

## ANALISIS KUANTITATIF DEVIASI PRODUKTIVITAS *MASS CONCRETE* PADA BASEMENT 3

Jolanda Ozerlie Hermanto<sup>1,\*</sup>, Linda Azhari<sup>1</sup>, Mega Watty<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara

Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta Barat 11440

\*Corresponding authors: [jolaozrl@gmail.com](mailto:jolaozrl@gmail.com)

**Abstract:** Mass concrete pouring for raft foundations requires continuous execution to maintain structural integrity and prevent cold joints. This study aims to analyze productivity deviations in the mass concrete pouring of a raft foundation at Basement 3 of a high-rise building project in Jakarta. A descriptive quantitative approach with a case study method was employed using secondary data, including the baseline schedule, concrete pouring logs, truck mixer arrival records, and slump rejection data. Data were analyzed using S-Curve Overlay, throughput analysis, headway analysis, loss time analysis, and concurrent delay analysis. The results indicate that the actual pouring duration reached 69.3 hours, exceeding the planned duration of 53 hours by 16.3 hours (30.7%). The average actual productivity was 177.6 m<sup>3</sup>/h, which was 22.7% lower than the planned productivity of 230 m<sup>3</sup>/h. Logistical delays caused by unstable truck mixer headway accounted for the largest contribution, representing approximately 49% of the total schedule deviation. The remaining 51% resulted from concurrent operational factors, including extended pouring duration, slump rejection incidents, adverse weather conditions, equipment downtime, and performance degradation due to equipment and workforce fatigue. These findings emphasize that successful large-scale mass concrete pouring depends on the synchronization of concrete supply stability, equipment reliability, material quality control, and field resource readiness.

**Keywords:** mass concrete, productivity, raft foundation, headway, concurrent delay

**Abstrak:** Pekerjaan pengecoran *mass concrete* pada *raft foundation* memerlukan pelaksanaan secara kontinu untuk menjaga integritas struktur dan mencegah terjadinya *cold joint*. Penelitian ini bertujuan menganalisis deviasi produktivitas pada pekerjaan pengecoran *mass concrete raft foundation Basement 3* pada proyek gedung bertingkat tinggi di Jakarta. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode studi kasus berdasarkan data sekunder berupa *baseline schedule*, *concrete pouring log*, *logbook* kedatangan *truck mixer*, dan data *slump reject*. Analisis dilakukan menggunakan metode *S-Curve Overlay*, *throughput analysis*, *headway analysis*, *loss time analysis*, dan *concurrent delay analysis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa durasi aktual pengecoran mencapai 69,3 jam, lebih lama 16,3 jam atau 30,7% dibandingkan durasi rencana 53 jam. Produktivitas rata-rata aktual tercatat sebesar 177,6 m<sup>3</sup>/jam, lebih rendah 22,7% dibandingkan produktivitas rencana sebesar 230 m<sup>3</sup>/jam. Keterlambatan logistik akibat ketidastabilan *headway* armada truck mixer memberikan kontribusi terbesar, yaitu sekitar 49% dari total deviasi durasi. Sementara itu, 51% sisanya disebabkan oleh faktor operasional yang terjadi secara bersamaan, meliputi pembengkakan durasi penuangan, kejadian *slump reject*, gangguan cuaca, *downtime* peralatan, serta penurunan kinerja akibat *fatigue* pada alat dan tenaga kerja. Hasil penelitian menegaskan bahwa keberhasilan pengecoran *mass concrete* sangat bergantung pada sinkronisasi antara stabilitas suplai beton, keandalan peralatan, pengendalian mutu material, dan kesiapan sumber daya lapangan.

**Kata kunci:** *mass concrete*, produktivitas, *raft foundation*, *headway*, *concurrent delay*

### 1. PENDAHULUAN

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh pentingnya produktivitas pada pekerjaan pengecoran *mass concrete*, khususnya pada *raft foundation* yang memerlukan pengecoran kontinu untuk menjaga integritas struktur dan mencegah *cold joint*. *Mass concrete*

didefinisikan sebagai beton dengan volume besar yang berpotensi mengalami perbedaan temperatur signifikan antara inti dan permukaan, sehingga memerlukan pengendalian pelaksanaan yang ketat (ACI Committee 207, 2005). Keberhasilan pekerjaan ini tidak hanya ditentukan oleh kualitas material, tetapi juga oleh stabilitas sistem produksi yang mencakup

logistik, peralatan, tenaga kerja, dan kondisi lingkungan.

