

Upaya Percepatan Penanganan Kondisi Substandard Submarine Pipeline Penerimaan Avtur menggunakan Metode Double-Ended Draining dan Oil Bubble Trap

Fuad Al Amien^{1*}, Wahyu Putra HK², Andre Sumanta³, Jhodi Irawan⁴, Aris Setiyawan⁵, Tahta Adhitama⁶, Vrisco Harjanto⁷

^{1-4, 6-7} Integrated Terminal Ampenan, PT Pertamina Patra Niaga, Regional Jawa Timur–Bali–Nusa Tenggara (Jatimbalinus), Indonesia

⁵ Health, Safety, Security, and Environment (HSSE) Regional, PT Pertamina Patra Niaga, Regional Jawa Timur–Bali–Nusa Tenggara (Jatimbalinus), Indonesia

Email : fuad.amien1603@gmail.com¹, w.putra46@gmail.com², andresumanta2@gmail.com³, jhodiirawan@gmail.com⁴, arissetiyawan87@gmail.com⁵, adhitama53@gmail.com⁶, vrisco.harjanto@outlook.com⁷

*Korespondensi penulis: fuad.amien1603@gmail.com

Abstract. *Submarine pipelines are vital infrastructures in aviation fuel distribution, carrying high risks of operational disruption, safety issues, and environmental pollution. In 2025, the aviation fuel receiving submarine pipeline at Integrated Terminal Ampenan was deformed due to mechanical pulling by MT Anargya I, causing system shutdown. This incident created risks of seawater intrusion, marine pollution, and potential fuel shortages at Lombok International Airport. This study evaluates the effectiveness of applying a double-ended draining method combined with an oil bubble trap as a fast, safe, and sustainable solution for submarine pipeline repair. Using a case study and descriptive-analytical approach based on the Continuous Improvement Program (CIP), the research analyzed quality, cost, delivery, safety, environmental, and workforce aspects. The results showed the method effectively drained aviation fuel without seawater contamination, prevented marine spills, maintained fuel quality within specifications, and completed repairs before critical stock levels were reached. Additionally, it provided significant cost savings compared to emergency supply operations and achieved zero safety incidents and environmental pollution. The integration of double-ended draining and oil bubble trap proved to be an effective, adaptive innovation with strong potential for replication and standardization in other aviation fuel submarine pipeline systems.*

Keywords: *Aviation fuel; Double-ended draining; Environmental safety; Oil bubble trap; Submarine pipeline*

Abstrak : Submarine pipeline merupakan infrastruktur penting dalam distribusi avtur yang memiliki risiko tinggi terhadap gangguan operasional, keselamatan, dan pencemaran lingkungan. Pada tahun 2025, pipa bawah laut penerimaan avtur di Integrated Terminal Ampenan mengalami deformasi akibat tarikan kapal MT Anargya I, sehingga sistem penerimaan terhenti. Kondisi ini menimbulkan potensi kontaminasi air laut, pencemaran lingkungan, serta ancaman kekosongan stok avtur di Bandara Internasional Lombok. Penelitian ini bertujuan mengkaji efektivitas penerapan metode double-ended draining yang dikombinasikan dengan oil bubble trap sebagai solusi percepatan perbaikan pipa bawah laut secara aman dan berkelanjutan. Dengan pendekatan studi kasus dan analisis deskriptif-analitis berdasarkan kerangka Continuous Improvement Program (CIP), penelitian meninjau aspek kualitas, biaya, ketepatan waktu, keselamatan, lingkungan, dan moral pekerja. Hasil menunjukkan metode ini mampu mengosongkan pipa tanpa intrusi air laut, mencegah tumpahan avtur ke laut, menjaga kualitas produk tetap sesuai standar, serta menyelesaikan pekerjaan sebelum stok mencapai batas kritis. Selain itu, metode tersebut menghasilkan penghematan biaya signifikan dibandingkan suplai darurat, tanpa insiden keselamatan maupun pencemaran. Integrasi double-ended draining dan oil bubble trap terbukti efektif, adaptif, dan berpotensi direplikasi serta distandarisasi pada fasilitas pipa bawah laut avtur lainnya..

Kata kunci: Avtur; Double-ended draining; Keselamatan lingkungan; Oil bubble trap; Submarine pipeline

1. LATAR BELAKANG

Distribusi bahan bakar penerbangan (aviation fuel/avtur) merupakan bagian penting dalam sistem transportasi udara karena berhubungan langsung dengan keselamatan penerbangan keberlangsungan operasional dan bandara. Keandalan sistem distribusi avtur

sangat ditentukan oleh kondisi infrastruktur pendukung, salah satunya adalah submarine pipeline yang berfungsi menyalurkan produk dari terminal darat ke fasilitas penerimaan di wilayah perairan (American Petroleum Institute, 2014). Pipa bawah laut memiliki tingkat risiko yang tinggi karena beroperasi di lingkungan yang dinamis dan sulit diakses secara langsung. Aktivitas pelayaran, kondisi arus laut, serta keterbatasan inspeksi rutin menjadikan submarine pipeline rentan terhadap kerusakan mekanis. Oleh karena itu, pengelolaan dan penanganan gangguan pada pipa bawah laut memerlukan pendekatan teknis yang tepat, cepat, dan terstandarisasi (American Society for Testing and Materials, 2023).

