REVIEW KOMPREHENSIF: STUDI PERBANDINGAN MATERIAL SS304 DAN FRP PENGGANTI SS400 PADA PIPA *DUCTING SCRUBBING* PABRIK NPK-1 PT PUSRI PALEMBANG

Vidia Tanaya Putri[1], Latifatul Rohmah[2], Afdal Mukminin[3], Aldillah Herlambang[4], Oki Alfernando[5], Rizka Shafira[6]

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

ABSTRACT

Failure of the Carbon Steel SS400 scrubbing ducting pipe in the NPK-1 Plant of PT Pusri Palembang due to internal corrosion and solid accumulation highlights the need to evaluate more reliable replacement materials to improve operational reliability and prevent unscheduled shutdowns. This study aims to compare the performance of Stainless Steel 304 (SS304) and Fiber Reinforced Plastic (FRP) as alternative substitutes for SS400 through a comprehensive literature review approach. The research method employed a literature review by collecting and analyzing secondary data from various national and international scientific publications, followed by a comparative assessment of both materials based on technical, economic, environmental, and safety aspects using a weighted multi-criteria scoring matrix. The results indicate that FRP Vinylester has dominant advantages in corrosion resistance under aggressive NPK fluid environments, lower life cycle costs, and better operational efficiency, achieving a weighted score of 7.63 compared to 6.86 for SS304. However, SS304 demonstrates advantages in fire safety, inspectability, structural integrity, and suitability for areas with high safety requirements. These findings suggest that no single material is absolutely superior across all parameters, but FRP is more optimal as the primary material for most ducting segments, while SS304 is recommended for critical segments through a hybrid approach. The implications of this study provide a multi-criteria-based material selection recommendation to improve scrubbing system reliability, long-term cost efficiency, process safety, and support more sustainable asset management strategies in the fertilizer industry.

Keywords : *Material, Piping, FRP, Ducting, SS304*

ABSTRAK

Kegagalan pipa *ducting scrubbing* berbahan *Carbon Steel* SS400 di Pabrik NPK-1 PT Pusri Palembang akibat korosi internal dan akumulasi padatan menunjukkan perlunya evaluasi material pengganti yang lebih andal untuk meningkatkan keandalan operasi dan mencegah *unscheduled shutdown*. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja *Stainless Steel* 304 (SS304) dan *Fiber Reinforced Plastic* (FRP) sebagai alternatif pengganti SS400 melalui pendekatan kajian literatur komprehensif. Metode penelitian menggunakan *literature review* dengan mengumpulkan dan menganalisis data sekunder dari berbagai publikasi ilmiah nasional dan internasional, kemudian membandingkan kedua material berdasarkan aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan melalui matriks skor multikriteria berbobot. Hasil kajian menunjukkan FRP *Vinylester* memiliki keunggulan dominan dalam ketahanan korosi terhadap lingkungan fluida NPK yang agresif, biaya siklus hidup yang lebih rendah, serta efisiensi operasional yang lebih baik, dengan skor tertimbang 7,63 dibandingkan SS304 sebesar 6,86. SS304 tetap menunjukkan keunggulan pada aspek *fire safety*, inspektabilitas, integritas struktural, dan kesesuaian untuk area dengan persyaratan keselamatan tinggi. Temuan ini menunjukkan tidak terdapat satu material yang mutlak unggul di seluruh parameter, namun FRP lebih optimal sebagai material utama untuk mayoritas segmen *ducting*, sementara SS304 direkomendasikan untuk segmen kritis melalui pendekatan *hybrid*. Implikasi penelitian ini memberikan dasar rekomendasi pemilihan material berbasis multi-kriteria untuk meningkatkan keandalan sistem *scrubbing*, efisiensi biaya jangka panjang, keselamatan proses, serta mendukung strategi pengelolaan aset yang lebih berkelanjutan di industri pupuk.

