

ANALISIS POTENSI KEGAGALAN PROSES UJI COD LIMBAH CAIR DENGAN PENDEKATAN FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) DAN FAULT TREE ANALYSIS (FTA)

ANALYSIS OF POTENTIAL FAILURES IN THE COD TESTING PROCESS FOR LIQUID WASTE USING THE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) AND FAULT TREE ANALYSIS (FTA) APPROACHES

Rakhmatullah Ainul Yaqin¹, Said Salim Dahda²

Teknik Industri, Universitas Muhammadiyah Gresik, Kota Gresik^{1,2}

rakhmatbadron17@gmail.com¹, said_salim@umg.ac.id²

ABSTRACT

Chemical Oxygen Demand (COD) testing is an important parameter in evaluating the quality of industrial wastewater. Inaccurate test results can lead to non-compliance with environmental standards. This study aims to analyze potential failures in the COD testing process using the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) methods. Data were obtained through observation, interviews, and laboratory document studies. The FMEA results showed that the main failure modes included the absence of indicator color guides (RPN=384), differences in visual perception between analysts (RPN=343), and reagent volumes that did not comply with SOPs (RPN=343). The FTA analysis revealed dominant failure paths due to uncalibrated equipment and misinterpretation of the titration endpoint. In conclusion, the integration of FMEA–FTA provides a comprehensive risk analysis and confirms the need for equipment calibration, provision of color charts, and improved laboratory lighting to ensure the accuracy of COD test results.

Keywords: COD, Liquid Waste, FMEA, FTA, Laboratory Risk.

ABSTRAK

Pengujian Chemical Oxygen Demand (COD) merupakan parameter penting dalam evaluasi kualitas limbah cair industri. Ketidakakuratan hasil uji dapat menimbulkan ketidaksesuaian dengan standar lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi kegagalan dalam proses uji COD menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA). Data diperoleh melalui observasi, wawancara, dan studi dokumen laboratorium. Hasil FMEA menunjukkan mode kegagalan utama meliputi tidak adanya panduan warna indikator (RPN=384), perbedaan persepsi visual antar analis (RPN=343), dan volume reagen tidak sesuai SOP (RPN=343). Analisis FTA mengungkap jalur kegagalan dominan akibat alat tidak terkalibrasi dan kesalahan interpretasi titik akhir titrasi. Kesimpulannya, integrasi FMEA–FTA memberikan analisis risiko yang komprehensif serta menegaskan perlunya kalibrasi alat, penyediaan color chart, dan peningkatan pencahayaan laboratorium untuk menjamin akurasi hasil uji COD.

Kata Kunci: COD, FMEA, FTA, Limbah Cair, Risiko Laboratorium.

PENDAHULUAN

Pengelolaan kualitas limbah cair merupakan komponen penting dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan dan memastikan kepatuhan terhadap regulasi pemerintah. Salah satu parameter utama yang digunakan dalam menilai tingkat pencemaran organik pada limbah cair adalah Chemical Oxygen Demand (COD). Parameter ini menggambarkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat organik dalam air limbah, sehingga menjadi tolok ukur efektivitas sistem pengolahan limbah industri

(Rusdianto et al., 2023). Dengan demikian, keakuratan hasil pengujian COD sangat menentukan apakah air limbah yang dibuang telah memenuhi baku mutu lingkungan yang berlaku.

Ketidaktepatan dalam hasil uji COD dapat menimbulkan konsekuensi yang serius terhadap proses pengambilan keputusan teknis maupun kepatuhan hukum. Menurut (Yulianti et al., 2021), data COD yang tidak akurat dapat menyebabkan kesalahan dalam mengevaluasi kinerja instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Nilai COD yang lebih

rendah dari kondisi sebenarnya berpotensi menimbulkan kelalaian dalam penanganan limbah, sedangkan nilai yang terlalu tinggi dapat mendorong tindakan korektif berlebihan yang berimplikasi pada meningkatnya biaya operasional. Oleh sebab itu, keandalan hasil uji laboratorium menjadi faktor krusial dalam memastikan validitas data pengendalian kualitas limbah cair.

