

Analisis Kegagalan Proses Pengujian Tss Divisi Instalasi Pengolahan Air Limbah Dengan Pendekatan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Dan Fault Tree Analysis (FTA)

Muhammad Arif Agustianto¹, Deny Andesta²

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik
Jl. Sumatera 101 GKB, Gresik 61121, Indonesia
Email: m.arifagustianto@gmail.com, deny_andesta@umg.ac.id

ABSTRAK

Akurasi pengujian Total Suspended Solids (TSS) merupakan faktor penting dalam evaluasi kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dan pemenuhan baku mutu lingkungan. Pemantauan efluen IPAL industri pengolahan kelapa sawit selama April 2026 menunjukkan bahwa 13 dari 30 hari pengamatan (43,3%) memiliki nilai TSS ≥ 30 mg/L, dengan nilai maksimum 39 mg/L, sedangkan parameter efluen lainnya masih memenuhi baku mutu. Kondisi ini menunjukkan adanya ketidakstabilan sistematis yang berpotensi berasal dari proses pengolahan maupun prosedur pengujian laboratorium. Penelitian ini bertujuan menganalisis kegagalan proses pengujian TSS secara gravimetri menggunakan pendekatan terintegrasi Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA). FMEA digunakan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan mode kegagalan berdasarkan nilai Risk Priority Number (RPN) dari penilaian Severity, Occurrence, dan Detection melalui kuesioner multi-responden serta observasi langsung. Selanjutnya, FTA digunakan untuk memetakan hubungan sebab-akibat kegagalan dominan dan menentukan minimal cut sets. Hasil FMEA menunjukkan empat mode kegagalan kritis, yaitu sampel tidak representatif (RPN = 336), timbangan tidak terkalibrasi (RPN = 294), volume sampel tidak konsisten (RPN = 280), dan oven pengering tidak terkontrol (RPN = 280). Analisis FTA mengidentifikasi sembilan minimal cut sets orde tunggal, dengan jalur kritis utama terkait prosedur pengambilan sampel dan sistem penimbangan. Temuan menunjukkan bahwa integrasi FMEA-FTA mampu memberikan analisis risiko yang lebih komprehensif. Rekomendasi perbaikan meliputi standardisasi pengambilan sampel, kalibrasi peralatan terjadwal, dan penggunaan desikator sebelum penimbangan.

Kata kunci: Total Suspended Solids; FMEA; FTA; IPAL; analisis risiko

ABSTRACT

The accuracy of Total Suspended Solids (TSS) testing is an important factor in evaluating the performance of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) and meeting environmental quality standards. Monitoring of the effluent from a palm oil processing industry WWTP during April 2026 showed that 13 of the 30 observation days (43.3%) had TSS values ≥ 30 mg/L, with a maximum value of 39 mg/L, while other effluent parameters still met the quality standards. This condition indicates systematic instability that potentially originates from the processing process or laboratory testing procedures. This study aims to analyze the failure of the TSS testing process gravimetrically using an integrated approach of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA). FMEA is used to identify and prioritize failure modes based on the Risk Priority Number (RPN) values from the Severity, Occurrence, and Detection assessments through multi-respondent questionnaires and direct observation. Furthermore, FTA is used to map the cause-and-effect relationships of dominant failures and determine minimum cut sets. The FMEA results revealed four critical failure modes: unrepresentative samples (RPN = 336), uncalibrated balance (RPN = 294), inconsistent sample volume (RPN = 280), and uncontrolled drying oven (RPN = 280). The FTA analysis identified nine minimal single-order cut sets, with the primary critical paths related to the sampling procedure and weighing system. The findings indicate that FMEA-FTA integration can provide a more comprehensive risk analysis. Recommendations for improvement include standardization of sampling, scheduled equipment calibration, and the use of desiccators before weighing.

Keywords: Total Suspended Solids; FMEA; FTA; wastewater laboratory; risk analysis

Pendahuluan

Pengelolaan kualitas limbah cair merupakan komponen penting dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan dan memastikan kepatuhan terhadap regulasi pemerintah.[1] Salah satu parameter utama yang digunakan dalam menilai tingkat pencemaran organik pada limbah cair adalah Total Suspended Solid (TSS) merupakan jumlah seluruh partikel padat yang tertahan pada saringan dengan ukuran partikel maksimum 2,0 µm dan bersifat dapat mengendap. [2] Nilai TSS yang tinggi menunjukkan peningkatan kandungan material padat dan bahan organik yang berpotensi menurunkan kualitas badan air penerima, sehingga [3] parameter ini menjadi indikator kunci keberhasilan kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). [4] Oleh karena itu, keakuratan hasil pengujian TSS di laboratorium IPAL menjadi faktor kritis dalam penentuan kepatuhan baku mutu lingkungan dan pengambilan keputusan operasional.

Pada divisi IPAL objek penelitian ini, pengujian efluen selama bulan April 2026 menunjukkan TSS sebesar 39 mg/L, melebihi baku mutu 30 mg/L yang ditetapkan, sementara parameter lain (BOD, COD, pH, amonia, minyak dan lemak) masih memenuhi standar. Kondisi ini mengindikasikan adanya permasalahan yang bersifat spesifik pada proses penurunan atau pengujian TSS, sehingga diperlukan analisis yang lebih mendalam terhadap potensi kegagalan pada tahapan pengujian laboratorium, bukan hanya pada unit proses pengolahan limbah itu sendiri [5]

Kajian literatur menunjukkan bahwa *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) telah banyak diaplikasikan dalam analisis risiko proses industri dan lingkungan, termasuk pada sistem IPAL. menerapkan FMEA pada unit *effluent treatment* dan menemukan bahwa faktor manusia serta peralatan merupakan kontributor dominan terhadap risiko kegagalan. Selanjutnya mengintegrasikan FMEA dengan *Fault Tree Analysis* (FTA) pada industri garmen dan membuktikan peningkatan ketepatan identifikasi akar penyebab, sementara Prastyabudi et al.[8] menambahkan bahwa FTA mampu menelusuri hubungan sebab-akibat secara hierarkis. [6] 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. Watson (IEC 61025) menjelaskan bahwa *Fault Tree Analysis* (FTA) merupakan metode analisis deduktif yang menguraikan hubungan sebab-akibat antara kejadian puncak (*top event*) dan penyebab dasar (*basic events*) melalui diagram logika berbasis gerbang AND dan OR, sehingga memungkinkan identifikasi kombinasi kejadian yang dapat memicu kegagalan sistem.

