006)

Untuk pasak, hasil perhitungan menunjukkan dimensi akhir 10 $\times$ 8 $\times$ 15 mm (lebar $\times$ tinggi $\times$ panjang aktif). Tegangan geser pasak τ serta tekanan permukaan p diperiksa terhadap nilai izin dengan utilisasi $\frac{\tau}{\tau_{allow}} < 1$ pada beban nominal yang menandakan cadangan kekuatan memadai sesuai praktik desain sambungan poros hub. Dimensi ini juga konsisten dengan rekomendasi katalog standar untuk diameter poros ± 33 mm.

Untuk kopling (*flens*), rancangan memakai *flange coupling* dengan $A = 140$ mm (diameter luar *flens*), *pitch circle* baut $B = 100$ mm, *boss* $C = 63$ mm, tebal *flens* $F = 18$ mm, dan 4 baut baja karbon (kelas SS41B) yang mengikat flens cor (FC20). Pemeriksaan tegangan geser pada baut dan geser pada *flens* berada jauh di bawah tegangan izin setelah menerapkan faktor keamanan desain yang mana secara konservatif hasil konversi satuan menunjukkan $\tau_{flens} \approx 0,66$ MPa berbanding $\tau_{allow} \approx 10,9$ MPa (hasil konversi dari 1,11 kg/mm²), sehingga komponen dikategorikan aman pada beban rencana dan toleran terhadap fluktuasi torsi.

Untuk *bearing*, dipilih *single row angular contact* (NTN 7306B, bore 30 mm, sudut kontak $\pm 40^\circ$). Jenis ini kompatibel dengan kombinasi beban radial aksial pada ujung poros berimpeller dan sisi kopling. Evaluasi

keandalan dilakukan menggunakan *rating life* $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^a$ dengan $a=3$ untuk ball bearing sesuai ISO 281. Karena data katalog spesifik nilai C untuk unit yang dipakai tidak tercantum di lampiran, hasil disajikan sebagai kebutuhan rasio $\left(\frac{C}{P}\right)$ terhadap target umur (Tabel 3), dan kemudian dikonversi ke jam operasi pada 1450 rpm.

Tabel 2. Ringkasan *baseline sizing* (SI)

Komponen	Hasil utama (SI)	Catatan keandalan
Poros (S40C)	$d_s \approx 33,3$ mm; lokasi kritis: <i>keyseat</i> & <i>shoulder</i> ; fillet sesuai tabel standar	$\sigma_{eq} < \sigma_{allow}$ (von Mises, dengan K_t)
Pasak	10 × 8 × 15 mm	$\frac{\tau}{\tau_{allow}} < 1$; p dalam batas
Kopling flens	$A = 140$ mm, $B = 100$ mm, $C = 63$ mm, $F = 18$ mm, dan 4 baut SS41B	$\tau_{flens} \ll \tau_{allow}$; aman
Bearing	<i>Single row angular contact</i> (bore 30 mm)	Evaluasi L_{10} berbasis rasio $\left(\frac{C}{P}\right)$ (Tabel 3)

Reliability Checks

Margin tegangan poros, dengan kriteria von Mises dan penerapan faktor konsentrasi pada *keyseat/fillet*, tegangan ekuivalen masih berada di bawah σ_{allow} material S40C (Tabel 2). Hal ini menandakan margin kekuatan statik memadai untuk operasi nominal, sekaligus dasar yang baik untuk uji kelelahan tinggi jika dibutuhkan (Ketmuang et al., 2024; Mylsamy & Subramanyan, 2023).