Integrated Terminal Ampenan merupakan salah satu fasilitas strategis yang berperan dalam penyediaan avtur untuk memenuhi kebutuhan operasional Bandara Internasional Lombok. Sistem penerimaan avtur di terminal ini menggunakan submarine pipeline yang terhubung langsung dengan fasilitas bongkar muat di area perairan. Pada tahun 2025, sistem tersebut mengalami kondisi substandard akibat tertariknya pipa oleh kapal MT Anargya I saat proses operasional di laut. Insiden tersebut menyebabkan deformasi pada pipa serta gangguan pada rangkaian penerimaan avtur. Kondisi ini mengakibatkan pipa tidak dapat digunakan secara normal dan menimbulkan potensi gangguan pasokan avtur ke bandara (Pertamina Patra Niaga, 2025).

Kerusakan submarine pipeline avtur tidak hanya berdampak pada aspek operasional, tetapi juga menimbulkan risiko terhadap mutu produk bahan bakar. Avtur memiliki persyaratan kualitas yang sangat ketat, di mana produk harus berada dalam kondisi “clear and bright”, bebas partikel, serta tidak mengandung air bebas sebelum digunakan pada pesawat udara. Proses perbaikan pipa bawah laut yang tidak terkendali berpotensi menyebabkan masuknya air laut ke dalam sistem pipa. Kontaminasi air laut pada avtur dapat menyebabkan produk menjadi off-spec dan tidak layak untuk digunakan dalam operasional penerbangan (Ortiz & Gonzalez, 2019). Oleh karena itu, setiap kegiatan perbaikan harus dirancang sedemikian rupa agar mutu produk tetap terjaga.

Selain risiko mutu produk, kegiatan perbaikan submarine pipeline juga memiliki potensi besar terhadap pencemaran lingkungan laut dan keselamatan kerja. Pembukaan sambungan pipa, pelepasan ball valve, maupun pengosongan produk di bawah laut berisiko menimbulkan tumpahan avtur ke perairan umum. Kondisi ini dapat berdampak pada kerusakan ekosistem laut serta menimbulkan konsekuensi hukum dan reputasi bagi perusahaan. Di sisi lain, pekerjaan bawah laut termasuk dalam kategori pekerjaan berisiko tinggi yang membutuhkan tenaga kerja tersertifikasi dan prosedur keselamatan yang ketat. Ketiadaan metode baku dalam

penanganan kondisi darurat semakin meningkatkan kompleksitas permasalahan yang dihadapi (Skalle et al., 2013).

Permasalahan utama yang muncul dalam insiden ini adalah belum tersedianya metode khusus untuk perbaikan submarine pipeline avtur yang mampu menjamin keamanan, mutu produk, dan perlindungan lingkungan secara bersamaan. Prosedur konvensional yang umum digunakan berpotensi menimbulkan pencemaran apabila diterapkan pada kondisi pipa yang masih berisi avtur. Selain itu, keterbatasan waktu akibat ancaman kekurangan stok avtur di bandara menuntut solusi yang dapat diterapkan secara cepat dan efektif. Kondisi darurat ini mendorong perlunya inovasi metode kerja yang adaptif terhadap kondisi lapangan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan teknis yang mampu menjawab tantangan operasional, lingkungan, dan keselamatan secara simultan (Pertamina Patra Niaga, 2025).

Berdasarkan kondisi tersebut, dikembangkan metode perbaikan dengan menerapkan pendekatan draining yang double-ended dikombinasikan dengan penggunaan alat oil bubble trap. Metode double-ended draining dilakukan untuk mengosongkan avtur dari dalam pipa baik dari sisi darat maupun sisi laut sehingga meminimalkan risiko kontaminasi air laut. Sementara itu, oil bubble trap dirancang untuk menangkap gelembung avtur yang muncul saat proses pelepasan sambungan pipa bawah laut. Penerapan metode ini diharapkan mampu mencegah tumpahan avtur ke lingkungan laut selama proses perbaikan berlangsung. Penulisan ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis penerapan metode tersebut serta mengevaluasi dampaknya terhadap aspek mutu, biaya, waktu, keselamatan, dan keberlanjutan operasional.

2. KAJIAN TEORITIS

A. Submarine Pipeline Pada Sistem Penerimaan Avtur

Submarine pipeline merupakan sistem perpipaan bawah laut yang berfungsi menyalurkan bahan bakar, termasuk avtur, dari fasilitas produksi atau penyimpanan menuju terminal penerimaan secara aman dan berkelanjutan. Dalam sistem penerimaan avtur, submarine pipeline memiliki peran strategis karena mampu menjamin kontinuitas suplai dengan risiko gangguan lingkungan yang lebih kecil dibandingkan transportasi darat atau kapal secara langsung (Soesanto, 2020). Avtur sebagai bahan bakar penerbangan memiliki karakteristik khusus seperti volatilitas rendah, kestabilan termal tinggi, serta persyaratan ketat terhadap kontaminasi air dan partikel padat. Oleh karena itu, sistem perpipaan avtur harus dirancang untuk menjaga kualitas fluida selama proses distribusi, termasuk pengendalian tekanan dan aliran. Penelitian oleh (Sulaksono et al., 2013) menunjukkan bahwa aliran avtur dalam sistem perpipaan sering mengalami

kondisi transien yang dapat memicu fenomena water hammer. Fenomena tersebut berpotensi merusak pipa dan peralatan jika tidak dikendalikan dengan baik. Untuk itu, integrasi komponen pengaman seperti surge absorber menjadi bagian penting dalam desain sistem perpipaan avtur. Dengan demikian, submarine pipeline tidak hanya berfungsi sebagai media transportasi, tetapi juga sebagai sistem yang harus memenuhi aspek keselamatan dan keandalan operasi (Sulaksono et al., 2013).

