

EFISIENSI PENGGUNAAN CAT DAN THINNER PADA LINI PAINTING ALUMINIUM MELALUI PENDEKATAN QUALITY CONTROL CIRCLE: STUDI KASUS DI INDUSTRI KOMPONEN OTOMOTIF

Agustinus Dwi Susanto¹

Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa

Jl. Kalibaru Timur Kel. Kalibaru Medan Satria Kota Bekasi

Email : Agustinus.Id@gmail.com

Abstrak—Biaya indirect material cat dan thinner pada lini Painting Aluminium (Painting AL) mencapai Rp503,5 juta per bulan, menyumbang 74% dari total Auxiliary Material. Penelitian ini menggunakan pendekatan Quality Control Circle (QCC) dengan siklus Plan-Do-Check-Act (PDCA) untuk mengidentifikasi dan mengeliminasi akar penyebab inefisiensi konsumsi material secara sistematis. Analisis Pareto dan diagram Fishbone mengidentifikasi empat akar penyebab dominan dengan skor risiko kumulatif 93%: (1) ketidakmampuan spray gun elektrostatis menjangkau area lekukan komponen akibat Faraday cage effect; (2) sirkulasi udara cooling zone yang tidak optimal sehingga suhu part melebihi standar (45–50°C vs. target 36–42°C); (3) metode repair yang menyamakan perlakuan dengan part baru melalui full body painting; dan (4) kebiasaan overspray operator. Tiga intervensi diterapkan secara simultan: substitusi spray gun elektrostatis ke non-elektrostatis (nozzle 0,8 mm), optimasi termal cooling zone melalui modifikasi sekat dan ventilasi, serta perubahan metode repair menjadi spray area cacat + finishing RCP Bell. Hasil evaluasi tiga bulan pasca-implementasi menunjukkan penurunan biaya indirect material sebesar 4,2% (Rp503,5 juta → Rp482,3 juta/bulan), konsumsi cat turun 8% (7,87 → 7,40 ml/pcs), rejection rate turun dari 2,5% menjadi 1,0%, emisi CO₂ berkurang 7,5% (327 → 302,02 ton/tahun), dan limbah cat cair turun 11% (38,80 → 34,42 m³/tahun). Total penghematan mencapai Rp1,276 miliar per tahun dengan biaya investasi hanya Rp17,1 juta (ROI >7.400%). Penelitian ini menunjukkan bahwa kerangka QCC-PDCA multi-intervensi efektif sebagai model perbaikan berkelanjutan yang mengintegrasikan dimensi cost, quality, safety, dan environmental sustainability secara komprehensif.

Kata Kunci—Quality Control Circle; PDCA; Painting Aluminium; Indirect Material; Cost Reduction; Faraday Cage Effect; Sustainability

I. PENDAHULUAN

Industri manufaktur komponen otomotif menghadapi tekanan kompetitif yang semakin meningkat, khususnya dalam pengendalian biaya produksi dan pemenuhan regulasi lingkungan. Proses pengecatan (*painting*) merupakan salah satu tahapan produksi dengan konsumsi *indirect material* tertinggi, mencakup cat dan thinner sebagai *Auxiliary Material* (AM) [1]. Inefisiensi dalam proses *painting* tidak hanya berdampak pada peningkatan biaya operasional, tetapi juga menghasilkan emisi senyawa organik volatil (VOC) dan limbah cair cat yang berpotensi merusak lingkungan [2,3].

Pada perusahaan ini, mengoperasikan lini Painting Aluminium (Painting AL) untuk komponen *casting* aluminium berupa *Bottom Case*, *Axle Holder*, dan *Upper Bracket*. Data monitoring internal periode Januari–Desember 2023 menunjukkan bahwa konsumsi cat dan thinner mencapai rata-rata Rp503,5 juta per bulan, setara dengan 74% dari total biaya AM atau 65% dari total *indirect material* Painting AL (Rp776,9 juta/bulan). Angka ini secara konsisten melampaui target *Key Performance Indicator* (KPI) divisi, yaitu pengurangan 100 liter/bulan atau efisiensi 2%.

