

PROCESS QUALITY CONTROL MAPPING PADA PROSES PERAKITAN GARDAN UNTUK MENINGKATKAN KONSISTENSI KUALITAS KOMPONEN OTOMOTIF

Sulaeman

*Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa
Jl. Kalibaru Timur, Kelurahan Kalibaru, Medan Satria, Kota Bekasi, Indonesia
Email: sulaemannuhun@gmail.com*

Abstrak—Kualitas produk gardan pada industri otomotif tidak hanya ditentukan oleh karakteristik komponen individual, tetapi juga oleh konsistensi pengendalian pada setiap tahapan perakitan. Penelitian sebelumnya pada objek yang sama telah mengidentifikasi enam tahapan utama perakitan gardan, namun belum memformulasikan keterkaitan antara karakteristik kualitas kritis, parameter proses, metode pengukuran, dan titik kendali mutu dalam suatu control plan yang terstruktur. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi Critical Quality Characteristics (CQC) dan menyusun pemetaan pengendalian kualitas berbasis proses pada perakitan gardan. Penelitian menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif dengan Process Quality Control Mapping. Data diperoleh dari dokumentasi proses, hasil observasi, pengukuran backlash, data kekerasan material, dan hasil uji fungsi yang tersedia pada penelitian sebelumnya. Analisis dilakukan melalui identifikasi tahapan proses, penentuan karakteristik kualitas kritis, identifikasi parameter pengendalian, metode inspeksi, serta penyusunan matriks pengendalian kualitas. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat empat kelompok pengendalian yang menjadi prioritas, yaitu kebersihan komponen, ketepatan posisi dan pengencangan pasangan pinion–ring gear, pengendalian backlash dan preload, serta pengendalian karakteristik material dan verifikasi fungsi akhir. Nilai backlash sebesar 0,15 mm berada dalam rentang acuan 0,10–0,20 mm, sedangkan kekerasan meningkat dari sekitar 22 HRC menjadi 55–58 HRC setelah perlakuan panas. Berdasarkan hasil pemetaan, pengendalian kualitas perlu ditempatkan sepanjang proses dan tidak hanya pada inspeksi akhir. Penelitian menghasilkan rancangan control plan konseptual yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan SPC, Measurement System Analysis, dan digital quality monitoring pada penelitian selanjutnya.

Keywords—gardan, critical quality characteristics, quality control, control plan, backlash, automotive manufacturing.

I. PENDAHULUAN

Industri otomotif menuntut tingkat konsistensi kualitas yang tinggi karena komponen pemindah tenaga harus mampu mentransmisikan torsi secara stabil dan bekerja pada kondisi pembebanan yang berubah. Gardan atau differential merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pemindah tenaga karena berfungsi meneruskan torsi sekaligus memungkinkan roda kiri dan kanan berputar dengan kecepatan sudut berbeda ketika kendaraan berbelok. Oleh sebab itu, kualitas perakitan gardan tidak hanya berkaitan dengan kesesuaian dimensi komponen, tetapi juga dengan ketepatan posisi, pengencangan, celah roda gigi, kondisi bearing, pelumasan, dan keberhasilan fungsi mekanisme.

Backlash merupakan salah satu karakteristik penting dalam sistem roda gigi. Celah tersebut diperlukan untuk menyediakan ruang bagi pelumasan dan mengakomodasi ekspansi termal, tetapi perubahan backlash akibat keausan atau ketidaktepatan pemasangan dapat menyebabkan getaran dan kesalahan transmisi. Wu dan Cheng menunjukkan bahwa backlash berkaitan dengan ruang antar-gigi yang dibutuhkan untuk pelumasan dan kompensasi ekspansi

termal, sedangkan peningkatan backlash dapat berhubungan dengan vibration dan tracking error pada sistem transmisi [1]. Penelitian mengenai dinamika roda gigi juga menunjukkan bahwa backlash berinteraksi dengan friksi, deformasi termal, dan karakteristik kontak sehingga pengendaliannya menjadi bagian penting dalam menjaga kestabilan sistem [2].