Produktivitas konstruksi merupakan perbandingan antara output yang dihasilkan dengan input yang digunakan, seperti tenaga kerja, waktu, material, dan peralatan. Peningkatan produktivitas dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk metode kerja, pengelolaan sumber daya, koordinasi operasional, dan penerapan teknologi yang mendukung efisiensi pelaksanaan proyek (Wang et al., 2026). Pada pekerjaan *mass concrete*, produktivitas dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi. Efisiensi siklus *transit mixer* dan waktu tunggu berpengaruh signifikan terhadap produktivitas (Patil & Salgud, 2019). Selain itu, manajemen rantai pasok beton berperan penting dalam menjaga kontinuitas suplai material (Park et al., 2011), sementara ketidakpastian waktu perjalanan dan gangguan pada sistem *dispatching* armada dapat menurunkan kinerja operasional serta mengganggu kontinuitas pengecoran (Hsie et al., 2022).

Dari sisi material, nilai *slump* merupakan indikator penting *workability* beton. Toleransi *slump*  $\pm 25$  mm; beton di luar batas tersebut berpotensi ditolak (*slump reject*) (ACI Committee 304, 2000). Waktu *transit* yang terlalu lama dapat menurunkan *workability* beton secara signifikan (Chakraborty et al., 2023), bahkan menyebabkan kehilangan volume produksi akibat penolakan material (Mahgoub et al., 2024). Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu dan kelembaban juga memengaruhi karakteristik beton segar dan efektivitas *admixture* (Chen & Trejo, 2016); (Zeyad & Almalki, 2020).

Faktor operasional juga memegang peranan penting. Gangguan pada sistem *dispatching* dan ketidakpastian operasional dapat menurunkan efisiensi proses, meningkatkan waktu tunggu, serta mengurangi kinerja keseluruhan pekerjaan pengecoran (Hsie et al., 2022). Produktivitas juga sangat dipengaruhi oleh koordinasi antara *transit mixer* dan *concrete pump*, ketersediaan operator terampil, serta efektivitas sistem antrian (Hasan et al., 2021). Pada pekerjaan yang berlangsung terus-menerus, kelelahan pekerja menjadi faktor laten yang dapat menurunkan konsistensi kerja, meningkatkan waktu siklus,

dan memperbesar potensi kesalahan operasional (Umer et al., 2023); (Antwi-Afari et al., 2017).

Pada studi kasus pengecoran *raft foundation* volume 12.390 m<sup>3</sup> di Basement 3, ditemukan deviasi waktu pelaksanaan sebesar  $\pm 15$  jam dari rencana. Deviasi ini diduga dipengaruhi oleh ketidakstabilan *headway truck mixer*, *downtime* alat, variasi durasi penuangan, kejadian *slump reject*, faktor cuaca, serta kelelahan sistem akibat operasi berkelanjutan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan rencana dan realisasi produktivitas, mengidentifikasi faktor-faktor penyebab deviasi, serta mengukur kontribusi masing-masing faktor terhadap keterlambatan menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis data lapangan, seperti *S-curve analysis*, *throughput analysis*, *headway analysis*, *loss time analysis*, dan *concurrent delay analysis*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi bagi perusahaan konstruksi, akademisi, dan praktisi lapangan dalam meningkatkan pengendalian produktivitas pekerjaan *mass concrete* berskala besar.

## 2. METODE PENELITIAN

### Rancangan penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode studi kasus untuk menganalisis deviasi produktivitas pada pekerjaan pengecoran *mass concrete*. Pendekatan kuantitatif memungkinkan evaluasi kinerja proyek secara objektif berdasarkan data terukur, sehingga penyimpangan antara rencana dan realisasi dapat diidentifikasi serta dianalisis secara sistematis (Ninpan et al., 2024). Metode studi kasus dipilih karena efektif untuk menganalisis fenomena kontemporer dalam konteks nyata, terutama ketika batas antara fenomena dan konteksnya tidak terdefinisi secara tegas serta melibatkan berbagai sumber bukti (Ridder, 2017).

