

ANALISIS PROSES PERAKITAN GARDAN PADA INDUSTRI OTOMOTIF STUDI KASUS DI SALAH SATU PERUSAHAAN OTOMOTIVE DI INDONESIA

Sulaeman

Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa

sulaemannuhun@gmail.com

Abstrak

Proses perakitan gardan merupakan tahapan kritis pada sistem pemindah tenaga kendaraan karena ketepatan pemasangan komponen, penyetelan celah roda gigi, dan kualitas material berpengaruh terhadap keandalan transmisi torsi serta kenyamanan operasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis tahapan perakitan gardan pada lingkungan industri otomotif, mengidentifikasi titik kendali yang berpengaruh terhadap kualitas hasil perakitan, dan mengevaluasi kesesuaian parameter yang tersedia pada dokumen penelitian. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan desain studi kasus. Data diperoleh melalui observasi proses, wawancara dan dokumentasi yang tersedia pada naskah sumber, kemudian dianalisis melalui pemetaan aliran proses dan identifikasi titik kendali mutu. Hasil penelitian menunjukkan enam tahapan utama, yaitu persiapan dan pembersihan komponen, pemasangan drive pinion, pemasangan differential case dan roda gigi internal, pemasangan ring gear, penyetelan backlash dan preload, serta pemasangan axle shaft dan pengisian oli gardan. Nilai backlash yang terdokumentasi sebesar 0,15 mm dan berada dalam rentang acuan 0,10–0,20 mm yang digunakan dalam penelitian. Pengujian kekerasan juga menunjukkan peningkatan dari sekitar 22 HRC sebelum perlakuan panas menjadi 55–58 HRC setelah perlakuan panas. Uji fungsi menunjukkan mekanisme diferensial dapat bekerja dan membedakan putaran roda ketika kendaraan berbelok. Temuan tersebut menunjukkan bahwa ketelitian perakitan, pengendalian backlash dan preload, kebersihan komponen, serta pengendalian karakteristik material merupakan titik kendali utama dalam menjamin kualitas gardan. Penelitian ini memberikan implikasi praktis bagi penguatan inspeksi proses dan konsistensi pengukuran pada lini perakitan gardan.

Kata kunci: gardan; differential; perakitan otomotif; backlash; preload; heat treatment; pengendalian mutu.

I. PENDAHULUAN

Industri otomotif membutuhkan sistem pemindah tenaga yang mampu mentransmisikan torsi secara stabil sekaligus mempertahankan keandalan komponen selama kendaraan beroperasi pada beban dan kondisi jalan yang berubah-ubah. Gardan atau differential merupakan salah satu elemen penting pada sistem tersebut karena harus meneruskan torsi dari poros penggerak ke roda sekaligus memungkinkan roda pada sisi kiri dan kanan berputar dengan kecepatan sudut yang berbeda ketika kendaraan berbelok. Dengan demikian, kualitas geometrik, ketepatan perakitan, dan kondisi permukaan komponen roda gigi menjadi bagian penting dari kinerja keseluruhan sistem.

Pada pasangan roda gigi, kualitas kontak gigi dipengaruhi oleh geometri, kekakuan, gesekan, temperatur, pelumasan, dan celah antar-gigi. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa karakteristik backlash perlu diperhatikan karena celah tersebut diperlukan untuk memberikan ruang bagi pelumasan dan kompensasi ekspansi termal, tetapi perubahan celah akibat keausan dapat meningkatkan getaran dan menurunkan ketepatan transmisi [1]. Pengaruh friksi permukaan dan deformasi termal terhadap dinamika sistem roda gigi juga telah ditunjukkan dalam pemodelan dinamik, sehingga pengendalian kondisi kontak selama perakitan dan operasi menjadi penting [2].

Keandalan roda gigi juga berkaitan dengan kualitas manufakturnya. Variasi geometrik pada proses pembuatan dan finishing dapat memengaruhi respons mekanik dan termal pasangan roda gigi [3]. Pada roda gigi otomotif, perlakuan panas merupakan proses penting untuk meningkatkan kekerasan, kekuatan, ketahanan aus, dan ketahanan lelah. Namun, perlakuan panas yang tidak terkontrol juga dapat menimbulkan distorsi yang memengaruhi ketelitian dimensi dan kualitas akhir roda gigi [4]. Studi yang lebih baru bahkan menunjukkan bahwa pengendalian parameter carburizing-quenching diperlukan untuk memperoleh distribusi kekerasan dan lapisan karburasi yang seragam [5].

