

# Mekanisme Korosi dan Perlindungannya dengan Lapisan Berbasis Polimer: Review

A.R. Arrosyid<sup>1</sup>, S. Siswosukarto<sup>1\*</sup>, A.F. Setiawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

\*Corresponding author: suprpto.siswosukarto@ugm.ac.id

## INTISARI

Korosi pada baja merupakan masalah yang krusial karena dapat mengganggu integritas dan keamanan infrastruktur. Korosi atmosferik, sebagai bentuk korosi yang umum terjadi, sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, serta keberadaan ion agresif seperti klorida dan sulfur dioksida. Proses korosi ini berlangsung dalam beberapa tahap, mulai dari pembentukan lapisan oksida hingga terbentuknya produk korosi akhir. Untuk mengurangi laju korosi, pelapisan permukaan logam dengan bahan polimer seperti *epoxy*, *alkyd*, dan *polyurethane* menjadi salah satu metode yang efektif. Pelapis ini bekerja sebagai penghalang fisik yang membatasi kontak antara logam dan agen korosif. Paper ini membahas proses terjadinya korosi atmosferik, faktor-faktor yang memengaruhinya, serta mekanisme pelindung dari pelapis berbasis polimer.

**Kata kunci:** Korosi, *Epoxy*, *Alkyd*, *Polyurethane*.

## 1 PENDAHULUAN

Korosi merupakan salah satu tantangan utama dalam penggunaan logam, terutama baja, di bidang teknik sipil. Proses korosi menyebabkan terbentuknya karat, yang dapat menurunkan kekuatan, daya tahan, dan umur pakai material logam. Dampaknya dapat mengancam keselamatan dan stabilitas struktur, sehingga diperlukan perhatian khusus dalam upaya pemeliharannya (Di Sarno dkk., 2021). Korosi atmosferik dapat dipercepat dengan keberadaan kelembapan, suhu yang tinggi, waktu basah (*time of wettness*), dan polusi pada udara sekitar (Ul-Hamid dkk., 2017). Proses terjadinya korosi atmosferik dapat berlangsung dalam tiga tahap, yaitu tahap awal (pembentukan lapisan oksida), tahap menengah (reaksi dengan zat agresif atmosferik), dan tahap akhir (pembentukan produk korosi) (Leygraf dkk., 2016).

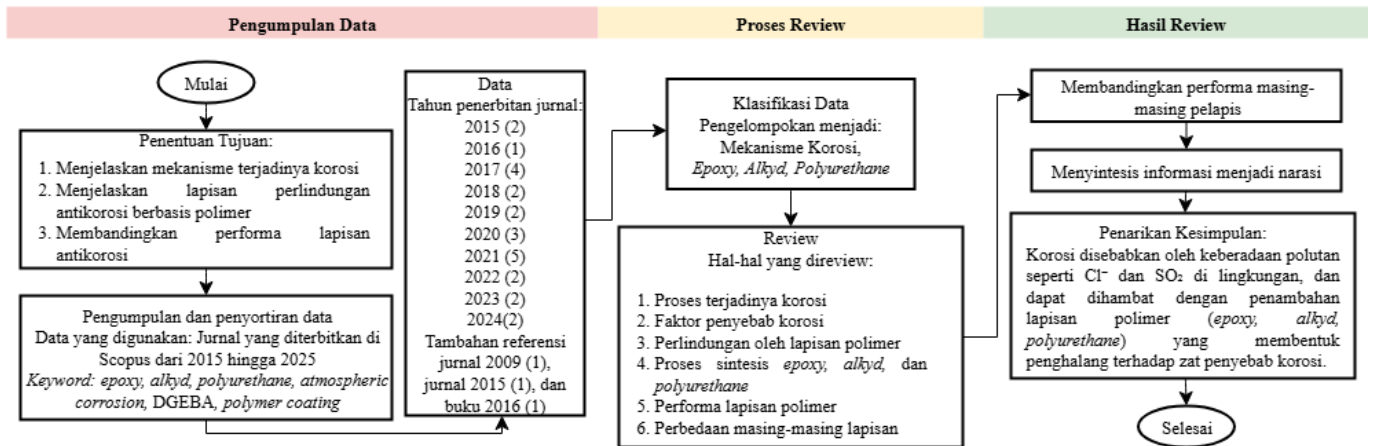
Upaya untuk menghambat proses korosi dapat dilakukan dengan menambahkan inhibitor, lapisan antikorosi, dan penggunaan proteksi elektrokimia. Di antara ketiga upaya tersebut, penggunaan lapisan antikorosi lebih banyak digunakan (da Silva dkk., 2020). Lapisan antikorosi berperan sebagai penghalang (*barrier*) bagi faktor penyebab korosi untuk mencapai substrat baja (Deyab dkk., 2017). Lapisan dengan bahan polimer banyak digunakan karena kemampuannya untuk mempertahankan pasivitas di permukaan lapisan, dan dapat membentuk lapisan *interface* antara metal dan *coating* (Namsheer dan Rout, 2021).

