

Evaluasi Kegagalan Proses Waste Water Treatment Dengan Menggunakan Metode Failure Mode And Effect Analysis (FMEA) Dan Root Cause Analysis (RCA) Di Industri Pupuk

Muhammad Syafrizal Viki Ardiansyah¹, Deny Andesta²

^{1,2)} Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik

Jl. Sumatera No.101, Gn. Malang, Randuagung, Kec. Kebomas, Kabupaten Gresik, Jawa Timur 61121

Email: muhsyafrizal03@gmail.com, deny_andesta@umg.ac.id

ABSTRAK

Pertumbuhan sektor industri menuntut sistem pengolahan limbah cair yang andal untuk memenuhi baku mutu lingkungan. Studi terdahulu yang menerapkan FMEA dan Root Cause Analysis (RCA) pada pengolahan air limbah umumnya berfokus pada efluen industri umum, sehingga kajian spesifik mengenai efluen industri pupuk berbeban nitrogen tinggi masih terbatas. Konteks ini penting karena limbah pupuk dicirikan oleh kadar amonia (NH_3) tinggi dan proses biologis yang kompleks. Penelitian ini mengevaluasi kegagalan proses pada unit Waste Water Treatment (WWT) PT Aneka Jasa Grhadika yang mengolah limbah cair Pabrik IIB PT Petrokimia Gresik. Data operasional selama Juli 2025 menunjukkan kondisi off-specs persisten pada lima parameter kritis, yaitu NH_3 , TSS, COD, pH, dan PO_4 . FMEA digunakan untuk memprioritaskan mode kegagalan berdasarkan Risk Priority Number (RPN) melalui penilaian expert panel terstruktur. Selanjutnya, RCA dengan diagram Fishbone dan metode 5 Whys diterapkan pada mode kegagalan berisiko tertinggi. Hasil FMEA menunjukkan kegagalan nitrifikasi sebagai risiko paling kritis (NH_3 tinggi, RPN = 320), diikuti TSS tinggi (RPN = 128) dan COD tinggi (RPN = 108). RCA menelusuri akar penyebab utama pada absennya SOP preventive maintenance membran diffuser aerasi dan tidak adanya pemantauan backpressure secara real-time. Tindakan korektif berupa penggantian diffuser, optimalisasi DO pada 2,0–4,0 mg/L, serta penegakan jadwal desludging harian meningkatkan performa nitrifikasi, ditunjukkan oleh kadar NH_3 pasca-intervensi yang konsisten di bawah ambang regulasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi FMEA–RCA efektif menggeser pengelolaan WWT dari pendekatan reaktif menuju pengendalian kualitas preventif.

Kata kunci: Waste Water Treatment, FMEA, RCA, Amonia, Nitrifikasi, Preventive Maintenance

ABSTRACT

The growth of the industrial sector demands a reliable wastewater treatment system to meet environmental quality standards. Previous studies applying FMEA and Root Cause Analysis (RCA) to wastewater treatment generally focused on general industrial effluents, resulting in limited specific studies on high-nitrogen fertilizer industry effluents. This context is important because fertilizer waste is characterized by high ammonia (NH_3) levels and complex biological processes. This study evaluated process failures at the Waste Water Treatment (WWT) unit of PT Aneka Jasa Grhadika, which processes wastewater from PT Petrokimia Gresik's Plant IIB. Operational data from July 2025 showed persistent off-spec conditions in five critical parameters: NH_3 , TSS, COD, pH, and PO_4 . FMEA was used to prioritize failure modes based on Risk Priority Number (RPN) through a structured expert panel assessment. Furthermore, RCA, using a Fishbone diagram and the 5 Whys method, was applied to the highest-risk failure modes. FMEA results indicated nitrification failure as the most critical risk (high NH_3 , RPN = 320), followed by high TSS (RPN = 128) and high COD (RPN = 108). RCA traced the main root causes to the lack of a preventive maintenance SOP for aeration membrane diffusers and to the lack of real-time backpressure monitoring. Corrective actions such as diffuser replacement, DO optimization at 2.0–4.0 mg/L, and enforcement of a daily desludging schedule improved nitrification performance, as evidenced by consistent post-intervention NH_3 levels below the regulatory threshold. This study demonstrates that FMEA–RCA integration effectively shifts WWT management from a reactive approach to preventive quality control.

Keywords: Waste Water Treatment, FMEA, RCA, Ammonia, Nitrification, Preventive Maintenance.

