

Studi Analisis Waktu Layan Bangunan Beton: Pengaruh Penggunaan Mineral Tambahan Pada Campuran Beton

Agus Santosa Sudjono¹⁾

Abstrak

Artikel ini membahas pengaruh penggunaan mineral tambahan pada campuran beton berdasarkan hasil analisis waktu layan. Analisis waktu layan dimodelkan sebagai fungsi dari karakteristik bahan mentah dan campuran beton yang digunakan. Dasar perhitungan waktu layan bangunan beton adalah kerusakan beton yang diakibatkan oleh korosi baja tulangan. Dari hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa penambahan silicafume pada campuran beton adalah metode paling efektif untuk meningkatkan waktu layan bangunan beton. Selain itu, penambahan silicafume, slag, dan fly ash pada campuran beton membuat beton lebih ramah terhadap lingkungan.

Kata-kata Kunci: Waktu layan, korosi, slag, fly ash, silicafume.

Abstract

This paper discussed about the effects of mineral additions on mix-design of concrete based on service life analysis. The service life analysis was modeled as function of raw material characteristics and mix-design of concrete. The deterioration of concrete structure that caused by corrosion became consideration of service life analysis in this paper. The results of simulation show that adding silicafume to mix-design concrete is most effective method to increase the service life of concrete structure. Furthermore, adding silicafume, slag, and fly ash to mix-design of concrete make concrete more friendly to global environment.

Keywords: Service life, corrosion, slag, fly ash, silicafume.

1. Pendahuluan

Pembangunan prasarana umum selain bertujuan untuk meningkatkan kemudahan cara hidup manusia juga untuk mendorong pertumbuhan perekonomian di suatu negara. Setelah bangkit dari krisis ekonomi yang berkepanjangan, Pemerintah Indonesia saat ini mencanangkan pembangunan infrastruktur di berbagai bidang untuk meningkatkan pertumbuhan perekonomian. Pemerintah mengikutsertakan swasta untuk membangun prasarana transportasi, prasarana energi, prasarana komunikasi, dan sebagainya (Cheow, 2005).

Kombinasi beton dan baja yang dinamakan beton bertulang telah dikenal sebagai bahan konstruksi utama pada abad 20 yang lalu. Beton bertulang diperkirakan tetap menjadi bahan konstruksi utama pada abad 21 ini. Beton bertulang selain mempunyai kelebihan pada karakteristik bahannya juga murah dari segi ekonomi. Karena itu, beton bertulang pun menjadi bahan konstruksi utama pada pembangunan prasarana

umum di negara kita saat ini. Misalnya, beton bertulang yang bersifat kaku dipilih sebagai bahan perkerasan jalan karena lebih murah dan berkualitas jika dibandingkan dengan aspal (Bambang, 2004). Pada artikel ini, beton bertulang untuk selanjutnya hanya dituliskan dengan beton saja.

Pada awalnya, beton dikenal sebagai bahan konstruksi yang semi permanen. Sifat semi permanen adalah suatu bahan dapat bertahan sampai waktu layannya tanpa perlu dilakukan pemeliharaan yang khusus. Akan tetapi, hasil investigasi di lapangan dan penelitian di laboratorium menunjukkan bahwa beton dapat mengalami kerusakan akibat kondisi lingkungan di sekitarnya jika tidak dilakukan pemeliharaan dengan baik. Kerusakan tersebut mengakibatkan kinerja bangunan beton menjadi turun. Jika kerusakan semakin parah maka bangunan beton tidak dapat berfungsi dengan baik atau dengan kata lain waktu layan bangunan beton itu sudah berakhir.

Proses kerusakan beton akibat kondisi lingkungan di sekitarnya membutuhkan waktu yang lama, tetapi

1. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 05 April 2005 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 02 Juni 2005 - 25 Juli 2005. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 29 Juli 2005 hingga 02 Agustus 2005.

kerusakan itu dapat terjadi secara mendadak. Kerusakan tersebut dapat terjadi sebelum waktu layan rencananya terpenuhi. Kondisi ini sangat berbahaya bagi orang banyak karena bangunan prasarana umum umumnya terbuat dari beton. Karena itu, kerusakan beton akibat penurunan keawetannya membuat ketakutan masyarakat umum di Jepang (Kobayashi, 1999).

Belajar dari peristiwa di Jepang, pembangunan prasarana umum yang sedang dilaksanakan saat ini sudah seharusnya jika memperhitungkan keawetan beton yang digunakan. Peningkatan keawetan beton tidak selalu berarti memperbesar biaya proyek. Dari hasil penelitian di laboratorium menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash*, *slag* dan *silicafume* pada campuran beton dapat meningkatkan keawetan beton. Selain itu, penggunaan *fly ash*, *slag*, dan *silicafume* pada beton lebih ekonomis dibandingkan dengan menaikkan unit berat semen.

Artikel ini membahas pengaruh penggunaan mineral tambahan pada campuran beton dari hasil analisis waktu layan bangunan beton. Analisis waktu layan bangunan beton hanya didasarkan pada kerusakan beton akibat korosi baja tulangan. Korosi baja tulangan tersebut diakibatkan oleh infiltrasi ion Cl^- ke dalam beton. Fokus dari artikel ini membuat model untuk menganalisis waktu layan bangunan beton. Studi literatur terhadap hasil-hasil penelitian yang berhubungan dengan korosi baja tulangan dilakukan untuk mendefinisikan parameter-parameter yang diperlukan oleh model yang dibuat. Analisis waktu layan yang dimodelkan pada artikel ini dapat menghitung masa layan bangunan beton berdasarkan komposisi campuran beton yang digunakan karena parameter-parameter dari berbagai aspek telah dapat didefinisikan.

2. Waktu Layan Bangunan Beton

Jika tidak terjadi bencana alam yang besar atau kesalahan perencanaan struktur maka waktu layan suatu bangunan ditentukan oleh bahan konstruksi yang digunakan. Misalnya, bangunan beton yang sebagian besar menggunakan beton dan baja tulangan, waktu layannya ditentukan oleh waktu layan dari beton dan baja tulangan. Beton selain berfungsi sebagai bahan struktural juga berfungsi sebagai pelindung keawetan baja tulangan yang ada di dalamnya. Karena itu, kualitas beton itu sendiri sangat berpengaruh besar pada waktu layan bangunan beton.

Waktu layan suatu bahan adalah waktu dari bahan selesai diproduksi sampai waktu dimana bahan sudah mengalami kerusakan dan tidak dapat berfungsi dengan baik. Keawetan suatu bahan mengalami penurunan dengan bertambahnya umur bahan. Fungsi perubahan keawetan bahan terhadap waktu dan batas

keawetan bahan yang diijinkan adalah dua parameter yang penting untuk menghitung waktu layan suatu bahan. Parameter yang pertama bergantung pada pendefinisan mekanisme kerusakan yang mungkin terjadi berdasarkan kondisi lingkungan dimana lokasi bahan digunakan. Pengaruh kondisi lingkungan di sekitar bangunan beton yang dapat menyebabkan kerusakan adalah perubahan temperatur dan kelembaban, serangan zat-zat kimia yang berbahaya, abrasi, dan sebagainya.

Kerusakan pada beton selain disebabkan oleh pengaruh kondisi lingkungan di sekitarnya juga dapat disebabkan dari dalam beton itu sendiri. Penyebab kerusakan dari dalam beton sendiri umumnya adalah pemakaian bahan dasar yang di bawah standar, dan proses pembuatan yang tidak benar. Karena itu, fungsi perubahan keawetan beton terhadap waktu harus dimodelkan berdasarkan bahan-bahan dasar yang digunakan, dan campuran betonnya.