Permasalahan ini disebabkan oleh tiga kondisi utama yang berlangsung secara bersamaan: pertama, penggunaan *spray gun* elektrostatis pada proses *touch-up* manual yang tidak mampu menjangkau area lekukan (*concave area*) komponen akibat *Faraday cage effect*, sehingga operator menaikkan *flow rate* secara berlebihan; kedua, sirkulasi udara di ruang *cooling zone* yang tidak optimal menyebabkan suhu *part* mencapai 45–50°C (di atas target 36–42°C), yang

meningkatkan laju penguapan thinner; dan ketiga, metode proses *repair* yang menyamakan perlakuan dengan *part fresh* melalui *full body painting*, mengakibatkan konsumsi cat dan thinner untuk *part repair* menjadi dua kali lipat.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas efisiensi proses *painting* di sektor manufaktur. Poozesh et al. [4] menyimpulkan bahwa efisiensi transfer cat (*transfer efficiency*) di industri otomotif secara keseluruhan berkisar 50–60%, dengan *spray gun* elektrostatis menunjukkan keunggulan pada permukaan datar namun menghadapi kendala *Faraday cage effect* pada geometri kompleks. Srinivasan dan Ramesh [5] membuktikan bahwa suhu lingkungan *painting booth* berpengaruh signifikan terhadap *transfer efficiency*. Lebih lanjut, Sutrisno et al. [6] mengaplikasikan metode QCC-PDCA dalam penurunan *defect* pada proses *painting* dan berhasil menurunkan *rejection rate* sebesar 40%. Namun, belum ada studi yang secara komprehensif mengintegrasikan substitusi teknologi *spray gun*, optimasi termal *cooling zone*, dan perubahan metode *repair* dalam satu kerangka QCC-PDCA dengan analisis dampak simultan terhadap cost, quality, dan *environmental sustainability* pada lini *painting* komponen aluminium *casting*.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi dan memprioritaskan akar penyebab tingginya konsumsi cat dan thinner menggunakan *tools* QCC berbasis risiko; (2) merancang dan mengimplementasikan solusi perbaikan multi-intervensi yang mempertimbangkan efektivitas biaya; serta (3) mengukur dampak perbaikan secara komprehensif meliputi aspek *cost*, *quality*, *delivery*, *safety*, *morale*, dan *environment* (QCDSME). Kontribusi utama penelitian ini

adalah penyediaan kerangka integrasi multi-intervensi berbasis QCC yang dapat diadopsi oleh industri *painting* komponen logam sejenis.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Quality Control Circle dan Siklus PDCA

Quality Control Circle (QCC) adalah metode perbaikan berkelanjutan berbasis kelompok kecil pekerja yang secara sukarela mengidentifikasi, menganalisis, dan memecahkan permasalahan dalam lingkup kerjanya [7]. Dikombinasikan dengan siklus *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) yang dikembangkan Deming, QCC memberikan kerangka sistematis yang telah terbukti efektif di berbagai sektor manufaktur [8]. Kajian literatur terhadap implementasi QCC di berbagai industri Asia menunjukkan bahwa aktivitas QCC secara konsisten menghasilkan penurunan biaya operasional, peningkatan produktivitas, dan perbaikan kondisi kerja [9].

Dalam konteks industri otomotif Indonesia, implementasi QCC semakin ditekankan melalui forum nasional. Namun, dokumentasi akademik dari implementasi QCC di sektor komponen otomotif Indonesia, khususnya pada proses *painting* aluminium, masih sangat terbatas dalam literatur jurnal terindeks [10].

2.2 Proses Painting dan Faktor Inefisiensi

Proses *painting* pada komponen *casting* aluminium melibatkan beberapa tahapan: *pre-treatment*, pengeringan oven, pendinginan (*cooling zone*), pengecatan otomatis (*spray auto* dengan *RCP Bell*), dan pengecatan manual (*touch-up*). Efisiensi transfer coating (*transfer efficiency*) merupakan parameter kunci yang mengukur rasio cat yang menempel pada permukaan produk terhadap total cat yang disemprotkan. Poozesh et al. [4] melaporkan bahwa efisiensi ini di industri otomotif berkisar 50–60% bergantung pada jenis aplikator yang digunakan.

Spray gun elektrostatik bekerja dengan prinsip muatan listrik negatif pada partikel cat yang tertarik ke permukaan benda kerja yang digrounding. Meskipun efektif untuk permukaan datar, fenomena *Faraday cage effect* menyebabkan garis-garis medan listrik tidak mampu menembus area lekukan atau cekungan dalam, sehingga partikel cat tidak terdeposisi secara merata pada area tersebut [11]. Kondisi ini memaksa operator meningkatkan volume semprot, yang justru kontraproduktif terhadap efisiensi material.

Suhu permukaan *part* memiliki korelasi langsung dengan laju penguapan thinner. Jiang et al. [12] menunjukkan bahwa kenaikan suhu *part* sebesar 10°C meningkatkan laju penguapan thinner sebesar 35–50%, yang berdampak pada peningkatan viskositas cat dan kebutuhan penyesuaian *flow rate*. Kondisi ini menciptakan siklus inefisiensi yang sulit dikendalikan tanpa intervensi sistemik pada sistem pendinginan.