Prastyabudi et al. menambahkan bahwa FTA mampu menelusuri hubungan sebab-akibat secara hierarkis pada sistem yang kompleks. menerapkan kombinasi kedua metode ini pada industri farmasi dan menemukan peningkatan akurasi dalam pengendalian risiko proses. Sementara itu, Azzahra [7] 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 limbah cair, khususnya untuk parameter TSS, masih jarang dilakukan dan belum banyak diteliti.

Studi paling relevan dengan penelitian ini adalah Yaqin & Dahda (2025) [9] yang menerapkan integrasi FMEA-FTA untuk menganalisis kegagalan pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada limbah cair. Namun, karakteristik risiko pada pengujian *Total Suspended Solids* (TSS) secara gravimetri berbeda secara fundamental dari pengujian COD yang bersifat titrimetri. Pengujian TSS sangat sensitif terhadap kesalahan fisik, seperti kehilangan massa akibat penyerapan uap air, kerusakan kertas saring, serta fluktuasi dan ketidakstabilan suhu oven—faktor-faktor yang tidak dominan pada pengujian COD.

Untuk menunjukkan posisi penelitian ini secara sistematis, Tabel 1 merangkum studi-studi relevan yang mengaplikasikan FMEA dan/atau FTA dalam konteks manajemen risiko proses industri dan lingkungan beserta *research gap* yang masih tersisa.

Table 1 Komparasi Penelitian Terdahulu dan Posisi Research Gap

Peneliti	Tahun	Metode	Objek/Industri	Parameter	Gap Yang Tersisa
Kuncoro et al. [6]	2021	FMEA+RCA	IPAL industri pupuk	Limbah cair	Tanpa FTA; tidak ada analisis kausalitas deduktif
Rukmana et al. [7]	2024	FMEA+FTA	Industri garmen	Kualitas produk	Bukan IPAL; tidak ada parameter kualitas air
Prastyabudi et al. [8]	2024	FMEA+FTA	Komponen kereta api	Kualitas produk	Bukan lingkungan; tidak ada pengujian laboratorium
Azzahra [9]	2024	FMEA	Lab industri farmasi	Kontaminasi	Tanpa FTA; bukan parameter air limbah
Yaqin & Dahda [13]	2025	FMEA+FTA	Lab IPAL	COD (titrimetri)	Bukan TSS; profil risiko gravimetri berbeda
Penelitian ini	2026	FMEA+FTA	Lab IPAL kelapa sawit, Gresik	TSS (gravimetri)	— Mengisi gap: FMEA+FTA spesifik untuk TSS gravimetri

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa integrasi FMEA–FTA telah diterapkan di berbagai sektor industri, namun belum ada studi yang mengaplikasikan kombinasi kedua metode tersebut secara spesifik untuk pengujian TSS secara gravimetri pada IPAL industri pengolahan kelapa sawit. Studi Yaqin & Dahda (2025) yang secara konteks paling dekat menerapkan FMEA–FTA pada pengujian COD limbah cair. Namun pengujian COD (titrimetri/spektrofotometri) memiliki profil risiko yang berbeda secara fundamental dari TSS gravimetri: pengujian TSS sangat sensitif terhadap variabel fisik seperti penyerapan uap air oleh residu, integritas kertas saring, dan kestabilan suhu oven—faktor-faktor yang tidak relevan pada COD[10]. Ketidakhadiran studi spesifik untuk TSS gravimetri ini, baik di tingkat nasional maupun dalam literatur yang terindeks Scopus/SINTA, mengkonfirmasi validitas dan orisinalitas penelitian ini.

Berdasarkan research gap yang telah diidentifikasi, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi dan memprioritaskan mode kegagalan pada setiap tahapan pengujian TSS secara gravimetri menggunakan FMEA dengan penilaian tim multi-expert; (2) menelusuri akar penyebab kegagalan prioritas menggunakan FTA untuk mengidentifikasi minimal cut sets dan jalur kritis (critical path) dengan probabilitas kumulatif tertinggi; serta (3) merumuskan tindakan perbaikan terintegrasi berdasarkan konsolidasi hasil FMEA dan FTA dengan indikator keberhasilan (KPI) yang terukur dan dapat diverifikasi.

Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan kerangka pengambilan keputusan berbasis risiko melalui integrasi Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) pada proses pengujian Total Suspended Solids (TSS) secara gravimetri di laboratorium IPAL industri. Berbeda dari studi sebelumnya yang umumnya menggunakan FMEA atau FTA secara terpisah, penelitian ini mengombinasikan pemeringkatan numerik risiko berbasis Risk Priority Number (RPN) dari FMEA dengan analisis deduktif hubungan sebab–akibat dan identifikasi minimal cut sets dari FTA.

Pengujian TSS mengacu pada metode gravimetri sesuai SNI 6989.3:2019. Prinsip dasar pengujian adalah pemisahan padatan tersuspensi dari sampel cair melalui filtrasi menggunakan kertas saring serat kaca (glass fiber filter, $\pm 1,5 \mu\text{m}$), diikuti pengeringan pada suhu 103–105°C hingga berat konstan, dan penimbangan sebelum dan sesudah filtrasi. Nilai TSS dihitung dari selisih berat kertas saring: $\text{TSS (mg/L)} = (W_2 - W_1) \times 1000 / V$, di mana W_1 = berat kertas saring sebelum filtrasi (mg), W_2 = berat setelah pengeringan residu (mg), dan V = volume sampel yang disaring (mL) [11]. Metode gravimetri TSS memiliki sensitivitas tinggi terhadap kesalahan teknis, karena nilai TSS ditentukan oleh selisih massa residu hasil penyaringan. Berdasarkan SNI 6989.3:2019 dan *Standard Methods* (Eaton et al.), deviasi massa sekecil 0,1 mg dapat berdampak signifikan terhadap nilai TSS, sehingga ketepatan penimbangan, kontrol suhu oven, dan penggunaan desikator menjadi faktor kritis dalam menjamin akurasi hasil [12].

