

Prediksi Masa Layan Beton Bertulang pada Lingkungan Klorida Menggunakan Model Laju Korosi

Alfa Reza

Alumni Program Studi Konstruksi Bangunan Gedung, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri
Manado, Sulawesi Utara

PT. Bintang Laut Persada, Tomohon, Sulawesi Utara

E-mail: rezanewc@gmail.com

Abstrak

Korosi tulangan merupakan salah satu penyebab utama penurunan kinerja struktur beton bertulang pada lingkungan yang mengandung ion klorida. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketahanan korosi mortar geopolimer berbasis metakaolin serta memprediksi masa layan struktur beton bertulang melalui integrasi hasil pengujian laboratorium dan pendekatan analitis. Metode yang digunakan adalah eksperimen accelerated corrosion menggunakan larutan NaCl 5% dan tegangan DC 12 V dengan sistem siklus basah-kering. Parameter yang dianalisis meliputi laju korosi, densitas arus korosi, serta persentase kehilangan berat tulangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mortar geopolimer dengan komposisi MK-95 memiliki performa terbaik dengan nilai laju korosi dan densitas arus korosi yang lebih rendah dibandingkan mortar normal (MN) dan MK-100. Analisis prediksi masa layan dilakukan dengan mengintegrasikan model laju korosi dan pendekatan difusi klorida berdasarkan konsep Tuutti. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa umur struktur diperkirakan sebesar 38 tahun untuk MN, 30 tahun untuk MK-100, dan mencapai 153 tahun untuk MK-95. Selain itu, analisis terhadap ketebalan selimut beton menunjukkan bahwa penggunaan mortar geopolimer memungkinkan pencapaian masa layan yang tinggi dengan ketebalan selimut yang lebih efisien dan masih berada dalam rentang standar desain. Dengan demikian, penggunaan mortar geopolimer berbasis metakaolin, khususnya pada komposisi optimum, terbukti efektif dalam meningkatkan durabilitas struktur beton bertulang pada lingkungan korosif.

Kata kunci: Beton bertulang, korosi, metakaolin, mortar geopolimer, masa layan.

Abstract

Reinforcement corrosion is one of the primary causes of performance degradation in reinforced concrete structures in environments containing chloride ions. This study aims to analyze the corrosion resistance of metakaolin-based geopolymer mortar and predict the service life of reinforced concrete structures through the integration of laboratory test results and analytical approaches. The method used was an accelerated corrosion experiment employing a 5% NaCl solution and a 12 V DC voltage with a wet-dry cycling system. The analyzed parameters include corrosion rate, corrosion current density, and the percentage of reinforcement weight loss. The results indicate that the geopolymer mortar with the MK-95 composition exhibits the best performance, with lower corrosion rates and corrosion current densities compared to normal mortar (MN) and MK-100. Service life prediction analysis was conducted by integrating a corrosion rate model and a chloride diffusion approach based on Tuutti's concept. Calculation results indicate that the estimated structural lifespan is 38 years for MN, 30 years for MK-100, and up to 153 years for MK-95. Furthermore, analysis of the concrete cover thickness indicates that the use of geopolymer mortar allows for a long service life to be achieved with a more

efficient cover thickness that remains within the standard design range. Thus, the use of metakaolin-based geopolymer mortar, particularly at the optimal composition, has proven effective in enhancing the durability of reinforced concrete structures in corrosive environments.

Keywords: Reinforced concrete, corrosion, metakaolin, geopolymer mortar, service life.

1. PENDAHULUAN

Korosi tulangan merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan kerusakan pada struktur beton bertulang, terutama pada lingkungan yang mengandung ion klorida seperti daerah pantai dan lingkungan industri. Penetrasi ion klorida ke dalam beton dapat merusak lapisan pasif pada permukaan baja sehingga memicu reaksi korosi yang menyebabkan penurunan kapasitas struktur (Bertolini, 2013).

Beton berbasis semen Portland konvensional memiliki porositas yang memungkinkan penetrasi ion klorida lebih cepat, sehingga meningkatkan risiko korosi tulangan. Selain itu, produksi semen Portland juga memberikan dampak lingkungan yang signifikan karena emisi karbon yang tinggi (Scrivener et al., 2021).

Sebagai alternatif, mortar geopolimer berbasis metakaolin dapat digunakan karena memiliki struktur mikro yang lebih padat dan permeabilitas yang lebih rendah. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa geopolimer memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi klorida dan lingkungan agresif (Provis, 2022). Metakaolin merupakan material pozzolan hasil kalsinasi kaolin yang memiliki kandungan silika dan alumina reaktif tinggi. Dalam sistem geopolimer, metakaolin berperan sebagai sumber utama pembentukan gel aluminosilikat yang memberikan struktur mikro yang lebih padat dan stabil. Penggunaan metakaolin dalam mortar geopolimer telah banyak dikaji karena kemampuannya dalam meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida serta memperbaiki sifat mekanik dan durabilitas material.