Paper ini akan membahas mengenai bagaimana mekanisme korosi terjadi, serta bagaimana peran lapisan perlindungan korosi berbasis polimer, terutama *epoxy*, *alkyd*, dan *polyurethane* dalam mencegah korosi. Penulisan paper ini dilakukan berdasarkan banyaknya studi terkait korosi dan pelapis polimer, tetapi kajian komprehensif yang membandingkan *epoxy*, *alkyd*, dan *polyurethane* masih terbatas. Oleh karena itu, penulisan paper ini disusun berdasarkan kajian literatur untuk membahas mekanisme korosi dan peran masing-masing pelapis. Proses review dalam paper ini disajikan melalui bagan alir yang ditampilkan pada Gambar 1.

## 2 KOROSI

Korosi atmosferik merupakan proses terbentuknya karat disebabkan oleh pengaruh lingkungan sekitar. Suhu, kelembapan, dan polutan lingkungan, seperti SO<sub>2</sub> dan Cl<sup>-</sup>, memengaruhi korosi atmosferik pada baja secara signifikan (Di Sarno dkk., 2021). Faktor-faktor seperti *dissolved oxygen*, pH, salinitas, temperatur, dan tekanan memiliki efek pada korosi bahan di lingkungan pesisir (Zhu dkk., 2020). Pada lingkungan pesisir, korosi dapat terjadi lebih cepat akibat salinitas tinggi karena kehadiran aerosol yang berada pada lingkungan pesisir, yang kaya akan ion Cl<sup>-</sup> (Alcántara dkk., 2017). Lingkungan dengan atmosfer industrial mengandung unsur korosif berupa SO<sub>2</sub> yang sebagian

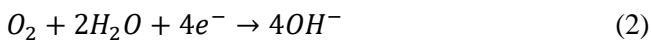
besar berasal dari pembakaran batu bara, minyak, dan bensin. Laju korosi yang terjadi pada lingkungan laut dan industri dapat terjadi beberapa kali lipat lebih cepat (Ul-Hamid dkk., 2017).



Gambar 1 Langkah Review.

### 2.1 Mekanisme Korosi

Korosi dapat terjadi akibat proses elektrokimia yang terjadi karena reaksi anodik (oksidasi) dan katodik (reduksi). Elektron dari reaksi ini akan bereaksi dengan oksigen yang larut dalam lapisan *aqueous*. Ion hidroksida kemudian berpindah pada area anodik membentuk *ferrous hydroxide* (Fe(OH)<sub>2</sub>) sebagai produk korosi awal (Alcántara dkk., 2017). Proses terjadinya korosi atmosferik dapat dibagi menjadi tiga tahap (Leygraf dkk., 2016).



#### 2.1.1 Tahap Awal (*Initial Stage*)

Tahap awal korosi terjadi ketika larutan bersentuhan dengan ion logam di daerah anodik pada permukaan baja. Elektron kemudian bergerak menuju struktur logam ke area katodik yang kemudian bereaksi dengan air dan oksigen membentuk ion hidroksil (OH<sup>-</sup>) seperti pada Gambar 2 (kiri). Meskipun pada awalnya lapisan tipis oksida dan hidroksida yang terbentuk memberikan perlindungan sementara terhadap korosi, kelembapan yang terus mengendap bersama debu di udara dapat membentuk cairan elektrolit di atas permukaan logam (Lazorenko dkk., 2021). Ion hidroksil akan bereaksi dengan ion *ferrous* (Fe<sup>2+</sup>) di area anodik untuk membentuk *ferrous hydroxide* (Fe(OH)<sub>2</sub>) yang akan teroksidasi dengan keberadaan oksigen membentuk *hydrated ferric oxide* atau karat (Zafar dkk., 2024).

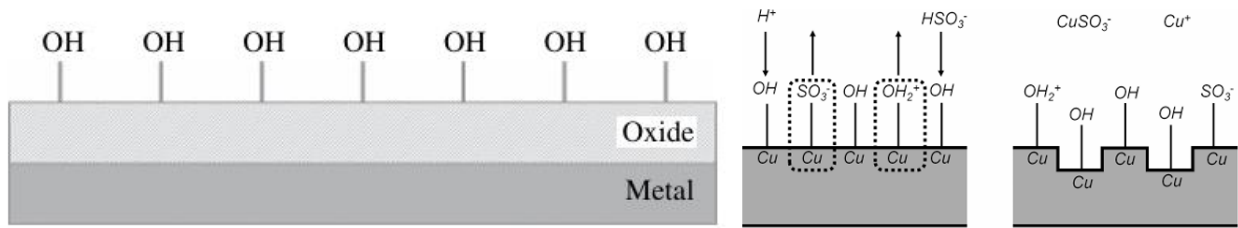
Interaksi antara logam dan udara dimulai ketika uap air langsung bereaksi dengan permukaan logam. Molekul air bisa menempel sebagai air utuh atau terpecah (terdisosiasi) menjadi bagian-bagian kecil. Pada permukaan logam, terutama yang banyak cacat atau tidak sempurna (seperti material polikristalin), air cenderung terpecah menjadi gugus hidroksil. Gugus ini kemudian menarik lebih banyak air untuk menempel, yang bisa mempercepat proses korosi.