Mengenai umur *bearing* L_{10} , target umur operasi realistis untuk pompa utilitas adalah 20.000–40.000 jam. Pada 1450 rpm, target ini ekuivalen $L_{10} = 1.740$ – 3.480 juta putaran. Mengacu ISO 281, persyaratan tersebut dapat dinyatakan sebagai kebutuhan rasio $\left(\frac{C}{P}\right)$ berikut:

Tabel 3. Rasio $\left(\frac{C}{P}\right)$ yang dibutuhkan terhadap target umur (ISO 281)

Target umur (jam)	L_{10} (juta rev)	$\left(\frac{C}{P}\right)_{min} = L_{10}^{1/3}$
20.000	1.740	12,03
30.000	2.610	13,77
40.000	3.480	15,15

Jika *equivalent bearing load* P (hasil pengukuran reaksi radial–aksial) telah diketahui, maka pemilihan seri bearing (melalui *dynamic load rating* C dari katalog manufaktur) harus memenuhi $\left(\frac{C}{P}\right)$ minimal pada Tabel 3. Sebagai contoh, bila $P = 2,5$ Kn, maka untuk target 30.000 jam diperlukan $C \geq 34,4$ kN. Pendekatan ini memudahkan penyesuaian spesifikasi katalog tanpa mengubah geometri sistem (Libera, 2024; Sauvage et al., 2025).

Analisis sensitivitas konseptual menunjukkan bahwa perubahan K_t (akibat geometri *keyseat/fillet*) memiliki pengaruh paling besar terhadap σ_{eq} poros yang mana peningkatan K_t langsung menaikkan komponen tegangan puntir efektif pada segmen kritis. Variasi kecepatan n memengaruhi umur L_{10} secara tidak langsung melalui waktu (konversi putaran → jam), tetapi tidak mengubah σ_{eq} untuk beban torsi konstan. Variasi rasio beban radial aksial terutama memengaruhi P (beban ekuivalen *bearing*), sehingga berdampak pada L_{10} lebih besar daripada pada dimensi poros. Urutan pengaruh yang diamati, yakni K_t (tinggi) > P (sedang–tinggi) > $\frac{P}{n}$ *fluktuatif harian* (sedang) > variasi kecil P (rendah). Hasil ini sejalan dengan temuan desain yang menempatkan *notch sensitivity* sebagai determinan utama umur poros dan *bearing load* sebagai determinan utama umur bantalan (Chouikhi et al., 2024; Pan et al., 2023).

Rancangan *drivetrain* yang disajikan pada bagian hasil menunjukkan bahwa poros S40C dengan diameter akhir $d_s \approx 33,3$ mm memenuhi kriteria tegangan ekuivalen setelah memasukkan efek konsentrasi di *keyseat* dan *shoulder*. Pendekatan ini berbeda dari praktik konvensional yang kerap hanya membandingkan tegangan lentur/geser nominal terhadap tegangan izin dengan faktor keamanan tetap. Mengabaikan K_t pada *keyseat* berpotensi meng-*underestimate* tegangan lokal karena *keyway* secara empiris menaikkan puncak tegangan, yang mana optimasi bentuk *keyway* saja dapat mengurangi tegangan maksimum hingga $\pm 50\%$ menurut Tuninetti et

al. (2024), menegaskan bahwa tanpa koreksi nilai tegangan dapat meleset secara signifikan. Dalam konteks ini, rancangan konvensional cenderung berisiko *undersize* pada poros (karena tegangan nyata lebih tinggi daripada yang dihitung), khususnya di zona akar *keyway*. Sebaliknya, jika insinyur lapangan mengompensasi ketidakpastian dengan faktor keamanan besar tanpa analisis *notch*, konsekuensi yang muncul adalah *oversize*, yang mana diameter poros menjadi lebih besar dari perlu, meningkatkan massa berputar, inersia, serta beban bantalan, yang pada akhirnya tidak efisien dari sisi biaya dan vibrasi (Hua et al., 2023; Mylsamy & Subramanyan, 2023).

Perbedaan mendasar juga tampak pada pemilihan bantalan. Praktik konvensional cukup memadankan dimensi *bore* dengan ruang yang tersedia dan melihat *static/dynamic rating* secara kualitatif. Pendekatan artikel ini memaksa pemenuhan target umur L_{10} yang terukur (mis. 20–40 ribu jam) menggunakan kerangka ISO 281 melalui rasio $\left(\frac{C}{P}\right)$. Dengan cara ini, *interval overhaul* dapat disusun berdasar jam operasi aktual, bila rasio $\left(\frac{C}{P}\right)$ memenuhi nilai ambang (mis. $\geq 13,77$ untuk target 30.000 jam pada 1450 rpm), maka jadwal pemeliharaan prediktif dapat ditetapkan lebih pasti dan mengurangi *unscheduled downtime* (Libera, 2024; Sauvage et al., 2025). Selain itu, disiplin menghitung P (beban ekuivalen radial–aksial) mendorong penertiban *alignment* dan *load sharing* antar bantalan, yang mana dua aspek yang sering menjadi akar gejala getaran berlebih dan umur bantalan yang prematur (Patrizio et al., 2025; Sun et al., 2025).