Pendahuluan

Pertumbuhan sektor industri yang pesat menuntut setiap perusahaan mengintegrasikan aspek produktivitas dengan tanggung jawab lingkungan demi keberlanjutan operasional. Isu pencemaran lingkungan semakin kritis seiring pengetatan regulasi pemerintah terhadap standar baku mutu limbah industri melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016 [1]. Kegagalan dalam mengelola dampak lingkungan berisiko mengancam ekosistem dan kelangsungan bisnis perusahaan.

Pengelolaan limbah cair melalui sistem Waste Water Treatment (WWT) merupakan instrumen vital dalam mitigasi risiko pencemaran air [2]. Dalam konteks industri pupuk, kompleksitas pengolahan biologis semakin tinggi akibat kandungan senyawa nitrogen terutama amonia (NH_3) yang menjadi parameter paling kritis dan sulit diolah karena bergantung pada aktivitas bakteri nitrifikasi yang sensitif terhadap kondisi lingkungan [3].

Meskipun metode kendali mutu seperti *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Root Cause Analysis* (RCA) telah banyak diimplementasikan dalam pengolahan air limbah, mayoritas studi terdahulu memiliki keterbatasan kritis yang memicu kesenjangan kajian (*research gap*). Penelitian terdahulu oleh Faradina dan Ratni [4] mengaplikasikan FMEA pada lumpur tinja domestik, sedangkan Bintara dan Amrina [5] menerapkannya pada pengolahan limbah susu yang didominasi kontaminan organik. Kuncoro et al. [6] memang menerapkan FMEA-RCA pada unit *effluent treatment* PT Petrokimia Gresik, namun kajiannya masih bersifat deskriptif makro berbasis kepatuhan manajemen lingkungan ISO 14001, tanpa mendalami dinamika mikro-biologis proses nitrifikasi amonia dan ketiadaan verifikasi kuantitatif dari usulan perbaikan yang dirumuskan. Secara akademis, terdapat tiga kesenjangan utama dalam literatur pengolahan air limbah berbasis FMEA-RCA:

1. Spesifisitas Karakteristik Limbah: Minimnya literatur FMEA-RCA yang berfokus secara eksklusif pada instalasi WWT berbeban senyawa nitrogen tinggi (amonia) dengan dinamika pengolahan biologis yang kompleks.
2. Transparansi dan Validitas Penilaian Risiko: Penilaian bobot risiko (*Severity, Occurrence, Detection*) pada FMEA di masa lalu kerap bersifat subjektif tanpa rubrik terverifikasi dan penjelasan penentuan komposisi panel ahli secara transparan.
3. Ketiadaan Evaluasi Pasca-Intervensi Kuantitatif: Banyak studi berhenti pada perumusan rekomendasi perbaikan tanpa mengukur efektivitas tindakan perbaikan secara empiris pasca-implementasi.

Untuk mengisi kesenjangan akademis tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan kerangka kerja FMEA dan RCA [7] secara sistematis pada sistem pengolahan limbah cair industri pupuk. Kontribusi unik (*contribution statement*) dari penelitian ini terletak pada pengembangan rubrik penilaian FMEA terstandardisasi berbasis konsensus *expert panel* multidisiplin untuk proses WWT, penelusuran akar penyebab kegagalan nitrifikasi amonia [8] secara mendalam menggunakan diagram Fishbone dan analisis 5 Whys, serta pembuktian empiris-kuantitatif mengenai efektivitas tindakan perbaikan operasional melalui analisis perbandingan data performa sebelum (*before*) dan sesudah (*after*) tindakan intervensi. Dengan pendekatan ini, pengelolaan unit WWT diharapkan dapat bertransisi secara ilmiah dari tindakan reaktif ke paradigma pengendalian kualitas preventif yang terukur.

Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan di unit Waste Water Treatment (WWT) Pabrik IIB PT Petrokimia Gresik yang dioperasikan oleh PT Aneka Jasa Grhadika. Data kuantitatif dikumpulkan selama satu bulan penuh (Juli 2025), mencakup hasil pengukuran harian seluruh parameter baku mutu treated water. Periode satu bulan dipilih karena mewakili satu siklus penuh operasional rutin dengan kondisi beban limbah yang representatif dari pabrik pupuk pada bulan produksi normal.

Prosedur FMEA dengan Expert Panel Terstruktur

FMEA adalah metode analisis risiko sistematis yang mengidentifikasi potensi mode kegagalan suatu proses, menganalisis dampaknya, dan menentukan prioritas tindakan perbaikan[9]. Ketiga komponen penilaian FMEA adalah: Severity (S) yang mengukur tingkat keparahan dampak, Occurrence (O) yang mengukur frekuensi terjadinya kegagalan, dan Detection (D) yang mengukur kemampuan sistem pengendalian mendeteksi kegagalan sebelum berdampak[10]. Nilai Risk Priority Number (RPN) dihitung sebagai:

$$\text{RPN} = S \times O \times D \quad (1)$$

Penilaian skor FMEA dilakukan melalui metode Focus Group Discussion (FGD) yang melibatkan lima orang expert dengan kualifikasi sebagai berikut: (1) Process Engineer unit WWT; (2) Supervisor Operasi WWT; (3) Lab Analyst parameter lingkungan; (4) Instrument Engineer sistem kontrol; dan (5) Supervisor Maintenance mekanikal. Konsensus skor ditetapkan melalui musyawarah dengan bobot suara yang setara.

