

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Konsep Dasar Kualitas

Kualitas didefinisikan sebagai konsep yang kompleks dan seringkali ambigu, yang mencakup berbagai aspek seperti nilai pasar, perspektif pelanggan, fungsionalitas, atribut teknis, daya tahan, dan aspek lingkungan, serta dipengaruhi oleh persepsi konsumen terhadap produk atau layanan yang bersangkutan (Jakti & Al Faritsy, 2024). Definisi kualitas terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi dan digitalisasi di sektor manufaktur, di mana Quality 4.0 mengintegrasikan teknologi digital dengan praktik manajemen kualitas tradisional untuk meningkatkan kualitas sistem secara keseluruhan, mulai dari proses produksi hingga rantai pasok dan layanan purna jual (Sader et al., 2022).

Dalam industri manufaktur, kualitas didefinisikan sebagai sejauh mana suatu produk memenuhi spesifikasi atau standar yang telah ditetapkan, serta kemampuannya untuk memenuhi kebutuhan dan harapan pelanggan. Dalam konteks manufaktur, kualitas sering kali didefinisikan sebagai “conformance to specifications” atau kepatuhan terhadap parameter teknis dan kinerja produk yang diharapkan (Karmarkar & Pitbladdo, 1997). Pada konteks manufaktur, menurut (Javaid et al., 2021) kualitas produk dapat dinilai dengan menggunakan berbagai dimensi yang membahas aspek-aspek berikut:

1. Kinerja, mengacu pada beberapa produk yang baik memenuhi fungsi yang diharapkan. Kinerja yang baik adalah salah satu indikator utama kualitas produk.
2. Keandalan, kemampuan produk untuk berfungsi dengan baik selama periode waktu tertentu tanpa mengalami masalah apa pun. Keandalan adalah faktor penting yang memastikan bahwa konsumen dapat membeli produk.
3. Daya Tahan, beberapa produk sederhana dapat dibuat untuk bekerja dengan baik dan berfungsi dengan baik sebelum memerlukan penggantian. Daya tahan yang tinggi menunjukkan kualitas yang baik.
4. Kemudahan Perawatan, berfokus pada kemudahan penggunaan dan biaya produk. Produk yang mudah digunakan dan dirawat memiliki standar kualitas yang lebih tinggi.

5. Estetika, berkaitan dengan atribut fisik produk, seperti desain dan penampilannya. Estetika yang baik dapat meningkatkan persepsi kualitas produk.
6. Fitur, hal ini berdasarkan pada fitur atau fungsi yang ditawarkan produk. Fitur yang lebih relevan dan berlimpah dapat meningkatkan peringkat kualitas produk.
7. Kualitas yang Dirasakan, berfokus terhadap persepsi konsumen tentang kualitas produk berdasarkan pengalaman dan reputasi. Kualitas yang digunakan sering kali dipengaruhi oleh faktor subjektif.
8. Kesesuaian dengan Spesifikasi, menjelaskan bagaimana produk memenuhi standar dan spesifikasi yang telah ditetapkan. Tingkat kepatuhan yang tinggi menunjukkan kontrol kualitas yang efektif di seluruh proses manufaktur.

Dalam industri manufaktur berbasis logam dan fabrikasi, kontrol kualitas sangat penting untuk memastikan bahwa produk akhir memiliki kualitas yang konsisten dan dapat diamati sehingga memenuhi standar industri dan kebutuhan pelanggan (Lin et al., 2022). Produk logam rentan memiliki cacat seperti kesalahan dimensi, cacat permukaan, dan cacat internal yang dapat memengaruhi kinerja dan kondisi akhir produk (DI Cataldo et al., 2021). Kemajuan teknologi seperti sensor, pembelajaran mesin, dan sistem *cyber* fisik telah meningkatkan akurasi deteksi terhadap kecacatan dan memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat waktu dan akurat dalam proses produksi (Lee et al., 2018).

2.2 Tools of Quality

Tools of Quality atau tujuh alat pengendalian mutu, adalah alat-alat khusus yang digunakan untuk memantau, menganalisis, dan mengevaluasi data dengan berbagai cara guna mendeteksi masalah dan menangani gangguan dalam proses produksi, sehingga meningkatkan produktivitas sebuah organisasi (Org & Neyestani, 2017). Penggunaan seven tools dalam pengendalian mutu dasar sangat penting untuk meningkatkan operasional bisnis dan telah terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas dan produktivitas di berbagai industri (Org & Neyestani, 2017). Terdapat tujuh alat dasar pengendalian mutu yang dikenal secara internasional yaitu (Abdel-Hamid & Abdelhaleem, 2019):

1. *Check Sheet* adalah Formulir sederhana digunakan untuk mengumpulkan dan mengorganisir data secara sistematis sepanjang suatu proses, sehingga memudahkan untuk mengidentifikasi masalah atau pola.
2. Histogram adalah jenis grafik batang yang menampilkan distribusi frekuensi data dan membantu dalam mengidentifikasi pola variasi dan penyimpangan dalam proses.
3. Pareto Chart adalah diagram batang yang memprioritaskan masalah berdasarkan frekuensi, sehingga memudahkan untuk menentukan masalah mana yang harus diprioritaskan untuk dihilangkan.
4. *Fishbone* Diagram digunakan untuk secara sistematis mengidentifikasi akar masalah dengan mengelompokkan faktor-faktor yang berkontribusi ke dalam kategori utama.
5. *Control Chart* adalah grafik yang menunjukkan variasi dalam proses dari satu waktu ke waktu berikutnya, memungkinkan deteksi ketidakraturan atau penyimpangan dari nilai normal.
6. *Flowchart* adalah diagram alur yang menggambarkan alur suatu proses, sehingga memudahkan pemahaman dan analisis.
7. Scatter Diagram adalah grafik yang menggambarkan hubungan antara dua variabel, membantu dalam mengidentifikasi korelasi atau tingkat hubungan antara variabel-variabel tersebut.

