



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 2246-2254

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Perbandingan Material Pengganti Tahan Korosif pada Pipa *Flowline* Carbon Steel CO₂ dan H₂S di PT Migas

Rayhan Maulana, Didi Mario, Zahra Junie Kurniati, Aldillah Herlambang, Oki Alfernando

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi

raihan0703@gmail.com

Abstrak

Korosi pada pipa *flowline* berbahan carbon steel merupakan permasalahan utama dalam sistem produksi minyak dan gas karena dapat menurunkan integritas material dan menyebabkan kegagalan operasi. Material ini memiliki ketahanan korosi yang rendah, terutama pada lingkungan yang mengandung CO₂, H₂S, air, dan ion klorida, sehingga mempercepat terjadinya korosi merata maupun lokal seperti pitting. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja duplex stainless steel 2205 dan stainless steel 316L sebagai material alternatif pengganti carbon steel. Metode yang digunakan adalah literature review terhadap jurnal nasional dan internasional terkait sifat mekanik dan ketahanan korosi material. Hasil kajian menunjukkan bahwa duplex stainless steel 2205 memiliki ketahanan korosi dan kekuatan mekanik yang lebih unggul, serta tahan terhadap stress corrosion cracking karena struktur mikro dua fase dan nilai PREN yang tinggi, sehingga lebih sesuai untuk lingkungan migas yang agresif. Sementara itu, stainless steel 316L juga memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi, khususnya pitting corrosion, sehingga dapat digunakan pada kondisi korosif menengah. Namun, kedua material tersebut tetap berpotensi mengalami kegagalan akibat faktor non-material seperti cacat mikrostruktur, proses fabrikasi, dan kualitas pengelasan. Oleh karena itu, pemilihan material harus mempertimbangkan kondisi operasi, metode manufaktur, serta kontrol kualitas. Berdasarkan hasil perbandingan, duplex stainless steel 2205 direkomendasikan sebagai material utama untuk meningkatkan keandalan dan umur pakai pipa *flowline*.

Kata kunci: Korosi, *Flowline*, Carbon Steel, Duplex Stainless Steel 2205, Stainless Steel 316L, Pitting Corrosion, Literatur Riview.

1. Latar Belakang

Pipa merupakan salah satu komponen utama dalam industri minyak dan gas (Migas) yang berfungsi sebagai media transportasi fluida, seperti minyak mentah, gas alam, air formasi, maupun campuran fluida lainnya dari sumur produksi menuju fasilitas pengolahan, penyimpanan, hingga distribusi akhir. Dalam sistem perpipaan Migas, pipa *flowline* memiliki peran yang sangat penting karena berfungsi menghubungkan sumur produksi dengan separator atau gathering station sebagai bagian awal dari proses pengolahan fluida hasil produksi [1]. Keberadaan pipa *flowline* menjadi sangat vital karena kelancaran distribusi fluida produksi sangat bergantung pada kondisi dan performa pipa tersebut. Oleh sebab itu, kerusakan pada pipa *flowline* dapat mengganggu kontinuitas produksi dan menimbulkan dampak operasional yang serius bagi perusahaan.

Pada praktik operasionalnya, pipa *flowline* sering bekerja pada kondisi lingkungan yang ekstrem. Sebagian besar pipa dipasang di bawah permukaan tanah dan beroperasi pada suhu serta tekanan tinggi dalam waktu yang lama. Selain itu, pipa juga terpapar lingkungan tanah yang memiliki kandungan kelembapan, garam, maupun senyawa kimia tertentu yang bersifat korosif [2]. Kondisi ini menyebabkan pipa *flowline* menjadi sangat rentan terhadap degradasi material, terutama korosi. Kerentanan tersebut semakin meningkat karena material yang umum digunakan pada pipa *flowline* adalah Carbon Steel. Material ini dipilih karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, mudah diproduksi, serta biaya yang relatif ekonomis dibandingkan material lainnya. Akan tetapi, Carbon Steel memiliki kelemahan utama berupa ketahanan korosi yang rendah ketika terpapar lingkungan agresif dalam jangka waktu panjang [1].

Lingkungan operasional pada industri Migas umumnya mengandung zat-zat yang dapat mempercepat proses korosi, seperti air formasi, kelembapan tinggi, serta gas korosif berupa karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen sulfida (H₂S) yang dihasilkan dari proses produksi minyak dan gas. Gas-gas tersebut dapat bereaksi dengan permukaan

logam dan membentuk senyawa korosif yang mempercepat penurunan kualitas material pipa. Selain itu, keberadaan mikroorganisme tertentu di dalam tanah maupun fluida produksi juga dapat memicu *microbiologically influenced corrosion* (MIC) yang mempercepat kerusakan permukaan logam. Apabila korosi terjadi secara terus-menerus tanpa pengendalian yang tepat, maka ketebalan pipa akan semakin menurun dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktur pipa.