Selain backlash, karakteristik manufaktur dan perlakuan panas juga berpengaruh terhadap kualitas roda gigi. Variasi geometrik pada proses pembuatan dapat memengaruhi respons mekanik dan termal pasangan roda gigi [3]. Perlakuan panas diperlukan untuk meningkatkan kekerasan, kekuatan, ketahanan aus, dan ketahanan lelah, tetapi proses tersebut juga berpotensi menghasilkan distorsi. Shao et al. menunjukkan bahwa distorsi akibat perlakuan panas dapat memengaruhi ketelitian geometrik roda gigi otomotif dan dapat dikurangi melalui pengendalian proses heat treatment [4]. Dengan demikian, pengendalian kualitas pada perakitan gardan perlu mempertimbangkan hubungan antara kualitas komponen, kondisi proses perakitan, dan hasil akhir unit.

Aspek lain yang tidak dapat dipisahkan adalah pelumasan. Kondisi pelumasan berhubungan dengan friksi, temperatur, kehilangan daya, dan keausan pada pasangan roda gigi. Studi mengenai lubrication menunjukkan bahwa karakteristik suplai pelumas dapat memengaruhi kondisi termal dan performa kontak roda gigi [5]. Oleh karena itu, kebersihan komponen sebelum perakitan dan kesesuaian pelumas pada tahap akhir perlu ditempatkan sebagai bagian dari pengendalian kualitas proses.

Perkembangan pengendalian kualitas manufaktur saat ini bergerak menuju pengendalian proses berbasis data. Kajian mengenai manufacturing quality assessment menunjukkan bahwa pendekatan Industry 4.0 memungkinkan monitoring dan prediksi kualitas dilakukan lebih dekat dengan proses produksi, walaupun penerapannya memerlukan kesiapan data, sistem, dan organisasi [6]. Konsep Quality 4.0 juga mengintegrasikan metode pengendalian kualitas tradisional dengan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi, kualitas, dan operational excellence [7]. Pada industri gear, penerapan statistical quality control melalui control chart, histogram, cause-and-effect diagram, dan analisis akar penyebab telah digunakan untuk mengidentifikasi penyimpangan proses dan area yang memerlukan perhatian [8].

Penelitian sebelumnya pada objek yang sama telah memetakan enam tahapan utama perakitan gardan, yaitu persiapan komponen, pemasangan drive pinion, pemasangan differential case, pemasangan ring gear, penyetelan backlash dan preload, serta pemasangan axle shaft dan pengisian oli. Penelitian tersebut juga melaporkan backlash sebesar 0,15 mm dan peningkatan kekerasan dari sekitar 22 HRC menjadi 55–58 HRC setelah perlakuan panas. Namun, penelitian tersebut berfokus pada analisis tahapan proses dan evaluasi parameter teknis, sehingga belum mengembangkan

hubungan sistematis antara tahapan proses, Critical Quality Characteristics, parameter pengendalian, metode inspeksi, dan tindakan pengendalian.

Kesenjangan tersebut menjadi dasar penelitian ini. Fokus penelitian tidak lagi pada deskripsi proses perakitan, tetapi pada penyusunan pemetaan pengendalian kualitas yang dapat digunakan sebagai dasar control plan. Pendekatan ini penting karena kualitas produk sebaiknya dibangun selama proses, bukan hanya diverifikasi setelah produk selesai. Penelitian zero-defect manufacturing juga menempatkan integrasi pengendalian proses, teknologi digital, dan identifikasi faktor kritis sebagai arah penting dalam pengembangan sistem kualitas modern [9].

Tujuan penelitian ini adalah: (1) mengidentifikasi Critical Quality Characteristics pada proses perakitan gardan; (2) menghubungkan setiap karakteristik kualitas dengan parameter proses yang harus dikendalikan; (3) menyusun Process Quality Control Mapping; dan (4) merancang control plan konseptual sebagai dasar peningkatan konsistensi kualitas proses perakitan gardan.

II. LANDASAN TEORI

A. Critical Quality Characteristics

Critical Quality Characteristics (CQC) merupakan karakteristik produk atau proses yang memiliki pengaruh penting terhadap fungsi, keandalan, keselamatan, atau kesesuaian produk terhadap spesifikasi. Dalam konteks perakitan gardan, CQC tidak hanya berupa dimensi akhir, tetapi dapat berupa kebersihan permukaan kontak, posisi pinion, torsi pengencangan, backlash, preload, kekerasan material, sealing, dan hasil functional test.

