

---

## RELIABILITAS JANGKA PANJANG DARI PENAMPANG BETON BERTULANG YANG MENGALAMI PERKARATAN

Leary Pakiding

Leary Pakiding, Universitas Sains dan Teknologi Jayapura, [pakiding.leary@gmail.com](mailto:pakiding.leary@gmail.com)

### ABSTRAK

Pendekatan berbasis reliabilitas jangka panjang untuk optimalisasi penampang beton bertulang dalam lingkungan yang korosif dipaparkan dalam artikel ini. Kinerja struktur jangka panjang dievaluasi dengan menggunakan metodologi umum untuk analisis struktur beton bertulang yang tulangnya mengalami perkaratan yang bervariasi dengan waktu. Simulasi “Monte Carlo” digunakan untuk menyelidiki kinerja reliabilitas dari penampang beton bertulang yang telah dioptimalkan untuk meminimalkan biaya material. Simulasi ini diterapkan pada desain yang tidak bergantung pada variasi waktu dan pada desain yang bersifat jangka panjang. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa dalam desain berorientasi jangka panjang, jumlah dan lokasi tulangan baja dan tebal selimut beton memainkan peran penting dalam mencapai kinerja struktur yang optimal.

**Kata kunci :** *reliabilitas, beton bertulang, perkaratan, monte carlo*

### 1. PENDAHULUAN

Bentuk penampang struktur dan tata letak tulangan dalam penampang dapat mempengaruhi kinerja struktur beton yang terkontaminasi zat-zat korosif. Oleh karena itu, pendekatan umum yang baik dan benar untuk mendesain struktur beton yang optimal dan dapat bertahan lama tanpa mengalami kerusakan harus digunakan. Ini tidak hanya diterapkan pada saat awal konstruksi, tetapi juga dalam jangka umur struktur yang diharapkan dengan cara memperhitungkan semua sumber-sumber lain yang mungkin mengakibatkan kerusakan [6]. Pendekatan optimalisasi jangka panjang yang berbasis reliabilitas pada struktur-struktur beton yang mengalami kerusakan dapat dilihat dalam [10, 12, 13, 18]. Selain itu, pendekatan optimalisasi struktur jangka panjang yang telah dikembangkan dalam konteks deterministik dapat dilihat dalam [2].

Artikel ini menjelaskan rumusan pendekatan optimalisasi struktur dalam jangka panjang yang telah diperluas dalam konteks probabilitas, di mana tujuan desain adalah mengurangi biaya jangka panjang dan kendala lain yang perlu dipertimbangkan seperti kinerja penampang beton yang mengalami kerusakan akibat korosi selama beroperasi. Evolusi kinerja struktur jangka panjang didasarkan pada [3-6, 9]. Dampak pendekatan optimalisasi struktur jangka panjang ditunjukkan dengan membandingkan solusi optimal yang diperoleh dengan rumusan klasik yang tidak tergantung waktu dan mempertimbangkan keadaan awal struktur tanpa kerusakan dan yang diperoleh dari formulasi jangka panjang yang mempertimbangkan evolusi waktu dari kinerja struktur yang diperhitungkan.

### 2. TINJAUAN PUSTAKA

#### **Kinerja jangka panjang struktur beton bertulang**

Analisis kinerja jangka panjang dari struktur beton bertulang yang berada dalam lingkungan yang korosif harus dapat menjelaskan proses difusi zat-zat korosif, seperti sulfat dan klorida, dan kerusakan mekanis yang disebabkan oleh difusi yang biasanya melibatkan korosi pada tulangan [7, 17]. Untuk proses difusi, hukum difusi “Fick” [14] digunakan dalam simulasi dan hasil analisis difusi tersebut sebagaimana dijelaskan dalam [6, 9] dirujuk dalam artikel ini.

