

Analisis dan Usulan Perbaikan *Defect* Produk *Ducting* Menggunakan Metode Six sigma dan Fuzzy FMEA (Studi Kasus: PT Ravana Jaya)

Firman Maulana¹, Deny Andesta²

^{1,2}) Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik
Jl. Sumatera No. 101, Randuagung, Kec. Gresik, Gresik Jawa Timur 61121
Email: firmanmalnn@gmail.com, deny_andesta@umg.ac.id

ABSTRAK

PT. Ravana Jaya sebagai perusahaan fabrikasi *ducting* masih menghadapi tingkat *defect* yang berdampak pada penurunan kapabilitas proses dan potensi peningkatan biaya kualitas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *defect* dominan, mengukur kapabilitas proses menggunakan metode Six Sigma, menentukan prioritas risiko kegagalan melalui FMEA dan Fuzzy FMEA, serta merumuskan strategi perbaikan berbasis risiko. Penelitian dilakukan pada periode Mei–Juni 2025 dengan pendekatan DMAIC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *defect* dominan terjadi pada proses *welding* (61 cacat), diikuti oleh *grinding* (36 cacat) dan *marking* (28 cacat). Nilai rata-rata level sigma berturut-turut sebesar 3,15; 3,41; dan 3,52, yang mengindikasikan bahwa proses masih berada pada level 3σ dan belum memenuhi standar 6σ . Analisis FMEA mengidentifikasi kegagalan las tidak merata dan *porosity* sebagai risiko tertinggi, sedangkan pendekatan Fuzzy FMEA menghasilkan nilai FRPN sebesar 959 pada mode kegagalan yang sama sehingga menjadi prioritas utama perbaikan. Integrasi Six Sigma dan Fuzzy FMEA dalam penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dalam mengukur kapabilitas proses sekaligus menentukan prioritas risiko secara lebih diskriminatif dibandingkan dengan FMEA konvensional. Implementasi rekomendasi yang diusulkan berpotensi meningkatkan stabilitas proses, menurunkan *defect*, dan memperkuat sistem pengendalian kualitas secara berkelanjutan.

Kata kunci: Six sigma, FMEA, Fuzzy FMEA, DMAIC, *Ducting*, Pengendalian Kualitas.

ABSTRACT

PT. Ravana Jaya, a *ducting* fabrication company, still experiences *defect* levels that affect process capability and increase quality-related costs. This study aims to analyze dominant defects, measure process capability using the Six Sigma method, determine failure risk priorities through FMEA and Fuzzy FMEA, and formulate risk-based quality improvement strategies. The study was conducted during May–June 2025 using the DMAIC approach. The results indicate that the dominant defects occur in the *welding* process (61 defects), followed by *grinding* (36 defects) and *marking* (28 defects). The average sigma levels are 3.15, 3.41, and 3.52, respectively, indicating that the process capability remains at the 3σ level and has not reached the 6σ standard. FMEA analysis identifies uneven *welding* and *porosity* as the highest-risk failure modes, while the Fuzzy FMEA approach yields the highest FRPN value of 959 for the same failure mode, making it the top priority for improvement. The integration of Six Sigma and Fuzzy FMEA in this study provides a more comprehensive framework for evaluating process capability and prioritizing risks more discriminatively than conventional FMEA. The proposed improvements are expected to enhance process stability, reduce *defect* rates, and strengthen sustainable quality control systems.

Keywords: Six sigma, FMEA, Fuzzy FMEA, DMAIC, *Ducting*, Quality Control.

Pendahuluan

Dinamika industri manufaktur saat ini menunjukkan peningkatan tuntutan terhadap konsistensi kualitas produk dan efisiensi proses produksi, sehingga perusahaan dituntut mampu mengendalikan *defect* secara sistematis dan terukur [1]. *Ducting* sebagai komponen sistem HVAC memerlukan presisi tinggi karena berfungsi mendistribusikan udara dan menjaga kestabilan tekanan. *Defect* seperti las tidak merata, *porosity*, dan ketidaksesuaian dimensi dapat menyebabkan kebocoran serta menurunkan performa sistem ventilasi [2][3]. PT Ravana Jaya sebagai perusahaan fabrikasi *ducting* masih menghadapi *defect* dominan pada proses *welding*, *grinding*, dan *marking* selama periode Mei–Juni 2025, dengan *welding* sebagai penyumbang terbesar. Kondisi ini menunjukkan perlunya analisis mendalam untuk meningkatkan kapabilitas proses.

Six Sigma dengan pendekatan DMAIC digunakan untuk mengukur kinerja proses melalui DPU, DPMO, dan level sigma [4]. sedangkan FMEA menganalisis potensi kegagalan berdasarkan parameter *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*

yang menghasilkan *Risk Priority Number* (RPN) [5]. Namun, subjektivitas dalam penilaian FMEA konvensional mendorong penggunaan Fuzzy FMEA untuk meningkatkan akurasi prioritas risiko melalui pendekatan logika fuzzy [6].

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya menerapkan Six Sigma dan FMEA secara terpisah atau terbatas pada industri manufaktur mass production, penelitian ini mengintegrasikan analisis kapabilitas proses berbasis Six Sigma dengan pendekatan Fuzzy FMEA dalam konteks industri fabrikasi *ducting* yang memiliki karakteristik proses berbasis welding dan grinding. Integrasi ini tidak hanya berhenti pada identifikasi risiko, tetapi dilanjutkan dengan simulasi kuantitatif peningkatan level sigma serta penerjemahan hasil FRPN ke dalam rekomendasi teknis operasional seperti penyusunan *Welding Procedure Specification* (WPS). Dengan demikian, kontribusi penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menghubungkan analisis risiko kuantitatif dengan implementasi teknis di lapangan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode deskriptif kuantitatif untuk mengidentifikasi jenis-jenis *defect*, menelusuri faktor penyebabnya, serta merumuskan usulan perbaikan melalui penerapan Six Sigma dan FMEA. Kegiatan penelitian dilaksanakan di PT Ravana Jaya yang berlokasi di Gresik, dengan periode pengumpulan data berlangsung pada Mei hingga Juni 2025.

Tahap Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara dengan *Project Manager* dan tim *Quality Control*, serta melalui observasi langsung terhadap aktivitas produksi di PT Ravana Jaya. Adapun data sekunder diperoleh dari arsip internal perusahaan berupa laporan resmi rekapitulasi *defect* produk bulanan yang berasal dari bagian produksi.

Six sigma

Six Sigma merupakan pendekatan manajemen yang bersifat adaptif dan berorientasi pada peningkatan kinerja bisnis secara berkelanjutan [7]. Metode ini menekankan perbaikan kualitas berbasis analisis statistik yang dilaksanakan secara sistematis dan terstruktur untuk mengurangi variasi serta menghilangkan sumber utama permasalahan. Implementasinya dilakukan melalui tahapan *Define, Measure, Analyze, Improve, dan Control* (DMAIC) guna mencapai dan mempertahankan keunggulan operasional [8].