Penelitian yang menghubungkan hasil pengujian korosi dengan prediksi masa layan struktur masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketahanan korosi mortar geopolimer berbasis metakaolin serta mengembangkan pendekatan analitis untuk memprediksi masa layan struktur beton bertulang pada lingkungan klorida dengan mengintegrasikan hasil pengujian *accelerated corrosion* dan model laju korosi.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi ketahanan korosi tulangan pada mortar normal dan mortar geopolimer berbasis metakaolin. Benda uji berupa mortar berbentuk kubus berukuran 100 mm × 100 mm × 100 mm dengan tulangan baja diameter 16 mm yang ditanam di dalamnya sebagai objek pengujian korosi, panjang terekspos yakni 5 cm. Variasi mortar yang digunakan terdiri dari mortar normal (MN) serta mortar geopolimer dengan variasi kadar metakaolin, yaitu MK-95 dan MK-100. Variasi komposisi mortar dalam penelitian ini dibedakan berdasarkan proporsi bahan pengikat yang digunakan. Mortar normal (MN) menggunakan 100% semen Portland sebagai bahan pengikat. Mortar

geopolimer MK-95 terdiri dari 95% metakaolin dan 5% semen PCC sebagai bahan pengikat tambahan, sedangkan MK-100 menggunakan 100% metakaolin tanpa campuran semen. Aktivator yang digunakan pada mortar geopolimer berupa larutan alkali yang terdiri dari sodium silikat dan sodium hidroksida dengan perbandingan tertentu. Perbedaan komposisi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kadar metakaolin terhadap ketahanan korosi dan durabilitas material.

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen PCC yang diperoleh dari produk komersial, metakaolin sebagai bahan pozzolan utama, dimana metakaolin yang digunakan merupakan hasil pembakaran material kaolin pada suhu 800° Celcius selama 6 jam yang diambil dari desa Toraget, Kabupaten Minahasa serta larutan alkali berupa sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na₂SiO₃) sebagai aktivator. Agregat halus yang digunakan berupa pasir alami (Ex. Amurang, Minahasa Selatan) dengan gradasi sesuai standar. Pemilihan material ini didasarkan pada ketersediaan lokal dan relevansi penggunaannya dalam pengembangan beton geopolimer.

Pengujian korosi dilakukan menggunakan metode *accelerated corrosion* dengan media larutan NaCl 5% dan tegangan listrik DC sebesar 12 volt. Pengujian dilakukan dengan sistem siklus basah dan kering untuk mensimulasikan kondisi lingkungan korosif secara dipercepat. Laju korosi dihitung menggunakan metode kehilangan berat dengan persamaan (1):

$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (1)$$

dimana:

CR = laju korosi (g/m²·jam),

W = kehilangan berat tulangan (g),

A = luas permukaan baja (m²),

T = waktu pengujian (jam),

D = densitas baja (g/cm³),

K = konstanta konversi.

Untuk memperoleh representasi laju korosi dalam kondisi lapangan, nilai CR dikonversi ke satuan penetrasi (mm/tahun) menggunakan pendekatan berbasis densitas baja. Selanjutnya dilakukan koreksi menggunakan *acceleration factor* (AF) untuk mengakomodasi perbedaan antara kondisi laboratorium dan kondisi nyata. Berdasarkan literatur, nilai AF untuk metode *accelerated corrosion* berada pada rentang 10³ hingga 10⁶, tergantung pada kondisi pengujian (Broomfield, 2007; Bertolini et al., 2013). Dalam penelitian ini digunakan nilai konservatif $AF = 10^6$.

Prediksi masa layan struktur dilakukan dengan mengintegrasikan hasil pengujian laju korosi dengan model kehilangan penampang tulangan serta pendekatan difusi klorida menggunakan Hukum Fick untuk estimasi waktu inisiasi korosi.