Kerusakan struktural yang disebabkan oleh difusi dapat melibatkan kerusakan beton dan korosi tulangan [7]. Artikel ini mempertimbangkan proses berkurangnya kekuatan penampang

beton akibat korosi yang seragam pada tulangan. Berdasarkan [3, 9], indeks kerusakan (damage index) tak berdimensi  $ds$  dan laju korosi  $v$  digunakan untuk mengukur persentase kehilangan luasan baja tulangan. Indeks kerusakan  $ds$  dari waktu ke waktu berbeda untuk setiap tulangan di penampang karena evolusi konsentrasi dari zat-zat korosif dan lokasi setiap tulangan di penampang. Nilai indeks kerusakan bervariasi dari 0 hingga 1. Oleh karena itu, waktu awal kerusakan di setiap tulangan mungkin berbeda. Selain itu, laju korosi dipengaruhi juga oleh konsentrasi klorida pada permukaan tulangan. Tingkat korosi rata-rata yang digunakan dalam artikel ini merujuk pada [19].

### 3. METODE PENELITIAN

#### Pendekatan jangka panjang dari optimalisasi struktur berdasarkan reliabilitas

Permasalahan desain optimalisasi probabilistik jangka panjang dirumuskan sebagai berikut:

$$\min_{\mathbf{x} \in D} f(\mathbf{x}) \quad D = \{\mathbf{x} | \mathbf{x}^- \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^+, \beta(\mathbf{x}, t) \geq \bar{\beta}(t), t \leq T\} \quad (1)$$

di mana  $\beta(\mathbf{x}, t)$  adalah indeks reliabilitas (reliability index) dan  $\bar{\beta} = \bar{\beta}(t)$  adalah reliabilitas target jangka panjang yang pada umumnya bervariasi dari waktu ke waktu karena mencerminkan beberapa faktor yang dapat berubah dari waktu ke waktu seperti jenis dan pentingnya struktur, dampak konsekuensi kegagalan struktur, tanda-tanda terjadinya kegagalan struktur, dan kriteria sosial-ekonomi [15,16].

Fungsi tujuan dalam optimalisasi dirumuskan sebagai berikut:

$$f(\mathbf{x}) = A_c(\mathbf{x}) + \chi A_s(\mathbf{x}) \quad (2)$$

di mana  $A_c$  dan  $A_s$  adalah total luas beton dan baja.  $\chi = c_s/c_c$  adalah rasio biaya satuan baja,  $c_s$  dan biaya satuan beton,  $c_c$ . Formulasi ini mengabaikan intervensi pemeliharaan jangka panjang,  $T$ . Selain itu, fungsi tujuan yang dipilih mewakili kriteria yang konsisten untuk membandingkan solusi desain yang berbeda daripada biaya yang sebenarnya.

Batasan perilaku desain yang bervariasi dari waktu ke waktu ditetapkan pada kondisi batas dalam faktor keselamatan (safety factor)  $\Theta = \Theta(\mathbf{x}, t)$  dan dirumuskan sebagai berikut:

$$\Theta(\mathbf{x}, t) = \frac{M_R(\mathbf{x}, t)}{M_A(\mathbf{x}, t)} \geq 1, t \leq T \quad (3)$$

di mana  $M_R(\mathbf{x}, t)$  adalah kapasitas momen lentur dari penampang dan  $M_A(\mathbf{x}, t)$  adalah momen lentur yang bekerja. Jika distribusi lognormal dapat dipilih sebagai model yang sesuai untuk  $M_R$  dan  $M_A$ , dengan nilai rata-rata  $\mu_R$  dan  $\mu_A$  dan koefisien variasi  $\delta_R$  dan  $\delta_A$ , maka distribusi probabilistik faktor keselamatan  $\Theta$  juga lognormal dengan parameter statistik sebagai berikut [1]

$$\mu_\Theta = \frac{\mu_R}{\mu_A} (1 + \delta_A^2) \quad \delta_\Theta = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_A^2 + \delta_R^2 \delta_A^2} \quad (4)$$

dan indeks reliabilitas dari waktu ke waktu dapat dihitung sebagai berikut:

$$\beta(\mathbf{x}, t) = \frac{\lambda_\Theta(\mathbf{x}, t)}{\zeta_\Theta(\mathbf{x}, t)} \quad (5)$$

Dimana  $\lambda_{\Theta}(\mathbf{x}, t)$  dan  $\zeta_{\Theta}(\mathbf{x}, t)$  adalah nilai rata-rata dan standar deviasi dari variabel acak dengan distribusi normal  $\ln \Theta$ . Untuk penampang beton bertulang, vektor variabel desain  $\mathbf{X}$  biasanya mencakup variabel menerus yang terkait dengan ukuran dan geometri penampang dan variabel integer yang terkait dengan diameter tulangan baja standar yang umumnya tersedia untuk struktur beton bertulang biasa.

