RE-EVALUASI DAN ANALISIS KRITIS PEMILIHAN MATERIAL PIPA DI INDUSTRI KIMIA

Selomita Br Sipayung[1], Tiara Dara Destina[2], Sondang Manalu[3], Aldilah Herlambang[4], Oki Alfernano[5], Rizka Shafira[6]

[1,2,3,4,5,6]*Universitas Jambi*
E-mail : tiaradaradestina09@gmail.com

ABSTRACT

Piping systems are critical components in the chemical, oil and gas, and energy industries. Inappropriate pipe material selection has been shown to be a major cause of operational failures, resulting in significant technical, economic, and environmental impacts. This review critically examines five scientific journals addressing pipe material issues in various industrial settings, including the failure of ASTM A179 boiler pipes due to thermal degradation, internal corrosion of API 5L Grade B crude oil pipelines, a comprehensive review of industrial piping systems, the depletion of diesel fuel pipelines in coastal environments, and the effect of sugar contaminants on corrosion rates. The analysis was conducted based on four primary material selection criteria: technical, economic, environmental, and safety. The study results indicate that carbon steel continues to dominate pipe material use in Indonesian industry due to its low initial cost and ease of fabrication. However, this material fundamentally has limited corrosion resistance in aggressive operating environments. Documented failures occur much earlier than the planned design life, indicating that a material selection approach based on initial cost without life cycle cost analysis has proven inefficient. This review proposes alternative materials that are more suitable for each operating condition, including Stainless Steel 316L, Duplex Stainless Steel 2205, and Alloy Steel Cr-Mo, as well as a hybrid approach using advanced coatings (3LPE) combined with a risk-based inspection program as a realistic compromise solution for existing infrastructure.

Keywords : *Pipe Material Selection, Corrosion, Carbon Steel, Life Cycle Cost, Industrial Piping Systems, Crude Oil Pipelines, Alternative Materials, Risk-Based Inspection*

ABSTRAK

Sistem perpipaan merupakan komponen kritis dalam industri kimia, minyak dan gas, serta energi. Pemilihan material pipa yang tidak tepat terbukti menjadi penyebab utama kegagalan operasional yang berdampak besar secara teknis, ekonomi, maupun lingkungan. Review ini mengkaji secara kritis lima jurnal ilmiah yang membahas permasalahan material pipa dalam berbagai kondisi industri, meliputi kegagalan pipa boiler ASTM A179 akibat degradasi termal, korosi internal pipa penyalur crude oil API 5L Grade B, tinjauan komprehensif sistem perpipaan industri, penipisan pipa bahan bakar diesel di lingkungan pantai, serta pengaruh kontaminan gula terhadap laju korosi. Analisis dilakukan berdasarkan empat kriteria utama pemilihan material, yaitu teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan. Hasil kajian menunjukkan bahwa carbon steel masih mendominasi penggunaan material pipa di industri Indonesia akibat biaya awal yang rendah dan kemudahan fabrikasi, namun material ini secara fundamental memiliki ketahanan korosi yang terbatas pada lingkungan operasi agresif. Kegagalan yang terdokumentasi terjadi jauh lebih cepat dari design life yang direncanakan, mengindikasikan bahwa pendekatan pemilihan material berbasis biaya awal tanpa life cycle cost analysis terbukti tidak efisien. Review ini mengusulkan material alternatif yang lebih sesuai untuk masing-masing kondisi operasi, antara lain Stainless Steel 316L, Duplex Stainless Steel 2205, dan Alloy Steel Cr- Mo, serta pendekatan hybrid berupa coating canggih (3LPE) dikombinasikan dengan program inspeksi berbasis risiko sebagai solusi kompromis yang realistis bagi infrastruktur yang sudah terpasang.

Kata Kunci : *Pemilihan Material Pipa, Korosi, Carbon Stell, Life Cycle Cost, Sistem Perpipaan Industri, Crude Oil Pipeline, Material Alternatif, Inspeksi Berbasis Risiko*

PENDAHULUAN

Sistem perpipaan merupakan salah satu komponen paling kritis dalam industri kimia, minyak dan gas, serta industri manufaktur lainnya. Hampir semua proses industri melibatkan aliran fluida dari satu peralatan ke peralatan lain, dan pipa adalah media yang banyak digunakan untuk keperluan tersebut.