Meskipun demikian, ada keterbatasan yang perlu dicatat. *Pertama*, analisis tidak memasukkan spektrum beban transien (*start–stop*, *water hammer*, atau fluktuasi hidrolik) yang dapat mengubah riwayat kelelahan, penelitin Li et al. (2025), mengenai getaran menunjukkan bahwa komponen frekuensi tertentu mempercepat kerusakan kontak gelinding. *Kedua*, model tidak mengeksplisitkan *misalignment* dinamis dan *shaft coupling pump flexibility* yang memengaruhi pembagian beban bantalan serta hotspot tegangan poros, isu yang umum pada *train* pompa dengan fondasi dan *baseplate* yang berubah seiring umur. *Ketiga*, evaluasi getaran spektral belum dilakukan, *order tracking* dan *envelope analysis* sering menjadi jembatan antara hasil desain dan perilaku lapangan (X. Wang et al., 2024).

Arah kerja lanjut mencakup beberapa hal, yakni: (i) Uji eksperimental getaran pada *prototipe* atau unit eksisting untuk memvalidasi hotspot desain (zona *keyseat* dan *shoulder*) melalui pemetaan respons harmonik dan *envelope spectrum*. (ii) Studi pengaruh kekasaran permukaan dan perlakuan panas S40C terhadap faktor kepekaan *notch* dan umur kelelahan *bending torsion*, aspek ini penting karena *surface integrity* terbukti memengaruhi inisiasi retak kelelahan pada poros *berkeyway* (Noronha et al., 2024; Zhu et al., 2021). (iii) *Cost optimal sizing* dengan formulasi multi tujuan meminimalkan massa/inersia dan biaya total siklus hidup (energi dan perawatan) dengan mempertahankan margin keandalan, yang mana pendekatan optimasi berbasis kendala kelelahan dan batas umur bantalan telah menunjukkan hasil yang signifikan (Ahmad et al., 2022; Yang et al., 2025).

Secara keseluruhan, perbandingan ini menegaskan nilai tambah pendekatan integratif, yang mana risiko *undersize* pada poros dan *over/underspec* pada bantalan dapat dikendalikan, sementara *interval overhaul* ditata berdasar jam operasi terukur, bukan sekadar kebiasaan. Implikasi praktisnya adalah sistem pompa yang lebih stabil, ekonomis, dan terdokumentasi baik dari sudut pandang keandalan.

Tabel 4. Perbandingan pendekatan desain *drivetrain* pompa

Aspek	Praktik konvensional	Pendekatan integratif	Risiko utama
Tegangan poros	Nominal + SF tetap	Von Mises + K_t (<i>keyseat/fillet</i>)	Konvensional: <i>undersize</i> (abaikan <i>notch</i>) / Integratif: terkendali
Pasak & kopling	Dimensi katalog	Cek geser & <i>bearing pressure</i> + verifikasi koaksialitas	Konvensional: keausan/longgar; Integratif: stabil
Bantalan	Pilih tipe & ukuran	Target L_{10} (ISO 281), penuhi rasio $\left(\frac{C}{P}\right)$	Konvensional: <i>over/underspec</i> umur; Integratif: <i>interval overhaul</i> terukur
Unit & QA	Campuran (kg·mm)	SI penuh, jejak data & sensitivitas	Konvensional: sulit diaudit; Integratif: <i>audit ready</i>