Selain karakteristik material dan geometri, pelumasan merupakan bagian integral dari keandalan pasangan roda gigi. Pelumas berfungsi mengurangi kontak logam-ke-logam dan membantu membuang panas yang dihasilkan pada kontak tribologis. Studi eksperimental mengenai pelumasan roda gigi menunjukkan bahwa metode dan jumlah suplai pelumas memengaruhi kerugian daya serta temperatur operasi [6]. Penurunan kualitas pelumas juga dapat mengurangi kemampuan perlindungan terhadap keausan pada permukaan roda gigi [7]. Oleh karena itu, proses perakitan yang diikuti pengisian oli sesuai spesifikasi harus dipandang sebagai satu rangkaian pengendalian mutu, bukan sebagai aktivitas yang berdiri sendiri.

Di sisi lain, penelitian tentang roda gigi dalam lima tahun terakhir banyak diarahkan pada pemodelan dinamika, pemantauan keausan, optimasi perlakuan panas, dan inspeksi kualitas. Kajian tersebut penting untuk meningkatkan performa dan umur pakai, tetapi tidak selalu menjelaskan bagaimana berbagai parameter teknis tersebut dikendalikan secara terpadu pada proses perakitan gardan di lingkungan manufaktur. Kesenjangan tersebut menjadi semakin relevan pada konteks industri otomotif Indonesia, karena kesesuaian antara prosedur perakitan, pengukuran backlash, kondisi material, dan uji fungsi perlu ditunjukkan secara empiris pada produk yang dirakit.

Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui studi kasus pada proses perakitan gardan di. Kontribusi penelitian terletak pada pemetaan tahapan perakitan secara terpadu dan pengaitan setiap tahapan dengan titik kendali mutu yang tersedia pada data penelitian, terutama kebersihan komponen, pemasangan pasangan pinion–ring gear, penyetelan backlash dan preload, karakteristik kekerasan setelah perlakuan panas, serta uji fungsi diferensial. Pendekatan ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan pengujian statistik skala produksi, tetapi untuk memberikan gambaran teknis yang terstruktur mengenai faktor proses yang paling menentukan keberhasilan perakitan.

Tujuan penelitian adalah (1) memetakan tahapan perakitan gardan, (2) mengidentifikasi titik kendali kritis yang berkaitan dengan kualitas hasil perakitan, (3) mengevaluasi data backlash dan kekerasan yang tersedia, dan (4) menginterpretasikan hasil uji fungsi sebagai verifikasi akhir terhadap keberhasilan proses perakitan.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Desain Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan desain studi kasus pada proses perakitan gardan. Desain ini dipilih karena fokus penelitian adalah memahami urutan operasi, fungsi setiap tahapan, titik pengendalian mutu, dan keterkaitan hasil pengukuran dengan keberhasilan perakitan. Penelitian tidak mengklaim representasi statistik seluruh produksi karena jumlah sampel dan seri pengukuran tidak tersedia pada dokumen sumber.

2.2 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian adalah proses perakitan unit gardan/differential yang mencakup persiapan komponen, pemasangan drive pinion, pemasangan differential case dan roda gigi internal, pemasangan ring gear, penyetelan backlash dan preload, pemasangan axle shaft, serta pengisian oli gardan. Lokasi penelitian Adalah salah satu industri otomotif di Indonesia.

2.3 Sumber dan Teknik Pengumpulan Data

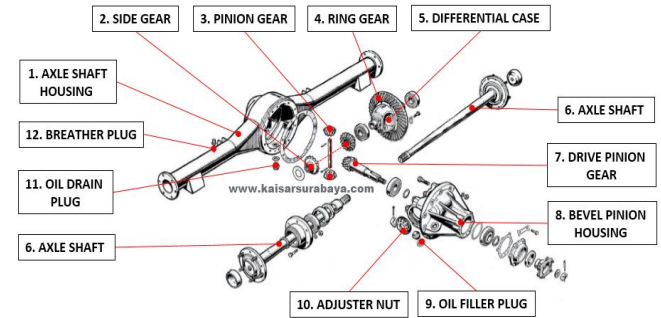
Data primer berupa hasil observasi proses perakitan, informasi teknis dari kegiatan lapangan, pengukuran backlash, informasi kekerasan material, dan hasil uji fungsi yang tercantum pada dokumen penelitian. Data pendukung berupa gambar proses, ilustrasi komponen, dan uraian prosedur. Data sekunder berasal dari literatur ilmiah mutakhir yang digunakan untuk membangun landasan pembahasan. Teknik pengumpulan data terdiri atas observasi, wawancara semi-terstruktur sebagaimana dinyatakan dalam dokumen sumber, dan dokumentasi