Pada kenyataannya, suatu struktur beton dapat mengalami penurunan keawetannya diakibatkan oleh lebih dari satu penyebab kerusakan secara bersamaan. Akan tetapi, mekanisme dari masing-masing kerusakan yang terjadi pada beton adalah kompleks. Oleh karena itu, untuk mempermudah pemodelan, fungsi perubahan keawetan beton terhadap waktu didefinisikan berdasarkan satu penyebab kerusakan yang paling dominan pada kondisi lingkungan dimana bangunan beton berada. Sebagai studi awal tentang waktu layan beton, pada artikel ini dibahas tentang prediksi waktu layan bangunan beton berdasarkan infiltrasi ion Cl^- yang menyebabkan korosi baja tulangan. Hasil studi ini dapat digunakan untuk memprediksi waktu layan bangunan beton yang berada di sekitar garis pantai.

3. Mekanisme Korosi pada Baja Tulangan Beton

Pada kondisi basa di permukaan baja terdapat lapisan pasif baja yang tipis. Lapisan pasif baja ini berguna untuk melindungi baja dari korosi. Lapisan pasif baja tersebut menjadi hilang jika kondisi di sekeliling baja berubah menjadi asam. Beton adalah bahan yang bersifat alkali, pH beton sekitar 12-13 sehingga baja tulangan di dalam beton aman terhadap korosi.

Beton secara makro terlihat sebagai material yang kuat dan masif, tetapi jika dilihat secara mikro maka beton adalah material yang berpori dengan diameter yang kecil. Pori-pori di dalam beton pada umumnya adalah menerus. Pori-pori seperti itu dinamakan pori-pori kapiler. Pori-pori kapiler berdiameter $3\text{nm}-2\mu\text{m}$ (Hanehara, 1993). Unsur atau senyawa di sekitar beton dapat berinfiltasi atau berdifusi ke dalam beton melalui pori-pori kapiler karena ada perbedaan konsentrasi. Misalnya bangunan beton di sekitar

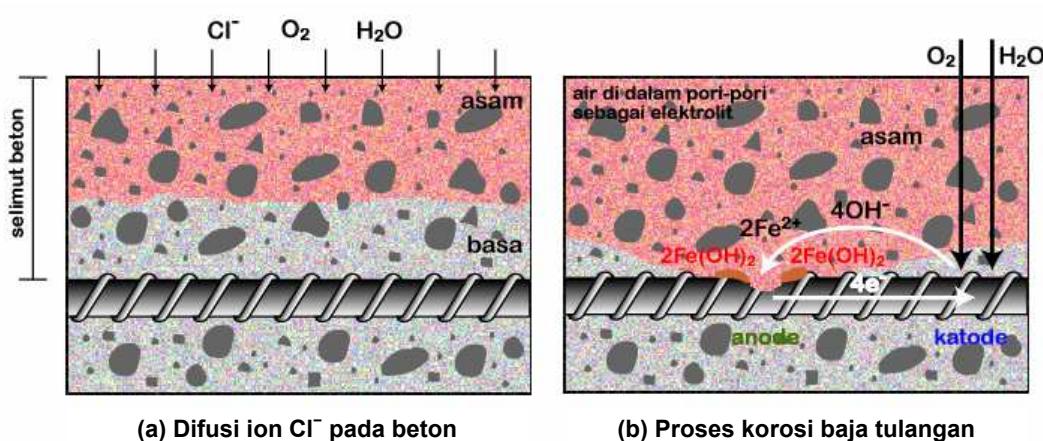
pantai, ion Cl^- dari air laut dapat berdifusi ke dalam beton karena konsentrasi ion Cl^- di luar beton lebih tinggi daripada di dalam beton.

Salah satu penyebab korosi pada baja tulangan di dalam beton adalah infiltrasi ion Cl^- ke dalam beton. Setelah ion Cl^- berinfiltrasi sampai ke permukaan baja tulangan dan mampu menghilangkan lapisan pasif baja, permukaan baja tulangan mulai dapat melepaskan elektron dan berubah Fe^{2+} . Bagian permukaan baja tersebut menjadi *anode* dari elektrokimia korosi. Elektron yang dilepaskan dari reaksi *anode* menyebabkan gas O_2 dan H_2O yang terdapat di atas permukaan baja yang masih tertutup oleh lapisan pasifnya bereaksi dan membentuk ion OH^- . Bagian ini dinamakan katode dari elektrokimia korosi. Kedua ion itu membentuk Fe(OH)_2 sebagai bentuk awal senyawa hasil korosi. Perbandingan volume antara Fe dan Fe(OH)_2 adalah kira-kira 2.5 kali. Ekspansi dari hasil korosi dapat menyebabkan keretakan selimut beton. Proses infiltrasi ion Cl^- dan

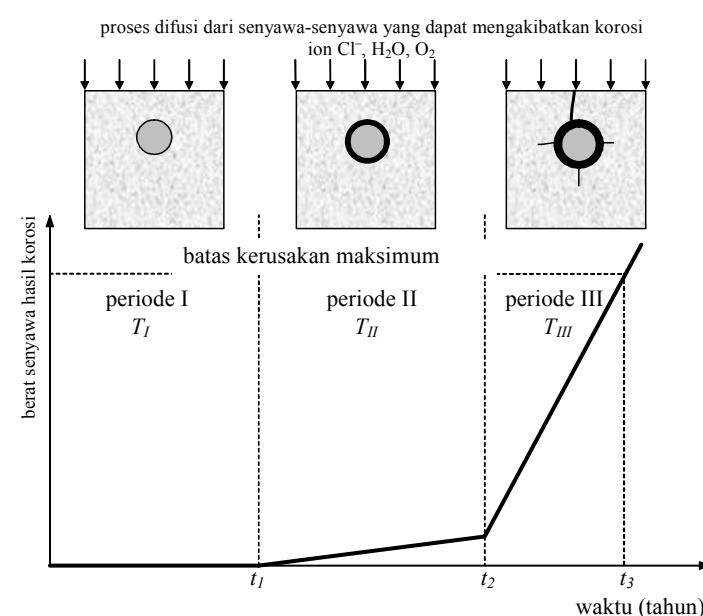
korosi dari baja tulangan dalam beton diilustrasikan pada **Gambar 1**.

4. Pemodelan Waktu Layang Bangunan Beton

Kerusakan beton akibat korosi baja tulangan tergantung dari kecepatan reaksi korosi. Kecepatan reaksi korosi dapat diukur dari berat senyawa hasil korosi. Jika diasumsikan berat jenis dari baja dan senyawa hasil korosi adalah hampir sama maka kecepatan reaksi korosi dapat dihitung dari perbandingan berat senyawa hasil korosi dengan waktu. Perhitungan ini dapat diperoleh dari pengukuran berat senyawa hasil korosi baik di laboratorium maupun di lapangan. Karena itu, artikel ini memodelkan kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan dalam hubungan antara berat senyawa hasil korosi dengan waktu, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2** (Sudjono, 2005).



Gambar 1. Proses kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan



Gambar 2. Model kerusakan bangunan beton akibat korosi (Sudjono, 2005)

Menurut **Gambar 2**, kerusakan bangunan beton akibat korosi baja tulangan dibagi dalam tiga periode proses. T_I adalah periode belum terjadi reaksi korosi, yaitu dari waktu bangunan beton selesai dibangun sampai dengan waktu dimana ion Cl^- mencapai permukaan baja tulangan. T_{II} adalah periode yang diawali hilangnya lapisan pasif baja dan reaksi korosi mulai terjadi sampai dengan waktu dimana senyawa hasil korosi mengisi semua rongga yang ada di zona transisi dan siap untuk memberikan tekanan pada selimut beton. T_{III} adalah periode dimana senyawa hasil korosi memberikan tekanan pada selimut beton sampai dengan waktu dimana keretakan besar dan parah terjadi di permukaan beton. Waktu layan bangunan beton adalah jumlah waktu dari ketiga periode seperti yang dituliskan di bawah ini.

$$T_{\text{layan}} = T_I + T_{II} + T_{III} \quad (1)$$

T_I tergantung dari waktu difusi ion Cl^- dari luar beton untuk mencapai permukaan baja tulangan. Kualitas beton sangat berpengaruh pada T_I . Waktu difusi ion Cl^- dihitung berdasarkan persamaan Fick II. Berdasarkan persamaan Fick II itu, T_I dapat dihitung dari pemodelan persamaan di bawah ini (Sudjono, 2005).

$$T_I = \frac{1}{D_{cl}} \left(\frac{c}{k} \right)^2 \quad (2)$$

dimana, D_{cl} adalah koefisien difusi ion Cl^- , c adalah tebal selimut beton, dan k adalah konstanta tanpa satuan. Nilai k adalah sangat tergantung dari perbandingan antara konsentrasi ion Cl^- di permukaan beton dengan konsentrasi ion Cl^- di dalam beton yang dapat mengakibatkan hilangnya lapisan pasif baja tulangan.