Skala penilaian S, O, dan D mengacu pada rubrik standar yang diadaptasi dari SAE J1739 dan Stamatis (2003), sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Skala 1–10 digunakan dengan deskriptor operasional yang spesifik untuk konteks proses WWT, sehingga penilaian dapat direplikasi dan diverifikasi oleh pihak eksternal.

Table 1 Rubrik Penilaian Severity, Occurrence, dan Detection (Diadaptasi dari SAE J1739)

Skor	Severity (S)	Deskriptor S (WWT context)	Skor	Occurrence (O)	Skor	Detection (D)
1	Tidak ada dampak	Tidak berdampak pada kualitas TW	1	Sangat jarang (<1 kali/tahun)	1	Kontrol hampir pasti mendeteksi
2-3	Sangat minor	TW masih dalam baku mutu	2-3	Jarang (1-2 kali/tahun)	2-3	Deteksi sangat tinggi (>99%)
4-5	Minor	Fluktuasi parameter, masih toleransi	4-5	Kadang (3-6 kali/tahun)	4-5	Deteksi sedang (90-99%)
6-7	Moderat	TW off-specs, memerlukan treatment ulang	6-7	Sering (1-2 kali/bulan)	6-7	Deteksi rendah (50-89%)
8-9	Kritis	Pelanggaran baku mutu regulasi, potensi sanksi	8-9	Sangat sering (>2 kali/bulan)	8-9	Deteksi sangat rendah (<50%)
10	Sangat kritis	Kerusakan ekosistem, sanksi hukum berat	10	Hampir pasti (>3 kali/bulan)	10	Tidak dapat dideteksi

Prosedur Root Cause Analysis (RCA)

RCA adalah pendekatan analisis sistematis yang bertujuan mengidentifikasi penyebab mendasar (*root cause*) dari suatu kegagalan, bukan sekadar gejalanya [11]. RCA dilakukan pada mode kegagalan dengan RPN tertinggi melalui dua tahap:

- a. Diagram Fishbone: Penyebab kegagalan dikategorikan ke dalam lima faktor: Manusia, Mesin, Metode, Material, dan Lingkungan [12], berdasarkan hasil FGD dengan expert panel yang sama.
- b. Analisis 5 Whys: Penelusuran sebab-akibat berantai dilakukan hingga ditemukan akar penyebab yang bersifat sistemik [13], yaitu akar yang jika ditangani akan mencegah terulangnya kegagalan secara permanen.

Integrasi FMEA dan RCA dalam satu kerangka analisis memungkinkan alur kerja yang terstruktur: FMEA menentukan prioritas di mana masalah paling kritis [14], sedangkan RCA menjawab mengapa masalah itu terjadi dan bagaimana mencegahnya secara permanen [15]. Pendekatan integratif ini sesuai dengan prinsip continuous improvement dalam manajemen kualitas

Proses Nitrifikasi Biologis dalam WWT

Proses nitrifikasi adalah konversi biologis amonia (NH_3) menjadi nitrit (NO_2^-) oleh bakteri Nitrosomonas, kemudian menjadi nitrat (NO_3^-) oleh bakteri Nitrobacter [16]. Proses ini bersifat aerobik obligat dan sangat sensitif terhadap kadar Dissolved Oxygen (DO): bakteri nitrifikasi memerlukan DO minimal 1,5–2,0 mg/L untuk aktivitas optimal, dan aktivitasnya menurun drastis saat $\text{DO} < 1,0$ mg/L [17]. Faktor lain yang mempengaruhi efisiensi nitrifikasi meliputi suhu, pH (optimal 7,5–8,5), dan konsentrasi Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) di bak aerasi [18]. Pemahaman terhadap dinamika nitrifikasi ini menjadi fondasi ilmiah yang penting dalam menginterpretasikan hasil FMEA dan RCA pada penelitian ini.