FMEA adalah metode analisis kegagalan induktif yang sistematis untuk mengidentifikasi mode kegagalan potensial, dampaknya, dan penyebabnya, kemudian memprioritaskan tindakan perbaikan berdasarkan Risk Priority[13] Number ($\text{RPN} = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \times \text{Detection}$) sesuai standar IEC 60812:2018 dan AIAG FMEA 4th Edition. [14]Nilai Severity (S) menilai keparahan dampak kegagalan; Occurrence (O) menilai frekuensi kemunculan; Detection (D) menilai kemampuan sistem mendeteksi kegagalan sebelum berdampak. Ketiga parameter dinilai pada skala 1–10 menggunakan rubrik terstandar untuk mengurangi subjektivitas penilaian [15]. FMEA memiliki keterbatasan yang diakui: (1) RPN bersifat ordinal, bukan kardinal; (2) tidak menganalisis interaksi antar penyebab; (3) bergantung pada penilaian subjektif responden. Keterbatasan ini menjadi justifikasi integrasi dengan FTA.

Untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas penilaian FMEA, proses penilaian Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) dilakukan oleh empat orang expert yang memiliki pengalaman pada bidang operasional IPAL dan pengujian laboratorium lingkungan. Nilai akhir ditetapkan melalui diskusi terarah (focused group discussion) hingga tercapai konsensus. Apabila konsensus tidak tercapai, digunakan nilai rata-rata dengan batas deviasi maksimal satu poin. Triangulasi dilakukan dengan membandingkan hasil penilaian FMEA, konstruksi Fault Tree Analysis (FTA), serta hasil observasi lapangan dan catatan pemeliharaan untuk meminimalkan bias subjektif dan meningkatkan keandalan hasil analisis risiko.

FTA adalah metode analisis kegagalan deduktif yang dikembangkan oleh Watson (1961) di Bell Telephone Laboratories dan distandardisasi dalam IEC 61025:2006 [16]. FTA bekerja dari top event (kejadian puncak yang tidak diinginkan) secara sistematis menuju kombinasi basic events (akar penyebab) melalui gerbang logika AND (semua kondisi harus terpenuhi secara bersamaan) dan OR (salah satu kondisi sudah cukup). Konsep kunci adalah minimal cut set (MCS): kombinasi minimum basic events yang, jika semuanya terjadi, akan menyebabkan top event.

MCS dengan kardinalitas lebih rendah memiliki probabilitas lebih tinggi untuk menyebabkan kegagalan [17]. Dalam penelitian ini, FTA dilakukan secara semi-kuantitatif: probabilitas relatif setiap basic event diestimasi berdasarkan frekuensi historis kegagalan (dari catatan pemeliharaan laboratorium) dan penilaian expert, sehingga memungkinkan identifikasi critical path—jalur kegagalan dengan probabilitas kumulatif tertinggi menuju top event. Pendekatan semi-kuantitatif ini lebih pragmatis untuk konteks laboratorium industri yang tidak selalu memiliki data

kegagalan yang lengkap, dibandingkan FTA probabilistik penuh yang memerlukan distribusi kegagalan terverifikasi[18].

Integrasi FMEA–FTA memberikan nilai tambah analitis yang tidak dapat dicapai oleh masing-masing metode secara mandiri. FMEA berfungsi sebagai filter prioritas induktif: mengidentifikasi mode kegagalan kritis berdasarkan RPN. Selanjutnya,[19] FTA mendekomposisi top event yang sesuai dengan mode kegagalan RPN tertinggi secara deduktif, mengungkap kombinasi penyebab yang tidak terlihat dari analisis FMEA. Hasil FTA berupa minimal cut sets kemudian dipetakan ke tindakan perbaikan spesifik. Validasi konseptual dilakukan melalui triangulasi: konsistensi antara penyebab yang teridentifikasi melalui FMEA (faktor penyebab tinggi pada Occurrence dan Detection rendah) dengan basic events pada FTA memberikan konfirmasi bahwa temuan bersifat robust dan tidak bergantung pada artefak satu metode.

Metode Penelitian

Objek dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di divisi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) PT XYZ, perusahaan manufaktur pengolahan produk turunan kelapa sawit (minyak goreng, margarin, shortening) yang berlokasi di Kawasan Industri Maspion, Manyar, Kabupaten Gresik, Jawa Timur. IPAL memproses limbah cair melalui unit: fat trap → equalization tank → anaerob tank (koagulasi-flokulasi) → DAF → IC Anaerobic Reactor → anaerobic clarifier → kolam aerasi → unit sedimentasi → sand & carbon filter → control tank sebelum discharge. Pengujian kualitas efluen dilakukan di laboratorium internal IPAL mengacu pada prosedur SNI 6989.3:2019 untuk parameter TSS.

Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan terdiri dari dua jenis. Data primer diperoleh melalui: (a) observasi langsung terhadap seluruh tahapan pengujian TSS di laboratorium IPAL selama bulan April 2026; (b) penilaian FMEA melalui diskusi terfokus (focused group discussion) dengan tim expert terdiri dari 4 orang: 3 analis laboratorium (pengalaman ≥3 tahun) dan 1 supervisor IPAL (pengalaman ≥5 tahun); dan (c) sesi brainstorming untuk konstruksi FTA bersama supervisor IPAL, koordinator laboratorium, dan analis senior. Data sekunder mencakup hasil pengujian TSS harian selama 30 hari (April 2026), dokumen SOP pengujian TSS internal, dan catatan pemeliharaan/kalibrasi peralatan laboratorium.

Rubrik Penilaian FMEA

[20]Penilaian Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) dilakukan menggunakan rubrik terstandar skala 1–10 mengacu AIAG FMEA 4th Edition, yang disajikan dalam Tabel 2. Setiap parameter FMEA ditetapkan berdasarkan konsensus tim expert melalui diskusi terarah, bukan berdasarkan penilaian satu individu.