#### 2.1.2 Tahap Menengah (*Intermediate Stage*)

Air tidak hanya berperan sebagai media reaksi elektrokimia, tetapi juga sebagai pelarut bagi unsur lain penyebab korosi di atmosfer seperti, nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), SO<sub>2</sub>, hidrogen klorida (HCl), hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), amonia (NH<sub>3</sub>), asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), oksigen (O<sub>2</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), dalam bentuk gas, serta NaCl, amonium sulfat ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>), amonium klorida (NH<sub>4</sub>Cl), dan natrium sulfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), dalam bentuk partikel. Unsur-unsur ini dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia dan elektrokimia seperti transformasi SO<sub>2</sub> menjadi asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) atau asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) atau asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dan NO<sub>2</sub> menjadi asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), yang menyebabkan turunnya pH dan meningkatnya agresivitas lapisan air.

Ion H<sup>+</sup> dan senyawa ligan dari asam, seperti bisulfat (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>) atau bisulfat (HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>), bereaksi dengan permukaan logam yang telah teroksidasi. Mereka menggantikan gugus hidroksil yang terikat pada logam, melemahkan ikatan logam-

oksida dan menyebabkan logam larut ke dalam air sebagai ion terlarut, diilustrasikan pada Gambar 2 (kanan). Proses ini dikenal sebagai disolusi logam yang dipicu oleh proton dan ligan, dan merupakan mekanisme penting dalam korosi atmosfer tahap ini.



Gambar 2. Ion Hidroksil pada Baja (kiri) dan Disolusi Substrat (kanan) (Leygraf dkk., 2016).

Di saat yang sama, ion logam yang terlarut dapat membentuk pasangan ion dengan anion yang ada di dalam larutan, membentuk kompleks yang kemudian menjadi prekursor untuk produk korosi. Beberapa reaksi bahkan dipercepat oleh sinar ultraviolet dari cahaya matahari yang memicu pembentukan radikal reaktif seperti OH<sup>-</sup> yang sangat agresif terhadap permukaan logam. Ketika konsentrasi ion-ion tersebut mencapai titik jenuh, mereka mulai mengendap sebagai produk korosi awal, biasanya dalam bentuk oksida, hidroksida, atau garam logam. Endapan ini terjadi tidak merata, karena sifat permukaan logam yang heterogen, dan sering kali diawali di area cacat mikro atau titik-titik aktif korosi.

### 2.1.3 Tahap Akhir (*Final Stage*)

Pada tahap akhir, endapan yang semula tersebar akan tumbuh dan bergabung (koalesensi), menutupi permukaan logam secara menyeluruh dan membentuk lapisan produk korosi yang lebih stabil. Lapisan ini dapat terlihat sebagai karat merah pada baja, patina hijau pada tembaga, atau korosi putih pada seng.

Ketika lapisan produk korosi telah menutupi seluruh permukaan, reaksi korosi menjadi bergantung pada seberapa baik ion dari luar bisa menembus lapisan tersebut. Ion-ion seperti H<sup>+</sup> atau Cl<sup>-</sup> masih bisa menembus lapisan yang porous atau tipis, sehingga reaksi korosi tetap berlangsung. Namun, jika lapisan tersebut cukup padat dan tidak mudah ditembus, maka ia dapat berfungsi sebagai pelindung pasif yang memperlambat atau bahkan menghentikan proses korosi.

## 2.2 Polutan

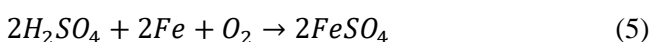
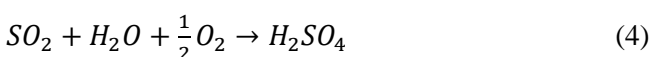
### 2.2.1 Sulfur (Alcántara dkk., 2017)

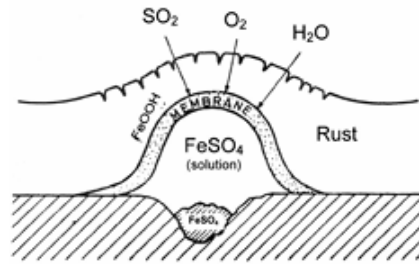
SO<sub>2</sub> sering ditemukan pada atmosfer dengan konsentrasi yang beragam bergantung pada tipe industri di sekitarnya, keberadaan pembangkit listrik, waktu dalam setahun, dll. Apabila konsentrasinya melebihi 0,1 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> akan lebih agresif terhadap baja. SO<sub>2</sub> merupakan unsur yang dapat menyebabkan depolarisasi katodik karena rentan direduksi pada logam. Dengan kandungan gas yang sangat kecil, konsentrasi dalam elektrolit dan efeknya dapat mirip dengan oksigen karena SO<sub>2</sub> sekitar 2600 kali lebih larut dalam air dibandingkan oksigen. Pada tingkat keasaman tertentu, SO<sub>2</sub> dapat berperan sebagai pengoksidasi dan menyebabkan proses katodik lebih cepat.

Air hujan dapat menyerap SO<sub>2</sub> dari atmosfer yang dapat menimbulkan terjadinya hujan asam. Pada situasi ini, terjadi reaksi katodik dari hidrogen sebagai berikut.