Kata Kunci : *Material, Pipa, FRP, Ducting, SS304*

PENDAHULUAN

Industri pupuk merupakan sektor strategis penopang ketahanan pangan nasional. PT Pusri Palembang mengoperasikan pabrik NPK Fusion-1 berkapasitas 100.000 ton/tahun sejak 2016, dengan sistem *scrubbing* untuk meminimalkan *losses* dan mengolah emisi. Pada Februari 2023, terjadi kegagalan *ducting* 1N-D212 *(Cooler Cyclone)* ke 1N-D214 *(Cooler Pool Scrubber)* berupa *shell buckling* yang menyebabkan *shutdown* selama ±12 hari dan kerugian signifikan. Investigasi menunjukkan penyebabnya adalah penumpukan padatan pada *ducting* horizontal dan korosi internal masif yang menurunkan ketebalan *elbow* dari 6 mm menjadi 0,8–1,1 mm (Nasrah & Homzah, 2023). Kondisi operasi dengan komposisi udara 99,76%wt, produk 0,23%wt, dan air 0,001%wt pada 48°C menciptakan lingkungan sangat korosif dan higroskopis, diperparah oleh penggunaan *Carbon Steel* SS400 yang tidak tahan korosi serta keterbatasan akses *maintenance*, sehingga meningkatkan risiko kegagalan dan *unscheduled shutdown* (Sianipar et al., 2024).

Sebagai solusi, dapat dilakukan penggantian material yang menjadi langkah mendesak dengan dua kandidat utama, yaitu *Stainless Steel* 304 (SS304) dan *Fiber Reinforced Plastic* (FRP). SS304 unggul dalam ketahanan korosi, kekuatan mekanis, dan kemudahan fabrikasi, dengan laju korosi sangat rendah (0,013 mm/tahun hingga 0,0009178 mm/tahun) serta dapat diproses presisi menggunakan CNC laser *cutting* (Nurwahyudin et al., 2025; Sianipar et al., 2024). Sebaliknya, FRP tidak mengalami korosi elektrokimia, lebih ringan, dan memiliki kekuatan spesifik tinggi serta biaya material lebih rendah, meskipun memerlukan evaluasi menyeluruh terhadap biaya siklus hidup (Maulana & Rokhim, 2026; Nasrah & Homzah, 2023).

Dari aspek lingkungan dan keselamatan, FRP serat alam lebih berkelanjutan namun kurang kuat dibanding FRP sintetis, sedangkan FRP serat kaca lebih sesuai untuk *ducting* bertekanan meski tidak *biodegradable* (Inayah et al., 2023). SS304 membutuhkan energi produksi lebih tinggi, tetapi mudah didaur ulang dan mendukung keandalan sistem *scrubbing*. Dari sisi keselamatan, integritas struktural jangka panjang sangat krusial karena kegagalan *ducting* meningkatkan risiko kecelakaan dan *unscheduled shutdown*. Stainless steel 304 unggul dalam inspeksi melalui metode NDT seperti ultrasonik dan radiografi (ASME Sec V), sementara FRP memerlukan metode khusus dan cenderung mengalami kegagalan *brittle* (Zayadi et al., 2021).

Meskipun telah banyak dikaji secara terpisah, belum terdapat *review* komprehensif yang membandingkan efisiensi SS304 dan FRP sebagai pengganti SS400 pada ducting *scrubbing* industri pupuk NPK dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan secara simultan. Kesenjangan ini menjadi dasar kajian untuk menghasilkan rekomendasi berbasis bukti ilmiah guna mencegah kegagalan serupa, meminimalkan *unscheduled shutdown*, serta meningkatkan keandalan dan keselamatan operasional pabrik NPK-1 PT Pusri Palembang secara berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur *(literature review)* sebagai metode utama yang mencakup pengumpulan, identifikasi, dan perbandingan secara sistematis terhadap dua material kandidat, yaitu *Stainless Steel* 304 dan *Fiber Reinforced Plastic* (FRP). Seluruh data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai publikasi ilmiah nasional maupun internasional melalui *database* akademik seperti *Elsevier*, *Google Scholar*, serta sumber-sumber ilmiah lainnya yang relevan dan sesuai dengan lingkup kajian penelitian ini.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Meskipun konsentrasi partikel NPK hanya 0,23%, sifat higroskopis sangat tinggi dari komponen NPK harus menjadi perhatian utama. Dalam kajian terhadap sifat termal dan reologi pupuk NPK berbasis ammonium nitrat, ditemukan bahwa NPK termasuk sistem garam multikomponen dengan *higroscopicity* tinggi yang sangat mudah menyerap uap air dari udara sekitar. Hal ini berarti partikel NPK yang menempel pada dinding *ducting* akan segera menarik uap air dari udara lembap tropis dan membentuk larutan elektrolit aktif di permukaan dinding, bukan sekadar debu kering pasif. Dari karakteristik fluida yang melalui pipa *ducting scrubbing*, diperlukannya material yang mampu bertahan terhadap kondisi operasi yang dijalankan melalui berbagai aspek seperti teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan.