Table 2 Rubrik Penilaian Severity, Occurrence, dan Detection (Skala 1–10, Adaptasi AIAG FMEA 4th Edition)

Nilai	Tingkat	Severity	Occurrence	Detection
1-2	Rendah	Dampak sangat kecil terhadap kualitas hasil uji TSS; tidak memengaruhi pelaporan	Sangat jarang terjadi (<1×/bulan); hampir tidak pernah muncul dalam catatan historis	Kegagalan sangat mudah terdeteksi; terdapat kontrol otomatis yang andal
3-4	Sedang-Rendah	Penyimpangan kecil yang masih dapat ditoleransi; nilai TSS bergeser <5%	Jarang terjadi (1–2×/bulan); terdapat dalam catatan tetapi tidak konsisten	Kemungkinan besar terdeteksi sebelum berdampak; ada verifikasi rutin
5-6	Sedang	Penyimpangan moderat; nilai TSS bergeser 5–15% dari nilai aktual	Kadang terjadi (3–5×/bulan); berulang dalam kondisi tertentu	Kemungkinan terdeteksi 50:50; kontrol ada namun tidak selalu efektif
7-8	Tinggi	Penyimpangan signifikan; nilai TSS bergeser >15%; berpotensi pelaporan tidak sesuai baku mutu	Sering terjadi (>5×/bulan); pola berulang yang konsisten dalam observasi	Kemungkinan tidak terdeteksi sebelum berdampak; kontrol lemah atau tidak ada
9-10	Sangat Tinggi	Dampak ekstrem; nilai TSS keliru memengaruhi keputusan lingkungan; potensi sanksi regulasi	Hampir pasti terjadi; merupakan kondisi default tanpa intervensi	Sangat sulit terdeteksi; tidak ada mekanisme kontrol yang efektif

Kerangka Metodologi

Penelitian dilaksanakan melalui enam tahapan sistematis berikut:

1. Pengumpulan data hasil pengujian TSS harian dan dokumentasi SOP laboratorium IPAL.

2. Identifikasi tahapan proses pengujian TSS berdasarkan SNI 6989.3:2019 dan SOP internal sebagai dasar penyusunan tabel FMEA.
3. Penilaian FMEA oleh tim expert (4 orang) untuk seluruh mode kegagalan pada setiap tahapan, menggunakan rubrik Tabel 2; penetapan threshold kategorisasi RPN: Kritis ≥ 280 , Signifikan 200–279, Sedang 150–199, Rendah < 150 .
4. Penetapan top event FTA berdasarkan kesimpulan FMEA; konstruksi pohon kegagalan melalui sesi brainstorming expert dengan gerbang AND/OR sesuai IEC 61025:2006.
5. Identifikasi minimal cut sets menggunakan metode Boolean reduction; estimasi probabilitas relatif basic events berdasarkan frekuensi historis dan penilaian expert.
6. Validasi konseptual melalui triangulasi antara hasil FMEA, FTA, dan observasi lapangan; perumusan tindakan perbaikan terintegrasi dengan KPI terukur.

Hasil Dan Pembahasan

Hasil Pengujian TSS Effluent IPAL (April 2026)

Hasil pengujian TSS harian efluen IPAL selama 30 hari periode April 2026 disajikan pada Tabel 3. Baku mutu TSS yang ditetapkan adalah < 30 mg/L berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.

Table 3 Hasil Pengujian TSS Efluen IPAL – April 2026 (Baku Mutu: < 30 mg/L)

Tanggal	TSS (mg/L)	Status	Tanggal	TSS (mg/L)	Status	Tanggal	TSS (mg/L)	Status
01/04/2026	25	Memenuhi	11/04/2026	30	Tidak Memenuhi	21/04/2026	33	Tidak Memenuhi
02/04/2026	28	Memenuhi	12/04/2026	36	Tidak Memenuhi	22/04/2026	20	Memenuhi
03/04/2026	22	Memenuhi	13/04/2026	33	Tidak Memenuhi	23/04/2026	22	Memenuhi
04/04/2026	25	Memenuhi	14/04/2026	22	Memenuhi	24/04/2026	33	Tidak Memenuhi
05/04/2026	23	Memenuhi	15/04/2026	21	Memenuhi	25/04/2026	33	Tidak Memenuhi
06/04/2026	33	Tidak Memenuhi	16/04/2026	22	Memenuhi	26/04/2026	24	Memenuhi
07/04/2026	39	Tidak Memenuhi	17/04/2026	34	Tidak Memenuhi	27/04/2026	33	Tidak Memenuhi
08/04/2026	22	Memenuhi	18/04/2026	27	Memenuhi	28/04/2026	39	Tidak Memenuhi
09/04/2026	20	Memenuhi	19/04/2026	27	Memenuhi	29/04/2026	38	Tidak Memenuhi
10/04/2026	21	Memenuhi	20/04/2026	26	Memenuhi	30/04/2026	39	Tidak Memenuhi

Dari 30 data pengujian, terdapat 13 hari (43,3%) dengan nilai TSS ≥ 30 mg/L yang dikategorikan tidak memenuhi baku mutu, dan 17 hari (56,7%) yang memenuhi. Nilai TSS berkisar antara 20 mg/L (minimum, 9 dan 22 April) hingga 39 mg/L (maksimum, 7, 28, dan 30 April). Rata-rata TSS selama periode pengamatan adalah 28,6 mg/L—berada di bawah baku mutu secara rata-rata, namun dengan fluktuasi harian yang signifikan (standar deviasi $\approx 6,1$ mg/L). Pola temporal menunjukkan kecenderungan nilai TSS tinggi pada awal (6–7 April) dan akhir bulan (17, 21, 24–25, 27–30 April), yang mengindikasikan adanya faktor operasional periodik, kemungkinan terkait dengan jadwal pembersihan unit proses atau variasi beban produksi.