Karakteristik avtur yang sensitif terhadap perubahan tekanan dan temperatur menuntut sistem perpipaan memiliki standar keselamatan yang tinggi, khususnya pada jalur bawah laut yang beroperasi dalam kondisi lingkungan ekstrem. Desain submarine pipeline harus mempertimbangkan aspek mekanis, hidrodinamis, serta kualitas material agar tidak terjadi kebocoran maupun degradasi mutu bahan bakar. Studi lain menegaskan bahwa pemilihan diameter pipa, material, serta sistem proteksi sangat berpengaruh terhadap keberhasilan penyaluran avtur dari kilang ke fasilitas penerimaan (Soesanto, 2020). Selain itu, pengendalian tekanan melalui peralatan seperti surge absorber terbukti efektif dalam meminimalkan risiko kegagalan pipa akibat lonjakan tekanan mendadak (Sulaksono et al., 2013). Dalam konteks regulasi, perancangan dan pengoperasian submarine pipeline harus mengacu pada standar internasional seperti API dan ASME, serta regulasi migas nasional. Standar tersebut mengatur persyaratan desain, konstruksi, pengujian, dan operasi pipa guna menjamin keselamatan dan keandalan sistem. Jurnal lain menekankan bahwa kepatuhan terhadap standar teknis dan regulasi menjadi faktor kunci dalam menjamin keamanan distribusi avtur dan perlindungan lingkungan laut (Soesanto, 2020). Dengan penerapan standar dan sistem proteksi yang tepat, submarine pipeline dapat beroperasi secara aman dan efisien dalam sistem penerimaan avtur.

B. Kondisi Substandard pada Submarine Pipeline

Kondisi substandard pada submarine pipeline dapat didefinisikan sebagai keadaan ketika sistem perpipaan bawah laut tidak lagi memenuhi persyaratan desain, operasi, dan keselamatan yang ditetapkan. Kondisi ini sering muncul akibat perubahan lingkungan laut maupun degradasi sistem selama masa operasi pipeline. Menurut (Zhang et al., 2020) menjelaskan bahwa salah satu bentuk kondisi substandard yang umum adalah free-spanning, yaitu kondisi pipa tidak lagi bersentuhan dengan dasar laut akibat scouring atau perubahan topografi seabed. Selain itu, tekanan yang tidak stabil di dalam pipa dapat memicu getaran dan tegangan berlebih yang mempercepat

kerusakan struktural. (Sulardi, 2020) menambahkan bahwa aktivitas manusia seperti jangkar kapal, pergeseran pipa, serta pemasangan yang tidak sesuai standar juga berkontribusi terhadap terbentuknya kondisi substandard. Kondisi ini sering diperparah oleh adanya air terperangkap dan kontaminan di dalam pipa yang tidak terdeteksi sejak awal operasi. (Du et al., 2023) juga menegaskan bahwa kombinasi tekanan tinggi, temperatur, dan keterbatasan interaksi pipa–tanah dapat menyebabkan buckling serta deformasi permanen. Dengan demikian, kondisi substandard merupakan hasil dari interaksi kompleks antara faktor mekanis, lingkungan, dan operasional .

Penyebab umum kondisi substandard pada submarine pipeline meliputi air terperangkap, kontaminasi fluida, tekanan tidak stabil, serta korosi internal dan eksternal. (Zhang et al., 2020) menunjukkan bahwa scouring akibat arus dan gelombang laut dapat menghilangkan penopang alami pipa, sehingga meningkatkan risiko kelelahan material. Korosi juga menjadi faktor dominan karena pipa beroperasi dalam lingkungan laut yang agresif dan sering terpapar air laut serta mikroorganisme. (Du et al., 2023) menyatakan bahwa korosi dan buckling yang tidak terdeteksi dapat berkembang menjadi kebocoran serius dan kegagalan struktur. Dampak dari kondisi substandard ini tidak hanya memengaruhi integritas mekanis pipa, tetapi juga menurunkan kualitas avtur akibat potensi kontaminasi dan masuknya air. Dari sisi operasional, gangguan ini dapat menyebabkan penghentian suplai, peningkatan biaya perbaikan, dan risiko downtime yang tinggi. (Sulardi, 2020) menekankan bahwa kegagalan pipa bawah laut juga meningkatkan potensi bahaya keselamatan seperti kebakaran dan pencemaran lingkungan laut. Oleh karena itu, kondisi substandard pada submarine pipeline memiliki dampak signifikan terhadap kualitas avtur, keandalan operasional, dan keselamatan sistem secara keseluruhan.