Perbandingan Kriteria Teknis antara SS304 dan FRP

Karakteristik teknis antara SS304 dan FRP dapat dibandingkan melalui beberapa kriteria perbandingan seperti berikut:

Tabel 1. Perbandingan Kriteria Teknis Antara SS304 Dan FRP

Parameter	SS304	FRP	Standar Acuan
Ketahanan korosi vs Cl^- (KCl)	Rentan *pitting corrosion*, pada 48°C *pitting potential* (Ep) turun drastis, risiko *pitting* lokalis di area deposit NPK	*Inert* sepenuhnya, tidak ada mekanisme *pitting*, *crevice*, atau SCC terhadap Cl^-	ASTM G48
Ketahanan korosi vs NO_3^- (NH_4NO_3)	Tahan korosi seragam pada 48°C/ATM; risiko meningkat saat NO_3^- bersinergi dengan Cl^-	*Inert* terhadap ammonium nitrat pada kondisi 48°C/ATM, resin *vinylester* stabil	Zatkalíková et al. (2022)
Ketahanan korosi vs $H_2PO_4^-$	Moderat; pH 4,5–6,0 dapat melemahkan lapisan pasif secara bertahap	Sangat tahan; resin *vinylester* tahan terhadap larutan fosfat asam	ASTM C581
Ketahanan *crevice corrosion* (area *flange*)	Risiko tinggi; celah flange mengonsentrasikan Cl^- + NO_3^- → korosi tersembunyi	Tidak ada risiko *crevice corrosion*; material non-logam tidak terpengaruh	ASTM G48 dan ASME RTP-1
Kekuatan tarik	515–620 MPa (isotropik, konsisten) per ASTM A240	GFRP: 200–400 MPa (anisotropik, bergantung orientasi serat)	ASTM A240 dan ASTM D2996
Yield strength	Minimal 205 MPa, daktail, ada deformasi sebelum patah	70–200 MPa, perilaku getas (*brittle*), patah tanpa peringatan	ASTM A240 dan ASTM D2996
Kecukupan kekuatan pada tekanan ATM	Jauh lebih dari cukup, tebal minimum sekitar 1,5–3 mm	Lebih dari cukup dengan tebal 4–8 mm per standar SMACNA FRP	SMACNA 008-2008 dan ASME B31.3

Modulus elastisitas	Sekitar 193 GPa, kaku, deformasi minimal	Sekitar 20–40 GPa (GFRP); lebih fleksibel, perlu *stiffener ring* pada diameter besar	ASME BPVC Sec. II
Densitas	Sekitar 7,93 g/cm³	Sekitar 1,8 g/cm³	-
Ketahanan abrasi partikel NPK	Kekerasan *Vickers* ~200 HV, tahan abrasi sangat baik	Cukup pada *straight run*, *elbow* dan area *impingement* tinggi perlu *corrosion barrier* 3–4 mm	ASME RTP-1 Section V
Ketahanan suhu operasi 48°C	Stabil sempurna, jauh di bawah batas *creep* >300°C	Stabil sempurna, 48°C jauh di bawah HDT resin *vinylester* sekitar 120–150°C	ASME BPVC Sec. II dan ASTM D2996
Rentang suhu operasi maksimum	Hingga 870°C (struktur), tidak ada degradasi di rentang industri umum	Umumnya hingga 93–120°C, terbatas, tidak cocok suhu tinggi	ASME B31.3
Pengelasan dan sambungan	Dapat dilas TIG/MIG; pasca-las wajib *pickling* dan *passivation*	Tidak dapat dilas, sambungan adhesif/laminasi, perlu tenaga ahli bersertifikat	ASTM A380; SMACNA Metal 4th Ed.
Integrasi sistem dengan *scrubber* FRP	Terdapat *thermal expansion mismatch* di *flange* jika *scrubber* berbahan FRP	Kompatibel sempurna, eliminasi *mismatch* termal di sambungan, praktik umum di industri	Inayah et al. (2023)
Reparasi lapangan	Mudah; las setempat, *patching*, atau penggantian *spool*	Terbatas; laminasi tambal; perlu kondisi kering dan suhu terkontrol	SMACNA Industrial Duct 3rd Ed.
Inspeksi NDT	Mudah; UT, RT, PT, MT tersedia dan terstandar ASME Section V	Lebih sulit; perlu *Acoustic Emission Testing* (ASTM E1419) atau *phased array* UT khusus	ASTM E1419