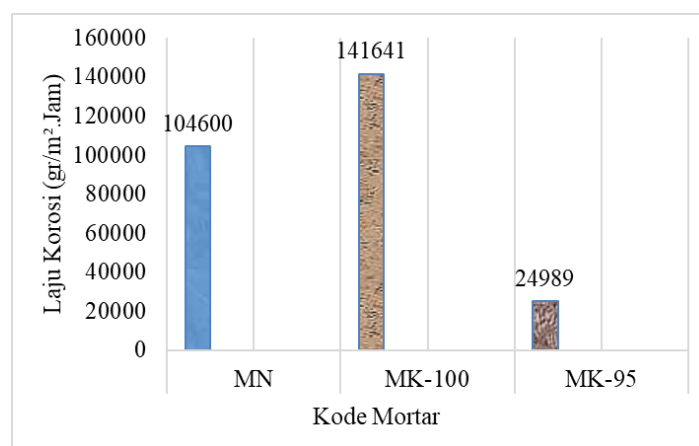
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk meningkatkan keandalan hasil, data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan nilai rata-rata dari masing-masing parameter pengujian. Meskipun

penelitian ini belum menggunakan analisis statistik inferensial secara mendalam, perbedaan nilai yang signifikan antar variasi menunjukkan tren yang konsisten dalam peningkatan performa mortar geopolimer terhadap ketahanan korosi.

3.1 Analisis Laju Korosi Tulangan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa mortar geopolimer berbasis metakaolin dengan proporsi campuran 95% metakaolin dan 5% semen PCC (MK-95) memiliki nilai laju korosi yang lebih rendah dibandingkan mortar normal (MN) dan mortar dengan 100% metakaolin (MK-100). Perbandingan ini mengindikasikan bahwa penggunaan metakaolin sebagai bahan pengikat pada proporsi tertentu mampu meningkatkan ketahanan mortar terhadap lingkungan yang mengandung ion klorida.



Gambar 1. Diagram Laju Korosi Tulangan dalam Mortar

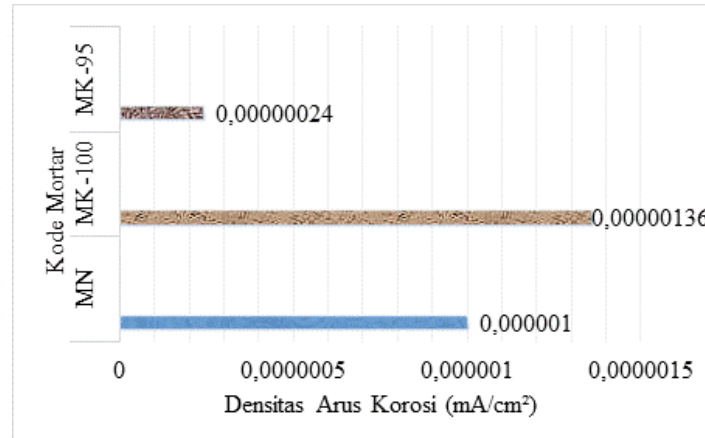
Penurunan laju korosi tersebut disebabkan oleh struktur mikro mortar geopolimer yang lebih padat sehingga menghambat difusi ion klorida menuju permukaan tulangan. Proses transport ion klorida menjadi mekanisme dominan dalam proses inisiasi korosi, sehingga penghambatan terhadap penetrasi ion tersebut secara langsung memperlambat terjadinya korosi (Zhang et al., 2023).

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa material geopolimer memiliki permeabilitas yang lebih rendah dibandingkan beton berbasis semen Portland, sehingga mampu meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia dan korosi (Provis, 2022). Selain itu, kandungan silika dan alumina yang tinggi pada metakaolin berperan dalam membentuk struktur matriks yang lebih rapat dan stabil.

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan mortar geopolimer berbasis metakaolin tidak hanya menurunkan laju korosi tetapi juga berpotensi meningkatkan durabilitas struktur beton bertulang, khususnya pada lingkungan agresif seperti daerah pantai.

3.2 Analisis Densitas Arus Korosi

Nilai densitas arus korosi merupakan indikator penting dalam menentukan tingkat aktivitas elektrokimia pada permukaan tulangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mortar geopolimer MK-95 memiliki nilai densitas arus korosi yang lebih kecil dibandingkan dengan mortar normal dan mortar geopolimer MK-100.