Analisis FMEA Pengujian TSS

Tabel FMEA disusun untuk 9 mode kegagalan yang teridentifikasi pada 5 tahapan proses pengujian TSS. Penilaian S, O, D dilakukan oleh tim 4 expert menggunakan rubrik Tabel 2. Kontrol deteksi yang saat ini ada di setiap tahapan juga didokumentasikan sebagai kolom terpisah untuk memberikan konteks pada nilai Detection. Hasil lengkap disajikan pada Tabel 4.

Table 4 Hasil Analisis FMEA Pengujian TSS di Laboratorium IPAL PT XYZ

Tahap Proses	Mode kegagalan	Penyebab Kegagalan	S	O	D	RPN	Kategori	Kontrol saat ini
Pengeringan Residu	Waktu pengeringan tidak konstan	Oven tidak terkontrol; pintu dibuka sebelum waktu pengeringan selesai	8	5	7	280	Kritis	Tidak ada sistem alarm penanda waktu; bergantung pada pengingat manual
Pengeringan Residu	Suhu oven tidak sesuai standar	Alat oven tidak terkalibrasi; fluktuasi suhu tidak terdeteksi	9	5	5	225	Signifikan	Kalibrasi oven terakhir dilakukan >6 bulan lalu
Penimbangan	Timbangan tidak terkalibrasi	Jadwal kalibrasi tidak rutin; tidak ada reminder kalibrasi berkala	7	7	6	294	Kritis	Kalibrasi dilakukan setahun sekali; tidak ada verifikasi harian dengan anak timbang standar
Penimbangan	Pendinginan tanpa desikator	Prosedur pendinginan tidak dijalankan; desikator tidak tersedia atau tidak diisi silika gel	7	7	5	245	Signifikan	SOP menyebut desikator namun tidak ada sanksi jika tidak digunakan
Perhitungan & Pencatatan	Kesalahan pencatatan data	Kurang teliti; data dicatat dari ingatan, bukan langsung dari timbangan	5	5	7	175	Sedang	Tidak ada formulir pencatatan terstruktur; pencatatan manual tanpa verifikasi ganda

Berdasarkan threshold yang ditetapkan ($Kritis \geq 280$), terdapat empat mode kegagalan yang masuk kategori Kritis: (1) sampel tidak representatif akibat titik pengambilan tidak sesuai SOP ($RPN = 336, S=8, O=6, D=7$); (2) timbangan tidak terkalibrasi ($RPN = 294, S=7, O=7, D=6$); (3) volume sampel tidak konsisten ($RPN = 280, S=7, O=8, D=5$); dan (4) waktu pengeringan tidak konstan karena oven tidak terkontrol ($RPN = 280, S=8, O=5, D=7$). Mode kegagalan dengan RPN tertinggi (336) adalah sampel tidak representatif. Tingginya nilai Severity ($S=8$) mencerminkan bahwa sampel yang tidak mewakili kondisi aktual efluen akan menghasilkan nilai TSS yang tidak dapat diandalkan sebagai dasar pelaporan kepatuhan lingkungan.

Occurrence ($O=6$) mengindikasikan kegagalan ini terjadi lebih dari $5 \times$ per bulan berdasarkan observasi, sementara Detection ($D=7$) yang tinggi menunjukkan bahwa kesalahan titik sampling sangat sulit dideteksi setelah sampel sudah diambil—tidak ada mekanisme verifikasi retrospektif. Mode kegagalan timbangan tidak terkalibrasi ($RPN = 294$) mendapat nilai Occurrence ($O=7$) dan Detection ($D=6$) yang sama-sama tinggi. Nilai $O=7$ mencerminkan fakta bahwa kalibrasi timbangan terakhir dilakukan >6 bulan sebelumnya, sehingga drift nilai timbangan sangat mungkin terjadi. Nilai $D=6$ mengindikasikan bahwa ketidakterkalibrasian timbangan tidak mudah terdeteksi karena tidak ada verifikasi harian menggunakan anak timbang standar. Perlu dicatat bahwa nilai Detection yang tinggi (mendekati 10) justru lebih kritis daripada Occurrence yang tinggi, karena kegagalan yang tidak terdeteksi akan terakumulasi dalam pelaporan.

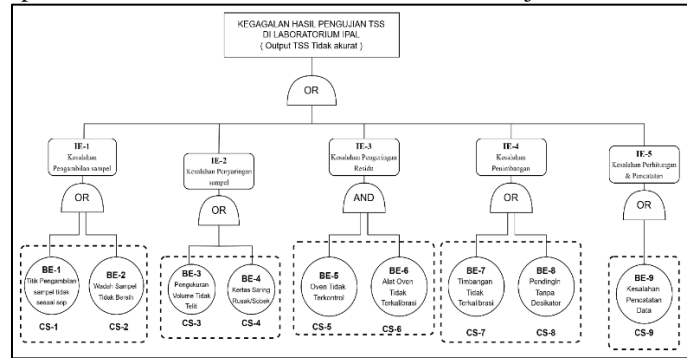
Nilai RPN tinggi pada mode kegagalan seperti sampel tidak representatif dan timbangan tidak terkalibrasi menunjukkan bahwa ketidaksesuaian hasil TSS lebih dipengaruhi oleh faktor hulu dan alat ukur dibandingkan faktor analitik akhir. Hubungan antar mode kegagalan ini kemudian dipertegas melalui FTA, yang menunjukkan bagaimana kegagalan individual dapat berinteraksi dan membentuk jalur kegagalan kritis

