

Penerapan Siklus *Plan-Do-Check-Action* untuk Mengurangi Cacat Permukaan pada Produk *Outer Tube* Model 2DP di PT. XYZ

Naufal Bahy Putra¹, Deni Fajar Fitriyana^{1*}, Samsudin Anis¹, Rahmat Doni Widodo¹, Janviter Manalu², Januar Parlaungan Siregar³, Tezara Cionita⁴, Mochamad Marte Ardhianto⁵

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Kampus UNNES Sekaran Gunungpati Semarang 50229, Central Java, Indonesia

²Falkultas Teknik, Universitas Cenderawasih Jayapura
Jayapura 99351, Papua, Indonesia

³Faculty of Mechanical & Automotive Engineering Technology, Universiti Malaysia Pahang Al - Sultan Abdullah
Pahang 26600, Malaysia

⁴Mechanical Engineering Faculty of Engineering & Quantity Surveying INTI International University
Negeri Sembilan 71800, Malaysia

⁵Udiklat PLN Makassar
Gowa 92119, Makassar

*E-mail: deniifa89@mail.unnes.ac.id

Diajukan: 23-01-2025; Diterima: 24-04-2025; Diterbitkan: 30-04-2025

Abstrak

Tingkat cacat permukaan pada *outer tube* model 2DP di area pemesinan PT.XYZ masih mencapai 3,91%, melebihi *Key Performance Indicator* (KPI) perusahaan sebesar 1,36%. Kajian terdahulu membuktikan efektivitas siklus *Plan-Do-Check-Action* (PDCA) di berbagai sektor, namun belum ada penelitian empiris yang memfokuskan penurunan cacat permukaan komponen otomotif pada proses pemesinan di Indonesia dan mengukur dampak langsung integrasi PDCA terhadap pencapaian KPI serta penghematan biaya perbaikan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menurunkan cacat permukaan *outer tube* model 2DP mencapai KPI sebesar 1,36% dan menghemat biaya pengerjaan ulang. Metode yang digunakan dengan mengkombinasikan 8 Langkah *Toyota Production System* (TPS), diagram Pareto, dan diagram *ishikawa* untuk mengidentifikasi akar penyebab dan menetapkan prioritas perbaikan. Dengan melakukan perbaikan meliputi, pemotongan dua-tahap (*roughing-finishing*), modifikasi program *turning*, penggantian diameter *tool rib*, dan penggunaan *jig semi-cavity*, hasil penelitian menunjukkan penurunan tingkat cacat permukaan pada produk *outer tube* model 2DP dari 3,91% menjadi 1,32% serta memberikan penghematan biaya tahunan perusahaan hingga Rp. 600.780.000. Kesimpulannya, integritas siklus PDCA menggunakan 8 langkah TPS dan alat bantu kualitas efektif dalam meningkatkan kualitas produk dan efisiensi biaya di industri Otomotif. Penelitian ini memperluas bukti empiris *lean manufacturing* di industri otomotif di Indonesia, menyediakan kerangka praktis perbaikan berbiaya rendah namun berdampak tinggi serta integrasi dengan teknologi industri 4.0.

Kata kunci: 8 langkah TPS; Cacat permukaan; Diagram Pareto; *Lean manufacturing*; *Outer tube*; PDCA

Abstract

The surface defect rate on the *outer tube* model 2DP in the machining area of PT. XYZ still reaches 3.91%, exceeding the company's *Key Performance Indicator* (KPI) of 1.36%. Previous studies have proven the effectiveness of the *Plan-Do-Check-Action* (PDCA) cycle in various sectors, but there has been no empirical research that focuses on reducing surface defects in automotive components in the machining process in Indonesia and measuring the direct impact of PDCA integration on achieving KPI and saving repair costs. Therefore, this study aims to reduce surface defects in the *outer tube* model 2DP to achieve a KPI of 1.36% and save rework costs. The method used is a combination of the 8 Steps of the *Toyota Production System* (TPS), Pareto diagrams, and *Ishikawa* diagrams to identify root causes and set repair priorities. By making improvements including, two-stage cutting (*roughing-finishing*), modification of *turning* program, replacement of *tool rib* diameter, and use of *semi-cavity* jig, the results of the study showed a decrease in the level of surface defects in the *outer tube* product model 2DP from 3.91% to 1.32% and provided annual cost savings of up to Rp. 600,780,000. In conclusion, the integrity of the PDCA cycle using TPS 8 Steps and quality tools are effective in improving product quality and cost efficiency in the Automotive Industry. This study extends the empirical evidence of *lean manufacturing* in the automotive industry in Indonesia, providing a practical; framework for low-cost but high-impact improvements and integration with industry 4.0 technology.

Keywords: 8 Steps TPS; Surface defect; Pareto diagram; *Lean manufacturing*; *Outer tube*; PDCA

1. Pendahuluan

Lean manufacturing merupakan sebuah teknik, peralatan, filosofi, dan metodologi yang diterapkan pada sistem produksi [1–3]. Filosofi ini berasal dari Jepang yang dikembangkan pada praktik *Toyota Production System* (TPS) [4–6], dan telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap keberhasilan perusahaan di negara-negara maju [7-8]. Karakteristik *lean manufacturing* meliputi praktik *just-in-time*, *work-in-progress* dan pengurangan pemborosan, strategi perbaikan, produksi bebas cacat, dan standarisasi kerja [9]. Tujuan utama *lean manufacturing* adalah menghilangkan pemborosan dan mengendalikan proses penting terkait dengan produksi. Alasan inilah perusahaan menerapkan *lean manufacturing* untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses produksinya [10–14]. Dalam industri manufaktur, pemborosan diklasifikasikan dalam tujuh kategori: Produksi berlebih, transportasi, waktu tunggu, inventaris, pergerakan, pemrosesan berlebih, dan cacat [15-16]. Semua pemborosan ini berdampak pada waktu pengiriman, biaya, dan kualitas produk [17–19].

Dalam industri manufaktur yang penuh dengan persaingan, kualitas merupakan faktor yang penting untuk mendorong keberhasilan komersial produk dalam memperoleh pasar mereka [20–23]. Beberapa penulis menyatakan bahwa cacat adalah penyebab utama kerusakan pada suatu komponen [24–28]. Cacat didefinisikan sebagai suatu kegagalan atau serangkaian kegagalan baik secara alami maupun efek kumulatif, yang mengakibatkan suatu bagian dari produk tidak memenuhi standar atau spesifikasi penerimaan minimum yang ditetapkan [29-30]. Kualitas produk yang buruk dapat berdampak pada banyak hal, mulai dari kerugian ekonomi langsung, dampak sumber daya yang terbuang, citra perusahaan yang buruk dan ketidakpuasan pelanggan [31–33]. Oleh karena itu, mengabaikan produk cacat dalam proses produksi dapat mengakibatkan permintaan yang tidak terpenuhi dan perlu melakukan pengerjaan ulang sehingga meningkatkan biaya pengeluaran perusahaan [34–36].

Banyak industri telah menerapkan berbagai metode untuk menjaga aktivitas produksi perusahaan agar tidak terjadi kegagalan dan pemborosan selama produksi. Salah satu metode tersebut adalah 8 langkah TPS, yang berlandaskan pada prinsip siklus *Plan-Do-Check-Action* (PDCA) [37-38]. Siklus PDCA berfungsi sebagai alat pengendalian kualitas dan perbaikan berkelanjutan dalam pengembangan produk di berbagai perusahaan industri [39–43]. Selain itu Siklus PDCA juga digunakan sebagai aplikasi manajemen kerja untuk meningkatkan kinerja organisasi bisnis dan menciptakan pengetahuan dan aktivitas baru [44–46]. Dalam penerapannya, Siklus PDCA bersifat fleksibel dan dapat diterapkan dimana saja dan untuk aktivitas apapun sesuai kebutuhan proses perencanaan produksi [47-48].

Lin et al., [49] menggunakan metode 8 langkah TPS untuk mengurangi waktu pemindahan pasien rawat inap ke ruang operasi sekaligus mengevaluasi kembali prinsip dasar *lean*. Hasilnya, total waktu yang dibutuhkan berkurang hingga 62,3%, waktu yang dibutuhkan petugas untuk melapor ke ruang perawat berkurang 56,5%, dan waktu yang dibutuhkan untuk transportasi *lift* berkurang 44,4%. Pada sebuah perusahaan manufaktur di bidang industri pengecoran, Kholil dkk., [38] melakukan penelitian dengan menerapkan metode 8 *Steps* dan 7 *Tools* dari TPS untuk mengatasi keterlambatan pengiriman kepada konsumen akibat lamanya proses *finishing*. Dengan metode ini, waktu siklus di area *finishing* berhasil dipangkas menjadi 66 detik, *output* standar meningkat menjadi 52 unit per jam, dan kecepatan penyelesaian lini produksi mengalami peningkatan hingga 112% dibandingkan sebelumnya. Wicaksono dan Rozak [50] menerapkan metode 8 langkah TPS di sebuah perusahaan otomotif yang bergerak di bidang manufaktur dan ekspor kendaraan dan suku cadang yang berlokasi di Jakarta, Indonesia untuk mengurangi cacat penyok. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cacat penyok berkurang 4,35% dari 6,74% menjadi 2,39%.

Antunes dan Eduardo [51] melakukan studi kasus penerapan siklus PDCA untuk menganalisis dan mengatasi masalah kehilangan saus yang berlebihan dalam produksi makanan beku pada industri makanan di Brazil. Hasil dari penelitiannya,

perusahaan mampu mengurangi kehilangan saus hingga 86,75% melalui perbaikan desain dan pengoperasian peralatan pengeluaran saus. Untuk menurunkan tingkat *Cans Loss Indeks* (CLI) di perusahaan yang memproduksi minuman, Silva dkk., [52] menyajikan program produksi bersih menggunakan siklus PDCA. Hasilnya, CLI tahunan turun dari 0,97 % pada April-Juli menjadi 0,78% pada akhir tahun, yang menghasilkan pengurangan biaya lebih dari 35% dari semester pertama ke semester berikutnya. Pada tahun kedua, CLI mencapai sasaran 0,60% dengan pengurangan biaya sebesar 28,91% dalam empat bulan pertama. Penerapan program produksi bersih menggunakan siklus PDCA ini berhasil meningkatkan kualitas dan produktivitas perusahaan serta mengurangi limbah dalam produksi minuman kaleng.