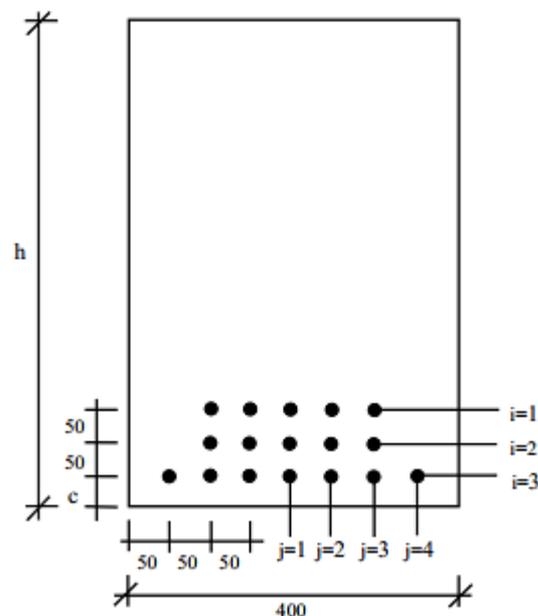
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Contoh-contoh penerapan optimalisasi struktur berdasarkan reliabilitas jangka panjang

Simulasi “Monte Carlo” [1] digunakan dalam contoh-contoh berikut ini.

##### Contoh 1 (data untuk simulasi “Monte Carlo” berdasarkan [6])

Tata letak penampang ditunjukkan pada Gambar. 1 (dalam satuan mm)



Gambar 1. Penampang Beton Dengan Lokasi Tulangan Baja

Variabel desain adalah selimut beton  $c$ , ketinggian maksimum  $h^*=h-c$ , dan diameter tulangan  $\phi_{ij}$ . Nilai optimal dari variabel desain dicari dengan mempertimbangkan kendala sisi beton sebagai berikut:

$$h_{min}^* \leq h_{min}^* \leq h_{max}^* \quad (6)$$

$$c_{min} \leq c \leq c_{max} \tag{7}$$

$$\phi_i = 0 \quad \forall \phi_i < \phi_{min}, \quad i = 1,2 \tag{8}$$

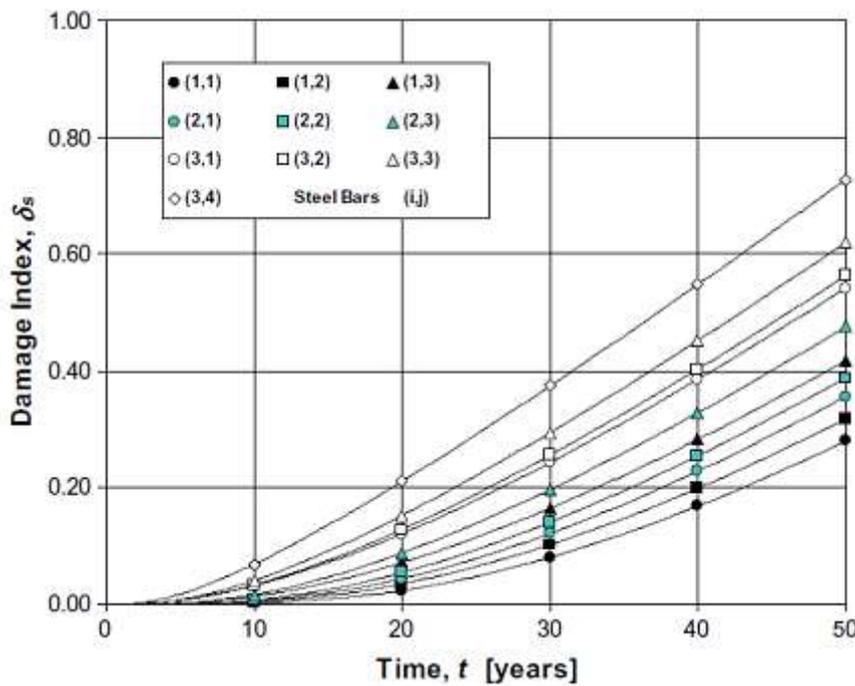
$$\phi_i \leq \phi_{max}, \quad i = 1, \dots, 3 \tag{9}$$