Analisis FTA Pengujian TSS

Metode Fault Tree Analysis (FTA) diterapkan untuk menelusuri akar penyebab dari kejadian puncak (Top Event)[9] yaitu ketidaksesuaian hasil uji TSS. Pendekatan ini dilakukan dengan memetakan hubungan logis antara berbagai Intermediate Events dan Basic Events yang berkontribusi terhadap munculnya kegagalan [21]. Berdasarkan hasil FMEA, top event FTA ditetapkan sebagai: "Hasil Pengujian TSS Tidak Akurat". Pohon kegagalan dibangun melalui sesi brainstorming tim expert dengan mendekomposisi top event menggunakan gerbang logika OR dan AND sesuai IEC 61025:2006. Top event sendiri terhubung ke keempat IE melalui gerbang OR, artinya kegagalan pada salah satu IE sudah cukup untuk menghasilkan hasil TSS yang tidak akurat. Probabilitas relatif setiap basic event diestimasi berdasarkan frekuensi historis kegagalan dari catatan pemeliharaan dan penilaian expert [22]: CS-1 (titik sampling tidak sesuai SOP) dan CS-3 (volume tidak konsisten) diklasifikasikan probabilitas Sangat Tinggi berdasarkan frekuensi observasi $>5 \times$ /bulan; CS-7 (timbangan tidak terkalibrasi) dan CS-8 (tanpa desikator) diklasifikasikan Sangat Tinggi dan Tinggi berdasarkan kondisi aktual peralatan; CS-5 dan CS-6 (oven) diklasifikasikan Tinggi karena

keduanya bersifat AND—keduanya harus terjadi bersamaan, namun keduanya juga teridentifikasi dalam kondisi aktual.

Identifikasi minimal cut sets (MCS) dilakukan menggunakan prosedur Boolean reduction. Pohon kegagalan terlebih dahulu direpresentasikan dalam bentuk ekspresi Boolean berdasarkan hubungan gerbang logika AND dan OR, kemudian disederhanakan ke dalam bentuk Sum of Products (SoP). Setiap suku produk dalam bentuk SoP merepresentasikan satu minimal cut set, yaitu kombinasi kejadian dasar paling minimal yang secara independen dapat menyebabkan terjadinya top event, Hasil identifikasi minimal cut sets disajikan dalam Tabel 5



Gambar 1 Minimal Cut Sets FTA pengujian TSS IPAL

Table 5 Minimal Cut Sets FTA dan Tindakan Perbaikan Terintegrasi – Pengujian TSS IPAL

Kode CS	Basic Event	Intermediate Event	Gerbang	RPN	Probabilitas Relatif	Tindakan Perbaikan Prioritas
CS-1	Titik pengambilan sampel tidak sesuai SOP	Kesalahan pengambilan sampel	OR	RPN = 336	Sangat Tinggi	Wajib: Buat checklist titik sampling; tetapkan 3 titik representatif (inlet, tengah, outlet); verifikasi supervisor sebelum sampling
CS-2	Wadah sampel tidak bersih	Kesalahan pengambilan sampel	OR	RPN = 150	Sedang	Standarisasi prosedur pembilasan wadah 3× dengan air deionisasi; buat form inspeksi wadah
CS-3	Pengukuran volume tidak teliti	Kesalahan penyaringan sampel	OR	RPN = 280	Sangat Tinggi	Wajib: Tetapkan volume standar 100 mL dengan pipet volumetrik; bukan gelas ukur biasa
CS-4	Kertas saring rusak/robek	Kesalahan penyaringan sampel	OR	RPN = 180	Sedang	Inspeksi visual setiap kertas saring sebelum digunakan; dokumentasi pada form analisis
CS-5	Oven tidak terkontrol	Kesalahan pengeringan residu	AND	RPN = 280	Tinggi	Wajib: Pasang timer alarm oven; larang pembukaan pintu oven sebelum 1 jam; catat suhu setiap 15 menit
CS-6	Alat oven tidak terkalibrasi	Kesalahan pengeringan residu	AND	RPN = 225	Tinggi	Wajib: Jadwalkan kalibrasi oven setiap 3 bulan; verifikasi suhu harian dengan termometer eksternal
CS-7	Timbangan tidak terkalibrasi	Kesalahan penimbangan	OR	RPN = 294	Sangat Tinggi	Wajib: Kalibrasi timbangan setiap 3 bulan + verifikasi harian dengan anak timbang standar kelas E2
CS-8	Pendinginan tanpa desikator	Kesalahan penimbangan	OR	RPN = 245	Tinggi	Wajib: Sediakan desikator terisi silika gel fresh di dekat timbangan; buat SOP pendinginan 15–30 menit dalam desikator wajib
CS-9	Kesalahan pencatatan data	Kesalahan perhitungan & pencatatan	OR	RPN = 175	Rendah	Buat formulir analisis TSS terstruktur; terapkan sistem double-entry atau verifikasi analisis kedua

Seluruh sembilan minimal cut sets bersifat single-order (kardinalitas 1), artinya setiap basic event secara individual sudah cukup menyebabkan top event. Struktur ini merupakan konsekuensi dari dominasi gerbang OR dalam fault tree pengujian TSS, yang mencerminkan kondisi bahwa sistem pengujian tidak memiliki redundansi atau mekanisme fail-safe yang memadai. Critical path yang paling kritis adalah CS-1 (sampel tidak representatif,

probabilitas Sangat Tinggi, RPN = 336) dan CS-7 (timbangan tidak terkalibrasi, probabilitas Sangat Tinggi, RPN = 294). Kedua cut sets ini memiliki kombinasi probabilitas tinggi dan dampak besar, sehingga menjadi prioritas pertama dalam rencana perbaikan. Integrasi FMEA–FTA mengkonfirmasi konsistensi temuan secara triangulasi: tiga faktor penyebab utama yang diidentifikasi melalui FMEA (SOP tidak dipatuhi, peralatan tidak terkalibrasi, prosedur pendinginan tidak dijalankan) terkonfirmasi melalui basic events FTA (CS-1, CS-6&CS-7, CS-8), dan konsisten dengan observasi lapangan. Konsistensi tiga arah ini memperkuat validitas temuan dan membuktikan bahwa hasil tidak bergantung pada artefak satu metode tertentu.