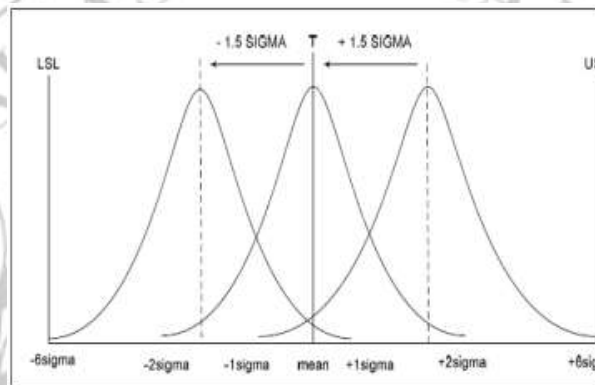
2.3 Six Sigma

2.3.1 Definisi Six Sigma

Six Sigma adalah sebuah metodologi manajemen berbasis proyek yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas produk, layanan, dan organisasi dengan secara sistematis mengurangi kesalahan dan variasi dalam proses bisnis. Metodologi ini pertama kali diperkenalkan oleh Motorola pada tahun 1980-an sebagai respons terhadap kebutuhan untuk meningkatkan kualitas produk dan mengurangi biaya dalam proses manufaktur. Six Sigma menggunakan metodologi berbasis data dan analisis statistik untuk mengidentifikasi dan menghilangkan penyebab cacat serta mencapai tingkat kesempurnaan yang sangat tinggi dengan target kualitas 3,4 cacat per satu juta peluang (DPMO) (Uluskan, 2022).

Sebagai salah satu pendekatan manajemen kualitas yang paling dikenal, Six Sigma berfokus pada peningkatan kepuasan pelanggan melalui pengurangan variasi

dan cacat dalam proses. Pelanggan akan puas jika mereka menerima produk dengan harga yang sesuai dengan anggaran mereka. Jika suatu produk memenuhi standar kualitas Six Sigma, perusahaan dapat mencapai hanya 3,4 kegagalan per satu juta kesempatan (DPMO), atau dengan kata lain, tingkat keberhasilan sebesar 99,99966% dari apa yang diharapkan pelanggan dari produk tersebut. Dengan demikian, Six Sigma dapat dianggap sebagai ukuran kinerja sistem industri dalam menentukan beberapa aspek baik dari transaksi produk antara pelanggan dan penjual. Semakin tinggi ambang batas sigma yang telah dicapai, semakin baik kinerja sistem industri dalam memenuhi kebutuhan dan mengatasi risiko bagi karyawannya (Gaussian, 2019).



Gambar 2. 1 Six Sigma

Sumber : (Gaussian, 2019)

Gambar 2.1 menunjukkan prinsip dasar Six Sigma, yaitu toleransi terhadap kesalahan proses rata-rata sebesar $\pm 1,5$ sigma dari spesifikasi target tanpa mengorbankan kemampuan proses dalam hal mencapai spesifisitas. Implementasi proses Six Sigma oleh Motorola menunjukkan bahwa penyimpangan rata-rata dari Critical to Quality (CTQ) rata-rata (mean) adalah $\pm 1,5$ sigma terhadap spesifikasi target (T), menghasilkan tingkat cacat sebesar 3,4 DPMO. Meskipun ada kesulitan, distribusi proses terutama didasarkan pada spesifikasi atas (USL) dan bawah (LSL). Hal ini menunjukkan bagaimana Six Sigma meningkatkan variasi jangka panjang dalam proses aktual sambil tetap mempertahankan tingkat kualitas yang sangat tinggi. Oleh karena itu, toleransi penyimpangan ($\mu - T$) = $\pm 1,5$ tetap dapat ditentukan tanpa mempengaruhi kondisi keuangan klien (Gaussian, 2019).

2.3.2 Tahap Implementasi Six Sigma

Dalam metode Six Sigma penggunaan metodologi DMAIC sangatlah penting untuk mengurangi cacat pada proses produksi. Melalui fase-fase *Define*, *Measure*, *Analyze*, *Improve*, dan *Control*, DMAIC membantu organisasi mengidentifikasi penyebab masalah, menerapkan solusi berbasis data, dan memantau proses untuk memastikan perbaikan dapat dilakukan secara tepat waktu (Rizki et al., 2024).



Gambar 2. 2 Metode Six Sigma

Sumber: (Jou et al., 2022)

1. *Define*

Define adalah langkah pertama yang bertujuan untuk mendefinisikan dengan jelas masalah, ruang lingkup proyek, tujuan perbaikan, serta kebutuhan dan kekhawatiran klien sebelum proses perbaikan dimulai. Tahap ini melakukan deskripsi suatu proses menggunakan diagram SIPOC, kemudian menentukan *Critical to Quality* (CTQ) yang berkaitan dengan keinginan pelanggan (Haekal, 2023).

a SIPOC

Diagram SIPOC adalah alat visual yang digunakan untuk memetakan proses bisnis secara menyeluruh dengan mengidentifikasi lima elemen utama yaitu Pemasok (*Supplier*), Masukan (*Input*), Proses (*Process*), Keluaran (*Output*), dan Pelanggan (*Customer*). Diagram ini sering digunakan dalam metodologi Six Sigma untuk memberikan representasi visual alur proses dan hubungan antar elemen, yang memudahkan pemahaman, komunikasi, dan perbaikan proses di berbagai organisasi (Brown, 2019). Berikut adalah penjelasan lebih lanjut mengenai diagram SIPOC (Zhang et al., 2022):

1. *Supplier*, merupakan pihak yang menyediakan input atau bahan yang diperlukan untuk suatu proses.
2. *Input*, merupakan segala sesuatu yang diperlukan untuk memulai suatu proses.
3. *Process*, merupakan serangkaian tindakan atau langkah utama yang mengubah masukan menjadi keluaran.
4. *Output*, merupakan hasil akhir dari proses yang telah dilaksanakan.
5. *Customers*, merupakan pihak yang menerima hasil proses.

b. *Critical to Quality (CTQ)*

Critical to Quality (CTQ) adalah fitur atau atribut dari suatu produk atau layanan yang sangat penting bagi pelanggan dan memengaruhi persepsi mereka terhadap kualitas. Pada tahap Define, CTQ diidentifikasi berdasarkan kebutuhan dan kekhawatiran klien serta hasil dari SIPOC (Jou et al., 2022).