$$\phi_3 \geq \phi_{min} \tag{10}$$

$$\phi_{34} \geq \phi_{min} \tag{11}$$

where  $h_{min}^* = 550 \text{ mm}$ ,  $h_{max}^* = 750 \text{ mm}$ ,  $c_{min} = 50 \text{ mm}$ ,  $c_{max} = 100 \text{ mm}$ ,  $\phi_{min} = 12 \text{ mm}$ ,  $\phi_{max} = 26 \text{ mm}$ .

Proses difusi disimulasikan dengan menggunakan pendekatan “cellular automata” yang diusulkan dalam [3]. Difusivitas  $D = 9,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , dimensi grid  $\Delta z = 15,5 \text{ mm}$  dan perubahan waktu  $\Delta t = 0,1$  tahun digunakan untuk menentukan “cellular automaton”. Kerusakan mekanis yang disebabkan oleh difusi dievaluasi dengan mengasumsikan  $C_{cr} = 0$ ,  $C_s = C_0$  dan  $\Delta t_s = 50$  tahun. Gambar. 2 menunjukkan evolusi waktu dari indeks kerusakan tulangan baja yang terkait dengan proses difusi yang diperoleh dari [6].



**Gambar 2.** Evolusi Waktu Dari Indeks Kerusakan Tulangan Baja (Diadopsi Dari [6]).

Sebagai catatan untuk contoh 1, karena kurangnya data penunjang untuk simulasi “Monte Carlo”, maka “curve fitting” dilakukan pada grafik evolusi yang ditunjukkan dalam Gambar 2.

Indeks reliabilitas dari waktu ke waktu  $\bar{\beta} = \beta(t)$  dievaluasi untuk jangka waktu  $T = 50$  tahun dengan mengasumsikan kekuatan material sebagai variabel acak. Kekuatan tekan beton  $f_c$  dimodelkan oleh distribusi lognormal dengan nilai rata-rata 35 MPa dan standar deviasi 5 MPa. Kekuatan baja dimodelkan sebagai distribusi lognormal dengan nilai rata-rata 500 MPa dan standar deviasi 30 MPa. Kapasitas momen lentur yang bervariasi dengan waktu  $M_R$  dihitung dengan mengasumsikan beton dalam keadaan tertekan, kedalaman blok tegangan tekan adalah 0,8y terhadap kedalaman sumbu netral y, dan regangan pada saat beton hancur saat tertekan  $\epsilon_{cu} = 0,35\%$ . Momen lentur yang bekerja dan tidak bervariasi dengan waktu  $M_A$  diasumsikan memiliki distribusi lognormal yang ditentukan oleh nilai rata-rata  $\mu_A = 300$  kN m dan koefisien variasi  $\delta_A = 0,15$ . Akhirnya, dengan mengasumsikan bahwa frekuensi inspeksi berkala atau kegiatan pemantauan akan semakin meningkat selama bertahun-tahun untuk memberikan deteksi kerusakan dan peringatan dini kegagalan, fungsi bilinear berikut  $\bar{\beta} = \bar{\beta}(t)$  diadopsi sebagai ambang batas reliabilitas yang bervariasi dengan waktu:

$$\bar{\beta}(t) = \begin{cases} \bar{\beta}_0 + (\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_0) \frac{t}{t_1}, & 0 \leq t < t_1 \\ \bar{\beta}_1 + (\bar{\beta}_T - \bar{\beta}_1) \frac{t-t_1}{T-t_1}, & t_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (12)$$