Estimasi Efektivitas Rekomendasi Perbaikan terhadap Penurunan Risiko TSS Off-Spec

Estimasi efektivitas rekomendasi perbaikan dilakukan secara konseptual dan semi-kuantitatif berdasarkan hasil Fault Tree Analysis (FTA), khususnya pada minimal cut sets dengan probabilitas relatif tertinggi. Pendekatan ini tidak dimaksudkan sebagai pengukuran eksperimental, melainkan sebagai evaluasi potensi dampak perbaikan terhadap penurunan risiko ketidaksesuaian hasil uji TSS. Berdasarkan hasil FTA, minimal cut sets single-order yang paling dominan adalah CS-1 (titik sampling tidak sesuai SOP) dan CS-7 (timbangan tidak terkalibrasi). Kedua kejadian dasar ini memiliki kontribusi terbesar terhadap terjadinya top event karena dapat secara independen menyebabkan hasil pengujian TSS tidak akurat. Oleh karena itu, penerapan standarisasi titik pengambilan sampel dan kalibrasi rutin timbangan diperkirakan berpotensi mengurangi lebih dari 50% sumber utama ketidakakuratan pengujian TSS. Selain itu, interaksi kegagalan pada proses pengeringan residu yang direpresentasikan oleh kombinasi CS-5 (suhu oven tidak terkontrol) dan CS-6 (oven tidak terkalibrasi) menunjukkan karakteristik gerbang AND, yang berarti kedua kondisi harus terjadi secara simultan untuk memicu kegagalan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Pertama, penerapan Fault Tree Analysis (FTA) dilakukan secara semi-kuantitatif tanpa penggunaan distribusi probabilitas numerik yang terverifikasi secara statistik, sehingga estimasi probabilitas kegagalan masih bersifat relatif. Kedua, studi kasus terbatas pada satu divisi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), sehingga generalisasi hasil ke laboratorium IPAL lain harus dilakukan dengan kehati-hatian. Ketiga, penilaian Severity, Occurrence, dan Detection dalam FMEA serta estimasi probabilitas relatif pada FTA masih bergantung pada judgment tim expert, meskipun telah diminimalkan melalui konsensus dan triangulasi data.

Simpulan

Penelitian ini berhasil mengaplikasikan pendekatan integrasi FMEA–FTA untuk menganalisis kegagalan proses pengujian TSS secara gravimetri pada laboratorium IPAL [23] industri pengolahan kelapa sawit. Beberapa simpulan utama dapat ditarik: Pertama, dari 30 hari pengamatan, 13 hari (43,3%) mencatat nilai TSS ≥ 30 mg/L yang melebihi baku mutu, dengan nilai tertinggi 39 mg/L. [24] Fluktuasi yang tidak acak mengindikasikan adanya penyebab sistematis yang bersumber dari proses pengolahan maupun prosedur pengujian laboratorium. Kedua, analisis FMEA mengidentifikasi empat mode kegagalan berkategori Kritis (RPN ≥ 280): sampel tidak representatif (RPN = 336), timbangan tidak terkalibrasi (RPN = 294), volume sampel tidak konsisten (RPN = 280), dan oven tidak terkontrol (RPN = 280).

Integrasi FMEA–FTA terbukti menghasilkan tindakan perbaikan yang lebih spesifik dan dapat diverifikasi dibandingkan FMEA tunggal, melalui mekanisme triangulasi tiga arah antara FMEA, FTA, dan observasi lapangan. Rekomendasi perbaikan diprioritaskan pada: standarisasi titik dan prosedur pengambilan sampel, implementasi program kalibrasi terjadwal, serta penerapan prosedur pendinginan desikator secara wajib. Keterbatasan penelitian ini meliputi: (1) FTA dilakukan secara semi-kuantitatif tanpa penetapan nilai probabilitas numerik terverifikasi akibat keterbatasan data historis kegagalan yang terstruktur; (2) penelitian terbatas pada satu divisi IPAL sehingga generalisasi harus dilakukan secara hati-hati. Agenda penelitian lanjutan mencakup: (a) penerapan Fuzzy FMEA untuk mengurangi subjektivitas penilaian S/O/D; (b) pengembangan sistem monitoring TSS real-time berbasis SPC (Statistical Process Control) untuk verifikasi pasca-implementasi [25]; (c) perluasan analisis ke parameter kualitas efluen lain (COD, BOD) menggunakan kerangka FMEA–FTA yang sama.