1. *Define* : Mengidentifikasi dan merumuskan permasalahan proses.
2. *Measure* : Melakukan pengukuran kinerja proses melalui perhitungan DPU, DPO, dan DPMO untuk menentukan level sigma, serta menyusun peta kendali-P sebagai alat evaluasi kestabilan proses.
3. *Analyze* : Menentukan akar penyebab menggunakan diagram *fishbone*.
4. *Improve* : Menghitung severity, occurrence, detection, dan RPN, kemudian melakukan fuzzifikasi untuk memperoleh nilai FRPN.
5. *Control* : Pada tahap ini dilakukan pengendalian menggunakan metode 5W+1H dan dibuat SOP.

Failure Mode Effect Analysis (FMEA)

Metode FMEA diterapkan untuk mengidentifikasi setiap mode kegagalan pada komponen serta menentukan tingkat prioritas risikonya [9]. Evaluasi dalam FMEA didasarkan pada tiga parameter utama, yaitu *severity, occurrence, dan detection*, yang digunakan untuk menilai tingkat risiko kegagalan dalam proses produksi [10]. Perkalian ketiga parameter tersebut menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebagai indikator tingkat risiko. Semakin tinggi nilai RPN, semakin besar tingkat risiko yang harus segera ditangani, sedangkan nilai yang lebih rendah menunjukkan risiko yang relatif dapat diterima [11]. Apabila terdapat nilai RPN yang sama, maka dilakukan analisis lanjutan menggunakan metode Fuzzy FMEA, yang memiliki keunggulan dibandingkan FMEA konvensional, terutama dalam mengurangi subjektivitas dan mengatasi kesamaan nilai RPN [12].

Teori Fuzzy

Fuzzy Logic merupakan pendekatan pengambilan keputusan berbasis aturan yang dirancang untuk mengatasi permasalahan dengan tingkat ketidakpastian dan ambiguitas yang tinggi. Pendekatan ini memanfaatkan konsep *gray area* antara dua kondisi ekstrem untuk menghasilkan keputusan yang lebih fleksibel [13]. Sistem Fuzzy terdiri dari himpunan fuzzy sebagai representasi variabel *input* dan *output*, serta aturan fuzzy (rule base) yang menghubungkan keduanya melalui mekanisme inferensi [14].

Penelitian ini menerapkan pendekatan deskriptif melalui studi kasus yang dilakukan di PT Ravana Jaya, perusahaan manufaktur *ducting*. Penelitian bertujuan untuk mengidentifikasi jenis *defect*, menentukan prioritas risiko kegagalan, menganalisis akar penyebab *defect*, serta merumuskan usulan perbaikan kualitas produk secara sistematis.

Hasil Dan Pembahasan

Pengumpulan Data

Data jumlah *defect* pada proses produksi *Ducting* di PT. Ravana Jaya bulan 20 Mei 2025 – 26 Juni 2025 adalah :

Tabel 1. Data Produksi dan *Defect Ducting* PT. Ravana Jaya Periode Mei 2025 - Juni 2025

No	Bulan	Komponen	Produksi	Marking	Drilling	Cutting	Welding	Grinding	Painting
1	Mei 2025	Square Ducting	220	9	8	6	18	12	4
		Elbow Ducting	220	7	9	3	16	10	4
2	Juni 2025	Square Ducting	190	10	4	7	16	7	4
		Elbow Ducting	190	2	5	4	11	7	5
Total			820	28	19	21	61	36	17

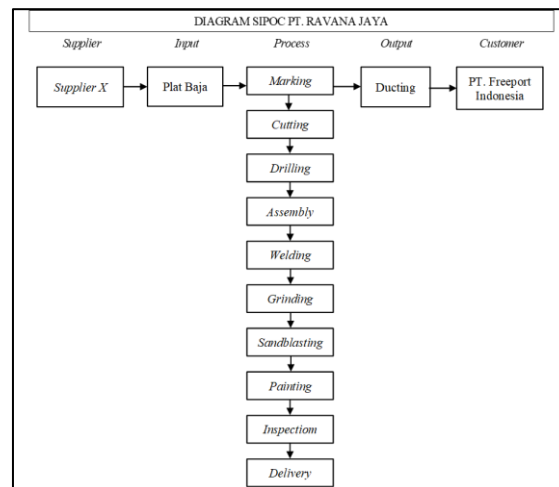
Berdasarkan data produksi di atas, terdapat tiga jenis *defect* utama yaitu welding (61 *defect*), grinding (36 *defect*), dan marking (28 *defect*). Penelitian ini difokuskan pada ketiga jenis *defect* tersebut karena memiliki frekuensi tertinggi dibandingkan dengan proses lainnya. Tahap berikutnya dilakukan analisis data dengan metode Six Sigma untuk menilai kapabilitas proses serta Fuzzy FMEA untuk menetapkan urutan prioritas risiko kegagalan.

Six sigma

Data dianalisis menggunakan metode Six Sigma melalui tahapan DMAIC untuk menentukan level sigma tiap jenis *defect*. Selanjutnya, akar penyebab diidentifikasi dengan diagram *fishbone* dan prioritas risiko ditetapkan menggunakan Fuzzy FMEA pada proses welding, grinding, dan marking.

1. Define

Pada tahap *Define*, permasalahan kualitas diidentifikasi secara sistematis melalui penyusunan diagram SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) dan penentuan *Critical to Quality* (CTQ) [15]. Diagram SIPOC digunakan untuk memetakan alur proses produksi secara menyeluruh, mulai dari pemasok hingga produk diterima pelanggan. Sementara itu, CTQ ditetapkan berdasarkan kebutuhan pelanggan serta jenis *defect* yang terjadi di perusahaan [16]. Meningkatnya persaingan industri fabrikasi menuntut perusahaan menghasilkan produk dengan kualitas, layanan, dan ketepatan waktu yang optimal. Oleh karena itu, pemenuhan kebutuhan pelanggan menjadi prioritas utama dalam upaya meningkatkan kepuasan dan daya saing perusahaan [17].



Gambar 1. Diagram SIPOC PT. Ravana Jaya

Penentuan Critical To Quality (CTQ)

Berdasarkan data inspeksi proses produksi, ditetapkan tiga CTQ untuk *defect* pada produk *ducting*.

Tabel 2. CTQ *Defect Ducting*

No	Defect	Keterangan
1	Marking	Ukuran tidak sesuai gambar kerja, alat ukur tidak terkalibrasi, <i>human error</i> saat mengukur
2	Grinding	<i>Overheat</i> , pengikisan berlebih, penggunaan batu gerinda yang sudah aus, operator kurang terlatih
3	Welding	Las tidak merata, <i>porisity</i> , <i>over spatter</i> , <i>undercut</i>

Tabel 3. Data Produksi dan *Defect Ducting* PT. Ravana Jaya

No	Bulan	Komponen	Produksi	Marking	Welding	Grinding
1	Mei 2025	Square Ducting	220	9	18	12
		Elbow Ducting	220	7	16	10
2	Juni 2025	Square Ducting	190	10	16	7
		Elbow Ducting	190	2	11	7
Total			820	28	61	36

2. Measure

Tahap ini bertujuan memperoleh data kuantitatif melalui perhitungan DPU, DPO, dan DPMO untuk menentukan level sigma proses [7].