C. Metode Double Ended Draining dan Oil Bubble Trap

Metode double-ended draining merupakan teknik pengosongan pipa dengan membuka aliran dari kedua ujung pipa secara simultan untuk mempercepat pembuangan fluida dan kontaminan yang terperangkap. Prinsip kerja metode ini didasarkan pada perbedaan tekanan yang seimbang sehingga fluida, air, dan gas di dalam pipa dapat keluar lebih efektif dibandingkan metode satu arah. (Abad, 2024) menjelaskan bahwa sistem dengan kondisi drainase ganda memungkinkan pelepasan fluida terjebak secara lebih merata, sehingga mengurangi tekanan sisa di dalam struktur. Dalam konteks pipeline, metode ini membantu meminimalkan akumulasi air yang

dapat memicu korosi internal. Selain itu, pengosongan dari dua sisi juga mengurangi risiko terbentuknya zona stagnan di sepanjang pipa. (Hamamah & Grützner, 2022) menyebutkan bahwa pengendalian aliran dua fase sangat penting untuk menjaga kestabilan sistem fluida selama proses pemisahan. Dengan pendekatan ini, waktu pembersihan pipa dapat dipersingkat secara signifikan. Oleh karena itu, double-ended draining menjadi solusi efektif dalam penanganan kondisi substandard pada sistem perpipaan bawah laut.

Oil bubble trap merupakan perangkat yang dirancang untuk menangkap dan memisahkan gelembung udara serta air dari aliran fluida di dalam pipeline. Konsep kerja oil bubble trap memanfaatkan perbedaan densitas antara minyak, air, dan gas sehingga gelembung dapat terakumulasi dan dikeluarkan dari sistem. (Bussiere et al., 2019) menjelaskan bahwa pengendalian gelembung dan fase fluida sangat berpengaruh terhadap stabilitas aliran dan pencegahan gangguan operasional. Dalam sistem avtur, keberadaan gelembung udara dan air dapat menurunkan kualitas bahan bakar serta meningkatkan risiko kegagalan operasi. Kombinasi oil bubble trap dengan metode double-ended draining terbukti lebih unggul dibandingkan metode konvensional karena mampu mempercepat pemulihan kondisi pipa. (Hamamah & Grützner, 2022) menegaskan bahwa pemisahan fase yang efisien dapat mengurangi waktu henti sistem dan meningkatkan keandalan operasi. Selain itu, metode ini juga menurunkan risiko korosi dan tekanan tidak stabil akibat fluida terperangkap. Dengan demikian, penerapan double-ended draining dan oil bubble trap memberikan keunggulan signifikan dalam percepatan penanganan kondisi substandard pada submarine pipeline.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi kasus deskriptif-analitis yang dilaksanakan di Integrated Terminal Ampenan, khususnya pada sistem submarine pipeline penerimaan avtur di perairan sekitar terminal, selama periode April hingga Juli 2025 bertepatan dengan penanganan kondisi substandard akibat insiden penarikan pipa oleh kapal MT Anargya I. Penelitian dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi darurat operasional, keselamatan kerja, cuaca, serta kelancaran distribusi avtur untuk mendukung operasional Bandara Internasional Lombok. Identifikasi masalah dilakukan melalui analisis laporan insiden, inspeksi lapangan, serta diskusi dengan tim operasional dan HSSE, yang kemudian dianalisis menggunakan metode Root Cause Analysis (RCA) dengan diagram fishbone berdasarkan aspek peralatan, metode, manusia, lingkungan, dan sistem monitoring. Solusi yang diterapkan berupa metode double-

ended draining yang dikombinasikan dengan penggunaan oil bubble trap untuk memastikan pipa dalam kondisi kosong dan meminimalkan pelepasan avtur serta gelembung udara selama pembongkaran sambungan bawah laut. Data penelitian terdiri dari data primer berupa observasi langsung, dokumentasi bawah laut, dan hasil uji mutu avtur pasca-perbaikan, serta data sekunder dari laporan operasional, biaya, jadwal pekerjaan, dan dokumen Aviation Fuel Release Statement. Analisis data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif berdasarkan parameter panca mutu, meliputi kualitas, biaya, ketepatan waktu, keselamatan dan lingkungan, serta moral pekerja. Hasil analisis digunakan untuk menilai efektivitas metode perbaikan yang diterapkan serta potensi replikasinya pada lokasi lain..

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi awal submarine pipeline penerimaan avtur di Integrated Terminal Ampenan menunjukkan kegagalan fungsi yang serius akibat deformasi mekanis pipa bawah laut yang disebabkan oleh tertariknya pipa oleh kapal MT Anargya I, sehingga sistem penerimaan tidak dapat dioperasikan dan suplai avtur ke AFT Bandara Internasional Lombok terhenti. Kerusakan tersebut terjadi pada segmen kritis yang mencakup area U-turn dan sambungan ball valve subsea, yang secara desain berfungsi sebagai pengatur aliran dan titik isolasi antara sistem darat dan laut. Akibat kondisi ini, terminal kehilangan kemampuan untuk menerima avtur melalui jalur reguler dan menghadapi ancaman gangguan operasional penerbangan apabila pasokan tidak segera dipulihkan. Selain aspek operasional, keberadaan avtur di dalam pipa yang mengalami deformasi meningkatkan risiko kontaminasi air laut selama proses perbaikan subsea. Kondisi awal ini menempatkan pekerjaan perbaikan dalam kategori berisiko tinggi karena harus dilaksanakan di bawah tekanan waktu, lingkungan laut terbuka, dan persyaratan mutu produk yang ketat.