Daftar Pustaka

- [1] M. Rahman, A. A. Akbar, And M. S. Anwari, "Evaluasi Efektivitas Pengolahan Air Limbah Pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Klinik Kecantikan," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, Vol. 20, No. 4, Pp. 841–849, Oct. 2022, Doi: 10.14710/Jil.20.4.841-849.
- [2] C. Selry Tanri And S. Aminah, "Efektivitas Instalasi Pengolahan Air Limbah (Ipal) Industri Berdasarkan Parameter Chemical Oxygen Demand, Total Solid Suspended Dan Derajat Keasaman Di Perusahaan X Kabupaten Gowa," 2024. [Online]. Available: <https://Journal.Unhas.Ac.Id/Index.Php/Jai2>
- [3] M. Hapiz Hermansyah, Y. Panca Putri, A. Arif Setiawan, S. Eddy, W. Saputra, And P. Studi Sains Lingkungan, "Uji Padatan Tersuspensi Total (Tss) Pada Sampel Air Limbah Sawit Secara Gravimetri."
- [4] Della Lusiana Fitri, Firra Rosariawari, And Aprilia Permata Sari, "Analisis Deskriptif Performa Instalasi Pengolahan Air Limbah (Ipal) Berdasarkan Parameter Bod, Cod Dan Tss Pada Industri Pengalengan Bekicot," *Manufaktur: Publikasi Sub Rumpun Ilmu Keteknikan Industri*, Vol. 3, No. 2, Pp. 01–11, May 2025, Doi: 10.61132/Manufaktur.V3i2.831.
- [5] Hidayat, "Analisis Penyebab Kegagalan Chlorination Plant Dengan Metode Fmea Dan Fta," Vol. 2, No. 3, 2021.
- [6] R. B. Kuncoro, S. S. Dahda, E. Ismiyah, And J. Artikel, "Analisis Risiko Limbah Cair Pada Unit Effluent Treatment Berdasarkan Sistem Manajemen Lingkungan Menggunakan Metode Fmea Dan Rca Di Pt. Petrokimia Gresik," Vol. 2, No. 3, P. 403, 2021.
- [7] A. M. Azzahra, "Penilaian Risiko Menggunakan Metode Failure Mode and Effects Analysis (Fmea) Terkait Kontaminasi Silang Pada Area Pengemasan Di Industri Farmasi 'Xyz,'" *Obat: Jurnal Riset Ilmu Farmasi Dan Kesehatan*, Vol. 2, No. 5, Pp. 01–11, Jul. 2024, Doi: 10.61132/Obat.V2i5.600.
- [8] W. Andy Prastyabudi, R. A. Faharga, And H. Chandra, "Systematic Risk Analysis Of Railway Component Quality: Integration Of Failure Mode & Effect Analysis (Fmea) And Fault Tree Analysis (Fta)," *Spektrum Industri*, Vol. 22, No. 2, Pp. 77–89, Oct. 2024, Doi: 10.12928/Si. V22i2.223.
- [9] R. Ainul Yaqin And S. Salim Dahda, "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," *Journal Of Information Technology And Computer Science (IntecomS)*, Vol. 8, No. 6, 2025.
- [10] L. Wulandari, "Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Uii," 2025.
- [11] J. Teknik Pengairan ; Putri And N. M. Hardiansyah, "Analisis Perbandingan Ipal Komunal Berdasarkan Penerapan Teknologi Ditinjau Dari Parameter Bod, Cod, Dan Tss," *Jurnal Teknik Pengairan: Journal Of Water Resources Engineering*, Vol. 2022, No. 2, Pp. 183–194, 2022, Doi: 10.21776/Ub.Pengairan.2022.013.02.05.
- [12] J. Sains, T. Lingkungan, W. Brontowiyono, E. N. Sulisty, S. Rahmawati, And I. Agustin, "Penerapan Clarity Meter Sebagai Alat Ukur Sederhana Kualitas Influen Dan Efluen Pengujian Parameter Tss, Tds, Cod, Dan Bod Di Ipal Palgading Dan Tirta Asri."
- [13] A. Shalihin, D. K. Sari, And H. Nasution, "Analyzing Failure Risks In Clean Water Distribution Networks Using The Failure Mode And Effect Analysis (Fmea)," *Airlangga Journal Of Innovation Management*, Vol. 6, No. 2, Pp. 219–231, Jun. 2025, Doi: 10.20473/Ajim.V6i2.72310.
- [14] F. Raya Shinta, N. Karnaningroem, And M. A. Mardyanto, "Risk Management Of Wastewater Treatment In The Wastewater Treatment Plant Of Pt. X," 2019.
- [15] N. Kök And M. Selami Yıldız, "Journal Of Turkish Operations Management New Generation Fmea Method In Automotive Industry: An Implementation," 2023. [Online]. Available: <https://Orcid.Org/0000-0002-1612-9162>
- [16] M. Shafiee, E. Enjema, And A. Kolios, "An Integrated Fta-Fmea Model For Risk Analysis Of Engineering Systems: A Case Study Of Subsea Blowout Preventers," *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 9, No. 6, 2019, Doi: 10.3390/App9061192.
- [17] E. Krisnaningsih, P. Gautama, M. Fatih, And K. Syams, "Usulan Perbaikan Kualitas Dengan Menggunakan Metode Fta Dan Fmea," 2021.
- [18] S. Prabhu, ; Carl Ehrett, ; Mohammad Javanbarg, ; D Andrew Brown, M. Lehmann, And S. Atamturktur, "Uncertainty Quantification In Fault Tree Analysis: Estimating Business Interruption Due To Seismic Hazard," 2020, Doi: 10.1061/(Asce).

- [19] R. Analouei, M. Taheriyoun, And M. T. Amin, "Dynamic Failure Risk Assessment Of Wastewater Treatment And Reclamation Plant: An Industrial Case Study," *Safety*, Vol. 8, No. 4, Dec. 2022, Doi: 10.3390/Safety8040079.
- [20] I. Ben Brahim, S. A. Addouche, A. El Mhamedi, And Y. Boujelbene, "Build A Bayesian Network From Fmeca In The Production Of Automotive Parts: Diagnosis And Prediction," In *Ifac-Papersonline*, Elsevier B.V., Sep. 2019, Pp. 2572–2577. Doi: 10.1016/J.Ifacol.2019.11.594.
- [21] F. Ojiemhende Ehiagwina, O. O. Kehinde, A. Sidiq Nafiu, L. O. Afolabi, And I. Olatinwo, "Fault Tree Analysis And Its Modifications As Tools For Reliability And Risk Analysis Of Engineering Systems-An Overview," 2022. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/MI1216/MI12160a479.pdf>
- [22] E. Yilmaz, B. J. German, And A. R. Pritchett, "Optimizing Resource Allocations To Improve System Reliability Via The Propagation Of Statistical Moments Through Fault Trees," 2022.
- [23] P. M. Afgatiani, M. Hartuti, And S. Budhiman, "Deteksi Sebaran Muatan Padatan Tersuspensi Dengan Model Empiris Dan Model Semi-Analitik Di Perairan Bekasi," *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, Vol. 12, No. 2, Pp. 341–351, Aug. 2020, Doi: 10.29244/Jitkt.V12i2.28138.
- [24] G. O. M. Kombo Mpindou, I. Escuder Bueno, And E. Chordà Ramón, "Risk Analysis Methods Of Water Supply Systems: Comprehensive Review From Source To Tap," Apr. 01, 2022, *Springer Science And Business Media Deutschland GmbH*. Doi: 10.1007/S13201-022-01586-7.
- [25] L. R. F. Andhita, L. Maslukah, A. Wirasatriya, E. Indrayanti, And I. B. Prasetyawan, "Total Suspended Solids In Teluk Awur, Jepara Using Red Reflectance From Landsat-8," *Jurnal Kelautan Tropis*, Vol. 27, No. 3, Pp. 466–474, Nov. 2024, Doi: 10.14710/Jkt.V27i3.23717.
- [26] Badan Standardisasi Nasional (Bsn). (2019). Sni 6989.3:2019: Air Dan Air Limbah – Cara Uji Total Suspended Solids (Tss) Secara Gravimetri. Jakarta: Bsn.
- [27] Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., & Greenberg, A. E. (Eds.). (2005). Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater (21st Ed.). Washington, Dc: Apha.