Korosi pada pipa *flowline* bukan hanya menurunkan integritas struktur material, tetapi juga dapat menyebabkan kebocoran sistem transportasi fluida yang berdampak besar terhadap aspek ekonomi, operasional, keselamatan kerja, dan lingkungan [2]. Kebocoran pipa dapat menyebabkan hilangnya fluida produksi dalam jumlah besar, penghentian operasi produksi, meningkatnya biaya perawatan dan penggantian pipa, serta pencemaran lingkungan akibat tumpahan minyak atau gas berbahaya. Selain itu, kebocoran gas yang mudah terbakar juga dapat memicu kebakaran maupun ledakan yang mengancam keselamatan pekerja di lapangan. Oleh karena itu, pengendalian korosi menjadi salah satu aspek penting dalam menjaga keandalan dan keberlanjutan sistem perpipaan di industri Migas.

Korosi pada pipa dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik faktor internal maupun eksternal. Faktor eksternal meliputi kelembapan tanah, pH tanah, kandungan salinitas, suhu lingkungan, serta keberadaan kontaminan kimia tertentu. Sementara itu, faktor internal dapat berasal dari karakteristik fluida yang dialirkan, seperti laju aliran, temperatur fluida, tekanan operasi, dan kandungan zat korosif di dalam fluida [3]. Interaksi berbagai faktor tersebut dapat menimbulkan berbagai jenis korosi pada pipa *flowline*, seperti korosi merata (*uniform corrosion*), korosi sumuran (*pitting corrosion*), korosi celah (*crevice corrosion*), hingga korosi akibat aliran atau erosi (*erosion corrosion*) [4,5,6]. Di antara berbagai jenis korosi tersebut, *pitting corrosion* termasuk salah satu jenis korosi yang paling berbahaya karena dapat menyebabkan perforasi pada pipa dalam waktu relatif singkat meskipun kerusakan permukaan terlihat kecil.

Berbagai metode telah diterapkan untuk mengendalikan korosi pada pipa *flowline*, seperti penggunaan coating atau pelapis pelindung, cathodic protection, injeksi inhibitor korosi, serta inspeksi dan perawatan berkala. Namun, metode-metode tersebut sering kali membutuhkan biaya operasional yang tinggi dan belum mampu sepenuhnya mengatasi masalah korosi dalam jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif lain yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk mengurangi potensi korosi pada pipa *flowline*. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah mengganti material Carbon Steel dengan material lain yang memiliki ketahanan korosi lebih baik, sehingga dapat meningkatkan umur pakai pipa sekaligus menekan risiko kerugian ekonomi dan kecelakaan kerja [7,8,9].

Salah satu material yang memiliki potensi tinggi sebagai pengganti Carbon Steel adalah Duplex Stainless Steel (DSS). Menurut Azzam dan Khalifa, Duplex Stainless Steel merupakan paduan logam yang memiliki ketahanan sangat baik terhadap retak korosi serta unggul dalam menahan korosi lokal, seperti korosi *pitting* dan korosi celah [10]. Material ini memiliki kombinasi struktur ferit dan austenit yang memberikan keseimbangan antara kekuatan mekanik tinggi dan ketahanan korosi yang baik. Selain itu, Duplex Stainless Steel juga diketahui memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungan yang mengandung klorida dan gas korosif, sehingga banyak digunakan pada industri minyak dan gas lepas pantai.

Selain Duplex Stainless Steel, Stainless Steel 316L juga dikenal sebagai material yang memiliki performa sangat baik pada lingkungan korosif. Menurut Voisin et al., Stainless Steel 316L merupakan material unggulan untuk aplikasi struktural pada lingkungan korosif dan telah banyak diteliti selama beberapa dekade karena memiliki keseimbangan yang baik antara sifat mekanik, ketahanan korosi, serta kemampuan fabrikasi [11]. Kandungan molibdenum pada Stainless Steel 316L memberikan ketahanan lebih tinggi terhadap korosi *pitting* dan korosi celah dibandingkan stainless steel biasa. Oleh sebab itu, kedua material tersebut memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai alternatif material pengganti *Carbon Steel* pada pipa *flowline*.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan performa Duplex Stainless Steel dan Stainless Steel 316L sebagai material alternatif pengganti Carbon Steel pada pipa *flowline*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai material yang memiliki ketahanan korosi lebih baik, sehingga dapat membantu mengurangi potensi kebocoran, kerusakan sistem transportasi fluida, kerugian ekonomi, serta risiko kecelakaan kerja yang mengancam keselamatan personel dan lingkungan [12,13]. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem perpipaan yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan di industri minyak dan gas pada masa mendatang.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah *literature review*, yaitu metode penelitian yang dilakukan dengan cara mengumpulkan, menelaah, dan menganalisis berbagai sumber pustaka yang relevan dengan topik penelitian [15]. Metode ini digunakan untuk memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai perbandingan ketahanan korosi material *Carbon Steel*, *Stainless Steel 316L*, dan *Duplex Stainless Steel (DSS)* pada aplikasi pipa *flowline* di industri minyak dan gas. Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari jurnal nasional maupun jurnal internasional yang telah dipublikasikan dan memiliki keterkaitan dengan tema penelitian.

Pada tahap awal, proses pencarian artikel dilakukan melalui berbagai database ilmiah menggunakan kata kunci “*Carbon Steel di Aliran Pipa*”, “*Stainless Steel Properties*”, dan “*Duplex Stainless Steels (DSS) Properties*”. Berdasarkan hasil pencarian tersebut diperoleh sekitar 50 artikel yang dipublikasikan pada rentang tahun 2022–2026. Selanjutnya, artikel-artikel tersebut diseleksi berdasarkan relevansi topik, kesesuaian pembahasan, serta kelengkapan data terkait ketahanan korosi material pada pipa *flowline*. Dari hasil proses seleksi tersebut, diperoleh sekitar 15 artikel yang dianggap paling relevan dan digunakan sebagai sumber utama dalam pembahasan penelitian ini [15].