Risiko utama yang dihadapi akibat kondisi substandard submarine pipeline tidak hanya terbatas pada terhentinya distribusi avtur, tetapi juga mencakup potensi penurunan mutu produk akibat intrusi air laut ke dalam sistem pipa. Avtur sebagai bahan bakar penerbangan memiliki toleransi yang sangat rendah terhadap kandungan air bebas, sehingga kontaminasi sekecil apa pun dapat menyebabkan produk menjadi off-spec dan tidak dapat digunakan untuk operasional pesawat udara. Selain itu, proses pembongkaran sambungan pipa bawah laut yang masih mengandung produk berpotensi menimbulkan tumpahan avtur ke perairan apabila tidak dikendalikan dengan metode yang tepat. Tumpahan tersebut tidak hanya berdampak pada pencemaran lingkungan laut, tetapi juga berpotensi menimbulkan sanksi regulator dan

kerugian reputasi bagi perusahaan (Board, 2012). Oleh karena itu, pemilihan metode perbaikan harus mampu mengendalikan risiko mutu, lingkungan, dan keselamatan secara bersamaan.

Metode double-ended draining diterapkan sebagai pendekatan utama untuk mengosongkan avtur dari dalam pipa dengan melakukan penyedotan secara simultan dari sisi darat dan sisi laut. Penyedotan dari sisi darat dilakukan menggunakan vacuum truck, sedangkan dari sisi laut menggunakan pompa diesel yang ditempatkan di atas work boat, sehingga terbentuk kondisi tekanan negatif yang seimbang di sepanjang pipa. Keseimbangan tekanan ini sangat penting untuk mencegah terjadinya aliran balik air laut ke dalam pipa, khususnya pada kondisi pipa yang telah mengalami deformasi dan tidak lagi memiliki kekedapan sempurna. Pendekatan ini berbeda dengan metode konvensional satu arah yang cenderung menciptakan perbedaan tekanan signifikan dan meningkatkan risiko intrusi air laut. Dengan demikian, double-ended draining memberikan kontrol fluida yang lebih stabil dan aman selama proses pengosongan pipa.

Secara teknis, estimasi volume avtur di dalam pipa menjadi dasar penting dalam perencanaan dan evaluasi efektivitas metode pengosongan yang diterapkan. Dengan asumsi diameter dalam pipa sebesar 6 inci dan panjang pipa terdampak sekitar 72 meter, volume internal pipa diperkirakan mencapai sekitar 1,31 meter kubik. Berdasarkan densitas rata-rata avtur sebesar 0,80 kg per liter, massa avtur yang berada di dalam pipa diperkirakan mencapai lebih dari satu ton. Seluruh volume avtur tersebut berhasil dikeluarkan melalui proses double-ended draining tanpa terdeteksinya air laut pada produk hasil pengosongan. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu mengendalikan fluida secara efektif meskipun sistem berada dalam kondisi substandard.

Selama tahap awal pembongkaran sambungan subsea, khususnya pada proses pelepasan baut ball valve, teridentifikasi adanya fenomena ball valve passing yang ditandai dengan munculnya gelembung avtur ke kolom air laut. Fenomena ini menunjukkan bahwa ball valve tidak sepenuhnya kedap akibat kerusakan mekanis, sehingga masih memungkinkan terjadinya kebocoran internal. Apabila tidak dikendalikan, kebocoran ini berpotensi menyebabkan tumpahan avtur langsung ke perairan laut. Meskipun laju kebocoran relatif kecil, dampak lingkungan dan konsekuensi regulasi dari tumpahan avtur tetap signifikan. Kondisi ini menegaskan perlunya sistem pengendalian tambahan selama proses pembongkaran pipa bawah laut.

Untuk mengendalikan potensi kebocoran tersebut, dipasang oil bubble trap pada titik kerja subsea sebagai alat penangkap gelembung avtur yang muncul selama proses pelepasan sambungan pipa. Oil bubble trap dirancang untuk menangkap avtur dalam bentuk gelembung

dan menyalurkannya ke containment bag sehingga tidak terlepas ke lingkungan perairan. Berdasarkan pengamatan lapangan, laju kemunculan gelembung diperkirakan berkisar antara satu hingga dua liter per menit dengan durasi sekitar lima menit. Dengan demikian, potensi tumpahan avtur yang berhasil dicegah diperkirakan mencapai sekitar sepuluh liter. Keberhasilan oil bubble trap dalam menangkap seluruh kebocoran ini membuktikan efektivitasnya sebagai sistem pengendalian pencemaran pada pekerjaan subsea berisiko tinggi.

Efektivitas pengendalian kebocoran menggunakan oil bubble trap tidak hanya berdampak pada aspek lingkungan, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap kelancaran pekerjaan perbaikan secara keseluruhan. Dengan tidak terjadinya tumpahan avtur ke perairan, pekerjaan dapat dilanjutkan tanpa harus menghentikan operasi untuk penanganan insiden lingkungan. Kondisi ini juga menghindarkan perusahaan dari potensi penghentian pekerjaan oleh regulator maritim yang memiliki kewenangan menghentikan operasi apabila terjadi pencemaran laut. Selain itu, tidak adanya memberikan operasional insiden kepastian selama proses pencemaran hukum dan perbaikan berlangsung. Dengan demikian, oil bubble trap berperan sebagai elemen kunci dalam menjaga keberlanjutan pekerjaan perbaikan submarine pipeline.