Gambar 2. Diagram Densitas Arus Korosi pada Tulangan dalam Mortar

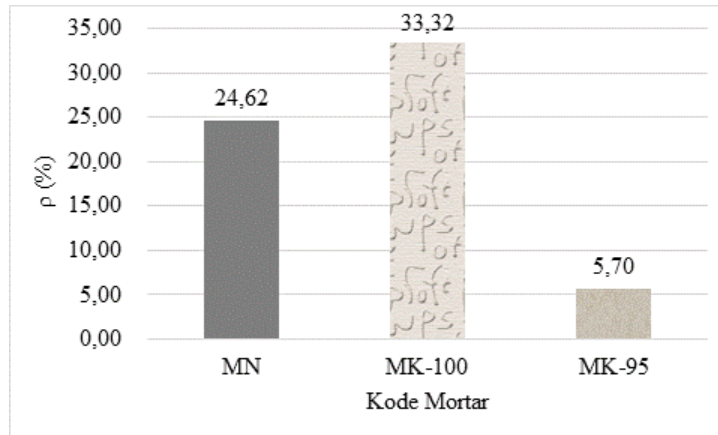
Nilai densitas arus korosi yang rendah menunjukkan bahwa laju reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan baja berlangsung lebih lambat. Hal ini berkaitan dengan meningkatnya resistivitas mortar geopolimer yang mampu menghambat aliran arus listrik dalam sistem korosi.

Fenomena ini sesuai dengan penelitian Khan et al. (2022) yang menyatakan bahwa material berbasis metakaolin memiliki resistivitas listrik yang lebih tinggi dibanding mortar konvensional, sehingga mampu menurunkan aktivitas korosi. Selain itu, struktur pori yang lebih kecil pada mortar geopolimer juga membatasi pergerakan ion dalam sistem elektrolit.

Dengan demikian, penurunan densitas arus korosi menunjukkan bahwa mortar geopolimer tidak hanya berperan sebagai pelindung fisik, tetapi juga mampu menghambat mekanisme elektrokimia yang menyebabkan korosi.

3.3 Analisis Persentase Kehilangan Berat Tulangan

Persentase kehilangan berat tulangan merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kerusakan material akibat korosi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mortar geopolimer MK-95 memiliki nilai kehilangan berat yang lebih kecil dibandingkan mortar normal dan mortar geopolimer MK-100.



Gambar 3. Diagram Persentase Nilai Kehilangan Berat Tulangan dalam Mortar

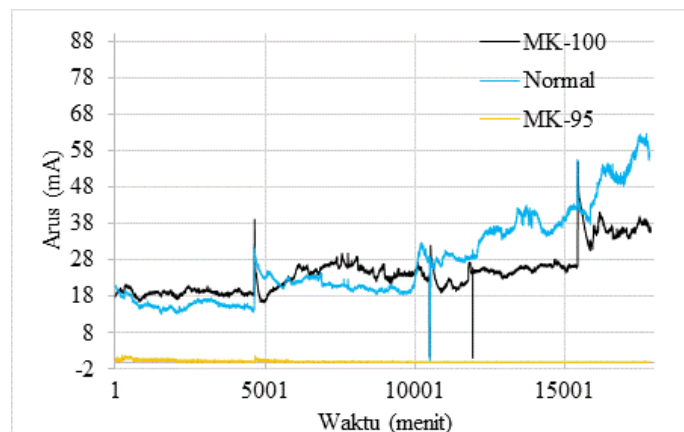
Kehilangan berat tulangan berkaitan langsung dengan berkurangnya luas penampang efektif baja yang dapat menyebabkan penurunan kapasitas tarik struktur. Semakin besar kehilangan berat, maka semakin besar pula potensi penurunan kinerja struktur beton bertulang.

Hasil ini konsisten dengan penelitian Liu et al. (2024) yang menunjukkan bahwa beton geopolimer mengalami kehilangan berat tulangan yang lebih kecil dibandingkan beton konvensional akibat struktur matriks yang lebih padat. Selain itu, lingkungan alkali yang stabil pada geopolimer juga membantu mempertahankan lapisan pasif pada permukaan baja.

Dengan demikian, penggunaan mortar geopolimer berbasis metakaolin dapat mengurangi tingkat kerusakan tulangan akibat korosi dan meningkatkan keandalan struktur dalam jangka panjang.

3.4 Hubungan Arus dan Waktu

Hubungan antara arus listrik dan waktu selama pengujian *accelerated corrosion* menunjukkan bahwa arus listrik relatif stabil sepanjang proses pengujian. Kestabilan ini menunjukkan bahwa sistem pengujian berjalan secara konsisten dan dapat merepresentasikan proses korosi dalam kondisi yang dipercepat.



Gambar 4. Grafik Hubungan Arus terhadap Waktu

Dalam sistem korosi elektrokimia, laju korosi berbanding lurus dengan arus listrik yang mengalir. Oleh karena itu, kestabilan arus menunjukkan bahwa proses korosi yang terjadi selama pengujian berlangsung secara terkendali dan dapat digunakan sebagai dasar analisis (Angst et al., 2020).

Selain itu, metode *accelerated corrosion* yang digunakan dalam penelitian ini memungkinkan simulasi kondisi lingkungan korosif dalam waktu yang lebih singkat tanpa mengubah mekanisme dasar korosi. Hal ini menjadikan metode tersebut relevan untuk digunakan dalam evaluasi durabilitas material.