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Ringkasan Jurnal Utama

Menurut Setyani et al., korosi terjadi pada pipa *flowline carbon steel seamless* NPS 4 inch schedule 80 dengan tebal awal 8,56 mm yang telah beroperasi selama 27 tahun sejak 1997 di PT. X [1]. Berdasarkan hasil pengukuran ketebalan pada Juli 2024, ketebalan pipa pada bagian *underground* tercatat sebesar 6 mm dengan laju korosi 0,095 mm/tahun dan estimasi sisa umur pakai selama 13,82 tahun. Sementara itu, pada bagian *surface*, ketebalan pipa sebesar 7 mm dengan laju korosi 0,058 mm/tahun serta sisa umur pakai mencapai 39,87 tahun. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa ketebalan minimum struktural yang disyaratkan adalah 4,6875 mm [1].

Jenis korosi yang teridentifikasi merupakan *pitting corrosion* yang ditemukan pada area transisi antara *underground* dan *surface*. Kondisi ini dipicu oleh kerusakan *wrapping* akibat suhu tinggi mencapai 200°F, akumulasi air hujan pada area perbatasan, serta tidak adanya perawatan rutin pada pipa *underground* [1].

3.2. Identifikasi Kriteria Pemilihan Material dalam Jurnal

Penulis secara implisit menggunakan kriteria berikut dalam pemilihan carbon steel sebagai material pipa:

Table 1. kriteria dalam pemilihan carbon steel sebagai material [14].

No.	Kriteria	Keterangan dalam Jurnal
1.	Tekanan desain	150 psi, dihitung dengan ASME B31.3
2.	Ketebalan minimum	Mengacu API 574, NPS 4 inch = 3,1 struktural
3.	Ketebalan mekanik	Schedule 80, S = 110 MPa
4.	Proteksi korosi eksternal	Coating + wrapping sebagai mitigasi
5.	Estimasi umur pakai	Dihitung dari laju korosi terukur

Berdasarkan hasil kajian literatur, penulis secara implisit menggunakan beberapa kriteria teknis dalam pemilihan material *Carbon Steel* sebagai material pipa *flowline*. Kriteria tersebut meliputi tekanan desain, ketebalan minimum, ketebalan mekanik, sistem proteksi korosi eksternal, serta estimasi umur pakai pipa. Tekanan desain pipa ditetapkan sebesar 150 psi yang dihitung berdasarkan standar ASME B31.3 untuk memastikan pipa mampu menahan tekanan operasi selama proses distribusi fluida berlangsung. Selain itu, penentuan ketebalan minimum pipa mengacu pada standar API 574 dengan ukuran NPS 4 inch yang memiliki batas ketebalan struktural minimum sebesar 3,1 mm sehingga integritas struktur pipa tetap terjaga selama operasi [14].

Dari aspek mekanik, penggunaan *Carbon Steel* schedule 80 dengan tegangan izin (S) sebesar 110 MPa menunjukkan bahwa material dipilih karena memiliki kekuatan mekanik yang cukup baik untuk menahan beban

operasi dan tekanan internal. Untuk mengurangi risiko korosi eksternal, penulis juga mempertimbangkan penggunaan sistem proteksi berupa coating dan wrapping sebagai metode mitigasi terhadap paparan lingkungan korosif di sekitar pipa. Selain itu, estimasi umur pakai pipa dihitung berdasarkan laju korosi terukur sehingga kondisi aktual material dapat dipantau dan diprediksi secara lebih akurat. Dengan mempertimbangkan berbagai kriteria tersebut, Carbon Steel dipilih karena dinilai mampu memenuhi kebutuhan teknis dan operasional pada sistem perpipaian flowline meskipun tetap memiliki risiko korosi yang perlu dikendalikan [14].

3.3. Analisis Kritis terhadap Pemilihan Material

Gap yang ditemukan dalam jurnal:

Pertama, berdasarkan penelitian Setyani et al., tidak membahas pemilihan material alternatif sejak awal desain [1]. Carbon steel dipilih berdasarkan pertimbangan biaya dan ketersediaan, namun tidak ada justifikasi teknis komparatif dengan material lain yang lebih tahan korosi.

Kedua, tidak ada analisis komposisi fluida yang detail. Jurnal menyebut suhu operasi 200°F dan lingkungan agresif, namun tidak mencantumkan kadar H₂S, CO₂, klorida, atau pH air formasi secara eksplisit padahal faktor-faktor ini sangat menentukan pemilihan material sesuai standar NACE MR0175/ISO 15156.

Ketiga, sistem proteksi korosi tidak dievaluasi secara kuantitatif sebelum terjadi kegagalan. Efektivitas coating dan wrapping hanya dianalisis secara *visual post-failure*, bukan melalui monitoring berkala.

Keempat, tidak mempertimbangkan kriteria ekonomi jangka panjang (*Life Cycle Cost Analysis*). Biaya penggantian pipa akibat kegagalan dini bisa jauh melebihi biaya awal penggunaan material premium.