Evaluasi Pasca Perbaikan

Untuk mengevaluasi efektivitas tindakan korektif secara kuantitatif, data pengukuran harian parameter NH_3 pada treated water dibandingkan antara kondisi sebelum perbaikan (Juli 2025, periode pengamatan FMEA) dan setelah perbaikan (Agustus 2025, pasca-implementasi tindakan korektif) [19]. Indikator keberhasilan ditetapkan sebagai: (1) persentase hari dengan NH_3 di bawah baku mutu (≤ 50 mg/L); (2) rerata nilai NH_3 harian pada treated water; dan (3) stabilitas tingkat oksigen terlarut (DO) di dalam bak aerasi biologis pada rentang optimal 2,0–4,0 mg/L.

Hasil Dan Pembahasan

Berdasarkan standar baku mutu yang berlaku (Tabel 2), pengukuran harian unit WWT selama Juli 2025 menunjukkan fluktuasi signifikan pada seluruh parameter kritis. Akumulasi beban off-specs (total beban pencemar melebihi batas baku mutu, dikalikan volume debit harian) disajikan pada Tabel 3.

Table 2 Parameter dan Standar Baku Mutu Treated Water

Parameter	Batas Maksimum	Satuan
pH	6 – 9	–
TSS	≤ 100	mg/L
COD	≤ 200	mg/L
Flour (F)	≤ 50	mg/L
PO ₄	≤ 50	mg/L
NH ₃	≤ 50	mg/L

Sumber : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016.

Table 3 Akumulasi Beban Parameter Off-Specs Periode Juli 2025

Parameter	Akumulasi Off-Specs	Frekuensi Hari Off-Specs	Keterangan
COD	6.192,42	22 dari 31 hari	Beban organik fluktuatif tinggi; tertinggi secara akumulasi
PO ₄	2.008,59	18 dari 31 hari	Pengendapan kimiawi kurang optimal
pH	902,78	12 dari 31 hari	Fluktuasi asam/basa akibat instabilitas pompa dosing
NH ₃	485,55	9 dari 31 hari	Efisiensi biodegradasi nitrogen rendah; risiko toksisitas tertinggi
TSS	1.244,79	14 dari 31 hari	Lumpur meluap saat desludging tidak terjadwal
Flour (F)	0,00	0 hari	Tidak terdeteksi dalam limbah inlet; dikecualikan dari FMEA

Dari Tabel 3, terlihat bahwa COD memiliki akumulasi beban off-specs tertinggi secara nominal. Namun, penetapan prioritas FMEA tidak semata-mata berdasarkan akumulasi beban, melainkan pada komposit tiga dimensi penilaian (S, O, D). NH₃ mendapat skor Severity (S) tertinggi (8) karena sifat toksisitasnya yang langsung mengancam ekosistem badan air penerima dan berpotensi mengakibatkan sanksi hukum [20], berbeda dengan COD yang dampaknya lebih bersifat organik dan bertahap. Parameter Flour dikecualikan dari analisis FMEA karena tidak terdeteksi dalam limbah inlet selama periode pengamatan.

Analisis FMEA dan Perhitungan RPN

Penilaian S, O, dan D dilakukan melalui sesi FGD bersama expert panel (5 orang) pada tanggal 28 Juli 2025. Konsensus skor ditetapkan setelah diskusi berbasis rubrik Tabel 1. Hasil tabulasi FMEA disajikan pada Tabel 4.

Table 4 Hasil Analisis FMEA Unit WWT – Juli 2025

Nama Proses	Mode Kegagalan	Potensi Dampak	S	Potensi Penyebab	O	Kontrol Saat Ini	D	RPN
Proses Biologis (NH ₃)	Kegagalan nitrifikasi (NH ₃ tinggi)	Toksisitas efluen, pelanggaran regulasi, sanksi hukum	8	Suplai DO rendah akibat diffuser buntu; sludge age pendek; fluktuasi suhu	5	Analysers TW harian; monitoring DO visual	8	320
Klarifikasi / Sedimentasi (TSS)	TSS outlet tinggi	Penurunan kualitas fisik treated water, penyumbatan saluran	6	Flokulasi tidak optimal; hydraulic load berlebih	6	Analysers TW harian	3	108
Proses Biologis (COD)	COD outlet tinggi	Degradasi organik tidak tuntas; beban pada badan air	6	Waktu retensi kurang; shock load beban organik masuk	6	Analysers TW harian	3	108
Netralisasi Primer (pH)	Fluktuasi pH ekstrem	Korosi peralatan; kerusakan komunitas mikroba biologis	6	Kerusakan pompa dosing; kalibrasi sensor pH tidak berkala	7	pH meter online lokal	2	84

Chemical Treatment (PO ₄)	Kadar PO ₄ tinggi	Eutrofikasi badan air penerima limbah	7	Dosis koagulan tidak presisi; variasi beban masuk	5	Uji kimia laboratorium harian	2	70
---------------------------------------	------------------------------	---------------------------------------	---	---	---	-------------------------------	---	----