2. *Measure*

Pada tahap ini fokus utama adalah mengukur kinerja proses saat ini untuk mengidentifikasi ambang batas cacat dan peluang perbaikan. Pengukuran dilakukan dengan cara pengumpulan data secara sistematis untuk menghitung matrik kualitas seperti DPMO (*Defects Per Million Opportunities*) dan level sigma (Salomon et al., 2023).

a. *Defects Per Million Opportunities (DPMO)*

Defects Per Million Opportunities (DPMO) adalah indikator yang digunakan untuk menentukan jumlah cacat per satu juta peluang dalam suatu proses produksi. DPMO dihitung dengan membagi total cacat dengan total peluang, kemudian dikalikan satu juta (Suprayogi, 2018).

$$DPMO = \frac{\text{Jumlah produk defect}}{\text{unit yang diproduksi} \times \text{banyaknya jenis defect}} \times 10^6 \quad (2.1)$$

b. *Tingkat Sigma*

Tingkat sigma adalah ukuran statistik yang menunjukkan seberapa baik suatu proses berjalan tanpa masalah. Semakin tinggi tingkat sigma, semakin sedikit cacat yang terjadi dalam satu juta peluang, menunjukkan proses yang lebih stabil dan baik (Sjarifudin et al., 2022). Berdasarkan hasil perhitungan DPMO, nilai tersebut kemudian dikonversikan menjadi nilai sigma menggunakan Tabel 2.2

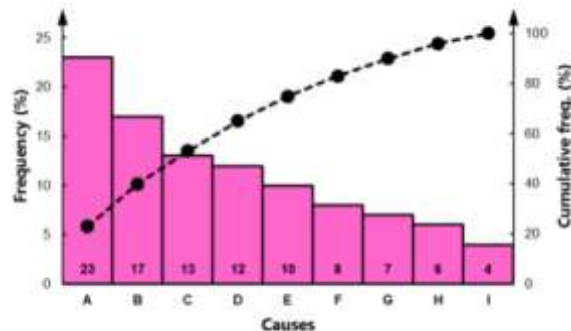
$$\text{Nilai Sigma} = \left(\frac{1.000.000 - DPMO}{1.000.000} \right) + 1,5 \quad (2.2)$$

3. Analyze

Tahap *Analyze* tujuannya adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis penyebab utama masalah yang timbul selama proses, sehingga faktor-faktor yang paling berkontribusi terhadap terjadinya cacat atau ketidaksesuaian produk dapat diidentifikasi. Pada tahap ini, beberapa alat analitis digunakan untuk mengidentifikasi penyebab utama masalah, sehingga solusi yang dikembangkan pada tahap berikutnya menjadi lebih akurat (Jou et al., 2022).

a Diagram Pareto

Diagram pareto adalah diagram yang digunakan untuk memprioritaskan jenis masalah atau isu yang paling sering terjadi, sehingga solusi dapat difokuskan pada penyebab yang menimbulkan dampak terbesar. Diagram ini membantu mengidentifikasi 20% penyebab yang menimbulkan 80% permasalahan (prinsip 80/20), sehingga dapat menentukan prioritas perbaikan (Legesse & Geremew, 2021)

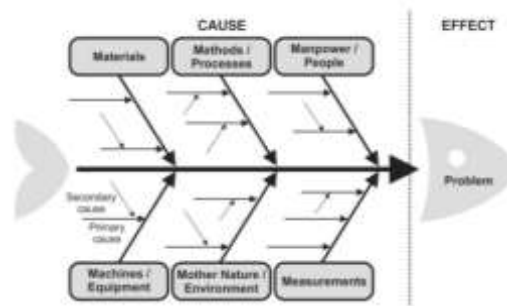


Gambar 2. 3 Diagram Pareto

Sumber : (Kusnadi, 2012)

b Fishbone Diagram

Diagram *Fishbone* atau diagram sebab akibat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan penyebab utama masalah berdasarkan kategori seperti manusia, mekanis, metode, dan material. Diagram ini memudahkan orang untuk memvisualisasikan hubungan antara berbagai hal sehingga masalah dapat diselesaikan secara sistematis (Arafeh et al., 2021).



Gambar 2.4 Fishbone Diagram

Sumber : (Kah et al., 2014)

4. *Improve*

Tahap *Improve* adalah tahap di mana solusi diterapkan untuk mengatasi masalah mendasar yang telah diidentifikasi. Pada tahap ini, perubahan dilakukan pada proses, bahan, atau metode baru untuk mengurangi variasi, cacat, atau meningkatkan efisiensi (V. Gupta et al., 2018). Hasil utama yang dihasilkan pada tahap ini adalah peningkatan kapabilitas proses, efisiensi biaya, dan penurunan cacat (Hashim et al., 2024).

5. *Control*

Tahap *Control* bertujuan untuk memastikan bahwa perbaikan yang dilakukan pada tahap *Improve* dapat dipertahankan dalam jangka panjang. Pada tahap ini, pemantauan yang cermat, standarisasi prosedur, dan pelatihan dilakukan untuk memastikan konsistensi dalam hasil (Sharma et al., 2018).

2.4 *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan teknik analisis sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan menyelesaikan permasalahan terkait produk dan proses sebelum permasalahan tersebut muncul (Silverman & Johnson, 2013). Metode ini membantu dalam mengidentifikasi potensi mode kegagalan berdasarkan data historis dan analisis, sehingga perubahan desain atau prosedur dapat diterapkan untuk mengatasi mode kegagalan yang diperkirakan (Valdesi, 2014).