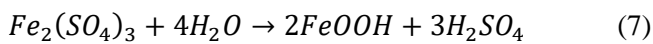
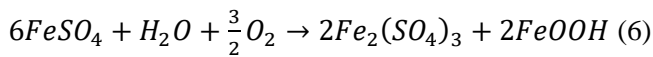
Keadaan asam atau kadar pH yang rendah dapat memperburuk proses terjadinya korosi. SO<sub>2</sub> menyebabkan pembentukan dan perambatan “sarang” sulfat, yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan dijelaskan melalui reaksi pada Persamaan (4) dan Persamaan (5). Reaksi ini muncul pada titik yang terisolasi di permukaan, tetapi jumlahnya meningkat hingga seluruh permukaan dilapisi dengan film karat.





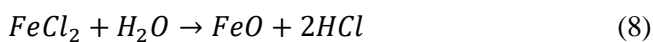
Gambar 3. Korosi oleh Sulfur (Alcántara dkk., 2017).

Hidrolisis dari *ferrous sulfate* yang terbentuk di sarang-sarang ini mengontrol penyebaran karat. Sarang-sarang ini dapat pecah akibat tekanan osmosis sehingga meningkatkan laju korosi.



### 2.2.2 Klorida (Alcántara dkk., 2017)

Ion  $Cl^-$  dari aerosol laut meningkatkan konduktivitas film elektrolit dan menurunkan stabilitas lapis pasif, sehingga laju korosi naik sebanding dengan aktivitas  $Cl^-$  (Alcántara dkk., 2015). Konsentrasi  $Cl^-$  tinggi yang terdapat di lapisan air pada permukaan logam dan retensi kelembapan yang tinggi pada area karat menyebabkan pembentukan *ferrous chloride* ( $FeCl_2$ ) yang menghidrolisis air dengan persamaan berikut.



Keberadaan HCl meningkatkan keasaman elektrolit yang dapat mempercepat proses reaksi elektrokimia pada permukaan baja. Pada kondisi asam, reaksi katodik semakin berperan dalam mempercepat pelarutan logam ( $Fe^{2+}$ ). Lepasnya logam yang memiliki ion positif lebih menarik ion  $Cl^-$  kedalam sistem untuk menyeimbangkan muatan. Keberadaan  $Cl^-$  ini justru mempercepat pelarutan besi dan menghasilkan lebih banyak  $FeCl_2$ . Mekanisme ini sering disebut dengan “*autocatalytic*”.

## 2.3 Pelapisan Antikorosi

Korosi dapat dicegah dengan beberapa cara yaitu dengan penggunaan material tahan korosi seperti baja tahan karat atau baja galvanis, penggunaan inhibitor korosi dengan zat kimia yang mengubah, pengendalian lingkungan agar faktor penyebab korosi dapat dikurangi, atau melakukan pelapisan material dengan lapisan antikorosi (Zafar dkk., 2024). Lapisan antikorosi berfungsi sebagai *barrier* fisik yang memberikan perlindungan korosi antara substrat dengan ion agresif (Deyab dkk., 2017). Meskipun *barrier* ini dapat melindungi substrat baja dari serangan faktor penyebab korosi, zat korosif seperti oksigen, air, dan ion klorida tetap dapat menembus ke permukaan substrat yang dilindungi melalui difusi. Hal ini menyebabkan performa *coating* menurun dan menghasilkan *hydrolytic degradation* sehingga terjadi hilangnya lekatan serta *blistering* pada lapisan (Haghdadeh dkk., 2018). Lapisan dengan bahan polimer banyak digunakan dalam upaya pencegahan korosi karena kemampuannya untuk mempertahankan pasivitas melalui proses anodik yang dipadukan dengan reduksi  $O_2$  di permukaan lapisan dan membentuk *metal oxide interface layer* antara metal dan *coating* (Namsheer dan Rout, 2021).

### 2.3.1 Epoxy

*Epoxy* merupakan polimer yang dapat bereaksi dengan berbagai reaktan yang biasa disebut *curative* atau *hardener*. *Epoxy* dapat melindungi baja dari korosi dengan berperan sebagai inhibitor atau sebagai pelapis permukaan. Sebagai inhibitor, *epoxy* bereaksi dengan baja dan menciptakan lapisan pelindung yang dapat mengganggu reaksi korosi, sehingga mampu memperlambat laju korosi. *Epoxy* apabila digunakan sebagai pelapis permukaan, *epoxy* yang memiliki sifat hidrofobik akan mencegah terjadinya kontak antara baja dengan zat-zat korosif dan yang mungkin terlarut dalam air, sehingga tidak terserap oleh baja (Shi dkk., 2009, Verma dkk., 2020). *Epoxy* banyak digunakan karena stabilitas kimia yang baik, penyusutan rendah, dan sifat mekanik yang relatif tinggi. Akan tetapi, *epoxy* memiliki ketahanan terhadap radiasi UV yang rendah (Lazorenko dkk., 2021).

Pelapis berbasis *epoxy* merupakan pelapis yang banyak digunakan dalam pengaplikasian pencegahan korosi (Namsheer dan Rout, 2021). Jenis *epoxy* resin yang banyak digunakan pada saat ini adalah *diglycidyl ether of bisphenol A* (DGEBA), *tetraglycidyl diamino diphenyl methane* (TGDDM), *triglycidyl p-amino phenol* (TGAP), dan *diglycidyl ether of bisphenol F* (DGEBF) (Domun dkk., 2015). DGEBA banyak digunakan karena memiliki performa mekanis dan termal yang baik, serta ketahanan kimia yang tinggi (da Silva dkk., 2020).