2.3 Pendekatan Multi-Kriteria dalam Improvement

Pengambilan keputusan solusi perbaikan dalam QCC umumnya menggunakan analisis *cost-benefit* sederhana. Beberapa penelitian terkini mengusulkan pendekatan yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan aspek risiko

implementasi dan dampak jangka panjang [13]. Matriks probabilitas-dampak (*risk matrix*) yang mengkuantifikasi setiap akar penyebab berdasarkan frekuensi kejadian dan besaran dampak terhadap biaya memberikan dasar yang lebih objektif dalam penentuan prioritas intervensi [14].

Dimensi *sustainability* dalam penilaian kinerja *improvement* semakin mendapat perhatian seiring dengan komitmen industri otomotif global terhadap *carbon neutrality*. ISO 14001:2015 mengharuskan organisasi untuk mengidentifikasi dan mengelola dampak lingkungan dari proses produksi, termasuk emisi VOC dan limbah cat cair [15]. Integrasi analisis dampak lingkungan dalam kerangka QCC-PDCA merupakan pendekatan yang masih jarang terdokumentasi dalam literatur nasional.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus *mixed method* (kualitatif-kuantitatif) dengan pendekatan *action research* melalui implementasi siklus PDCA selama 10 bulan (Januari–Oktober 2024) di Painting AL Section. Unit analisis adalah lini produksi Painting AL dengan rata-rata produksi 775.210 pcs/bulan.

3.2 Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui tiga metode: (1) observasi langsung (*genba*) untuk verifikasi kondisi aktual proses; (2) pengukuran terstruktur menggunakan termometer inframerah, *flow meter* cat, dan timbangan digital; dan (3) kajian dokumen internal meliputi data KPI bulanan, laporan konsumsi material, laporan *reject*, dan rekam hasil uji performa *coating*. Data *baseline* menggunakan periode Januari–Desember 2023 (12 bulan), sedangkan data hasil perbaikan menggunakan periode Juli–September 2024 (3 bulan pasca-implementasi penuh).

3.3 Kerangka Analisis QCC-PDCA

Tahap PLAN meliputi: (a) stratifikasi masalah menggunakan diagram Pareto; (b) analisis akar penyebab menggunakan diagram Fishbone (Ishikawa) dengan pendekatan 6M (*Man, Machine, Method, Material, Measurement, Environment*); (c) kuantifikasi risiko menggunakan matriks 5×5 (probabilitas × dampak, skala 1–5); dan (d) seleksi solusi berbasis analisis *cost-benefit* (prioritas: *Low Cost – High Benefit*).

Tahap DO meliputi implementasi tiga intervensi secara paralel pada Juni 2024. **Tahap CHECK** mencakup validasi multi-aspek (QCDSME) dan verifikasi keuangan oleh Departemen Accounting. **Tahap ACTION** mencakup standarisasi hasil perbaikan melalui pembaruan dokumen FMEA, DPFP, MPSS, PIS, QCFOP, dan SOP.

3.4 Pengukuran Hasil

Efektivitas perbaikan diukur menggunakan enam indikator QCDSME: (1) biaya *indirect material* cat dan thinner (Rp/bulan); (2) indeks konsumsi material (ml/pcs); (3) *rejection rate* (tipis/meler, %); (4) frekuensi *mixing* cat (kali/hari); (5) beban *handling* operator *spray gun* (gram); dan (6) emisi CO₂ dan volume limbah cat cair (ton

CO₂/tahun; m³/tahun). Perhitungan emisi CO₂ dilakukan menggunakan metode stoikiometri berbasis komposisi kimia cat dan thinner (fraksi karbon tiap komponen, dikonversi ke CO₂ dengan faktor 44/12).