Pemilihan material yang tepat untuk sistem perpipaan dii industri kimia merupakan salah satu keputusan paling krusial dalam tahap perancangan alat. Keputusan ini tidak boleh diambil hanya berdasarkan harga murah atau kemudahan mendapatkan material, karena dampak jangka panjangnya bisa sangat merugikan. Bayangkan sebuah pabrik yang harus berhenti beroperasi berhari-hari karens pipa bocor akibat korosi yang sebenarnya bisa dicegah sejak awal. Itulah konsekuensi nyata dalam pemilihan material yang kurang tepat.

Dari berbagai penelitian yang sudah ada, termasuk dari European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG), terlihat bahwa korosi adalah salah satu penyebab utama kegagalan pipa, selain interferensi eksternal. Yang lebih mengkhawatirkan, korosi tidak menunjukkan trend penurunan seperti faktor-faktor lain, sehingga di masa depan dampaknya diprediksi akan semakin signifikan. Kondisi ini mendorong para peneliti dan insinyur untuk terus menari solusi terbaik dalam hal pemilihan material pipa yang tepat.

Review ini mengkaji lima jurnal ilmiah yang membahas permasalahan material pada sistem perpipaan di berbagai kondisi industri. Kelima jurnal ini dipiilih karena masing-masing mewakii skenario nyata di lapangan kegagalan pipa boiler akibat perubahan sifat material, korosi internal pipa penyalur crude oil, tinjauan komprehensif sistem perpipaan industri, penipisan pipa bahan bakar diesel di lingkungan pantai, dan pengaruh kontaminan gula terhadap laju korosi. Dari kajian ini, kami berupaya memberi memberikan penilaian kritis terhadap pemilihan material yang digunakan dan mengusulkan alternatif material yang lebih baik berdasarkan data teknisi terkini.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (literature review) dengan pendekatan deskriptif-kualitatif dan analisis kritis. Data yang digunakan berupa data sekunder yang diperoleh dari lima jurnal ilmiah utama yang membahas pemilihan material pipa, kegagalan akibat korosi, degradasi termal, serta sistem perlindungan korosi pada industri kimia, minyak dan gas, serta pembangkit energi. Selain jurnal ilmiah, penelitian ini juga menggunakan referensi pendukung berupa standar internasional seperti ASME, ASTM, API, ISO, dan NACE untuk memperkuat analisis teknis material. Proses pengumpulan data dilakukan melalui identifikasi literatur yang relevan, studi dokumentasi, serta klasifikasi data berdasarkan aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dan komparatif dengan membandingkan material pipa yang digunakan pada masing-masing studi kasus terhadap material alternatif yang lebih sesuai. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter seperti kekuatan mekanik, ketahanan korosi, temperatur operasi, ketebalan pipa, umur pakai, biaya relatif, serta risiko keselamatan dan lingkungan.

Selanjutnya dilakukan analisis kritis menggunakan pendekatan Life Cycle Cost (LCC) untuk menilai efisiensi material dalam jangka panjang. Hasil analisis digunakan untuk menyusun rekomendasi material alternatif yang lebih optimal dan sesuai dengan kondisi operasi industri, seperti Stainless Steel 316L, Duplex Stainless Steel 2205, Alloy Steel Cr-Mo, serta sistem pelapisan protektif berbasis coating modern.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Maulana (2023): Studi ini menganalisis kegagalan pipa ASTM A179 pada ruang bakar boiler. Pipa ini merupakan baja karbon rendah yang digunakan untuk sikulasi air di dalam boiler. Peneliti menemukan bahwa paparan suhu tinggi terus-menerus di ruang bakar menyebabkan perubahan struktur mikro material, yaitu hilangnya fase pearlite yang berperan penting dalam kekerasan material. Metode yang digunakan meliputi uji kekerasan Brinell dan pengamatan metallografi menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 200x dan 500x.

Santoso et al. (2025): Penelitian ini menginvestigasi penyebab kebocoran yang terjadi dua kali dalam satu tahun pada pipa penyalur crude oil API 5L Grade B sepanjang 212 km. Pipa berdiameter 8 inci seharusmya berumur 20 tahun, tetapi gagal jauh sebelum waktunya. Melalui serangkaian pengujian visual, SEM, EDX, XRD, dan pengukuran ketebalan ultrasonik, ditemukan bahwa korosi internal akibat C02 terlarut dalam air terproduksi menjadi penyebab utama kegagalan, menghasilkan produk korosi berupa siderit (Fe2CO3) dan hermatit (Fe3O4).