Defect per Unit (DPU) : Menghitung rata-rata *defect* per unit.

$$DPU = \frac{\text{Total Defect}}{\text{Total Unit}} \quad (1)$$

Defect per Opportunity (DPO) : Menghitung probabilitas *defect* per peluang.

$$DPO = \frac{DPU}{CTQ} \quad (2)$$

Defect per Million Opportunity (DPMO) : Menghitung *defect* per satu juta kesempatan.

$$DPMO = DPO \times 1.000.000 \quad (3)$$

Sigma Level : Konversi nilai DPMO ke level sigma yang berkaitan dengan kapabilitas.

$$\text{Nilai Sigma} = \frac{NORMSINV(1 - DPMO)}{1.000.000} + 1.5 \quad (4)$$

Catatan : Nilai 1.5 adalah faktor pergeseran (shift) standar industri untuk mengantisipasi variasi jangka Panjang. Formula tersebut digunakan secara konsisten pada seluruh jenis *defect* sehingga memungkinkan replikasi perhitungan oleh peneliti lain.

Tabel 4. DPU, DPO, DPMO, Nilai Sigma *Defect Welding*

No	Bulan	DPU	CTQ	Nilai DPO	Nilai DPMO	Level Sigma
1	Mei	0.153	3	0.051	51.000	3.12
2	Juni	0.141	3	0.047	47.000	3.17
Rata - Rata						3.15

Tabel 5. DPU, DPO, DPMO, Nilai Sigma *Defect Grinding*

No	Bulan	DPU	CTQ	Nilai DPO	Nilai DPMO	Level Sigma
1	Mei	0.099	3	0.033	33.000	3.34
2	Juni	0.072	3	0.024	24.000	3.48
Rata - Rata						3.41

Tabel 6. DPU, DPO, DPMO, Nilai Sigma *Defect Marking*

No	Bulan	DPU	CTQ	Nilai DPO	Nilai DPMO	Level Sigma
1	Mei	0.071	3	0.023	23.000	3.5
2	Juni	0.063	3	0.021	21.000	3.53
Rata - Rata						3.52

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai rata-rata level sigma pada proses welding adalah 3,15, sedangkan pada proses grinding sebesar 3,41 dan pada proses marking mencapai 3,52. Seluruh proses masih berada pada kisaran 3σ dan belum mencapai target 6σ , sehingga menunjukkan kapabilitas proses yang masih perlu ditingkatkan. Proses welding menjadi yang paling kritis karena memiliki level sigma terendah, sehingga diprioritaskan dalam upaya perbaikan. Untuk memastikan kestabilan proses, dilakukan analisis menggunakan peta kendali P guna mengetahui apakah proporsi *defect* masih berada dalam batas kendali statistik. Perhitungan peta kendali P dilakukan berdasarkan proporsi *defect* terhadap total produksi pada setiap periode pengamatan.

Proporsi *defect* (bulan) :

$$P = \frac{\text{Jumlah unit cacat}}{\text{Jumlah unit diperiksa}} \quad (5)$$

Center Line (CL) : Rata-rata seluruh P selama banyaknya bulan (n) :

$$CL = \frac{\sum P_i}{n} \quad (6)$$

Upper Center Line (UCL) : Batas kendali atas :

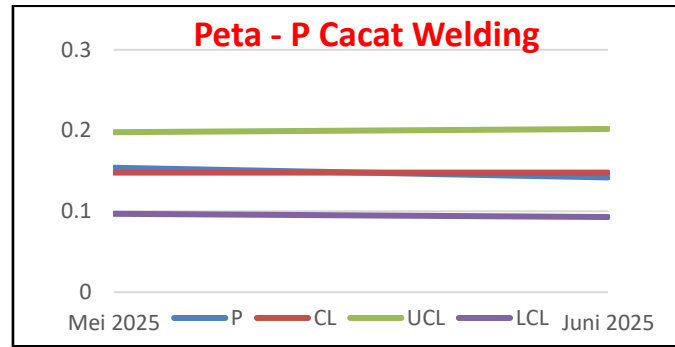
$$UCL = CL + 3 \sqrt{\frac{CL(1 - CL)}{n_i}} \quad (7)$$

Lower Center Line (LCL) : Batas kendali bawah :

$$LCL = CL - 3 \sqrt{\frac{CL(1 - CL)}{n_i}} \quad (8)$$

Tabel 7. CL, UCL, dan LCL *Defect Welding*

No	Bulan	CL	P	UCL	LCL
1	Mei 2025	0.148	0.154	0.198	0.097
2	Juni 2025	0.148	0.142	0.202	0.093

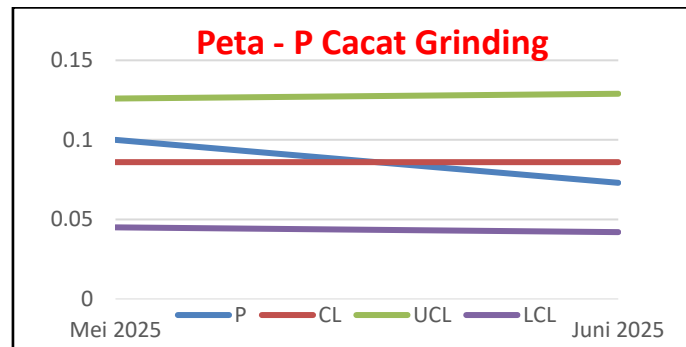


Gambar 2. Peta Kendali P *Defect Welding*

Gambar 2. menunjukkan bahwa proses produksi berada dalam kondisi terkendali, karena seluruh nilai proporsi masih berada di antara batas kendali atas (UCL) dan batas kendali bawah (LCL), sehingga tidak terdapat indikasi penyimpangan yang signifikan.

Tabel 8. CL, UCL dan LCL *Defect Grinding*

No	Bulan	CL	P	UCL	LCL
1	Mei 2025	0.086	0.1	0.126	0.045
2	Juni 2025	0.086	0.073	0.129	0.042

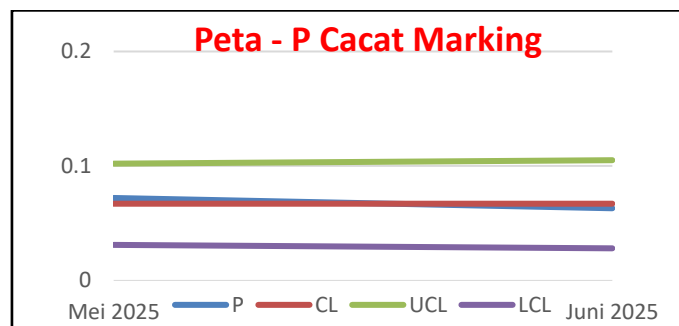


Gambar 3. Peta Kendali P *Defect Grinding*

Pada Gambar 3. menunjukkan bahwa proses produksi berada dalam kondisi terkendali, karena seluruh nilai proporsi masih berada di antara batas kendali atas (UCL) dan batas kendali bawah (LCL).