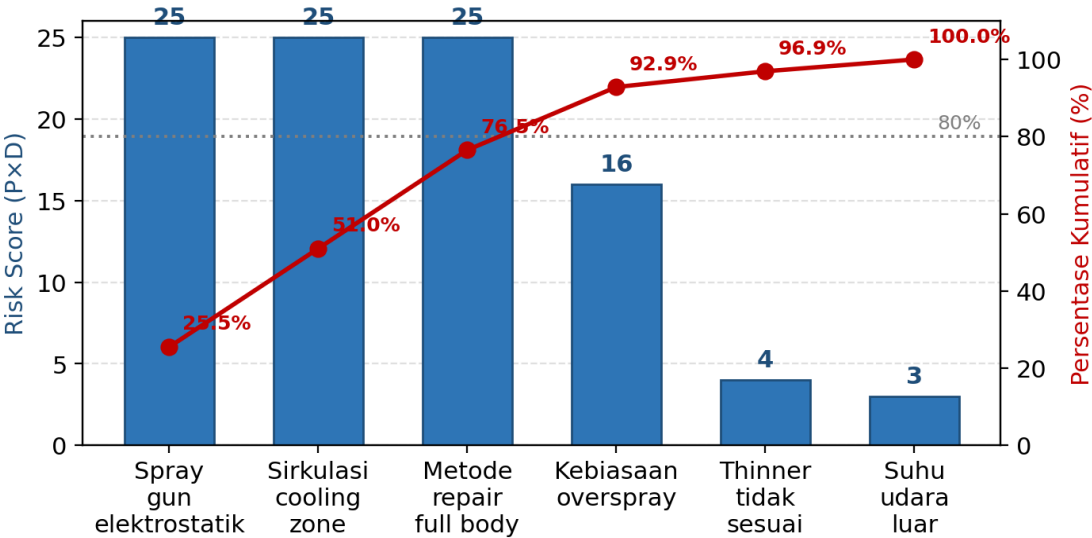
IV. HASIL PENELITIAN

4.1 Identifikasi dan Stratifikasi Masalah

Analisis data konsumsi *indirect material* periode Januari–Desember 2023 menunjukkan bahwa dari total Rp776,9 juta/bulan, komponen Auxiliary Material (AM) menyumbang 88% (Rp680,3 juta/bulan). Stratifikasi lebih lanjut mengidentifikasi cat dan thinner sebagai penyumbang

tertinggi dengan 74% (Rp503,5 juta/bulan) atau Rp649,51/pcs pada rata-rata produksi 775.210 pcs/bulan, menempatkannya sebagai prioritas *improvement* sesuai prinsip Pareto 80/20.

Dari sisi KPI, indeks IM Painting AL aktual pada periode Oktober–Desember 2024 (Rp777–894/pcs) secara konsisten melampaui nilai plan (Rp650–760/pcs). Proyeksi kapasitas produksi yang akan meningkat dari 2.385 *hanger/shift* (FY-24) menjadi 2.928 *hanger/shift* (FY-25) berdasarkan *forecast customer* turut memperburuk tekanan terhadap efisiensi biaya material, menegaskan urgensi intervensi sistemik.



Gambar 1. Diagram Pareto Prioritas Akar Penyebab Inefisiensi Konsumsi Cat dan Thinner (Risk Score Matrix, 2024)

4.2 Analisis Akar Penyebab

Brainstorming tim QCC mengidentifikasi enam kemungkinan akar penyebab dari perspektif 5M+1E.

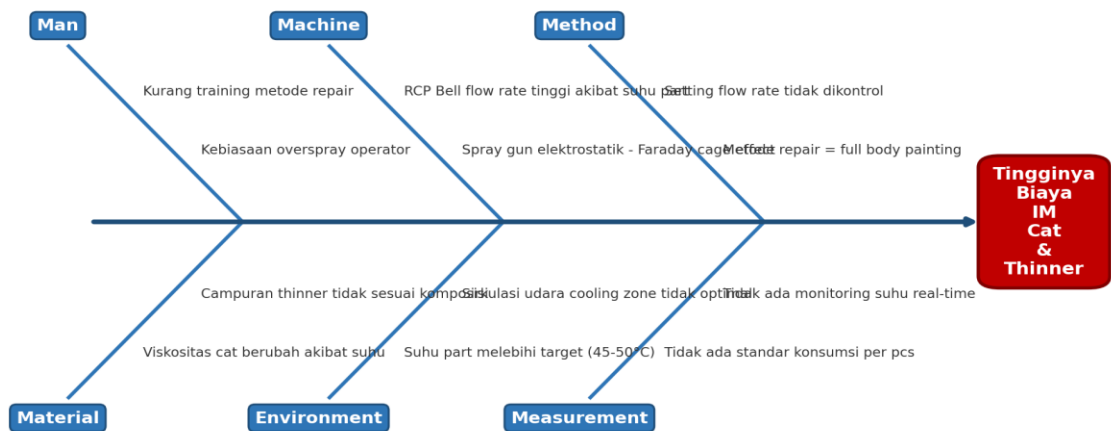
Kuantifikasi menggunakan matriks probabilitas-dampak 5×5 menghasilkan total risk score 98 poin. Tabel 1 menyajikan distribusi skor risiko seluruh akar penyebab yang teridentifikasi.