2.4 Analisis Data

Analisis dilakukan dalam empat tahap. Pertama, proses dipetakan menjadi enam tahapan utama. Kedua, setiap tahapan dihubungkan dengan tujuan teknis dan potensi pengaruhnya terhadap mutu. Ketiga, data kuantitatif yang tersedia, yaitu backlash 0,15 mm dan kekerasan 22 HRC menjadi 55–58 HRC, dibandingkan dengan rentang acuan yang digunakan dalam dokumen penelitian serta didiskusikan menggunakan literatur mutakhir. Keempat, uji fungsi digunakan sebagai verifikasi akhir bahwa mekanisme diferensial bekerja sesuai fungsi dasarnya. Pendekatan ini dipilih karena data numerik yang tersedia terbatas sehingga penerapan SPC atau FMEA berbasis skor tidak dilakukan untuk menghindari pembuatan data yang tidak berasal dari pengamatan.

2.5 Keabsahan Data

Keabsahan informasi diperkuat melalui triangulasi metode, yaitu membandingkan uraian proses, hasil pengukuran, dokumentasi visual, dan hasil uji fungsi. Triangulasi sumber dilakukan pada informasi yang tersedia dari kegiatan observasi dan wawancara. Karena penelitian merupakan studi kasus dengan data terbatas, hasil diposisikan sebagai temuan teknis pada objek penelitian, bukan sebagai generalisasi statistik terhadap seluruh industri otomotif. Seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. susunan komponen dalam gardan

2.6 Kerangka Analisis

Kerangka analisis penelitian ditunjukkan pada alur berikut:

1. Identifikasi objek dan permasalahan proses perakitan
2. Observasi tahapan perakitan dan dokumentasi
3. Pemetaan enam tahapan proses
4. Identifikasi titik kendali mutu
5. Evaluasi backlash, kekerasan material, dan uji fungsi
6. Perbandingan dengan literatur mutakhir
7. Penarikan kesimpulan dan rekomendasi perbaikan

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pemetaan Proses Perakitan

Dokumen sumber menunjukkan bahwa proses perakitan gardan dapat diringkas menjadi enam tahapan yang saling berurutan. Urutan tersebut bukan sekadar rangkaian pekerjaan mekanis, tetapi membentuk sistem pengendalian mutu berlapis: komponen harus bersih dan sesuai, pasangan roda gigi harus terpasang tepat, celah dan beban awal bearing harus disetel, kemudian fungsi unit diverifikasi. seperti tampak dalam tabel 1

Tabel 1. Tahapan dalam perakitan

Tahap	Aktivitas utama	Titik kendali	Implikasi mutu
1. Persiapan	Pemeriksaan komponen dan pembersihan dari kotoran/gram logam	Kelengkapan, kebersihan, cacat visual	Mengurangi risiko kontaminasi dan gangguan kontak.
2. Drive pinion	Pemasangan bearing, penempatan pinion, penyetelan shim, pengencangan	Posisi pinion dan torsi pengencangan sesuai prosedur	Menentukan posisi awal pasangan pinion–ring gear.
3. Differential case	Pemasangan spider gear, side gear, dan pin shaft	Kebebasan gerak dan penguncian komponen	Menjamin mekanisme diferensial dapat bekerja tanpa hambatan.
4. Ring gear	Pemasangan, pemasangan, dan	Posisi ring gear dan distribusi	Mengurangi risiko ketidakseragaman

	pengencangan baut silang bertahap	gaya pengencangan	an posisi/deformasi
5. Backlash & preload	Penyetelan adjuster nut menggunakan dial indicator	Backlash dan kelancaran putaran	Menentukan kualitas kontak gigi dan kondisi bearing.
6. Axle & oli	Pemasangan axle shaft, gasket, dan pengisian oli	Kekencangan, sealing, dan kesesuaian pelumas	Menjamin fungsi akhir dan perlindungan tribologis.

Dan juga terlihat dalam Gambar 2. dimana terlihat jelas Susunan komponen utama pada differential gear assembly.