Dalam penilaian risiko pada FMEA dilakukan dengan mengevaluasi tiga faktor risiko utama yaitu *Severity (S)*, *Occurrence (O)* dan *Detectability (D)*. Setiap mode kegagalan diberi skor untuk evaluasi ketiga faktor tersebut, kemudian dikalikan untuk menghasilkan nilai *Risk Priority Number (RPN)* untuk menentukan prioritas kegagalan (Qin et al., 2020).

a *Severity* (Tingkat Keparahan)

Mengukur dampak atau frekuensi dari kegagalan yang terjadi. Pengembangan sistem penilaian *Severity* yang memperhitungkan berbagai faktor lain mungkin dapat meningkatkan akurasi penilaian risiko (Zandi et al., 2020).

Tabel 2. 1 Kriteria Severity

<i>Effect</i>	<i>Severity</i>	Skor
Sangat rendah	Gangguan pada proses produksi bersifat minimal dan tidak signifikan, dengan persentase produk yang mengalami rework < 1% dari total output bulanan.	1
Rendah	Gangguan yang terjadi memiliki dampak terbatas terhadap kelancaran proses produksi dan kualitas produk, dengan rework berkisar antara 1% - 5% dari total output.	2
Sedang	Gangguan mulai mempengaruhi stabilitas proses produksi dan menyebabkan peningkatan cacat produk, dengan tingkat rework sebesar 5% - 10% dari total produksi.	3
Tinggi	Proses produksi mengalami hambatan yang cukup signifikan disertai peningkatan jumlah cacat, dengan persentase rework mencapai 10% - 20% dari total output.	4
Sangat Tinggi	Terjadi gangguan besar dalam proses produksi yang berdampak pada kualitas produk secara luas, dengan tingkat rework berkisar antara 20% - 50% dari total produksi.	5
Berbahaya	Proses produksi terganggu secara serius sehingga menyebabkan kerusakan atau cacat produk dalam skala besar, dengan > 50% produk memerlukan rework.	6

Sumber : (Hartanti et al., 2022)

b. *Occurrence* (Frekuensi Kejadian)

Frekuensi kejadian atau *Occurrence* bertujuan untuk menilai seringnya suatu mode kegagalan diperkirakan terjadi. Penentuan tahap ini seringkali didasarkan pada data historis (Mangeli et al., 2019).

Tabel 2. 2 Kriteria Occurence

Occurrence	Peluang Kejadian	Skor
Tidak pernah	Kejadian sangat jarang terjadi, dengan frekuensi satu kali dalam periode > 1 tahun.	1
Jarang	Kejadian berpeluang muncul satu kali dalam rentang waktu 1 - 6 bulan.	2
Kadang-kadang	Kejadian terjadi dengan frekuensi satu kali dalam jangka waktu 1 -3 bulan	3
Cukup sering	Kejadian muncul secara berkala dengan frekuensi sekitar satu kali setiap bulan.	4
Sering	Kejadian terjadi cukup rutin dengan frekuensi satu kali dalam satu minggu.	5
Sangat Sering	Kejadian berlangsung hampir setiap hari dalam kegiatan operasional.	6

Sumber : (Hartanti et al., 2022)

c. *Detection* (Deteksi)

Deteksi mengukur kemungkinan kegagalan teridentifikasi sebelum berdampak pada sistem atau pengguna. Nilai D yang rendah artinya kegagalan sulit dideteksi sehingga menyebabkan risiko yang lebih tinggi (Mangeli et al., 2019).

Tabel 2. 3 Kriteria Detection

Detection	Tingkat Mendeteksi	Skor
Pasti	Sumber masalah dapat dideteksi secara langsung dengan hasil yang akurat.	1
Sangat Mudah	Diperlukan inspeksi visual untuk mendeteksi sumber masalah, dengan hasil deteksi yang tetap akurat.	2
Mudah	Memerlukan alat bantu, dan sumber masalah baru dapat diketahui setelah masalah terjadi.	3

Sedang	Diperlukan alat bantu dalam proses pendeteksian, dan penyebab masalah hanya dapat diidentifikasi melalui analisis lanjutan.	4
Sulit	Pendeteksian memerlukan alat bantu khusus dengan ketelitian tinggi, namun penyebab masalah tetap sulit untuk diidentifikasi.	5
Sangat Sulit	Sumber masalah tidak dapat diidentifikasi meskipun telah dilakukan proses pendeteksian.	6

Sumber : (Hartanti et al., 2022)

d. *Risk Priority Number* (RPN)

Risk Priority Number (RPN) adalah metode evaluasi risiko yang menggabungkan tiga faktor utama, yaitu *Occurrence*, *Severity*, dan *Detection*. Nilai RPN diperoleh dari hasil perkalian ketiganya, dan digunakan untuk menentukan prioritas penanganan terhadap potensi kegagalan dalam suatu proses. Nilai RPN diperoleh dengan mengalikan ketiga faktor tersebut, sebagaimana ditunjukkan dalam rumus berikut:

$$RPN = S \times O \times D$$

Keterangan:

S = *Severity*

O = *Occurrence*

D = *Detection*

Nilai RPN digunakan untuk menentukan tingkat risiko. Nilai RPN yang tinggi menunjukkan risiko yang signifikan dan harus segera menjadi prioritas perbaikan. Klasifikasi tingkat risiko disajikan dalam tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Kategori Risiko

Nilai RPN	Kategori
0	Sangat rendah
8 - 40	Rendah
80 - 240	Sedang
320 - 1000	Tinggi

Sumber : (R. Gupta, 2023)

Tabel kategori risiko menggambarkan bahwa nilai *Risk Priority Number* (RPN) berfungsi untuk menentukan prioritas penanganan terhadap potensi kegagalan dalam suatu proses. Semakin besar nilai RPN, semakin tinggi pula tingkat risiko yang harus segera ditindaklanjuti. Berdasarkan tabel, nilai 0 termasuk kategori *sangat rendah* dan tidak memerlukan tindakan perbaikan khusus. Rentang nilai 8–40 dikategorikan rendah, menandakan risiko yang masih dapat diterima serta cukup dikendalikan melalui pengawasan rutin. Nilai 80–240 termasuk kategori sedang, menunjukkan adanya potensi kegagalan yang memerlukan evaluasi agar tidak meningkat menjadi risiko yang lebih tinggi. Sedangkan nilai 320–1000 tergolong tinggi dan mencerminkan risiko serius yang membutuhkan tindakan korektif segera untuk menurunkan tingkat keparahan, kemungkinan terjadinya, atau meningkatkan kemampuan deteksi terhadap kegagalan.