3.4. Re-Evaluasi: Material Alternatif yang Diusulkan

Material Alternatif 1: Stainless Steel 316L (LPBF)

Berdasarkan Voisin et al., SS 316L yang difabrikasi dengan metode Laser Powder Bed Fusion memiliki ketahanan pitting yang lebih tinggi dibandingkan SS 316L konvensional [11]. Hal ini disebabkan oleh: (a) tidak adanya inklusi MnS yang menjadi titik inisiasi pit, (b) struktur selular sub-grain yang memperkaya Cr dan Mo di dinding sel, dan (c) potensi pitting potential yang lebih tinggi dalam larutan klorida.

Material Alternatif 2: Duplex Stainless Steel 2205

Berdasarkan Azzam & Khalifa, DSS 2205 memiliki resistansi superior terhadap stress corrosion cracking dan pitting corrosion berkat kandungan Cr (22%), Mo (3%), dan N yang tinggi. PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) = %Cr + 3,3(%Mo) + 16(%N) mencapai 34,9 [10]. Namun jurnal ini juga memperingatkan bahwa DSS 2205 rentan mengalami kegagalan pada zona las (HAZ) jika prosedur pengelasan tidak dikontrol dengan ketat, terutama terkait keseimbangan fase ferit/austenit dan kadar nitrogen.

3.5. Pembahasan

Table 2. Tabel Perbandingan Material

Kriteria	Carbon Steel [1]	SS 316 LPBF [11]	DSS 2205 [10]
Nama Material	ASTM A106 Grade B/ Seamless Carbon Steel	Stainless Steel 316L (LPBF)	Duplex Stainless Steel 2205 (UNS S32205)
Kekuatan Tarik	415 MPa	600-700 MPa (2-3x konvensional)	620 MPa
Ketahanan Korosi	Rendah, butuh proteksi coating dan wrapping	Sangat baik di lingkungan klorida, pitting potensial tinggi	Sangat baik, PREN = 34,9; tahan C1 ⁻ SCC
Rentang Suhu Operasi	Hingga 425°C (Standar ASME)	Hingga 400°C (tergantung kondisi termal LPBF)	Hingga 315°C (diatas ini Risiko sigma phase)

Ketahanan terhadap H ₂ S/CO ₂	Sangat Rentan	Baik (butuh verifikasi di lingkungan H ₂ S tinggi)	Baik, sesuai NACE MR0175 untuk moderate H ₂ S
Laju Korosi	0,095 mm/tahun (underground)	Sangat rendah (data kualitatif dari studi laboratorium)	Rendah jika fase balance terjaga, bisa meningkat jika HAZ tidak optimal
Biaya Material	Rendah (Rp. 50.000-80.000/kg)	Sangat Tinggi (proses LPBF mahal)	Menengah-Tinggi (Rp. 300.000-500.000/kg)
Kemudahan Fabrikasi	Sangat mudah, tersedia luas	Terbatas, butuh teknologi LPBF khusus	Sedang, butuh prosedur las terkontrol ketat
Standar yang berlaku	ASME B31.3, API 574	ASTM A240, perlu sertifikasi AM	ASTM A790, ASTM A182 F51
Catatan Kelebihan	Biaya awal rendah, mudah didapat, familiar di lapangan	Pitting resistance terbaik, kekuatan mekanik tinggi, bebas inklusi MnS	Kekuatan 2x austenitic SS, tahan Cl ⁻ SCC, PREN tinggi
Catatan Kekurangan	Sangat rentan korosi, butuh sistem proteksi ekstensif, umur pakai yang terbatas	Biaya sangat tinggi, ketersediaan terbatasperlu validasi aplikasi industri	Rentan gagal di HAZ jika las tidak terkontrol, kadar N harus sesuai spesifikasi

Korosi pada pipa *flowline* berbahan *carbon steel* merupakan salah satu permasalahan utama dalam sistem produksi minyak dan gas (*migas*). Material *carbon steel* banyak digunakan karena memiliki biaya produksi yang relatif lebih murah, mudah diperoleh, serta memiliki proses fabrikasi dan pengelasan yang lebih sederhana dibandingkan material lainnya. Selain itu, *carbon steel* juga memiliki kekuatan mekanik yang cukup baik untuk menahan tekanan dan temperatur operasi pada sistem perpipaan industri migas. Namun demikian, material ini memiliki kelemahan utama berupa ketahanan korosi yang rendah, terutama ketika digunakan pada lingkungan operasi yang mengandung CO₂, H₂S, air, serta ion klorida dalam konsentrasi tinggi. Lingkungan tersebut bersifat sangat agresif terhadap permukaan logam dan mampu mempercepat reaksi elektrokimia yang menyebabkan terjadinya degradasi material [1].