Tabel 1. Matriks Probabilitas dan Dampak Akar Penyebab (P=Probabilitas; D=Dampak; Skala 1–5)

Kode	Akar Penyebab	P	D	P×D	Kum. (%)	Status
A-1	Spray gun elektrostatik tidak menjangkau lekukan (Faraday cage effect)	5	5	25	26%	✓ Intervensi
A-2	Sirkulasi udara cooling zone tidak maksimal	5	5	25	51%	✓ Intervensi
A-3	Metode repair sama dengan part fresh (full body painting)	5	5	25	77%	✓ Intervensi
A-5	Kebiasaan overspray operator	4	4	16	93%	✓ Intervensi
A-6	Campuran thinner tidak sesuai komposisi	1	4	4	97%	– Dipantau
A-4	Pengaruh suhu udara luar (paint booth)	1	3	3	100%	– Dipantau

Empat akar penyebab dominan (A-1, A-2, A-3, A-5) berkontribusi 93% dari total *risk score* dan menjadi fokus intervensi. Verifikasi lapangan (*genba*) pada Maret–April 2024 mengkonfirmasi kondisi aktual: suhu *cooling zone* terukur 45–50°C (target 36–42°C), *flow rate spray auto*

tercatat 80 ml/menit (standar 65–75 ml/menit), efisiensi *coating spray* manual hanya 40% dengan *spray gun* elektrostatik vs. 46% pasca substitusi, dan konsumsi cat proses *repair full body* mencapai 9,81 ml/pcs.



Gambar 2. Diagram Fishbone Akar Penyebab Tingginya Biaya Indirect Material Cat dan Thinner

4.3 Rancangan dan Implementasi Solusi

Berdasarkan prinsip seleksi *Low Cost – High Benefit*, tiga solusi terpilih dari enam alternatif yang dievaluasi. Tabel 2

merangkum perbandingan alternatif solusi beserta estimasi biaya implementasi.

Tabel 2. Perbandingan Alternatif dan Solusi Terpilih Berdasarkan Analisis Cost-Benefit

Akar Penyebab	Solusi Terpilih	Solusi Ditolak	Biaya Implementasi
A-1, A-5	Ganti spray gun elektrostatis → non-elektrostatis (nozzle 0,8 mm)	Robot spray dengan bell gun (biaya tinggi, perlu modifikasi line)	Rp14,8 juta
A-2	Optimasi sirkulasi cooling zone (sekat + ventilasi + indexer pengarah)	Penambahan AC unit (biaya operasional tinggi)	Rp2,3 juta
A-3	Repair hanya area cacat + finishing RCP Bell (spray manual + auto)	Lini painting khusus repair (investasi besar)	Rp0 (perubahan metode)

Intervensi 1 — Substitusi Spray Gun: Trial menggunakan tiga ukuran *paint nozzle* (1,2 mm; 1,0 mm; 0,8 mm) menunjukkan bahwa *nozzle* 0,8 mm dengan *air cap* 18 mm memberikan efisiensi optimal dengan konsumsi cat *spray* manual 2,30 ml/pcs (vs. 3,66 ml/pcs dengan *spray gun* elektrostatis), *saving* 1,36 ml/pcs. Eliminasi medan elektrostatis (−45 kV) memungkinkan partikel cat menembus area lekukan melalui mekanisme atomisasi pneumatik murni.

Intervensi 2 — Optimasi Cooling Zone: Modifikasi dua tahap dilakukan. Tahap 1 (penambahan sekat pemisah udara oven-cooling) menghasilkan kenaikan suhu tidak terduga akibat uap oven tersedot ke area *cooling*. Tahap 2 (penambahan ventilasi, *indexer* pengarah *hanger*, dan pintu sekat) berhasil menurunkan suhu *part* dari 45–50°C menjadi 36–42°C (sesuai target), menghasilkan *saving* konsumsi cat *auto* 0,51 ml/pcs.

Intervensi 3 — Perubahan Metode Repair: Dari tiga tahap *trial* metode *repair* (RCP Bell saja; *spray* manual area cacat saja; kombinasi *spray* manual area cacat + *finishing* RCP Bell), hanya metode ketiga yang memberikan hasil visual *acceptable* tanpa efek belang. Metode baru ini menurunkan konsumsi cat *repair* dari 9,81 ml/pcs (*spray full body*) menjadi 5,27 ml/pcs, *saving* 4,54 ml/pcs (46% dari total *saving*).

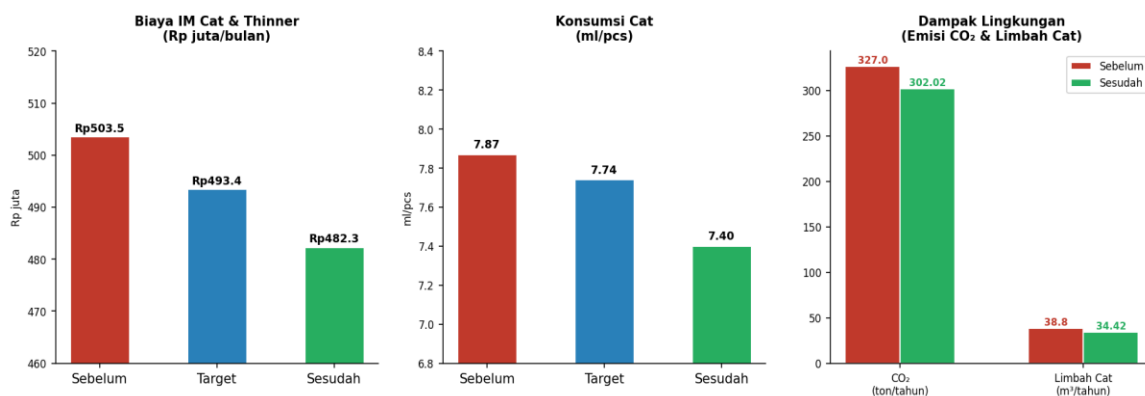
4.4 Hasil Evaluasi Perbaikan (QCDSME)