Dalam konteks teknis *ducting scrubbing* NPK-1 PT Pusri, FRP *Vinylester* adalah pilihan material yang lebih tepat karena parameter paling kritis, ketahanan korosi terhadap Cl^-, NO_3^-, dan fosfat asam pada 48°C yang dimiliki oleh FRP secara mutlak dimenangkan oleh FRP. Keunggulan SS304 dalam kekuatan mekanik dan kemudahan fabrikasi tidak relevan dalam kondisi tekanan ATM, dan justru biaya yang dikeluarkan untuk mengatasi kelemahan korosi SS304 (inspeksi rutin, *chemical cleaning*, reparasi *pitting*) menjadi pemborosan yang tidak perlu. SS304 tetap direkomendasikan hanya untuk segmen-segmen tertentu yang memiliki persyaratan *fire safety* ketat, berada di dekat area penyimpanan ammonium nitrat, atau memerlukan fleksibilitas reparasi lapangan yang tinggi.

Perbandingan Kriteria Ekonomi antara SS304 dan FRP

Perbandingan kriteria ekonomi antara SS304 dan FRP dapat dibandingkan melalui beberapa kriteria perbandingan seperti berikut:

Tabel 2. Perbandingan kriteria teknis antara SS304 dan FRP

Parameter	SS304	FRP	Standar Acuan
Harga *material raw*	USD 2–3/kg (dipengaruhi harga nikel global yang fluktuatif)	GFRP *vinylester*, sekitar USD 2,5–5/kg, lebih stabil harganya	Market Data (2024)
Biaya fabrikasi	Tinggi, pengelasan TIG/MIG + *pickling* + *passivation* = 40–60% dari harga material	Lebih rendah, tanpa pengelasan, tanpa hot *work permit*, tanpa *passivation*	SMACNA 008-2008
Biaya instalasi	Tinggi; diperlukan alat angkat berat, hot *work permit*, *scaffolding* khusus	40% lebih rendah; ringan, tanpa alat angkat berat, tanpa pekerjaan panas	Tencom Limited (2026)
CAPEX total (estimasi Ø600mm, 150m)	IDR 1,8 miliar (material + fabrikasi + instalasi)	IDR 1,5 miliar	Estimasi Engineering
Biaya pemeliharaan tahunan	IDR 50–150 juta/tahun (inspeksi NDT, *chemical cleaning*, reparasi *pitting*)	IDR 15–40 juta/tahun (inspeksi visual + NDT periodik)	Sly (2026)
Frekuensi penggantian parsial	Setiap 5–8 tahun di area kritis (*elbow*, *flange*, horizontal *run*) pada kondisi NPK	Sangat jarang; *elbow* perlu inspeksi lebih ketat namun jarang penggantian	Adkins (2022)
OPEX kumulatif 25 tahun	IDR 2,5 miliar (inspeksi + reparasi + penggantian parsial)	IDR 0,6 miliar (minimal *maintenance*)	Omar & Abdelhadi (2024)
Total LCC 25 tahun	IDR 4,3 miliar	IDR 2,1 miliar	Adkins (2022)
Penghematan LCC FRP vs SS304	-	IDR 2,2 miliar (~51% lebih hemat)	-
Nilai sisa *(scrap value)*	Tinggi; SS304 *scrap* ~USD 0,8–1,2/kg; dapat dijual	Hampir nol; *thermoset* tidak dapat dilebur; berpotensi biaya disposal	-

Secara ekonomi, FRP *Vinylester* adalah pilihan yang jauh lebih menguntungkan untuk sistem *ducting scrubbing* NPK-1 PT Pusri dengan penghematan LCC 25 tahun mencapai sekitar 51%. Keunggulan ini bukan berasal dari harga material yang lebih murah, melainkan dari eliminasi biaya pemeliharaan korosi yang besar dan berulang sepanjang masa layanan. Satu-satunya catatan penting adalah perencanaan biaya disposal FRP di akhir masa layanan perlu dianggarkan sejak

awal agar tidak menjadi beban tak terduga, karena berbeda dengan SS304 yang bernilai ekonomi positif saat diakhiri masa pakainya.