2.5 Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ)

TRIZ (*Theory of Inventive Problem Solving*) merupakan metodologi yang dikembangkan pada tahun 1950 oleh insinyur Rusia yaitu Genrikh Altshuller. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan masalah dengan cara inovatif menggunakan pendekatan sistematis yang didasarkan pada data daripada intuisi (Ng & Jee, 2016). Salah satu alat ukur utama dalam metode TRIZ adalah penggunaan 39 parameter teknik dan 40 prinsip inventif. Penggunaan 39 parameter dan 40 prinsip inventif adalah untuk mempercepat proses peningkatan kualitas yang dihasilkan (Lewis Chen & Liu, 2001).

Tabel 2. 5 Parameter Sistem TRIZ

No	Parameter	Keterangan
1.	<i>Weight of moving object</i>	Berat suatu objek dalam kondisi gravitasi normal, yang memerlukan gaya tertentu untuk menopang atau menggerakkannya.
2.	<i>Weight of stationary object</i>	Berat objek dalam kondisi diam pada lingkungan dengan gravitasi normal, yang memerlukan gaya untuk menopang atau menahannya.
3.	<i>Length of moving object</i>	Dimensi panjang dari suatu objek yang sedang bergerak, tidak selalu merupakan ukuran terpanjang, tetapi mempertimbangkan aspek ukuran linier.

4.	<i>Length of stationary object</i>	Memiliki pengertian yang sama dengan <i>length of moving object</i> , namun diterapkan pada objek yang tidak bergerak.
5.	<i>Area of moving object</i>	Merujuk pada karakteristik geometri dari suatu objek yang bergerak, mencakup luas permukaan luar atau dalam yang digunakan oleh objek tersebut.
6.	<i>Area of stationary object</i>	Memiliki makna yang sama dengan <i>area of moving object</i> , namun digunakan untuk objek yang dalam keadaan diam.
7.	<i>Volume of moving object</i>	Besarnya ruang tiga dimensi yang ditempati oleh objek, misalnya dihitung dengan panjang \times lebar \times tinggi untuk objek berbentuk kubus, atau tinggi \times luas alas untuk objek berbentuk tabung.
8.	<i>Volume of stationary object</i>	Memiliki pengertian yang sama dengan <i>volume of moving object</i> , namun diterapkan pada objek yang tidak bergerak.
9.	<i>Speed</i>	Tingkat perubahan posisi objek terhadap waktu, yang juga mencerminkan kecepatan proses atau gerakan dalam satuan waktu tertentu.
10.	<i>Force</i>	Besaran yang menggambarkan interaksi antar elemen sistem. Dalam mekanika klasik, dihitung sebagai hasil perkalian massa dan percepatan ($F = m \times a$).
11.	<i>Stress or pressure</i>	Besaran gaya per satuan luas, yang mencakup tekanan fisik dan tegangan mekanis yang terjadi dalam sistem.
12.	<i>Shape</i>	Menggambarkan konfigurasi eksternal atau kontur fisik dari suatu objek, yang berpengaruh terhadap fungsionalitas sistem.
13.	<i>Stability of the object's composition</i>	Mengacu pada integritas struktural suatu sistem, termasuk ketahanan terhadap degradasi kimia, pembongkaran komponen, serta tingkat entropi yang mencerminkan kestabilan sistem.
14.	<i>Strength</i>	Kemampuan suatu objek untuk menahan beban atau gaya luar tanpa mengalami kerusakan atau deformasi.

15.	<i>Duration of action by a moving object</i>	Waktu efektif suatu objek dalam menjalankan fungsinya secara optimal, biasanya diukur dari waktu rata-rata antar kerusakan (MTBF) atau durabilitasnya.
16.	<i>Duration of action by a stationary object</i>	Memiliki pengertian yang sama <i>duration of action by a moving object</i> , tetapi diterapkan pada objek dalam keadaan diam.
17.	<i>Temperature</i>	Menunjukkan kondisi termal suatu objek atau sistem, termasuk kapasitas panas yang berpengaruh terhadap perubahan suhu dalam proses operasional.
18.	<i>Illumination intensity (jargon)</i>	Merupakan ukuran fluks cahaya per satuan luas, mencakup aspek kecerahan, kualitas pencahayaan, dan distribusi cahaya dalam sistem.
19.	<i>Use of energy by moving object</i>	Jumlah energi yang diperlukan oleh objek untuk menjalankan fungsinya. Energi ini dapat berasal dari sistem luar seperti energi listrik atau panas, dan biasanya dinyatakan sebagai hasil dari gaya dikalikan jarak.
20.	<i>Use of energy by stationary object</i>	Memiliki makna yang sama dengan penggunaan <i>use of energy by moving object</i> , namun diaplikasikan pada objek yang tidak berpindah tempat.
21.	<i>Power (jargon)</i>	Menggambarkan tingkat energi yang digunakan oleh suatu sistem atau objek dalam satuan waktu tertentu saat melakukan pekerjaan.
22.	<i>Loss of energy</i>	Bagian dari energi yang digunakan namun tidak berkontribusi langsung terhadap proses kerja atau keluaran sistem, sehingga menurunkan efisiensi.
23.	<i>Loss of substance</i>	Kehilangan sebagian atau seluruh bagian dari material, komponen, atau subsistem, baik bersifat sementara maupun permanen.
24.	<i>Loss of information</i>	Hilangnya data atau akses terhadap informasi yang terdapat dalam sistem, termasuk informasi yang berkaitan dengan persepsi manusia seperti aroma, tekstur, atau suara.