Paparan lingkungan korosif secara terus-menerus dapat memicu berbagai jenis korosi pada pipa *flowline*, baik dalam bentuk korosi merata (*uniform corrosion*) maupun korosi lokal seperti *pitting corrosion*. Korosi merata menyebabkan penurunan ketebalan dinding pipa secara keseluruhan, sedangkan *pitting corrosion* lebih berbahaya karena menghasilkan lubang-lubang kecil yang dapat menembus dinding pipa dalam waktu relatif singkat. Penipisan dinding pipa akibat korosi dapat menurunkan integritas struktur, meningkatkan risiko kebocoran fluida, hingga menyebabkan kegagalan sistem perpipaan secara menyeluruh. Dampak dari kerusakan tersebut tidak hanya menimbulkan kerugian ekonomi akibat penghentian operasi produksi dan biaya perbaikan yang tinggi, tetapi juga dapat membahayakan keselamatan kerja serta menyebabkan pencemaran lingkungan akibat kebocoran minyak maupun gas berbahaya [1]. Oleh karena itu, pengendalian korosi menjadi aspek yang sangat penting dalam menjaga keandalan sistem *flowline* pada industri migas.

Sebagai alternatif solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut, Azzam & Khalifa mengkaji penggunaan *duplex stainless steel* sebagai material pengganti *carbon steel* [10]. *Duplex stainless steel* memiliki struktur mikro dua fase, yaitu *austenit* dan *ferrit*, yang memberikan kombinasi sifat mekanik tinggi dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan *carbon steel*. Kombinasi kedua fase tersebut membuat material ini memiliki kekuatan tarik yang tinggi sekaligus ketahanan yang baik terhadap berbagai jenis korosi, terutama *stress corrosion cracking* (SCC), *pitting corrosion*, dan *crevice corrosion*. Ketahanan tersebut menjadikan *duplex stainless steel* lebih sesuai digunakan pada lingkungan operasi sistem *flowline* migas yang memiliki kandungan klorida tinggi maupun gas korosif seperti H₂S dan CO₂.

Selain memiliki ketahanan korosi yang baik, *duplex stainless steel* juga diketahui memiliki umur pakai yang lebih panjang dibandingkan *carbon steel*, sehingga berpotensi mengurangi biaya *maintenance* dan penggantian pipa dalam jangka panjang. Meskipun biaya awal material ini relatif lebih tinggi, penggunaan *duplex stainless steel* dinilai lebih ekonomis dalam jangka panjang karena mampu mengurangi risiko kerusakan dan kegagalan sistem perpipaan. Namun demikian, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa kegagalan material masih dapat terjadi akibat faktor eksternal seperti kesalahan proses fabrikasi, perlakuan panas yang tidak tepat, kualitas pengelasan yang buruk, serta adanya cacat mikrostruktur pada material [10]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa performa

material tidak hanya ditentukan oleh komposisi kimia dan sifat mekaniknya, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kualitas proses manufaktur dan pengendalian mutu selama proses produksi hingga pemasangan di lapangan.

Selain *duplex stainless steel*, Voisin et al. dalam penelitiannya membahas penggunaan *stainless steel 316L*, khususnya yang diproduksi menggunakan metode *additive manufacturing* [11]. *Stainless steel 316L* merupakan salah satu jenis baja tahan karat yang memiliki kandungan kromium dan molibdenum cukup tinggi, sehingga mampu membentuk lapisan pasif pada permukaan material. Lapisan pasif tersebut berfungsi melindungi logam dari reaksi oksidasi dan memperlambat laju korosi ketika material terpapar lingkungan agresif. Oleh karena itu, *stainless steel 316L* dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi, terutama korosi *pitting* dan korosi celah yang sering terjadi pada sistem perpipaan di lingkungan korosif.

Penggunaan *stainless steel 316L* juga memberikan keuntungan dari sisi kemampuan fabrikasi dan pengelasan yang lebih baik dibandingkan beberapa jenis material tahan korosi lainnya. Material ini relatif mudah dibentuk dan diaplikasikan pada berbagai sistem perpipaan industri. Selain itu, perkembangan teknologi manufaktur modern seperti *Laser Powder Bed Fusion* pada metode *additive manufacturing* memungkinkan produksi komponen dengan bentuk yang lebih kompleks dan efisien. Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa proses manufaktur tersebut dapat memengaruhi struktur mikro material sehingga dalam kondisi tertentu masih berpotensi mengalami korosi lokal akibat adanya porositas, retakan mikro, atau ketidaksempurnaan struktur internal [11]. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas hasil manufaktur tetap menjadi faktor penting yang harus diperhatikan agar performa ketahanan korosi material dapat optimal dalam penggunaan jangka panjang.

3.6. Diskusi

Hasil kajian dari ketiga jurnal menunjukkan bahwa pemilihan material pipa *flowline* memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap ketahanan sistem produksi minyak dan gas terhadap serangan korosi. Pada sistem perpipaan berbahan *Carbon Steel*, korosi terjadi akibat interaksi antara material logam dengan lingkungan operasi yang mengandung CO₂, H₂S, air, serta ion klorida dalam jumlah tertentu. Lingkungan tersebut bersifat sangat agresif dan mampu mempercepat reaksi elektrokimia pada permukaan logam sehingga laju korosi meningkat secara signifikan. Korosi yang terjadi tidak hanya berbentuk korosi merata (*uniform corrosion*), tetapi juga korosi lokal seperti *pitting corrosion* yang lebih berbahaya karena dapat menyebabkan perforasi pada pipa dalam waktu relatif singkat [1]. Penurunan ketebalan pipa akibat korosi secara terus-menerus dapat mengurangi integritas struktur, meningkatkan risiko kebocoran fluida, hingga menyebabkan kegagalan sistem perpipaan yang berpotensi mengganggu proses produksi.