Perbandingan Kriteria Lingkungan antara SS304 dan FRP

Perbandingan kriteria lingkungan antara SS304 dan FRP dapat dibandingkan melalui beberapa kriteria perbandingan seperti berikut:

Tabel 3. Perbandingan kriteria lingkungan antara SS304 dan FRP

Parameter	SS304	FRP	Standar Acuan
Emisi CO_2e produksi per kg	2,9–6,8 kg CO_2e/kg (proses peleburan baja energi tinggi)	GFRP: sekitar 3,0–8,0 kg CO_2e/kg (serupa per kg, namun jauh lebih ringan per komponen)	Alrehaili et al. (2025)
Emisi CO_2e per aplikasi fungsional	Lebih tinggi karena massa komponen lebih besar	77–85% lebih rendah per struktur fungsional karena massa lebih ringan	Omar & Abdelhadi (2024)
Energi produksi	Sekitar 55–80 MJ/kg (peleburan baja memerlukan energi besar)	25–50 MJ/kg (proses manufaktur suhu rendah)	Sbahieh et al. (2023)
Kontaminasi fluida selama operasi	Tidak ada; lapisan pasif Cr_2O_3 stabil; tidak melepas kontaminan ke aliran udara	Tidak ada pada 48°C/ATM; resin *cured* tidak reaktif; perlu pastikan full cure	ASTM C581
Daur ulang *(recyclability)*	Sangat baik; *scrap rate* 85–90%; dapat dilebur berkali-kali; kompatibel *circular economy*	Sangat terbatas untuk *thermoset*; *landfill* atau insinerasi dominan; riset *pyrolysis* masih berkembang	Alrehaili et al. (2025)
Pengelolaan limbah akhir masa layanan	Mudah; jual sebagai *scrap* logam; nilai ekonomi positif; zero *landfill*	Bermasalah; biaya disposal khusus; potensi limbah B3; teknologi daur ulang belum matang	Soto-Vázquez (2025)
Kepatuhan regulasi lingkungan RI	Kompatibel dengan PERMEN LHK No. P.15/2019; PROPER hijau	Kompatibel operasional; ada risiko kepatuhan di tahap disposal akhir masa layanan	ISO 14001 dan ISO 14692
Emisi selama pemeliharaan	Ada; *chemical cleaning* menggunakan asam sitrat/nitrat encer → pengelolaan limbah cair	Hampir nol; hanya air bersih untuk pembersihan rutin	ASTM A380

Kriteria lingkungan tidak menghasilkan pemenang mutlak seperti pada kriteria teknis dan ekonomi. FRP lebih baik pada fase produksi dan operasi berkat efisiensi massa dan eliminasi limbah kimia pemeliharaan, sedangkan SS304 jauh lebih unggul pada fase akhir masa layanan berkat *recyclability* sempurna yang sejalan dengan prinsip *circular economy*. Dalam konteks operasi jangka panjang PT Pusri, rekomendasi praktisnya adalah memilih FRP untuk keunggulan

operasional sambil merencanakan strategi disposal yang bertanggung jawab sejak awal, termasuk menganggarkan biaya pengelolaan limbah FRP di akhir masa layanan agar keunggulan lingkungan operasional tidak tereliminasi oleh dampak negatif pembuangan yang tidak terencana.