Kholif dkk., [53] menerapkan siklus PDCA untuk mengurangi kesalahan dan meningkatkan kapabilitas proses, guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas di laboratorium susu. Hasilnya, jumlah sampel susu UHT yang terkontaminasi berhasil dikurangi dari 386 menjadi 85. Selain itu, indeks kemampuan proses meningkat dari 0,52 menjadi 1,07. Pengurangan jumlah sampel terkontaminasi serta peningkatan kemampuan proses ini berhasil meningkatkan efisiensi dari 68,02% menjadi 74,06%, dan efektivitas dari 88,95% menjadi 96,85%. Di perusahaan manufaktur pada industri pengolahan plastik, Jagusiak-kocik [40] menerapkan siklus PDCA untuk mengatasi masalah dalam proses produksi bingkai foto, seperti perubahan warna dan permukaan yang gosong. Hasilnya, perusahaan tersebut berhasil mencapai tujuannya untuk mengurangi produk cacat hingga lebih dari 60%.

Huang et al., [54] menyajikan pengaruh model peningkatan kualitas dengan menggunakan metode *Find-Organize-Clarify-Focus-Select* (FOCUS) dan PDCA untuk mengurangi tingkat kecacatan distribusi kemasan steril yang diproses oleh CSSD. Hasilnya, terjadi penurunan tingkat kecacatan distribusi kemasan steril dari 1,74% menjadi 0,37% ($P < 0,05$) sehingga kualitas pasokan tetap terjaga. Vi Nguyen et al., [55] memberikan panduan praktis tentang penerapan siklus PDCA yang dikombinasikan dengan alat pendukung lainnya seperti 5 *Why*, diagram Ishikawa, 5W2H, dan *Computer-Aided Design* untuk peningkatan kualitas kemasan di Laboratorium GPME, Vietnam German University, Vietnam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PDCA merupakan metode yang efektif untuk mengatasi masalah kerusakan produk yang disebabkan oleh bahan dan teknik pengemasan yang tidak tepat. Metode ini menghadirkan solusi yang baik untuk menyeimbangkan perbaikan kemasan dan mengurangi biaya untuk memastikan keuntungan bagi perusahaan.

Arredondo-Soto et al., [56] melakukan penelitian mengenai penerapan metodologi *Practical Process Improvement* (PPI) dan PDCA di sebuah perusahaan manufaktur alat kesehatan yang berlokasi di Tijuana, Meksiko untuk mengurangi limbah dan rantai pasok selama proses produksi sehingga dapat mengurangi biaya untuk tetap kompetitif dalam penetapan harga produk. Setelah menyelesaikan dua tahap, proyek ini menghasilkan penghematan ekonomi sebesar \$165.000 dalam setahun. Amaral et al., [57] menggunakan metodologi siklus PDCA dengan menentukan waktu siklus pasokan yang optimal dan menstandarisasi proses pasokan logistik dan aliran material untuk mengukur manfaat dari pengurangan limbah dalam implementasi dan optimalisasi produk massal di lini perakitan sebuah perusahaan di sektor otomotif. Hasilnya, pemborosan dapat dikurangi dengan menetapkan aliran yang ringkas dan mendefinisikan pola pasokan yang menghasilkan pergerakan yang berkurang, memperbaiki posisi lebih dari setengah material di *trailer logistic* untuk mengurangi pemborosan transportasi, dan mengembangkan simulator Excel untuk mengoptimalkan siklus kereta logistik.

Di perusahaan manufaktur komponen otomotif, Miguel-Angel et al., [58] menerapkan metodologi PDCA dan didukung alat mutu lainnya seperti 5W2H, 3 *legged 5 why analysis*, *control chart* dan *capability analysis* untuk mengurangi skrap dalam pembuatan sub-rakitan motor listrik di perusahaan Tiongkok. Hasilnya adalah pengurangan dari 2,92% menjadi 0,7% dan mengurangi biaya tahunan sebesar \$135.000. Demikian juga, Realyv et al., [1] telah melakukan studi kasus penerapan siklus PDCA dan alat kualitas lainnya seperti diagram Pareto dan diagram alir di perusahaan manufaktur komponen elektronik untuk mengurangi cacat yang dihasilkan selama proses pengelasan setidaknya 20% dan

meningkatkan 20% kapasitas tiga jalur produksi ganda papan elektronik yang diproses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, pada tiga jalur produksi ganda papan mengalami penurunan sebesar 65%, 79%, dan 77%.

Literatur menunjukkan banyak penerapan siklus PDCA dan alat perbaikan berkelanjutan di berbagai sektor industri. Namun, sedikit penelitian yang secara khusus menilai efektivitas pendekatan tersebut dalam menurunkan cacat permukaan proses pemesinan komponen otomotif di industri manufaktur Indonesia. Keterkaitan antara 8 langkah TPS berbasis PDCA dengan pencapaian KPI dan efisiensi biaya perbaikan pun masih terbatas. Kesenjangan ini mendorong perlunya riset komprehensif yang mengintegrasikan siklus PDCA, 8 langkah TPS, dan alat mutu untuk meningkatkan kualitas serta menekan biaya pada lini produksi otomotif di Indonesia. Studi kasus ini dilakukan di area pemesinan perusahaan manufaktur komponen otomotif di Indonesia yang memproduksi *shock absorber* yaitu *outer tube*, yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Produk *outer tube*

Gambar 1 menunjukkan produk *outer tube* yang merupakan salah satu komponen *shock absorber* bagian depan sepeda motor, yang berfungsi untuk menjaga kestabilan kecepatan saat berkendara, menyerap getaran dan menyeimbangkan kendaraan, serta berperan sebagai elemen pendukung struktural kendaraan yang penting untuk keselamatan. *Outer tube* diproses dengan cara pengecoran dengan metode *gravity casting*, menggunakan campuran 2 jenis *ingot* yaitu AC2BF dan AC4D serta campuran sisa pengecoran. Setelah melalui proses pengecoran, *outer tube* kemudian mengalami proses pemesinan untuk membentuk *outer tube* menjadi bentuk dan dimensi yang diinginkan dengan memanfaatkan alat potong. *Outer tube* kemudian dilanjutkan ke proses selanjutnya yaitu pengecatan yang merupakan proses pelapisan yang bertujuan untuk menutupi area permukaan dengan satu atau lebih lapisan cairan tipis yang merata.

Dari sekian banyak produk *outer tube* yang dihasilkan, terdapat masalah terkait cacat permukaan yang disebabkan oleh proses pemesinan *outer tube*. Cacat permukaan terjadi karena adanya perubahan fisik atau kimia pada material benda kerja akibat pengaruh beban eksternal (mekanik, termal, kimia) dan internal (mekanik, termal, kimia) selama proses pemesinan [59]. Perubahan ini mencakup kondisi topografi permukaan [60], struktural metalurgi [61-62], sifat mekanis, serta komposisi kimia [63-64], dari permukaan yang diproses.

Dari data yang diperoleh dari perusahaan sejak bulan Januari hingga Maret 2024, total cacat permukaan mencapai 13.315 buah. Cacat tersebut terdiri dari berbagai model: Model 2DP (Yamaha Nmax) sebanyak 4.861 buah, model 2SX (Yamaha Soul GT) sebanyak 1.741 buah, model BEJ (Yamaha Fazzio) sebanyak 1.687 buah, model BJM (Yamaha Grand Filano) sebanyak 1.264 buah, model 2PV (Yamaha Jupiter MX King) sebanyak 899 buah, model 1DY (Yamaha Jupiter Z1) sebanyak 856 buah, model 1FD (Yamaha Vega Force) sebanyak 662 buah, model B65 (Yamaha Aerox) sebanyak 548 buah, model 54P (Yamaha Mio J dan Mio GT) sebanyak 474 buah, dan model B74 (Yamaha Xmax) sebanyak 323

buah. Data tersebut menunjukkan bahwa cacat permukaan model 2DP merupakan cacat tertinggi yaitu sebesar 3,91% dengan total cacat mencapai 4.861 unit dari total produksi sebanyak 123.469 unit. Target yang ditetapkan perusahaan sesuai dengan KPI-nya adalah sebesar 1,36%. Untuk mencapai target tersebut, maka perlu dilakukan *improvement* terhadap cacat permukaan model 2DP di area pemesinan *outer tube*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penerapan Siklus PDCA dengan menggunakan 8 langkah TPS dan alat bantu kualitas tambahan sebagai alat pengendalian kualitas dan perbaikan berkelanjutan untuk mengurangi tingkat cacat permukaan dan biaya pengerjaan ulang pada produk *outer tube* model 2DP di area pemesinan *outer tube* sesuai dengan target KPI yang ditetapkan perusahaan. Pendekatan siklus PDCA menggunakan 8 langkah TPS diterapkan untuk menganalisis penyebab cacat permukaan pada produk *outer tube* model 2DP, mengembangkan langkah-langkah perbaikan, dan membandingkan tingkat cacat sebelum dan sesudah penerapan metode 8 langkah TPS. Alat bantu kualitas tambahan seperti diagram pareto dan diagram *ishikawa* juga diterapkan untuk menganalisa masalah dan menentukan tindakan yang perlu diambil untuk perbaikan yang efektif. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah yang penting, karena metodologi dan alat kualitas pendukung yang dikembangkan dapat dengan mudah diterapkan ke dalam proses produksi lainnya, tidak hanya dalam produksi komponen otomotif saja.

2. Material dan metodologi

Data penelitian ini diperoleh dari PT.XYZ yang berlokasi di Cikarang, Indonesia pada periode Januari hingga Maret 2024. Penelitian ini menggunakan teknik total *sampling*, yaitu dengan menganalisis seluruh data cacat permukaan *outer tube* pada periode tersebut. Teknik ini dipilih untuk memastikan hasil analisis mencerminkan kondisi nyata secara menyeluruh dan akurat. Data bersumber dari sistem pencacatan harian perusahaan dan laporan inspeksi kualitas yang dilakukan secara berkala oleh tim kontrol kualitas. Validitas data dijamin dengan adanya verifikasi silang antara laporan visual operator dan sistem pencacatan digital. Adapun reliabilitas data didukung oleh penggunaan alat ukur dan prosedur inspeksi yang konsisten, serta pelatihan rutin bagi operator inspeksi. Penelitian ini memiliki batasan pada aspek ruang lingkup, yakni hanya fokus pada *outer tube* model 2DP dan tidak mencakup model lainnya.