3.5 Analisis Prediksi Masa Layan

Prediksi masa layan struktur beton bertulang dalam penelitian ini mengacu pada konsep Tuutti (1982) yang membagi umur struktur menjadi dua fase utama, yaitu fase inisiasi dan fase propagasi korosi, yang secara matematis dinyatakan sebagai:

$$t_{service} = t_{initiation} + t_{propagation} \quad (2)$$

Fase inisiasi merupakan periode difusi ion klorida melalui mortar atau beton hingga mencapai konsentrasi kritis pada permukaan tulangan, sedangkan fase propagasi merupakan periode dimana korosi berlangsung aktif dan menyebabkan kehilangan penampang baja.

Estimasi waktu inisiasi korosi dihitung menggunakan pendekatan sederhana berbasis Hukum Fick:

$$t_{initiation} = \frac{x^2}{4D} \quad (3)$$

dimana x adalah ketebalan selimut beton dan D adalah koefisien difusi klorida yang bergantung pada karakteristik material mortar. Mortar geopolimer berbasis metakaolin memiliki nilai D yang lebih rendah dibanding mortar normal, sehingga mampu memperpanjang fase inisiasi.

Sementara itu, fase propagasi korosi dihitung berdasarkan hubungan antara laju korosi dan kehilangan diameter tulangan:

$$t_{propagation} = \frac{\Delta d}{CR} \quad (4)$$

Nilai kehilangan diameter (Δd) diperoleh dari asumsi batas kerusakan struktural sebesar 25% dari diameter awal tulangan (Bertolini et al., 2013).

Nilai laju korosi yang digunakan merupakan hasil konversi dari pengujian *accelerated corrosion* yang telah dikoreksi menggunakan *acceleration factor* (AF), sehingga merepresentasikan kondisi lapangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi MK-95 memiliki nilai laju korosi paling rendah, sehingga menghasilkan waktu propagasi korosi yang paling panjang.

Tabel 1. Konversi Laju Korosi dan Estimasi Kondisi Lapangan

Variasi	CR Lab (g/m ² ·jam)	CR (mm/tahun)	CR Field (mm/tahun, AF=10 ⁶)
MN	104600	116577	0,116
MK-100	141641	157859	0,158
MK-95	24989	27850	0,028

Integrasi antara fase inisiasi dan propagasi menunjukkan bahwa mortar geopolimer berbasis metakaolin, khususnya pada variasi MK-95, memberikan peningkatan masa layan yang signifikan dibandingkan dengan mortar normal dan variasi MK-100.

Dengan demikian, model yang digunakan dalam penelitian ini tidak hanya merepresentasikan proses korosi secara parsial, tetapi juga memberikan pendekatan yang komprehensif dalam menghubungkan performa material terhadap estimasi umur layanan struktur beton bertulang.

Nilai laju korosi hasil konversi menunjukkan bahwa kondisi laboratorium menghasilkan percepatan korosi yang sangat tinggi dibandingkan dengan kondisi alami, sehingga diperlukan koreksi untuk memperoleh estimasi yang lebih realistis. Setelah dilakukan koreksi, terlihat bahwa variasi MK-95 memiliki laju korosi paling rendah dibandingkan dengan variasi lainnya.

Prediksi masa layan struktur beton bertulang dilakukan dengan menghubungkan nilai laju korosi hasil pengujian dengan kehilangan penampang tulangan akibat korosi. Laju korosi yang diperoleh dari pengujian *accelerated corrosion* masih dalam satuan massa (g/m²·jam), sehingga perlu dikonversi ke satuan penetrasi (mm/tahun) menggunakan pendekatan berbasis densitas baja. Selanjutnya, dilakukan koreksi menggunakan *acceleration factor* (AF) untuk merepresentasikan kondisi lapangan. Berdasarkan literatur, nilai AF untuk metode *accelerated corrosion* berada pada rentang 10³ hingga 10⁶, tergantung pada tingkat percepatan yang dihasilkan oleh arus listrik eksternal (Broomfield, 2007; Bertolini et al., 2013). Mengingat pengujian dilakukan menggunakan larutan NaCl 5% dan tegangan DC 12 V, maka dalam penelitian ini digunakan nilai konservatif AF = 10⁶. Pemilihan nilai *acceleration factor* (AF) sebesar 10⁶ didasarkan pada kondisi pengujian yang menggunakan tegangan listrik eksternal dan larutan NaCl dengan konsentrasi tinggi, yang secara signifikan mempercepat proses korosi dibandingkan kondisi alami. Nilai ini dipilih secara konservatif berdasarkan literatur untuk memastikan bahwa hasil prediksi tidak meremehkan laju korosi dalam kondisi lapangan. Selanjutnya, prediksi masa layan dihitung berdasarkan hubungan antara laju korosi dan kehilangan diameter tulangan menggunakan persamaan $t = \frac{\Delta d}{CR}$. Nilai Δd diperoleh dari asumsi batas kerusakan struktural, dimana tulangan dianggap mengalami penurunan kapasitas signifikan ketika kehilangan diameter mencapai sekitar 20–25% dari diameter awal (Bertolini et al., 2013). Dengan diameter awal tulangan sebesar 16 mm dan batas kerusakan sebesar 25%, maka kehilangan diameter kritis dihitung sebagai $\Delta d = 0,25 \times 16 = 4\text{mm}$.