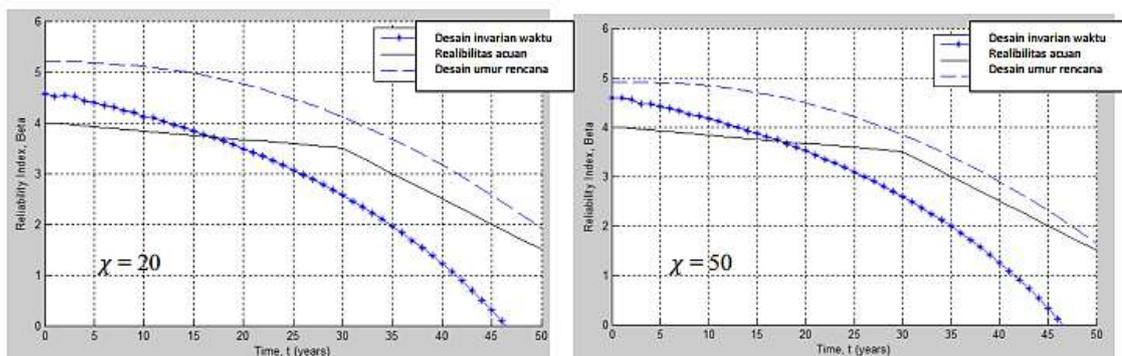
with  $\bar{\beta}_0 = 4.0$ ,  $\bar{\beta}_1 = 3.5$ ,  $\bar{\beta}_T = 1.5$ , and  $t_1 = 30$  years.

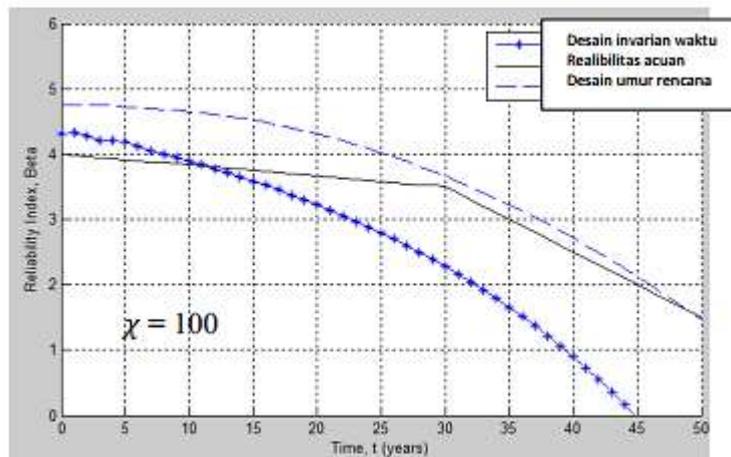
Penampang beton yang dioptimalkan dapat dilihat dalam Tabel 1 dan data-data penampang ini digunakan dalam simulasi “Monte Carlo” dengan menggunakan MATLAB [20]. Parameter utama, rasio biaya unit  $\chi$ , diselidiki untuk tiga skenario biaya yang berbeda dengan  $\chi = 20$ ,  $\chi = 50$ , dan  $\chi = 100$ .

Tabel 1. Solusi desain yang optimal: (a) pendekatan yang tidak bervariasi dengan waktu, (b) pendekatan jangka panjang (diadopsi dari [6]).

$\chi$	$h$ [mm]	$h'$ [mm]	$c$ [mm]	$\phi_1$ [mm]	$\phi_2$ [mm]	$\phi_3$ [mm]	$\phi_{s4}$ [mm]
(a)							
20	600	550	50	—	—	22	16
50	610	560	50	—	—	22	14
100	665	615	50	—	—	20	16
(b)							
20	600	550	50	16	20	12	12
50	630	555	75	12	20	12	12
100	735	635	100	12	16	12	12

Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi “Monte Carlo” untuk formulasi yang tidak tergantung pada waktu dan mempertimbangkan kondisi awal penampang tanpa kerusakan dan formulasi jangka panjang yang diusulkan di mana evolusi waktu dari kinerja struktur diperhitungkan.