Amonia bebas (NH₃) dalam air memiliki sifat toksisitas akut yang mematikan bagi ikan dan organisme air pada konsentrasi yang sangat rendah (mg/L), sehingga pelanggaran regulasi amonia langsung berimplikasi pada sanksi hukum berat dan penghentian paksa operasional pabrik. Sebaliknya, [21] parameter COD dan TSS bersifat toksisitas kronis-bertahap (mengurangi kualitas air secara perlahan melalui penipisan oksigen akibat pembusukan zat organik), sehingga dampak hukumnya tidak secepat amonia. Oleh karena itu, Severity amonia dinilai jauh lebih tinggi (S=8) dibanding COD/TSS (S=6).

Root Cause Analysis (RCA) – Kegagalan Nitrifikasi (NH₃, RPN = 320)

1. Diagram Fishbone

Berdasarkan sesi FGD expert panel, penyebab kegagalan nitrifikasi dikategorikan ke dalam empat faktor utama [22]:

- Faktor Manusia: Kurangnya pemahaman operator tentang korelasi kritis antara laju aliran udara (Dissolved Oxygen/DO) dan aktivitas bakteri autotrof nitrifikasi (Nitrosomonas dan Nitrobacter). Operator cenderung berfokus pada pembacaan flow meter blower, bukan pada nilai DO aktual di bak aerasi.
- Faktor Mesin: Membran diffuser halus di dasar bak aerasi mengalami fouling parah akibat akumulasi lumpur biologis halus (pin flocs) dan beberapa titik mengalami robekan fisik, sehingga distribusi oksigen terlarut menjadi tidak merata dan DO drop di bawah batas minimal.
- Faktor Metode: Prosedur desludging biologis tidak dijadwalkan secara ketat—pembuangan dilakukan berdasarkan estimasi visual, bukan parameter MLSS terukur—sehingga akumulasi lumpur berlebih meningkatkan oxygen demand secara drastis dan menekan DO.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi debit dan konsentrasi amonia masuk (shock load) yang dikirim langsung dari pabrik pupuk hulu tanpa stabilisasi yang cukup di bak ekualisasi, menyebabkan beban nitrifikasi melonjak tiba-tiba melebihi kapasitas komunitas bakteri.

2. Analisis 5 Whys

Table 5 Analisis 5 Whys – Kegagalan Nitrifikasi Amonia

Level	Pertanyaan	Jawaban
Why 1	Mengapa kadar NH ₃ pada treated water melebihi baku mutu?	Proses nitrifikasi (konversi NH ₃ → NO ₂ ⁻ → NO ₃ ⁻) di bak aerasi biologis tidak berjalan sempurna.
Why 2	Mengapa proses nitrifikasi tidak berjalan sempurna?	Populasi dan aktivitas bakteri nitrifikasi menurun drastis akibat kondisi lingkungan yang tidak mendukung.
Why 3	Mengapa populasi dan aktivitas bakteri nitrifikasi menurun?	Kadar DO di bak aerasi sering drop di bawah 1,5 mg/L, padahal bakteri nitrifikasi bersifat obligat aerob yang sangat sensitif terhadap kekurangan oksigen.
Why 4	Mengapa kadar DO sering drop di bawah batas minimum?	Suplai gelembung udara dari blower tidak terdistribusi secara merata akibat fouling dan robekan pada membran diffuser halus di dasar kolam aerasi.
Why 5 (Root Cause)	Mengapa membran diffuser bisa tersumbat dan rusak tanpa penanganan dini?	Tidak adanya Standard Operating Procedure (SOP) perawatan preventif dan jadwal pembersihan berkala untuk membran diffuser, serta tidak adanya sistem pemantauan tekanan udara (pressure gauge) pada jalur blower untuk mendeteksi backpressure akibat penyumbatan secara dini.

Rencana Tindakan Perbaikan

Berdasarkan integrasi hasil FMEA dan RCA, disusun matriks tindakan perbaikan komprehensif dengan target operasional terukur (Tabel 6).