*Epoxy* pada lingkungan pesisir dapat melindungi baja dalam jangka panjang. Pemaparan baja dengan lapisan *epoxy* akan meningkatkan kekasaran permukaan secara bertahap pada 12 tahun pertama, kemudian kekasaran tersebut akan menurun setelah 20 tahun paparan. Lapisan *epoxy* akan mengalami penurunan ketebalan secara linier dan akhirnya kehilangan kemampuan protektifnya setelah 20 tahun, meskipun masih terdapat lapisan *epoxy* (Zhang dkk., 2018, Tianyu dkk., 2021). Selain itu, penggunaan *epoxy* pada beton bertulang yang direndam dalam air laut membantu mencegah kerusakan beton yang terjadi akibat ekspansi beton oleh produk korosi. Zat korosif yang berhasil masuk ke dalam beton dapat terhambat reaksinya dengan tulangan baja dengan adanya lapisan *epoxy*, sehingga tidak terbentuk produk korosi (Sohail dkk., 2019).

### 2.3.2 Alkyd

*Alkyd* banyak digunakan sebagai lapisan antikorosi karena memiliki ketahanan terhadap air yang baik. Namun, pelapis ini memiliki adhesi yang lebih rendah dibanding pelapis lainnya (Afshar dkk., 2023). Selain itu, *alkyd* memiliki stabilitas termal, kekakuan yang tinggi, dan kekuatan mekanik yang baik, meskipun memiliki kerapuhan dan dapat mengalami saponifikasi pada lingkungan korosif sehingga berpotensi terjadi pengelupasan (Lazorenko dkk., 2021). *Alkyd* resin termasuk dalam poliester yang disintesis dengan reaksi *polycondensation* dari minyak lemak atau asam lemak, *carboxylic acid* (*dibasic* atau *polycarboxylic*) atau *acid anhydrides*, dan *polyols* (Chiplunkar dan Pratap, 2016, Ifijen dkk., 2022). Terdapat tiga metode umum untuk menyintesis *alkyd*, yaitu *alcoholysis*, *acidolysis*, dan *fatty acid* yang masing-masing bergantung pada material awal yang digunakan (Ifijen dkk., 2022). Proses sintesis *alkyd* berdasarkan metode tersebut dijelaskan sebagai berikut (Chardon dkk., 2021).

1. Proses *alcoholysis*

*Alcoholysis* atau *monoglyceride* terjadi dalam dua tahapan. Pembentukan diawali dengan reaksi *transesterification* antara *polyol* (seperti *glycerol*) dan *triglycerides* yang menghasilkan campuran yang banyak mengandung *monoglyceride* serta sejumlah *glycerol*, *diglycerides*, dan *triglycerides* yang belum bereaksi. *Phthalic anhydride* kemudian ditambahkan dalam campuran reaksi *monoglyceride* yang kemudian akan terjadi tahap *polycondensation*.

2. Proses *acidolysis*

*Acidolysis* merupakan proses sintesis *alkyd* yang jarang digunakan karena memerlukan suhu dan waktu yang lebih dibandingkan proses *alcoholysis*. Pertama-tama, *triglycerides* direaksikan dengan *polyacids* (*isophthalic/terephthalic acid*) untuk menghasilkan produk *acidolysis* dan asam lemak. Setelah didapatkan produk *acidolysis*, dilakukan reaksi *polycondensation* antara *polyol* dan gugus *carboxylic* dari produk *acidolysis* yang menghasilkan *alkyd*.

3. Proses *fatty acid*

Penggunaan asam lemak sebagai pengganti *triglycerides* dilakukan karena asam lemak sudah mengandung gugus *carboxylic*, sehingga dapat bereaksi langsung dengan *polyol* tanpa perlu melalui tahap pencampuran seperti *alcoholysis* dan *acidolysis*. Asam lemak, *polyol*, dan *polyacid* dicampurkan bersama dan terjadi reaksi esterifikasi.

Penggunaan EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*) terhadap spesimen yang direndam dalam larutan NaCl 3% selama 20 menit (Bastos, 2025) menunjukkan *alkyd* primer memiliki nilai impedansi yang lebih tinggi dan laju perubahan nilai impedansi yang lebih lambat seiring waktu. Hal ini menunjukkan kemampuan *alkyd* dalam menahan proses elektrokimia yang dapat menyebabkan korosi terjadi. Peningkatan kemampuan *alkyd* dengan menggunakan *acrylic* yang dikombinasikan dengan *alkyd* resin (Zhao dkk., 2024) menunjukkan ketahanan penyerapan air yang baik disebabkan oleh permukaan *coating* yang lebih padat dan lebih homogen. Selain itu, lapisan permukaan *acrylic-alkyd* resin dibentuk dengan makromolekul sebagai rangka dan molekul kecil yang mengisi celah antar-makromolekul menjadikan permukaan lapisan yang terbentuk lebih halus dan padat sehingga dapat secara efektif memblokir cairan korosif. Penambahan *acrylic acid* sebanyak 6% pada *alkyd* resin memiliki struktur rantai bercabang yang lebih maksimal sehingga lapisan dapat menahan media korosif dan memiliki sifat perlindungan yang lebih baik.