Berdasarkan nilai tersebut, diperoleh estimasi umur struktur sebesar 38 tahun untuk mortar normal, 30 tahun untuk MK-100, dan mencapai 153 tahun untuk MK-95. Perbedaan ini menunjukkan bahwa mortar geopolimer dengan komposisi MK-95 memiliki ketahanan korosi

yang paling baik dan mampu memperpanjang masa layan struktur secara signifikan dibandingkan dengan mortar normal. Sebaliknya, variasi MK-100 menunjukkan performa yang lebih rendah dibandingkan dengan MK-95, yang mengindikasikan bahwa peningkatan kadar metakaolin tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan ketahanan korosi.

Tabel 2. Integrasi $t_{\text{initiation}}$ terhadap $t_{\text{propagation}}$

Variasi	t_init (tahun)	t_prop (tahun)	t_service (tahun)
MN	4	34	38 tahun
MK-100	5	25	30 tahun
MK-95	10	143	153 tahun

Perlu dicatat bahwa nilai masa layan sebesar 153 tahun yang diperoleh untuk variasi MK-95 merupakan hasil estimasi berbasis model prediktif yang dikalibrasi dari data laboratorium. Nilai ini mencerminkan kondisi ideal berdasarkan parameter yang digunakan dalam model dan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan yang kompleks. Faktor-faktor seperti variasi lingkungan, perubahan sifat material seiring waktu (*aging effect*), serta interaksi kimia yang lebih kompleks di lapangan dapat mempengaruhi nilai aktual masa layan. Oleh karena itu, hasil ini harus diinterpretasikan sebagai estimasi konservatif yang menunjukkan potensi peningkatan durabilitas material, bukan sebagai nilai absolut umur struktur di kondisi nyata.

Lebih lanjut, peningkatan performa pada MK-95 disebabkan oleh terbentuknya struktur mikro yang lebih padat sehingga mampu menghambat difusi ion klorida serta menurunkan laju reaksi elektrokimia pada permukaan tulangan. Namun, pada kadar metakaolin yang lebih tinggi (MK-100), kemungkinan terjadi ketidakseimbangan dalam struktur matriks yang dapat meningkatkan porositas atau ketidakstabilan mikrostruktur.

Hasil penelitian ini tidak hanya menunjukkan bahwa mortar geopolimer berbasis metakaolin memiliki ketahanan korosi yang lebih baik, tetapi juga mengidentifikasi adanya komposisi optimum dalam meningkatkan durabilitas material. Pendekatan ini memberikan kontribusi praktis dalam perencanaan material beton bertulang, khususnya untuk aplikasi pada lingkungan korosif seperti daerah pesisir.

Meskipun fase inisiasi tidak dihitung secara eksplisit dalam penelitian ini, pengaruhnya tetap tercermin secara tidak langsung melalui karakteristik material mortar yang mempengaruhi difusi ion klorida. Mortar geopolimer berbasis metakaolin memiliki struktur mikro yang lebih padat dan permeabilitas yang lebih rendah, sehingga berpotensi memperpanjang fase inisiasi dibandingkan dengan mortar normal. Dengan demikian, peningkatan masa layan struktur pada mortar geopolimer tidak hanya disebabkan oleh penurunan laju korosi (fase propagasi), tetapi juga oleh kemampuan material dalam menghambat penetrasi ion klorida (fase inisiasi).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa performa mortar geopolimer berbasis metakaolin berkontribusi pada kedua fase korosi, yaitu memperlambat inisiasi korosi melalui peningkatan ketahanan terhadap difusi klorida, serta memperpanjang fase propagasi melalui penurunan laju korosi, sehingga menghasilkan peningkatan masa layan struktur beton bertulang secara signifikan. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada penggunaan model difusi sederhana yang belum mempertimbangkan faktor *aging material*, *chloride binding*, serta variasi kondisi lingkungan secara dinamis. Selain itu, pendekatan *accelerated corrosion* yang digunakan

