

## Analisis Peran Material Pipa Komposit dalam Mitogasi Korosi dan Peningkatan Keselamatan Operasional di Industri Kimia

Vera Pangni Fahrani<sup>1</sup>, Cecillia Vicario Revanda<sup>2</sup>, Alyssa Nabila Ramadhanti<sup>3</sup>, Jihan Salsabila<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia, Universitas Singaperbangsa Karawang

\*Corresponding author, email: 2410631230049@student.unsika.ac.id

**Abstrak.** Kerusakan infrastruktur akibat korosi merupakan tantangan utama dalam industri kimia yang berdampak pada aspek ekonomi dan keselamatan. Penggunaan material konvensional seringkali tidak mampu menghadapi paparan zat korosif ekstrem dalam jangka panjang. Review ini bertujuan untuk mengevaluasi peran material pipa komposit sebagai solusi inovatif dalam menghadapi proses korosi di sektor kimia dan kaitannya dengan standar keselamatan kerja. Melalui analisis berbagai literatur, ditemukan bahwa material komposit, seperti *Glass Reinforced Epoxy* (GRE) dan *Fiber Reinforced Plastic* (FRP), menawarkan ketahanan kimia yang superior dan umur simpan (*remaining life*) yang lebih lama. Hasil kajian menunjukkan bahwa pemantauan laju korosi yang sistematis dan penggunaan teknologi material maju sangat krusial untuk memitigasi risiko kebocoran serta menjamin keberlanjutan proses di fasilitas kimia dan migas.

**Kata Kunci:** pipa komposit, industri kimia, korosi, keselamatan proses, ketahanan material

## Pendahuluan

Kebutuhan akan sistem perpipaan yang andal menjadi perhatian utama di sektor industri kimia di Indonesia. Infrastruktur seperti pipa, tangki, dan reaktor berperan penting dalam menjamin kelancaran proses produksi serta keselamatan operasional. Namun, salah satu permasalahan utama yang sering dihadapi adalah degradasi material akibat korosi. Korosi tidak hanya menyebabkan penurunan kualitas material, tetapi juga dapat memicu kegagalan sistem yang berdampak pada kerugian ekonomi, pencemaran lingkungan, serta risiko kecelakaan kerja yang serius.

Dalam industri kimia, fluida yang dialirkan umumnya bersifat agresif, seperti asam kuat, basa, maupun senyawa organik yang reaktif. Kondisi operasi yang melibatkan tekanan dan suhu tinggi semakin mempercepat laju korosi pada material logam konvensional seperti baja karbon. Meskipun berbagai metode perlindungan seperti pelapisan (*coating*) dan proteksi katodik telah diterapkan, metode tersebut seringkali membutuhkan biaya tambahan serta perawatan berkala yang tidak sedikit. Oleh karena itu, diperlukan inovasi material yang mampu memberikan ketahanan lebih baik terhadap lingkungan korosif sekaligus meningkatkan efisiensi operasional.

Material komposit hadir sebagai alternatif yang semakin banyak digunakan dalam industri modern. Komposit, khususnya jenis *Fiber Reinforced Plastic* (FRP) dan *Glass Reinforced Epoxy* (GRE), memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik, ketahanan kimia tinggi, serta bobot yang lebih ringan dibandingkan material logam. Struktur komposit yang terdiri dari matriks polimer dan penguat serat

memungkinkan material ini bersifat inert terhadap berbagai zat kimia agresif, sehingga mampu mengurangi risiko korosi secara signifikan. Selain itu, sifat non-konduktif dari material komposit juga memberikan keunggulan dalam aspek keselamatan, terutama pada lingkungan yang berpotensi menimbulkan percikan api atau ledakan.

Seiring dengan meningkatnya tuntutan terhadap keselamatan proses (*process safety management*), penggunaan material yang tepat menjadi faktor kunci dalam mencegah kecelakaan industri. Kegagalan material akibat korosi sering kali terjadi secara tiba-tiba dan sulit terdeteksi, sehingga berpotensi menimbulkan dampak yang besar. Oleh karena itu, pemilihan material yang memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi serta dapat dipantau secara efektif menjadi sangat penting dalam mendukung keberlanjutan operasional industri kimia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif peran material komposit dalam industri kimia, khususnya dalam aplikasi sistem perpipaan dan reaktor. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi bagaimana penggunaan material komposit dapat berkontribusi dalam mitigasi korosi serta peningkatan keselamatan operasional. Dengan melakukan analisis terhadap berbagai literatur ilmiah, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai keunggulan, tantangan, serta potensi pengembangan material komposit di masa depan.