### 2.3.3 Polyurethane

*Polyurethane* memiliki fleksibilitas serta ketahanan terhadap abrasi, goresan, benturan, sinar UV, dan lingkungan korosif di daerah pesisir maupun industri, sehingga material ini banyak digunakan sebagai pelapis dalam konstruksi dan industri. Namun *polyurethane* memiliki stabilitas suhu dan kekuatan mekanis yang rendah (Haghdadeh dkk., 2018, Lazorenko dkk., 2021, Afshar dkk., 2023, Ulaeto dkk., 2023). Dasar kimia dari *polyurethane* adalah penggabungan antara *polyisocyanate* atau *diisocyanate* dengan *polyol* atau *diol* yang reaksinya menciptakan ikatan *urethane* dengan penambahan *chain extender* dan bahan aditif lain. *Isocyanate* (-NCO) memengaruhi sifat mekanik dan stabilitas kimia *polyurethane* karena rantai molekulnya yang pendek, sedangkan *polyol* (-OH) menentukan sifat fleksibilitas dan elastisitas *polyurethane* karena rantai molekulnya yang panjang (Das dan Mahanwar, 2020, Zafar dkk., 2024). Sifat dari *polyurethane* sangat dipengaruhi oleh sifat *isocyanate* yang digunakan. Terdapat empat jenis *isocyanate* yang banyak digunakan yaitu *aliphatic*, *cycloaliphatic*, *aromatic*, dan *polycyclic*. Lapisan *polyurethane* dengan *aliphatic diisocyanate* memiliki stabilitas oksidatif dan ultraviolet dibandingkan dengan *aromatic diisocyanate* yang memiliki kekakuan yang lebih tinggi (Defeyt dkk., 2017, Zafar dkk., 2024).

Pengujian perendaman baja karbon 4130 dengan air laut selama 30 hari menunjukkan bahwa penambahan *polyurethane* sebagai pelapis antikorosi memberikan peningkatan sudut kontak. Hal ini membuat cairan yang mungkin menyebabkan korosi tidak mudah membasahi substrat (lebih hidrofobik), sehingga korosi tidak mudah terjadi (Tan dkk., 2019). Keunggulan *polyurethane* dibandingkan dengan lapisan polimer lainnya adalah kemampuannya untuk mencegah transmisi sinar UV pada spektrum 200-300 nm sepenuhnya dan perlahan meningkat seiring dengan peningkatan spektrum UV hingga 70% pada spektrum 400 nm (Deng dkk., 2022).

### 2.3.4 Perbandingan

Penggunaan lapisan *epoxy* memerlukan biaya awal yang lebih rendah dibandingkan dengan *polyurethane*. Namun, meskipun *epoxy* menawarkan adhesi dan hambatan elektrokimia tertinggi, material ini memerlukan pemeliharaan yang lebih sering. *Polyurethane* memerlukan biaya awal yang sedikit lebih tinggi dibandingkan material polimer lain. Akan tetapi, *polyurethane* memiliki durabilitas yang lebih baik dan interval perawatan yang lebih panjang. *Alkyd* menempati posisi paling rendah dalam hal performa teknis dan ketahanan, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi non-struktural atau dekoratif dengan kebutuhan proteksi yang ringan. Perkiraan *life cycle cost* dari *epoxy* dan *polyurethane* berturut-turut adalah 40 \$/m<sup>2</sup> dan 38 \$/m<sup>2</sup> dengan umur layan 15 tahun dan 18 tahun (Firoozi dkk., 2025). Dibandingkan dengan kedua jenis pelapis lainnya, *alkyd* memiliki biaya yang relatif lebih rendah, yakni sekitar 25% lebih murah dibandingkan pelapis *epoxy* (Hegyí dkk., 2015). Berdasarkan karakteristik dari masing-masing lapisan, keunggulan, kekurangan, rekomendasi peruntukan, dan biaya disajikan pada Tabel 1.

## 3 KESIMPULAN

Korosi adalah proses elektrokimia yang terjadi akibat interaksi logam dengan lingkungan, terutama dalam bentuk korosi atmosferik yang umum dijumpai pada struktur baja. Faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu, serta kehadiran polutan seperti ion klorida dan sulfur dioksida memainkan peran penting dalam mempercepat laju korosi. Proses ini melalui tahapan pembentukan oksida, reaksi dengan kontaminan, hingga terbentuknya lapisan produk korosi.

Pelapis berbasis polimer seperti *epoxy*, *alkyd*, dan *polyurethane* merupakan metode proteksi yang efektif terhadap korosi atmosferik. Ketiganya bekerja dengan membentuk lapisan penghalang yang mencegah penetrasi air, oksigen, dan ion-ion agresif ke permukaan logam. Namun, efektivitas masing-masing pelapis sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat aplikasi, seperti kelembapan, suhu, tingkat polusi, serta paparan sinar ultraviolet. *Epoxy* memiliki stabilitas kimia tinggi dan biaya awal yang relatif rendah, namun memerlukan frekuensi perawatan yang lebih tinggi. *Alkyd* menonjol dari sisi kemudahan aplikasi dan biaya yang ekonomis, tetapi memiliki ketahanan lingkungan yang lebih rendah. Sementara itu, *polyurethane* menunjukkan ketahanan paling baik terhadap lingkungan ekstrem serta umur layanan yang lebih panjang, meskipun biaya yang dibutuhkan lebih tinggi.