Reaksi korosi sangat bergantung pada tersedia gas O_2 di dalam beton. Gas O_2 di dalam beton adalah hasil difusi dari gas O_2 yang ada di permukaan beton. Karena itu, kecepatan reaksi korosi baja tulangan beton dapat diasumsikan sama dengan kecepatan difusi gas O_2 ke dalam beton. Jika koefisien difusi gas O_2 adalah D_{O_2} dengan satuan mm^2/tahun , tebal selimut beton adalah c dengan satuan mm dan konsentrasi gas O_2 di permukaan beton adalah C_{O_2} dengan satuan mg/mm^3 , maka kecepatan reaksi korosi tulangan beton r dalam satuan ($\text{mg}/\text{mm}^2/\text{tahun}$) dapat dituliskan seperti **Persamaan 3**. **Persamaan 3** ini adalah hasil modifikasi dari persamaan yang diusulkan oleh *Japan Concrete Institute* (Sudjono, 2005).

$$r = \frac{D_{O_2}}{c} C_{O_2} \quad (3)$$

Zona transisi pada permukaan baja tulangan dengan beton dapat diasumsikan seperti layaknya zona transisi

pada permukaan agregat dengan pasta semen. Akibat ‘efek dari dinding’ partikel-partikel semen tidak dapat menempel pada permukaan agregat sehingga senyawa hasil hidrasi pun tidak dapat mengisi ruangan di sekitar permukaan baja tulangan. Hal itu menyebabkan zona transisi lebih berpori. Volume pori-pori dan tebal dari zona transisi tergantung dari kualitas beton. Karena itu, T_{II} adalah tebal kumulatif pori-pori di zona transisi dibagi dengan kecepatan reaksi korosi, seperti yang dimodelkan pada persamaan di bawah ini (Sudjono, 2005).

$$T_{II} = \frac{\rho t_{ez} v}{1.5r} \quad (4)$$

dimana, ρ adalah berat jenis dari senyawa hasil korosi ($7.85 \text{ mg}/\text{mm}^3$), t_{ez} adalah tebal zona transisi pada permukaan baja tulangan (mm), v adalah proporsi volume pori-pori di zona transisi (tanpa satuan), r adalah kecepatan reaksi korosi ($\text{mg}/\text{mm}^2/\text{tahun}$), dan 1.5 adalah faktor perbesaran volume dari senyawa hasil reaksi korosi.

Hubungan lebar celah keretakan dengan berat senyawa hasil korosi dapat dibuat berdasarkan hasil pengukuran di laboratorium. T_{III} adalah waktu dimana kinerja bangunan beton mengalami penurunan akibat keretakan. Jika lebar celah keretakan yang menyebabkan penurunan kinerja bangunan diketahui maka perhitungan T_{III} dapat dimodelkan. T_{III} adalah berat senyawa hasil korosi per luas yang dapat menimbulkan bangunan beton rusak dibagi dengan kecepatan difusi dari oksigen.

$$T_{III} = \frac{M - M_{tr}}{r} \quad (5)$$

dimana, M adalah berat total dari senyawa hasil korosi (mg/mm^2), M_{tr} adalah berat dari senyawa hasil korosi yang mengisi pori-pori di zona transisi (mg/mm^2), dan r adalah kecepatan reaksi korosi ($\text{mg}/\text{mm}^2/\text{tahun}$).

5. Pemodelan Parameter Yang Digunakan

Pada artikel ini memodelkan parameter-parameter yang digunakan dengan melakukan studi literatur hasil-hasil penelitian tentang sifat dan karakteristik beton, serta kerusakan beton akibat korosi. Data yang diperoleh kemudian diolah untuk mendefinisikan bentuk persamaan dan nilai konstanta dari masing-masing parameter-parameter.

5.1 Konsentrasi ion Cl^- awal

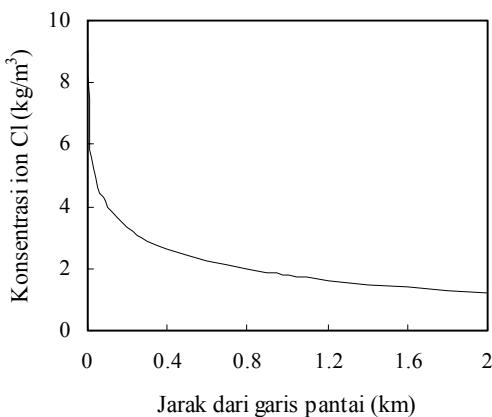
Sumber ion Cl^- umumnya dari air laut. Ion Cl^- dapat terkandung dalam uap air hasil penguapan air laut. Uap air tersebut dapat diterbangkan oleh angin, kemudian menempel pada permukaan bangunan

beton. Persamaan dari perubahan konsentrasi ion Cl^- awal di permukaan beton terhadap jarak dari garis pantai dapat dimodelkan seperti di bawah ini (Sudjono, 2004).

$$C_0(X) = C_0 \times \exp \left[a \left(\frac{X}{X_0} \right)^b \right] \quad (6)$$

dimana, C_0 adalah konsentrasi ion klorida awal di laut (kg/m^3), a adalah parameter akibat pengaruh kuat angin, b adalah parameter akibat pengaruh topografi daerah, X adalah jarak bangunan dari garis pantai (km) dan X_0 adalah perkiraan jarak terjauh dari jangkauan ion Cl^- (km).

Jika diasumsikan nilai $C_0=9\text{kg/m}^3$, nilai parameter $a=-2.0$, nilai parameter $b=0.3$, dan perkiraan jarak terjauh dari jangkauan ion Cl^- adalah $X_0=2\text{km}$, maka perubahan konsentrasi ion Cl^- awal terhadap jarak dari garis pantai ditunjukkan pada **Gambar 3**. Pada gambar ini konsentrasi ion Cl^- awal sejauh 2km dari pantai diperkirakan 1.218kg/m^3 .



Gambar 3. Konsentrasi ion Cl^- dan jarak dari garis pantai

5.2 Koefisien difusi ion Cl^-

Koefisien difusi ion Cl^- didasarkan pada kualitas beton dengan umur minimal 28 hari. Persamaan regresi dari data hasil pengukuran koefisien difusi ion $\text{Cl}^- (D_{cl})$ di lapangan dan laboratorium dari berbagai jenis beton dapat dimodelkan seperti pada **Persamaan 7**. Persamaan ini dapat menghitung koefisien difusi ion Cl^- dari berbagai kondisi campuran beton. **Persamaan 7** adalah modifikasi dari persamaan yang diusulkan oleh Noguchi (Noguchi, 2001).

$$D_{cl} = c_T \times k \times R \times \left[1576.8 \exp \left(-\frac{1.6}{w_0} \right) \right] \quad (7)$$

dimana, w_0 adalah W/C dari campuran beton, c_T adalah faktor reduksi akibat pengaruh jenis semen, R adalah faktor reduksi akibat pengaruh penggunaan mineral tambahan, dan k adalah faktor reduksi akibat pengaruh penggunaan zat kimia tambahan. Unit satuan untuk koefisien difusi yang digunakan pada artikel ini adalah mm^2/tahun .

Semen *Portland* normal (OPC) digunakan sebagai standar pengukuran, maka nilai c_T dari semen OPC adalah 1.0. Semen *portland* kuat awal tinggi (HPC) mempunyai kecepatan reaksi lebih cepat daripada OPC sehingga dapat diasumsikan semen HPC mempunyai koefisien difusi yang lebih kecil dari OPC, yaitu $c_T=0.90$. Sedangkan untuk semen *portland* panas sedang dan rendah mempunyai kecepatan reaksi hidrasi yang lebih lambat daripada semen OPC tetapi menghasilkan mikro struktur yang lebih masif. Karena itu, nilai c_T dari semen *portland* panas sedang dan rendah diasumsikan lebih kecil dari HPC dan OPC yaitu $c_T=0.80$.