Velasco et al. (2025): Ini adalah review komprehensif dari Surfaces MDPI yang mengkaji desain sistem perpipaan industri dan metode perlindungan terhadap korosi. Jurnal ini sangat relevan karena membahas standar-standar internasional seperti ASME, API, ISO, dan NACE secara lengkap. Jurnal ini juga mengungkap fakta megejutkan bahwa 24% kecelakaan di industri kimia terjadi pada sistem perpipaan, dan korosi menyumbang 27,2% dari penyebab kegagalan pipa gas di Eropa.

Pratama et al. (2024): Penelitian ini mengukur laju korosi dan menghitung sisa umur pipa bahan bakar diesel di PLTD Namlea, Kabupaten Buru, menggunakan alat Ultrasonic Testing (UT). Kondisi lokasi yang berbatasan langsung dengan pantai membuat pipa sangat rentan korosi. Hasil pengukuran menunjukkan laju korosi rata-rata 0,336-0,358 mm/tahun dengan sisa umur pakai sekitar 5,5-6,1 tahun dari total ketebalan awal 5,54 mm.

Faidah & Takwanto (2026): Penelitian eksperimental ini mengkaji pengaruh kontaminasi gula (sugar content) dalam aliran injeksi out cooling tower terhadap laju korosi logam besi. Menggunakan metode weight loss, (kehilangan berat), peneliti merendam spesimen besi dalam larutan gula dengan variasi konsentrasi 1000, 5000, dan 10.000 ppm selama 96 jam. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi gula, semakin tinggi laju korosi, dengan nilai tertinggi 34,44 mpy pada konsentrasi 10.000 ppm.

Identifikasi Kriteria Pemilihan Material

Dalam kelima jurnal yang dikaji, pemilihan material pipa didasarkan pada berbagai kriteria yang dapat dikelompokkan ke dalam empat kategori utama yaitu teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan. Berikut identifikasi lengkapnya:

Kriteria Teknis

Dari semua jurnal yang dikaji, faktor teknis menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan material. Kriteria teknis yang paling sering muncul antara lain:

- Kekuatan mekanik (tensile strength dan yield strength): semua jurnal menggunakan carbon steel karena memiliki kekuatan yang cukup untuk aplikasi tekanan operasional yang ditetapkan. API 5L Grade B misalnya, memiliki tensile strength minimum 415 MPa, sedangkan ASTM A179 minimal 325 MPa.
- Ketahanan terhadap korosi: ini adalah kriteria paling banyak dipermasalahkan dalam kelima jurnal. Carbon steel ini memiliki ketahanan korosi yang rendah, terutama dalam lingkungan yang mengandung CO2, Cl-, H2S, air laut, atau asam organic dari gula.
- Kemampuan las (weldability): Carbon steel yang sangat mudah difabrikasi dan dilas, sehingga menjadi pilihan utama di lapangan yang membutuhkan penyambungan pipa dalam jumlah banyak.
- Toleransi terhadap suhu operasi: ASTM A179 dipilih untuk aplikasi boiler karena tahan terhadap tekanan pada suhu tinggi. Namun, seperti yang dibuktikan jurnal Maulana (2023), paparan suhu sangat tinggi dalam jangka panjang tetap menyebabkan degradasi material.
- Ketebalan dinding (wall thickness): semua jurnal menggunakan standar tertentu (API574, ASME B31) untuk menentukan ketebalan minimum yang masih aman, dan ketebalan ini menjadi dasar perhitungan laju korosi serta sisa umur pakai pipa.

Kriteria Ekonomi

Aspek ekonomi sangat dominan dalam Keputusan pemilihan material, terutama di studi-studi yang berbasis pada industri dengan biaya operasional tinggi:

- Biaya material: Carbon steel adalah material termurah yang tersedia di pasar. Hal ini secara eksplisit disebutkan dalam Jurnal (Velasco et al, 2025) yang menyatakan bahwa 90% pipa industri menggunakan low carbon steel karena harganya yang terjangkau.
- Biaya perawatan dan penggantian: Jurnal (Pratama dkk., Santoso dkk., dan Maulana) secara implisit menunjukkan bahwa pemilihan material murah di awal dapat berujung pada biaya perawatan yang jauh lebih besar karena harus melakukan inspeksi rutin, coating, dan penggantian pipa lebih cepat dari rencana.
- *Life Cycle Cost (LCC*): Hanya Jurnal (Velasco et al, 2025) yang secara ekspilisit menyebutkan pentingnya *life cycle cost analysis* dalam pemilihan material. Pendekatan ini sangat penting untuk menghindari bias short-term cost yang umum terjadi.
- Ketersediaan material: Carbon steel API 5L Grade B disebutkan sangat mudah didapat dalam negeri, yang juga menjadi factor ekonomi yang penting dalam konteks indusri Indonesia.