Dengan demikian, pemilihan jenis pelapis sebaiknya mempertimbangkan kebutuhan bangunan, keadaan lingkungan, serta efisiensi biaya jangka panjang agar perlindungan korosi optimal. Agar dapat menentukan lapisan dengan baik, perlu dilakukan pengujian lapangan dalam berbagai kondisi aktual untuk memperoleh data yang lebih representatif dan aplikatif. Hasil dari pengujian tersebut dapat digunakan untuk merekomendasikan jenis pelapis yang paling sesuai untuk lingkungan tertentu serta mendukung formulasi pelapis yang lebih adaptif.

Tabel 1. Perbedaan Lapisan Polimer

Lapisan	Karakteristik		Lingkungan	Peruntukan		Biaya
	Kelebihan	Kekurangan		Struktur	Lapisan	
<i>Epoxy</i>	Stabilitas kimia yang baik  Penyusutan rendah  Sifat mekanik yang relatif tinggi	Ketahanan terhadap UV rendah	Kawasan industri tertutup, seperti pabrik, gudang, atau area produksi kimia, di mana paparan sinar UV minimal	Struktur dalam ruangan rangka baja yang membutuhkan daya lekat tinggi dan ketahanan kimia.	Pelapis primer	Biaya awal yang lebih rendah (12 \$/m <sup>2</sup> ) dibandingkan dengan <i>polyurethane</i> , tetapi memerlukan frekuensi pemeliharaan yang lebih tinggi (setiap 5 tahun), sehingga <i>lifecycle cost</i> sebesar 40\$/m <sup>2</sup>
<i>Alkyd</i>	Ketahanan terhadap air tinggi  Stabilitas termal baik  Kekakuan dan kekuatan mekanik yang tinggi	Adhesi yang lebih rendah  Rapuh dan rentan terhadap saponifikasi di lingkungan korosif	Lingkungan urban atau pinggiran kota dengan tingkat kelembapan sedang, tidak terpapar langsung ke atmosfer korosif atau air laut.	Gedung perkantoran, sekolah, atau rumah susun.  Penggunaan dekoratif atau semi-struktural	Pelapis primer	Biaya awal 25% lebih rendah dibandingkan dengan <i>epoxy</i> . Namun, performa perlindungan paling rendah dibandingkan ketiga lapisan, sehingga akan memerlukan frekuensi pemeliharaan yang lebih sering.
<i>Polyurethane</i>	Fleksibilitas tinggi  Ketahanan fisik (abrasi, goresan, dan benturan) tinggi  UV yang tinggi	Stabilitas suhu rendah  Kekuatan mekanis rendah	Kawasan yang sangat terpapar cuaca, baik terhadap UV, abrasi, dan benturan.	Struktur luar ruangan, jembatan, atap baja, menara komunikasi, pagar industri, dan fasad bangunan.	Ideal sebagai lapisan akhir ( <i>top coat</i> )	Biaya awal yang tinggi (15 \$/m <sup>2</sup> ), tetapi sebanding dengan performa di lapangan (perkiraan usia 18 tahun dengan pemeliharaan setiap 6 tahun), sehingga <i>lifecycle cost</i> sebesar 38\$/m <sup>2</sup>