Penggunaan zat kimia tambahan mengakibatkan pengurangan unit berat air sehingga dapat meningkatkan kualitas beton baik pada waktu basah maupun keras. Jika tanpa digunakan zat kimia tambahan nilai dari k adalah nol maka penggunaan zat kimia mengakibatkan nilai koefisien difusi ion Cl^- menjadi lebih kecil. Pada artikel ini diambil $k=0.7$ jika digunakan zat kimia tambahan, seperti *water reducing admixture* dan *superplasticizer*.

Penggunaan mineral tambahan, seperti *slag*, *fly ash* dan *silicafume*, sebagai pengganti sebagian agregat menghasilkan kualitas beton yang lebih baik dari beton normal. Akibat penambahan itu, koefisien difusi beton normal dikalikan dengan faktor reduksi R . **Tabel 1** menunjukkan persamaan dari faktor reduksi R . Persamaan tersebut adalah modifikasi dari persamaan yang diusulkan oleh Noguchi (Noguchi, 2001). Parameter p pada **Tabel 1** adalah presentasi dari penggunaan mineral tambahan untuk menggantikan agregat (%). *Slag* dapat digunakan dalam presentasi yang besar karena mempunyai komposisi kimiawi yang hampir menyerupai semen, dan kehalusan partikelnya lebih halus dari partikel semen. Jika *fly ash* ditambahkan pada semen *portland* maka terjadi reaksi *pozzolan*, mikro struktur dari beton menjadi lebih kecil akibat penambahan senyawa hasil reaksi *pozzolan* tersebut. Akan tetapi, deviasi dari kualitas beton yang menggunakan *fly ash* sangat besar. Presentasi penggunaan *fly ash* yang optimal adalah sekitar 20% dari unit berat semen. Karena itu, faktor reduksi R dari penambahan *fly ash* lebih dari 20% diasumsikan konstan. Sedangkan, *silicafume* adalah mineral tambahan yang mempunyai partikel yang sangat halus sekali yang dapat berfungsi sebagai *micro-filler effect* dan reaksi *pozzolan* dapat berlangsung lebih cepat daripada *fly ash*. Akibat dari

Tabel 1. Persamaan dari faktor reduksi R

Mineral tambahan	Persamaan	Keterangan
Slag	$R = 1 - 1.4(p/100)$	
Fly ash	$R = 1 - (p/100)$	Jika penggunaan <i>fly ash</i> adalah lebih dari 20% maka $R=0.8$.
Silicafume	$R = 1 - 8(p/100)$	Jika penggunaan <i>silicafume</i> adalah lebih dari 10% maka $R=0.2$.

micro-filler effect dan reaksi *pozzolan* tersebut, mikro struktur beton menjadi lebih masif. Presentasi penambahan *silicafume* yang optimal adalah 10% dari unit berat semen. Karena itu, faktor reduksi dari penambahan *silicafume* lebih dari 10% diasumsikan konstan.

5.3 Koefisien difusi gas O₂

Koefisien difusi gas O₂ juga didasarkan pada kualitas beton dengan umur minimal 28 hari. Proses difusi dari gas O₂ dan ion Cl⁻ pada prinsipnya adalah sama yaitu akibat perbedaan konsentrasi. Tetapi perbedaannya adalah kondisi dari pori-pori dalam beton. Ion Cl⁻ dapat berinfiltrasi ke dalam beton jika kondisi pori-pori adalah terisi oleh air, sedangkan gas O₂ adalah sebaliknya. Kondisi pori-pori beton tergantung pada kelembaban relatif beton. Pada artikel ini, kelembaban relatif beton diambil sekitar 60%, yaitu kelembaban relatif rata-rata beton di sekitar laut. Persamaan regresi dari data pengukuran dapat dimodelkan seperti pada **Persamaan 8**.

$$D_{O_2} = c_T \times k \times r \times \left[\left(2.0 \times 10^7 \right) \exp \left(-\frac{2.0}{w_0} \right) \right] \quad (8)$$

Karena jenis semen, mineral tambahan dan zat kimia tambahan mempunyai pengaruh terhadap mikro struktur dari pasta semen dalam beton, maka pemodelan parameter c_T , k dan r untuk koefisien difusi gas O₂ dapat diasumsikan sama dengan pemodelan untuk koefisien difusi ion Cl⁻, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

5.4 Berat senyawa hasil reaksi korosi

Hubungan berat senyawa hasil reaksi korosi per luas permukaan baja dengan lebar celah keretakan yang ditimbulkannya selain dapat dicari dengan hasil pengukuran juga dapat dicari dengan hasil FEM program. Persamaan regresi dari data hasil analisis FEM tersebut ditunjukkan seperti di bawah ini (Iba, 2000).

$$W_{corr} = \frac{\rho}{\pi(\varphi-1)} \frac{c + D_b}{3D_b + 5c} (\alpha_0 \beta_0 \gamma_0 + \alpha \beta W_\delta) \quad (9)$$

dimana, W_{corr} adalah berat senyawa hasil korosi per satuan luas (mg/mm²), ρ adalah berat jenis baja (7.85mg/mm³), φ adalah ekspansi senyawa hasil korosi, c adalah tebal selimut beton (mm), D_b adalah diameter baja tulangan (mm), W_δ adalah lebar celah keretakan (mm), α adalah faktor akibat pengaruh tebal selimut beton dan diameter baja tulangan, β adalah faktor akibat pengaruh kualitas beton, α_0 adalah berat senyawa hasil korosi pada saat keretakan awal terjadi, β_0 adalah faktor reduksi dari diameter baja, γ_0 adalah faktor reduksi dari kualitas beton. Faktor-faktor reduksi di atas masing-masing dihitung dengan persamaan-persamaan empirik di bawah ini.

$$\alpha = (0.0007D_b - 0.04)c + (-0.066D_b + 5.92) \quad (10a)$$

$$\beta = 0.0016f'_c + 1.0037 \quad (10b)$$

$$\alpha_0 = 0.0003c^{1.5558} \quad (10c)$$

$$\beta_0 = 3.8865D_b^{-0.537} \quad (10d)$$

$$\gamma_0 = 0.0049f'_c + 0.8539 \quad (10e)$$

dimana, adalah kuat tekan beton.

5.5 Kuat tekan beton

Kuat tekan beton diperlukan untuk menghitung berat senyawa hasil korosi yang dapat menyebab bangunan beton rusak. Kuat tekan beton tergantung dari kualitas pasta semen, agregat halus dan agregat kasar. Penambahan agregat bertujuan untuk mengurangi unit berat dari semen agar beton lebih ekonomis, tetapi akibatnya kekuatan beton lebih rendah kekuatan pasta semen atau mortar. Jika kuat tekan mortar dari semen *portland* normal ditetapkan sebagai kuat tekan standar beton (f'_p) maka kuat tekan dari sembarang beton (f'_c) dapat dimodelkan dalam bentuk perkalian faktor-faktor koreksi dari bahan yang digunakan dengan kuat tekan standar tersebut. Prediksi kuat tekan beton dapat dimodelkan seperti persamaan di bawah ini (Noguchi, 2001).

$$f'_p = \left[1 + \frac{-1}{1 + \exp\left(\frac{-(1/w_0 - 3.3)}{T}\right)} \right] \frac{[a(1/w_0) + b]K}{10} + \left[\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-(1/w_0 - 3.3)}{T}\right)} \right] \frac{[275(1/w_0)]}{10} \quad (11a)$$

$$f'_c = R_g \times R_{g2} \times R_{air} \times R_{mix} \times f'_p \quad (11a)$$

dimana, a , b , K dan T adalah koefisien yang tergantung dari jenis semen, w_0 adalah W/C, R_g adalah faktor koreksi akibat jenis agregat kasar, R_{g2} adalah faktor koreksi akibat tekstur permukaan agregat kasar, R_{air} adalah faktor koreksi dari kadar udara dalam beton dan R_{mix} adalah faktor koreksi akibat penggunaan mineral tambahan. Unit satuan kuat tekan beton yang digunakan adalah MPa.