dapat menghasilkan kondisi yang berbeda dari mekanisme korosi alami. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk memvalidasi model pada kondisi lapangan. Perbedaan antara kondisi laboratorium dan kondisi lapangan menjadi faktor penting dalam interpretasi hasil. Pengujian *accelerated corrosion* menghasilkan laju korosi yang jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi alami, sehingga diperlukan pendekatan koreksi melalui *acceleration factor*. Namun demikian, kondisi lapangan memiliki variabilitas yang lebih kompleks, sehingga hasil prediksi perlu dipahami sebagai pendekatan estimatif.

3.6 Interpretasi Selimut Beton terhadap Masa Layan

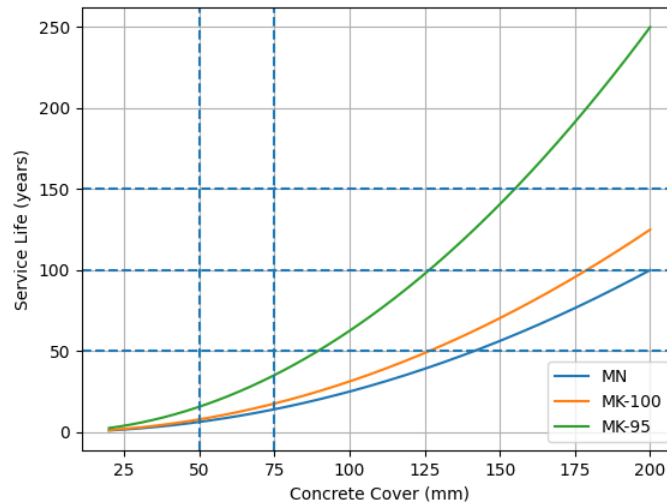
Hasil prediksi masa layan selanjutnya dikaitkan dengan parameter desain struktur, khususnya ketebalan selimut beton, yang berperan dalam mengendalikan fase inisiasi korosi. Analisis didasari oleh model Fick sederhana yakni :

$$t_{service} = \frac{x^2}{4D} \quad (5)$$

Dimana:

- x = selimut beton (mm)
- D = koefisien difusi klorida

Analisis durabilitas struktur beton bertulang pada lingkungan yang mengandung ion klorida, fase inisiasi korosi memegang peranan penting karena menentukan waktu awal terjadinya kerusakan pada tulangan. Fase ini dikendalikan oleh proses transport ion klorida melalui beton yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik material dan ketebalan selimut beton. Semakin rendah kemampuan material dalam meloloskan ion klorida dan semakin besar ketebalan selimut beton, maka semakin lama waktu yang dibutuhkan ion klorida untuk mencapai permukaan tulangan. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan analitis untuk mengkuantifikasi hubungan antara parameter-parameter tersebut terhadap waktu inisiasi korosi. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah model difusi berdasarkan Hukum Fick, yang menyederhanakan proses penetrasi klorida sebagai fungsi dari koefisien difusi material dan ketebalan selimut beton. Pendekatan ini memungkinkan estimasi waktu inisiasi korosi secara kuantitatif, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi durabilitas serta perencanaan desain struktur beton bertulang pada lingkungan korosif. Dengan demikian, analisis fase inisiasi korosi menjadi langkah awal yang penting dalam memprediksi masa layan struktur beton bertulang secara keseluruhan.



Gambar 5. Orientasi Desain Tebal Selimut Beton vs Masa Layan Struktural

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara ketebalan selimut beton dan masa layan struktur yang dikembangkan berdasarkan pendekatan difusi klorida. Kurva masing-masing variasi mortar memperlihatkan bahwa peningkatan ketebalan selimut beton secara signifikan memperpanjang fase inisiasi korosi, dimana hubungan yang terbentuk bersifat non-linear sesuai dengan model difusi. Variasi MK-95 menunjukkan performa terbaik dengan kurva yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya, yang mengindikasikan kemampuan material dalam menghambat penetrasi ion klorida akibat nilai difusivitas yang lebih rendah.

Pada grafik tersebut juga ditampilkan garis horizontal yang merepresentasikan target umur layanan (50, 100, dan 150 tahun), serta garis vertikal yang menunjukkan batas ketebalan selimut beton berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 untuk lingkungan agresif, yaitu sekitar 50–75 mm. Terlihat bahwa mortar normal (MN) memerlukan ketebalan selimut beton yang jauh lebih besar untuk mencapai target umur layanan yang tinggi, bahkan melebihi batas praktis desain. Sebaliknya, mortar geopolimer berbasis metakaolin, khususnya variasi MK-95, mampu mencapai umur layanan yang sama dengan ketebalan selimut yang lebih kecil dan masih berada dalam rentang standar.