Table 6 Matriks Tindakan Perbaikan Hasil Integrasi FMEA-RCA

Param.	Akar Penyebab (RCA)	Tindakan Perbaikan	Target Operasional	Penanggung Jawab	Status
NH ₃ RPN=320	Absennya SOP PM diffuser dan	Penggantian diffuser buntu; penyusunan SOP PM berkala	DO bak aerasi: 2,0–	Supervisor Proses &	Terealisasi (shift PM)

	monitoring backpressure	(monthly); pemasangan pressure gauge blower	4,0 mg/L; NH ₃ TW ≤50 mg/L	Tim Mekanik	Agustus 2025)
TSS RPN=128	Jadwal desludging tidak konsisten berbasis estimasi visual	Jadwal desludging harian otomatis berbasis target MLSS ≤3.500 mg/L; pemasangan flow meter inlet clarifier	TSS outlet <50 mg/L (50% di bawah baku mutu)	Operator WWT & Supervisor Operasi	Jadwal ditempel di control room; dimonitor harian
COD RPN=108	Retention time tidak cukup saat beban puncak	Optimalisasi volume bak ekualisasi; sirkulasi air limbah berbasis pembacaan COD influent	COD TW <150 mg/L	Process Engineer & Lab Analyst	Logbook COD harian + grafik tren diperbarui
pH RPN=84	Pompa dosing manual; kalibrasi sensor jarang	Otomatisasi pompa dosing berbasis pH online; kalibrasi sensor mingguan	pH stabil 6,5–8,5	Instrument Engineer & Operator	Alarm interlock pH ekstrem aktif di panel DCS

Evaluasi Kuantitatif Pasca-Perbaikan

Untuk memverifikasi efektivitas tindakan korektif secara empiris, data kadar NH₃ treated water harian dibandingkan antara periode sebelum perbaikan (Juli 2025) dan setelah perbaikan (Agustus 2025). Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 7.

Table 7 Perbandingan Kinerja Parameter NH₃ Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Indikator Kinerja	Sebelum Perbaikan (Juli 2025)	Setelah Perbaikan (Agustus 2025)
Rerata NH ₃ TW harian (mg/L)	62,7	31,4
Jumlah hari NH ₃ off-specs (>50 mg/L)	9 dari 31 hari (29%)	2 dari 31 hari (6,5%)
Nilai NH ₃ TW maksimum (mg/L)	98,3	54,1
Nilai DO rerata bak aerasi (mg/L)	1,2 (sering <1,0)	2,8 (konsisten dalam rentang 2,0–4,0)
Frekuensi desludging	Tidak terjadwal (2–3x/minggu)	Terjadwal harian sesuai SOP baru

Data empiris pada Tabel 7 mengonfirmasi bahwa tindakan perbaikan yang dirumuskan melalui integrasi metode FMEA-RCA memberikan dampak peningkatan kualitas yang signifikan. Melalui penggantian diffuser dan penegakan jadwal perawatan preventif, transfer massa oksigen di kolam aerasi meningkat tajam, ditandai dengan naiknya rata-rata DO menjadi 2,8 mg/L. Ketersediaan oksigen yang melimpah dan stabil menstimulus aktivitas bakteri nitrifikasi untuk mendegradasi amonia secara optimal. Dampak langsungnya adalah penurunan rata-rata amonia akhir sebesar 49,9% (dari 62,7 mg/L ke 31,4 mg/L) sehingga air buangan konsisten aman berada di bawah ambang batas regulasi pemerintah.

Perbandingan dengan studi sejenis: Kuncoro et al.[6] pada unit Effluent Treatment PT. Petrokimia Gresik melaporkan efektivitas FMEA dalam mengidentifikasi prioritas kegagalan, namun tidak menyertakan data kuantitatif pasca-implementasi perbaikan. Penelitian ini melengkapi gap tersebut dengan menyajikan evaluasi before-after yang terukur, serta memperluas analisis RCA hingga ke akar sistemik (absennya SOP PM) yang berbeda dari temuan Kuncoro et al. [6] yang berfokus pada aspek prosedural operasional. [23] Kontribusi diferensiatif penelitian ini terletak pada integrasi tiga elemen yang belum dilakukan secara bersamaan dalam satu studi: (1) rubrik penilaian FMEA yang transparan dan diverifikasi expert panel; (2) RCA hingga akar sistemik; dan (3) evaluasi kuantitatif pasca-perbaikan.

Simpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi kegagalan proses pada unit Waste Water Treatment (WWT) di PT Aneka Jasa Grhadika melalui integrasi FMEA dan RCA. Tiga kesimpulan utama dapat ditarik [24]:1. Prioritas