Identifikasi CQC penting karena tidak seluruh parameter proses memiliki tingkat kepentingan yang sama. Parameter yang secara langsung memengaruhi fungsi transmisi harus mendapatkan pengendalian lebih kuat dibandingkan parameter pendukung.

B. Backlash dan Preload

Backlash merupakan celah antara pasangan gigi yang memungkinkan pelumasan dan memberikan ruang terhadap ekspansi termal. Namun, nilai backlash yang terlalu besar dapat menyebabkan impact dan vibration, sedangkan backlash yang terlalu kecil dapat meningkatkan risiko interference atau overheating [1], [2].

Preload berhubungan dengan kondisi awal bearing dan harus dikendalikan bersama backlash. Walaupun nilai preload kuantitatif tidak tersedia pada dokumen penelitian, hasil observasi menunjukkan bahwa penyeteran menghasilkan putaran poros yang halus tanpa binding atau kelonggaran berlebih.

C. Heat Treatment pada Gear

Heat treatment digunakan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus permukaan roda gigi. Namun, proses pemanasan dan pendinginan dapat menyebabkan distorsi karena perubahan temperatur, transformasi fase, tegangan termal, dan karakteristik material [4]. Oleh sebab itu, hardness tidak dapat dipandang sebagai satu-satunya indikator keberhasilan heat treatment. Pengendalian yang lebih komprehensif perlu mempertimbangkan profil kekerasan, dimensi, distorsi, dan parameter proses.

D. Process Quality Control Mapping

Process Quality Control Mapping merupakan pendekatan untuk menghubungkan tahapan proses dengan karakteristik kualitas, parameter yang dikendalikan, metode pengukuran,

potensi kegagalan, dan tindakan pengendalian. Pendekatan ini digunakan dalam penelitian sebagai alat analitis untuk mengubah informasi proses menjadi rancangan control plan.

Berbeda dari FMEA kuantitatif, penelitian ini tidak menghitung Risk Priority Number (RPN) karena data occurrence, severity, dan detection yang diperlukan tidak tersedia. Hal tersebut dilakukan untuk mencegah pembuatan nilai risiko yang tidak berasal dari observasi aktual.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Desain Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan desain studi kasus. Objek penelitian adalah proses perakitan unit gardan pada salah satu perusahaan otomotif di Indonesia. Pendekatan studi kasus dipilih karena penelitian berfokus pada identifikasi karakteristik proses dan penyusunan sistem pengendalian kualitas berdasarkan kondisi teknis yang tersedia.

B. Sumber Data

Data penelitian terdiri atas:

1. dokumentasi tahapan perakitan gardan;
2. hasil observasi proses;
3. informasi teknis proses perakitan;
4. data pengukuran backlash;
5. data kekerasan sebelum dan sesudah heat treatment;
6. hasil functional test;
7. dokumentasi komponen dan susunan differential;
8. literatur ilmiah mutakhir mengenai gear, backlash, heat treatment, lubrication, quality control, dan Quality 4.0.

Data utama yang tersedia menunjukkan enam tahapan proses perakitan dan nilai backlash 0,15 mm. Data hardness menunjukkan perubahan dari sekitar 22 HRC menjadi 55–58 HRC.

C. Tahapan Analisis

Analisis dilakukan melalui tujuh tahap:

Tahap 1 — Process Identification

Mengidentifikasi seluruh tahapan utama perakitan gardan.

Tahap 2 — CQC Identification

Menentukan karakteristik kualitas yang berpengaruh langsung terhadap fungsi dan reliability unit.

Tahap 3 — Process Parameter Identification

Mengidentifikasi parameter proses yang dapat memengaruhi CQC.

Tahap 4 — Control Point Identification

Menentukan titik pada proses tempat parameter perlu diperiksa atau dikendalikan.

Tahap 5 — Measurement Method Identification

Menentukan alat atau metode pemeriksaan yang relevan, seperti visual inspection, torque wrench, dial indicator, hardness testing, dan functional test.