Dalam praktik laboratorium, proses pengujian COD kerap menghadapi berbagai potensi kesalahan yang berpengaruh terhadap kestabilan hasil analisis. Kesalahan tersebut dapat bersumber dari ketidaktepatan dalam menentukan titik akhir titrasi, kesalahan dalam penambahan reagen, maupun perbedaan persepsi visual antar analis. (Wilayah et al., 2025) melaporkan bahwa lebih dari 60% kesalahan di laboratorium terjadi pada tahap analisis dan interpretasi hasil, bukan pada kinerja instrumen. Kondisi ini menegaskan pentingnya penerapan pendekatan analisis risiko untuk mengidentifikasi serta meminimalkan sumber kegagalan yang dapat menurunkan keandalan hasil pengujian.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengelola risiko proses adalah Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Metode ini, menurut (Prasetya et al., 2021) merupakan pendekatan sistematis yang berfungsi untuk mengenali potensi kegagalan, menilai tingkat keparahan (severity), frekuensi kemunculan (occurrence), serta kemampuan deteksinya (detection). Ketiga aspek tersebut kemudian diolah menjadi nilai Risk Priority Number (RPN) yang digunakan untuk menentukan prioritas penanganan risiko. FMEA banyak diaplikasikan di berbagai bidang, termasuk industri manufaktur, pelayanan kesehatan, dan laboratorium, karena mampu memberikan hasil analisis yang terukur dan mudah diterapkan.

Namun demikian, FMEA memiliki keterbatasan dalam menggambarkan hubungan logis antar penyebab kegagalan karena bersifat linier dan kuantitatif. Untuk

mengatasi kekurangan tersebut, metode Fault Tree Analysis (FTA) dapat dijadikan pelengkap. (Rukmana et al., 2024) menjelaskan bahwa FTA merupakan metode deduktif yang menguraikan hubungan antara kejadian puncak (top event) dan penyebab dasar (basic events) melalui diagram logika berbasis gerbang AND dan OR. (Andy Prastyabudi et al., 2024) menambahkan bahwa FTA mampu menelusuri hubungan sebab-akibat secara hierarkis sehingga membantu mengidentifikasi kombinasi faktor yang paling berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan. Dengan menggabungkan kedua metode tersebut, analisis risiko menjadi lebih komprehensif: FMEA memberikan prioritas risiko secara numerik, sedangkan FTA menjelaskan mekanisme logis yang memicu terjadinya kegagalan.

Sejumlah penelitian telah menunjukkan efektivitas integrasi FMEA dan FTA dalam meningkatkan ketepatan identifikasi akar penyebab kegagalan. (Andy Prastyabudi et al., 2024) menerapkan kombinasi kedua metode ini pada industri farmasi dan menemukan peningkatan akurasi dalam pengendalian risiko proses. Sementara itu, (Azzahra, 2024) menunjukkan bahwa penggunaan FMEA yang diperkuat dengan FTA pada sektor kesehatan mampu menghasilkan strategi mitigasi risiko yang lebih efisien dibandingkan penggunaan salah satu metode secara tunggal. Meskipun demikian, penerapan integrasi FMEA–FTA dalam konteks pengujian laboratorium limbah cair, khususnya untuk parameter COD, masih jarang dilakukan dan belum banyak diteliti.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis potensi kegagalan pada proses pengujian COD limbah cair dengan menggunakan pendekatan FMEA dan FTA secara terintegrasi. FMEA digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan prioritas risiko melalui perhitungan nilai RPN, sedangkan FTA digunakan untuk memetakan hubungan sebab-akibat hingga

ke akar permasalahan. Melalui pendekatan ini, diharapkan diperoleh hasil analisis yang lebih komprehensif dalam upaya meningkatkan keandalan proses pengujian laboratorium, memperkuat penerapan sistem manajemen mutu, serta mendukung efektivitas pengendalian risiko pada pengolahan limbah cair industri.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium PT XYZ, yang merupakan unit pengujian di bawah perusahaan pengelola limbah cair industri. Laboratorium tersebut memiliki tanggung jawab utama dalam melakukan pengujian berbagai parameter kualitas air limbah sebelum dibuang ke lingkungan, termasuk parameter Chemical Oxygen Demand (COD).

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas dua jenis, yaitu:

1. Data primer, diperoleh melalui observasi langsung terhadap proses pengujian COD di laboratorium serta wawancara dengan analis yang terlibat dalam kegiatan pengujian.
2. Data sekunder, mencakup hasil pengujian COD pada sampel effluent selama periode Mei 2025 serta dokumen pendukung seperti Standard Operating Procedure (SOP) pengujian COD.