25.	<i>Loss of time</i>	Durasi waktu yang terbuang selama aktivitas berlangsung. Pengurangan waktu yang hilang berarti peningkatan efisiensi waktu dalam proses.
26.	<i>Quantity of substance/the matter</i>	Mengacu pada kuantitas bahan, komponen, atau subsistem yang digunakan dalam suatu sistem, baik secara permanen maupun sementara.
27.	<i>Reliability</i>	Kemampuan sistem untuk menjalankan fungsinya secara konsisten sesuai harapan dalam kondisi yang telah ditentukan.
28.	<i>Measurement accuracy</i>	Tingkat kedekatan antara hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya dari suatu karakteristik sistem. Akurasi yang baik dapat dicapai dengan meminimalkan kesalahan pengukuran.
29.	<i>Manufacturing precision</i>	Tingkat kesesuaian hasil produksi terhadap spesifikasi desain atau toleransi teknis yang telah ditetapkan.
30.	<i>External harm affects the object</i>	Kerentanan sistem terhadap gangguan atau pengaruh negatif yang berasal dari luar sistem, seperti suhu ekstrem, getaran, atau korosi.
31.	<i>Object-generated harmful factors</i>	Efek merugikan yang timbul dari operasi sistem atau objek, yang dapat menurunkan efisiensi, kualitas, atau keselamatan proses kerja.
32.	<i>Ease of manufacture</i>	Tingkat kemudahan dalam proses produksi atau perakitan suatu produk, mencakup aspek kenyamanan, waktu, dan tenaga kerja yang diperlukan.
33.	<i>Ease of operation</i>	Derajat kemudahan dalam mengoperasikan sistem, termasuk jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan, jumlah tahapan kerja, dan kebutuhan alat bantu khusus.
34.	<i>Ease of repair</i>	Karakteristik sistem yang mencerminkan kemudahan dalam melakukan perbaikan atas kerusakan, kesalahan, atau cacat, ditinjau dari aspek waktu, alat, dan metode perbaikan.
35.	<i>Adaptability of versatility</i>	Kemampuan suatu sistem atau objek untuk menyesuaikan diri dengan perubahan lingkungan atau kebutuhan, serta dapat digunakan dalam berbagai situasi

	atau kondisi operasi.
36. <i>Device complexity</i>	Jumlah dan keragaman elemen dalam sistem, serta tingkat interaksi antar elemen tersebut. Semakin banyak komponen dan keterkaitannya, maka sistem semakin kompleks.
37. <i>Difficulty of detecting and measuring</i>	Tingkat kesulitan dalam mendeteksi atau mengukur kondisi sistem, terutama jika sistem memiliki banyak variabel, membutuhkan alat ukur khusus, atau proses pengamatannya kompleks dan memakan waktu.
38. <i>Extent of automation</i>	Sejauh mana sistem dapat beroperasi tanpa intervensi manusia. Tingkat otomasi tertinggi adalah sistem yang mampu beradaptasi, mengendalikan, dan memperbaiki dirinya sendiri.
39. <i>Productivity</i>	Jumlah keluaran (output) atau performa yang dihasilkan sistem dalam satuan waktu tertentu. Semakin tinggi produktivitas, maka semakin efisien sistem dalam menghasilkan output.

Setelah mengidentifikasi parameter yang perlu ditingkatkan dan yang perlu dikurangi, langkah selanjutnya adalah mengembangkan solusi inovatif menggunakan 40 prinsip TRIZ. Proses ini dimulai dengan analisis teknis hasil analisis parameter, diikuti dengan penggunaan rumus analisis TRIZ untuk mengidentifikasi prinsip-prinsip penemuan yang relevan sebagai landasan untuk mengembangkan solusi inovatif (Donnici et al., 2018).

Tabel 2. 6 Inventive Principal TRIZ

No	Inventive Principales	Definisi
1	<i>Segmentation</i>	Prinsip ini mendorong pemisahan proses-proses yang bernilai rendah dan fokus pada penggunaan proses bernilai tinggi guna meningkatkan efisiensi.
2	<i>Taking out</i>	Menyediakan layanan atau fitur yang dapat disesuaikan sesuai dengan kebutuhan lingkungan atau kondisi tertentu.
3	<i>Local Quality</i>	Menyesuaikan proses secara spesifik agar berbeda dari proses standar, sehingga lebih optimal dalam konteks lokalnya.
4	<i>Asymmetry</i>	Menggabungkan beberapa layanan yang berbeda untuk menghasilkan jenis layanan baru yang lebih inovatif.
5	<i>Merging</i>	Menyediakan layanan yang memiliki lebih dari satu fungsi guna meningkatkan nilai tambah dan efektivitas.
6	<i>Universality</i>	Mengurangi potensi risiko tinggi melalui eliminasi komponen atau proses yang berisiko.
8	<i>Anti-weight</i>	Melaksanakan tahapan pendahuluan sebelum layanan utama diberikan agar proses pelayanan menjadi lebih cepat dan efisien.
10	<i>Preliminary action</i>	Melakukan perencanaan awal terhadap kemungkinan dampak negatif dengan menyusun skenario terburuk yang dapat terjadi.
11	<i>Beforehand cushioning</i>	Mengidentifikasi perubahan yang diperlukan pada sistem pelayanan untuk mengantisipasi potensi gangguan.
14	<i>Spheroidality</i>	Meningkatkan fleksibilitas layanan melalui penyesuaian bentuk atau pendekatan sistem pelayanan.
15	<i>Dynamics</i>	Mengatur pelaksanaan layanan hanya pada waktu-waktu tertentu, tidak secara terus-menerus, guna meningkatkan efektivitas sumber daya.
19	<i>Periodic action</i>	Mengubah aktivitas yang awalnya merugikan menjadi aktivitas yang memberikan manfaat bagi sistem.
20	<i>Continuity of Useful Action</i>	Menjaga kelangsungan proses yang bermanfaat tanpa gangguan yang tidak diperlukan.