2.1. 8 langkah Toyota Production System (TPS)

Penelitian ini menggunakan metode 8 langkah TPS yang mengacu pada pendekatan PDCA. Bagian *Plan* (P) mencakup lima langkah pertama, yaitu: Mengklarifikasi masalah, menguraikan masalah, menetapkan target, menganalisis akar penyebab dan mengembangkan tindakan perbaikan. Selanjutnya, bagian *Do* (D) adalah langkah ke-6, yaitu melakukan perbaikan. Bagian *Check* (C) mengacu pada langkah ke-7, yaitu mengevaluasi hasil dan proses. Terakhir, bagian *Action* (A) mencakup langkah ke-8, yaitu standarisasi proses [37,49,65-66].

2.1.1. Langkah 1: Mengklarifikasi Masalah

Mengklarifikasi masalah bertujuan untuk mengidentifikasi dan mendefinisikan secara jelas dan ringkas dalam memecahkan masalah [67]. Masalah yang paling dominan digunakan untuk menentukan masalah yang akan menjadi tujuan akhir dari proses pemecahan masalah [68].

2.1.2. *Langkah 2: Menguraikan Masalah*

Langkah ini melibatkan memecahkan masalah menjadi karakteristik-karakteristik kecil dan terukur yang dapat membantu mengidentifikasi titik terjadinya masalah tersebut. Empat akar penyebab penyimpangan adalah mesin, manusia, metode, material, dan lingkungan (4M+1E) [69-70].

2.1.3. *Langkah 3: Menetapkan Target*

Setelah mengidentifikasi titik terjadinya masalah, langkah selanjutnya adalah menetapkan target yang berfokus pada penentuan target yang spesifik, terukur, dapat dicapai, dan terikat waktu sesuai dengan KPI perusahaan untuk mengukur keefektifan dari langkah-langkah yang dilakukan [71–73].

2.1.4. *Langkah 4: Menganalisis Akar dan Penyebab*

Langkah ini menyelidiki secara mendalam mengapa suatu masalah terjadi dengan menggunakan diagram ishikawa berdasarkan faktor penyebab seperti, manusia, mesin, metode, material, dan lingkungan, sehingga solusi yang diterapkan benar-benar efektif dan mencegah terulangnya masalah yang sama [74–77]. Namun, masalah dapat diselesaikan dengan baik jika penyidik mengetahui cara menemukan akar penyebabnya.

2.1.5. *Langkah 5: Mengembangkan Tindakan Perbaikan*

Setiap masalah memiliki beberapa akar penyebab, sehingga diperlukan berbagai tindakan perbaikan untuk mengatasinya. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan sebanyak mungkin solusi yang relevan [78]. Solusi terbaik kemudian dipilih dengan menyederhanakan tindakan perbaikan ke tindakan yang paling praktis dan efektif [79].

2.1.6. *Langkah 6: Melakukan Perbaikan*

Langkah ini mengimplementasikan perbaikan yang telah direncanakan sebelumnya untuk mengatasi akar penyebab masalah secara sistematis dan terukur. Disarankan untuk membagi pekerjaan menjadi beberapa tahap-tahap kecil sehingga tindakan perbaikan dapat diuji atau dipantau sebelum tahap akhir diselesaikan. Selain itu, penting untuk menetapkan pihak yang bertanggung jawab untuk memantau kemajuan implementasi tindakan penanggulangan. Mereka akan memastikan bahwa rencana tersebut berjalan sesuai dengan harapan serta mengoordinasikan kegiatan rencana yang diperlukan untuk menyelesaikan proses implementasi.

2.1.7. *Langkah 7: Evaluasi Hasil dan Proses*

Verifikasi hasil secara keseluruhan dilakukan untuk memastikan apakah hasil yang diinginkan telah tercapai. Penting untuk menganalisis apakah hasilnya sesuai dengan harapan pemangku kepentingan, termasuk pelanggan dan perusahaan [80-81].

2.1.8. *Langkah 8: Standarisasi Proses*

Langkah terakhir dalam proses pemecahan masalah adalah menstandarisasi proses, yang dilakukan ketika perbaikan menunjukkan hasil yang baik dan konsisten. Pekerjaan yang terstandarisasi merupakan cara yang sederhana, aman, dan efektif untuk melakukan pekerjaan [82–85].

2.2. Diagram Pareto

Diagram Pareto merupakan alternatif penting untuk histrogram dan digunakan secara luas dalam analisis kualitas dan peningkatan proses. Data yang ditampilkan mencakup berbagai jenis cacat, mode kegagalan, atau kategori lain yang relevan. Diagram Pareto ini terdiri dari diagram batang dan diagram garis. Diagram batang menunjukkan nilai individu dalam urutan menurun berdasarkan kategori yang relevan, sedangkan diagram garis menunjukkan total kumulatif dari ukuran unit [86-87]. Diagram Pareto dapat membantu mengidentifikasi dan mengkategorikan peluang perbaikan terbaik [88-89].

2.3. Diagram Ishikawa

Diagram Ishikawa juga dikenal sebagai diagram sebab-akibat atau diagram tulang ikan, yang merupakan alat sederhana yang digunakan dalam manajemen kualitas. Diagram ini membantu mengidentifikasi dan menganalisa penyebab potensial dari variasi proses atau terjadinya suatu fenomena, serta menggambarkan penyebab interaksi antar penyebab tersebut [90-91]. Selain itu, diagram Ishikawa juga digunakan untuk menganalisis masalah dalam organisasi yang membantu mengklarifikasi hubungan antara faktor penyebab dalam suatu proses dan efeknya, seperti kualitas, produktivitas, biaya dan lain-lain. Tujuannya adalah untuk menemukan faktor-faktor penyebab yang menghambat dalam suatu proses dan efeknya [92]. Diagram Ishikawa terdiri dari kepala ikan, tulang punggung, dan tulang. Kepala ikan menggambarkan masalah yang perlu dipecahkan, tulang punggung menggambarkan kelompok penyebab utama, dan tulang-tulang menggambarkan penyebab yang termasuk dalam kategori tertentu.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Hasil Implementasi Metode 8 Langkah TPS dan Alat Bantu Kualitas Tambahan

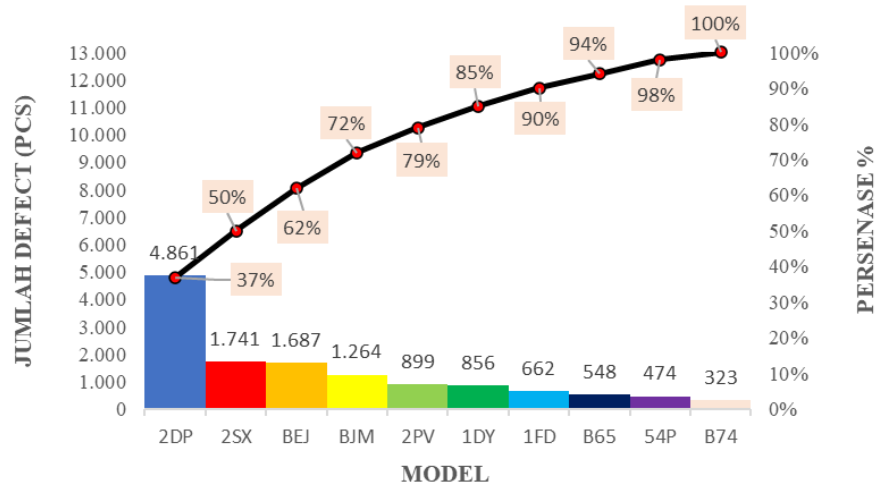
3.1.1. Mengklarifikasi Masalah

Masalah yang paling dominan adalah masalah yang akan dipilih untuk dijadikan objek dari upaya perbaikan ini. Untuk mengetahui model mana saja yang mengalami cacat permukaan di area pemesinan *outer tube*, berikut adalah data cacat permukaan berdasarkan model selama periode bulan Januari hingga Maret 2024, yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Cacat Permukaan Berdasarkan Model di Area Pemesinan *Outer Tube*

No	Model	Merek	Januari (Buah)	Februari (Buah)	Maret (Buah)	Rata-rata (Buah)	%	% Kom
1	2DP	Yamaha Nmax	5.893	4.946	3.743	4.861	37%	37%
2	2SX	Yamaha Soul GT	2.535	2.258	431	1.741	13%	50%
3	BEJ	Yamaha Fazzio	1.827	1.349	1.884	1.687	12%	62%
4	BJM	Yamaha Grand Filano	884	1.407	1.500	1.264	10%	72%
5	2PV	Yamaha Jupiter MX King	825	1.441	431	899	7%	79%
6	1DY	Yamaha Jupiter Z1	845	1.192	530	856	6%	85%
7	1FD	Yamaha Vega Force	815	541	631	662	5%	90%
8	B65	Yamaha Aerox	715	395	534	548	4%	94%
9	54P	Yamaha Mio J and Mio GT	662	305	496	474	4%	98%
10	B74	Yamaha Xmax	454	230	285	323	2%	100%
TOTAL			15.415	14.064	10.465	13.315	100%	

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata jumlah cacat permukaan selama periode Januari hingga Maret meliputi: Model 2DP sebanyak 4.861 buah, 2SX sebanyak 1.741 buah, BEJ sebanyak 11.687 buah, BJM sebanyak 1.264 buah, 2PV sebanyak 899 buah, 1DY sebanyak 856 buah, 1FD sebanyak 662 buah, B65 sebanyak 548 buah, 54P sebanyak 474 buah, dan B74 sebanyak 323 buah. Dari data Tabel 1, dilakukan analisa menggunakan diagram Pareto untuk menentukan Pareto cacat permukaan berdasarkan model yang paling dominan, yang dapat dilihat pada Gambar 2.