Kriteria Lingkungan

Aspek lingkungan kurang mendapat perhatian yang memadai dalam sebagian besar jurnal yang dikaji:

- Dampak kebocoran terhadap lingkungan: Jurnal (Santoso dkk, 2025) secara langsung menyebutkan bahwa kegagalan pipa crude oil menimbulkan kerugian dari segi pencemaran lingkungan. Namun tidak ada analisis mendalam tentang cara mencegahnya dari sisi pemilihan material.

- Sustainable coating: Jurnal (Velasco et al, 2025) membahas tren coating yang lebih ramah lingkungan (water-based, bio-based) sebagai pengembangan terkini. Hal ini menunjukkan kesadaran terhadap aspek lingkungan dalam konteks perlindungan material.
- Korosivitas lingkungan sekitar: Jurnal (Pratama dkk, 2024) dengan jelas menunjukkan bahwa lokasi geografis (tepi pantai) sangat mempengaruhi laju korosi. Faktor lingkungan seperti kelembaban, kandungan garam udara, dan paparan air laut harus diperhitungkan dalam pemilihan material.

Kriteria Keselamatan

Aspek keselamatan menjadi motivadi utama sebagian besar penelitian yang dikaji:

- Risiko kebocoran dan ledakan: Jurnal (Velasco et al, 2025) mengutip data EGIG bahwa 24% kecelakaan pipa di industri disebabkan oleh korosi. Kebocoran pipa dalam industri yang mengolah bahan mudah terbakar atau beracun dapat berakibat sangat fatal.
- Standar minimum ketebalan pipa: Jurnal (Pratama dkk, 2024) dengan konsisten API 574 sebagai acuan standar ketebalan minimum (1,8 mm) yang tidak boleh terlampaui.
- Inspeksi dan monitoring: semua jurnal secara tidak langsung menekankan pentingnya inspeksi berkala. Jurnal Paratama et al. Menggunakan UT sebagai alat inspeksi non- destruktif yang akurat yang monitoring laju korosi.

Analisis Kritis Pemilihan Material

Secara keseluruhan, pemilihan material berbahan carbon steel ini sebagai material utama pipa di semua studi yang dikaji dapat dipahami dari sudut pandang biaya dan kemudahan fabrikasi. Namun, jika dievaluasi dari perspektif rekayasa material modern, pada material ini terdapat beberapa kekurangan yang masih perlu dikritisi:

Pertama, tidak ada satu pun dari kelima studi melakukan analisis komprehensif atau lebih teliti dan mendalam terhadap alternatif material lain sebelum memilih carbon steel. Pemilihan material tersebut seolah-olah sudah menjadi keputusan baku tanpa melalui proses evaluasi sistematis yang mempertimbangkan lingkungan operasi secara menyeluruh. Dalam rekayasa modern, proses Material Selection harus melibatkan analisis multi-kriteria (teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan) secara bersamaan.

Kedua, *carbon steel* secara alami memiliki ketahanan korosi yang sangat terbatas, terutama dalam kondisi yang ditemukan dalam kelima studi atau sumber literatur ini seperti lingkungan pantai, air terproduksi mengandung CO2 dan Cl-, air pendingin terkontaminasi gula/asam organik, dan suhu ekstrem di boiler. Memilih material yang secara fundamental rentan terhadap kondisi operasi yang ada, lalu mengandalkan coating atau inspeksi rutin sebagai kompensasinya, adalah pendekatan reaktif, bukan preventif.

Jika Dilihat dari sudut pandang ekonomi jangka pendek, pemilihan carbon steel memang masuk akal. Harga material yang murah, ketersediaan yang tinggi, dan kemudahan fabrikasi adalah pertimbangan yang sangat relevan terutama untuk infrastruktur skala besar seperti trunkline 212 km atau sistem perpipaan PLTD. Namun jika dihitung dengan pendekatan Life Cycle Cost (LCC), pemilihan ini perlu dipertanyakan.