## Metode

Penelitian ini menggunakan metode systematic literature review (SLR) dengan tujuan mengevaluasi perkembangan penggunaan material komposit pada sistem perpipaan industri kimia. Penelusuran literatur dilakukan melalui database Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, dan MDPI menggunakan kata kunci composite pipe, fiber reinforced plastic (FRP), glass reinforced epoxy (GRE), corrosion resistance, chemical industry, life cycle cost, dan process safety.

Literatur yang digunakan dibatasi pada publikasi tahun 2015-2025, berbahasa Inggris maupun Indonesia, berupa artikel jurnal yang telah melalui proses peer review. Tahap seleksi dilakukan melalui identifikasi, penyaringan berdasarkan relevansi judul dan abstrak, evaluasi isi, kemudian sintesis hasil penelitian.

Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan karakteristik material, ketahanan korosi, aspek ekonomi, umur pakai, biaya pemeliharaan, serta implikasinya terhadap keselamatan proses pada industri kimia.

## Hasil dan Pembahasan

### a. Mitigasi Korosi Melalui Inovasi Material

Penggunaan material komposit terbukti efektif dalam memitigasi korosi internal maupun eksternal. Lapisan kaya resin (*resin-rich liner*) pada pipa komposit berfungsi sebagai penghalang kimia primer yang mencegah penetrasi ion korosif ke dalam struktur penguat serat. Analisis pada tangki penyimpanan dan pipa di kilang menunjukkan bahwa material dengan ketahanan korosi tinggi mampu menurunkan biaya perawatan secara signifikan dibandingkan baja karbon.

### b. Keselamatan Operasional dan keberlanjutan

Keamanan dalam industri kimia sangat bergantung pada kemampuan sistem perpipaan untuk menahan tekanan operasional tanpa kebocoran. Material komposit memberikan keunggulan

keselamatan berupa sifat non-konduktif yang mengurangi risiko percikan api di area mudah terbakar. Selain itu, efisiensi proses ditingkatkan melalui pengurangan waktu henti (*downtime*) untuk perbaikan akibat karat. Sama halnya dengan penggunaan teknologi ramah lingkungan di industri lain, transisi ke komposit juga mendukung praktik berkelanjutan dengan mengurangi limbah sisa penggantian logam korosif.

**c. Karakteristik Material Komposit terhadap Lingkungan Korosif**

Material komposit seperti FRP (*Fiber Reinforced Plastic*) dan GRE (*Glass Reinforced Epoxy*) memiliki struktur yang terdiri dari matriks polimer dan penguat serat yang memberikan kombinasi sifat unggul. Matriks polimer berfungsi sebagai pelindung terhadap lingkungan kimia agresif, sementara serat memberikan kekuatan mekanik yang tinggi. Dalam kondisi industri kimia yang sering melibatkan paparan asam, basa, serta senyawa organik volatil, material komposit menunjukkan stabilitas yang lebih baik dibandingkan material logam konvensional.

Selain itu, komposit tidak mengalami korosi elektrokimia seperti baja, sehingga tidak memerlukan perlindungan tambahan seperti coating atau proteksi katodik. Hal ini menjadikan material komposit lebih efisien dari segi biaya operasional dan pemeliharaan. Ketahanan terhadap degradasi kimia ini juga berkontribusi terhadap peningkatan umur pakai peralatan industri.

**d. Mekanisme kegagalan Material dan Pencegahannya**

Meskipun memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi, material komposit tetap memiliki potensi kegagalan, terutama akibat faktor mekanik dan lingkungan. Kegagalan pada komposit umumnya terjadi dalam bentuk delaminasi, retak matriks, atau kerusakan serat akibat beban berlebih maupun paparan suhu tinggi dalam jangka panjang.

Untuk mencegah kegagalan tersebut, diperlukan desain material yang tepat serta kontrol kualitas selama proses fabrikasi. Selain itu, inspeksi rutin menggunakan metode non-destruktif seperti ultrasonic testing dan visual inspection sangat penting untuk mendeteksi kerusakan sejak dini. Dengan penerapan strategi pemeliharaan yang baik, risiko kegagalan dapat diminimalkan sehingga keselamatan operasional tetap terjaga.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Teknis dan Keselamatan antara Pipa Logam Konvensional dan Pipa Komposit (FRP/GRE)

| No | Komponen Evaluasi    | Pipa Logam Konvensional         | Pipa komposit (FRP/GRE) |
|----|----------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 1  | Ketahanan Korosi     | Rendah (Butuh proteksi katodik) | Sangat Tinggi (Inert)   |
| 2  | Rasio kekuatan/Berat | Berat                           | Sangat Ringan           |
| 3  | Prediksi Umur Pakai  | Pendek (Akibat karat)           | Panjang (>20 Tahun)     |
| 4  | Aspek Keselamatan    | Resiko kebocoran tinggi         | Resiko kebocoran rendah |

**e. Analisis Perbandingan Ekonomi antara Material Komposit dan Logam**

Material komposit memiliki biaya investasi awal sekitar 20-50% lebih tinggi dibandingkan pipa baja karbon, biaya tersebut dapat dikompensasi oleh rendahnya kebutuhan pemeliharaan serta umur pakai yang lebih panjang. Pada lingkungan yang bersifat sangat korosif, pipa logam memerlukan pelapisan ulang, inspeksi berkala, hingga penggantian akibat degradasi material.