Tabel 9. CL, UCL, dan LCL *Defect Marking*

No	Bulan	CL	P	UCL	LCL
1	Mei 2025	0.067	0.072	0.102	0.031
2	Juni 2025	0.067	0.063	0.105	0.028



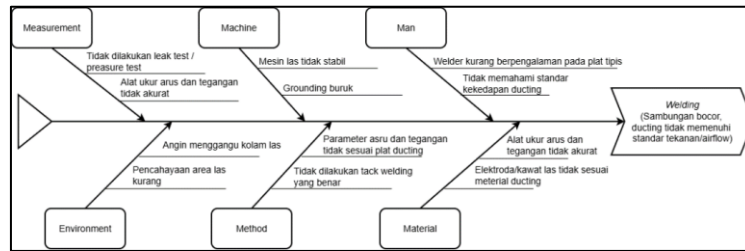
Gambar 4. Peta Kendali P *Defect Marking*

Pada Gambar 4. menunjukkan bahwa proses produksi berada dalam kondisi terkendali, karena seluruh nilai proporsi masih berada di antara UCL dan LCL.

3. Analyze

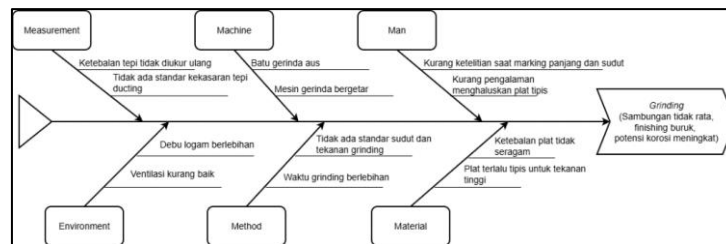
Tahap *Analyze* difokuskan pada penelusuran sumber penyebab terjadinya *defect* dalam proses produksi. Untuk mendukung proses tersebut, digunakan diagram *fishbone* sebagai alat analisis guna menggambarkan keterkaitan sebab dan

akibat secara sistematis terhadap permasalahan pada produk *ducting* [18]. Identifikasi dilakukan dengan mengklasifikasikan faktor penyebab ke dalam beberapa aspek utama, yaitu *man*, *machine*, *method*, *material*, dan *environment*, sehingga akar masalah dapat ditentukan secara lebih terorganisir dan komprehensif [19].



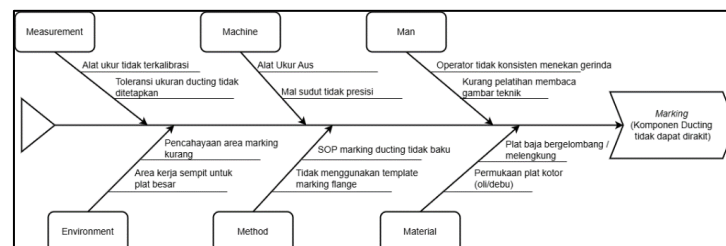
Gambar 5. Diagram Fishbone Defect Welding

1. *Man* : Welder yang kurang berpengalaman dalam pengelasan plat tipis menghasilkan sambungan tidak merata.
2. *Machine* : Mesin las yang tidak stabil serta *grounding* yang buruk menyebabkan busur las tidak konsisten.
3. *Method* : Tidak ada WPS *ducting* menyebabkan variasi parameter arus, tegangan, dan teknik pengelasan.
4. *Material* : Pemilihan elektroda atau kawat las yang tidak sesuai dengan material *ducting* serta kondisi sambungan yang kotor (oli, karat, debu) akan menurunkan kualitas las dan meningkatkan potensi kebocoran.
5. *Measurement* : Ketidadaan *leak test* atau *pressure test* menyebabkan *defect* las sering baru diketahui setelah *ducting* digunakan.
6. *Environment* : Angin di area kerja dapat mengganggu kolom las, sementara pencahayaannya yang kurang menyulitkan welder dalam mengontrol kualitas sambungan.



Gambar 6. Diagram Fishbone Defect Grinding

1. *Man* : Operator grinding yang kurang terampil sering memberikan tekanan yang tidak konsisten.
2. *Machine* : Batu gerinda yang aus dan gerinda yang bergetar menghasilkan penghalusan yang tidak merata.
3. *Method* : Tidak adanya standar sudut, tekanan, dan waktu grinding menyebabkan kualitas hasil sangat bergantung pada pengalaman operator.
4. *Material* : Ketebalan plat yang tidak seragam membuat hasil grinding tidak konsisten.
5. *Measurement* : Tidak adanya standar kekasaran tepi *ducting*.
6. *Environment* : Debu logam yang berlebihan dan ventilasi yang buruk mengganggu visibilitas operator serta mempercepat keausan peralatan grinding.



Gambar 7. Diagram Fishbone Defect Marking

1. *Man* : Faktor manusia berperan besar karena proses marking masih bersifat manual.
2. *Machine* : Peralatan yang digunakan dalam marking seperti penggaris baja, meteran, dan mal sudut dapat mengalami keausan
3. *Method* : Tidak adanya SOP marking yang baku menyebabkan variasi cara kerja antar operator.
4. *Material* : Plat *ducting* yang bergelombang atau melengkung menyulitkan proses penandaan.
5. *Measurement* : Alat ukur yang tidak terkalibrasi serta tidak ditetapkannya toleransi dimensi *ducting* menyebabkan hasil pengukuran sulit dikendalikan.
6. *Environment* : Pencahayaannya yang kurang dan area kerja yang sempit.

4. Improve

Pada tahap ini dirumuskan alternatif solusi serta rekomendasi perbaikan terhadap proses produksi berdasarkan hasil analisis *defect ducting* yang telah diidentifikasi sebelumnya melalui diagram *fishbone*. Fase *improve* dilaksanakan dengan menerapkan metode FMEA untuk mengevaluasi tingkat risiko setiap mode kegagalan. Penilaian dilakukan dengan menentukan parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection*, yang kemudian dihitung untuk memperoleh nilai RPN. Selanjutnya dilakukan proses fuzzifikasi menggunakan pendekatan logika Fuzzy melalui penetapan variabel input, output, serta klasifikasi peringkat FRPN, dengan bantuan *software* MATLAB 2015 [20].

Failure Mode Effect Analysis (FMEA)

Perhitungan FMEA dilakukan dengan mengalikan nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* untuk memperoleh angka yang disebut sebagai RPN. Nilai RPN yang semakin besar menunjukkan tingkat risiko kegagalan yang semakin tinggi dan memerlukan perhatian lebih lanjut [21]. Tahap ini merupakan fase perbaikan yang difokuskan pada penanganan masalah yang telah diidentifikasi dan dianalisis pada tahapan sebelumnya. Pada tahap ini, pendekatan FMEA dan Fuzzy FMEA digunakan sebagai dasar dalam merumuskan serta menentukan prioritas tindakan perbaikan [22].