Tabel 1. Ringkasan Parameter Teknis Pengosongan dan Pengendalian Pencemaran

Parameter	Nilai
Diameter dalam pipa	6 inci (0,1524 m)
Panjang pipa terdampak	±72 m
Volume avtur dalam pipa	±1,31 m ³
Massa avtur dalam pipa	±1.048 kg
Laju kebocoran teramati	1–2 L/menit
Potensi tumpahan tercegah	±10 L
Metode pengendalian	Double-ended draining & oil bubble trap

Evaluasi mutu avtur pasca-perbaikan dilakukan untuk memastikan bahwa metode yang diterapkan tidak menurunkan kualitas produk yang akan disalurkan ke pengguna akhir. Pemeriksaan dilakukan melalui uji visual clear and bright serta pengujian laboratorium mengacu pada standar ASTM dan EI/JIG yang berlaku untuk bahan bakar penerbangan (Energy Institute, 2023). Hasil pengujian menunjukkan bahwa avtur tetap berada dalam kondisi jernih dan cerah tanpa indikasi keberadaan air bebas maupun partikel tersuspensi. Tidak ditemukannya kontaminasi air laut membuktikan bahwa proses pengosongan dan

pembongkaran pipa berhasil dilakukan tanpa intrusi fluida eksternal. Hasil ini sangat krusial karena mutu avtur merupakan faktor utama dalam menjamin keselamatan penerbangan (ASTM., 2023).

Keberhasilan menjaga mutu avtur pasca-perbaikan juga berdampak langsung pada kesiapan sistem untuk kembali beroperasi secara normal. Dengan produk yang tetap on-spec, sistem penerimaan avtur dapat langsung digunakan tanpa memerlukan proses tambahan seperti re-filtering, reprocessing, atau pembuangan produk. Hal ini tidak hanya menghemat waktu pemulihan operasi, tetapi juga mengurangi potensi kerugian akibat kehilangan produk. Selain itu, kepastian mutu produk memberikan kepercayaan kepada pemangku kepentingan bahwa sistem telah aman untuk digunakan kembali. Dengan demikian, metode perbaikan yang diterapkan terbukti efektif dalam menjaga integritas mutu produk sekaligus mempercepat operasional.

Dari perspektif operasional keberhasilan pengendalian mutu dan lingkungan selama perbaikan memberikan kontribusi signifikan terhadap pencapaian target penyelesaian pekerjaan. Seluruh rangkaian perbaikan submarine pipeline berhasil diselesaikan sebelum batas kritis ketersediaan stok avtur di AFT Bandara Internasional Lombok. Penyelesaian tepat waktu ini menghindarkan terminal dan bandara dari risiko gangguan penerbangan akibat kekosongan bahan bakar. Selain itu, keberhasilan ini menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu menjawab tantangan pekerjaan darurat kompleksitas tinggi. Dengan Hasil tingkat ini memperlihatkan bahwa integrasi pendekatan teknis dan pengendalian risiko merupakan kunci keberhasilan penanganan kondisi substandard submarine pipeline.

Keberhasilan penyelesaian pekerjaan sebelum batas kritis ketersediaan stok avtur memberikan margin keamanan operasional yang sangat penting bagi sistem distribusi bahan bakar penerbangan. Berdasarkan simulasi stok, apabila sistem penerimaan tidak kembali beroperasi hingga awal Mei 2025, AFT Bandara Internasional Lombok berpotensi mengalami stock out yang berdampak langsung pada operasional penerbangan. Penyelesaian pekerjaan pada tanggal 17 April 2025 memberikan selisih waktu aman sekitar 16 hari sebelum kondisi kritis tersebut tercapai. Margin waktu ini sangat signifikan mengingat pekerjaan subsea sangat dipengaruhi oleh faktor cuaca, arus laut, dan visibilitas penyelaman. Dengan demikian, metode yang diterapkan terbukti mampu menjawab tantangan keterbatasan waktu dalam kondisi darurat operasional.

Dari sisi keandalan sistem, pemulihan fungsi submarine pipeline tidak hanya diukur dari selesainya pekerjaan fisik, tetapi juga dari kemampuan sistem untuk beroperasi kembali secara stabil tanpa gangguan lanjutan. Setelah perbaikan selesai, sistem penerimaan avtur

dioperasikan secara bertahap dengan pemantauan tekanan, laju alir, dan mutu produk. Selama periode monitoring pasca-perbaikan, tidak ditemukan indikasi kebocoran, penurunan tekanan abnormal, maupun anomali mutu produk. Hal ini menunjukkan bahwa integritas sistem pipa telah dipulihkan dengan baik meskipun berada dalam kondisi awal yang substandard. Keandalan pasca-perbaikan ini memperkuat validitas metode yang diterapkan sebagai solusi teknis yang efektif (Gogtay & Thatte, 2017).

Aspek keselamatan kerja menjadi perhatian utama selama seluruh rangkaian pekerjaan perbaikan submarine pipeline karena melibatkan aktivitas penyelaman, pekerjaan bawah laut, dan penanganan bahan bakar mudah terbakar (Guo et al., 2014). Seluruh pekerjaan dilakukan dengan penerapan prosedur keselamatan yang penggunaan ketat, penyelam termasuk bersertifikat, pengawasan HSSE, serta pembatasan area kerja dari aktivitas pelayaran. Selama pelaksanaan pekerjaan, tidak terjadi kecelakaan kerja maupun near miss yang berpotensi menimbulkan cedera atau kerugian material. Kondisi ini menunjukkan bahwa metode yang diterapkan tidak meningkatkan risiko keselamatan kerja meskipun pekerjaan dilakukan dalam situasi darurat. Dengan demikian, inovasi metode kerja ini sejalan dengan prinsip zero accident dalam pengelolaan fasilitas energi.