Selain menurunkan performa teknis, korosi pada pipa *Carbon Steel* juga memberikan dampak ekonomi yang besar bagi industri migas. Kerusakan pipa dapat menyebabkan penghentian operasi produksi, meningkatnya biaya perawatan dan penggantian komponen, serta kerugian akibat hilangnya fluida produksi. Tidak hanya itu, kebocoran minyak maupun gas juga dapat memicu pencemaran lingkungan dan risiko kecelakaan kerja seperti kebakaran atau ledakan yang membahayakan keselamatan personel di area operasi. Oleh karena itu, penggunaan *Carbon Steel* tanpa perlindungan tambahan, seperti *coating*, *wrapping*, *cathodic protection*, maupun *inhibitor corrosion*, dinilai kurang efektif untuk penggunaan jangka panjang pada lingkungan yang memiliki tingkat korosivitas tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun *Carbon Steel* memiliki keunggulan dari sisi biaya dan kekuatan mekanik, material ini tetap memerlukan sistem proteksi tambahan agar umur pakai pipa dapat dipertahankan.

Penggunaan *Duplex Stainless Steel (DSS)* sebagai alternatif material menunjukkan peningkatan performa yang cukup signifikan dalam ketahanan terhadap korosi. Struktur mikro *duplex* yang terdiri atas dua fase, yaitu *austenit* dan *ferrit*, memberikan kombinasi sifat mekanik tinggi dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan *Carbon Steel*. Material ini diketahui memiliki ketahanan yang baik terhadap *stress corrosion cracking (SCC)*, *pitting corrosion*, maupun *crevice corrosion* yang sering terjadi pada lingkungan dengan kandungan ion klorida tinggi. Selain itu, *Duplex Stainless Steel* juga memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi sehingga mampu digunakan pada kondisi tekanan dan temperatur operasi yang lebih ekstrem. Dengan karakteristik tersebut, *DSS* dinilai lebih cocok digunakan pada sistem perpipaan migas yang beroperasi pada lingkungan korosif, terutama pada area *offshore* maupun fasilitas produksi dengan kandungan gas korosif tinggi.

Meskipun demikian, hasil penelitian Azzam dan Khalifa menunjukkan bahwa kegagalan material masih dapat terjadi meskipun *Duplex Stainless Steel* memiliki sifat unggul terhadap korosi [10]. Kegagalan tersebut umumnya

dipengaruhi oleh faktor non-material, seperti kesalahan proses fabrikasi, kualitas pengelasan yang kurang baik, perlakuan panas yang tidak sesuai, hingga kesalahan instalasi di lapangan. Proses pengelasan yang tidak terkontrol, misalnya, dapat menyebabkan perubahan struktur mikro pada daerah *heat affected zone (HAZ)* sehingga menurunkan ketahanan korosi material. Selain itu, perlakuan panas yang tidak tepat juga dapat memicu terbentuknya fase *intermetallic* yang bersifat rapuh dan mempercepat terjadinya kerusakan material. Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan penggunaan *DSS* tidak hanya bergantung pada sifat material, tetapi juga pada kualitas proses manufaktur dan pengendalian mutu selama proses produksi hingga instalasi.

Di sisi lain, *Stainless Steel 316L* juga menunjukkan performa yang baik sebagai material alternatif pengganti *Carbon Steel* pada pipa *flowline*. Material ini memiliki kandungan kromium dan molibdenum yang mampu membentuk lapisan pasif pada permukaan logam sehingga dapat melindungi material dari serangan lingkungan korosif. Lapisan pasif tersebut berfungsi sebagai penghalang yang memperlambat reaksi oksidasi dan mengurangi laju korosi pada permukaan material. Oleh karena itu, *Stainless Steel 316L* dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi *pitting* maupun korosi celah yang sering menjadi penyebab utama kegagalan lokal pada sistem perpipaan. Selain ketahanan korosi yang baik, material ini juga memiliki kemampuan fabrikasi dan pengelasan yang relatif lebih mudah dibandingkan *Duplex Stainless Steel* sehingga lebih fleksibel digunakan dalam berbagai aplikasi industri.

Namun demikian, penelitian oleh Voisin et al. menunjukkan bahwa penggunaan metode manufaktur modern seperti *additive manufacturing* dapat menghasilkan struktur mikro yang tidak homogen pada *Stainless Steel 316L* [11]. Ketidakhomogenan tersebut dapat berupa porositas, retakan mikro, maupun cacat internal lainnya yang berpotensi menjadi titik awal terjadinya korosi lokal. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas proses manufaktur sangat memengaruhi performa akhir material di lingkungan operasi. Dengan kata lain, meskipun *Stainless Steel 316L* memiliki komposisi kimia dan sifat ketahanan korosi yang baik, kualitas hasil produksi tetap harus dikontrol secara ketat agar material dapat bekerja secara optimal dalam jangka panjang.