**Gambar 3.** Evolusi Waktu Dari Indeks Reliabilitas

Gambar 3 juga menunjukkan evolusi waktu dari indeks reliabilitas untuk solusi optimal yang ditunjukkan pada Tabel 1. Dapat dicatat bahwa pendekatan optimisasi jangka panjang diperlukan untuk memenuhi kendala reliabilitas  $\beta(t) \geq \bar{\beta}(t)$  tidak hanya pada waktu awal, tetapi juga dalam jangka panjang yang telah ditentukan, T.

Ketinggian optimal  $h^*$  dari penampang tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jenis desain yang digunakan. Sebaliknya, nilai-nilai optimal dari variabel desain lainnya sangat terkait dengan efek kerusakan. Misalnya, jika kerusakan tidak dipertimbangkan, maka luas tulangan baja minimum yang layak dikaitkan dengan ketinggian maksimum batang baja (yaitu lapisan  $i = 3$ ) dan selimut beton minimum dapat dipilih karena nilainya tidak mempengaruhi kapasitas momen lentur. Sebaliknya, jika kinerja struktur jangka panjang dipertimbangkan, maka lokasi setiap lapisan tulangan baja, serta nilai selimut beton, dapat memainkan peran penting dalam definisi luas tulangan minimum yang layak.

Selanjutnya, karena proses kerusakan yang disebabkan oleh difusi, diperlukan keseimbangan dalam menentukan antara memaksimalkan kedalaman tulangan dan meminimalkan efek kerusakan. Cara untuk mencapai keseimbangan tersebut tergantung pada skenario biaya, karena peningkatan rasio  $\chi$  biaya satuan tidak hanya melibatkan pengurangan total luas tulangan baja, tetapi juga peningkatan perlindungan tulangan dari zat-zat korosif yang bisa diperoleh dengan nilai kedalaman yang lebih tinggi untuk tulangan baja dengan diameter lebih besar dan nilai yang lebih besar dari selimut beton. Berdasarkan hasil simulasi “Monte Carlo” dapat dikatakan bahwa tata letak tulangan dan selimut beton dapat secara signifikan mempengaruhi evolusi kinerja struktur, dan ini harus dipertimbangkan sebagai faktor utama dalam desain optimal jangka panjang.

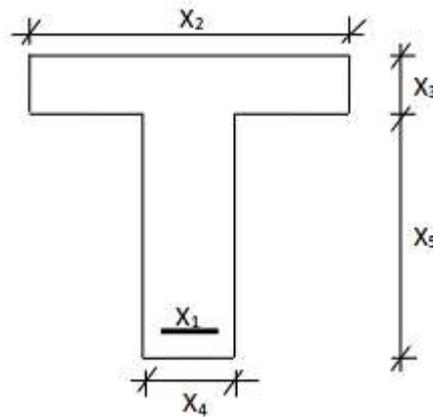
**Contoh 2 (data untuk simulasi “Monte Carlo” berdasarkan [9])**

Penurunan kinerja gelagar jembatan seiring berjalannya waktu diselidiki pada tingkat (level) penampang. Perkaratan pada tulangan dirumuskan berdasarkan [19]. Korosi yang

menyeluruh pada tulangan diasumsikan dengan total daerah tulangan lentur sebagai fungsi dari waktu,  $t$ , sebagai berikut:

$$A_s(t) = \begin{cases} \frac{n\pi D_b^2}{4} & \text{for } t \leq T_I \\ \frac{n\pi [D_b - 2v(t - T_I)]^2}{4} & \text{for } t > T_I \end{cases} \quad (13)$$

di mana  $D_b$  = diameter tulangan,  $n$  = jumlah tulangan,  $T_I$  = waktu inisiasi korosi, dan  $v$  = laju korosi. Angka dua (2) yang digunakan dalam persamaan (13) memperhitungkan proses perambatan korosi menyeluruh dari semua sisi pada tulangan.



**Gambar 4.** Penampang Gelagar T Beton Bertulang

Gambar 4 menunjukkan geometri penampang yang dianalisa. Dua tipe desain yaitu desain yang tidak tergantung waktu dan desain jangka panjang, diperiksa dan dibandingkan. Untuk desain jangka panjang, selimut beton diperbesar dan luas tulangan baja dikurangi. Tingkat korosi diasumsikan  $114 \mu\text{m}/\text{tahun}$  dan  $64 \mu\text{m}/\text{tahun}$  untuk desain yang tidak tergantung waktu dan untuk desain jangka panjang. Tabel 2 menunjukkan variabel desain ( $X$ ) dan parameter ( $Y$ ) yang digunakan dalam simulasi “Monte Carlo” (Sebagai catatan, notasi tetap sama seperti yang ada pada [9]).