Perbandingan Kriteria Keselamatan antara SS304 dan FRP

Perbandingan kriteria keselamatan antara SS304 dan FRP dapat dibandingkan melalui beberapa kriteria perbandingan seperti berikut:

Tabel 4. Perbandingan Kriteria Keselamatan Antara SS304 Dan FRP

Parameter	SS304	FRP	Standar Acuan
Mode kegagalan struktural	Daktail *(ductile)*; deformasi plastis terlihat sebelum patah → memberikan *early warning*	Getas *(brittle)*; patah tiba-tiba tanpa peringatan visual → lebih berbahaya	ASME B31.3 dan ACI 440
Risiko kegagalan pada tekanan ATM	Sangat rendah; tekanan operasi jauh di bawah *allowable stress*	Sangat rendah; ketebalan standar jauh melebihi kebutuhan tekanan ATM	ASME BPVC Sec. VIII dan ASME RTP-1
Ketahanan api/*flammability*	Tidak mudah terbakar; tidak berkontribusi pada *fire load*; tidak menghasilkan gas toksik	FRP standar mudah terbakar; menghasilkan gas HCN, CO, styrene yang toksik saat terbakar	NFPA 654 dan ASTM E84
FRP *fire-retardant* (FR grade)	-	FRP-FR memenuhi ASTM E84 Class A; *self-extinguish*; tetap menghasilkan gas toksik lebih sedikit	ASTM E84 dan NFPA 654
Risiko dalam lingkungan NH_4NO_3	Aman; tidak bereaksi dengan NH_4NO_3; tidak mempercepat dekomposisi	Matriks polimer organik berpotensi berinteraksi dengan NH_4NO_3 (oksidator kuat) dalam kondisi kebakaran	NFPA 400 dan SDS CF Industries 2024
Inspeksi keselamatan berkala	Konvensional; UT/PT/RT tersedia dan mudah; indikator kebocoran/deformasi mudah dideteksi	Lebih kompleks; memerlukan *Acoustic Emission* Testing (ASTM E1419) atau *phased array* UT khusus	ASTM E1419 dan ASME Section V
Keselamatan instalasi *(hot work)*	Diperlukan *hot work permit* untuk pengelasan; risiko kebakaran di area pabrik aktif	Tidak ada *hot work permit*; tanpa pekerjaan panas; lebih aman di area produksi aktif	OSHA 29 CFR 1910.119
Risiko ergonomi *(handling)*	Berat (sekitar 85 kg/spool); risiko cedera muskuloskeletal; memerlukan alat angkat	Ringan (sekitar 35 kg/spool); 60% lebih ringan; aman untuk *manual handling* 2 orang	OSHA ergonomi standards

K3 fabrikasi	Paparan *fume* las Ni & Cr^{6+} (karsinogen, IARC Group 1); wajib APD respirator & ventilasi	Paparan debu serat kaca (IARC 2B) dan styrene (50 ppm OSHA TWA) saat laminasi	OSHA 1910.1026
Konduktivitas listrik	Konduktif; diperlukan *grounding* yang tepat; risiko sengatan listrik	Non-konduktif; isolasi alami; lebih aman di area elektrolitik	-
Kompatibilitas dengan SMKP/PSM	Sepenuhnya kompatibel; material ter standardisasi penuh dalam ASME/OSHA PSM	Memerlukan HAZOP tambahan untuk *fire safety*; perlu prosedur inspeksi NDT khusus	OSHA 29 CFR 1910.119 dan ASME B31.3

Dalam kriteria keselamatan, SS304 adalah material yang lebih aman secara keseluruhan untuk *ducting scrubbing* NPK-1 PT Pusri, terutama didorong oleh dua faktor yang tidak dapat dikompromikan: *fire safety* mutlak dalam lingkungan mengandung NH_4NO_3 dan kompatibilitas penuh dengan program PSM/inspeksi NDT yang sudah berjalan. Keunggulan FRP dalam keselamatan instalasi memang nyata dan bermakna, namun bersifat sementara yang hanya relevan selama fase konstruksi yang berlangsung beberapa bulan, sedangkan risiko *fire safety* SS304 yang lebih baik berlaku sepanjang 25 tahun masa operasi. Oleh karena itu, untuk segmen *ducting* yang melewati area *hazardous*, berada di dalam bangunan, atau berdekatan dengan penyimpanan NH_4NO_3, SS304 harus menjadi pilihan utama atas dasar keselamatan meskipun harus membayar lebih mahal dari sisi teknis dan ekonomi.