Meskipun demikian, hasil analisis berbasis model difusi sederhana menunjukkan bahwa untuk mencapai masa layan hingga 150 tahun, diperlukan ketebalan selimut beton yang relatif besar. Nilai ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena bersifat konservatif dan belum mempertimbangkan beberapa faktor penting dalam kondisi nyata, seperti penurunan koefisien difusi seiring waktu (*aging effect*), kemampuan material dalam mengikat ion klorida (*chloride binding*), serta variasi kondisi lingkungan. Oleh karena itu, nilai ketebalan selimut yang diperoleh dari model tersebut tidak secara langsung merepresentasikan kebutuhan desain aktual.

Dalam praktik rekayasa, penggunaan mortar geopolimer berbasis metakaolin dengan performa difusivitas rendah memungkinkan optimasi desain selimut beton, dimana masa layan yang tinggi dapat dicapai tanpa harus meningkatkan ketebalan selimut secara signifikan. Untuk variasi MK-95, ketebalan selimut beton pada kisaran 60–80 mm sudah dapat memberikan masa layan yang panjang dan sesuai dengan ketentuan standar, sehingga lebih efisien dibandingkan pendekatan konvensional yang hanya mengandalkan peningkatan ketebalan selimut beton.

Grafik ini menunjukkan bahwa peningkatan durabilitas struktur beton bertulang lebih efektif dicapai melalui kombinasi antara pemilihan material dengan difusivitas rendah dan desain selimut beton yang optimal, dibandingkan dengan hanya meningkatkan ketebalan selimut beton secara berlebihan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa mortar geopolimer berbasis metakaolin memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan mortar normal. Hal ini ditunjukkan oleh nilai laju korosi, densitas arus korosi, serta kehilangan berat tulangan yang lebih rendah pada mortar geopolimer. Hasil analisis prediksi masa layan menunjukkan bahwa variasi MK-95 memberikan performa terbaik dengan umur struktur yang lebih panjang dibandingkan variasi lainnya. Sebaliknya, peningkatan kadar metakaolin hingga MK-100 tidak selalu meningkatkan ketahanan korosi, yang menunjukkan adanya komposisi optimum dalam penggunaan metakaolin. Integrasi antara model laju korosi dan pendekatan difusi klorida menunjukkan bahwa peningkatan masa layan struktur dipengaruhi oleh dua mekanisme utama, yaitu perpanjangan fase inisiasi akibat rendahnya difusivitas material, serta perlambatan fase propagasi akibat rendahnya laju korosi. Penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi material lebih efektif dibandingkan dengan peningkatan ketebalan selimut beton dalam meningkatkan durabilitas struktur beton bertulang pada lingkungan korosif. Hal ini menunjukkan, penggunaan mortar geopolimer berbasis metakaolin, khususnya pada komposisi optimum, dapat menjadi solusi efektif dalam meningkatkan durabilitas struktur beton bertulang pada lingkungan korosif. Selain itu, pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan model prediksi masa layan berbasis data eksperimen yang dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland, Ø. (2020). Critical chloride content in reinforced concrete—A review. *Cement and Concrete Research*, 123, 105-121.
- Andrade, C., & Alonso, C. (2001). On-site measurement of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 15(2-3), 141-145.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559–573.
- Khan, M. I., Azizli, K., & Man, Z. (2022). Electrical resistivity and durability performance of geopolimer materials. *Materials*, 15(4), 1456.
- Life-365 Consortium. (2020). *Life-365 service life prediction model and computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides*. Ann Arbor, MI: Life-365.

- Liu, Y., Shi, C., & Zhang, Z. (2024). Corrosion resistance of geopolymer concrete under chloride exposure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(2), 04023345.
- Provis, J. L. (2022). *Alkali-activated materials*. Dordrecht: Springer.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2021). Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Shi, C., Krivenko, P. V., & Roy, D. (2018). *Alkali-activated cements and concretes*. London: Taylor & Francis.
- Tang, L., & Nilsson, L. O. (1992). Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. *Cement and Concrete Research*, 22(4), 789–795.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- ACI Committee 365. (2013). *Service life prediction—State-of-the-art report (ACI 365R-00)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- SNI 2847:2019. (2019). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Zhang, P., Wang, K., & Li, Q. (2023). Chloride diffusion in geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 360, 129145.