Penelitian difokuskan pada tahapan pengujian COD terhadap sampel effluent untuk menilai kesesuaiannya dengan baku mutu lingkungan, yaitu kadar COD di bawah 150 mg/L sebagaimana ditetapkan dalam peraturan yang berlaku.

Proses penilaian terhadap nilai Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) pada metode FMEA dilakukan melalui diskusi terarah (focused interview) bersama tiga orang analis pengujian COD dan kepala laboratorium PT XYZ. Responden tersebut dipilih karena memiliki pengalaman kerja minimal tiga tahun dan keterlibatan langsung dalam pelaksanaan pengujian COD. Setiap parameter FMEA ditentukan berdasarkan hasil rata-rata pengisian kuesioner yang disusun dengan

mempertimbangkan tingkat dampak kegagalan terhadap hasil uji, frekuensi kemunculan kesalahan, serta efektivitas sistem deteksi yang tersedia.

Data hasil wawancara dan observasi dikategorikan sebagai data primer, sedangkan data sekunder yang digunakan sebagai pendukung berasal dari dokumen SOP pengujian COD, catatan hasil uji laboratorium, serta laporan mutu internal.

Tahapan penyusunan Fault Tree Analysis (FTA) dilakukan berdasarkan hasil Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) yang telah diperoleh sebelumnya. Pengembangan FTA dilakukan melalui sesi brainstorming bersama kepala laboratorium, koordinator laboratorium, dan analis pengujian COD. Kegiatan ini bertujuan untuk memetakan hubungan logis antar penyebab kegagalan (basic events dan intermediate events) hingga terbentuk struktur logika top event secara menyeluruh. Dengan demikian, penyusunan diagram FTA tidak dilakukan secara subjektif oleh peneliti, melainkan melalui proses validasi bersama tenaga ahli yang memahami proses pengujian COD secara teknis maupun operasional.

Proses Pengujian COD

Prosedur pengujian COD yang digunakan mengacu pada metode closed reflux titrimetric sesuai dengan standar SNI 6989.2:2019 tentang Metode Uji COD. Tahapan pengujian secara umum meliputi:

1. Pengambilan sampel air limbah effluent yang telah melewati proses pengolahan.
2. Penambahan reagen, yaitu kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) dan asam sulfat (H_2SO_4) ke dalam tabung reaksi dalam sistem tertutup.
3. Proses pemanasan (digestion) pada suhu sekitar $150^\circ C$ selama ± 2 jam untuk mengoksidasi senyawa organik dalam sampel.
4. Titrasi menggunakan larutan FAS (Ferrous Ammonium Sulfate) dengan indikator ferroin untuk menentukan titik akhir reaksi.

5. Perhitungan nilai COD, dinyatakan dalam satuan mg/L O₂.

Tahapan ini memiliki tingkat sensitivitas tinggi terhadap kesalahan dalam pengukuran volume reagen, konsentrasi larutan, serta penentuan titik akhir titrasi. Oleh karena itu, dilakukan analisis risiko untuk mengidentifikasi faktor dominan yang dapat menyebabkan hasil uji COD tidak sesuai dengan baku mutu.

Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Metode FMEA diterapkan untuk mengidentifikasi kemungkinan terjadinya kegagalan pada setiap tahapan proses pengujian COD dan menentukan prioritas penanganannya.

Langkah-langkah pelaksanaan metode ini meliputi:

1. Identifikasi tahapan proses, berdasarkan SOP pengujian COD yang digunakan di laboratorium.
2. Penentuan mode kegagalan (failure modes), yaitu bentuk kegagalan potensial pada setiap tahapan proses.
3. Penilaian risiko, berdasarkan tiga parameter utama:
 - o Severity (S): tingkat keparahan akibat terjadinya kegagalan,
 - o Occurrence (O): frekuensi kemungkinan kegagalan muncul,
 - o Detection (D): kemampuan sistem untuk mendeteksi kegagalan sebelum berdampak.
4. Perhitungan nilai Risk Priority Number (RPN) menggunakan rumus:

$$RPN = S \times O \times D$$
5. Penentuan prioritas risiko, di mana nilai RPN tertinggi menunjukkan mode kegagalan yang paling kritis dan perlu segera mendapatkan tindakan perbaikan.

Hasil penilaian risiko dari metode FMEA menjadi dasar dalam penyusunan struktur Fault Tree Analysis (FTA) yang digunakan untuk menelusuri hubungan sebab-akibat dari kejadian puncak (top event).