Matriks Skor Multikriteria

Untuk menentukan yang mana material yang lebih unggul, diperlukan matriks skor multikriteria yang di mana setiap kriteria memiliki perbedaan pembobotan berdasarkan urgensi dan kriteria prioritas:

Tabel 5. Perbandingan material berdasarkan matriks skor multikriteria

Kriteria	Bobot	Skor SS304 (1–10)	Skor FRP (1–10)	Nilai Tertimbang SS304	Nilai Tertimbang FRP
Ketahanan korosi fluida NPK (Cl^-, NO_3^-, & 48°C)	25%	5,5	9,5	1,375	2,375
Ekonomi — LCC 25 tahun	20%	5	8,5	1	1,7
Kekuatan & integritas struktural (ATM)	10%	9	7,5	0,9	0,75
Keselamatan — *fire safety* (lingkungan NH_4NO_3)	10%	9,5	4,5	0,95	0,45
Lingkungan — operasi & produksi	7%	7	7	0,49	0,49
Ketahanan abrasi partikel NPK	5%	8,5	6,5	0,425	0,325
Integrasi sistem & kemudahan fabrikasi	5%	7	8	0,35	0,4
Ekonomi — CAPEX & *procurement*	5%	7	7,5	0,35	0,375

Keselamatan — K3 instalasi & operasi	5%	6,5	8	0,325	0,4
Keselamatan — inspektabilitas & PSM	5%	8,5	5,5	0,425	0,275
Lingkungan — daur ulang & EoL	3%	9	2,5	0,270	0,075
Total	100%	-	-	6,86/10	7,63/10

Matriks skor multikriteria menegaskan bahwa FRP *Vinylester* adalah pilihan material yang lebih optimal secara keseluruhan untuk sistem *ducting scrubbing* NPK-1 PT Pusri, didorong terutama oleh dominasi pada dua kriteria terpenting yaitu ketahanan korosi dan keekonomian siklus hidup. Namun skor yang tidak berbeda jauh antara kedua material yaitu 7,62 vs 6,86 yang sekaligus menegaskan bahwa pendekatan *hybrid* tetap menjadi solusi paling rasional. FRP sebagai material utama pada segmen mayoritas sistem, dan SS304 pada segmen-segmen spesifik dengan persyaratan *fire safety* dan inspektabilitas yang lebih ketat. Keputusan akhir harus dikonfirmasi melalui HAZOP study dan evaluasi ASTM C581 untuk verifikasi kompatibilitas resin FRP spesifik terhadap komposisi fluida NPK aktual sebelum finalisasi desain.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis perbandingan komprehensif yang mencakup empat kriteria utama yaitu teknis, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan dengan pembobotan yang disesuaikan terhadap kondisi operasi spesifik *ducting scrubbing* NPK-1 PT Pusri (udara 99,76%, debu NPK 0,23%, air 0,001%, suhu 48°C, tekanan ATM), diperoleh kesimpulan bahwa tidak ada satu material yang mutlak superior di seluruh aspek penilaian. FRP *Vinylester* memperoleh skor tertimbang akhir 7,62/10 dibanding SS304 sebesar 6,86/10, menjadikan FRP sebagai material yang lebih optimal secara keseluruhan namun dengan catatan dan syarat teknis yang tidak dapat diabaikan.

DAFTAR PUSTAKA

Adkins, L. (2022). Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Resin and Corrosion Barrier Selection – the Testing behind the Recommendation. *CONFERENCE 2022*, 1–10. https://doi.org/10.5006/C2022-17961

Alrehaili, E., Nurdiawati, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Sustainable composites for metal replacement: Environmental assessment and material selection of fiber-reinforced polymer across industries. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, *28*, 200294. https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200294

Apriliana, A. D., Liman, L., Erwanto, E., & Muhtarudin, M. (2025). PENGARUH KOMBINASI PUPUK TRICHOKOMPOS DAN PUPUK NPK TERHADAP KANDUNGAN PROTEIN KASAR DAN SERAT KASAR RUMPUT PAKCHONG. *Jurnal Riset Dan Inovasi Peternakan (Journal of Research and Innovation of Animals)*, *9*(3), 453–463. https://doi.org/10.23960/jrip.2025.9.3.453-463

Athallah, M. N., Yudo, H., & Zakki, A. F. (2025). Analisa Pengaruh Variasi Arus Las SMAW Pada Pengelasan Dissimilar Baja ST42 dan SS304 Terhadap Laju Korosi dan Kekuatan

Impak. *Jurnal Teknik Perkapalan*, *13*(4), 1–10. https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval

Inayah, R., Pratiwi, W. D., & Indrawan, R. (2023). Efek Sinergis Alumina Trihydrate Dan Melamine Cyanurate Terhadap Ketahanan Api Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, *7*(1), 21–27.