Hasil kajian ini menunjukkan bahwa tidak ada satu material yang sepenuhnya sempurna untuk seluruh kondisi operasi pipa *flowline*. *Carbon Steel* unggul dari sisi biaya dan kemudahan penggunaan, tetapi memiliki ketahanan korosi yang rendah. *Duplex Stainless Steel* menawarkan kombinasi kekuatan mekanik dan ketahanan korosi yang sangat baik, namun membutuhkan proses fabrikasi dan pengelasan yang lebih kompleks. Sementara itu, *Stainless Steel 316L* memiliki ketahanan korosi yang baik dan proses fabrikasi yang lebih mudah, tetapi performanya tetap dipengaruhi oleh kualitas manufaktur. Oleh karena itu, pemilihan material harus mempertimbangkan keseimbangan antara ketahanan korosi, kekuatan mekanik, biaya investasi, kemudahan fabrikasi, serta kondisi lingkungan operasi yang akan dihadapi.

Implikasi dari hasil penelitian ini adalah bahwa strategi pengendalian korosi pada pipa *flowline* tidak dapat hanya bergantung pada pemilihan material semata. Diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif melalui kombinasi penggunaan material tahan korosi, penerapan *coating* dan *inhibitor corrosion*, inspeksi berkala, *monitoring* ketebalan pipa, serta penerapan sistem *maintenance* yang terencana. Dengan penerapan strategi tersebut, risiko kegagalan sistem perpipaan dapat diminimalkan sehingga keandalan operasional, keselamatan kerja, dan keberlanjutan produksi pada industri minyak dan gas dapat lebih terjamin dalam jangka panjang.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa material *carbon steel* pada pipa *flowline* masih menjadi material yang paling banyak digunakan dalam industri minyak dan gas karena memiliki biaya awal yang relatif rendah, mudah diperoleh, serta memiliki proses fabrikasi dan pengelasan yang lebih sederhana dibandingkan material tahan korosi lainnya. Selain itu, *carbon steel* juga memiliki kekuatan mekanik yang cukup baik untuk mendukung sistem transportasi fluida pada berbagai kondisi operasi. Namun demikian, material ini memiliki kelemahan utama berupa ketahanan korosi yang rendah, terutama ketika digunakan pada lingkungan yang mengandung CO_2 , H_2S , air, dan ion klorida dalam jumlah tinggi. Lingkungan tersebut mempercepat terjadinya reaksi korosi baik dalam bentuk korosi merata (*uniform corrosion*) maupun korosi lokal seperti *pitting corrosion* yang dapat menyebabkan penurunan ketebalan pipa secara signifikan. Penurunan ketebalan tersebut dapat memperpendek umur pakai pipa, meningkatkan risiko kebocoran, menurunkan integritas struktur, serta memicu kegagalan operasi yang berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi, pencemaran lingkungan, dan risiko keselamatan kerja. Hasil kajian juga menunjukkan bahwa penggunaan sistem proteksi tambahan seperti *coating*, *wrapping*, *cathodic protection*, dan *corrosion inhibitor* memang dapat membantu memperlambat laju korosi pada *carbon steel*. Akan tetapi, metode tersebut tetap membutuhkan biaya perawatan

dan pengawasan yang tinggi dalam jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material yang memiliki ketahanan korosi lebih baik agar sistem perpipaan dapat beroperasi dengan lebih aman dan efisien. Dalam hal ini, *duplex stainless steel 2205* menunjukkan performa yang sangat baik sebagai material pengganti *carbon steel*. Material ini memiliki struktur mikro dua fase, yaitu *austenit* dan *ferrit*, yang memberikan kombinasi kekuatan mekanik tinggi dan ketahanan korosi yang unggul. Selain itu, nilai *Pitting Resistance Equivalent Number (PREN)* yang tinggi membuat *duplex stainless steel 2205* lebih tahan terhadap *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, maupun *stress corrosion cracking (SCC)* pada lingkungan dengan kandungan klorida dan gas korosif tinggi. Dengan karakteristik tersebut, material ini dinilai sangat sesuai digunakan pada sistem *flowline* di lingkungan migas yang agresif, baik pada fasilitas *onshore* maupun *offshore*. Di sisi lain, *stainless steel 316L* juga menunjukkan ketahanan korosi yang baik dan layak dipertimbangkan sebagai alternatif material pengganti *carbon steel*. Kandungan kromium dan molibdenum pada material ini mampu membentuk lapisan pasif yang efektif dalam melindungi permukaan logam dari serangan lingkungan korosif. *Stainless steel 316L* diketahui memiliki ketahanan yang baik terhadap *pitting corrosion* serta memiliki kemampuan fabrikasi dan pengelasan yang relatif lebih mudah dibandingkan *duplex stainless steel*. Oleh karena itu, material ini dapat menjadi pilihan yang lebih fleksibel untuk kondisi operasi tertentu dengan tingkat korosivitas menengah. Namun demikian, hasil kajian juga menunjukkan bahwa kualitas proses manufaktur sangat memengaruhi performa material. Ketidake sempurnaan struktur mikro, porositas, cacat pengelasan, maupun perlakuan panas yang tidak tepat dapat menjadi titik awal terjadinya korosi lokal. Hal tersebut menunjukkan bahwa pemilihan material tahan korosi tetap harus diikuti dengan kontrol kualitas manufaktur yang baik, prosedur pengelasan yang sesuai standar, serta inspeksi dan *maintenance* berkala agar performa material dapat optimal selama masa operasi. Secara keseluruhan, pemilihan material untuk pipa *flowline* sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan biaya awal material, tetapi juga harus memperhatikan kondisi fluida proses, kandungan gas korosif, tekanan dan temperatur operasi, metode fabrikasi, umur pakai material, serta biaya siklus hidup (*life cycle cost*) dalam jangka panjang. Material dengan biaya awal lebih tinggi belum tentu lebih mahal apabila mampu mengurangi frekuensi kerusakan, biaya *maintenance*, dan risiko kegagalan operasi selama masa penggunaan. Berdasarkan hasil perbandingan dari berbagai penelitian yang dikaji, *duplex stainless steel 2205* direkomendasikan sebagai pilihan utama untuk lingkungan dengan tingkat korosivitas tinggi karena memiliki kombinasi terbaik antara kekuatan mekanik dan ketahanan korosi. Sementara itu, *stainless steel 316L* dapat digunakan sebagai alternatif pada kondisi korosif menengah yang memerlukan ketahanan *pitting* yang baik dengan proses fabrikasi yang lebih mudah. Dengan pemilihan material yang tepat serta penerapan strategi pengendalian korosi yang optimal, keandalan sistem perpipaan pada industri minyak dan gas dapat meningkat sehingga risiko kebocoran, kerusakan sistem, dan kecelakaan kerja dapat diminimalkan.