Sebagai contoh, pipa API 5L Grade B mengalami kegagalan 2 kali dalam 1 tahun, padahal design life-nya 20 tahun. Biaya penanganan kebocoran, pembersihan lingkungan, dan kerugian

produksi hampir pasti jauh melebihi selisih biaya antara carbon steel dengan material yang lebih tahan korosi (Santoso dkk., 2025). Demikian pulasisa umur pakai pipa yang hanya 5,5–6,1 tahun (padahal baru dipasang 5 tahun lalu) menunjukkan bahwa biaya penggantian akan datang lebih cepat dari yang direncanakan (Pratama dkk., 2024).

Dari sisi penggunaan standar, kelima jurnal pada umumnya sudah mengacu pada standar internasional yang relevan: API 5L, API 570, API 574, ASME B31, dan ASTM. Hal ini menunjukkan bahwa secara formal, pemilihan dan pengujian material sudah dilakukan sesuai dengan persyaratan minimum yang berlaku.

Namun, standar-standar tersebut bersifat minimum requirements, bukan rekomendasi optimal. Rekayasa modern, sudah banyak mengembangkan pendekatan yang lebih canggih penggunaan IoT dan Cyber-Physical Systems untuk monitoring real-time, machine learning untuk prediksi kegagalan, serta material-material baru seperti smart coating dengan kemampuan self-healing (Velasco dkk., 2025).Sayangnya ada beberapa sumber yang belum mempertimbangkan teknologi-teknologi ini dalam rekomendasi mereka.

Re-Evaluasi Dan Usulan Material Alternatif

Dasar Re-Evaluasi

Re-evaluasi pemilihan material dalam review ini didasarkan pada tiga pertimbangan utama. Pertama, analisis terhadap jenis kegagalan dominan yang terjadi di kelima jurnal yang dikaji, yaitu korosi internal dan eksternal akibat lingkungan agresif. Kedua, perbandingan sifat-sifat teknis material berdasarkan data dari literatur dan standar material internasional. Ketiga, pertimbangan aplikabilitas di industri Indonesia dengan memperhatikan aspek ketersediaan dan biaya relatif.

Empat material alternatif diusulkan dalam re-evaluasi ini, yaitu Stainless Steel 316L, Duplex Stainless Steel 2205, Alloy Steel Cr-Mo (misal ASTM A335), dan HDPE Lined Steel. Setiap material memiliki keunggulan yang berbeda dan paling cocok untuk kondisi operasi yang berbeda pula.

Tabel 1. Perbandingan Properties Material Pipa: Asli vs Alternatif

Parameter	Material Asli		Material Alternatif (Usulan)			
	Carbon Steel (API 5L Gr. B)	ASTM A179 (Boiler)	Stainless Steel 316L	Duplex SS 2205	Alloy Steel (Cr- Mo)	HDPE Lined Steel
Tensile Strength (MPa)	≥ 415	≥ 325	515–690	620–880	415–620	~350 (komposit)
Yield Strength (MPa)	≥ 240	≥ 180	205–310	450–620	205–415	~200 (komposit)
Kekerasan (BHN/HRB)	≤ 22 HRC	120–132 BHN*	≤ 95 HRB	28–36 HRC	≤ 25 HRC	Rendah (liner)
Ketahanan Korosi	Rendah	Rendah	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Tinggi	Tinggi (HDPE)
Suhu	~400	±600 (boiler)	~870	≤ 315	≤ 650	~60 (liner)

Operasi Maks (°C)						
Ketahanan thd CO2/H2S	Buruk	Buruk	Baik	Sangat Baik	Sedang–Baik	Sangat Baik
Biaya Relatif	Rendah	Rendah	Tinggi	Sangat Tinggi	Menengah–Tinggi	Menengah
Kemudahan Fabrikasi	Sangat Mudah	Mudah	Mudah	Sedang	Sedang	Kompleks
Aplikasi Utama	Pipa crude oil, distribusi bahan bakar	Pipa boiler/pembangkit	Cooling tower, kimia, gula	Lingkungan korosif berat	Pipa suhu tinggi	Pipa air/bahan kimia
Standar Referensi	API 5L, ASME B31.4	ASTM A179, ASME Sec. I	ASTM A312, ASME B31.3	ASTM A789, NACE MR0175	ASTM A335, ASME B31.1	AWWA C901, ISO 4427