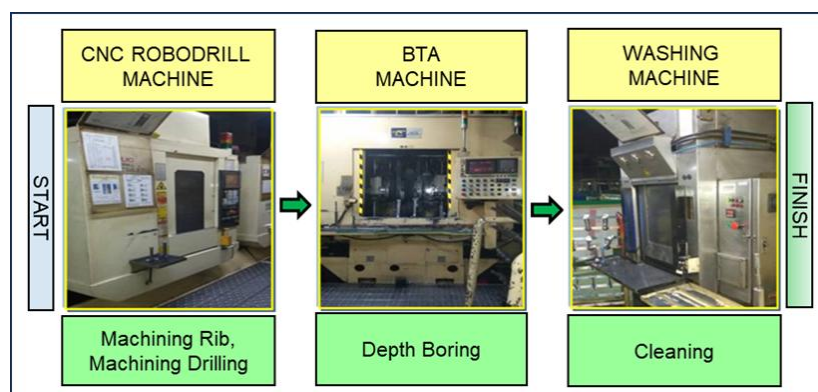


Gambar 2. Pareto berdasarkan model

Berdasarkan Gambar 2, cacat permukaan model 2DP merupakan masalah yang dominan di area pemesinan *outer tube*. Untuk mencegah jumlah cacat semakin meningkat, maka harus dilakukan perbaikan agar potensi yang menyebabkan cacat tersebut tidak tinggi lagi.

3.1.2. Menguraikan Masalah

Setelah mengetahui permasalahan yang dijadikan objek penelitian yaitu cacat permukaan model 2DP di area pemesinan *outer tube*, langkah selanjutnya adalah menguraikan masalah tersebut berdasarkan faktor 4M+1E. Alur proses pemesinan *outer tube* model 2DP dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur proses di area pemesinan *outer tube* model 2DP

Berdasarkan Gambar 3, proses pemesinan pertama pada *outer tube* model 2DP adalah proses *machining rib* dan proses *machining drilling* menggunakan mesin CNC Robodrill. Proses *machining rib* bertujuan untuk melakukan proses pemotongan *rib* pada *outer tube*, sedangkan proses *machining drilling* bertujuan untuk pembuatan lubang pada poros roda dan lubang baut, pembuatan alur atau coakan pada bagian dalam *outer tube*, dan pembuatan *turning*. Selanjutnya *outer tube* diproses *hole depth* menggunakan mesin BTA untuk pembuatan kedalaman dan pembesaran lubang *outer tube*. Terakhir, *outer tube* diproses pembersihan menggunakan mesin pencuci untuk membersihkan *outer tube* dari kontaminasi *oil coolant* dan *cutting chip*. Selama proses pemesinan, banyak ditemukan cacat permukaan pada produk *outer tube* model 2DP. Kondisi mesin dan operator secara umum dinilai baik, namun hasil tetap dipengaruhi oleh desain metode kerja. Meskipun mesin dalam keadaan prima, setiap sistem memiliki batas *stiffness* dan *vibration damping*. Operator telah sesuai standar, tetapi tidak cukup hanya mengikuti prosedur, melainkan perlu pemahaman mengenai strategi *toolpath* dan pemrosesan bertahap sesuai prinsip distribusi beban. Uraian masalah cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP berdasarkan faktor 4M+1E dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Uraian Masalah Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP

Faktor	Ideal	Temuan	Judge
Manusia	Operator sesuai dengan standar <i>skill map</i>	Operator sesuai dengan standar <i>skill map</i>	 Tidak diperlukan perbaikan
Material	Bahan baku mematuhi standar kualitas inspeksi manual	Bahan baku mematuhi standar kualitas inspeksi manual	 Tidak Diperlukan Perbaikan
Mesin	Mesin telah memenuhi standar manajemen operasional dan teknik	Mesin telah memenuhi standar manajemen operasional dan teknik	 Tidak Diperlukan Perbaikan
Metode	Hasil dari proses <i>turning</i> tidak kasar	Hasil dari proses <i>turning</i> kasar	 Diperlukan Perbaikan
Metode	Hasil dari proses <i>turning</i> tidak bergaris	Hasil dari proses <i>turning</i> bergaris	 Diperlukan Perbaikan
Metode	Hasil dari proses <i>rib</i> tidak kasar	Hasil dari proses <i>rib</i> kasar	 Diperlukan Perbaikan
Metode	Hasil dari proses <i>rib</i> tidak bergelombang	Hasil dari proses <i>rib</i> bergelombang	 Diperlukan Perbaikan
Lingkungan	Suhu ruangan sesuai standar yaitu 33°C-37°C	Suhu ruangan sesuai standar yaitu 33°C-37°C	 Tidak Diperlukan Perbaikan

Berdasarkan uraian masalah yang disajikan pada Tabel 2, hasil temuan terkait masalah cacat model 2DP disebabkan oleh faktor metode yang mengakibatkan hasil *turning* kasar dan bergaris. Selain itu, hasil *rib* juga kasar dan bergelombang. Kondisi ini berpotensi menyebabkan cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP.

3.1.3. Menetapkan Target

Langkah selanjutnya adalah menetapkan target penurunan cacat permukaan model 2DP. Data target penurunan cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Target Penurunan Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP

Model	Januari (Buah)	Februari (Buah)	Maret (Buah)	Rata-rata (Buah)	Target
2DP	5.893	4.946	3.743	4.861	1.679
Total Produksi	135.532	118.319	116.557	123.469	123.469
Persentase Cacat	4,35%	4,18%	3,21%	3,91%	1,36%

Berdasarkan Tabel 3 dapat diketahui bahwa rata-rata jumlah cacat permukaan model 2DP selama 3 bulan pada periode Januari hingga Maret 2024 sebanyak 4.861 buah dengan total produksi 123.469 buah atau sebesar 3,91%, hal ini tentu melebihi target perusahaan yaitu 1,36%. Data tersebut juga menunjukkan bahwa setidaknya cacat yang dihasilkan setelah dilakukan perbaikan adalah 1.679 buah dengan total produksi 123.469 buah. Dengan melakukan peningkatan untuk mengurangi cacat tersebut, perusahaan dapat memperoleh keuntungan berupa penghematan biaya. Potensi keuntungan dari penurunan cacat permukaan model 2DP dapat dilihat pada Tabel 4.

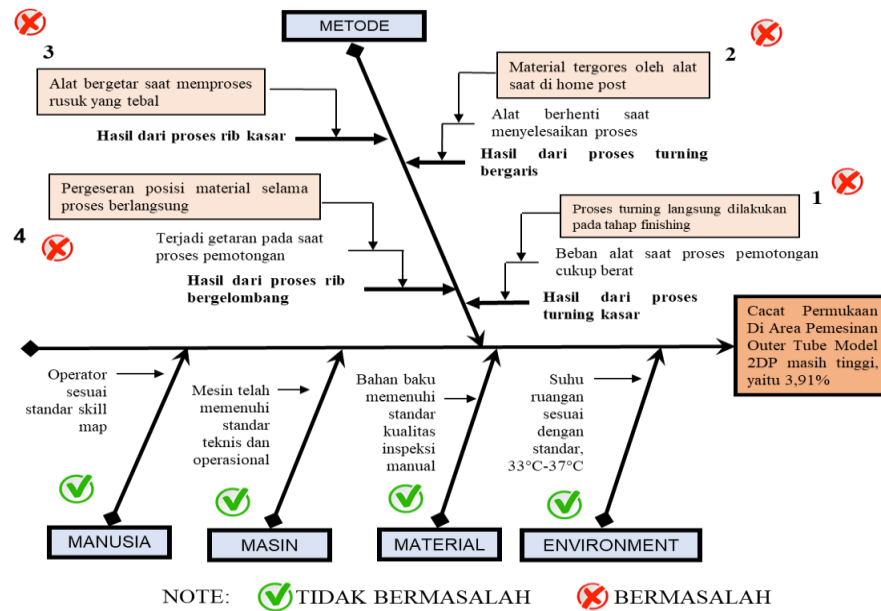
Tabel 4. Potensi Keuntungan Penurunan Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP

Cacat	Jumlah Cacat (Buah)	%	Biaya Repair per Buah (Rp)	Biaya Total Kerugian (Rp)	Pengurangan Kerugian per Bulan (Rp)	Penurunan Kerugian per Tahun (Rp)
Sebelum Perbaikan	4.861	3,91%	15.000	72.915.000		
Sesudah Perbaikan	1.679	1,36%	15.000	25.185.000	47.730.000	572.760.000

Berdasarkan Tabel 4 dapat diketahui bahwa cacat permukaan model pada *outer tube* model 2DP dengan jumlah cacat sebanyak 4.861 buah atau sebesar 3.91%, mengakibatkan perusahaan mengalami kerugian sekitar 72.915.000 per bulan. Apabila perbaikan yang dilakukan sesuai dengan target sekitar 1.679 buah atau sebesar 1,36%, perusahaan mengalami penurunan kerugian menjadi Rp. 25.185.000 per bulan. Penurunan kerugian ini berdampak pada penghematan biaya pengeluaran mencapai Rp. 45.730.000 per bulan dan Rp. 572.760.000 per tahun.

3.1.4 Menganalisis Akar dan Penyebab

Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis akar dan penyebab masalah menggunakan diagram sebab akibat, yang dapat dilihat pada Gambar 4.



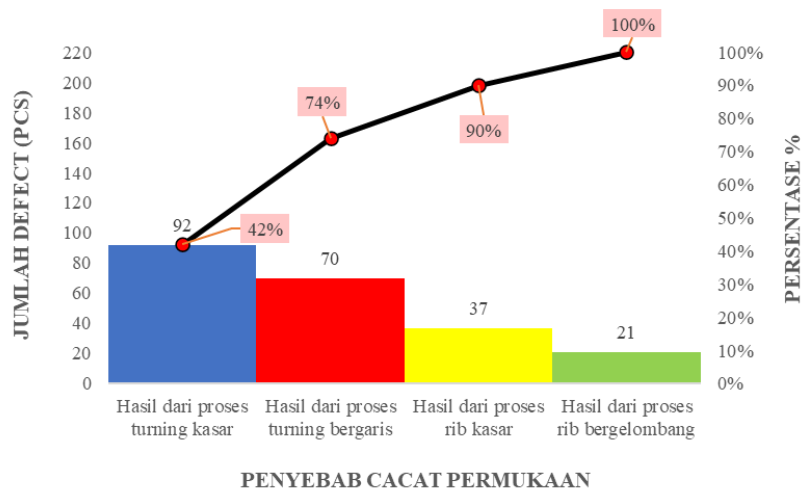
Gambar 4. Diagram sebab akibat cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP

Gambar 4 menunjukkan akar penyebab cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP yang masih tinggi. Cacat pada proses *turning* dan *rib* di area *outer tube* model 2DP secara teoritis dapat dijelaskan melalui prinsip dasar mekanika pemesinan. Masalah pertama, akar penyebab hasil dari proses *turning* kasar disebabkan oleh proses *turning* yang langsung dilakukan *finishing*. Kedua, akar penyebab hasil dari proses *turning* bergaris disebabkan karena material tergores oleh alat saat berada di *home post*. Selanjutnya, akar penyebab hasil dari proses *rib* kasar disebabkan oleh alat bergetar saat memproses *rib* yang tebal. Terakhir, akar penyebab hasil dari proses *rib* bergelombang disebabkan oleh posisi material bergeser seiring berjalannya proses. Berdasarkan diagram sebab akibat yang tertera pada Gambar 4, selanjutnya dilakukan pengolahan data berupa faktor yang paling dominan penyebab cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP. Data yang disajikan pada Tabel 5 merupakan hasil uji coba 220 buah *outer tube*.