Referensi

1. Setyani, A., Jheno Sheva Hermawan, Moch. A., Prabowo, I., & Amin, N. (2025). INVESTIGASI KOROSI PIPA FLOWLINE CARBON STEEL PADA SISTEM PRODUKSI MIGAS DAN PENERAPAN SOLUSI PROTEKTIF. *J-ENSITEC*, 11(02), 10207–102015. <https://doi.org/10.31949/j-ensitec.v11i02.13508>
2. AL-Khalidi, M. R., & Abdulsadda, A. T. (2024). *Corrosion prediction in the oil industry using deep learning techniques*. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 4(3), 1013–1036. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v4i3.1371>
3. Wasim, M., Shoaib, S., Mubarak, N. M., & Inamuddin, A. M. A. (2018). *Factors influencing corrosion of metal pipes in soils*. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 861–879. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x>
4. May, Z., Alam, M. K., & Nayan, N. A. (2022). *Recent advances in nondestructive method and assessment of corrosion undercoating in carbon-steel pipelines*. *Sensors*, 22(17), 6654. <https://doi.org/10.3390/s22176654>
5. Farh, H. M. H., Ben Seghier, M. E. A., Taiwo, R., & Zayed, T. (2023). *Analysis and ranking of corrosion causes for water pipelines: A critical review*. *npj Clean Water*, 6, 65. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00275-5>
6. Chohan, I. M., Ahmad, A., Sallih, N., Bheel, N., Salilew, W. M., & Almaliki, A. H. (2024). *Effect of seawater salinity, pH, and temperature on external corrosion behavior and microhardness of offshore oil and gas pipeline: RSM modelling and optimization*. *Scientific Reports*, 14, 16543. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67463-2>
7. Klenam, D. E. P., McBagonluri, F., Bamisaye, O. S., Asumadu, T. K., Ankah, N. K., Bodunrin, M. O., Andrews, A., & Soboyejo, W. O. (2024). *Corrosion resistant materials in high-pressure high-temperature oil wells: An overview and potential application of complex concentrated alloys*. *Engineering Failure Analysis*, 157, 107920. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107920>
8. Maurya, A. K., Pandey, S. M., Chhibber, R., Fydrych, D., & Pandey, C. (2024). *Corrosion performance of super duplex stainless steel and pipeline steel dissimilar welded joints: A comprehensive investigation for marine structures*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135, 1009–1033. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14596-3>
9. Condini, A., Trentalange, C., Giuliani, A., Cristoforetti, A., & Rossi, S. (2024). *Advancing corrosion protection in confined spaces: A solvent-free UV LED-curable coating for steel pipelines with enhanced barrier properties and harsh environment performance*. *Journal of Coatings Technology and Research*, 21(6), 2009–2022. <https://doi.org/10.1007/s11998-024-00950-3>
10. Azzam, M., & Khalifa, W. (2023). Investigation of duplex stainless steel flow line failure. *Engineering Failure Analysis*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106935>
11. Voisin, T., Shi, R., Zhu, Y., Qi, Z., Wu, M., Sen-Britain, S., Zhang, Y., Qiu, S. R., Wang, Y. M., Thomas, S., & Wood, B. C. (2022). *Pitting Corrosion in 316L Stainless Steel Fabricated by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Review and Perspective*. In *JOM*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05206-2>
12. Abdu, M. T., Khalifa, W., & Abdelrahman, M. S. (2023). *Investigation of erosion-corrosion failure of API X52 carbon steel pipeline*. *Scientific Reports*, 13, 20494. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42556-6>

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.8717>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

13. Disti, S. M., & Rubiandini, R. (2025). *Corrosion rate analysis in material selection for tubing in CO2 injection process at Well K-28*. Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology (JGEET), 10(04-2), 121–126. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.1.1.24168>
14. Karaca, C., & Oturak, H. (2022). Experimental analysis of copper pipe and steel pipe in shell and tube heat exchanger. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESEN)*, 8(3), 65–68. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.1087883>
15. Sugiyono. (2017). *Metode penelitian administrasi*. CV Alfabeta.