Keterangan : Nilai BHN dari uji Brinell (Jurnal 4); Rentan dalam kondisi CO_2, Cl^-, asam organik, dan lingkungan pantai

Sumber: ASME, ASTM, API, NACE; diolah oleh penulis

Rekomendasi Material Perstudi Kasus

Untuk Pipa Distribusi Bahan Bakar di Lingkungan Pantai (Jurnal 4 – PLTD Namlea)

Kondisi lingkungan pantai dengan kadar garam udara tinggi dan kelembaban ekstrem menjadi faktor utama yang memperburuk korosi pada pipa carbon steel di PLTD Namlea. Untuk kondisi ini, kami merekomendasikan dua alternatif:

- Stainless Steel 316L: Material ini mengandung molybdenum yang memberikan ketahanan sangat baik terhadap korosi atmosfer pantai dan korosi celah. Meski harganya 4–6 kali lebih mahal dari carbon steel, ketahanannya yang jauh lebih panjang (estimasi 3–4 kali lipat umur pakai) menjadikannya lebih ekonomis dalam jangka panjang (Ariyanto dkk., 2022).
- Carbon Steel dengan 3-Layer Polyethylene (3LPE) Coating: Jika biaya menjadi kendala utama, solusi hybrid berupa carbon steel yang dilapisi 3LPE bisa menjadi kompromi yang baik. Coating ini sudah terbukti efektif untuk pipa bawah tanah maupun di lingkungan agresif, dan sebagai salah satu coating dengan performa terbaik menurut laporan EGIG (Velasco dkk., 2025).

Untuk Pipa Penyalur Crude Oil dengan Produced Water (Jurnal 2 – PT PQR)

Kegagalan pipa API 5L Grade B akibat korosi internal CO2 (sweet corrosion) adalah masalah yang sudah sangat dikenal dalam industri migas. Alternatif material terbaik untuk kondisi ini adalah:

- Duplex Stainless Steel 2205: Material ini memiliki ketahanan luar biasa terhadap CO2, H2S, dan Cl- secara bersamaan. Kekuatan mekanisnya juga lebih tinggi dari carbon steel, sehingga

secara teoritis dapat menggunakan dinding yang lebih tipis dan menghemat material (Setyani dkk., 2025). Standar NACE MR0175 menjamin aplikabilitasnya di lingkungan H2S.

- Injeksi Corrosion Inhibitor + Carbon Steel: Jika penggantian seluruh pipa 212 km tidak memungkinkan secara ekonomi, penambahan sistem injeksi corrosion inhibitor secara kontinyu dikombinasikan dengan monitoring UT berkala dapat menjadi solusi jangka menengah. Namun pendekatan ini membutuhkan komitmen operasional yang konsisten.

Untuk Pipa Cooling Tower di Industri Gula (Jurnal 5)

Kasus ini menarik karena korosifnya bukan berasal dari fluida yang secara inherent agresif, melainkan dari kontaminasi yang sebenarnya bisa dicegah. Oleh karena itu, rekomendasi materialnya perlu disertai rekomendasi kontrol proses:

- Stainless Steel 304/316L: Dalam penelitian tentang korosi baja di lingkungan nira dan air gula (Faidah & Takwanto, 2026), stainless steel seri 304 dan 316L menunjukkan ketahanan korosi yang jauh lebih baik dibanding baja karbon. SS 316L dengan tambahan molybdenum memberikan perlindungan ekstra terhadap asam organik yang terbentuk dari degradasi gula.
- Pengendalian kualitas air pendingin (Water Treatment): Seiring dengan pergantian material, sistem water treatment yang efektif untuk menjaga pH air pendingin tetap netraldan mengontrol kadar gula perlu diimplementasikan. Ini adalah solusi preventif yang paling cost-effective.