Nilai koefisien a , b , K dan T dari jenis semen ditunjukkan pada **Tabel 2**. Nilai-nilai tersebut diperoleh dari regresi data pengukuran laboratorium. Kecenderungan dari pemodelan **Persamaan 11a** adalah semakin kecil W/C maka kuat tekan beton hampir sama untuk semua jenis semen.

Nilai faktor koreksi R_g adalah tergantung dari jenis agregat kasar yang digunakan, ukuran maksimum dan unit beratnya dalam beton. Faktor koreksi R_g dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini (Noguchi, 2001).

$$R_g = \left[1 - \left(\frac{a_g}{w_0 + 1} \right) \times \frac{G}{1000} \right] \left[1 - \left(\frac{b_g}{w_0} + c_g \right) \right] (\log G_{max} - \log A_g) \quad (12)$$

dimana, a_g , b_g , dan c_g adalah koefisien yang nilainya tergantung dari jenis agregat, G adalah unit berat agregat kasar dalam beton (kg/m^3), G_{max} adalah ukuran agregat kasar maksimum (mm), A_g adalah pengaruh dari ukuran agregat (misalnya jika $G_{max}=20\text{mm}$ maka $A_g=3\text{mm}$). Jika digunakan jenis batu *limestone*, *granite* dan agregat buatan maka nilai dari koefisien a_g , b_g , dan c_g dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Koefisien R_{g2} tergantung dari tekstur permukaan agregat kasar. Batu pecah mempunyai tekstur permukaan yang lebih kasar dari pada batu kerikil. Selain itu, batu pecah mempunyai bentuk yang tidak teratur sehingga daya lengkatnya dengan mortar lebih tinggi daripada batu kerikil sungai. Karena itu, untuk batu pecah $R_{g2}=1.0$ dan untuk batu kerikil sungai $R_{g2}=0.88$.

Kadar udara dalam beton mempengaruhi kuat tekan beton. Jika kadar udara bertambah 1% maka kuat beton akan turun sekitar 5% untuk beton normal, tetapi akan turun 2.8% untuk beton mutu tinggi. Selain itu, kadar udara juga dipengaruhi oleh kualitas agregat kasar yang digunakan. Faktor koreksi dari kadar udara (R_{air}) dimodelkan seperti pada persamaan di bawah ini (Noguchi, 2001).

$$R_{air} = 1 - k_{air} \times \left(\frac{A_{air}}{100} \right) \quad (13)$$

dimana, A_{air} adalah kadar udara dalam beton (%), k_{air} adalah koefisien yang nilainya dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Pemodelan persamaan faktor koreksi akibat penggunaan mineral tambahan (R_{mix}) ditunjukkan pada **Tabel 5**. Persamaan-persamaan dalam **Tabel 5** adalah hasil modifikasi dari persamaan yang diusulkan oleh Noguchi (Noguchi, 2001). Arti simbol huruf yang digunakan pada **Tabel 5** sebagai berikut: w_p adalah proporsi air terhadap semen dan mineral tambahan, H

Tabel 2. Nilai koefisien a , b , K dan T (Noguchi, 2001)

Jenis semen	a	b	K	T
Semen <i>portland</i> normal	0.838	-0.353	400	0.435
Semen <i>portland</i> kuat awal tinggi	0.843	-0.321	500	0.254
Semen <i>portland</i> panas rendah	1.127	-0.739	300	0.195

Tabel 3. Nilai koefisien a_g , b_g , dan c_g (Noguchi, 2001)

Jenis agregat	Berat jenis	Absorpsi	a_g	b_g	c_g
<i>Sandstone</i>	2.63	0.0059	-0.0705	-0.0283	0.0826
<i>Granite</i>	2.62	0.0049	0.3300	0.0234	-0.0597
Agregat buatan	1.29	0.2500	1.3540	0.0380	-0.0710

Tabel 4. Nilai koefisien k_{air} (Noguchi, 2001)

Proporsi air semen (W/C)	Berat jenis agregat ≤ 2.40	Berat jenis agregat > 2.40
> 0.45	0.05	0.05
≤ 0.45	0.04	0.03

Tabel 5. Persamaan faktor koreksi R_{mix}

Mineral tambahan	Persamaan	Keterangan
Slag	$R_{mix} = 1 + \left(0.123 + \frac{256}{10^6} H - \frac{1.8 \times 10^{-6} (4610 + H)^{\frac{3}{2}}}{1 + w_p} \right) \left[\frac{(p/100)}{0.3} \right]$	untuk $p \leq 30\%$
	$R_{mix} = (R_{30}) \left(3.58 \times 10^{-5} H + 0.531 \right) \left[\frac{(p/100) - 0.3}{0.4} \right]$	untuk $p > 30\%$
Fly ash	$R_{mix} = 1 + (2.50 w_p - 0.850) \left(\frac{p}{100} \right)$	untuk $p \leq 20\%$
Silicafume	$R_{mix} = 1 + 2.5 \left(\frac{p}{100} \right)$	untuk $p \leq 10\%$
	$R_{mix} = 1.25$	untuk $p > 10\%$

adalah luas permukaan jenis dari mineral tambahan (cm^2/g), dan p adalah presentasi penggunaan mineral tambahan terhadap unit berat semen (%). Penambahan *slag*, *fly ash* dan *silicafume* dengan menggantikan sebagian bagian dari agregat umumnya dapat meningkatkan kuat tekan beton.

6. Campuran Beton dan Nilai Parameter Yang Digunakan

6.1 Campuran beton

Artikel ini melakukan simulasi waktu layan dari berbagai campuran beton. Sebagai studi kasus dalam artikel ini campuran beton dengan variasi dari W/C, jenis mineral tambahan, dan presentasi penambahan mineral tambahan. Komposisi kimiawi dari semen dan mineral tambahan yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 6**. Kombinasi dari semen dan mineral tambahan yang menjadi studi kasus pada artikel ini ditunjukkan pada **Tabel 7**. Sifat fisik dari agregat halus dan kasar yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 8**. *Fine modulus* (FM) dari agregat halus yang digunakan diasumsikan 2.80.

Campuran beton direncanakan menurut metode yang diusulkan oleh *Japan Society of Civil Engineers* (Machida, 1999). *AE water reducing admixture* digunakan untuk mengatur kualitas beton basah.

Semua campuran beton direncanakan mempunyai *slump* sekitar 8cm dan kadar udara 6%. Campuran beton tanpa mineral tambahan dinamakan campuran beton normal. Pada artikel ini, pada penambahan mineral tambahan W/C campuran beton normal 45% dipertahankan sehingga penambahan mineral tambahan mengakibatkan perbandingan W/(C+P) menjadi kecil dan rasio agregat halus (s/a) harus diperkecil. W/C 45% dipilih karena merupakan batasan perencanaan campuran beton untuk bangunan beton di sekitar pantai yang diberikan oleh peraturan beton. Hasil perhitungan campuran beton standar ditunjukkan pada **Tabel 9**.

6.2 Nilai parameter yang digunakan

Nilai parameter yang digunakan dapat dihitung berdasarkan karakteristik bahan-bahan yang digunakan dan campuran beton. Hasil perhitungan koefisien difusi ion Cl^- , koefisien difusi gas O_2 , kuat tekan, dan batas maksimum berat senyawa korosi yang menimbulkan lebar celah keretakan 0.5mm ditunjukkan pada **Tabel 10**. Berat senyawa korosi tersebut dihitung berdasarkan baja tulangan dengan diameter 19mm dan tebal selimut beton 50mm. Selain itu, konsentrasi ion Cl^- yang dapat melarutkan lapisan pasif baja tulangan adalah 0.9 kg/m^3 . Tebal zona transisi dan volume pori-porinya diambil konstan untuk semua campuran beton, yaitu $35 \mu\text{m}$ dan 20%.