Selain keselamatan kerja, aspek perlindungan lingkungan menjadi indikator penting dalam evaluasi keberhasilan perbaikan submarine pipeline. Selama seluruh proses perbaikan, tidak terjadi pencemaran lingkungan laut baik dalam bentuk tumpahan avtur maupun residu pekerjaan subsea. Tidak adanya pencemaran ini menghindarkan perusahaan dari potensi sanksi administratif, tuntutan hukum, serta kerusakan reputasi (IMO, 2017). Keberhasilan pengendalian lingkungan sangat dipengaruhi oleh kombinasi metode double-ended draining dan penggunaan oil bubble trap pada titik kerja kritis. Dengan demikian, metode yang diterapkan tidak hanya bersifat teknis operasional, tetapi juga memenuhi prinsip perlindungan lingkungan yang berkelanjutan.

Dari perspektif ekonomi, biaya perbaikan submarine pipeline yang dikeluarkan relatif terkendali dibandingkan dengan potensi kerugian yang dapat timbul apabila suplai avtur harus dipenuhi melalui skema darurat. Total biaya perbaikan sekitar Rp1,7 miliar mencakup pekerjaan subsea, peralatan pendukung, serta pembuatan dan penggunaan oil bubble trap. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan potensi biaya suplai darurat yang diperkirakan mencapai Rp184 juta per hari berdasarkan kebutuhan pasokan avtur bandara. Apabila kondisi darurat tersebut berlangsung selama satu bulan, potensi biaya yang harus dikeluarkan dapat mencapai lebih dari Rp5 miliar. Dengan demikian, metode yang diterapkan menghasilkan penghematan biaya yang signifikan bagi perusahaan.

Analisis cost avoidance menunjukkan bahwa selisih antara biaya perbaikan dan potensi biaya suplai darurat mencapai sekitar Rp3,45 miliar dalam periode satu bulan. Nilai ini belum memperhitungkan potensi biaya tidak langsung seperti penalti keterlambatan penerbangan, kehilangan kepercayaan pelanggan, dan dampak reputasi perusahaan. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, manfaat ekonomi dari metode yang diterapkan menjadi semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa inovasi metode kerja pada kondisi darurat tidak hanya memberikan manfaat teknis, tetapi juga menciptakan nilai ekonomi yang berkelanjutan. Oleh karena itu, metode ini layak dipertimbangkan sebagai solusi standar dalam penanganan kondisi serupa di lokasi lain.

Keberhasilan pemulihan sistem penerimaan avtur juga berdampak positif terhadap aspek psikologis dan moral pekerja yang terlibat dalam operasional terminal dan bandara. Pada kondisi awal insiden, keterbatasan stok avtur menimbulkan tekanan kerja yang tinggi dan kekhawatiran terhadap kelangsungan operasional penerbangan. Setelah sistem kembali beroperasi secara normal, tingkat kepercayaan diri dan ketenangan pekerja meningkat secara signifikan. Kondisi ini berdampak positif terhadap kinerja operasional dan kualitas pengambilan keputusan di lapangan (Kumar et al., 2011). Dengan demikian, keberhasilan teknis perbaikan turut berkontribusi terhadap peningkatan aspek sosial dalam organisasi.

Dari sudut pandang manajemen aset, penerapan metode ini memberikan pembelajaran penting mengenai penanganan risiko pada infrastruktur pipa bawah laut. Insiden tertariknya pipa oleh kapal menunjukkan bahwa submarine pipeline memiliki kerentanan terhadap aktivitas pelayaran dan membutuhkan sistem mitigasi risiko yang lebih baik. Metode perbaikan yang dikembangkan dalam kasus ini dapat menjadi referensi dalam penyusunan prosedur darurat penanganan pipa bawah laut. Selain itu, pengalaman ini dapat mendorong peningkatan sistem monitoring dan perlindungan mekanis pada fasilitas sejenis. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan kontribusi praktis terhadap pengelolaan aset energi di wilayah perairan.

Secara konseptual, integrasi metode double-ended draining dan oil bubble trap menunjukkan pendekatan rekayasa operasional yang adaptif terhadap kondisi lapangan. Pendekatan ini tidak mengandalkan perubahan desain besar atau investasi jangka panjang, tetapi memanfaatkan rekayasa metode kerja yang relatif sederhana namun efektif. Fleksibilitas metode ini memungkinkan penerapan pada berbagai kondisi pipa bawah laut dengan karakteristik serupa. Selain itu, metode ini dapat disesuaikan dengan keterbatasan sumber daya dan waktu pada kondisi darurat. Dengan demikian, pendekatan ini memiliki potensi replikasi yang tinggi pada fasilitas penerimaan bahan bakar lainnya.

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan ini menunjukkan bahwa penanganan kondisi substandard submarine pipeline memerlukan pendekatan yang holistik dan terintegrasi. Keberhasilan perbaikan tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis penggantian atau pembongkaran pipa, tetapi juga oleh kemampuan mengelola risiko mutu produk, lingkungan, keselamatan, waktu, dan biaya secara bersamaan. Metode yang diterapkan dalam studi kasus ini berhasil memenuhi seluruh aspek tersebut dengan hasil yang terukur dan terdokumentasi. Temuan ini memperkuat argumen bahwa inovasi metode kerja memiliki peran strategis dalam menjaga keandalan sistem distribusi energi. Oleh karena itu, pendekatan ini layak dipertimbangkan sebagai praktik terbaik dalam penanganan kerusakan submarine pipeline avtur.