Untuk Pipa Boiler (Jurnal 1 – ASTM A179)

Kegagalan pipa boiler akibat paparan suhu tinggi jangka panjang memerlukan material yang secara khusus dirancang untuk aplikasi tekanan-suhu tinggi. Rekomendasi kami:

- Alloy Steel Cr-Mo (ASTM A335 Grade P11/P22): Material ini dirancang khusus untuk aplikasi high-temperature, high-pressure seperti boiler dan superheater (Putra dkk., 2025). Kandungan Cr dan Mo memberikan ketahanan creep yang jauh lebih baik dibanding carbon steel murni, sehingga perubahan fase pearlite ke ferrite yang melemahkan material (seperti yang terjadi di Jurnal 5) dapat dicegah atau setidaknya diperlambat secara signifikan.
- T91/P91 Steel (9Cr-1Mo-V): Untuk aplikasi suhu sangat tinggi (di atas 600°C), Grade T91/P91 adalah material modern yang direkomendasikan oleh ASME untuk superheater tubes. Material ini memiliki ketahanan creep dan oksidasi pada suhu tinggi yang jauh lebih baik dibanding ASTM A179.

Risiko Dan Implikasi Kegagalan Material

- **Risiko Teknis**

Kegagalan material pipa dalam industri kimia dan energi dapat memicu serangkaian risiko teknis yang serius. Berdasarkan temuan dari kelima jurnal yang dikaji, risiko-risiko teknis yang paling dominan adalah:

- Penipisan pada dinding pipa (wall thinning): Sebagaimana ditunjukkan dalam Sumber literatur 2, 4, dan 5, korosi secara bertahap mengurangi ketebalan dinding pipa. Jika ketebalan minimum tidak terpenuhi, pipe burst bisa terjadi secara tiba-tiba tanpa tanda peringatan yang jelas.
- Kegagalan struktural prematur: Dimana pada sumber literatur yang ke-4 menunjukkan bahwa pipa yang dirancang untuk 20 tahun ternyata mengalami kebocoran dalam 1 tahun pertama operasi. Ini menunjukkan bahwa kegagalan prematur akibat pemilihan material yang tidak tepat dapat jauh melampaui perkiraan awal perancang.

- Perubahan sifat mekanik: Jurnal 5 membuktikan bahwa paparan suhu tinggi mengubah mikrostruktur material (pearlite → ferrite) yang menurunkan kekerasan dan kekuatan material secara permanen. Perubahan ini tidak terlihat dari luar tanpa pengujian khusus.
- Kegagalan sistem berantai (cascading failure): Dalam industri yang beroperasi kontinyu (continuous process), kegagalan satu segmen pipa dapat menghentikan seluruh lini produksi, bukan hanya segmen yang bocor.

- **Risiko Ekonomi**

Dampak ekonomi dari kegagalan pipa jauh lebih besar dari yang sering diperhitungkan. Komponen biaya yang perlu dipertimbangkan meliputi:

- Biaya langsung: penggantian segmen pipa yang gagal, biaya peralatan inspeksi (UT), biaya tenaga kerja perbaikan, dan biaya penggantian material yang terbuang.
- Biaya tidak langsung (loss of production): Ketika produksi terhenti akibat kebocoran pipa, biaya kerugian per jam bisa sangat besar, terutama di industri yang beroperasi 24/7 seperti PLTD dan industri migas.
- Biaya regulasi dan hukum: Kebocoran crude oil atau bahan kimia berbahaya dapat memicu tuntutan hukum dan denda dari regulator lingkungan yang jumlahnya bisa sangat besar.
- Reputasi perusahaan: Insiden kegagalan pipa berulang dapat merusak reputasi perusahaan di mata investor, klien, dan masyarakat.

- **Risiko Keselamatan dan Lingkungan**

Dari semua risiko, risiko keselamatan adalah yang paling serius dan tidak bisa dikompromikan:

- Bahaya kebakaran dan ledakan: Kebocoran pipa yang mengalirkan bahan bakar diesel (Jurnal 2) atau crude oil (Jurnal 4) di dekat sumber panas dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan yang mengancam jiwa para pekerja.
- Toksisitas: Dalam industri kimia, kebocoran bahan korosif atau beracun ke lingkungan kerja dapat menyebabkan keracunan akut atau kronis bagi pekerja.
- Pencemaran lingkungan: Kebocoran crude oil atau bahan kimia industri ke tanah dan perairan dapat merusak ekosistem setempat. Jurnal 4 secara eksplisit menyebutkan kerugian dari sisi pencemaran lingkungan sebagai salah satu dampak dari kegagalan pipa yang terjadi.
- Kepatuhan regulasi: Indonesia memiliki berbagai regulasi terkait Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) serta perlindungan lingkungan (KLHK) yang mengharuskan perusahaan menjaga integritas sistem perpipaan mereka. Kegagalan dalam memenuhi regulasi ini dapat berujung pada pencabutan izin operasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian terhadap kelima jurnal ilmiah yang dianalisis, berikut adalah kesimpulan utama yang dapat ditarik:

- Carbon steel masih mendominasi penggunaan material pipa di industri Indonesia dan dunia, terutama karena faktor biaya awal yang rendah dan kemudahan fabrikasi. Namun, material ini secara fundamental memiliki ketahanan korosi yang terbatas dalam kondisi lingkungan agresif

seperti yang ditemukan dalam semua studi yang dikaji.