Tabel 6. Sifat fisik dan komposisi kimiawi dari semen dan mineral tambahan

Sifat kimiawi dan fisik	OPC (C)	Slag (Sl)	Fly ash (Fa)	Silicafume (Sf)
Sifat fisik				
Berat jenis	3.16	2.91	2.35	2.20
Luas permukaan jenis (cm^2/g)	3270	5970	5510	—
Kuat tekan 1 hari (MPa)	—	—	—	—
Kuat tekan 3 hari (MPa)	27.8	—	—	—
Kuat tekan 7 hari (MPa)	42.8	—	—	—
Kuat tekan 28 hari (MPa)	60.6	—	—	—
Komposisi kimiawi				
<i>Silicon oxide</i> (SiO_2)	22.0	32.5	62.5	93.41
<i>Alumunium oxide</i> (Al_2O_3)	5.4	13.1	23.6	0.66
<i>Ferric oxide</i> (Fe_2O_3)	3.0	0.2	5.6	0.97
<i>Calcium oxide</i> (CaO)	64.4	43.1	2.5	—
<i>Magnesium oxide</i> (MgO)	1.5	6.3	—	0.62
<i>Sulfur trioxide</i> (SO_3)	2.0	2.0	—	—
<i>Sulfur</i> (S)	—	—	—	—
<i>Sodium oxide</i> (Na_2O)	0.2	—	—	0.38
<i>Potassium oxide</i> (K_2O)	0.6	—	—	—
<i>Loss of ignition</i>	1.7	0.2	2.5	1.61

Tabel 7. Kombinasi semen dan mineral tambahan

W/C (%)	p(%)		
	Slag	Fly ash	Silicafume
45	5, 10, 20, 30	5, 10, 20	5, 10, 20

Tabel 8. Jenis dan sifat agregat

	Jenis bahan	Ukuran maksimum	Berat jenis	Absorpsi (%)
Agregat halus	Pasir sungai	5mm	2.63	2.1
Agregat kasar	granite	20mm	2.73	1.3

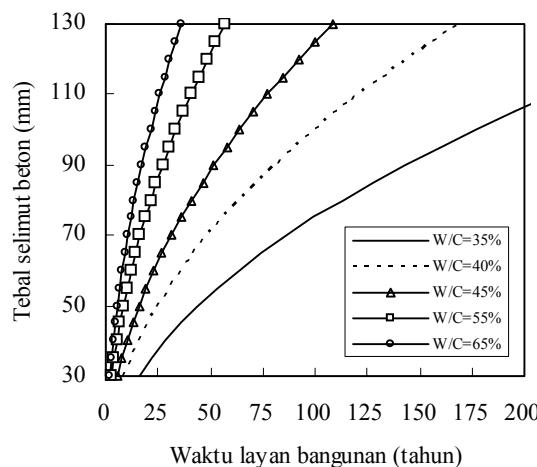
7. Hasil Simulasi dan Diskusi

7.1 Hubungan waktu layan dengan W/C dan tebal selimut beton

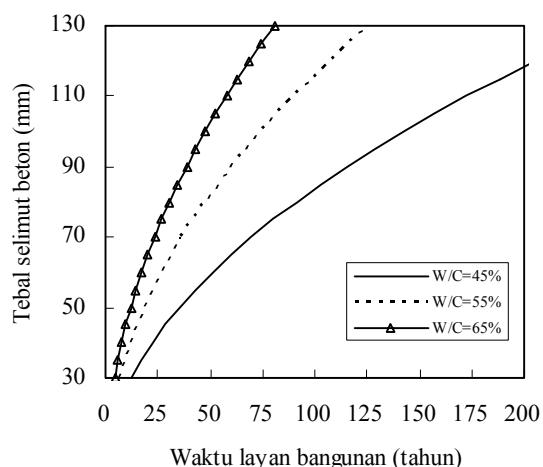
Pada simulasi mengasumsikan setelah bangunan beton selesai dibangun tidak ada keretakan pada permukaan beton. Proses difusi dari ion Cl^- , gas O_2 dan H_2O hanya melalui pori-pori di dalam beton.

Gambar 4 menunjukkan hubungan waktu layan bangunan beton dengan tebal selimut beton dan letak bangunan beton itu terhadap garis pantai. Gambar 4 (a) adalah grafik dari hubungan waktu layan

bangunan beton dengan tebal selimut beton pada garis pantai. Dari hasil simulasi ini menunjukkan bahwa waktu layan bangunan beton hanya sekitar 16 tahun jika dipakai W/C=45% dan tebal selimut beton 50mm. Untuk mencapai waktu layan 25 tahun, bangunan beton dapat dibangun dengan beberapa alternatif, seperti W/C=40% dan tebal selimut beton 50mm, W/C=45% dan tebal selimut beton 70mm, dan W/C=65% dan tebal selimut beton 110mm. Dari hasil simulasi tersebut dapat diketahui bahwa bangunan beton harus direncanakan dengan W/C 40% dan tebal selimut beton 50mm atau W/C 45% dan tebal selimut 70mm. Hasil tersebut sesuai dengan persyaratan peraturan beton.



(a) Bangunan pada garis pantai



(b) Bangunan pada 250m dari garis pantai

Gambar 4. Hubungan waktu layan dengan W/C dan tebal selimut beton

Gambar 4(b) menunjukkan dari grafik hubungan waktu layan bangunan pada 250m dari garis pantai dengan tebal selimut beton. Bangunan beton pada 250m dari garis pantai dapat dibangun dengan beberapa alternatif, seperti $W/C=45\%$ dan tebal selimut beton 40mm, $W/C=55\%$ dan tebal selimut beton 65mm, $W/C=65\%$ dan tebal selimut beton 75mm. Semakin jauh dari garis pantai, bangunan beton dapat dibangun dengan $W/C>45\%$. W/C dari campuran beton ditentukan oleh gaya dan momen yang bekerja pada bangunan beton tersebut.

7.2 Pengaruh jenis mineral tambahan pada waktu layan

Upaya lain untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap kondisi lingkungan di sekitarnya adalah dengan menambahkan mineral tambahan. Penggunaan mineral tambahan seperti *slag*, *fly ash* dan *silicafume* dapat memperkecil volume pori-pori kapiler karena reaksi *pozzolan*-nya dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ di dalam beton.

Gambar 5 menunjukkan hubungan waktu layan bangunan dan tebal selimut beton tanpa atau dengan mineral tambahan. $W/C = 45\%$ dipilih sebagai W/C campuran beton standar. **Gambar 5(a)** menunjukkan hubungan waktu layan bangunan dan tebal selimut beton dengan penambahan mineral tambahan $p=10\%$, sedangkan **Gambar 5(b)** dengan penambahan mineral tambahan $p=20\%$. Arti simbol huruf yang digunakan dalam gambar sebagai berikut: SL adalah *slag*, FA adalah *fly ash* dan SF adalah *silicafume*.

Penggunaan mineral tambahan dapat memperpanjang waktu layan dibandingkan jika hanya semen *Portland* saja. Pada presentasi penambahan yang sama, pengaruh terbesar terhadap waktu layan diberikan oleh

silicafume kemudian susul oleh *slag*, dan yang terakhir adalah *fly ash*. Jika presentasi penambahan 10% mineral tambahan dan tebal selimut beton 50mm maka waktu layan untuk OPC saja, OPC dan *slag* (SL), OPC dan *fly ash* (FA), dan OPC dan *silicafume* (SF) masing-masing adalah 16.0 tahun, 18.6 tahun, 17.8 tahun dan 80.0 tahun. Terlihat sekali bahwa penambahan *silicafume* sangat efektif sekali. Hal ini disebabkan oleh partikel *silicafume* sangat halus sehingga berfungsi sebagai *micro-filler* di antara partikel-partikel semen, serta reaksi *pozzolan* yang terjadipun lebih cepat daripada *slag* dan *fly ash*. Untuk mencapai waktu layan bangunan beton 25 tahun dapat digunakan beberapa alternatif, yaitu $W/C=45\%$ dengan penambahan *slag* atau *fly ash* 20% dan tebal selimut beton 50mm, $W/C=45\%$ dengan penambahan *silicafume* 5% dan tebal selimut 30mm. *Slag*, *fly ash*, dan *silicafume* adalah hasil produk sampingan dari industri. Karena itu, pemakaianya selain berfungsi untuk meningkatkan keawetan beton juga solusi penanganan limbah industri.