21	<i>Skipping</i>	Menghilangkan langkah-langkah tertentu untuk menyederhanakan proses dan menghemat waktu.
22	<i>Convert harm into benefit</i>	Mengubah efek negatif menjadi sesuatu yang bermanfaat bagi sistem.
23	<i>Feedback</i>	Menggunakan informasi umpan balik untuk mengendalikan dan meningkatkan sistem.
24	<i>Intermediary</i>	Menggunakan perantara atau media bantu untuk mengoptimalkan efisiensi sistem.
25	<i>Self Device</i>	Membuat pengguna atau sistem menjalankan sebagian proses secara mandiri untuk efisiensi.
26	<i>Copying</i>	Menggandakan elemen atau proses yang efektif sebagai solusi hemat biaya.
27	<i>Cheap Short – Living Object</i>	Menggunakan komponen sekali pakai atau murah untuk mengurangi biaya keseluruhan.
28	<i>Mechanics substitution</i>	Mengganti proses mekanis dengan metode lain seperti elektronik, optik, atau pneumatik.
29	<i>Pneumatics and Hydraulics</i>	Mengaplikasikan sistem berbasis udara atau cairan untuk menggantikan mekanisme konvensional.
30	<i>Flexible shells and thin films</i>	Menggunakan bahan fleksibel dan tipis untuk meningkatkan adaptabilitas dan efisiensi.
31	<i>Porous Materials</i>	Memanfaatkan material berpori untuk sirkulasi, pengurangan massa, atau efisiensi.
32	<i>Color changes</i>	Mengubah warna atau penampilan visual sistem untuk menyampaikan informasi atau meningkatkan kontrol.
33	<i>Homogeneity</i>	Menggunakan bahan atau elemen sejenis untuk menyederhanakan proses dan mengurangi ketidakcocokan.
34	<i>Discarding and recovering</i>	Menghapus komponen yang tidak dibutuhkan dan memanfaatkan kembali elemen yang masih berguna.
35	<i>Parameter changes</i>	Mengubah parameter seperti ukuran, suhu, atau tekanan untuk meningkatkan kinerja.
36	<i>Phase transitions</i>	Menggunakan perubahan wujud (padat, cair, gas) untuk meningkatkan efisiensi proses.

37	<i>Thermal Expansion</i>	Memanfaatkan efek termal seperti pemuaian untuk menjalankan fungsi tertentu dalam sistem.
38	<i>Strong oxidants</i>	Menggunakan zat atau proses kuat untuk mempercepat reaksi atau transformasi dalam sistem.
39	<i>Inert Atmosphere</i>	Menggunakan lingkungan yang tidak bereaksi (misal gas inert) untuk melindungi proses atau bahan.
40	<i>Composite material films</i>	Menggabungkan berbagai material untuk menciptakan sistem layanan yang lebih tahan dan serbaguna.

Sumber : (Hakim et al., 2018)

2.6 Proses Pengelasan dalam Industri

Pengelasan adalah proses fabrikasi atau pemodelan yang melibatkan penggunaan bahan, biasanya logam atau termoplastik, yang menghasilkan koalesensi. Proses ini dilakukan dengan cara melelehkan material cair yang mendingin menjadi sambungan yang kuat dan berkualitas tinggi (Klein, 2011). Untuk mencapai ikatan atom antara benda kerja, prinsip dasar pengelasan mengharuskan pemanasan, penekanan, atau keduanya. Pengelasan dasar dibagi menjadi tiga berdasarkan karakteristik penggabungan jenis logam las, yaitu pengelasan fusi, pengelasan tekan, dan pengelasan brazing (Du et al., 2011). Contoh padah pengelasan fusi melibatkan peleburan antara logam dasar dan bahan pengisi untuk membentuk sebuah sambungan las. Hal yang perlu diperhatikan dalam proses pengelasan adalah mengontrol kedalaman fusi dan laju *elektroda* (Nutalapati et al., 2016).

Cacat pengelasan adalah ketidaksempurnaan atau ketidakseragaman pada sambungan las yang dapat digunakan untuk menentukan kekuatan, keandalan, dan umur struktur hasil pengelasan. Menurut (Dagmar & Husada Tarigan, 2021) terdapat jenis-jenis utama kecacatan dalam proses pengelasan yang dapat diidentifikasi, berikut merupakan jenis-jenis kecacatan dalam pengelasan:

1. *Porosity*, merupakan jenis cacat yang ditandai dengan adanya lubang kecil atau rongga pada logam las, yang disebabkan oleh terjebaknya gas. Ini adalah salah satu kejadian yang paling sering terjadi.
2. *Slag Inclusion*, merupakan cacat yang terjadi saat inklusi non-logam tercampur dalam las logam, hal ini sering disebabkan oleh pembersihan yang tidak tepat atau teknik pengelasan yang tidak benar.

3. *Cracks*, merupakan cacat pengelasan yang terjadi di dalam logam las atau di permukaannya, dan seringkali disebabkan oleh pengaturan las yang tidak tepat atau konsentrasi tegangan yang berlebihan.
4. *Undercut* merupakan cacat pengelasan yang terjadi ketika garis lelehan pada logam dasar di dekat ujung las atau akar las yang tidak terisi oleh logam las.
5. *Lack of Fusion*, merupakan cacat pengelasan yang terjadi ketika logam las tidak sepenuhnya menyatu dengan logam dasar atau lapisan las sebelumnya.
6. *Splatter*, merupakan cacat pengelasan yang terjadi ketika tetesan-tetesan kecil logam cair tersebar dan menempel pada objek-objek di sekitarnya
7. *Overlap*, merupakan logam las berlebih yang tidak menyatu dengan logam dasar dan melebihi batas ujung las atau akar las.
8. *Burn-Through*, merupakan cacat pengelasan yang terjadi ketika logam las menembus logam dasar akibat panas yang ekstrem, meninggalkan lubang.

