

ABSTRACT

Slab concrete casting using ready-mixed concrete (RMC) requires synchronization between truck mixer arrivals and concrete pump readiness. Delivery inaccuracy may lead to truck mixer queuing, concrete pump idling, increased fuel consumption, CO₂e emissions, and disruption of operational continuity assessed through discharge time and cold joint gap as supplementary timestamp-based checks. This study analyzes slab concrete casting duration using Monte Carlo simulation and the JIT principle, with emphasis on how truck mixer dispatch patterns can be evaluated in a simpler form for field application.

The research method employed *discrete-event simulation* modeling in AnyLogic across four scenarios: Baseline, JIT Empirical, MC Stochastic, and MC-JIT. The empirical data comprised 113 actual trips across seven casting cycles with a total volume of 720 m³. The Baseline scenario used the project's actual *timestamps*, whereas JIT Empirical recalculated *dispatch* times so that *truck mixer* arrivals approached *concrete pump* readiness. MC Stochastic applied empirical *donor/block resampling* to preserve departure, *unloading*, return, and headway patterns, with empirical custom distribution as a *fallback* when a suitable *donor* package was unavailable. MC-JIT then combined JIT-based *dispatch* decisions with stochastic duration realizations, allowing an assessment of whether the JIT strategy remained effective under uncertain operational conditions.

The results show that the Baseline still exhibited inefficiencies, with an average truck mixer queuing duration of 11.61 minutes/trip and pump idle time of 3.20 minutes/trip. JIT Empirical yielded the maximum efficiency potential by deterministically eliminating queuing and idling, increasing productivity from 3.573 to 3.866 m³/hour, and reducing fuel consumption from 3,413.92 to 3,194.46 liters. Under stochastic conditions, MC Stochastic demonstrated that duration variability could worsen system performance. Compared with MC Stochastic, the selected MC-JIT configuration reduced queuing duration from 14.94 to 5.48 minutes/trip, fuel consumption from 3,464.38 to 3,364.00 liters/run, and emissions from 9,384.10 to 9,112.18 kg CO₂e/run, although concrete pump idle time increased from 2.17 to 3.83 minutes/trip. The final comparison using the productivity-cost index (P/C) showed JIT Empirical had the highest P/C (85.94), followed by the selected MC-JIT (71.68) and MC Stochastic (66.98). Thus, the application of JIT to RMC distribution has the potential to improve efficiency, but its effectiveness depends strongly on the accuracy of duration estimation, dispatch-time control, and the timely updating of field operational information.

Keywords: Ready-mixed Concrete (RMC), Discrete Event Simulation (DES), Monte Carlo, Just in Time (JIT), CO₂e emissions.

INTISARI

Pekerjaan pengecoran slab beton dengan *ready-mixed concrete* (RMC) membutuhkan sinkronisasi antara kedatangan *truck mixer* dan kesiapan *concrete pump*. Ketidaktepatan pengiriman dapat menimbulkan antrian *truck mixer*, *idle concrete pump*, peningkatan konsumsi BBM, emisi CO₂e, serta gangguan kontinuitas operasional yang ditinjau melalui *discharge time* dan *cold joint gap* sebagai pemeriksaan tambahan berbasis *timestamp*. Penelitian ini menganalisis durasi pengecoran slab beton menggunakan simulasi *Monte Carlo* dan prinsip JIT, dengan fokus pada bagaimana pola *dispatch truck mixer* dapat dievaluasi secara lebih sederhana untuk kebutuhan lapangan.

Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan simulasi diskrit di AnyLogic dengan empat skenario, yaitu Baseline, JIT Empiris, MC Stochastic, dan MC-JIT. Data empiris terdiri atas 113 trip aktual pada tujuh siklus pengecoran dengan total volume 720 m³. Skenario Baseline menggunakan *timestamp* aktual proyek, sedangkan JIT Empiris menghitung ulang waktu *dispatch* agar kedatangan *truck mixer* mendekati kesiapan *concrete pump*. MC Stochastic menggunakan *donor/block resampling* berbasis trip empiris untuk mempertahankan pola durasi berangkat, *unloading*, kembali, dan headway, dengan custom distribution empiris sebagai *fallback* ketika paket *donor* yang sesuai tidak tersedia. MC-JIT kemudian menggabungkan keputusan *dispatch* berbasis JIT dengan realisasi durasi stokastik, sehingga dapat mengevaluasi apakah strategi JIT tetap efektif ketika kondisi operasional tidak pasti.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Baseline masih memiliki pemborosan berupa durasi antri *truck mixer* rata-rata 11,61 menit/trip dan *idle pump* 3,20 menit/trip. JIT Empiris memberikan potensi efisiensi maksimum dengan menghilangkan antrian dan *idle* secara deterministik, meningkatkan produktivitas dari 3,573 menjadi 3,866 m³/jam, serta menurunkan konsumsi BBM dari 3.413,92 liter menjadi 3.194,46 liter. Pada kondisi stokastik, MC Stochastic menunjukkan bahwa variasi durasi dapat memperburuk kinerja sistem. Dibandingkan MC Stochastic, MC-JIT terpilih menurunkan durasi antri dari 14,94 menjadi 5,48 menit/trip, konsumsi BBM dari 3.464,38 menjadi 3.364,00 liter/run, dan emisi dari 9.384,10 menjadi 9.112,18 kg CO₂e/run, tetapi *idle concrete pump* meningkat dari 2,17 menjadi 3,83 menit/trip. Perbandingan akhir melalui indeks produktivitas-biaya (P/C) menunjukkan JIT Empiris memiliki P/C tertinggi (85,94), diikuti MC-JIT terpilih (71,68) dan MC Stochastic (66,98). Dengan demikian, penerapan JIT pada distribusi RMC berpotensi meningkatkan efisiensi, tetapi efektivitasnya sangat bergantung pada akurasi estimasi durasi, pengendalian waktu *dispatch*, dan pembaruan informasi operasional di lapangan. Dengan demikian, hasil JIT Empiris dibaca sebagai potensi pada skenario deterministik terkendali, sedangkan hasil MC-JIT dibaca sebagai uji ketahanan aturan *dispatch* ketika realisasi durasi tidak selalu sama dengan estimasi awal.

Kata kunci: *Ready-mixed Concrete* (RMC), *Discrete Event Simulation* (DES), Monte Carlo, *Just in Time* (JIT), emisi CO₂e.