kegagalan (FMEA): Dari lima parameter yang dianalisis, kegagalan nitrifikasi yang mengakibatkan NH_3 tinggi merupakan risiko paling kritis (RPN = 320), diikuti TSS tinggi (RPN = 128) dan COD tinggi (RPN = 108). Penetapan prioritas berdasarkan komposit S-O-D—bukan hanya akumulasi beban—menghasilkan urutan yang mencerminkan risiko lingkungan dan regulasi secara lebih akurat dibanding pendekatan single-metric. 2. Akar penyebab sistemik (RCA): Melalui Fishbone dan 5 Whys, teridentifikasi bahwa akar penyebab utama off-specs amonia adalah absennya SOP Preventive Maintenance untuk membran diffuser aerasi dan absennya sistem monitoring backpressure blower secara real-time. Ini merupakan kegagalan sistemik—bukan sekadar kegagalan teknis komponen—yang berdampak pada rendahnya DO bak aerasi ($<1,5$ mg/L) dan menurunnya aktivitas bakteri nitrifikasi secara signifikan. 3. Efektivitas perbaikan (Before-After): Implementasi tindakan korektif menghasilkan penurunan rerata NH_3 treated water sebesar 49,9% (dari 62,7 mg/L menjadi 31,4 mg/L) dan pengurangan frekuensi hari off-specs dari 29% menjadi 6,5%. Hasil ini membuktikan secara empiris bahwa kerangka FMEA-RCA terintegrasi efektif dalam mentransisikan pengelolaan WWT dari penanganan reaktif menuju pengendalian kualitas yang preventif dan berbasis data.

Keterbatasan penelitian ini mencakup: (1) periode pengamatan satu bulan yang belum dapat menangkap variabilitas musiman jangka panjang pada proses biologis WWT; dan (2) penilaian FMEA yang bersifat subjektif meskipun telah divalidasi melalui expert panel. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode Fuzzy FMEA yang mengintegrasikan teori himpunan samar (*fuzzy set theory*) dengan fungsi keanggotaan matematis untuk mengonversi penilaian deskriptif panel ahli. Metode ini terbukti andal dalam meminimalkan bias subjektivitas serta mengelola ketidakpastian (*epistemic uncertainty*) data penilaian risiko dalam proses manufaktur dan instalasi pengolahan air limbah kimia[25].

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim expert panel dari PT Aneka Jasa Grhadika dan PT Petrokimia Gresik yang telah berkontribusi dalam sesi FGD penilaian FMEA. Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri tanpa pendanaan institusional khusus.

Daftar Pustaka

- [1] KLHK, “Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia,” *J. GEEJ*, vol. 7, no. 2, pp. 1–39, 2016.
- [2] R. Ahmad, “Pengamanan Limbah Cair,” pp. 1–310, 2025.
- [3] R. Marsidi and A. Herlambang, “Proses nitrifikasi dengan sistem biofilter untuk pengolahan air limbah yang mengandung amoniak konsentrasi tinggi,” *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 3, no. 3, pp. 195–205, 2002.
- [4] N. Aulia Faradina and N. Ratni, “Analisis Risiko Penurunan Kualitas Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja Jabon Kabupaten Sidoarjo dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis,” *Serambi Eng.*, vol. IX, no. 3, 2024.
- [5] D. Yudha Bintara and U. Amrina, “Analisis Pengendalian Kualitas Limbah Cair Pabrik Susu Dengan Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA),” *Pros. Semin. Nas. Mercu Buana Conf. Ind. Eng.*, vol. 3, pp. 145–155, 2021.
- [6] R. B. Kuncoro, S. S. Dahda, and E. Ismiyah, “Analisis Risiko Limbah Cair Pada Unit Effluent Treatment Berdasarkan Sistem Manajemen Lingkungan Menggunakan Metode Fmea Dan Rca Di Pt. Petrokimia Gresik,” *JUSTI (Jurnal Sist. dan Tek. Ind.)*, vol. 2, no. 3, p. 403, 2022, doi: 10.30587/justicb.v2i3.3700.
- [7] S. Puspitasari and S. Merdikawati, “Identifikasi akar penyebab dan prioritasasi risiko ketidaksesuaian air handling unit (AHU) menggunakan RCA-FMEA terintegrasi Identification of Root Cause and Risk Prioritization of air handling unit (AHU) performance nonconformities using an integrate,” vol. 7, pp. 576–586, 2026, doi: 10.37373/jenius.v7i2.2352.
- [8] D. Fathurahman, “Efektivitas Konsorsium Bakteri *Bacillus Cereus*, *Bacillus Spizizenii*, dan *Stenotrophomonas Malthophilia* Terhadap Performa Wetland Mendegradasi Amonia (NH_3) ...,” pp. 1–59, 2024, [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/53245%0Ahttps://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/53245/20513157.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] H. R. Ardyansyah and N. U. Handayani, “Analisis Pengendalian Kualitas Produk Kain Grey Ps 946 Dalam Upaya Mengurangi Tingkat Kecacatan Produk Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Dan Pendekatan Kaizen,” *Ind. Eng. Online J.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–10, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/ieoj/article/view/40325>
- [10] A. F. Mustafa, “Optimalisasi Penentuan Mode Kegagalan Defect Dominan Pada in Check Buffing Panel Up Dengan Penerapan Metode Fmea-Topsis ...,” 2018, [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/11111>
- [11] F. A. Setyawan, D. Rahayu Widiana, and A. V. Sophia, “Analisis Akar Penyebab Kegagalan Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Kecap Menggunakan Metode Root Cause Analysis,” *Conf. Proceeding Waste Treat. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 186–190, 2022.
- [12] Haryono, S. Affandi, and G. Subroto, “Pengembangan Konsep Cleaner Drilling Berdasarkan Studi Kasus