### Objek dan lokasi penelitian

Objek penelitian adalah pekerjaan pengecoran *raft foundation* pada proyek gedung bertingkat tinggi, dengan volume total 12.390 m<sup>3</sup> di Basement 3. Pekerjaan ini termasuk kategori *mass concrete* yang menuntut pengecoran kontinu untuk mencegah *cold joint* dan menjaga integritas struktur (ACI Committee 207, 2005). Lokasi penelitian berada di Jakarta, dengan

durasi pengecoran rencana selama 53 jam secara berkelanjutan.

### Jenis dan sumber data

Penelitian menggunakan data sekunder yang diperoleh dari dokumentasi resmi proyek, meliputi baseline rencana, *concrete pouring log*, *logbook* kedatangan *truck mixer*, dan data *slump reject*. Data tersebut diolah kembali untuk menghasilkan parameter analisis yang relevan. Penggunaan data kedatangan *truck mixer* penting untuk menganalisis stabilitas suplai beton (*headway*) merupakan indikator utama efisiensi rantai pasok dan sistem antrian dalam pekerjaan pengecoran (Park et al., 2011); (Hsie et al., 2022); (Hasan et al., 2021).

### Variabel penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini terdiri atas downtime peralatan, variasi kualitas material yang direpresentasikan melalui nilai *slump*, serta interval kedatangan *truk mixer* (*headway*). Pemilihan ketiga variabel tersebut didasarkan pada perannya dalam merepresentasikan aspek operasional, material, dan logistik yang secara langsung memengaruhi produktivitas pengecoran. Pengendalian *downtime* terbukti menjadi faktor penting dalam menjaga kontinuitas proses konstruksi (Patil & Salgud, 2019). Selain itu, stabilitas rantai pasok dan koordinasi logistik juga berkontribusi signifikan terhadap kelancaran proses pengecoran, sebagaimana ditunjukkan dalam berbagai studi sebelumnya (Park et al., 2011); (Hsie et al., 2022); (Hasan et al., 2021); (Galić & Kraus, 2016).

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah deviasi waktu penuangan dan penurunan produktivitas. Kedua parameter tersebut dievaluasi berdasarkan selisih antara kinerja aktual di lapangan dan kondisi yang direncanakan, sehingga dapat merepresentasikan tingkat efisiensi pelaksanaan pengecoran (Wang et al., 2026).

### Teknik analisis data

Analisis data dilakukan menggunakan beberapa metode kuantitatif. *S-Curve Overlay* digunakan untuk membandingkan progres rencana dan aktual guna mengidentifikasi deviasi waktu, mengevaluasi penyimpangan jadwal, serta mendeteksi kebutuhan tindakan korektif selama pelaksanaan proyek (Konior &

Szóstak, 2020). *Throughput analysis* digunakan untuk mengukur laju penuangan beton ( $\text{m}^3/\text{jam}$ ) serta mengevaluasi perubahan produktivitas selama proses pengecoran, sehingga penurunan kinerja operasional dapat diidentifikasi secara lebih dini (Zhang et al., 2025). *Headway Analysis* digunakan untuk mengevaluasi konsistensi suplai beton melalui interval kedatangan *truck mixer* (Park et al., 2011); (Hasan et al., 2021).

Dimana untuk menghitung *headway* digunakan persamaan 1

$$\text{Target Headway (menit)} = \frac{\text{Volume Target (m}^3\text{)}}{\text{Produktivitas Penuangan Rencana (} \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \text{)}} \times 60 \quad (1)$$

*Loss Time Analysis* digunakan untuk mengidentifikasi waktu non-produktif akibat hambatan mekanis, material, dan operasional (Patil & Salgud, 2019). Persamaan 2 dan 3 digunakan untuk menganalisis *Loss Time Analysis*.

$$\text{Target Loss Time} = \Sigma(\text{Arrival Actual} - \text{Arrival Target}) \quad (2)$$

$$\text{Total Loss Time} = \Sigma_{i=1}^{n=1819} \max(0, \text{Dai} - \text{Dt}) \quad (3)$$

Dengan:

Dai = Durasi penuangan aktual armada ke-i (selisih selesai - mulai tuang)

Dt = Target durasi penuangan rencana (15 menit)

n = Total jumlah armada *Truck Mixer* (1819 unit)

$\max(0, ..)$  = Fungsi logika untuk memastikan jika armada selesai dibawah 15 menit, maka tidak ada *loss time*

Selain itu, *Concurrent Delay Analysis* digunakan untuk mengidentifikasi keterlambatan yang terjadi secara bersamaan dan memahami interaksi antar faktor penyebab deviasi dalam sistem pengecoran yang kompleks (Ezeldin & El-Hakim, 2023)

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis perbandingan rencana dan aktual (*execution gap*)

Berdasarkan pengumpulan data operasional pada pekerjaan pengecoran *mass concrete* pondasi rakit (*raft foundation*), ditemukan kesenjangan yang cukup lebar antara perencanaan (*baseline*) dengan realisasi pelaksanaan di lapangan. Ringkasan

perbandingan parameter tersebut disajikan dalam Tabel 1.