Analisis Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Metode FMEA digunakan untuk mengidentifikasi berbagai mode kegagalan beserta dampaknya, serta menghitung nilai RPN dengan menilai tiga parameter utama berikut:

1. *Severity* (S), menggambarkan seberapa besar tingkat keparahan dampak yang muncul apabila terjadi kegagalan dalam proses produksi [23].
2. *Occurrence* (O), menunjukkan tingkat frekuensi atau probabilitas terjadinya kegagalan, di mana semakin tinggi nilainya maka semakin besar kemungkinan kegagalan tersebut terjadi [24].
3. *Detection* (D), menilai kemampuan sistem mendeteksi kegagalan sebelum produk sampai ke pelanggan; skala 1 sangat mudah terdeteksi, skala 10 sangat sulit terdeteksi [4].

Penentuan Responden dan Prosedur Penilaian S/O/D

Penilaian *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) melalui kuesioner terstruktur kepada tiga responden yang memiliki kompetensi langsung dalam proses produksi *ducting*, yaitu Kepala Produksi, QC Inspector, dan *Supervisor* Produksi. Responden dipilih menggunakan *purposive sampling* dengan kriteria pengalaman kerja minimal tiga tahun serta keterlibatan langsung pada proses *welding*, *grinding*, dan *marking*. Setiap responden memberikan penilaian secara independen menggunakan skala 1–10, kemudian nilai akhir S/O/D dihitung berdasarkan rata-rata aritmatika untuk mengurangi subjektivitas dan meningkatkan objektivitas hasil penilaian.

Dasar Penentuan Skala Penilaian

Penentuan skala untuk parameter *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* mengadaptasi pedoman FMEA yang dikembangkan oleh AIAG (*Automotive Industry Action Group*) dan telah luas diterapkan dalam studi pengendalian kualitas manufaktur. Dalam penelitian ini, pedoman tersebut disesuaikan dengan karakteristik teknis serta kondisi operasional pada industri fabrikasi *ducting* [25]. *Severity* ditentukan berdasarkan dampak kegagalan terhadap fungsi *ducting*, khususnya potensi kebocoran dan ketidaksesuaian dimensi. *Occurrence* didasarkan pada frekuensi *defect* selama periode produksi, sedangkan *Detection* ditentukan dari kemampuan sistem inspeksi dalam mendeteksi *defect* sebelum produk dikirim ke pelanggan.

Tabel 10. Tabel Skala *Severity*

Skor	Kriteria Dampak
1 – 2	Dampak sangat kecil, tidak mempengaruhi fungsi
3 – 4	Dampak ringan, tidak mengganggu fungsi utama
5 – 6	Dampak sedang, memerlukan rework
7 – 8	Dampak tinggi, produk tidak sesuai spesifikasi
9 – 10	Dampak sangat kritis, berpotensi menyebabkan kebocoran sistem

Tabel 11. Tabel Skala *Occurrence*

Skor	Frekuensi Kejadian
1 – 2	Sangat jarang
3 – 4	Jarang
5 – 6	Cukup sering
7 – 8	Sering
9 – 10	Sangat sering

Tabel 12. Tabel Skala *Detection*

Skor	Kemampuan Deteksi
1 – 2	Sangat mudah terdeteksi
3 – 4	Mudah terdeteksi

Skor	Kemampuan Deteksi
5 – 6	Cukup sulit terdeteksi
7 – 8	Sulit terdeteksi
9 – 10	Sangat sulit/tidak terdeteksi

Tabel 13. Nilai RPN FMEA

No	Tahapan Proses	Penyebab Potensi Kegagalan	S	O	D	RPN	Kategori
1	Marking (Pengukuran & Penandaan)	Ukuran tidak sesuai gambar kerja	8	6	7	336	M
		Alat ukur tidak terkalibrasi	9	5	7	315	M
		Human error saat mengukur	6	7	8	336	M
		Overheat, pengikisan berlebih	6	5	5	150	L-M
2	Grinding (Penghalusan)	Penggunaan batu gerinda yang sudah aus	9	6	7	378	M-H
		Operator kurang terlatih	8	6	8	384	M-H
		Las tidak merata, porisity	9	7	8	504	H
3	Welding (Pengelasan)	Over spatter	8	6	7	336	M
		Undercut	8	6	8	384	M-H

Fuzzy FMEA

Perhitungan Fuzzy FMEA pada penelitian ini dikembangkan dari data kuesioner FMEA dengan mengonversi nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* ke dalam bentuk himpunan Fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan. Masing-masing parameter kemudian dikelompokkan ke dalam lima kategori linguistik, yaitu *Very Low*, *Low*, *Medium*, *High*, dan *Very High*. Seluruh proses komputasi menggunakan bantuan *software* MATLAB 2015. Tahapan analisis mencakup proses fuzzifikasi, penyusunan dan penerapan aturan berbasis Fuzzy *IF-THEN* (rule base), serta tahap defuzzifikasi menggunakan metode *centroid* untuk menghasilkan nilai akhir FRPN [26].

Struktur Dan Validasi Rule Base Fuzzy FMEA

Penelitian ini menggunakan sistem inferensi Fuzzy dengan tipe *Mamdani* dengan tiga variabel *input* (*Severity*, *Occurrence*, *Detection*) dan satu variabel *output* (FRPN). Masing-masing variabel input dibagi ke dalam lima kategori linguistik, yaitu *Very Low* (VL), *Low* (L), *Medium* (M), *High* (H), dan *Very High* (VH). Dengan demikian, kombinasi aturan yang terbentuk berjumlah 125 rule ($5 \times 5 \times 5$). Struktur aturan disusun berdasarkan prinsip bahwa tingkat risiko meningkat seiring dengan meningkatnya tingkat keparahan, frekuensi kejadian, dan kesulitan deteksi.

1. IF *Severity* is *High* AND *Occurrence* is *High* AND *Detection* is *High* THEN FRPN is *Very High*
2. IF *Severity* is *High* AND *Occurrence* is *Medium* AND *Detection* is *High* THEN FRPN is *High*
3. IF *Severity* is *Medium* AND *Occurrence* is *High* AND *Detection* is *Medium* THEN FRPN is *High*
4. IF *Severity* is *Low* AND *Occurrence* is *Low* AND *Detection* is *Medium* THEN FRPN is *Low*
5. IF *Severity* is *Very High* AND *Occurrence* is *High* AND *Detection* is *Medium* THEN FRPN is *Very High*

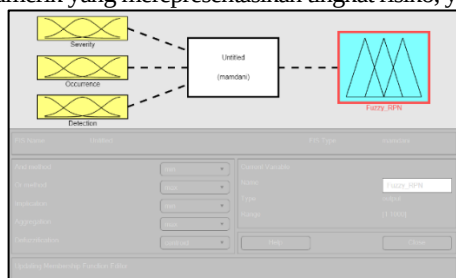
Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode *centroid* untuk memperoleh nilai *crisp* FRPN.