Tabel 5. Data Uji Coba Faktor Dominan Penyebab Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP

No	Permasalahan	Jumlah Cacat (Buah)	%	Kom%	Peringkat
1	Hasil dari proses <i>turning</i> kasar	92	42%	42%	1
2	Hasil dari proses <i>turning</i> bergaris	70	32%	74%	2
3	Hasil dari proses <i>rib</i> kasar	37	17%	90%	3
4	Hasil dari proses <i>rib</i> bergelombang	21	10%	100%	4
TOTAL		220	100%		

Jumlah faktor dominan penyebab cacat permukaan sebanyak, 92 buah dari hasil *turning* yang kasar, 70 buah dari hasil *turning* yang bergaris, 37 buah dari hasil *rib* yang kasar, dan 21 buah dari hasil *rib* yang bergelombang. Dari Tabel 5, dilakukan analisa menggunakan diagram Pareto untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang dijadikan langkah awal untuk menentukan prioritas dalam merencanakan perbaikan guna melakukan upaya penurunan cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP, yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Pareto Faktor Dominan Penyebab Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP

Berdasarkan Gambar 5, langkah awal dalam merencanakan perbaikan cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP, dimulai dengan hasil dari proses *turning* kasar, diikuti hasil dari proses *turning* bergaris, kemudian hasil dari proses *rib* kasar, dan terakhir hasil dari proses *rib* bergelombang.

3.1.5. Mengembangkan Tindakan Perbaikan

Berdasarkan analisis sebab akibat sebelumnya dapat diketahui bahwa akar masalah yang didapat adalah karena faktor metode yang menyebabkan produk *outer tube* model 2DP menghasilkan cacat permukaan. Oleh karena itu diperlukan usulan dan mengembangkan tindakan perbaikan untuk mengurangi jumlah cacat permukaan di area pemesinan *outer tube*. Metode yang digunakan untuk melakukan usulan dalam mengembangkan tindakan perbaikan adalah 5W+2H sebagaimana yang terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Mengembangkan Tindakan Perbaikan Berdasarkan 5W+2H

No	Faktor	What (Masalah)	How (Rencana)	Why (Target)	How Much (Biaya)	Remark (Pertimbangan)	Judge	Who, Where, When (Tim, Lokasi, Jadwal)
1	Metode	Proses <i>turning</i> langsung dilakukan tahap <i>finishing</i>	Alternatif 1: Proses pemotongan menggunakan <i>roughing</i> dan <i>finishing</i>	Hasil dari proses <i>turning</i> tidak kasar	Rp. 200.000	(+) Proses cepat (+) Biaya murah	✓	Tim: Naufal Bahy
			Alternatif 2: Mengganti <i>material tool turning</i> dengan <i>material diamond</i>	Hasil dari proses <i>turning</i> tidak kasar	Rp. 20.000.000	(+) Proses cepat (-) Biaya mahal	✗	Lokasi: Mesin Robodrill Jadwal: Mei 2024
2	Metode	Material tergores oleh alat saat	Memodifikasi program <i>turning</i>	Hasil dari proses <i>turning</i> tidak bergaris	Rp. 0	(+) Proses cepat	✓	Tim: Naufal Bahy Lokasi: Mesin Robodrill

3	Metode	berada di <i>home post</i>	Mengganti diameter <i>tool rib</i> dengan diameter yang lebih besar	Hasil dari proses <i>rib</i> tidak kasar	Rp. 300.000	(+) Biaya mahal (+) Proses cepat (+) biaya murah		Jadwal: Mei 2024 Tim: Naufal Bahy
		Alat bergetar saat memproses <i>rib</i> yang tebal	Mengganti material <i>tool rib</i> dengan material diamond	Hasil dari proses <i>rib</i> tidak bergelombang	Rp. 20.000.000	(+) Proses cepat (-) biaya mahal		Lokasi: Mesin Robodrill Jadwal: Mei 2024
4	Metode	Posisi material bergeser seiring berjalannya proses	Mengubah <i>jig support</i> menjadi <i>semi cavity</i>	Hasil dari proses <i>rib</i> tidak bergelombang	Rp. 1.000.000	(+) Proses cepat (+) Tidak goyah		Tim: Naufal Bahy Lokasi: Mesin Robodrill Jadwal: Mei 2024

Berdasarkan Tabel 6, dapat diketahui bahwa langkah-langkah perbaikan yang akan dilakukan untuk mengatasi masalah yang terjadi meliputi, proses pemotongan menggunakan *roughing* dan *finishing*, memodifikasi program *turning* setelah selesai proses, mengganti diameter *tool rib* dengan diameter yang lebih besar, dan mengubah *jig support* dengan *semi cavity*.

3.1.6. Melakukan Perbaikan

Perbaikan dilakukan sesuai dengan rencana tindakan yang telah dikembangkan sebelumnya dan telah diperoleh hal-hal yang perlu dilakukan dalam melakukan perbaikan.

a. Proses Pemotongan Menggunakan *Roughing* dan *Finishing*

Perbaikan pertama yang dilakukan adalah melakukan proses pemotongan menggunakan *roughing* dan *finishing*, seperti yang terlihat pada Gambar 6. Gambar 6 (a) dan (b) menunjukkan langkah perbaikan pertama, yang mengubah proses pemotongan dari yang semula langsung melalui tahap *finishing* menjadi melalui tahap *roughing* dan *finishing*. Dengan melakukan perbaikan ini, hasil proses *turning* halus dan tidak kasar.

b. Memodifikasi Program *Turning*

Perbaikan kedua yang dilakukan adalah memodifikasi program *turning* (Gambar 6). Gambar 6 (c) dan (d) menunjukkan penanggulangan kedua, dengan melakukan modifikasi program *turning* dari yang semula *tool* berhenti berputar sebelum naik (G00) diubah menjadi tetap berputar dan naik perlahan (G01) setelah selesai proses. Dengan melakukan perbaikan ini, hasil proses *turning* menjadi halus sempurna dan tidak bergaris.

c. Mengganti Diameter *Tool Rib* dengan Diameter yang Lebih Besar

Perbaikan ketiga yang dilakukan adalah mengganti diameter *tool rib* dengan diameter yang lebih besar, yang disajikan pada Gambar 6. Gambar 6 (e) dan (f) menunjukkan perbaikan ketiga, dengan mengganti diameter *tool endmill* yang semula berdiameter 10 mm menjadi berdiameter 12 mm. Dengan melakukan perbaikan ini, hasil proses *rib* menjadi halus.

d. Mengubah *Jig Support* dengan *Semi Cavity*

Perbaikan terakhir yang dilakukan adalah mengubah *jig support* dengan *semi cavity*, yang dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar 6 (g) dan (h) menunjukkan perbaikan terakhir, dengan mengubah *jig support* menjadi *semi cavity*. Dengan melakukan perbaikan ini, hasil proses *rib* halus dan tidak bergelombang.

Perbaikan 1

Sebelum Perbaikan



(a)

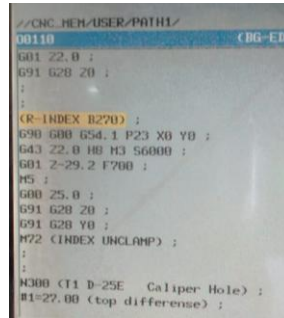
Sesudah Perbaikan



(b)

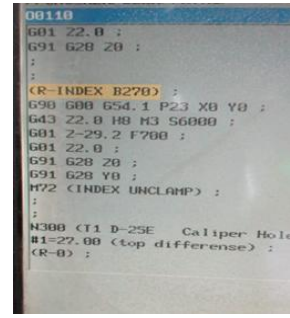
Perbaikan 2

Sebelum Perbaikan



(c)

Sesudah Perbaikan



(d)

Perbaikan 3

Sebelum Perbaikan



(e)

Sesudah Perbaikan



(f)

Perbaikan 4

Sebelum Perbaikan



(g)

Sesudah Perbaikan



(h)

Gambar 6. Perbedaan kondisi sebelum dan sesudah perbaikan: (a) Proses pemotongan langsung dilakukan *finishing*; (b) Proses pemotongan menggunakan *roughing* dan *finishing*; (c) Alat berhenti berputar dan kemudian naik; (d) Alat masih berputar dan kemudian naik secara lambat; (e) Tool pemotong *rib* berdiameter 10 mm; (f) Tool pemotong *rib* berdiameter 12 mm; (g) *Jig support*; (h) *Semi cavity*

3.1.7 Evaluasi Hasil dan Proses

Langkah selanjutnya adalah evaluasi hasil dan proses sebelum serta setelah dilakukan perbaikan berdasarkan hasil rencana perbaikan. Tabel 7 menyajikan data pemantauan sebelum dan setelah dilakukan perbaikan.