Inspeksi pada cacat pengelasan sangat penting dilakukan untuk memperbaiki cacat yang terjadi selama proses pengelasan. Dengan melakukan inspeksi yang tepat, berbagai cacat pengelasan seperti *porosity*, *slag inclusion*, *cracks*, dan sejenisnya dapat diketahui lebih awal sebelum menimbulkan kegagalan pada struktural. Proses ini tidak hanya untuk menjaga kualitas hasil pengelasan, namun juga memastikan keamanan dan ketahanan pada sambungan las. Terdapat berbagai jenis inspeksi yang dapat dilakukan untuk mendeteksi cacat pada pengelasan dengan metode non-destruktif (NDT) antara lain (Kah et al., 2014):

1. *Radiographic Testing* (RT), merupakan jenis inspeksi menggunakan sinar X atau gamma untuk menganalisis gambar internal dari sambungan las.
2. *Eddy Current Testing* (ECT), merupakan jenis inspeksi menggunakan arus eddy sebagai alat pendeteksi cacat permukaan dan dekat dengan material konduktif.
3. *Ultrasonic Testing* (UT), merupakan jenis inspeksi menggunakan gelombang ultrasonik untuk mendeteksi cacat internal dengan memantulkan gelombang dari cacat.

2.7 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Penelitian terdahulu yang mengkaji penerapan metode Six Sigma DMAIC, *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), dan *Theory of Inventive Problem*

Solving (TRIZ) telah banyak dilakukan di berbagai sektor industri. Metode-metode ini digunakan secara terpisah maupun terintegrasi untuk meningkatkan kualitas proses, mengidentifikasi potensi kegagalan, serta merancang solusi inovatif terhadap permasalahan yang kompleks. Berikut ini merupakan beberapa studi yang relevan dan menjadi landasan dalam penelitian ini.



Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu

No	Penelitian (Tahun)	Objek Penelitian	Variabel yang Diteliti	Metode					Aspek Penelitian
				DMAIC	FMEA	FTA	TRIZ	QFD	
1	A. Huda (2018)	Proses pengelasan proyek PT XYZ (offshore)	Jenis cacat (slag inclusion, lack of fusion, porosity), faktor penyebab	✓	✓				Identifikasi dan analisis penyebab cacat pengelasan serta prioritas perbaikan
2	Febriana & Hasbullah (2021)	Proses mixing industri ban (terdapat proses pengelasan)	Jenis cacat, akar penyebab, RPN	✓	✓	✓			Analisis dan perbaikan cacat dengan DMAIC dan FMEA, relevan untuk pengelasan
3	Jaisuk & Thawesaengkulthai (2018)	Komponen otomotif (termasuk pengelasan)	Tingkat cacat, faktor penyebab, solusi inovatif	✓	✓		✓		Pengurangan cacat dengan kombinasi DMAIC, FMEA, dan TRIZ

4	Hameed et al. (2022)	Redesign katup pelepas tekanan	Failure modes, RPN, kontradiksi desain, solusi inovatif	✓	✓	✓	FMEA dan TRIZ digunakan untuk mengidentifikasi dan menyelesaikan kegagalan desain; metode dapat diadaptasi untuk inovasi dan perbaikan proses pengelasan
5	Kaoudom et al. (2019)	Produk sport bar (termasuk proses pengelasan)	Jenis cacat permukaan, penyebab cacat	✓	✓		Penurunan cacat produk dengan DMAIC dan FMEA, relevan untuk pengelasan
6	Lisna et al. (2023)	Proses pengelasan proyek Feed Drum PT XYZ	Jenis cacat, RPN, prioritas perbaikan	✓			Identifikasi dan prioritas perbaikan cacat pengelasan
7	Jakti & Al Faritsy (2024)	Produk logam cor (lip handle & canal parts) di UD Cantenan	Jenis cacat (goresan, pinhole, pola asimetris), DPMO, sigma, faktor penyebab, RPN	✓	✓	✓	DMAIC untuk pemetaan proses, FMEA untuk prioritas risiko, TRIZ untuk solusi inovatif; sangat relevan untuk analisis dan perbaikan cacat pengelasan

Berdasarkan studi literatur dan penelitian terdahulu, pendekatan Six Sigma DMAIC telah banyak diterapkan di berbagai sektor industri manufaktur untuk menurunkan tingkat cacat produk, termasuk dalam konteks proses pengelasan. Beberapa penelitian sebelumnya telah menggunakan kombinasi metode DMAIC dan FMEA, serta sebagian lainnya telah mengintegrasikan TRIZ untuk merumuskan solusi perbaikan secara inovatif. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada proses produksi umum seperti pencampuran, perakitan, atau proses berbasis otomotif, dan belum secara spesifik menyoroti proses pengelasan logam berat dengan sistem produksi *make to order*, sebagaimana yang diterapkan di PT Boma Bisma Indra.

Selain itu, terdapat keterbatasan dalam integrasi menyeluruh antara metode DMAIC, FMEA, dan TRIZ dalam satu kerangka pemecahan masalah yang utuh. Banyak studi hanya menggunakan sebagian tahapan DMAIC atau tidak secara sistematis menindaklanjuti hasil identifikasi risiko dari FMEA ke tahap perbaikan menggunakan prinsip TRIZ. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan menerapkan metode Six Sigma secara menyeluruh, yang dimulai dari identifikasi masalah hingga solusi inovatif berbasis data, serta difokuskan pada konteks proses pengelasan di industri manufaktur logam berat.