7.3 Pengaruh presentasi penambahan mineral tambahan pada waktu layan

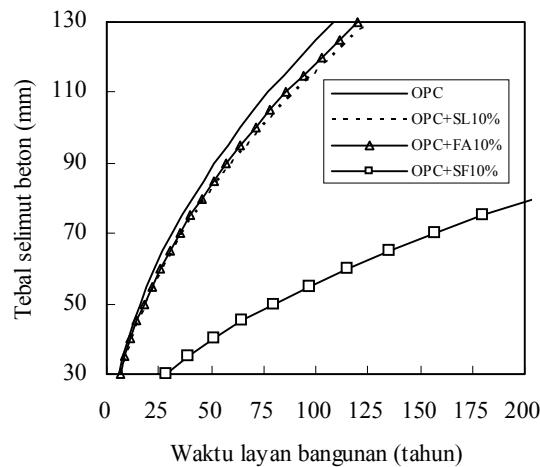
Gambar 6 menunjukkan pengaruh presentasi penambahan *slag* pada waktu layan bangunan beton. **Gambar 6(a)** adalah grafik yang menunjukkan pengaruh presentasi penambahan *slag* yang berbeda pada waktu layan bangunan beton yang berada di garis pantai. *Slag* yang mempunyai sifat yang hampir menyerupai C_2S dan ukuran partikel semen yang lebih halus dari semen *portland* sehingga *slag* dapat ditambahkan dalam presentasi yang besar. Semakin besar presentasi penambahan semakin besar pengaruh terhadap waktu layan. Presentasi penambahan *slag* yang optimum dapat sampai 50% dari berat semen,

tetapi perlu diingat bahwa presentasi penambahan *slag* yang besar akan berakibat reaksi hidrasi berlangsung lebih lambat.

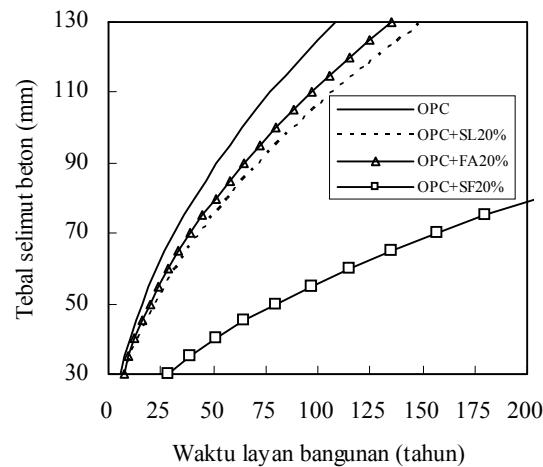
Gambar 6(b) adalah grafik yang menunjukkan perbandingan antara penambahan *slag* dan semen. Dari gambar tersebut diketahui bahwa tebal selimut beton 50mm dan campuran beton W/C=45% dengan penambahan *slag* 20% dan 30% masing-masing memberikan waktu layan 25 tahun dan 27.6 tahun. Apabila campuran beton normal dengan W/C=45% dijadikan dasar perbandingan maka dengan tebal selimut 50mm untuk mencapai waktu layan 25 tahun dapat dilakukan dengan menambah semen *portland* 46kg sehingga W/C campuran beton berubah menjadi

40% atau tetap mempertahankan W/C=45% dengan menambah *slag* 73kg.

Gambar 7 menunjukkan pengaruh presentasi penambahan *fly ash* pada waktu layan bangunan beton. **Gambar 7(a)** adalah grafik yang menunjukkan perbandingan pengaruh presentasi penambahan *fly ash* yang berbeda. Penambahan *fly ash* memberikan pengaruh pada waktu layan yang lebih kecil dari *slag*. Hal ini disebabkan oleh komposisi kimiawi *fly ash* sebagian besar adalah SiO₂ dan reaksi *pozzolan* *fly ash* berjalan lambat jika hanya dalam kondisi alkali beton saja. **Gambar 7(b)** adalah grafik yang menunjukkan antara penambahan *fly ash* dan semen. Penambahan 20% *fly ash* pada campuran beton W/C=45% hanya

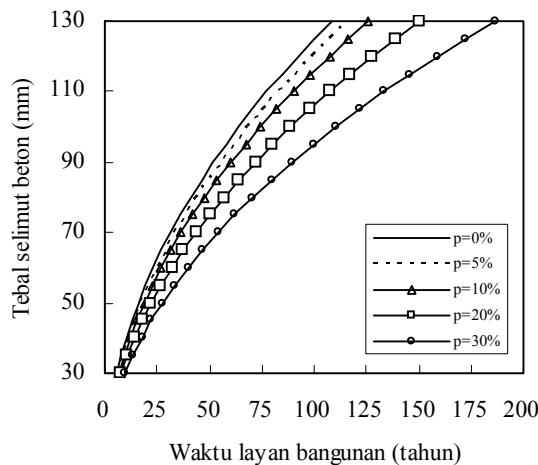


(a) Bangunan pada garis pantai ($p=10\%$)

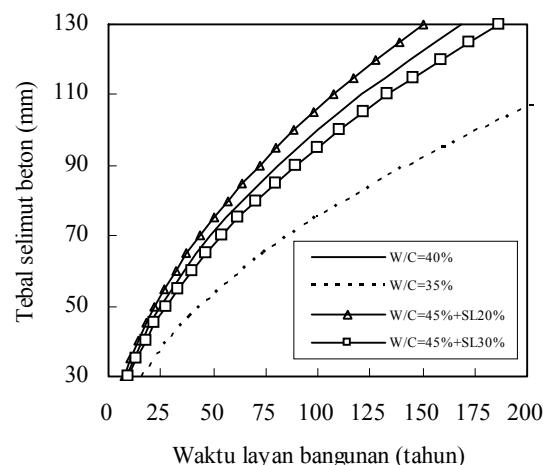


(b) Bangunan pada garis pantai ($p=20\%$)

Gambar 5. Hubungan waktu layan dengan jenis mineral tambahan (W/C=45%)



(a) Perbandingan presentasi penambahan yang berbeda (W/C=45%)



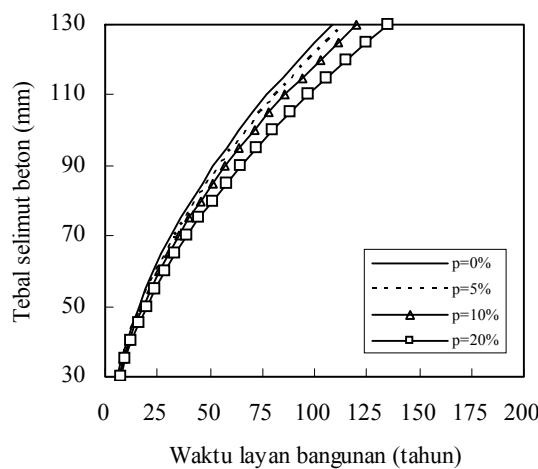
(b) Perbandingan antara penambahan *slag* dan semen

Gambar 6. Pengaruh presentasi penambahan *slag* pada waktu layan

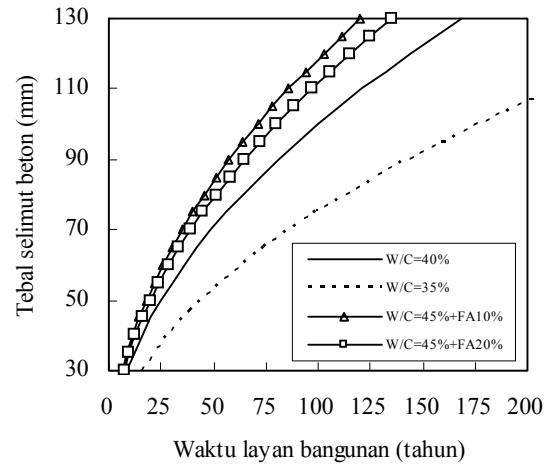
memberikan waktu layan sekitar 20 tahun jika tebal selimut beton yang digunakan adalah 50mm. Karena itu, penambahan *fly ash* hanya dapat digunakan untuk bangunan beton di daerah pantai jika dalam bentuk beton pracetak.