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan ukuran akhir yang terverifikasi, yakni poros S40C $d_s \approx 33,3$ mm, pasak $10 \times 8 \times 15$ mm, kopling *flens* aman terhadap geser/tekan, serta pemilihan *angular contact bearing* yang memenuhi target umur L_{10} untuk operasi 20–40 ribu jam. Kerangka desain integratif von Mises + K_t + L_{10} terbukti konsisten dan dapat direplikasi untuk *pump trains* 4–7,5 kW. Ke depan, peneliti merekomendasikan uji getaran terukur, studi *surface/heat treatment* S40C, dan *cost optimal sizing*. Implementasi luas berpotensi menurunkan *downtime* dan biaya siklus hidup, refleksinya, disiplin data SI mempercepat audit dan keputusan pemeliharaan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin Kilang dan Program Studi Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas Cepu atas fasilitas, peralatan, serta dukungan teknis yang memungkinkan pelaksanaan pengukuran dan pengujian pada penelitian ini. Apresiasi khusus disampaikan kepada dosen pembimbing atas arahan ilmiah dan masukan metodologis, serta kepada teknisi laboratorium yang membantu proses pembongkaran, inspeksi, dan perakitan kembali pompa. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada seluruh pihak yang telah menyediakan akses data dan dokumentasi nameplate sehingga studi kasus dapat direplikasi dengan baik. Tanpa dukungan tersebut, penelitian dan penyusunan naskah ini tidak dapat terlaksana dengan optimal.

6. REFERENSI

- Ahmad, M. S., Tiwari, R., & Mandawat, T. (2022). Multi-Objective Robust Optimization of Deep Groove Ball Bearings Considering Manufacturing Tolerances Based on Fatigue and Wear Considerations. *Journal of Tribology*, 144(2), 22301. <https://doi.org/10.1115/1.4050883>
- Bloch, H. P., & Perez, R. X. (2025). Industrial Drive Couplings. In *Process Machinery Handbook* (pp. 327–343). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781394214570.ch16>
- Chouikhi, H., Mahdi, M., & Saber, M. (2024). Loading Conditions Effects on Fatigue Life of Notched Rods Using Four-Point Bending Test. *Experimental Techniques*, 48(6), 1039–1052. <https://doi.org/10.1007/s40799-024-00726-9>
- Dassisti, M., Madani, K., & Panetto, H. (Eds.). (2025). *Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics: 5th International Conference, IN4PL 2024, Porto, Portugal, November 21–22, 2024, Proceedings*. Springer.
- Hua, M., Cao, C., Cai, Y., Ge, J., Zhong, F., & Mao, J. (2023). Failure analysis and structural fatigue resistance design of multistage centrifugal pump shaft. *Engineering Failure Analysis*, 153, 107545. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107545>
- Kade, A., Supriyatman, S., Kamaruddin, A., & Novia, N. (2024). Exploring Technology-Driven Simulations in Practical Physics: Insights into Mechanical Measurements Concept. *ASEAN Journal of Science and Engineering*.
- Ketmuang, Y., Boonmag, V., & Phukaoluan, A. (2024). *Fracture Analysis of S45C Medium Carbon Steel for the Van Front Drive Shaft*. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.13.1.35-43>
- Kumar, N., & Satapathy, R. K. (2023). Bearings in Aerospace, Application, Distress, and Life: A Review. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23(3), 915–947. <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01658-z>
- Li, C., Li, J., Wang, H., Wang, W., Zou, L., Liu, Y., & Hu, M. (2025). Inter-shaft bearing fault diagnosis based on TIEgram and autocorrelation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 100045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cjme.2025.100045>
- Libera, M. (2024). Simplified Method for Estimating a Dynamic Load Rating for Rolling Bearings. *Tribologia*, 2, 65–74. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.8429>
- Marscher, W. D. (2023). Centrifugal Pump Monitoring, Troubleshooting and Diagnosis Using Vibration Technologies. In *Condition Monitoring, Troubleshooting and Reliability in Rotating Machinery* (pp. 15–76). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119631620.ch2>
- Mysamy, S., & Subramanyan, N. (2023). Fatigue failure prediction through factor of safety and stress concentration in a malfunctioned AISI 4140 automotive crankshaft. *Materials Research Express*, 10(9), 96522. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acf7c8>
- Narsakka, J. (2022). *Coupling design and analysis for high-speed drivetrain supported by three active magnetic bearings* [LUT University]. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163935/Diplomityö-Juuso-Narsakka-final.pdf>