Data tersebut menunjukkan adanya penurunan produktivitas rata-rata sebesar

22,7%. Deviasi durasi sebesar 16,3 jam ini meningkatkan risiko inefisiensi sumber daya di lapangan.

**Tabel 1.** Perbandingan Rencana dan Aktual (*Execution Gap*)

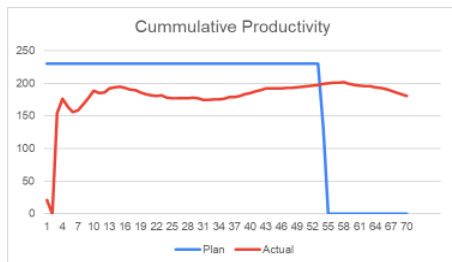
Parameter Analisis	Perencanaan	Aktual	Deviasi
Durasi Penuangan	53 Jam	69,3 Jam	+16,3 Jam (30,7%)
Produktivitas Rata - Rata	230 m <sup>3</sup> /jam	177,6 m <sup>3</sup> /jam	-52,4 m <sup>3</sup> /jam (22,7%)

**Analisis akumulasi deviasi melalui grafik kumulatif**

Untuk memvisualisasikan bagaimana kesenjangan terbentuk, data produktivitas penuangan dipetakan ke dalam grafik kumulatif pada Gambar 1.

Berdasarkan Gambar 1, dilakukan evaluasi terhadap perilaku sistem operasional selama 70 jam pengecoran yang dibuat dalam tiga poin evaluasi kritis yaitu:

1. Inkonsistensi Stabilitas Sistem: Meskipun pada analisis produktivitas per jam ditemukan periode dimana performa aktual melampaui rencana, namun secara kumulatif kurva aktual tetap berada di bawah kurva rencana. Surplus jangka pendek tidak cukup kuat untuk mengompensasi akumulasi volume yang terjadi sebelumnya.
2. Degradasi Performa Fase Akhir: Penurunan ini merupakan dampak dari akumulasi hambatan teknis serta variabel eksternal, khususnya transisi dari hari libur ke hari kerja
3. Keterbatasan Kapasitas Pemulihan (*Recovery Capacity*): Analisis kumulatif ini menunjukkan bahwa sistem tidak memiliki kemampuan *recovery* yang cukup untuk mengejar ketertinggalan setelah melewati jam kritis di hari Senin.

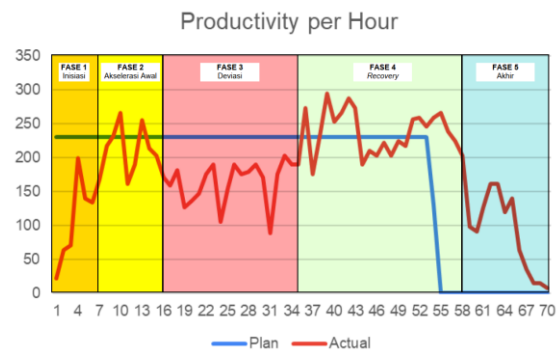


**Gambar 1.** Grafik Kumulatif Produktivitas

**Analisis fluktuasi laju penuangan (*hourly throughput*)**

Penyebab di balik melandainya kurva akumulasi pada Gambar 1, akan diidentifikasi dengan menganalisis produktivitas penuangan per jam (*hourly throughput*) yang disajikan pada Gambar 2 dan dijelaskan pada Tabel 2.

Secara teknis, grafik ini membuktikan bahwa sistem memiliki kapasitas puncak untuk melampaui target rencana namun gagal mempertahankan konsistensi *output*. Penurunan performa pada grafik ini selanjutnya akan dikategorikan menjadi empat variabel utama: stabilitas logistik (*headway*), faktor cuaca, kendala mekanis *Concrete Pump* dan interupsi kualitas material (*slump reject*) yang secara akumulatif membentuk kondisi *Concurrent Delay* (Ezeldin & El-Hakim, 2023).