Metode Fault Tree Analysis (FTA)

Metode FTA digunakan untuk menggambarkan secara visual hubungan logis antara berbagai penyebab yang dapat memicu terjadinya kegagalan pada proses pengujian COD. Top event yang menjadi fokus utama dalam analisis ini adalah ketidaksesuaian hasil uji COD terhadap nilai sebenarnya atau terhadap baku mutu yang berlaku.

Tahapan pelaksanaan FTA meliputi:

1. Penentuan Top Event, yaitu kondisi di mana hasil uji COD tidak akurat atau melebihi batas ambang yang diperbolehkan.
2. Identifikasi Intermediate Events yang dapat memicu top event, seperti kesalahan dalam penambahan reagen, kesalahan interpretasi titik akhir titrasi, dan ketidakterwakilan sampel uji.
3. Penentuan Basic Events, yakni penyebab paling dasar seperti pipet yang tidak terkalibrasi, panduan warna yang tidak tersedia, atau pencahayaan ruang titrasi yang kurang optimal.
4. Penyusunan diagram FTA, menggunakan simbol logika AND dan OR untuk menjelaskan keterkaitan antar penyebab.
5. Identifikasi Minimal Cut Sets, yaitu kombinasi penyebab terkecil yang cukup untuk memicu terjadinya top event.

Analisis FTA ini dilakukan secara kualitatif dengan tujuan untuk memahami struktur logis hubungan sebab-akibat antar penyebab kegagalan serta sebagai bentuk validasi terhadap hasil analisis FMEA.

Tahapan Penelitian

Secara garis besar, penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan, yaitu:

1. Pengumpulan data hasil pengujian COD effluent.
2. Identifikasi proses pengujian berdasarkan SOP laboratorium.
3. Analisis potensi kegagalan menggunakan metode FMEA.
4. Penyusunan struktur penyebab kegagalan dengan metode FTA.

5. Evaluasi hasil dan penyusunan rekomendasi, guna meningkatkan efektivitas sistem kerja laboratorium dan keandalan hasil pengujian COD.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian COD Effluent

Hasil pengujian Chemical Oxygen Demand (COD) pada limbah cair effluent PT XYZ selama periode Mei 2025 ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian COD Effluent (Mei 2025)

Tanggal	COD Effluent (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Keterangan
01-May-25	152,53	<150	Tidak Memenuhi
02-May-25	151,79	<150	Tidak Memenuhi
03-May-25	154,12	<150	Tidak Memenuhi
04-May-25	158,21	<150	Tidak Memenuhi
05-May-25	159,12	<150	Tidak Memenuhi
06-May-25	156,90	<150	Tidak Memenuhi
07-May-25	157,57	<150	Tidak Memenuhi
08-May-25	151,61	<150	Tidak Memenuhi
09-May-25	150,71	<150	Tidak Memenuhi
10-May-25	149,43	<150	Memenuhi
11-May-25	148,32	<150	Memenuhi
12-May-25	123,19	<150	Memenuhi
13-May-25	121,43	<150	Memenuhi
14-May-25	124,16	<150	Memenuhi
15-May-25	126,14	<150	Memenuhi
16-May-25	137,45	<150	Memenuhi
17-May-25	136,54	<150	Memenuhi
18-May-25	139,92	<150	Memenuhi
19-May-25	138,22	<150	Memenuhi
20-May-25	138,66	<150	Memenuhi

Tanggal	COD Effluent (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Keterangan
21-May-25	139,26	<150	Memenuhi
22-May-25	143,73	<150	Memenuhi
23-May-25	140,56	<150	Memenuhi
24-May-25	139,65	<150	Memenuhi
25-May-25	150,64	<150	Tidak Memenuhi
26-May-25	158,50	<150	Tidak Memenuhi
27-May-25	159,15	<150	Tidak Memenuhi
28-May-25	170,72	<150	Tidak Memenuhi
29-May-25	168,64	<150	Tidak Memenuhi
30-May-25	169,04	<150	Tidak Memenuhi
31-May-25	169,66	<150	Tidak Memenuhi

Berdasarkan hasil pengukuran, nilai COD effluent menunjukkan fluktuasi antara 119,46 mg/L hingga 170,72 mg/L dengan rata-rata 148,32 mg/L. Secara umum, hasil tersebut masih berada dalam kisaran baku mutu lingkungan (<150 mg/L). Namun, pada akhir periode pengujian (tanggal 25–31 Mei 2025) terjadi peningkatan nilai COD yang cukup signifikan hingga melampaui ambang batas, mencapai 170,72 mg/L.