Evaluasi komprehensif menunjukkan pencapaian seluruh sasaran yang ditetapkan, bahkan melampaui target pada beberapa indikator. Tabel 3 merangkum perbandingan kondisi sebelum perbaikan (*baseline* Jan–Des 2023) dengan kondisi sesudah perbaikan (monitoring Jul–Sep 2024).

Tabel 3. Perbandingan Hasil Perbaikan Berdasarkan Kerangka QCDSME (Baseline Jan–Des 2023 vs. Jul–Sep 2024)

Aspek	Parameter	Sebelum	Target	Sesudah	Status
Quality	Rejection rate (tipis/meler)	2,5%	<2,5%	1,0%	✓ MELAMPAUI

Aspek	Parameter	Sebelum	Target	Sesudah	Status
Cost	Biaya IM cat & thinner/bulan	Rp503,5 juta	Rp493,4 juta	Rp482,3 juta	✓ MELAMPAUI
	Konsumsi cat (ml/pcs)	7,87	7,74	7,40	✓ MELAMPAUI
	Konsumsi thinner (ml/pcs)	6,48	6,35	5,86	✓ MELAMPAUI
Delivery	Frekuensi mixing cat/hari	25×	23×	23×	✓ TERCAPAI
Safety	Beban handling spray gun	750 gr	<400 gr	290 gr	✓ MELAMPAUI
Environment	Emisi CO ₂ (ton/tahun)	327,0	<327,0	302,02	✓ TERCAPAI
	Limbah cat cair (m ³ /tahun)	38,80	<38,80	34,42	✓ TERCAPAI



Gambar 3. Perbandingan Hasil Sebelum–Sesudah Perbaikan: Biaya IM, Konsumsi Material, dan Dampak Lingkungan

4.5 Analisis Finansial

Total penghematan finansial mencapai Rp106,3 juta per bulan atau Rp1,276 miliar per tahun, yang terdiri dari: (1) *saving direct* dari penurunan IM cat Rp13,7 juta/bulan; (2) *saving* IM thinner Rp10,2 juta/bulan; (3) *saving* dari pengurangan biaya *repair* (penurunan *rejection rate*) Rp72,9 juta/bulan; dan (4) *saving* dari peningkatan kapasitas produksi Rp9,5 juta/bulan. Biaya proyek total hanya Rp17,1 juta (Rp14,8 juta pembelian *spray gun* non-elektrostatik + Rp2,3 juta modifikasi *cooling zone*), menghasilkan *Return on Investment* (ROI) sebesar >7.400% atau *payback period* di bawah satu bulan.

Target KPI divisi untuk pengurangan cat dan thinner sebesar 100 liter/bulan telah terlampaui secara signifikan, dengan realisasi penghematan 364 liter/bulan untuk cat dan 477 liter/bulan untuk thinner — masing-masing 3,6× dan 4,8× dari target yang ditetapkan.

V. PEMBAHASAN

5.1 Efektivitas Substitusi Spray Gun terhadap Faraday Cage Effect

Hasil penelitian ini mengkonfirmasi bahwa *Faraday cage effect* merupakan hambatan fundamental *spray gun* elektrostatik pada komponen dengan geometri kompleks, sebagaimana diulas secara teoritis oleh Bell et al. [11]. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi empiris baru:

pada komponen *casting* aluminium skala produksi massal, substitusi ke *spray gun* non-elektrostatik dengan parameter *nozzle* yang dioptimalkan (0,8 mm) tidak hanya mengatasi problem area lekukan, tetapi juga secara signifikan menurunkan konsumsi material (*saving* 1,36 ml/pcs dari proses *spray* manual) dan meningkatkan kenyamanan ergonomis operator melalui penurunan bobot alat dari 750 gr menjadi 290 gr.