Kategori Nilai Fuzzy Risk Priority Number (FRPN)

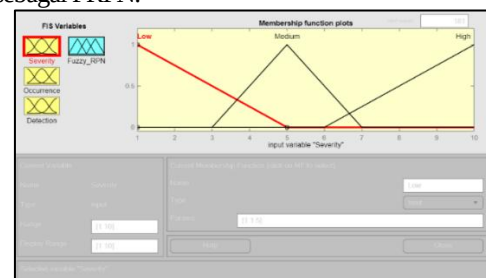
Tabel 14. Kategori Nilai FRPN

Rentang FRPN	Kategori Risiko
0 – 200	Very Low (VL)
201 – 400	Low (L)
401 – 600	Medium (M)
601 – 800	High (H)
801 – 1000	Very High (VH)

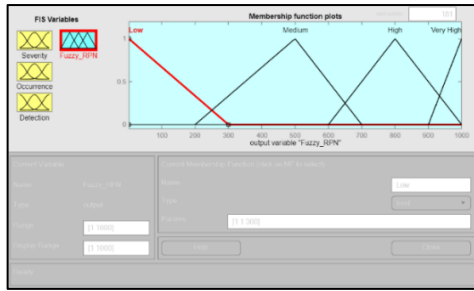
Klasifikasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam menetapkan urutan prioritas perbaikan, di mana kategori *Very High* menjadi fokus utama dalam pelaksanaan rekomendasi teknis. Hasil evaluasi Fuzzy selanjutnya dikonversi ke dalam bentuk nilai numerik yang merepresentasikan tingkat risiko, yang dikenal sebagai FRPN.



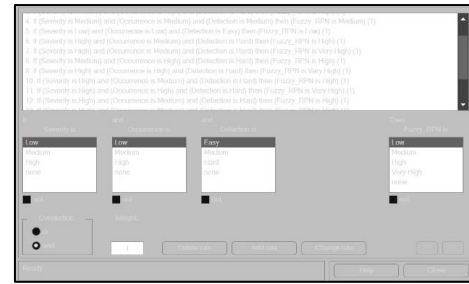
Gambar 8. Input dan Output Fuzzy FMEA



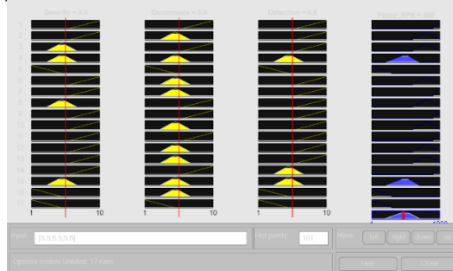
Gambar 9. Input Angka Severity, Occurrence dan Detection



Gambar 10. Input Angka Output Fuzzy RPN



Gambar 11. Input Rule If-Then Perhitungan RPN Fuzzy



Gambar 12. Hasil Perhitungan RPN Fuzzy

Tabel 15. Hasil Rekapitulasi Perhitungan Fuzzy FMEA

No	Tahapan Proses	Penyebab Potensi Kegagalan	S	O	D	Fuzzy RPN	Kategori
1	Marking (Pengukuran & Penandaan)	Ukuran tidak sesuai gambar kerja	8	6	7	815	VH
		Alat ukur tidak terkalibrasi	9	5	7	815	VH
		Human error saat mengukur	6	7	8	800	VH
2	Grinding (Penghalusan)	Overheat, pengikisan berlebih	6	5	5	461	M
		Penggunaan batu gerinda yang sudah aus	9	6	7	815	VH
		Operator kurang terlatih	8	6	8	824	VH
3	Welding (Pengelasan)	Las tidak merata, porosity	9	7	8	959	VH
		Over spatter	8	6	7	815	VH
		Undercut	8	6	8	824	VH

Berdasarkan hasil perhitungan Fuzzy FMEA, urutan prioritas risiko berbeda dibandingkan FMEA konvensional. Peringkat 1 ditempati oleh *defect welding* dengan penyebab las tidak merata dan *porosity*. Peringkat 2 meliputi *defect grinding* akibat operator kurang terlatih serta *defect welding* dengan penyebab *undercut*. Peringkat 3 terdiri dari *defect welding* akibat *over spatter*, *defect grinding* karena penggunaan batu gerinda yang aus, serta *defect marking* akibat ketidaksesuaian ukuran dan alat ukur yang tidak terkalibrasi. Mode kegagalan nilai FRPN tertinggi merupakan prioritas utama perbaikan, yaitu melalui penetapan *Welding Procedure Specification* (WPS) khusus. Untuk peringkat 2, dilakukan standarisasi parameter grinding dan peningkatan kompetensi operator. Sementara itu, peringkat 3 direkomendasikan kalibrasi rutin alat ukur, penggunaan *jig* atau *template* marking, penyusunan SOP marking yang lebih terstruktur, serta penggunaan alat ukur arus dan tegangan yang terkalibrasi guna meningkatkan stabilitas proses.

Tabel 16. Perbandingan FMEA dan Fuzzy FMEA

Mode Kegagalan	RPN Rank	FRPN Rank
Welding – Porosity	1	1
Grinding – Operator	3	2
Welding – Undercut	2	2

Perubahan peringkat menunjukkan bahwa pendekatan Fuzzy mampu menangkap ambiguitas penilaian yang tidak terakomodasi dalam perkalian linear RPN.

Analisis Sensitivitas Sederhana

Untuk menguji sensitivitas model, dilakukan simulasi perubahan ± 1 pada nilai *Occurrence* untuk *defect welding* dengan penyebab las tidak merata dan *porosity*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan satu tingkat pada nilai *Occurrence* menyebabkan kenaikan nilai FRPN secara signifikan, sedangkan penurunan satu tingkat menghasilkan penurunan FRPN yang besar. Hal ini menunjukkan bahwa parameter *Occurrence* memiliki pengaruh kuat terhadap prioritas risiko, sehingga upaya pengendalian frekuensi kejadian *defect* menjadi strategi paling efektif dalam menurunkan risiko secara keseluruhan. Analisis ini memperkuat validitas penetapan *welding* sebagai prioritas utama perbaikan. Untuk menguji stabilitas model, dilakukan simulasi perubahan nilai *Occurrence* pada kegagalan *welding* (S = 9, O = 7, D = 8). Selain parameter *Occurrence*,

simulasi juga dilakukan pada perubahan ± 1 pada *Severity* dan *Detection*. Hasil menunjukkan bahwa perubahan pada *Occurrence* memberikan dampak paling signifikan terhadap FRPN, sehingga strategi pengendalian frekuensi *defect* menjadi prioritas utama.

- Jika O meningkat menjadi 8, nilai FRPN meningkat dari 959 menjadi ± 975 .
- Jika O menurun menjadi 6, nilai FRPN menurun menjadi ± 930 .