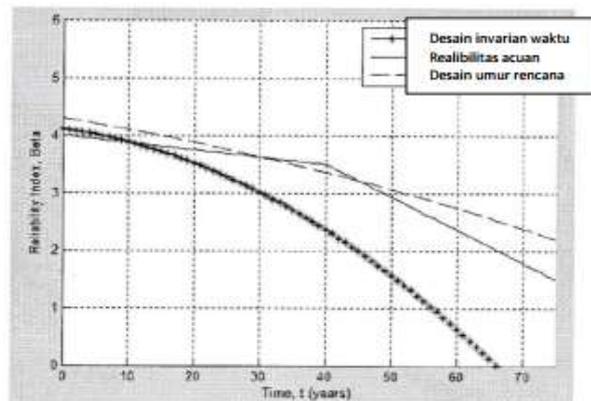
**Tabel 2.** Variabel-Variabel Desain (X) dan Parameter-Parameter (Y) (diadopsi dari [9])

Notasi	Variabel	Nilai-nilai	
		Desain Waktu Invarian	Desain Umur Rencana
X <sub>1</sub>	Luas tulangan tarik, A <sub>s</sub>	As(0)=98.84 cm <sup>2</sup>	As(0)=98.84 cm <sup>2</sup>
X <sub>2</sub>	Lebar sayap, b	77.83 cm	77.83 cm
X <sub>3</sub>	Tebal sayap, h <sub>r</sub>	22.43 cm	22.43 cm
X <sub>4</sub>	Tebal badan, b <sub>w</sub>	35.51 cm	35.51 cm
X <sub>5</sub>	Tingggi badan	154.38 cm	154.38 cm
X <sub>10</sub>	Kedalaman blok tegangan ekuivalen, a	Diperoleh dari variabel yang lain	Diperoleh dari variabel yang lain
X <sub>11</sub>	Kuat lentur nominal dari penampang T	Diperoleh dari variabel yang lain	Diperoleh dari variabel yang lain
X <sub>14</sub>	Tulangan ekuivalen sayap	Diperoleh dari variabel yang lain	Diperoleh dari variabel yang lain
Y <sub>1</sub>	Tebal pelat	17.78 cm	17.78 cm
Y <sub>3</sub>	Panjang bentang gelagar	18.30 m	18.30 m
Y <sub>4</sub>	Kuat leleh tulangan, f <sub>y</sub>	σ=413.4 Mpa, cov=0.15	σ=413.4 Mpa, cov=0.15
Y <sub>5</sub>	Kuat tekan beton, F <sub>c</sub>	σ=27.56 Mpa, cov=0.15	σ=27.56 Mpa, cov=0.15
Y <sub>6</sub>	Beban mati tidak termasuk berat sendiri gelagar	σ=13.57 kN/m, cov=0.20	σ=13.57 kN/m, cov=0.20
Y <sub>7</sub>	Beban hidup maksimum termasuk beban benturan	σ=9966 kN-m, cov=0.243	σ=9966 kN-m, cov=0.243
Y <sub>11</sub>	Berat jenis beton	σ=22.74 kN/m <sup>3</sup> , cov=0.10	σ=22.74 kN/m <sup>3</sup> , cov=0.10
Y <sub>12</sub>	Rasio kedalaman blok tegangan tekan persegi ekuivalen dan jarak dari lokasi regangan tarik maksimum ke sumbu, a <sub>1</sub>	0.85	0.85
α	Jarak dari serat bawah penampang ke titik netral tulangan	17.78 cm	17.78 cm
c	Selimut beton	7.62 cm	7.62 cm

Simulasi “Monte Carlo” dilakukan menggunakan MATLAB [20] untuk menyelidiki reliabilitas penampang dari waktu ke waktu. Perumusan masalah didasarkan pada [9]. Fungsi kondisi batas yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$g_M(t) = \frac{X_{11}}{12} - Y_7 - \frac{Y_6 Y_3^2}{8} - \frac{(X_2 X_3 + X_4 X_5) Y_{11} Y_3^2}{144 \times 8} \tag{14}$$

Reliabilitas acuan untuk penampang diasumsikan mengikuti persamaan (12) dengan t<sub>1</sub> = 40 tahun dan tidak ada perawatan yang diterapkan pada gelagar.