Tahap 6 — Process Quality Control Mapping

Menyusun hubungan antara proses, CQC, parameter kontrol, metode inspeksi, dan tindakan pengendalian.

Tahap 7 — Control Plan Development

Menghasilkan rancangan control plan yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan SPC, MSA, dan digital monitoring.

D. Kerangka Analisis

Kerangka penelitian dapat dirumuskan sebagai berikut:

Proses Perakitan → Critical Quality Characteristics → Parameter Proses → Metode Pengukuran → Titik Kendali → Control Plan → Rekomendasi Quality Improvement

E. Keabsahan Data

Keabsahan data diperkuat melalui triangulasi metode dengan membandingkan informasi observasi, dokumentasi proses, hasil pengukuran, dan functional test. Karena penelitian menggunakan data kasus dengan jumlah pengukuran terbatas, hasil tidak dimaksudkan sebagai generalisasi statistik terhadap seluruh industri otomotif.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Identifikasi Critical Quality Characteristics

Berdasarkan pemetaan proses, terdapat beberapa karakteristik kualitas yang secara langsung berkaitan dengan keberhasilan perakitan. CQC utama terdiri atas kebersihan komponen, posisi pemasangan pinion–ring gear, torsi pengencangan, backlash, preload, kekerasan material, sealing, kesesuaian pelumas, dan keberhasilan functional test.

Tabel 1 menunjukkan pemetaan awal CQC.

Tabel 1. Critical Quality Characteristics pada Perakitan Gardan

Tahap	Critical Quality Characteristic	Parameter Kendali	Metode Pemeriksaan
Persiapan	Kebersihan komponen	Kontaminasi, gram logam, kondisi visual	Visual inspection
Drive pinion	Posisi pinion	Seating bearing, shim, posisi pinion	Inspection & dimensional check
Drive pinion	Pengencangan	Torsi pengencangan	Torque wrench
Differential case	Kebebasan gerak	Gerakan spider/side gear	Functional/manual check
Ring gear	Posisi dan pengencangan	Seating dan torsi baut	Visual & torque wrench
Backlash/preload	Celah gigi	Backlash	Dial indicator
Backlash/preload	Kondisi bearing	Kelancaran putaran	Functional check
Heat treatment	Kekerasan	HRC	Hardness tester
Axle & oil	Sealing dan lubrication	Kondisi gasket dan level oli	Visual & inspection
Final test	Fungsi differential	Perbedaan putaran roda	Functional test

Hasil pemetaan menunjukkan bahwa pengendalian kualitas tidak seharusnya hanya ditempatkan pada final inspection. Kesalahan posisi pinion atau ketidaksesuaian pengencangan, misalnya, dapat memengaruhi kondisi pasangan gigi sebelum akhirnya terlihat pada pengujian akhir. Pendekatan ini konsisten dengan perkembangan quality management yang menempatkan pengendalian proses sebagai bagian penting dari zero-defect manufacturing [9].

B. Pengendalian Kebersihan Komponen

Tahap pertama merupakan titik pengendalian preventif. Differential case, drive pinion, ring gear, spider gear, side gear, dan axle shaft harus diperiksa sebelum dirakit.

Kebersihan penting terutama pada area kontak dan jalur pelumasan. Partikel asing dapat mengganggu pembentukan film pelumas dan meningkatkan risiko abrasive interaction. Studi tribologi menunjukkan bahwa kondisi kontak dan pelumasan memengaruhi friction, temperature, dan power loss pada sistem gear [5].

Oleh karena itu, control plan perlu memasukkan pemeriksaan kebersihan sebelum komponen masuk ke proses assembly. Meskipun penelitian ini belum memiliki data kuantitatif mengenai tingkat kontaminasi, secara proses

tahap tersebut dapat dikategorikan sebagai preventive control.

C. Pengendalian Posisi Drive Pinion dan Ring Gear

Drive pinion dan ring gear merupakan pasangan utama dalam transmisi torsi. Berdasarkan dokumen proses, hydraulic press digunakan untuk pemasangan bearing, shim digunakan untuk penyetelan posisi pinion, dan torque wrench digunakan untuk pengencangan.