5. Control

Tahap terakhir Six Sigma untuk memastikan tindakan perbaikan tetap konsisten serta mencegah proses kembali ke kondisi sebelumnya dengan metode 5W+1H yang dimana menggunakan pertanyaan *What, Where, Why, Who, When, dan How* untuk merumuskan tindakan perbaikan secara sistematis.

Tabel 17. Analisis 5W+1H *Defect Ducting* PT. Ravana Jaya

Jenis Defect	Defect Marking	Defect Grinding	Defect Welding
<i>What</i>	Kalibrasi alat ukur, penggunaan <i>jig/template</i> , SOP marking dan <i>double check</i> .	Standarisasi parameter grinding, penggantian batu gerinda berkala, pelatihan operator, inspeksi visual.	Penetapan WPS khusus <i>ducting</i> , kontrol parameter las, <i>leak/pressure test</i> , alat ukur terkalibrasi.
<i>Why</i>	Untuk mencegah salah ukur, <i>miss marking</i> , ketidaksesuaian dimensi yang menyebabkan <i>reject</i> .	Untuk mengurangi <i>defect permukaan, over grinding</i> , dan ketidakteraturan tekstur.	Untuk mencegah <i>porosity, undercut</i> , dan las tidak merata yang beresiko kebocoran.
<i>Who</i>	Operator marking, QC <i>Inspector</i> , dan Manajer Produksi.	Operator grinding, QC <i>Inspector</i> , dan Manajer Produksi.	Operator marking, QC <i>Inspector</i> , dan Manajer Produksi.
<i>Where</i>	Area produksi PT. Ravana Jaya	Area grinding PT. Ravana Jaya	Area welding PT. Ravana Jaya
<i>When</i>	Sebelum proses fabrikasi dan saat <i>in-process inspection</i> .	Selama proses grinding dan sebelum tahap proses berikutnya.	Selama proses welding dan setelah welding (<i>final inspection</i>)
<i>How</i>	Kalibrasi alat ukur secara rutin, gunakan <i>jig/template</i> .	Set parameter standar, training operator, inspeksi ketebalan.	Terapkan WPS, <i>briefing welder</i> , monitoring arus/tegangan, <i>leak test</i> .

Evaluasi Dampak Usulan Perbaikan

Dilakukan evaluasi dampak usulan perbaikan melalui simulasi berbasis data historis periode Mei–Juni 2025 fokus pada *defect welding* sebagai prioritas utama (FRPN tertinggi). Dari total produksi 820 unit, tercatat 61 *defect welding* dengan rata-rata DPMO ± 49.000 dan level sigma 3,15. Simulasi penurunan *defect* sebesar 20% (61 menjadi 49 defect) menunjukkan DPU turun dari 0,074 menjadi 0,060 dan DPMO diproyeksikan menurun menjadi ± 39.000 . Berdasarkan konversi DPMO, level sigma diperkirakan meningkat menjadi 3,30–3,35. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian frekuensi *defect* berdampak langsung pada peningkatan kapabilitas proses. Simulasi penurunan *defect* sebesar 20% merupakan proyeksi berbasis data historis dan belum mencerminkan hasil implementasi aktual. Level sigma pada proses welding sebesar 3,15 sejalan dengan beberapa penelitian pada industri fabrikasi yang umumnya berada pada rentang 3–4 sigma sebelum intervensi perbaikan. Pola kegagalan dominan pada proses pengelasan juga konsisten dengan literatur yang menyebutkan bahwa variabilitas operator dan parameter arus las menjadi faktor utama defect struktural.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini menggunakan data historis selama dua bulan (Mei–Juni 2025), sehingga stabilitas jangka panjang proses belum dapat dievaluasi secara longitudinal. Periode pengamatan yang relatif singkat dapat memengaruhi tingkat generalisasi hasil, khususnya dalam mengidentifikasi variasi musiman atau fluktuasi permintaan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih merepresentasikan kondisi proses pada periode observasi dan memerlukan validasi lanjutan dengan cakupan data yang lebih panjang.

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, proses produksi *ducting* di PT. Ravana Jaya masih mengalami tingkat *defect* yang signifikan pada proses welding, grinding, dan marking, dengan welding sebagai penyumbang tertinggi (61 defect). Pengukuran kapabilitas proses menggunakan Six Sigma menunjukkan rata-rata level sigma sebesar 3,15 (welding), 3,41 (grinding), dan 3,52 (marking), yang masih pada level 3σ dan belum mencapai target 6σ , sehingga diperlukan upaya perbaikan berkelanjutan. Analisis FMEA mengidentifikasi mode kegagalan tertinggi pada proses welding, khususnya las tidak merata dan *porosity*. Pendekatan Fuzzy FMEA menghasilkan nilai FRPN tertinggi sebesar 959 pada mode kegagalan yang sama, sehingga ditetapkan sebagai prioritas utama perbaikan.

Rekomendasi perbaikan meliputi penyusunan dan penerapan WPS khusus *ducting*, standarisasi parameter grinding, peningkatan kompetensi operator, kalibrasi alat ukur, serta penyusunan SOP yang lebih sistematis. Simulasi menunjukkan bahwa pengendalian *defect welding* berpotensi meningkatkan level sigma dari 3,15 menjadi sekitar 3,30–3,35 dan menurunkan DPMO hingga $\pm 20\%$. Dengan demikian, penerapan Six Sigma yang dipadukan dengan Fuzzy FMEA efektif