Gambar 8 menunjukkan pengaruh presentasi penambahan *silicafume* pada waktu layan bangunan beton. **Gambar 8(a)** adalah grafik yang menunjukkan perbandingan dari presentasi penambahan *silicafume* yang berbeda, sedangkan **Gambar 8(b)** adalah grafik yang menunjukkan perbandingan antara penambahan *silicafume* dan semen. Penambahan *silicafume* sangat efektif sekali untuk meningkatkan keawetan bangunan beton terhadap kerusakan akibat korosi baja tulangan. Penambahan *silicafume* hanya 5% saja memberikan penambahan waktu layan yang signifikan. Presentasi

penambahan *silicafume* hanya optimum 10%, sedangkan jika lebih besar dari 10% tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Hal ini terlihat bahwa grafik $p=10\%$ sama dengan grafik $p=20\%$ pada **Gambar 8(a)**. **Gambar 8(b)** menunjukkan bahwa campuran beton $W/C=45\%$ ditambah dengan *silicafume* 5% mempunyai masa layan bangunan yang lebih besar daripada campuran beton dengan $W/C=40\%$, dan campuran beton $W/C=45\%$ ditambah dengan *silicafume* 10% mempunyai waktu layan yang lauh lebih besar daripada campuran beton $W/C=35\%$. Untuk mencapai waktu layan bangunan beton 25 tahun dengan tebal selimut 50mm hanya cukup menambahkan 18kg pada campuran beton $W/C=45\%$. Jika dibandingkan dengan semen, penambahan *silicafume* lebih sedikit.

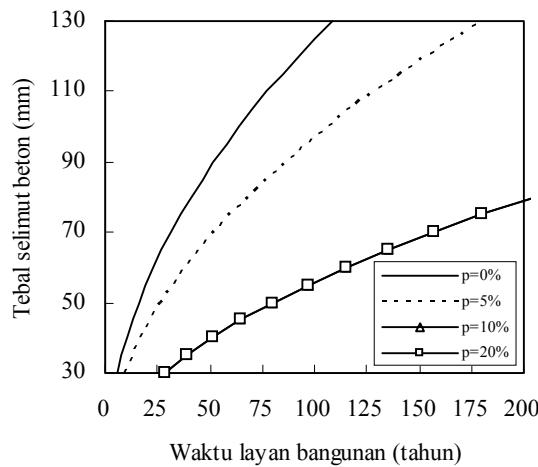


(a) Perbandingan presentasi penambahan yang berbeda ($W/C=45\%$)

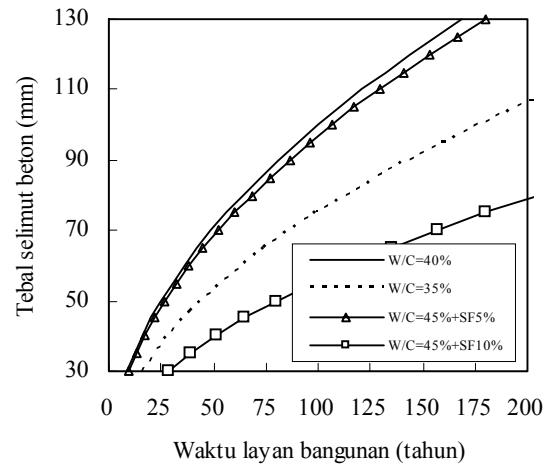


(b) Perbandingan antara penambahan *fly ash* dan semen

Gambar 7. Pengaruh presentasi penambahan *fly ash* pada waktu layan



(a) Perbandingan presentasi penambahan yang berbeda ($W/C=45\%$)



(b) Perbandingan antara penambahan *silicafume* dengan W/C

Gambar 8. Pengaruh presentasi penambahan *silicafume* pada waktu layan

Analisis waktu layan yang diusulkan pada artikel ini dapat menilai keoptimalan campuran beton dari segi waktu layan dan keawetan. Jika harga bahan dan pengaruh bahan terhadap lingkungan maka penilaian campuran beton terhadap biaya dan lingkungan dapat dinilai. Di masa depan, penilaian pengaruh bangunan beton terhadap lingkungan menjadi sangat penting karena perubahan lingkungan berakibat besar pada kesehatan makhluk hidup.

8. Kesimpulan

Berdasarkan analisis waktu layan bangunan beton terhadap kerusakan akibat korosi baja tulangan maka dapat disampaikan beberapa kesimpulan mengenai pengaruh penggunaan mineral pada campuran beton sebagai berikut:

- 1) Pada presentasi penambahan yang sama, penggunaan *silicafume* pada campuran beton memberikan waktu layan paling besar kemudian disusul oleh *slag* dan *fly ash*. Tetapi, perbedaan waktu layan yang diberikan oleh *silicafume* sangat lebih besar dari *slag* dan *fly ash*.
- 2) Waktu layan 25 tahun dari bangunan beton di garis pantai dapat dipenuhi jika digunakan campuran beton W/C=40% dan tebal selimut 50mm, campuran beton W/C=45% ditambah *slag* 30% dan tebal selimut beton 50mm, campuran beton W/C=45% ditambah *silicafume* 5% dan tebal selimut beton 30mm. Campuran beton W/C=45% ditambah *fly ash* 20% dan tebal selimut beton 50mm dapat digunakan asal beton dirawat pada temperatur yang tinggi.
- 3) Penggunaan mineral tambahan yang merupakan limbah industri pada campuran beton selain dapat meningkatkan waktu layan beton juga dapat membuat beton menjadi lebih ramah terhadap lingkungan.

Daftar Pustaka

Bambang, S., 2004, “*Pemanfaatan Perkerasan Beton pada Jalan Tol*”, Proc. Seminar Sehari Inovasi Teknologi Beton di Indonesia, Jakarta, 2004, pp. I1-I18.

Cheow, E.T.C, 2005, “*Kerjasama Pemerintah Swasta dalam Infrastruktur Dasar*”, <http://www.kkppi.go.id/lintassektor.php?pgstate=N&enid=BO03050001&langsel=I&subid=A&secid=O>, tanggal akses 29 Maret 2005

Hanehara, S., 1993, “*Structure of Concrete and Its Properties*”, Japan Cement Association on Very Simple about Cement Science, Tokyo, 1993, pp. 78-104. (in Japanese).

Iba, S., 2000, “*Study on Life Cycle Cost of Concrete Structure*”, Master Thesis, Waseda University, Tokyo, (dalam Bahasa Jepang).

Kobayashi, I., 1999, “*Concrete is Dangerous*”, Iwaba shinsho, Tokyo, (dalam Bahasa Jepang).

Machida, A., et. al., 1999, “*Construction Materials*”, Ohmsha, Tokyo, (dalam Bahasa Jepang).

Noguchi, K., 2005, “*Concrete Genome Project*”, <http://bme.t.u-tokyo.ac.jp>, tanggal akses 10 Maret 2005 (dalam bahasa Jepang).

Sudjono, A.S., 2004, “*Simulasi Perhitungan Tebal Selimut Beton Minimum terhadap Perubahan Jarak Bangunan dari Garis Pantai*”, Jurnal Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Vol. 11 No. 1, pp. 9-18, Januari 2004.

Sudjono, A.S., 2005, “*Prediksi Waktu Layan Bangunan Beton terhadap Kerusakan akibat Korosi Baja Tulangan*”, Jurnal Dimensi Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Vol. 7 No.1, pp. 6-15, Maret 2005.