Pengendalian posisi menjadi penting karena perubahan posisi relatif antara pinion dan ring gear dapat memengaruhi contact pattern. Penelitian mengenai kualitas manufaktur gear menunjukkan bahwa variasi geometrik dapat memengaruhi respons mekanik dan termal pasangan roda gigi [3].

Dengan demikian, parameter seating bearing, posisi pinion, pemilihan shim, dan torsi pengencangan perlu dimasukkan sebagai parameter kontrol.

D. Pengendalian Backlash

Backlash merupakan parameter kuantitatif paling jelas dalam data penelitian. Nilai yang terdokumentasi adalah:

Backlash = 0,15 mm

dengan rentang acuan:

0,10–0,20 mm

Dengan demikian:

0,10 mm ≤ 0,15 mm ≤ 0,20 mm

Nilai tersebut berada di dalam rentang acuan yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Namun, hasil tersebut hanya merepresentasikan unit yang diamati dan tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa seluruh proses produksi memiliki nilai backlash yang sama.

Backlash mempunyai fungsi penting dalam memberikan ruang pelumasan dan kompensasi ekspansi termal [1]. Penelitian Wu dan Cheng juga menunjukkan bahwa perubahan backlash dapat berhubungan dengan vibration dan error pada sistem transmisi [1].

Oleh karena itu, backlash perlu ditempatkan sebagai **Critical Control Point (CCP)** pada control plan.

Rekomendasi pengendalian:

1. menggunakan dial indicator yang terkalibrasi;
2. menetapkan metode pengukuran yang konsisten;
3. mencatat hasil pengukuran per unit atau batch;
4. menetapkan reaction plan apabila hasil keluar dari specification limit;
5. mengembangkan control chart apabila jumlah data produksi telah tersedia.

E. Pengendalian Preload

Preload bearing perlu dikendalikan bersama backlash karena keduanya memengaruhi kondisi kontak dan kelancaran putaran.

Dokumen penelitian tidak menyediakan nilai preload secara numerik. Hasil observasi menunjukkan bahwa poros dapat berputar dengan halus tanpa binding atau kelonggaran berlebih. Karena itu, hasil tersebut dikategorikan sebagai bukti kualitatif, bukan sebagai hasil pengukuran preload kuantitatif.

Untuk penelitian lanjutan, pengukuran torque-to-rotate atau metode lain yang sesuai dapat digunakan untuk menghasilkan data preload yang lebih objektif.

F. Pengendalian Kekerasan Material

Data penelitian menunjukkan perubahan hardness:

Sebelum heat treatment ≈ 22 HRC

Sesudah heat treatment = 55–58 HRC

Dengan demikian peningkatan hardness yang terdokumentasi adalah sekitar:

33–36 HRC

Peningkatan hardness tersebut menunjukkan perubahan karakteristik material setelah perlakuan panas. Namun, hardness tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator keberhasilan heat treatment.

Shao et al. menunjukkan bahwa heat treatment pada gear dapat meningkatkan karakteristik mekanik tetapi juga berpotensi menimbulkan distortion [4]. Oleh karena itu, control plan sebaiknya tidak hanya mencatat hardness tetapi juga mengintegrasikan pemeriksaan dimensi dan distortion.

G. Pengendalian Lubrication dan Sealing

Tahap akhir perakitan mencakup pemasangan axle shaft, gasket, dan pengisian oli. Pada tahap ini terdapat dua CQC, yaitu sealing dan lubrication.

Kegagalan sealing dapat menyebabkan kebocoran, sedangkan jumlah atau kondisi pelumas yang tidak sesuai dapat meningkatkan friction dan temperature. Literatur mengenai gear lubrication menunjukkan bahwa kondisi suplai pelumas memiliki pengaruh terhadap karakteristik temperatur dan performa kontak [5].

Control plan perlu memasukkan:

- pemeriksaan gasket;

- pemeriksaan sealing;
- kesesuaian jenis oli;
- kesesuaian jumlah oli;
- pemeriksaan kebocoran setelah assembly.

H. Final Functional Test

Functional test merupakan final gate untuk memastikan bahwa sistem differential dapat menjalankan fungsi dasarnya.