Tabel 7. Data Cacat Permukaan di Area Pemessinan *Outer Tube* Model 2DP Sebelum Perbaikan Periode Januari hingga Maret 2024

Model	Januari (Buah)	Februari (Buah)	Maret (Buah)	Rata-rata (Buah)
2DP	5.893	4.946	3.743	4.861
Total Produksi	135.532	118.319	116.557	123.469
% Cacat	4,35%	4,18%	3,21%	3,91%

Tabel 7 menunjukkan bahwa cacat permukaan model 2DP di area pemessinan *outer tube* sebanyak 4.861 pcs atau sebesar 3,91% sebelum dilakukan perbaikan. Setelah dilakukan perbaikan, terdapat perubahan jumlah cacat yang dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Data Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP Sesudah Perbaikan Periode April hingga Mei 2024

Model	April (Buah)	Mei (Buah)	Rata-rata (Buah)
2DP	1.452	1.577	1.515
Total Produksi	99.828	129.572	114.700
% Cacat	1,45%	1,22%	1,32 %

Berdasarkan Tabel 8, dapat diketahui bahwa setelah dilakukan perbaikan, cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP mengalami penurunan dari 3,91% menjadi 1,32%. Gambar 7 menyajikan grafik perbandingan tingkat cacat permukaan model 2DP sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Tingkat Cacat Permukaan *Outer Tube* Model 2DP Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Berdasarkan Gambar 7, dapat diketahui bahwa cacat permukaan model 2DP mengalami penurunan dari 3,91% menjadi 1,32% (sekitar 66%) melampaui target awal sebesar 1,36%. Hasil ini menunjukkan, perbaikan yang dilakukan berhasil dan sesuai dengan target. Perbaikan ini memberikan keuntungan tambahan dengan mengurangi biaya pengerjaan ulang produk. Tabel 9 merupakan hasil keuntungan perbaikan cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP.

Tabel 9. Hasil Keuntungan Perbaikan Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP

Cacat	Jumlah Cacat (Buah)	%	Biaya Repair per Buah (Rp)	Biaya Total Kerugian (Rp)	Penghematan Biaya per Bulan (Rp)	Penghematan Biaya per Tahun (Rp)
Sebelum Perbaikan	4.861	3,91%	15.000	72.915.000		
Sesudah Perbaikan	1.515	1,32%	15.000	22.725.000	50.190.000	602.280.000

Berdasarkan Tabel 9 dapat diketahui bahwa cacat permukaan model 2DP sebelum dilakukan perbaikan, perusahaan mengalami kerugian Rp. 72.915.000 per bulan untuk melakukan proses *repair* pada produk yang cacat. Hasil setelah dilakukan perbaikan, perusahaan mengalami penurunan kerugian menjadi Rp. 22.725.000 per bulan. Penurunan kerugian ini berdampak pada penghematan biaya pengeluaran mencapai Rp. 50.190.000 per bulan atau Rp. 602.280.000 per tahun. Tabel 10 menyajikan total harga perbaikan untuk mengurangi masalah cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP yaitu sebesar Rp. 1.500.000.

Tabel 10. Biaya Perbaikan Cacat Permukaan di Area Pemesinan Outer Tube Model 2DP

No	Alokasi Biaya Perbaikan	Biaya Per Item (Rp)
1	Modifikasi <i>roughing</i> dan <i>finishing</i>	200.000
2	Modifikasi program <i>turning</i>	0
3	Mengganti diameter <i>tool rib</i>	300.000
4	<i>Semi Cavity</i>	1.000.000
Total Biaya Perbaikan		1.500.000

Hasil perhitungan *Net Quality Income* (NQI) setelah melakukan perbaikan cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP ditunjukkan pada Tabel 11. Perusahaan dapat menghemat biaya pengeluaran untuk *repair* produk *outer tube* model 2DP di area pemesinan *outer tube* sebesar Rp. 600.780.000.

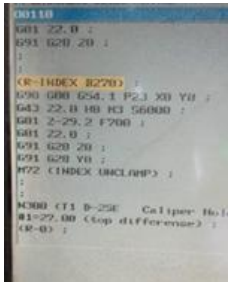
Tabel 11. *Net Quality Income* Perbaikan Cacat Permukaan di Area Pemesinan Outer Tube Model 2DP

<i>Net Quality Income</i> (NQI)	
Keuntungan Perbaikan Per Tahun (Rp)	602.280.000
Harga Perbaikan (Rp)	1.500.000
<i>Net Quality Income</i> (NQI) Per Tahun (Keuntungan Perbaikan Per Tahun – Harga Perbaikan)	600.780.000

3.1.8 Standarisasi Proses

Setelah dilakukan perbaikan di area pemesinan *outer tube* model 2DP pada mesin CNC Robodrill, Langkah selanjutnya adalah standarisasi proses. Tabel 12 menunjukkan aspek standarisasi yang harus dilakukan untuk menjaga konsistensi jumlah cacat permukaan model 2DP. Penerapan seluruh aspek standarisasi ini terbukti efektif dalam mengurangi masalah cacat permukaan pada *outer tube* model 2DP.

Tabel 12. Standarisasi Proses

Standarisasi		
No	Deskripsi	Ilustrasi
		12
1	Proses Turning dengan <i>Roughing</i> dan <i>Finishing</i>	 
2	Program baru untuk proses <i>Outside Turning</i>	
		34
3	Tool untuk proses <i>machining rib</i> menggunakan drill berdiameter 12 mm	 
4	<i>Jig semi cavity</i> untuk proses <i>machining rib</i>	

3.2. Pembahasan

3.2.1 Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Tabel 13 memperlihatkan perbandingan kondisi sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP yang menunjukkan bahwa perbaikan yang telah dilakukan berjalan sesuai dengan yang diharapkan.

Tabel 13. Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah Perbaikan Cacat Permukaan di Area Pemesinan *Outer Tube* Model 2DP

No	Sebelum Perbaikan	Setelah Perbaikan
1	Cacat permukaan di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, tinggi (3,91%)	Cacat permukaan di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP (1,32%) mengalami penurunan mencapai 1,32% (sekitar 66%)
2	Hasil dari proses <i>turning</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, kasar	Hasil dari proses <i>turning</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, tidak kasar
3	Hasil dari proses <i>turning</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, bergaris	Hasil dari proses <i>turning</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, tidak bergaris
4	Hasil dari proses <i>rib</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, kasar	Hasil dari proses <i>rib</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, tidak kasar
5	Hasil dari proses <i>rib</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, bergelombang	Hasil dari proses <i>rib</i> di area pemesinan <i>outer tube</i> model 2DP, tidak bergelombang

6	Tidak memiliki standar untuk mengurangi jumlah cacat di area pemesinan <i>outer tube</i>	Memiliki standar untuk mengurangi jumlah cacat permukaan di area pemesinan <i>outer tube</i>
7	Biaya pengeluaran perusahaan untuk pengerjaan ulang produk cacat tinggi	Biaya pengeluaran perusahaan untuk pengerjaan ulang produk cacat berkurang

3.2.2 Perbandingan Hasil Studi dan Penguatan Literatur

Penerapan metode siklus PDCA menggunakan 8 langkah TPS dalam studi ini menghasilkan penurunan tingkat cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP dari 3,91% menjadi 1,32% (sekitar 66%) melebihi target KPI perusahaan sebesar 1,36%. Capaian ini relevan dengan temuan Miguel-Angel et al., [58], yang melaporkan penurunan tingkat skrap dari 2,92% menjadi 0,7% (sekitar 76%) di industri sub-rakitan motor listrik. Meskipun capaian persentase dalam studi tersebut lebih besar, tetapi konteks penghematan biaya dalam dalam studi ini mencapai Rp. 600.780.000 per tahun dengan investasi perbaikan yang lebih kecil, namun menunjukkan efisiensi yang tinggi dalam konteks ekonomi. Hasil serupa ditemukan dalam studi Jaguasiak-Kocik [40] yang berhasil menurunkan cacat lebih dari 60% pada produksi bingkai foto di industri pengolahan plastik.

Sementara itu, studi Antunes dan Eduardo [51] di industri makanan melaporkan pengurangan kerugian hingga 86,75%, Meskipun nilai persentasenya lebih tinggi, penghematan biaya sebesar Rp. 600.780.000 per tahun dalam penelitian ini tetap memberikan dampak ekonomi yang signifikan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkuat efektivitas metode PDCA dalam menurunkan cacat dan biaya, tetapi juga memperluas validitasnya ke sektor otomotif Indonesia, yang sebelumnya minim representasi dalam literatur ilmiah. Temuan ini sekaligus menjadi koreksi terhadap studi-studi terdahulu yang belum sepenuhnya menekankan integrasi alat bantu secara sistematis. Penggunaan alat seperti Pareto dan *Ishikawa* terbukti krusial dalam mengidentifikasi akar penyebab dan menentukan prioritas perbaikan, sebagaimana ditekankan oleh Vi Nguyen et al., [55].

Secara teoritis, penelitian ini memperkuat kerangka *lean manufacturing* dan *continuous improvement*, menunjukkan bahwa siklus PDCA efektif tidak hanya dalam konsep, tetapi juga dalam praktik dengan biaya rendah. Secara praktis, studi ini dapat menjadi acuan bagi industri kecil dan menengah untuk menerapkan strategi perbaikan berbiaya minimal namun berdampak maksimal.

4. Kesimpulan

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa penerapan siklus PDCA dengan menggunakan metode 8 langkah TPS mempermudah identifikasi peluang perbaikan, pengembangan, dan implementasi dalam studi kasus lean manufacturing. Proses ini dapat disederhanakan lebih lanjut dengan dukungan alat bantu kualitas tambahan, seperti diagram pareto dan diagram *ishikawa*. Kombinasi metode dan alat tersebut terbukti efektif dalam meningkatkan daya saing perusahaan manufaktur di tingkat global, sebagaimana ditunjukkan dalam studi kasus ini.