Temuan ini memberikan nuansa berbeda terhadap simpulan Poozesh et al. [4] yang menyatakan bahwa *spray gun* elektrostatik secara umum lebih efisien dalam *transfer efficiency*. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh geometri produk: pada permukaan datar, elektrostatik memang unggul, namun pada permukaan konkaf dengan lekukan dalam seperti *Bottom Case* dan *Axle Holder*, efek Faraday cage mendominasi dan membuat pendekatan non-elektrostatik lebih superior dalam kombinasi TE + *coverage*. Temuan ini memperluas pemahaman tentang batas aplikabilitas *spray gun* elektrostatik.

5.2 Pengendalian Suhu sebagai Faktor Kritis Konsumsi Thinner

Intervensi *cooling zone* memvalidasi hubungan kausal antara suhu *part* dan efisiensi konsumsi cat yang diusulkan oleh Jiang et al. [12]. Data penelitian ini menunjukkan bahwa penurunan suhu *part* dari 45–50°C menjadi 36–42°C menurunkan *setting flow rate* RCP Bell sebesar 2,9% (70 →

68 ml/menit) dan menghasilkan *saving* 0,51 ml/pcs pada konsumsi cat *auto*. Meskipun *saving* individual ini lebih kecil dibandingkan intervensi lain, dampak sistemiknya lebih luas: stabilisasi kualitas lapisan cat, pengurangan frekuensi *adjustment* oleh operator, dan kontribusi terhadap kondisi kerja yang lebih nyaman.

Perlu dicatat bahwa implementasi dua-tahap pada *cooling zone* mengungkap kompleksitas sistem termal yang tidak terprediksi pada tahap perencanaan (uap oven tersedot ke *cooling zone* pada tahap 1). Ini menegaskan pentingnya monitoring iteratif dalam siklus DO yang memungkinkan koreksi cepat sebelum solusi final ditetapkan — suatu aspek yang kurang dieksplorasi dalam literatur QCC.

5.3 Inovasi Metode Repair: Kontribusi Terbesar

Perubahan metode *repair* dari *full body painting* menjadi *spray* area cacat + *finishing* RCP Bell memberikan *saving* terbesar dalam penelitian ini (4,54 ml/pcs atau 46% dari total *saving* konsumsi cat). Implikasi konseptualnya signifikan: hambatan psikologis yang selama ini menghalangi perubahan (keseragaman warna/tampilan) ternyata dapat diatasi melalui rekayasa urutan proses. Pendekatan ini setara dengan prinsip *repair-as-needed* dalam *lean manufacturing*, namun aplikasinya pada proses *painting* dengan RCP Bell sebagai *tool finishing* belum terdokumentasi dalam literatur yang dikaji, sehingga merupakan kontribusi metodologis orisinal penelitian ini.

5.4 Dampak Lingkungan dan Relevansi Sustainability

Pengurangan emisi CO₂ sebesar 24,98 ton/tahun dan penurunan limbah cat cair 4,38 m³/tahun merupakan *co-benefit* lingkungan yang signifikan dari program efisiensi material ini. Hasil ini sejalan dengan studi Kara dan Ibbotson [16] yang menunjukkan bahwa efisiensi material dalam proses manufaktur secara konsisten menghasilkan pengurangan jejak karbon yang proporsional. Metode perhitungan emisi CO₂ berbasis stoikiometri kimia yang digunakan dalam penelitian ini merupakan pendekatan yang dapat direplikasi dan distandarisasi untuk industri *painting* sejenis, mengisi gap metodologis dalam literatur nasional terkait akuntansi karbon level proses produksi.

5.5 Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan perlu diakui: (1) data monitoring pasca-perbaikan baru mencakup 3 bulan (Jul–Sep 2024), sehingga belum dapat menangkap pengaruh variasi musiman; (2) tidak dilakukan uji statistik formal karena keterbatasan data historis yang memenuhi asumsi distribusi normal; dan (3) efek Faraday cage tidak dikuantifikasi melalui eksperimen terkontrol, melainkan divalidasi melalui pengukuran konsumsi material dan inspeksi visual. Penelitian lanjutan dengan rentang monitoring 6–12 bulan dan desain eksperimental lebih ketat akan memperkuat validitas generalisasi.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa pendekatan QCC berbasis PDCA dengan *tools* Pareto, Fishbone, dan *risk matrix* secara sistematis mampu mengidentifikasi dan

mengeliminasi akar penyebab inefisiensi konsumsi cat dan thinner pada lini *Painting Aluminium* industri komponen otomotif. Tiga temuan utama dirumuskan sebagai berikut:

Pertama, substitusi *spray gun* elektrostatik ke non-elektrostatik (*nozzle* 0,8 mm) terbukti efektif mengatasi *Faraday cage effect* pada komponen *casting* aluminium dengan geometri lekukan kompleks, menurunkan konsumsi *spray* manual sebesar 37% (3,66 → 2,30 ml/pcs) sambil meningkatkan ergonomi operator (beban turun 61%).