- Pengeboran Minyak di Perusahaan 'XXX' Menggunakan Pendekatan FMEA," *Semin. Nas. Sains dan Teknol. Terap. X* 2022, pp. 1–7, 2022, [Online]. Available: <https://rb.gy/62giha>
- [13] Z. Mahrurozi, "Perancangan Lean Manufacturing Dengan Metode Vsm Dan Fmea Untuk Mengurangi Waste Pada Produk Barecore CV. Bangun Usaha Mandiri," pp. 1–88, 2022.
- [14] I. I. K. Wiryajati, A. IPU, and I. K. P. Putra, "FMEA untuk Panduan Praktis Identifikasi Kegagalan dan Pengendalian Risiko," *Books.Google.Com*, [Online]. Available: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Lb6JEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=pengaduan+fuzzy+logic&ots=6Cw4H7Tdgo&sig=3nBM5jD45ZyiI3yJgmv0z-_5D14
- [15] K. Muhammad, "Analisis Dan Perbaikan Penulisan List of Material Pada Program Preservasi Menggunakan Metode Root Cause Analysis Rca," *JUSTI (Jurnal Sist. dan Tek. Ind.*, vol. 4, no. 4, p. 452, 2024, doi: 10.30587/justicb.v4i4.8003.
- [16] A. Setiyawan and B. Hari, "Karakteristik Proses Klarifikasi dalam Sistem Nitrifikasi-Denitrifikasi untuk Pengolahan Limbah Cair dengan Kandungan N-NH3 Tinggi," *J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 2, pp. 1–13, 2010.
- [17] Metcalf & Eddy, "Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery," 2013, [Online]. Available: <https://books.google.com/cu/books?id=6KVKMAEACAAJ>
- [18] R. Ningtyas, "Pengolahan Air Limbah dengan Proses Lumpur Aktif," *Jur. Tek. Kim. ITB*, no. December, pp. 1–11, 2015, [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50857179/Pengolahan_Air_Limbah_dengan_Proses_Lumpur_Aktif-libre.pdf?1481603106=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPengolahan_Air_Limbah_dengan_Proses_Lump.pdf&Expires=1671349507&Signature=czTgXfRg64SAu
- [19] S. K. I. Mawangi and A. Moesriati, "Kajian Risiko Proses Pengolahan Lumpur Tinja Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) (Studi Kasus: Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja Kota Batu)," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 2, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i2.72607.
- [20] M. H. Hakim, N. R. Ramadani, and K. W. Wirakusuma, "Analisis Peningkatan Kualitas Air Minum Dalam Kemasan Menggunakan Integrasi Six Sigma dan Failure Mode and Effect Analysis," *Invent. Ind. Vocat. E-Journal Agroindustry*, vol. 5, no. 2, pp. 63–73, 2024, doi: 10.52759/inventory.v5i2.202.
- [21] A. Nastiti and A. Masduqi, "Pengurangan Risiko Kegagalan Kualitas Produksi Air Minum PDAM Tirta Dhaha Kota Kediri Menggunakan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)," *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i1.111008.
- [22] P. P. Sugandi, "Analisis Kegagalan Pada Impeller Pompa Ash Disposal di PLTU Jabar 2 Menggunakan Metode Root Cause Analysis (RCA)," 2025.
- [23] I. Machali, "Pendekatan Integrasi-Interkoneksi Dalam Kajian Manajemen Dan Kebijakan Pendidikan Islam," *el-Tarbawi*, vol. 8, no. 1, pp. 32–53, 2015, doi: 10.20885/tarbawi.vol8.iss1.art3.
- [24] M. T. Fajrin and W. Sulistiyowati, "Pengurangan Defect Pada Produk Sepatu Dengan Mengintegrasikan Statistical Process Control (Spc) Dan Root Cause Analysis (Rca) Studi Kasus Pt. Xyz," *Spektrum Ind.*, vol. 16, no. 1, p. 29, 2018, doi: 10.12928/si.v16i1.9778.
- [25] Y. Simamora and N. Kurniati, "Analisis risiko pada instalasi pengolahan air limbah (IPAL) PT Ajinomoto berdasarkan konsep manajemen risiko lingkungan," no. July, pp. 1–10, 1997.