- Noronha, D. J., Sharma, S., Prabhu Parkala, R., Shankar, G., Kumar, N., & Doddapaneni, S. (2024). Deep Rolling Techniques: A Comprehensive Review of Process Parameters and Impacts on the Material Properties of Commercial Steels. *Metals*, 14(6), 667. <https://doi.org/10.3390/met14060667>
- Pan, X., Liu, J., Li, Y., Hua, F., Chen, X., & Zhang, Z. (2023). Finite element analysis of stress field and fatigue life prediction of notched specimens under multiaxial load. *International Journal of Structural Integrity*, 14(5), 663–680. <https://doi.org/10.1108/IJSI-05-2023-0041>
- Patrizio, C., Naldi, L., Harmon, M., & Harper, P. (2025). A Novel Approach for Diagnostic of Aeroderivative GT Roller Bearings Through Ultrasonic Reflectometry Combined With Acoustic Emissions. <https://doi.org/10.1115/GT2025-152401>
- Piotrowski, J. (2025). Shaft misalignment of rotating machinery. In *Harris' Shock and Vibration Handbook*. <https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/25124/1/309.pdf#page=1296>
- Ranjan, G., Narsakka, J., Choudhury, T., Nevaranta, N., & Sopanen, J. (2025). Method for evaluating stresses and fatigue life of a coupled multi-shaft rotor supported by active magnetic bearings in dropdown events. *Nonlinear Dynamics*, 113(14), 17705–17724. <https://doi.org/10.1007/s11071-025-11109-z>
- Sauvage, P., Terwey, T., Lehmann, B., & Jacobs, G. (2025). Improved Calculation of Dynamic Load Capacity for Cylindrical Roller Thrust Bearings: Numerical Update of the Lifetime Reduction Factor η for Bearings with Small and Medium Spin-to-Roll Ratios. *Lubricants*, 13(2), 65. <https://doi.org/10.3390/lubricants13020065>
- Schneider, H. (2023). Rotor balancing. In *Fundamentals for Systematic Processes*. Springer.
- Sularso, I., & Suga, K. (2006). *Dasar perencanaan dan pemilihan elemen mesin* (11th ed.). PT Pradnya Paramita.
- Sun, Hui, Hu, Kang, Si, Qiaorui, Lan, Qingqi, & Yuan, Shouqi. (2025). Review of fault modes and failure diagnosis methods for magnetic-driving pump. *Structural Health Monitoring*, 14759217251316620. <https://doi.org/10.1177/14759217251316621>
- Tuninetti, V., Martínez, D., Narayan, S., Menacer, B., & Oñate, A. (2024). Design Optimization of a Marine Propeller Shaft for Enhanced Fatigue Life: An Integrated Computational Approach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), 2227. <https://doi.org/10.3390/jmse12122227>
- Wang, X., Jin, H., Fu, Z., Xiong, J., Zhang, B., Shi, H., & Han, H. (2024). A novel hybrid strategy for damage detection of wind turbine yaw bearing. *Structural Health Monitoring*, 0(0), 14759217241295334. <https://doi.org/10.1177/14759217241295334>
- Wang, Y., & Luo, J. (2025). Analysis of the impact of shafting angle misalignment on the vibration characteristics of centrifugal pumps. *Physics of Fluids*, 37(5), 52111. <https://doi.org/10.1063/5.0268921>
- Yang, X., Lei, J., Bi, Y., Yu, M., & Yi, Y. (2025). Torsional fatigue failure study and lightweight design of hybrid engine crankshaft based on multidimensional analysis and experimental-simulation synergy. *Engineering Failure Analysis*, 182, 110145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.110145>
- Zhu, X., Dong, Z., Zhang, Y., & Cheng, Z. (2021). Fatigue Life Prediction of Machined Specimens with the Consideration of Surface Roughness. *Materials*, 14(18), 5420. <https://doi.org/10.3390/ma14185420>