Gambar 2. Susunan komponen utama pada differential gear assembly

3.2 Persiapan dan Kebersihan Komponen

Pada tahap awal, komponen utama seperti differential case, drive pinion, ring gear, spider gear, side gear, dan axle shaft diperiksa serta dibersihkan. Temuan ini penting karena kontaminan pada permukaan kontak dapat menjadi partikel abrasif dan mengganggu pembentukan film pelumas. Literatur tribologi menunjukkan bahwa kondisi kontak dan pelumasan berpengaruh terhadap friksi, temperatur, dan kehilangan daya pada roda gigi [6]. Dengan demikian, kegiatan pembersihan sebelum perakitan dapat diposisikan sebagai preventive quality control, meskipun penelitian ini tidak memiliki data kuantitatif mengenai jumlah kontaminan atau tingkat reject.

3.3 Pemasangan Drive Pinion dan Ring Gear

Drive pinion dan ring gear merupakan pasangan roda gigi utama yang menerima dan meneruskan torsi. Dokumen sumber menunjukkan penggunaan hydraulic press untuk pemasangan bearing, shim untuk penyetelan posisi pinion, dan torque wrench untuk pengencangan. Secara teknis, penggunaan alat bantu tersebut penting untuk menjaga konsistensi posisi dan gaya pengencangan. Ketidaktepatan posisi pasangan roda gigi dapat mengubah pola kontak gigi dan pada kondisi operasi dapat berkontribusi terhadap getaran atau kebisingan. Penelitian mengenai kualitas manufaktur roda gigi menunjukkan bahwa variasi geometrik dan kualitas pembuatan dapat memengaruhi respons mekanik dan termal pasangan roda gigi [3]. Oleh karena itu, kontrol posisi pinion, seating bearing, dan pengencangan ring gear merupakan titik kendali yang perlu dipertahankan secara konsisten.

3.4 Penyetelan Backlash dan Preload

Backlash merupakan parameter paling eksplisit yang tersedia dalam data penelitian. Pengukuran dengan dial indicator menghasilkan nilai 0,15 mm, sedangkan dokumen sumber menggunakan rentang acuan 0,10–0,20 mm. Dengan demikian, nilai yang diperoleh berada di tengah rentang tersebut dan

dinyatakan memenuhi kriteria yang digunakan dalam penelitian. Secara teoritis, backlash diperlukan untuk menyediakan ruang bagi pelumasan dan kompensasi perubahan kondisi termal, sedangkan perubahan backlash yang berlebihan dapat berkaitan dengan getaran dan kesalahan transmisi [1]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa backlash berinteraksi dengan friksi dan deformasi termal dalam menentukan karakteristik dinamik sistem roda gigi [2].

Temuan 0,15 mm perlu dipahami sebagai hasil pengukuran pada unit yang diamati, bukan sebagai bukti bahwa seluruh unit produksi selalu memiliki nilai yang sama. Karena jumlah pengukuran dan variasi antarunit tidak tersedia pada dokumen sumber, penelitian ini tidak melakukan analisis kapabilitas proses (Cp/Cpk) atau statistical process control. Untuk penelitian lanjutan, pengukuran berulang pada sejumlah unit dapat digunakan untuk menentukan distribusi backlash dan kestabilan proses secara statistik.

Preload bearing juga perlu dikendalikan bersama backlash. Walaupun nilai numeriknya tidak tersedia, dokumen sumber menyatakan bahwa penyetelan menghasilkan putaran poros yang halus tanpa binding atau kelonggaran berlebih. Secara metodologis, temuan ini dikategorikan sebagai bukti kualitatif dari pemeriksaan fungsi mekanis, bukan sebagai pengukuran preload kuantitatif. Perbedaan ini penting agar kesimpulan penelitian tidak melampaui data yang tersedia.

3.5 Kekerasan Material dan Perlakuan Panas

Data penelitian menunjukkan bahwa kekerasan material roda gigi meningkat dari sekitar 22 HRC menjadi 55–58 HRC setelah perlakuan panas. Secara numerik, perubahan tersebut setara dengan kenaikan sebesar 33–36 poin HRC. Kenaikan kekerasan permukaan relevan terhadap kebutuhan ketahanan aus pada permukaan gigi. Penelitian pada roda gigi otomotif menunjukkan bahwa heat treatment berperan besar terhadap kekuatan, kekerasan permukaan, ketahanan aus, dan ketahanan lelah, tetapi proses tersebut juga dapat menghasilkan distorsi jika kondisi pemanasan dan pendinginan tidak terkendali [4]. Studi tahun 2025 juga menunjukkan bahwa pemilihan parameter heat treatment memengaruhi distribusi lapisan karburasi dan kekerasan permukaan maupun inti roda gigi [5].