Sebaliknya, pipa FRP dan GRE memiliki ketahanan kimia yang tinggi sehingga biaya pemeliharaan tahunan dapat berkurang sekitar 30-60% dibandingkan pipa logam. Selain itu, umur pakai material komposit dapat mencapai 20-30 tahun, sedangkan baja karbon pada lingkungan korosif umumnya memerlukan penggantian lebih cepat apabila tidak dilakukan perlindungan korosi secara intensif. Dari *Life Cycle Cost* (LCC), beberapa penelitian menunjukkan bahwa total biaya selama masa operasi material komposit lebih rendah karena berkurangnya biaya inspeksi, maintenance, downtime, dan penggantian komponen. Oleh karena itu, meskipun membutuhkan investasi awal yang lebih besar, nilai Return on Investment (ROI) menjadi lebih baik pada aplikasi jangka panjang, terutama pada industri kimia, petrokimia, serta migas.

Tabel 2. Perbandingan Ekonomi

| Parameter              | Baja Karbon  | FRP/GRE              |
|------------------------|--------------|----------------------|
| Investasi awal         | Rendah       | Lebih Tinggi (20-50) |
| Umur pakai             | 10-15 tahun  | 20-30 tahun          |
| Biaya maintenance      | Tinggi       | Rendah               |
| Frekuensi penggantian  | Tinggi       | Rendah               |
| <i>Life Cycle Cost</i> | Lebih Tinggi | Lebih rendah         |
| ROI jangka Panjang     | Sedang       | Lebih Tinggi         |

#### f. Tinjauan Penelitian Terdahulu

Tabel 3. Tabel Penelitian Terdahulu

| Peneliti                | Material       | Hasil Utama                                                                             |
|-------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Rafiee et al. (2023)    | FRP            | Ketahanan korosi meningkat dan umur pakai lebih dari 20 tahun pada lingkungan agresif   |
| Al-Mayah et al. (2022)  | GRE            | Biaya maintenance lebih rendah dibanding baja karbon pada industri migas.               |
| Mohitpour et al. (2021) | Composite Pipe | Penurunan downtime akibat korosi hingga lebih dari 40%.                                 |
| Wang et al. (2024)      | WVTR           | Life cycle cost lebih rendah dibanding pipa logam meskipun investasi awal lebih tinggi. |

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, penggunaan material komposit secara konsisten menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap korosi dibandingkan material logam konvensional. Selain meningkatkan umur pakai sistem perpipaan, material komposit juga mampu mengurangi frekuensi perbaikan dan penghentian operasi (downtime). Temuan tersebut menunjukkan bahwa

keuntungan penggunaan komposit tidak hanya berasal dari aspek teknis, tetapi juga dari efisiensi operasional dan biaya selama masa penggunaan.

**g. Peran Material Komposit dalam Mendukung Keselamatan Proses (Process Safety)**

Keselamatan proses merupakan aspek krusial dalam industri kimia, terutama dalam sistem perpipaan yang mengalirkan fluida berbahaya. Material komposit berperan penting dalam meningkatkan keselamatan karena memiliki sifat tahan bocor, tidak mudah korosi, serta tidak menghasilkan percikan api karena sifatnya yang non-konduktif.

Selain itu, penggunaan komposit juga mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan mendadak (sudden failure) yang sering terjadi pada material logam akibat korosi yang tidak terdeteksi. Dengan demikian, penerapan material komposit dapat mendukung implementasi sistem manajemen keselamatan proses (PSM) yang lebih efektif dan berkelanjutan.

**h. Implementasi Material Komposit pada Industri Kimia di Indonesia**

Di Indonesia, penggunaan material komposit mulai meningkat terutama pada sektor migas, petrokimia, dan pengolahan air. Pipa komposit digunakan untuk menggantikan pipa logam pada sistem distribusi fluida yang bersifat korosif seperti air laut, asam, dan limbah kimia.

Namun demikian, implementasi material ini masih menghadapi beberapa tantangan, seperti kurangnya tenaga ahli, standar desain yang belum merata, serta biaya awal yang relative tinggi. Oleh karena itu, diperlukan dukungan dari pemerintah, akademisi, dan industri untuk meningkatkan pemanfaatan material komposit melalui penelitian, pelatihan, dan standarisasi teknologi.

