

Pembukaan lalu lintas pada *rigid pavement* jalan tol dilakukan saat kuat tekan dan/atau kuat lentur minimum tercapai. Di Indonesia, spesifikasi kuat tekan dan kuat lentur masing-masing adalah 45 MPa dan 4,5 MPa pada umur 28 hari. Penundaan pembukaan lalu lintas berdampak pada peningkatan durasi konstruksi, penambahan biaya, penundaan *return of investment* (ROI) dan masyarakat terlambat menikmati manfaat jalan tol. Oleh karena itu, upaya percepatan dilakukan dengan menggunakan beton kuat awal tinggi yang mampu mencapai spesifikasi lebih cepat. Umumnya, beton kuat awal tinggi menggunakan faktor air semen (*FAS*) yang rendah dengan semen dalam jumlah banyak dan biasanya menggunakan semen tipe III yang lebih mahal atau paling tidak *Ordinary Portland Cement* (OPC). Namun, pendekatan ini kurang ramah lingkungan karena proses pembuatan klinker pada semen tipe III atau OPC menghasilkan emisi CO₂ dan memperparah pemanasan global. Penelitian ini bertujuan mengembangkan beton kuat awal tinggi yang lebih ramah lingkungan dengan target kuat tekan 45 MPa dan kuat lentur 4,5 MPa hanya dalam waktu 3 hari.

Solusi yang diusulkan pada penelitian ini adalah menggunakan semen hidraulis tipe *high early* (HE) yang mengandung klinker 29% lebih rendah dibanding semen tipe III dan OPC. Pengurangan semen lebih lanjut dilakukan dengan cara mensubstitusi semen hidraulis dengan *fly ash* tipe F dengan proporsi 70:30 sehingga jumlah klinker dapat dikurangi sebesar 59% sehingga beton lebih ramah lingkungan. Namun, strategi ini menurunkan kuat awal akibat berkurangnya semen hidraulis dan reaksi hidrasi yang lebih lambat. Peningkatan kuat tekan dilakukan dengan dua cara, pertama dengan menambah alkali aktivator untuk mempercepat reaksi *fly ash* tipe F. Kedua, dengan penurunan rasio air sementius (*FASm*) menggunakan pendekatan berbasis volume absolut. Penurunan *FASm* yang signifikan mengurangi *workability* beton. Penambahan *admixture* Sika® ViscoCrete®-1050 HE berbahan polycarboxylate tipe E (*high range water reducer and accelerating*) dilakukan untuk mempertahankan *workability* sesuai standar jalan tol (20-75 mm) sekaligus mempercepat proses pengerasan beton.

Penelitian ini berhasil mengembangkan beton kuat awal tinggi yang lebih ramah lingkungan dengan mengurangi penggunaan klinker semen hingga 59%. Penggunaan *admixture* Sika® ViscoCrete®-1050 HE berbahan polycarboxylate terbukti efektif mempertahankan fluiditas mortar dan *workability* beton meskipun dengan rasio air-sementius (*FASm*) rendah. Sementara itu, penambahan alkali aktivator pada campuran semen hidraulis dan *fly ash* tipe F justru menurunkan performa beton, dengan penurunan kuat tekan 4,9% (dari 36,7 MPa menjadi 34,9 MPa) dan penurunan kuat lentur 12,4% (dari 3,94 MPa menjadi 3,45 MPa). Di sisi lain, penurunan *FASm* dari 0,25 menjadi 0,23 meningkatkan performa beton secara signifikan dengan peningkatan kuat tekan 15,5% (dari 43,2 MPa menjadi 49,9 MPa) dan kuat lentur 10,9% (dari 4,22 MPa menjadi 4,68 MPa), namun penurunan *FASm* lebih lanjut menjadi 0,21 hanya memberikan peningkatan kecil yaitu kuat tekan sebesar 3,6% (menjadi 51,7 MPa) dan kuat lentur 4,5% (menjadi 4,89 MPa) akibat keterbatasan air untuk hidrasi. Komposisi optimum diperoleh pada *FASm* 0,23, dosis SP 0,39%, *Rm* 1,35, dan *Rb* 1,40 menghasilkan kuat tekan 49,9 MPa dan kuat lentur 4,68 MPa pada umur 3 hari, dengan *slump* 55 mm yang memenuhi persyaratan *rigid pavement* jalan tol.

Kata kunci: *High early strength, fly ash, semen hidraulis, rigid pavement, sustainability*

Traffic opening on rigid pavement for toll roads is permitted once the minimum compressive and/or flexural strength is achieved. In Indonesia, the specified compressive and flexural strengths are 45 MPa and 4.5 MPa, respectively, at 28 days of age. Delays in opening traffic routes lead to longer construction periods, higher costs, later ROI, and delayed public benefits. To counter this, projects are adopting high early strength concrete that reaches required strength specifications more quickly. Typically, high early-strength concrete uses a low water-cement ratio (W/C) with a high cement content, often involving more expensive Type III cement or at least Ordinary Portland Cement (OPC). However, this approach is less environmentally friendly because the clinker production process for Type III or OPC cement releases CO₂, and worsens global warming. This study aims to develop a more sustainable high early-strength concrete, targeting a compressive strength of 45 MPa and a flexural strength of 4.5 MPa in just 3 days.

The proposed solution in this research is to use high early-strength (HE) hydraulic cement, which contains 29% less clinker compared to Type III and OPC cement. Further cement reduction is achieved by substituting hydraulic cement with *fly ash* type F at a 70:30 ratio, reducing clinker content by 59% and making the concrete more eco-friendly. However, this strategy lowers early strength due to reduced hydraulic cement content and slower hydration reactions. To enhance compressive strength, two approaches were implemented. First, an alkali activator was added to accelerate the *fly ash* reaction. Second, the water-cementitious ratio (W/C_m) was reduced using an absolute volume-based approach. A significant reduction in W/C_m decreases concrete *workability*. To maintain *workability* according to toll road standards (20–75 mm) while accelerating hardening, a polycarboxylate-based admixture, Sika® ViscoCrete®-1050 HE (a high-range water reducer and accelerator), was added.

This study successfully developed a more sustainable high early-strength concrete by reducing clinker usage by up to 59%. The use of Sika® ViscoCrete®-1050 HE, a polycarboxylate-based admixture, effectively maintained mortar fluidity and concrete *workability* despite the low water-cementitious ratio (W/C_m). However, adding an alkali activator to the hydraulic cement-*fly ash* mixture reduced concrete performance, decreasing compressive strength by 4.9% (from 36.7 MPa to 34.9 MPa) and flexural strength by 12.4% (from 3.94 MPa to 3.45 MPa). Conversely, reducing the W/C_m from 0.25 to 0.23 significantly improved concrete performance, increasing compressive strength by 15.5% (from 43.2 MPa to 49.9 MPa) and flexural strength by 10.9% (from 4.22 MPa to 4.68 MPa). However, a further reduction to 0.21 provided only marginal improvements—compressive strength increased by 3.6% (to 51.7 MPa) and flexural strength by 4.5% (to 4.89 MPa)—due to limited water availability for hydration. The optimum composition was achieved with a W/C_m of 0.23, a superplasticizer dosage of 0.39%, an *R_m* of 1.35, and an *R_b* of 1.40. This mix produced a compressive strength of 49.9 MPa and flexural strength of 4.68 MPa at 3 days, with a 55 mm *slump*, meeting toll road rigid pavement requirements.

Keywords: High early strength, *fly ash*, semen hidraulis, rigid pavement, sustainability