Dengan demikian, data 55–58 HRC pada penelitian ini dapat dipandang sebagai indikator bahwa perlakuan panas menghasilkan permukaan yang lebih keras dibanding kondisi awal. Namun, penelitian tidak memiliki data kedalaman lapisan keras, struktur mikro, temperatur proses, media quenching, atau kekerasan inti setelah perlakuan. Oleh karena itu, klaim bahwa inti material pasti tetap liat tidak dapat dibuktikan hanya dari data yang tersedia. Pada penelitian lanjutan, pengukuran profil kekerasan dari permukaan menuju inti dan pemeriksaan metalografi akan memberikan bukti yang lebih kuat mengenai keberhasilan heat treatment.

3.6 Uji Fungsi Differential

Setelah proses perakitan selesai, unit menjalani uji fungsi. Dokumen sumber melaporkan bahwa mekanisme spider gear dapat bekerja dan memungkinkan perbedaan putaran roda kiri dan kanan ketika kendaraan berbelok. Temuan ini penting sebagai verifikasi akhir karena keberhasilan pengukuran parameter individual belum cukup apabila unit tidak dapat menjalankan fungsi diferensialnya. Secara fungsional, differential harus memungkinkan roda pada sisi luar tikungan menempuh jarak lebih besar sehingga berputar lebih cepat daripada roda sisi dalam. Keberhasilan mekanisme tersebut menunjukkan bahwa pemasangan spider gear, side gear, axle

shaft, dan komponen terkait tidak menghasilkan hambatan mekanis yang mengganggu fungsi dasar.

3.7 Titik Kendali Kritis dan Implikasi Perbaikan

Berdasarkan integrasi hasil observasi, pengukuran, dan pembahasan literatur, terdapat empat kelompok titik kendali yang paling relevan. Pertama, kebersihan komponen sebelum perakitan. Kedua, ketepatan posisi dan pengencangan pasangan pinion-ring gear. Ketiga, penyetelan backlash dan preload. Keempat, pengendalian karakteristik material melalui heat treatment dan verifikasi fungsi akhir. Urutan tersebut menunjukkan bahwa kualitas gardan dibangun secara bertahap; kegagalan pada tahap awal dapat terbawa ke tahap berikutnya dan baru terlihat pada pengujian akhir.

Implikasi praktisnya adalah perlunya menjaga konsistensi penggunaan alat ukur dan alat bantu perakitan, melakukan kalibrasi berkala pada torque wrench dan dial indicator, mendokumentasikan hasil pengukuran backlash per unit atau per batch, serta mempertahankan pemeriksaan fungsi sebagai final gate. Pendekatan pengendalian kualitas pada industri roda gigi juga semakin berkembang ke arah pemantauan berbasis data dan inspeksi yang lebih terukur [8][9][10]. Namun, penerapan metode statistik atau inspeksi otomatis memerlukan dataset produksi yang lebih besar daripada yang tersedia dalam penelitian ini.

3.8 Ringkasan Data Kuantitatif Penelitian.

Dari hasil penelitian ini dapat kita buat resume nya dalam Tabel 2.

Tabel 2. Resume penelitian

Parameter	Hasil pada dokumen penelitian	Acuan yang digunakan	Interpretasi
Backlash	0,15 mm	0,10–0,20 mm	Berada dalam rentang acuan; penyetelan dinyatakan memenuhi kriteria.
Kekerasan sebelum heat treatment	≈22 HRC	—	Kondisi awal yang terdokumentasi.
Kekerasan setelah heat treatment	55–58 HRC	—	Meningkat 33–36 poin HRC dibanding kondisi awal.
Uji fungsi differential	Berfungsi saat manuver berbelok	Fungsi diferensial	Mekanisme pembagian putaran bekerja pada unit yang diamati.

4. Kesimpulan

Proses perakitan gardan pada objek penelitian terdiri atas enam tahapan utama, yaitu persiapan dan pembersihan komponen, pemasangan drive pinion, pemasangan differential case dan roda gigi internal, pemasangan ring gear, penyetelan backlash dan preload, serta pemasangan axle shaft dan pengisian oli gardan.

Parameter backlash yang terdokumentasi sebesar 0,15 mm berada dalam rentang acuan 0,10–0,20 mm yang digunakan pada penelitian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penyetelan pasangan pinion-ring gear pada unit yang diamati telah memenuhi kriteria yang digunakan, meskipun belum dapat digunakan untuk menyimpulkan kapabilitas seluruh proses produksi karena jumlah pengukuran tidak tersedia.