Pada unit yang diamati, mekanisme differential dapat memungkinkan roda kiri dan kanan memiliki perbedaan putaran ketika kendaraan berbelok. Temuan tersebut menunjukkan bahwa spider gear, side gear, axle shaft, dan komponen terkait dapat bekerja secara fungsional.

Namun, final inspection tidak boleh menggantikan pengendalian pada tahap sebelumnya. Prinsip zero-defect manufacturing menekankan pentingnya mencegah defect selama proses dibandingkan hanya menemukan defect pada tahap akhir [9].

I. Process Quality Control Matrix

Berdasarkan seluruh hasil analisis, rancangan Process Quality Control Matrix ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Process Quality Control Matrix

Proses	CQC	Risiko Proses	Parameter Kontrol	Metode	Tindakan Pengendalian
Cleaning	Kebersihan	Kontaminasi	Kondisi permukaan	Visual	Cleaning ulang
Pinion assembly	Posisi pinion	Misalignment	Seating/shim	Inspection	Re-setting
Fastening	Torsi	Loose/over-tightening	Torque	Torque wrench	Re-tightening
Ring gear	Contact position	Contact tidak sesuai	Position/seating	Visual & inspection	Adjustment
Backlash	Gear clearance	Excessive/insufficient clearance	0,10–0,20 mm*	Dial indicator	Adjustment
Preload	Bearing condition	Binding/loose	Rotational condition	Functional check	Adjustment
Heat treatment	Hardness	Insufficient hardness	HRC	Hardness tester	Re-treatment/investigation
Lubrication	Oil condition	Friction/wear	Type & quantity	Inspection	Corrective filling
Final test	Differential function	Functional failure	Wheel differential action	Functional test	Rework/inspection

Rentang acuan 0,10–0,20 mm merupakan acuan yang digunakan dalam dokumen penelitian, bukan klaim spesifikasi universal untuk semua jenis gardan.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa pengendalian kualitas dapat dibangun secara berlapis. Tahapan cleaning, pinion positioning, fastening, backlash, heat treatment, lubrication, dan final test mempunyai fungsi pengendalian yang berbeda.

J. Rancangan Control Plan

Berdasarkan Process Quality Control Matrix, control plan konseptual dapat dibangun dengan tiga tingkat:

Level 1 – Preventive Control

Meliputi:

- pemeriksaan kebersihan;
- standardisasi pemasangan;
- standardisasi penggunaan shim;
- standardisasi torsi;
- kalibrasi alat ukur.

Level 2 – Process Control

Meliputi:

- pengukuran backlash;
- pemeriksaan preload;
- hardness inspection;
- inspection sealing;
- lubrication verification.

Level 3 – Detection/Final Control

Meliputi:

- functional test;
- final visual inspection;
- leak inspection.

Struktur tersebut lebih kuat daripada 89system yang hanya mengandalkan final inspection. Literature terbaru mengenai quality management menunjukkan bahwa transformasi menuju Quality 4.0 semakin menekankan integrasi data, monitoring, dan pengendalian kualitas secara real time [6], [7].

K. Potensi Pengembangan Quality 4.0

Walaupun penelitian ini belum menggunakan 89system digital, Process Quality Control Mapping yang dihasilkan dapat menjadi dasar digitalisasi.

Pengembangan berikutnya dapat dilakukan dengan:

Dial Indicator → Digital Data Capture → Database → SPC Dashboard → Alarm → Reaction Plan

Untuk hardness:

Hardness Tester → Digital Record → Trend Analysis → Process Monitoring

Untuk functional test:

Test Result → Database → Traceability → Quality Dashboard

Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa digital twin dan data-driven methods dapat digunakan untuk monitoring kondisi dan degradation pada gear [10]. Selain itu, kajian Quality 4.0 menunjukkan bahwa integrasi teknologi digital dengan quality management dapat meningkatkan operational efficiency, tetapi tetap memerlukan kesiapan sumber daya, kompetensi, dan sistem organisasi [7].