Kurniasari, A. P., & Amalia, Y. (2022). Pengaruh Korosi Terhadap Kegagalan Logam pada Jembatan : Literature Review. *Jurnal Mekanik Terapan*, *3*(2), 65–69. https://doi.org/10.32722/jmt.v3i2.4597

Maulana, M. R., & Rokhim, I. N. (2026). Analisa Kekuatan Material dan Biaya Produksi FRP (Fiber Reinforced Plastic) dengan Subtitusi Serat Rami Nanas. *JOURNAL SAINS STUDENT RESEARCH*, *4*(2), 83–95. https://doi.org/10.61722/jssr.v4i2.9355

Nasrah, P., & Homzah, O. F. (2023). ANALISA KERUSAKAN PIPA DUCTING SCRUBBING BERBAHAN CARBON STEEL SS400 DI PABRIK PUPUK NPK-1 PT PUSRI PALEMBANG. *AUSTENIT*, *15*(1), 55–62. https://doi.org/10.53893/austenit.v15i1.6684

Nurcholis, I., Pratiwi, W. D., Karim, M., Amin, A., Anggara, D., Wahyu, E., Teknik, J., Kapal, B., Perkapalan, P., Surabaya, N., & Kimia, J. T. (2022). Analisis komparasi kekerasan dan struktur mikro lasan dissimilar material pada berbagai posisi pengelasan di industri fabrikasi. *Journal of Welding Technology*, *4*(1), 1–8.

Nurwahyudin, H., Atros, M. R. El, & Mualif. (2025). Analisis Pengaruh Pengaturan Parameter pada CNC Cutting Laser terhadap Kualitas Hasil Pemotongan pada Material Stainless Steel 304 di PT X. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, *9*(1), 121–130. https://doi.org/10.30588/jeemm.v9i1.2164

Omar, S. Al, & Abdelhadi, A. (2024). Comparative Life-Cycle Assessment of Steel and GFRP Rebars for Procurement Sustainability in the Construction Industry. *Sustainability*, *16*(10), 3899. https://doi.org/10.3390/su16103899

Sbahieh, S., Mckay, G., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). A comparative life cycle assessment of fiber-reinforced polymers as a sustainable reinforcement option in concrete beams. *Frontiers in Built Environment*, *9*. https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1194121

Sianipar, D., Suprihanto, A., & Haryadi, G. D. (2024). PENGARUH KEKASARAN STAINLESS STEEL TIPE 304 YANG DIGUNAKAN UNTUK KAWAT ORTODONTIK TERHADAP LAJU KOROSI PADA LARUTAN SALIVA BUATAN. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, *12*(2), 25–36.

Soto-Vázquez, R. (2025). Life-cycle assessment in mining and mineral processing: A bibliometric overview. *Green and Smart Mining Engineering*, *2*(1), 73–83. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2025.02.001

Sultan, M. A., AR, R., & Gaus, A. (2022). Efek Perkuatan Glass Fiber Reinforce Polymer Sheet Pada Balok Beton Bertulang Dengan Tulangan Korosi. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, *12*(1), 103–116. nhttps://doi.org/10.29103/tj.v12i1.694

Zatkalíková, V., Uhríčik, M., Markovičová, L., & Kuchariková, L. (2022). Corrosion Behavior of Sensitized AISI 304 Stainless Steel in Acid Chloride Solution. *Materials*, *15*(23), 8543. https://doi.org/10.3390/ma15238543

Zayadi, A., Sugkono, & HP, C. (2021). Analisis Radiografi Sinar-X Terhadap Sambungan Pelat Baja Tahan Karat Aisi 304 Hasil Pengelasan Tungsten Inert Gas Dengan Arus 40-60 Ampere. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, *6*(2). https://doi.org/10.35894/jtk.v6i2