Mengenai tujuan yang diusulkan dalam studi kasus ini, disimpulkan bahwa tujuan untuk mengurangi cacat permukaan model 2DP yang merupakan cacat dengan jumlah tertinggi di area pemesinan *outer tube*, berhasil dicapai sesuai dengan target KPI yang ditetapkan perusahaan yaitu 1,36%. Jumlah cacat permukaan model 2DP mengalami penurunan yang signifikan dari 3,91% menjadi 1,32%. Selain itu, terkait tujuan untuk mengurangi biaya pengerjaan ulang pada produk *outer tube* model 2DP di area pemesinan akibat cacat permukaan, disimpulkan bahwa tujuan ini juga berhasil tercapai. Perusahaan mampu menghemat pengeluaran biaya pengerjaan ulang akibat cacat permukaan di area pemesinan *outer tube* model 2DP sebesar Rp. 600.780.000 per tahun. Cacat permukaan ini disebabkan oleh faktor metode, yaitu hasil dari

proses *turning* kasar disebabkan oleh proses *turning* yang langsung dilakukan *finishing*, hasil dari proses *turning* bergaris disebabkan oleh material tergores alat saat berada di *home post*, hasil dari *rib* kasar disebabkan akibat alat bergetar saat memproses area *rib*, dan hasil dari proses *rib* bergelombang disebabkan oleh posisi material bergeser seiring berjalannya proses. Solusi yang diterapkan untuk mengatasi masalah tersebut berupa, proses *turning* menggunakan *roughing* dan *finishing* agar hasil *turning* tidak kasar, memodifikasi program *turning* setelah selesai proses agar hasil *turning* tidak bergaris, mengganti diameter *tool rib* dengan diameter yang lebih besar agar hasil *rib* tidak kasar, dan mengganti *jig support* dengan tipe *semi cavity* agar hasil *rib* tidak bergelombang.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan penurunan cacat permukaan dan efisiensi biaya yang signifikan, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Penelitian ini hanya diterapkan pada satu model produk dan satu area proses pemesinan, sehingga generalisasi hasil ke area atau model lain masih memerlukan validasi lebih lanjut. Selain itu, durasi evaluasi pasca-perbaikan relatif singkat, sehingga dampak jangka panjang terhadap kestabilan kualitas belum dapat dipastikan secara menyeluruh. Disarankan agar metode 8 Langkah TPS ini diterapkan pada berbagai model produk dan lini proses lain, serta dilakukan pengamatan jangka panjang terhadap stabilitas perbaikan. Integrasi pendekatan ini dapat dilakukan dengan teknologi industri 4.0, seperti sistem pemantauan berbasis sensor atau kecerdasan buatan yang dapat menjadi langkah strategis untuk meningkatkan akurasi dalam mendiagnosis akar permasalahan dan ketepatan respons perbaikan.

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan teori *lean manufacturing* dan perbaikan berkelanjutan dalam konteks industri manufaktur, khususnya otomotif. Implementasi siklus PDCA berbasis pendekatan 8 langkah TPS memperkuat bukti empiris bahwa pendekatan sistematis berbasis data dan analisis akar penyebab mampu meningkatkan kualitas produk serta efisiensi biaya. Temuan ini juga memperkaya literatur mengenai penerapan metode *lean* dalam konteks produksi komponen otomotif di Indonesia.

Daftar Pustaka

- [1] Realyvasquez-Vargas, A., Arredondo-Soto, K.C., Carrillo-Gutierrez, T., Ravelo, G. Applying the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle to reduce the defects in the manufacturing industry: a case study. *Applied Science*. 2018;8(11):2181.
- [2] Gil-Vilda, F., Yagüe-Fabra, J.A., Sunyer, A. From lean production to lean 4.0: a systematic literature review with a historical perspective. *Appl Sci*. 2021;11(21):10131.
- [3] García-Alcaraz, J.L., Sánchez Ramírez, C. Special issue on applied engineering to lean manufacturing production systems. *Appl Sci*. 2022;12(17):1–2.
- [4] Simonsen, E.M., Herrera, R.F., Atencio, E. Benefits and difficulties of the implementation of lean construction in the public sector: a systematic review. *Sustain*. 2023;15(7):5852.
- [5] Tasdemir, C., Gazo, R. A systematic literature review for better understanding of lean driven sustainability. *Sustain*. 2018;10(7):2564.
- [6] Alefari, M., Almani, M., Salonitis, K. Lean manufacturing, leadership and employees: the case of UAE SME manufacturing companies. *Prod Manuf Res* [Internet]. 2020;8(1):222–243.
- [7] Henao, R., Sarache, W., Gómez, I. Lean manufacturing and sustainable performance: trends and future challenges. *J Clean Prod*. 2019;208:99–116.

- [8] Abu, F., Gholami, H., Mat Saman, M.Z., Zakuan, N., Streimikiene, D. The implementation of lean manufacturing in the furniture industry: a review and analysis on the motives, barriers, challenges, and the applications. *J Clean Prod.* 2019;234(October):660–680.
- [9] Botti, L., Mora, C., Regattieri, A. Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly system: a case study. *Comput Ind Eng.* 2017;111:481-495.
- [10] Gebeyehu, S.G., Abebe, M., Gochel, A. Production lead time improvement through lean manufacturing. *Cogent Eng.* 2022;9(1):2034255.
- [11] Buer, S.V., Semini, M., Strandhagen J.O., Sgarbossa, F., Semini M., et al. The complementary effect of lean manufacturing and digitalisation on operational performance. 2021;59(6):1800-1818.
- [12] Alefari, M., Almane, M., Salonitis, K. Lean manufacturing, leadership and employees: the case of UAE SME manufacturing companies. *Prod Manuf Res [Internet]*. 2020;8(1):222–243.
- [13] Rojas, T., Mula, J., Sanchis R. Quantitative modelling approaches for lean manufacturing under uncertainty. *Int J Prod Res.* 2024;62(16):5989–6015.
- [14] Maware, C., Parsley D.M. The Challenges of lean transformation and implementation in the manufacturing sector. *Sustain.* 2022;14(10):1–24.
- [15] Suhardi, B., Anisa, N., Laksono, P.W. Minimizing waste using lean manufacturing and ECRS principle in Indonesian furniture industry. *Cogent Eng.* 2019;6(1):1–13.
- [16] Rossi, A.H.G., Marcondes, G.B., Pontes, J., Leitão, P., Treinta F.T., et al. Lean tools in the context of industry 4.0: literature review, implementation and trends. *Sustain.* 2022;14(19):1-32.
- [17] Vanichchinchai, A. The effect of lean manufacturing on a supply chain relationship and performance. *Sustainability.* 2019;11:1-15.
- [18] Saad Bajou, M., Chafi, A. Lean construction implementation in the moroccan construction industry: awareness, benefit and barriers. *Journal of Engineering, Design and Technology.* 2018;16(4):533-556.
- [19] Maware, C., Adetunji, O. Lean manufacturing implementation in Zimbabwean industries : Impact on operational performance. 2019;11:1–12.
- [20] Psarommatis, F., Prouvost, S., May, G., Kiritsis, D. Product quality improvement policies in Industry 4.0: characteristics, enabling factors, barriers, and evolution toward zero defect manufacturing. *Front Comput Sci.* 2020;2(August):1–15.
- [21] Roshan, R., Guru, D., Paulssen, M. Customers’ experienced product quality : scale development and validation. *European Journal Marketing.* 2020;54(4):645–670.
- [22] Olalere, I.O., Ramdass, K. Assessing the impact of quality improvement on production defectiveness: a case study on an automotive manufacturing industry. *Cogent Eng.* 2024;11(1):1-18.
- [23] Iherobiem, A.C., Sanusi, A.O. Process innovation as a strategic tool in enhancing the performance of organizations: A study of manufacturing firms in Nigeria. *Emerging Markets Journal.* 2023;13(1):39-44.
- [24] Zerbst, U., Madia, M., Klinger, C., Bettge, D., Murakami, Y. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. I: Basic aspects. *Eng Fail Anal.* 2019;97(March):777–792.
- [25] Zerbst, U., Madia, M., Klinger, C., Bettge, D., Murakami, Y. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. II: Non-metallic inclusions. *Eng Fail Anal.* 2019;98(April):228–239.
- [26] Zerbst U, Madia M, Klinger C, Bettge D, Murakami Y. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. III: Cavities, dents, corrosion pits, scratches. *Eng Fail Anal.* 2019;97(January):759–776.

- [27] Zerbst, U., Klinger, C. Material defects as cause for the fatigue failure of metallic components. *Int J Fatigue*. 2019;127(June):312–323.
- [28] Ferro, P., Fabrizi, A., Berto, F., Savio, G., Meneghello, R., et al. Defects as a root cause of fatigue weakening of additively manufactured AlSi10Mg components. *Theor Appl Fract Mech*. 2020;108(March):102611.
- [29] Vial, T., Dhouib, F., Roger, L., Blangero, A., Duvivier, F., et al. Dimensionality reduction to improve search time and memory footprint in content-retrieval tasks: Application to semiconductor inspection images. *Adv. Ind. Manuf. Eng*. 2022;5:100097.
- [30] Goyal, A., Agrawal, R., Saha, C.R. Quality management for sustainable manufacturing: Moving from number to impact of defects. *J. Clean. Prod*. 2019;241:118348.
- [31] Psarommatis, F., Sousa, J., Mendonça, J.P., Kiritsis, D. Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0 : a position paper. 2022;60(1)-73-91.
- [32] Sreedharan, V.R.; Rajasekar, S.; Kannan Santhosh, S.; Arunprasad, P.; Trehan, R. Defect reduction in an electrical parts manufacturer: a case study. *TQM J*. 2018;30:650–678.
- [33] Dadashnejad, A.A., Valmohammadi, C. Investigating the effect of value stream mapping on operational losses: a case study. *J. Eng. Des. Technol*. 2018;16:478–500.
- [34] Kohlmann, P., Sahling, F. A Flexible planning approach for integrated lot sizing and rework planning with random proportion of defective products. *Int. J. Prod. Res*. 2024;62(19):6961-6978.
- [35] Psarommatis, F., May, G., Azamfirei, V. Zero defect manufacturing in 2024: a holistic literature review for bridging the gaps and forward outlook. *Int. J. Prod. Res*. 2024;1-37.
- [36] Du, Y., Mukherjee, T., DebRoy, T. Physics-informed machine learning and mechanistic modeling of additive manufacturing to reduce defects. *Appl. Mater. Today*. 2021;24.
- [37] Maware, C., Parsley, D.M. The effectiveness of teaching systematic problem-solving based on the revised bloom’s taxonomy in lean manufacturing training. 2024;289–304.
- [38] Kholil, M., Hanum, B., Hendri, Almahdy, I. Finishing line evaluation of bracket product FWD RR spring BT 1702 by applying 8 Steps 7 tools method toyota production (Case study: PT BA). *J. Phys. Conf. Ser*. 2020;1529.
- [39] Dudin, M.N., Smirnova, O.O., Vysotskaya, V., Frolova, E.E., Vilкова, N.G. The deming cycle (PDCA) concept as a tool for the transition to the innovative path of the continuous quality improvement in production processes of the agro-industrial sector. *European Research Study Journal*. 2017;XX(2B), 283–293.
- [40] Jagusiak-kocik, M. PDCA cycle as a part of continuous improvement in the production company - a case study. *Pord. Eng. Arch*. 2017;14(14):19–22.
- [41] Peças, P., Gamb, M., Sampayo, M., Jorge, D. Applied sciences PDCA 4.0 : a new conceptual approach for continuous improvement in the Industry 4.0 Paradigm. *Applied Sciences*. 2021;11(6):1-29.
- [42] Kumar, R. Kaizen a tool for continuous quality improvement in Indian manufacturing organization. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2021;4(02):452-459.
- [43] Regent, T.M., Klunko, N.S., Egorova, L. V., Chernova, V. V., Meshkova, L., et al. Implementation of the continuous improvement cycle for business processes into the quality management system of pharmaceutical industry enterprises. *Kurdish Studies*. 2024;12(2):3917–3927.
- [44] Maruta, R. The creation and management of organizational knowledge. *Knowledge-Based Syst*. 2014;67:26–34.
- [45] Asif, M., De Vries, H.J., Ahmad, N. Knowledge creation through quality management. *Total Qual. Manag. Bus. Excell*. 2013;24:664–677.