Kedua, optimasi termal *cooling zone* melalui modifikasi sekat dan sistem ventilasi berhasil menurunkan suhu *part* ke rentang target (36–42°C), yang secara langsung mengurangi kebutuhan *flow rate* cat pada proses otomatis, menstabilkan kualitas lapisan cat, dan meningkatkan kondisi kerja operator.

Ketiga, perubahan metode *repair* dari *full body painting* menjadi *spray* area cacat + *finishing* RCP Bell memberikan *saving* konsumsi terbesar (4,54 ml/pcs atau 46% dari total *saving*), membuktikan bahwa inovasi metodologis tanpa investasi peralatan dapat menghasilkan dampak ekonomi paling signifikan.

Secara keseluruhan, ketiga intervensi menghasilkan: penurunan biaya IM cat dan thinner 4,2%, *rejection rate* turun 60% (2,5% → 1,0%), konsumsi cat turun 8%, emisi CO₂ berkurang 7,5%, limbah cat cair turun 11%, dan total penghematan Rp1,276 miliar/tahun dengan investasi Rp17,1 juta (ROI >7.400%). Kerangka integrasi multi-intervensi yang dikembangkan dalam penelitian ini — menggabungkan substitusi teknologi, optimasi sistem termal, dan rekayasa metode proses dalam satu siklus QCC-PDCA dengan evaluasi QCDSME — dapat diadopsi sebagai model referensi oleh industri *painting* komponen logam sejenis. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan model prediktif berbasis regresi yang mengkuantifikasi hubungan suhu *part* terhadap konsumsi cat, serta mengevaluasi keberlanjutan hasil perbaikan dalam jangka panjang (≥12 bulan).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Manajemen atas dukungan dan kesempatan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh departemen yang telah memberikan validasi dan masukan konstruktif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dahmus, J.B. & Gutowski, T.G. (2004). An environmental analysis of machining. Proceedings of IMECE 2004, ASME, Anaheim, CA, USA, pp. 1–10.
- [2] Akafuah, N.K., Poozesh, S., Salaimeh, A., Patrick, G., Lawler, K. & Saito, K. (2016). Evolution of the automotive body coating process—a review. Coatings, 6(2), 24. <https://doi.org/10.3390/coatings6020024>
- [3] Streitberger, H.J. & Dössel, K.F. (2008). Automotive Paints and Coatings (2nd ed.). Wiley-VCH.
- [4] Poozesh, S., Akafuah, N. & Saito, K. (2018). Effects of automotive paint spray technology on the paint transfer efficiency — a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D:

- Journal of Automobile Engineering, 232(2), 282–301.
<https://doi.org/10.1177/0954407017695159>
- [5] Srinivasan, R. & Ramesh, K. (2021). Effect of ambient temperature and humidity on paint transfer efficiency in automotive spray booths. *Journal of Coatings Technology and Research*, 18(4), 987–999.
- [6] Sutrisno, A., Widodo, B. & Hakim, L. (2022). Implementasi Quality Control Circle untuk pengurangan defect pada proses painting komponen kendaraan bermotor. *Jurnal Teknik Industri*, 23(1), 45–58.
- [7] Ishikawa, K. (1985). *What is Total Quality Control? The Japanese Way*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [8] Moen, R. & Norman, C. (2010). Circling back: clearing up myths about the Deming cycle and seeing how it keeps evolving. *Quality Progress*, 43(11), 22–28.
- [9] Razaai, Z.F.M., Rasib, A.H.A. & Ishak, Y. (2018). Short review of QCC (Quality Control Circle) implementation toward productivity improvement: Case study. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 7(11), 47–51.
- [10] Indrayana, R., Prasetyo, H. & Kurniawan, A. (2023). Kajian literatur implementasi QCC di industri manufaktur Indonesia 2015–2022. *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*, 7(2), 89–103.
- [11] Bell, S., Pigot, J. & Keenan, S. (2013). Transfer efficiency of spray applied coatings: a systematic review. *Progress in Organic Coatings*, 76(10), 1396–1404.
- [12] Jiang, X., Fan, W. & Hu, X. (2020). Influence of substrate temperature on solvent evaporation and film formation in automotive spray painting. *Dyes and Pigments*, 178, 108349.
- [13] Purnomo, H. & Sari, D.P. (2021). Analisis pengambilan keputusan multi-kriteria pada program continuous improvement di industri otomotif. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 20(1), 12–23.
- [14] ISO 31000:2018. *Risk Management — Guidelines*. International Organization for Standardization.
- [15] ISO 14001:2015. *Environmental Management Systems — Requirements with Guidance for Use*. International Organization for Standardization.
- [16] Kara, S. & Ibbotson, S. (2011). Embodied energy of manufacturing supply chains. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3), 317–323.