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan Process Quality Control Mapping untuk mengidentifikasi karakteristik kualitas kritis pada proses perakitan gardan. Berbeda dari analisis proses perakitan yang hanya mendeskripsikan urutan operasi, pendekatan penelitian ini menghubungkan setiap tahapan proses dengan Critical Quality Characteristics, parameter pengendalian, metode inspeksi, dan tindakan pengendalian.

Hasil analisis menunjukkan empat kelompok pengendalian utama, yaitu kebersihan komponen, ketepatan posisi dan pengencangan pasangan pinion–ring gear, pengendalian backlash dan preload, serta pengendalian karakteristik material dan functional test.

Backlash sebesar 0,15 mm berada dalam rentang acuan 0,10–0,20 mm yang digunakan dalam penelitian. Sementara itu, hardness meningkat dari sekitar 22 HRC menjadi 55–58 HRC setelah heat treatment. Kedua parameter tersebut dapat digunakan sebagai contoh karakteristik kualitas yang perlu dikendalikan, tetapi belum dapat digunakan untuk menyatakan kapabilitas statistik proses karena jumlah pengukuran berulang tidak tersedia.

Kontribusi utama penelitian adalah rancangan Process Quality Control Matrix dan control plan konseptual yang menempatkan pengendalian kualitas sepanjang proses, bukan hanya pada final inspection. Rancangan tersebut dapat menjadi dasar pengembangan SPC, Measurement System Analysis, process capability analysis, dan digital quality monitoring.

Penelitian lanjutan perlu menggunakan dataset produksi yang lebih besar, pengukuran berulang, data reject, nilai torque aktual, data preload kuantitatif, profil hardness, data distortion, serta functional/endurance test sehingga pengendalian dapat dikembangkan menjadi sistem berbasis statistik dan Quality 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B.-F. Wu and M.-Y. Cheng, "Backlash size identification for servomechanisms with gear transmission devices," *Precision Engineering*, vol. 91, pp. 132–142, 2024, doi: 10.1016/j.precisioneng.2024.09.011.
- [2] L. Sheng, M. Xu, Q. Sun, W. Li, and G. Ye, "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*, vol. 237, no. 2, pp. 220–235, 2023, doi: 10.1177/14644193231154439.
- [3] D. Zorko, P. Wei, and N. Vukašinović, "The effect of gear-manufacturing quality on the mechanical and thermal responses of a polymer-gear pair," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 195–211, 2024, doi: 10.1093/jcde/qwae010.
- [4] W. Shao, M. Yi, J. Tang, et al., "Prediction and minimization of the heat treatment induced distortion in 8620H steel gear: Simulation and experimental verification," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, p. 126, 2022, doi: 10.1186/s10033-022-00802-4.
- [5] M. Mirza, M. Yilmaz, E. Thieme, T. Lohner, and C. H. Venner, "Drop-On-Demand Lubrication of Gears: A Feasibility Study," *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 7, p. 746407, 2021, doi: 10.3389/fmech.2021.746407.
- [6] N. G. Markatos and A. Mousavi, "Manufacturing quality assessment in the industry 4.0 era: a review," *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 34, no. 13–14, pp. 1655–1681, 2023, doi: 10.1080/14783363.2023.2194524.
- [7] H.-C. Liu, R. Liu, X. Gu, and M. Yang, "From total quality management to Quality 4.0: A systematic literature review and future research agenda," *Engineering Management Journal*, vol. 10, pp. 191–205, 2023.
- [8] P. J. Kumar, S. Saravanan, L. Sivabalan, K. Karthikeyan, and N. Naghulvarshan, "Statistical Quality Control in the Gear Manufacturing Industry," *Proceedings of the International Conference on Advancements in Materials, Design and Manufacturing for Sustainable Development*, 2024, doi: 10.4108/eai.23-2-2024.2347021.
- [9] A. Rani Sarker and J. K. Dunston, "Implementation of Quality 4.0, a systematic review of approaches, root causes, and challenges," *Quality Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 204–218, 2025, doi: 10.1080/08982112.2024.2373360.
- [10] K. Feng, J. C. Ji, Y. Zhang, Q. Ni, Z. Liu, and M. Beer, "Digital twin-driven intelligent assessment of gear surface degradation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 186, p. 109896, 2023, doi: 10.1016/j.ymssp.2022.109896.