- Kegagalan pipa yang terdokumentasi dalam kelima jurnal terjadi jauh lebih cepat dari design life yang direncanakan, mengindikasikan bahwa pendekatan pemilihan material yang hanya mempertimbangkan biaya awal tanpa life cycle cost analysis terbukti tidak efisien dan berisiko tinggi.
- Material alternatif seperti Stainless Steel 316L, Duplex SS 2205, dan Alloy Steel Cr-Mo menawarkan ketahanan korosi dan mekanik yang jauh lebih baik untuk kondisi operasi yang telah terdokumentasi dalam jurnal-jurnal tersebut, meskipun dengan biaya awal yang lebih tinggi.
- Pendekatan hybrid yang menggabungkan carbon steel dengan sistem coating canggih (3LPE, epoxy fusion-bonded) dan program inspeksi berbasis risiko (RBI - Risk Based Inspection) dapat menjadi solusi kompromis yang realistis, terutama untuk infrastruktur yang sudah terpasang.
- Jurnal 1 (Velasco et al., 2025) memberikan framework yang paling komprehensif untuk pemilihan material dan perlindungan korosi, dan dapat dijadikan referensi utama untuk pengembangan standar dan praktik terbaik di industri Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

Ariyanto, N. P., Siregar, A. P., Widiastuti, H., Rossbandrio, W., Fajrin, A., & Nugroho, C. B. (2022). Pengujian kekerasan dan struktur mikro sambungan low-carbon steel dan austenitic stainless steel. Jurnal Teknologi dan Riset Terapan (JATRA), 4(1), 40–44. https://jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JATRA

Faidah, A. H., & Takwanto, A. (2026). Analisis Pengaruh Sugar Content dalam Injeksi Out terhadap Laju Korosi pada Perpipaan Sistem Cooling Tower di Industri Gula Indonesia. Distilat: Jurnal Teknologi Separasi, 12(1), 141–150. https://doi.org/10.33795/distilat.v12i1.7923

Maulana, M. F. (2023). Analisa Kegagalan Pipa ASTM A179 pada Ruang Bakar Boiler. Jurnal Multidisiplin Indonesia, 2(9), 2553–2569.

Pratama, A. Z., Pattikayhattu, E. B., & Effendy, E. (2024). Analisis Perubahan Ketebalan Pipa Akibat Pengaruh Korosi dan Sisa Umur Pakai Pipa di PLTD Namlea Kabupaten Buru. Journal Mechanical Engineering (JME), 2(1), 48–63.

Putra, A. R., Syafrullah, M. D., Yuliansyah, Tolusha, M. R., & Mahendra, N. Y. (2025). Investigation of factors causing cracks in primary air tube boilers (case study). Austenit, 17(1), 23–29. https://doi.org/10.53893/austenit.v17i1.10318

Santoso, T., Adrian, R., Fazaul M, R., & Cahyono, R. B. (2025). Analisis Risiko Penyebab Kegagalan Pipa Penyalur Crude Oil. Teknik: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer, 5(1), 09–19. https://doi.org/10.55606/teknik.v5i1.5732

Setyani, A., Hermawan, M. A. J. S., Prabowo, I., & Amin, N. (2025). Investigasi korosi pipa flowline carbon steel pada sistem produksi migas dan penerapan solusi protektif. J- ENSISTEC (Journal of Engineering and Sustainable Technology), 11(2), 10207–10215. https://doi.org/10.31949/j-ensitec.v11i02.13508

Velasco, D. C. R., Goncalves, V. P. D., Oliveira, M. P., Simonassi, N. T., Lopes, F. P. D., & Vieira, C. M. F. (2025). Industrial Piping System: Design and Corrosion Protection. Surfaces, 8(1), 18. https://doi.org/10.3390/surfaces8010018