Perlakuan panas meningkatkan kekerasan material yang terdokumentasi dari sekitar 22 HRC menjadi 55–58 HRC. Peningkatan tersebut mendukung kebutuhan ketahanan permukaan terhadap keausan, tetapi evaluasi lebih lengkap masih memerlukan data profil kekerasan, struktur mikro, dan parameter heat treatment.

Uji fungsi menunjukkan bahwa mekanisme diferensial dapat membedakan putaran roda kiri dan kanan ketika kendaraan berbelok. Secara keseluruhan, titik kendali yang paling penting adalah kebersihan komponen, ketepatan pemasangan pasangan roda gigi, penyetelan backlash dan preload, pengendalian karakteristik material, dan verifikasi fungsi akhir.

Secara praktis, peningkatan konsistensi proses dapat dilakukan melalui kalibrasi alat ukur, dokumentasi hasil pengukuran secara sistematis, standardisasi pemeriksaan kebersihan komponen, dan penguatan inspeksi fungsi akhir. Penelitian lanjutan perlu menggunakan jumlah sampel yang lebih besar dan data berulang agar dapat dilakukan analisis SPC, kapabilitas proses, atau FMEA berbasis data.

5. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kasus berbasis data yang tersedia pada dokumen sumber. Keterbatasan utama adalah tidak tersedianya jumlah sampel, seri pengukuran berulang, nilai torsi pengencangan aktual, data temperatur dan waktu heat treatment, profil kekerasan permukaan-ke-inti, data reject, serta hasil pengujian NVH atau endurance. Karena itu, penelitian tidak melakukan generalisasi statistik dan tidak menghitung FMEA/RPN. Keterbatasan tersebut perlu diperhatikan ketika hasil penelitian digunakan sebagai dasar perbaikan proses produksi.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang mendukung kegiatan observasi dan penyediaan informasi teknis pada objek penelitian. Nama personel, nomor dokumen internal, dan informasi perusahaan yang bersifat rahasia tidak dicantumkan dalam naskah.

7. Referensi

- [1] Wu, B.-F., & Cheng, M.-Y. (2024). Backlash size identification for servomechanisms with gear transmission devices. *Precision Engineering*, 91, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.09.011>
- [2] Sheng, L., Xu, M., Sun, Q., Li, W., & Ye, G. (2023). Nonlinear dynamics analysis of gear transmission system considering tooth surface friction and thermal deformation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 237(2), 220–235. <https://doi.org/10.1177/14644193231154439>
- [3] Zorko, D., Wei, P., & Vukašinović, N. (2024). The effect of gear-manufacturing quality on the mechanical and thermal responses of a polymer-gear pair. *Journal of Computational Design and Engineering*, 11(1), 195–211. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwae010>

- [4] Shao, W., Yi, M., Tang, J., et al. (2022). Prediction and minimization of the heat treatment induced distortion in 8620H steel gear: Simulation and experimental verification. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35, 126. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00802-4>
- [5] Wang, Y., Zhang, L., Su, Y., Liu, H., Yang, H., & Chen, Y. (2025). Heat treatment control technology of high-strength steel gears based on support vector machine. *Scientific Reports*, 15, 7657. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92312-1>
- [6] Mirza, M., Yilmaz, M., Thieme, E., Lohner, T., & Venner, C. H. (2021). Drop-On-Demand Lubrication of Gears: A Feasibility Study. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 7, 746407. <https://doi.org/10.3389/fmech.2021.746407>
- [7] Gupta, K. K., & Muzakkir, S. M. (2023). Prediction of gearbox oil degradation based on online sensor data and machine learning algorithms. *Tribology in Industry*, 45(3), 487–502. <https://doi.org/10.24874/ti.1491.06.23.08>
- [8] Kumar, P. J., Saravanan, S., Sivabalan, L., Karthikeyan, K., & Naghulvarshan, N. (2024). Statistical quality control in the gear manufacturing industry. *Proceedings of the International Conference on Advancements in Materials, Design and Manufacturing or Sustainable Development (ICAMDMS 2024)*. <https://doi.org/10.4108/eai.23-2-2024.2347021>
- [9] Yang, S., Chen, W., & Liang, R. (2024). Residual stresses in gear form grinding by considering carburizing heat treatment: Multi-field coupled numerical simulation and experimental verification. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13293-5>
- [10] Feng, K., Ji, J. C., Zhang, Y., Ni, Q., Liu, Z., & Beer, M. (2023). Digital twin-driven intelligent assessment of gear surface degradation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 186, 109896. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109896>