Kenaikan nilai tersebut mengindikasikan adanya ketidakstabilan dalam proses pengolahan limbah cair atau kemungkinan terjadinya kesalahan pada tahap analisis laboratorium. Mengingat pengujian COD melibatkan reaksi kimia kompleks dan penentuan titik akhir titrasi secara visual, penyimpangan kecil pada volume reagen, konsentrasi larutan, atau persepsi warna indikator dapat menghasilkan variasi hasil yang cukup besar. Oleh karena itu, dilakukan analisis risiko lebih lanjut menggunakan metode FMEA dan FTA untuk mengidentifikasi sumber-sumber penyebab yang berpotensi memengaruhi ketidaksesuaian hasil pengujian COD.

Analisis dengan Metode FMEA

Analisis menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) bertujuan untuk mengenali kemungkinan mode kegagalan yang menyebabkan ketidaktepatan hasil uji COD serta menentukan prioritas risiko berdasarkan perhitungan Risk Priority Number (RPN).

Tabel 2. Hasil Analisis FMEA Pengujian COD di Laboratorium PT XYZ

Komponen	Mode Kegagalan	Penyebab	S	O	D	RPN
Penambahan Reagen	Volume reagen tidak sesuai SOP	Terburu-buru saat bekerja	7	7	7	343
		Masih menggunakan pipet volume	7	7	6	294
		Reagen mirip (warna/volume) diletakkan berdekatan	6	6	7	252
		Urutan tidak sesuai SOP	6	6	6	216
		Tidak ada petunjuk kerja di meja lab	7	7	6	294
Penambahan Reagen	Urutan reagen yang tidak sesuai SOP	Tidak fokus atau terburu-buru saat bekerja	7	7	5	245
		Tidak ada penanda visual di alat	7	7	5	245
		Label reagen pudar atau tidak lengkap	7	7	4	196
		Tidak ada panduan warna indikator (color chart)	8	8	6	384
		Persepsi visual berbeda antar analis	7	7	7	343
Titrasi	Interpretasi titik akhir	Tidak menggunakan titrator digital atau buret otomatis	7	7	6	294
		Larutan terlalu pekat → titik akhir tidak terlihat	6	6	6	216

Hasil penerapan metode FMEA menunjukkan bahwa mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi adalah tidak tersedianya panduan warna indikator (RPN = 384), diikuti oleh terburu buru saat bekerja (RPN = 343) dan tidak adanya petunjuk di meja lab (RPN = 29). Ketiga mode kegagalan tersebut berpusat pada

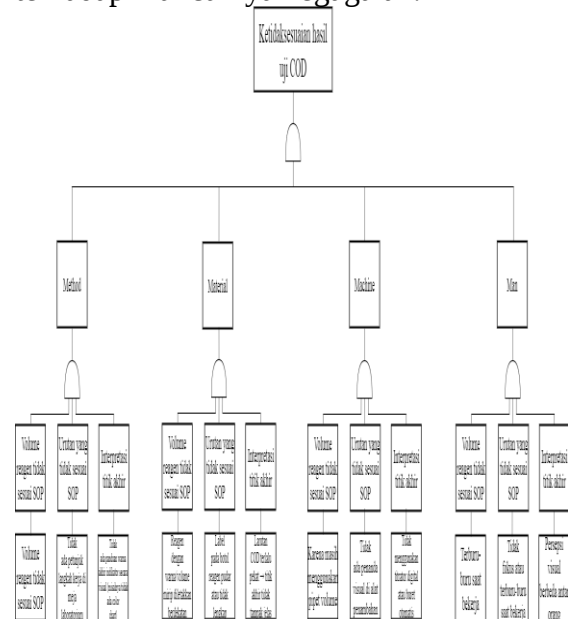
tahap titrasi, yang merupakan tahap paling krusial dalam penentuan nilai COD.

Ketiadaan panduan warna indikator menyebabkan penentuan titik akhir titrasi menjadi subjektif dan sangat bergantung pada pengalaman masing-masing analis. Selain itu, ketidakterkalibrasian alat ukur seperti pipet dan buret turut meningkatkan kemungkinan ketidaktepatan volume reagen yang digunakan. Hal ini sejalan dengan pendapat (Rusdianto et al., 2023) yang menyebutkan bahwa faktor manusia dan kelalaian kalibrasi alat merupakan dua penyebab dominan kesalahan laboratorium yang berdampak langsung terhadap akurasi hasil analisis.