Tabel 2. Biaya Perbaikan Submarine Pipeline

Komponen	Nilai (Rp)
Biaya total perbaikan	±1,7 miliar
Biaya suplai darurat per hari	±184 juta
Estimasi biaya suplai darurat per bulan	±5,15 miliar
Cost avoidance (1 bulan)	±3,45 miliar
Insiden HSSE	Nihil
Dampak operasional penerbangan	Nihil

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penerapan metode double-ended draining yang dikombinasikan dengan oil bubble trap terbukti efektif mempercepat penanganan kondisi substandard submarine pipeline penerimaan avtur di Integrated Terminal Ampenan tanpa penurunan mutu, pencemaran lingkungan, maupun kecelakaan kerja. Metode ini mampu mengosongkan avtur secara optimal, mencegah intrusi air laut dan tumpahan produk, serta menjaga kualitas bahan bakar tetap on-spec. Pekerjaan diselesaikan sebelum batas kritis stok avtur tercapai sehingga suplai ke Bandara Internasional Lombok tetap terjaga tanpa suplai darurat. Dari sisi ekonomi, metode ini menghasilkan cost avoidance signifikan dibandingkan potensi biaya suplai darurat. Secara keseluruhan, inovasi metode kerja ini menjadi solusi efektif, aman, dan berkelanjutan untuk penanganan kerusakan submarine pipeline avtur serta berpotensi direplikasi pada fasilitas serupa.

DAFTAR REFERENSI

- Abad, M. S. A. (2024). Transverse vibration analysis of saturated pro-elastic beams as a longitudinal function scale. *Journal of Civil Aspects and Structural Engineering*, 1(2), 173-182. <https://doi.org/10.48314/jcase.v1i2.42>
- American Petroleum Institute. (2014). *API RP 1111: Design, construction, operation, and maintenance of offshore hydrocarbon pipelines* (4th ed.). API Publishing Services.
- American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM D1298-12b: Standard test method for density, relative density, or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method*. ASTM International. <https://doi.org/https://doi.org/10.1520/D1298-12B>
- Board, T. R. (2012). *Aviation fuel handling and quality control practices*. Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14660>
- Bussiere, V., Vigne, A., Link, A., McGrath, J., Srivastav, A., Baret, J.-C., Franke, T., & T. (2019). High-throughput triggered merging of surfactant-stabilized droplet pairs using traveling surface acoustic waves. *Analytical Chemistry*, 91(21), 13978-13985. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03521>
- Du, F., Li, C., & Wang, W. (2023). Review development of subsea pipeline buckling, corrosion and leakage monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.3390/jmse11010188>
- Energy Institute. (2023). *EI/JIG standard 1530: Quality assurance requirements for the manufacture, storage and distribution of aviation fuels*. Energy Institute.
- Gogtay, N. J., & Thatte, U. M. (2017). Principles of correlation analysis. *Journal of the Association of Physicians of India*, 65(3), 78-81.
- Guo, B., Song, S., Ghalambor, A., & Lin, T. (2014). *Offshore pipelines: Design, installation, maintenance*. Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397949-0.00026-1>
- Hamamah, Z., & Grützner, T. (2022). Liquid-liquid centrifugal extractors: Types and recent applications - A review. *ChemBioEng Reviews*, 9(3), 286-318. <https://doi.org/10.1002/cben.202100035>
- IMO. (2017). *International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL), Annex I*. IMO Publishing.
- Kumar, S., Kwon, H. T., Choi, K. H., & Cho, J. (2011). LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development. *Applied Energy*, 88(12), 4264-4273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.035>
- Materials., A. S. for T. and. (2023). *ASTM D86-23: Standard test method for distillation of petroleum products and liquid fuels*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0086-23>

- Ortiz, J. A., & Gonzalez, E. (2019). Risk assessment methodologies for offshore pipelines: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62(10), 10-29. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103952>
- Pertamina Patra Niaga. (2025). Laporan penanganan kondisi substandard submarine pipeline penerimaan avtur Integrated Terminal Ampenan. PT Pertamina Patra Niaga.
- Skalle, P., Sveen, J., & Aas, B. (2013). Subsea pipeline integrity management. *Marine Structures*, 32(2), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2013.04.002>
- Soesanto, E. (2020). Peningkatan peluang bisnis strategis pada proyek supply avtur ke Bandara Soekarno Hatta dari Refinery Unit VI Balongan. *Jurnal Jaring Saintek*, 2(1), 51-60. <https://doi.org/10.31599/jaring-saintek.v2i2.295>
- Sulaksono, A., Soehartanto, T., & Nugroho, G. (2013). Perancangan sistem surge absorber untuk mencegah terjadinya water hammer pada pipeline sistem pendistribusian avtur di DPPU Pertamina - Bandara Ngurah Rai. *JURNAL TEKNIK POMITS*, 2(1), 130-134. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v2i1.3251>
- Sulardi, S. (2020). *Evaluasi kerusakan pipa bawah laut dan metode perbaikannya*. PROSIDING SNITT POLTEKBA, 4(2), 200-206. <https://jurnal.poltekba.ac.id/index.php/prosiding/article/view/1020>
- Zhang, B., Gong, R., Wang, T., & Wang, Z. (2020). Causes and treatment measures of submarine pipeline free-spanning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 1-21. <https://doi.org/10.3390/jmse8050329>