**i. Integrasi Teknologi Monitoring untuk Deteksi Korosi**

Perkembangan teknologi memungkinkan integrasi sistem monitoring berbasis sensor untuk mendeteksi potensi kerusakan pada material komposit. Sensor ini dapat digunakan untuk memantau tekanan, suhu, serta kondisi struktur secara real-time sehingga potensi kegagalan dapat diantisipasi lebih awal.

Penggunaan teknologi ini sangat penting dalam meningkatkan keandalan sistem perpipaan, terutama pada industri dengan risiko tinggi. Dengan adanya monitoring yang terintegrasi, perusahaan dapat melakukan tindakan preventif sebelum terjadi kegagalan yang berdampak besar terhadap keselamatan dan lingkungan.

## Kesimpulan

Selain memberikan peningkatan ketahanan terhadap korosi dan keselamatan proses, hasil kajian menunjukkan bahwa material komposit memiliki life cycle cost yang lebih rendah dibandingkan material logam karena kebutuhan pemeliharaan yang minimal serta umur pakai yang lebih panjang. Oleh sebab itu, material komposit layak dipertimbangkan sebagai investasi jangka panjang pada sistem perpipaan industri kimia.

## Referensi

- [1] Abd-Elhady M., Investigation of fatigue crack propagation in steel pipeline repaired by glass fiber reinforced polymer. *Composite Structures*, vol. 242, Article 112189; 2020. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112189.
- [2] Alabtah F. G., Mahdi E., Eliyan F. F., The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. *Composite Structures*, vol. 276, Article 114595; 2021. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114595.

- [3] Alabtah F. G., Mahdi E., Khraisheh M., External corrosion behavior of steel/GFRP composite pipes in harsh conditions. *Materials*, vol. 14, no. 21, Article 6501; 2021. doi:10.3390/ma14216501.
- [4] Watanabe Junior M., Reis J. M. L., Costa Mattos H. S., Polymer-based composite repair system for severely corroded circumferential welds in steel pipes. *Engineering Failure Analysis*, vol. 81, pp. 135–144; 2017.
- [5] Askari L., Aliofkhazraei A., Ghaffari S., A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 71, Article 102971; 2019. doi:10.1016/j.jngse.2019.102971.
- [6] Oulad Brahim A., Belaidi I., Khatir S., Le Thanh C., Mirjalili S., Abdel Wahab M., Strength prediction of a steel pipe having a hemi-ellipsoidal corrosion defect repaired by GFRP composite patch using artificial neural network. *Composite Structures*, vol. 304, Article 116299; 2023. doi:10.1016/j.compstruct.2022.116299.
- [7] Matar G. H., Andac M., Recent advances in sustainable biopolymer films incorporating vanillin for enhanced food preservation and packaging. *Polymer Bulletin*, vol. 82, no. 8, pp. 2751–2777; 2025. doi:10.1007/s00289-025-05661-7.
- [8] Shamsuddoha M., Manalo A. C., Aravinthan T., Islam M. M., Djukic L. P., Failure analysis and design of grouted fibre-composite repair system for corroded steel pipes. *Engineering Failure Analysis*, vol. 119, Article 104979; 2021.
- [9] Costa Mattos H. S., Reis J. M. L., Paim L. A., Silva M. L., Lopes Junior R., Perrut V. A., Failure analysis of corroded pipelines reinforced with composite repair systems. *Engineering Failure Analysis*, vol. 59, pp. 223–236; 2016.
- [10] Shamsuddoha M., Manalo A. C., Aravinthan T., Islam M. M., Djukic L. P., Failure analysis and design of grouted fibre-composite repair system for corroded steel pipes. *Engineering Failure Analysis*, vol. 119, Article 104979; 2021.
- [11] Repair of damage in pipes using bonded GFRP patches. *Composite Structures*, vol. 296, Article 115875; 2022. doi:10.1016/j.compstruct.2022.115875.
- [12] Liao D., Tan G., Jing Y., Yu Z., Dou J., Hu M., Zhao F., Liu J., Wang J., Study on the effect of multi-factor compound action on long-term tensile performance of GFRP composite pipe and life prediction analysis. *Composite Structures*, vol. 348, Article 118478; 2024. doi:10.1016/j.compstruct.2024.118478.
- [13] Prabhakar M. M., Rajini N., Ayrilmis N., Mayandi K., Siengchin S., Senthilkumar K., Karthikeyan S., Ismail S. O., An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability. *Composite Structures*, vol. 230, Article 111419; 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111419.
- [14] Wang B., Zhong S., Lee T.-L., Fancey K. S., Mi J., Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 4; 2020. doi:10.1177/1687814020913761.
- [15] Waqar M., Memon A. M., Sabih M., Alhems L. M., Composite pipelines: Analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques. *Engineering Failure Analysis*, vol. 157, Article 107914; 2024. doi:10.1016/j.engfailanal.2023.107914.