- [46] Seo, Y., Lee, C., Moon, H. An organisational learning perspective of knowledge creation and the activities of the quality circle. *Total Qual. Manag. Bus. Excell.* 2016;27:432–446.
- [47] Purvis, B. Three pillars of sustainability : in search of conceptual origins. *Sustain. Sci.* 2019;14:681-695.
- [48] Markulík, Š., Šolc, M., Fil’o, M. Applied sciences implementation of quality tools in mechanical engineering piece production. *Applied Sciences.* 2024;14(2):1-19.
- [49] Lin, C.C., Chueh, J.W., Chen, H.M., Chiu, Y.H., Chu, D. Applying the toyota production system to decrease the time required to transport patients undergoing surgery from the general ward to the operating room and reviewing the essence of lean thinking. *Front. Med.* 2022;9:1–16.
- [50] Wicaksono, P.A., Rozaq, R. Applying kaizen in quality for reducing dent defect per unit. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020;722.
- [51] Junior, A.A., Broday, E.E. Adopting PDCA to loss reduction: a case study in a food industry in Southern Brazil. *International Journal for Quality Research.* 2013;13(2):335–348.
- [52] Silva, A.S., Medeiros, C.F., Vieira, R.K. Cleaner production and PDCA cycle: Practical application for reducing the cans loss index in a beverage company. *Journal of Cleaner Production.* 2017:1-43.
- [53] Kholif, A.M., Abou, D.S., Hassan, E., Khorshid, M.A., Elsherpieny, E.A., et al. Implementation of model for improvement (PDCA-Cycle) in dairy laboratories. *J. Food Saf.* 2018;e12451:1–6.
- [54] Huang, Y., Huang, Y., Yi, L., Pan, W., Chen, Y. A FOCUS-PDCA quality improvement model for reducing the distribution defect rate of sterile packages. *Sci. Rep.* 2023;13(1):1–10.
- [55] Nguyen, V., Nguyen, N., Schumacher, B. Practical application of Plan–Do–Check–Act cycle for quality improvement of sustainable packaging. *Applied Sciences.* 2020;10(6332):1-15.
- [56] Arredondo-Soto, K.C., Blanco-Fernandez, J., Miranda-Ackerman, M.A., Solis-Quinteros, M.M., Realyvasquez-Vargas, A., et al. A Plan-Do-Check-Act based process improvement intervention for quality Improvement. *IEEE Access.* 2021;9:132779–132790.
- [57] Amaral, V.P., Ferreira, A.C., Ramos, B. Internal logistics process improvement using PDCA : a case study in the automotive sector. *Business System Research.* 2022;13(3):100–115.
- [58] Rangel-Sanchez, M.A., Urbona-Gonzalez, J.D.J., et al. Reduction of scrap in electric motor manufacturing for the automotive industry : a case study using PDCA approach. 2024.
- [59] Li, C., Li, X., Wu, Y., Zhang, F., Huang, H. Deformation mechanism and force modelling of the grinding of YAG single crystals. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2019;143(August):23–37.
- [60] Gavalda Diaz, O., Garcia Luna, G., Liao, Z., Axinte, D. The new challenges of machining ceramic matrix composites (CMCs): review of surface integrity. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2019;139:24–36.
- [61] Liao, Z., Abdelhafeez, A., Li, H., Yang, Y., Diaz, O.G., et al. State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2019;143(August):63–91.
- [62] Zhan, S., Zhao, Y. Plasma-assisted electrochemical machining of microtools and microstructures. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2020;156:103596.
- [63] Han, W., Fang, F. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2019;139:1–23.
- [64] Liu, Y.Z. Coaxial waterjet-assisted laser drilling of film cooling holes in turbine blades. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2020;150:103510.

- [65] Marksberry, P., Badurdeen, F., Gregory, B., Kreaflle, K. Management directed kaizen: Toyota's jishuken process for management development. *J. Manuf. Technol. Manag.* 2010;21:670–686.
- [66] Marksberry, P., Bustle, J., Clevinger, J. Problem solving for managers: a mathematical investigation of toyota's 8-step process. *J. Manuf. Technol. Manag.* 2011;22:837–852.
- [67] Fensel, D., Motta, E. Of Problem Solving Methods. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.* 2001;13(6):913–932.
- [68] Tinning, R. Teacher education pedagogy: dominant discourses and the process of problem setting. *J. Teach. Phys. Educ.* 2016;11:1–20.
- [69] Yihua, M., Tuo, X. Research of 4M1E's effect on engineering quality based on structural equation model. *Syst. Eng. Procedia.* 2011;1:213–220.
- [70] Zhao, F., Wu, J., Zhao, Y., Ji, X., Zhou, L., et al. A machine learning methodology for reliability evaluation of complex chemical production systems. *RSC Adv.* 2020;10:20374–20384.
- [71] Kaganski, S., Majak, J., Karjust, K. Fuzzy AHP as a tool for prioritization of key performance indicators. *Procedia CIRP.* 2018;72:1227–1232.
- [72] Gözaçan, N., Lafci, Ç. Evaluation of key performance indicators of logistics firms. *Logist. Sustain. Transp.* 2020;11:24–32.
- [73] Shahin, A., Mahbod, M.A. Prioritization of key performance indicators: an Integration of analytical hierarchy process and goal setting. *Int. J. Product. Perform. Manag.* 2007;56:226–240.
- [74] Mahto, D., Kumar, A. Application of root cause analysis in improvement of product quality and productivity. *J. Ind. Eng. Manag.* 2008;1:16–53.
- [75] Sawargaonkar, G.L., Davala, M.S., Rakesh, S., Kamdi, P.J., et al. Envirotyping helps in better understanding the root cause of success and limitations of rainfed production systems. *Front. Environ. Sci.* 2024; 12.
- [76] Papageorgiou, K., Theodosiou, T., Rapti, A., Papageorgiou, E.I., et al. A systematic review on machine learning methods for root cause analysis towards zero-defect manufacturing. *Front. Manuf. Technol.* 2022;2:1–16.
- [77] Vo, B., Kongar, E., Suarez-Barraza, M. Root-cause problem solving in an industry 4.0 context. *IEEE Engineering Management Review.* 2020;48(1):48–56.
- [78] Shah, R., Ward, P.T. Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management.* 2007;25(4):785–805.
- [79] Allio, M.K. A short, practical guide to implementing strategy. *Journal of Business Strategy.* 2005;26(4):12–21.
- [80] Perrini, F., Tencati, A. Sustainability and stakeholder management: the need for new corporate performance evaluation and reporting systems. *Bus. Strateg. Environ.* 2006;15:296–308.
- [81] Wheeler, D., Sillanpää, M. Including the stakeholders: the business case. *Long Range Plann.* 1998;31:201–210.
- [82] Mor, R.S., Bhardwaj, A., Singh, S., Sachdeva, A. Productivity gains through standardization-of-work in a manufacturing company. *J. Manuf. Technol. Manag.* 2019;30:899–919.
- [83] Nissinboim, N., Naveh, E. Process standardization and error reduction: a revisit from a choice approach. *Saf. Sci.* 2018;103:43–50.
- [84] Realyvasquez-Vargas, A., Arredondo-Soto, K.C., Garcia-Alcaraz, J.L., Macias, E.J. Improving a manufacturing process using the 8Ds method. A case study in manufacturing company. *Applied Sciences.* 2020;10(2433):1–26.
- [85] Velasquez Villagran, N., Estevez, E., Pesado, P., De Juanes Marquez, J. Standardization: a key factor of industry 4.0. 6th Int. Conf. eDemocracy eGovernment, ICEDEG. 2019:350–354.

- [86] Zargari, A., Cantrell, P.A., Grise, W., et al. Application of statistical process control (SPC) software in total quality improvement (TQI). Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference. 2002:829–834.
- [87] Shari, H.A., Khalid, N., Ashaari, N.S., Judi, H.M. Statistical process control in plastic packaging manufacturing : a case study. Proceeding of International Conference on Electrical Engineering and Informatics. 2009:199–203.
- [88] Syazwan Ab Talib, M., Abdul Hamid, A.B., Chin, T.A. Critical success factors of supply chain management : a literature survey and pareto analysis. EuroMed Journal of Business. 2015;10(2):234-263.
- [89] Talib, F., Rahman, Z., Qureshi, M.N. Pareto analysis of total quality management factors critical to success for service industries. International Journal for Quality Research. 2010;4(2):155-168.
- [90] Coccia, M. The fishbone diagram to identify, systematize and analyze the sources of general purpose technologies. Journal of Social and Administrative Sciences. 2018;4(4):291-303.
- [91] Shinde, D.D., Ahirrao, S., Prasad, R. Fishbone diagram : application to identify the root causes of student – staff problems in technical. Wirel. Pers. Commun. 2018;100:653–664.
- [92] Suárez-barraza, M.F., Rodríguez-gonzález, F.G., Suárez-barraza, M.F. Cornerstone root causes through the analysis of the Ishikawa diagram, is it possible to find them? a first research approach. International Journal of Quality and Service Sciences. 2018;11(2):302-316.