Temuan pada tahap FMEA ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan analisis Fault Tree Analysis (FTA), guna menelusuri secara mendalam hubungan sebab-akibat dari mode kegagalan yang telah diidentifikasi.

Analisis dengan Metode FTA

Metode Fault Tree Analysis (FTA) diterapkan untuk menelusuri akar penyebab dari kejadian puncak (Top Event), yaitu ketidaksesuaian hasil uji COD. Pendekatan ini dilakukan dengan memetakan hubungan logis antara berbagai Intermediate Events dan Basic Events yang berkontribusi terhadap munculnya kegagalan.



Gambar 1. Struktur Fault Tree Analysis Pengujian COD

Tabel 3. Minimal Cut Sets FTA Pengujian COD

No	Minimal Cut Set	Interpretasi
1	{Pipet tidak terkalibrasi}	Volume reagen salah → hasil COD bias
2	{Tidak ada panduan warna}	Titik akhir subjektif → hasil tidak seragam
3	{Reagen terlalu pekat/encer}	Reaksi tidak optimal → nilai COD meleset
4	{Label reagen pudar AND tidak ada petunjuk meja}	Reagen tertukar → hasil salah
5	{Sampel tidak representatif}	Nilai COD tidak menggambarkan kondisi aktual

Hasil analisis FTA menunjukkan bahwa jalur penyebab dominan berasal dari dua faktor utama, yaitu penambahan reagen yang tidak sesuai dengan SOP serta kesalahan dalam interpretasi titik akhir titrasi. Kedua faktor ini selaras dengan hasil FMEA yang menempatkan tahap titrasi sebagai area risiko tertinggi.

Beberapa Basic Events seperti pipet tidak terkalibrasi dan tidak tersedianya panduan warna indikator terbukti menjadi faktor paling kritis, karena keduanya dapat langsung menyebabkan terjadinya Top Event tanpa kombinasi faktor lain. Kondisi tersebut menjelaskan peningkatan nilai COD pada akhir periode pengujian, yang kemungkinan besar disebabkan oleh penurunan akurasi titrasi manual akibat kondisi alat yang kurang optimal dan faktor kesalahan manusia.

(Andy Prastyabudi et al., 2024) menjelaskan bahwa metode FTA mampu memberikan pemahaman menyeluruh mengenai hubungan sebab-akibat antar komponen sistem, sehingga sangat berguna dalam proses pengambilan keputusan berbasis risiko (risk-based decision making). Integrasi antara FMEA dan FTA pada penelitian ini memberikan pandangan yang lebih komprehensif, tidak hanya dalam menentukan tingkat risiko tetapi juga dalam menguraikan jalur kegagalan yang menyebabkan penyimpangan hasil uji COD.

SIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis risiko terhadap proses pengujian Chemical Oxygen Demand (COD) di laboratorium PT XYZ dengan pendekatan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA), diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil pengujian COD effluent pada periode Mei 2025 memperlihatkan adanya fluktuasi nilai antara 119,46 mg/L hingga 170,72 mg/L, dengan rata-rata 148,32 mg/L. Sebagian hasil menunjukkan nilai yang melampaui batas baku mutu lingkungan (<150 mg/L), terutama pada akhir periode pengamatan, yang mengindikasikan adanya ketidakstabilan proses pengolahan atau ketidakkonsistenan analisis laboratorium.
- Berdasarkan hasil FMEA, tiga mode kegagalan dengan nilai Risk Priority Number (RPN) tertinggi teridentifikasi sebagai berikut:
 - o Tidak tersedianya panduan warna indikator (RPN = 384),
 - o Perbedaan persepsi visual antar analis (RPN = 343),
 - o Ketidaksesuaian volume reagen akibat alat titrasi yang tidak terkalibrasi (RPN = 343).
 Ketiga mode kegagalan tersebut terjadi pada tahap titrasi dan interpretasi titik akhir, yang merupakan bagian paling kritis dalam pengujian COD.
- Hasil analisis FTA menunjukkan bahwa Top Event berupa ketidaksesuaian hasil uji COD disebabkan oleh dua jalur utama, yaitu:
 - o Kesalahan dalam penambahan reagen, yang dipicu oleh basic events seperti pipet tidak terkalibrasi, konsentrasi reagen tidak sesuai, dan label reagen yang pudar.
 - o Kesalahan interpretasi titik akhir titrasi, yang disebabkan oleh tidak adanya panduan warna, pencahayaan yang kurang memadai, serta perbedaan persepsi antar analis.