**Gambar 2.** Produktivitas per Jam

**Tabel 2.** Perbandingan Rencana dan Aktual (*Execution Gap*)

Jam ke-	Tanggal & Jam	Fase ke -	Keterangan
1 - 7	Jumat, 06/03/2026 21:00 - Sabtu, 07/03/2026 03:59	1 : Inisiasi	Masa penyesuaian di mana produktivitas perlahan naik menuju garis rencana
8 - 15	Sabtu, 07/03/2026 04:00 - Sabtu, 07/03/2026 11:59	2 : Akselerasi Awal	Produktivitas mencapai puncaknya untuk pertama kali di atas garis rata-rata rencana
16 - 34	Sabtu, 07/03/2026 12:00 - Minggu, 08/03/2026 06:59	3 : Deviasi	Produktivitas stabil tapi berada di bawah garis <i>plan</i>
35 - 58	Minggu, 08/03/2026 07:00 - Senin, 09/03/2026 06:59	4 : <i>Recovery</i>	Upaya akselerasi maksimal untuk mengejar ketertinggalan
58 - 70	Senin, 09/03/2026 07:00 - Senin, 09/03/2026 18:59	5 : Akhir	Fase keterlambatan. Pekerjaan berlanjut di saat rencana seharusnya sudah selesai

**Analisis variabel hambatan (*loss time*)**

Berdasarkan analisis terhadap kelima fase penuangan pada Gambar 2, ditemukan bahwa kesenjangan eksekusi (*execution gap*) sebesar 16,3 jam dipicu oleh variabel-variabel kritis berikut:

**A. Dinamika Logistik dan Transisi Arus Lalu Lintas**

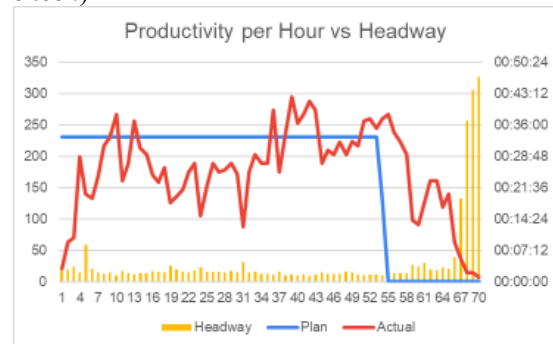
Konsistensi kedatangan armada *Truck Mixer (TM)* atau *headway* merupakan variabel penentu stabilitas produktivitas. Idealnya, dengan target 230 m<sup>3</sup>/jam, dibutuhkan kedatangan satu armada setiap 01:49 menit (didapatkan dari Persamaan 1).

$$\text{Target Headway (menit)} = \frac{\text{Volume Target (7)}}{\text{Target Produktivitas Penuangan Rencana (230)}} \times 60$$

Penentuan *loss time* pada aspek logistik dan arus lalu lintas dilakukan dengan membandingkan waktu kedatangan aktual (*Actual Arrival*) setiap armada di lokasi proyek terhadap target *headway* rencana seperti pada Persamaan 2

Angka ini merepresentasikan kehilangan waktu produktif di mana sistem penuangan terpaksa berada dalam kondisi idle (menganggur) karena ketiadaan material di lokasi. Keterlambatan suplai ini bersifat linear negatif terhadap produktivitas (Gambar 3) dan durasi total pengecoran. Secara teknis, angka tersebut merupakan batas bawah dari hambatan

logistik (belum termasuk waktu antri dan *qc check*).



**Gambar 3.** Grafik Produktivitas per Jam dibandingkan dengan *Headway*

Total *delay* kontribusi hambatan logistik sebesar 8 jam mencakup sekitar 49% dari total keterlambatan proyek (16,3 jam). Hal ini membuktikan bahwa faktor eksternal berupa kondisi lalu lintas dan manajemen *batching plant* memiliki pengaruh yang setara dengan kendala teknis internal di lapangan.