**Gambar 5.** Evolusi Waktu Dari Indeks Reliabilitas

Gambar 5 menunjukkan hasil analisa menggunakan simulasi “Monte Carlo” untuk kedua tipe desain yang disebutkan sebelumnya. Seperti dalam contoh pertama, indeks reliabilitas untuk penampang yang didesain untuk jangka panjang lebih besar dibandingkan dengan desain yang tidak tergantung waktu. Efek perbesaran selimut beton sangat signifikan dalam hal kinerja penampang gelagar yang mengalami kerusakan korosi.

## 5. PENUTUP

### Kesimpulan

Pendekatan desain dengan mempertimbangkan keadaan jangka panjang untuk optimalisasi struktur yang berbasis reliabilitas pada penampang beton bertulang yang mengalami difusi dari zat-zat korosif telah ditunjukkan sebagai salah satu pendekatan yang terbaik dalam desain. Optimalisasi probabilistik jangka panjang telah dirumuskan dalam suatu penelitian yang khusus (untuk mengecek reliabilitas struktur) di mana optimalisasi dilakukan untuk minimalisasi biaya yang tergantung pada waktu tanpa mempertimbangkan pemeliharaan. Artikel ini membandingkan solusi optimal yang diperoleh dengan formulasi klasik yang tidak tergantung pada waktu dan formulasi yang mempertimbangkan keadaan jangka panjang, di mana evolusi waktu dari kinerja struktur diperhitungkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa dalam desain yang berorientasi jangka panjang, luas perkuatan minimum yang layak tidak terkait dengan kedalaman maksimum tulangan baja di atas penampang beton sebagaimana yang diharapkan dari pendekatan klasik yang tidak bergantung waktu. Sebaliknya, jumlah dan lokasi tulangan baja dan tebal selimut beton mempunyai peran penting dalam pencapaian kinerja struktur yang optimal untuk jangka panjang.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ang AH-S, Tang WH. Probability concepts in engineering. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons; 2007.
- [2] Azzarello L, Biondini F, Marchiondelli A. Lifetime optimization of reinforced concrete structures in aggressive environments. In: Cho HN, Frangopol DM, Ang AH-S, editors. Lifecycle cost and performance of civil infrastructure systems. Taylor and Francis; 2007. p. 93– 102.
- [3] Biondini F, Bontempi F, Frangopol DM, Malerba PG. Cellular automata approach to durability analysis of concrete structures in aggressive environments. J Struct Eng, ASCE 2004;130(11):1724–37.
- [4] Biondini F, Bontempi F, Frangopol DM, Malerba PG. Probabilistic service life assessment and maintenance planning of concrete structures. J Struct Eng, ASCE 2006;132(5):810–25.
- [5] Biondini F, Frangopol DM. Probabilistic limit analysis and lifetime prediction of Concrete structures. Struct Infrastruct Eng 2008;4(5):399–412.
- [6] Biondini F, Frangopol DM. Lifetime reliability-based optimization of reinforced concrete cross-sections under corrosion. Structural Safety 2009;31:483–489.
- [7] CEB. Durable concrete structures – design guide. Thomas Telford; 1992. [19] Bertolini L, Elsener B, Pedferri P, Polder R. Corrosion of steel in concrete. Weinheim, Germany: WileyVCH; 2004.
- [8] Ellingwood B. Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: state of

practice and research issues. Struct Infrastruct Eng, Taylor and Francis 2005;1(1):7–18.

- [9] Frangopol DM, Lin K-Y, Estes AC. Reliability of reinforced concrete girders under corrosion attack. J Struct Eng, ASCE 1997;123(3):286–97.