4. Integrasi metode FMEA dan FTA memberikan gambaran menyeluruh terhadap sumber risiko dalam proses pengujian COD. FMEA berperan dalam menentukan prioritas risiko secara kuantitatif, sementara FTA menjelaskan hubungan sebab-akibat antar komponen kegagalan. Kombinasi kedua metode ini memberikan dasar kuat bagi penerapan pengambilan keputusan berbasis risiko (risk-based decision making) untuk peningkatan mutu hasil uji di laboratorium.

Saran

1. Peningkatan Standar Operasional Laboratorium
Disarankan agar laboratorium menyediakan color chart atau panduan warna indikator titrasi di setiap meja kerja. Hal ini bertujuan untuk mengurangi subjektivitas dalam penentuan titik akhir titrasi.
2. Pemeliharaan dan Kalibrasi Peralatan
Alat-alat laboratorium seperti pipet, buret, dan perangkat titrasi perlu menjalani proses kalibrasi secara berkala, minimal setiap tiga bulan, guna menjamin ketepatan volume reagen dan konsistensi hasil pengujian.
3. Pelatihan dan Standarisasi Kompetensi Analis
Diperlukan pelatihan ulang bagi seluruh analis terkait teknik visual titrasi untuk menyamakan persepsi terhadap perubahan warna titik akhir serta meningkatkan kemampuan observasi selama proses analisis berlangsung.
4. Optimalisasi Lingkungan Kerja Laboratorium
Pencahayaannya pada area titrasi perlu ditingkatkan agar perubahan warna indikator dapat diamati dengan jelas, sehingga mengurangi potensi kesalahan dalam penentuan hasil titrasi.
5. Pengembangan Sistem Digitalisasi Analisis
Laboratorium disarankan untuk mengadopsi teknologi analisis modern, seperti penggunaan titrator otomatis atau

sistem digital berbasis sensor optik, guna meminimalkan pengaruh subjektivitas manusia dan meningkatkan presisi hasil pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- Andy Prastyabudi, W., Faharga, R. A., & Chandra, H. (2024). Systematic Risk Analysis of Railway Component Quality: Integration of Failure Mode & Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) 6. *Spektrum Industri*, 22(2), 77–89. <https://doi.org/10.12928/si.v22i2.223>
- Azzahra, A. M. (2024). Penilaian Risiko menggunakan Metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) terkait Kontaminasi Silang pada Area Pengemasan di Industri Farmasi “XYZ”7. *OBAT: Jurnal Riset Ilmu Farmasi Dan Kesehatan*, 2(5), 01–11. <https://doi.org/10.61132/obat.v2i5.600>
- Prasetya, R. Y., Suhermanto, S., & Muryanto, M. (2021). Implementasi FMEA dalam Menganalisis Risiko Kegagalan Proses Produksi Berdasarkan RPN 4. *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*, 20(2), 133. <https://doi.org/10.20961/performa.20.2.52219>
- Rukmana, A. N., Nurrahman, A. A., Selamat, S., & Abdillah, S. (2024). Enhancing reliability in garment manufacturing through FMEA and FTA 5. *Acta Logistica*, 11(4), 579–587. <https://doi.org/10.22306/al.v11i4.548>
- Rusdianto, R., Susanti, S., Kusmita, T., Aryanto, L., Talitha, T., & Mursid, M. (2023). Pengujian COD Analisis Uji Chemical Oxygen Demand (COD) pada Air Limbah Sawit di Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Provinsi Bangka Belitung. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, 3(2), 26–31. <https://doi.org/10.33019/jrfi.v3i2.355>

3

- Wilayah, D. I., Puskesmas, K., Simpang, P., & Tahun, E. (2025). *Medic nutricia* 2025,3. 11(5), 25–31. <https://doi.org/10.5455/mnj.v1i2.644>
- Yulianti, T., Sri Puji Saraswati, Johan Syafri Mahathir Ahmad, & Wiratni Budhijanto. (2021). Organic Removal Treatment Using Microbubble Generator (MBG) in Eutrophic Disorder Condition(2). *Journal of the Civil Engineering Forum*, 8(82), 97–104. <https://doi.org/10.22146/jcef.3599>