## REFERENSI

- Afshar, A., Jahandari, S., Rasekh, H., Rahmani, A., dan Saberian, M., 2023. Effects of Different Coatings, Primers, and Additives on Corrosion of Steel Rebars. *Polymers*, 15 (6).
- Alcántara, J., Chico, B., Díaz, I., de la Fuente, D., dan Morcillo, M., 2015. Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, 97, 74–88.
- Alcántara, J., de la Fuente, D., Chico, B., Simancas, J., Díaz, I., dan Morcillo, M., 2017. Marine atmospheric corrosion of carbon steel: A review. *Materials*.
- Bastos, A.C., 2025. Remarks on the formulation of water-borne primers and their performance assessed by EIS. *Progress in Organic Coatings*, 200.
- Chardon, F., Denis, M., Negrell, C., dan Caillol, S., 2021. Hybrid alkyds, the glowing route to reach cutting-edge properties? *Progress in Organic Coatings*.
- Chiplunkar, P.P. dan Pratap, A.P., 2016. Utilization of sunflower acid oil for synthesis of alkyd resin. *Progress in Organic Coatings*, 93, 61–67.
- Defeyt, C., Langenbacher, J., dan Rivenc, R., 2017. Polyurethane coatings used in twentieth century outdoor painted sculptures. Part I: Comparative study of various systems by means of ATR-FTIR spectroscopy. *Heritage Science*, 5 (1).
- Deng, H., Xie, F., Shi, H., Li, Y., Liu, S., dan Zhang, C., 2022. UV resistance, anticorrosion and high toughness bio-based waterborne polyurethane enabled by a Sorbitan monooleate. *Chemical Engineering Journal*, 446.
- Deyab, M.A., Mele, G., Al-Sabagh, A.M., Bloise, E., Lomonaco, D., Mazzetto, S.E., dan Clemente, C.D.S., 2017. Synthesis and characteristics of alkyd resin/M-Porphyrins nanocomposite for corrosion protection application. *Progress in Organic Coatings*, 105, 286–290.
- Domun, N., Hadavinia, H., Zhang, T., Sainsbury, T., Liaghat, G.H., dan Vahid, S., 2015. Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials-a review of the current status. *Nanoscale*.
- Firoozi, A.A., Firoozi, A.A., Oyejobi, D.O., Avudaiappan, S., dan Flores, E.S., 2025. Enhanced durability and environmental sustainability in marine infrastructure: Innovations in anti-corrosive coating technologies. *Results in Engineering*.
- Haghdadeh, P., Ghaffari, M., Ramezanzadeh, B., Bahlakeh, G., dan Saeb, M.R., 2018. The role of functionalized graphene oxide on the mechanical and anti-corrosion properties of polyurethane coating. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 86, 199–212.
- Hegy, A., Constantinescu, H., Cazan, O., dan Barbos, G., 2015. Comparative Analysis of Costs for The Corrosion Protection over The Whole Service Life of Steel Structures. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, 8 (57).
- Ifijen, I.H., Maliki, M., Odiachi, I.J., Aghedo, O.N., dan Ohiocheoya, E.B., 2022. Review on Solvents Based Alkyd Resins and Water Borne Alkyd Resins: Impacts of Modification on Their Coating Properties. *Chemistry Africa*.
- Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., dan Nazdracheva, T., 2021. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*.
- Leygraf, C., Wallinder, I.O., Tidblad, J., dan Graedel, T., 2016. *Atmospheric Corrosion*. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Namsheer, K. dan Rout, C.S., 2021. Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*.

- Di Sarno, L., Majidian, A., dan Karagiannakis, G., 2021. The effect of atmospheric corrosion on steel structures: A state-of-the-art and case-study. *Buildings*.
- Shi, X., Nguyen, T.A., Suo, Z., Liu, Y., dan Avci, R., 2009. Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating. *Surface & Coatings Technology*, 204, 237–245.
- da Silva, L.R.R., Avelino, F., Diogenes, O.B.F., Sales, V. de O.F., da Silva, K.T., Araujo, W.S., Mazzetto, S.E., dan Lomonaco, D., 2020. Development of BPA-free anticorrosive epoxy coatings from agroindustrial waste. *Progress in Organic Coatings*, 139.
- Sohail, M.G., Salih, M., Al Nuaimi, N., dan Kahraman, R., 2019. Corrosion performance of mild steel and epoxy coated rebar in concrete under simulated harsh environment. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 37 (5), 657–678.
- Tan, H., Wang, D., dan Guo, Y., 2019. Investigation of graphene effect on the anti-corrosion behaviour of polyurethane coatings in sea-water. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 66 (6), 853–860.
- Tianyu, Z., Teng, Z., Yuting, H., Sheng, Z., Binlin, M., dan Zhigang, G., 2021. Long-term atmospheric aging and corrosion of epoxy primer-coated aluminum alloy in coastal environments. *Coatings*, 11 (2), 1–23.
- Ulaeto, S.B., Ravi, R.P., Udoh, I.I., Mathew, G.M., dan Rajan, T.P.D., 2023. Polymer-Based Coating for Steel Protection, Highlighting Metal–Organic Framework as Functional Actives: A Review. *Corrosion and Materials Degradation*.
- Ul-Hamid, A., Saricimen, H., Quddus, A., Mohammed, A.I., dan Al-Hems, L.M., 2017. Corrosion study of SS304 and SS316 alloys in atmospheric, underground and seawater splash zone in the Arabian Gulf. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 52 (2), 134–140.
- Verma, C., Olasunkanmi, L.O., Akpan, E.D., Quraishi, M.A., Dagdag, O., El Gouri, M., Sherif, E.S.M., dan Ebenso, E.E., 2020. Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review. *Reactive and Functional Polymers*.
- Zafar, S., Kahraman, R., dan Shakoor, R.A., 2024. Recent developments and future prospective of polyurethane coatings for corrosion protection – a focused review. *European Polymer Journal*.
- Zhang, S., He, Y., Zhang, T., Wang, G., dan Du, X., 2018. Long-term atmospheric corrosion behavior of epoxy prime coated aluminum alloy 7075-T6 in coastal environment. *Materials*, 11 (6).
- Zhao, B., Jiao, C., He, W., Ma, Y., Sun, S., Du, W., dan Cheng, Y., 2024. Optimization of the branched structure to enhance the corrosion protection of waterborne acrylic-alkyd resins on iron-based materials. *Progress in Organic Coatings*, 194.
- Zhu, J., Li, D., Chang, W., Wang, Z., Hu, L., Zhang, Y., Wang, M., Yang, Z., Song, J., Chen, S., Zhang, L., dan Zhang, L., 2020. In situ marine exposure study on corrosion behaviors of five alloys in coastal waters of western Pacific Ocean. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (4), 8104–8116.