dalam menghasilkan usulan tindakan perbaikan yang terstruktur dan terukur berdasarkan analisis data guna meningkatkan kapabilitas proses secara berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] D. Wahjudi and A. Cahyadi, "Implementasi FMEA untuk Peningkatan Produktifitas di PT. X," *J. Tek. Mesin*, vol. 19, no. 2, pp. 45–50, 2022, doi: 10.9744/jtm.19.2.45-50.
- [2] Y. S. W. W. S. Hardiansah, "Analisis Risiko Kecelakaan Kerja Dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) (Studi Kasus: Bengkel Dinamis)," *J. Tekst. J. Keilmuan dan Apl. Bid. Tekst. dan Manaj. Ind.*, vol. 7, no. 1, pp. 27–36, 2024.
- [3] A. Suyatno, B. E. Putra, M. F. Yuditama, Y. Ferdiansyah, and Y. Prastyo, "Studi Literatur Review Analisis Pengendalian Kualitas Menggunakan Metode Fmea," *J. Manag. Innov. Entrep.*, vol. 2, no. 4, pp. 2455–2465, 2025, doi: 10.70248/jmie.v2i4.2343.
- [4] A. Fatoni and F. Yuamita, "Analisis pengendalian kualitas produk menggunakan metode six sigma dan finea pada perusahaan manufaktur logam 1," *J. Ilm. Res. Student*, vol. 3, no. 1, pp. 501–512, 2026, doi: <https://doi.org/10.61722/jirs.v3i1.8697>.
- [5] H. W. Siska Apri Andita1, Siti Rahayu1, "Jurnal KaLIBRASI Penerapan Metode Six Sigma dan FMEA untuk Meningkatkan Kualitas," *Karya Lintas Ilmu Bid. Rekayasa Arsitektur, Sipil, Ind.*, vol. 8, no. 2, pp. 58–69, 2025.
- [6] E. Krisnaningsih, P. Gautama, and M. F. K. Syams, "Menggunakan Metode Fta Dan Fmea," *J. InTent*, Vol. 4, No. 1, Januari – Juni 2021, vol. 4, no. 1, pp. 41–54, 2021.
- [7] V. Gaspersz, "Pedoman Implementasi Program Six Sigma," *Sustain.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2022.
- [8] N. L. O. Jaya, Ipal rahmat, Nuha Agusyarif Rezka, "Penerapan Metode Six Sigma DMAIC dengan Pendekatan Failure Mode and Effect Analysis pada Produk Roti Alfitra Bakery," *J. Ilm. Multidisiplin*, vol. 4, no. 1, 2025.
- [9] C. A. Rakhmadina and D. Triardianto, "Penerapan Metode FMEA dan 5W1H dalam Analisis Kerusakan dan Perencanaan Kegiatan Perawatan pada Mesin Petik Teh Tipe Double di PT XYZ," (National Conf. ..., 2024, doi: <https://doi.org/10.25047/nacia.v2i1.242>.
- [10] M. Sholihah and R. Hidayat, "Analisis Dan Pengelolaan Risiko Pada Proses Produksi Panel Listrik Menggunakan Pendekatan Failure Mode and Effects Analysis Dan Fault Tree Analysis," *J@ti Undip J. Tek. Ind.*, vol. 20, no. 2, pp. 155–167, 2025, doi: 10.14710/jati.20.2.155-167.
- [11] R. R. Dwi Satya and N. Nurdeni, "Peningkatan Kualitas Produk Normal Noodle Dengan Menggunakan Metode Six Sigma Dan Fuzzy Fmea," *Fakt. Exacta*, vol. 15, no. 2, pp. 151–161, 2022, doi: 10.30998/faktorexacta.v15i2.13429.
- [12] A. H. Astyanti, E. Wuryaningtyas Yunitasari, and D. A. Susanti, "Pengendalian Kualitas Produk Menggunakan Fault Tree Analysis (Fta), Six Sigma Dan Fuzzy Fmea Pada Pt Homeware Internasional Indonesia," *Semin. Nas. Penelit. Mhs. Tek.* 2023, pp. 180–194, 2023.
- [13] N. Febriyana and S. Hartini, "Penerapan Metode Six Sigma DMAIC dan FUZZY FMEA untuk Perbaikan Kualitas Rokok di PT XYZ (Studi Kasus: SKT PT XYZ)," *Ind. Eng. Online J.*, pp. 1–10, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/ieoj/article/view/40271>
- [14] G. A. Pragastio, A. K. Garside, and T. E. Saputro, "Six Sigma Approach with Integration of FMEA-Fuzzy SWARA-Fuzzy WASPAS to Minimize Bottled Water Defects," *J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 22, no. 1, pp. 113–123, 2023, doi: 10.23917/jiti.v22i1.21370.
- [15] P. A. Hapsary, E. Prasetyaningsih, and P. Renosori, "Penerapan Lean Six Sigma untuk Mereduksi Pemborosan pada Departemen Finishing Produksi Karung," *Pros. Tek. Ind.*, vol. 7, no. 1, pp. 8–16, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.29313/ti.v7i1.25741>.
- [16] R. fizri Nugraha, Hady Sofyan, and Afif Fawa Idul Fata, "Product Quality Control Using Six-Sigma Method and Failure Mode and Effect Analysis at Core Board Purwakarta Company," *J. Teknol.*, vol. 14, no. 2, pp. 508–517, 2024, doi: 10.51132/teknologika.v14i2.389.
- [17] A. Heparta Sav, "Usulan Perbaikan Untuk Menurunkan Aktivitas Rework Pada Kabinet Upright Piano Pwh Menggunakan Metode Six Sigma Dan Fmea (Failure Mode and Effect Analysis)," *J. Sains Student Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 583–590, 2018.
- [18] M. Rifaldi and W. Sudarwati, "Penerapan Metode Six Sigma dan FMEA Sebagai Usaha untuk Mengurangi Cacat pada Produk Bracket," *Semin. Nas. Sains dan Teknol.* 2024, no. 9, pp. 1–9, 2024.
- [19] H. Hazmi, A. Fauzi, and R. N. Sari, "Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications Application of Six Sigma & FMEA Methods to Improve The Quality of Laminated Tube Packaging," *J. Artif. Intell. Eng. Appl.*, vol. 4, no. 2, pp. 2808–4519, 2025, doi: <https://doi.org/10.59934/jaiea.v4i2.804>.
- [20] S. Aisyah, "IMPLEMENTASI FAILURE MODE EFFECT ANALYSIS (FMEA) DAN FUZZY LOGIC SEBAGAI PROGRAM PENGENDALIAN KUALITAS PT Svenska Kugellahar Fabricen (SKF) Indonesia adalah salah FMEA adalah metode untuk mengidentifikasi dan menganalisa," *J. Ind. Eng. Manag. Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–14, 2011.
- [21] M. A. Muzani and S. Luthfianto, "Analisis Pengendalian Kualitas Produksi dengan Menggunakan Pendekatan

- Logika Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis (FMEA),” *PENDIPA J. Sci. Educ.*, vol. 9, no. 2, pp. 423–432, 2025, doi: 10.33369/pendipa.9.2.423-432.
- [22] A. T. Panudju, I. Mahuda, U. Marfuah, M. Mutmainah, and W. Sudarwati, “The integration of Fuzzy FMEA and AHP methods for optimizing of logistic systems,” *J. Ind. Serv.*, vol. 10, no. 2, p. 200, 2024, doi: 10.62870/jiss.v10i2.27727.
- [23] N. R. Armevia and I. Nugraha, “Analisis Pengendalian Kualitas Produk Pakan Ternak pada PT XYZ dengan Metode Six Sigma dan FMEA,” *Ind. J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 9, no. 3, pp. 712–724, 2025, doi: 10.37090/indstrk.v9i3.2148.
- [24] R. Kusumawardani and A. A. Widyatmoko, “Enhancing Pharma Manufacturing Efficiency: Integrating Lean Six Sigma and Fuzzy FMEA for Waste Reduction,” *Spektrum Ind.*, vol. 22, no. 2, pp. 179–192, 2024, doi: 10.12928/si.v22i2.199.
- [25] Automotive Industry Action Group (AIAG); Verband der Automobilindustrie (VDA), *The FMEA handbook : failure mode and effects analysis*, 1st Editio. Southfield, MI, USA: Automotive Industry Action Group (AIAG), 2019.
- [26] A. B. Rizkyllah and E. Aryanny, “Product Defect Level Analysis Bone Plate with The Six Sigma Method and Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis (F-FMEA),” *Indones. J. Innov. Stud.*, vol. 26, no. 4, pp. 1–15, 2025, doi: 10.21070/ijins.v26i4.1477.