Analisis pada Fase 5 (jam ke-58 hingga ke-70) mengonfirmasi bahwa nilai *headway* mengalami deviasi ekstrem yang semakin menjauhi target rencana. Kemudian, untuk menguji pengaruh faktor eksternal terhadap stabilitas penuangan, dilakukan analisis komparatif rata-rata *headway* kedatangan antar armada pada tiga hari pengamatan yang

berbeda. Hasil analisis menunjukkan fluktuasi yang sangat kontras seperti pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Analisis *temporal headway* per hari

Hari	Target Arrival Headway	Rerata Arrival Headway	Status Efisiensi
Jumat, 06/03/2026	1 menit 49 detik	3 menit 18 detik	Normal
Sabtu, 07/03/2026	1 menit 49 detik	2 menit 36 detik	Normal
Minggu, 08/03/2026	1 menit 49 detik	2 menit 00 detik	Optimum
Senin, 09/03/2026	1 menit 49 detik	9 menit 56 detik	Rendah (Hambatan Eksternal)

Secara teknis manajemen konstruksi, data ini menunjukkan adanya *Unpredictable External Delay*. Sistem penuangan di lokasi (pompa dan personel) tetap sama di ketiga hari tersebut, membuktikan bahwa pemilihan waktu penuangan yang bersinggungan dengan hari kerja (Senin) menciptakan hambatan logistik yang tidak dapat dihindari. Lonjakan *headway* pada fase ini menegaskan bahwa penuangan mass concrete skala besar menjadi tidak efektif apabila dilakukan pada hari kerja, dikarenakan tingginya volume lalu lintas yang secara linear memutus kontinuitas suplai beton ke lokasi proyek.

#### B. Analisis Dampak Cuaca dan Lingkungan (*Environmental Disruption*)

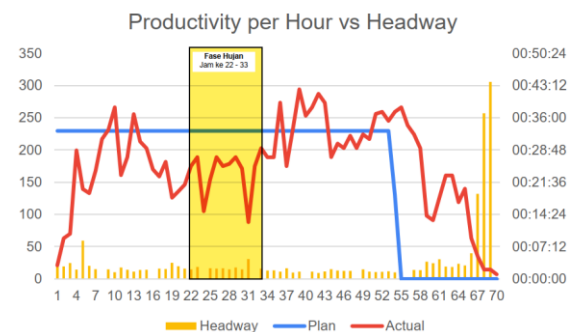
Faktor cuaca, khususnya hujan yang terjadi pada Sabtu pukul 18:00 (jam ke 22) - Minggu pukul 06.00 (jam ke 33), memberikan dampak berupa penurunan laju produktivitas. Meskipun manajemen proyek telah melakukan langkah mitigasi dengan pemasangan tenda pelindung pada area penuangan dan pompa, namun faktor manusia dan lingkungan tetap menyebabkan operasional tidak dapat berjalan pada kapasitas penuh (230 m<sup>3</sup>/jam). Walaupun penuangan tidak dihentikan total, terjadi hambatan operasional yang menyebabkan 'lembah' pada grafik produktivitas per jam:

1. Keterbatasan Pergerakan Personel: Penggunaan alat pelindung diri tambahan dan kondisi area kerja yang basah/licin

secara alami menurunkan kecepatan gerak pekerja.

2. Hambatan Visibilitas dan Komunikasi: Intensitas hujan mengganggu komunikasi visual antara operator pompa, *flagman*, dan pengemudi armada TM, yang mengakibatkan durasi manuver truk menjadi lebih lama.
3. Kondisi Psikologis dan Fisik: Pekerja yang terpapar hujan dalam durasi lama mengalami penurunan performa fisik, yang secara akumulatif memperlambat ritme kerja dibandingkan kondisi cuaca cerah.

Berdasarkan Gambar 4, pada Sabtu jam 18:00 dan Minggu jam 00:00, terlihat bahwa grafik produktivitas tidak menyentuh angka nol, namun berada jauh di bawah garis target.



**Gambar 4.** Grafik Fase Hujan

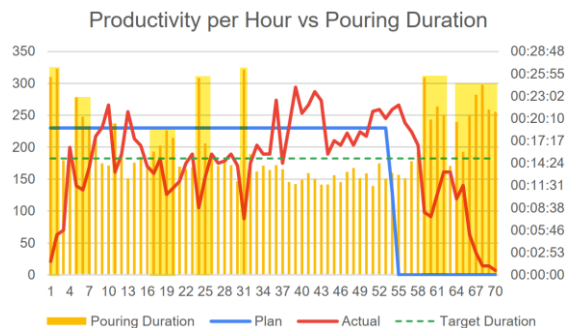
Hal ini mengonfirmasi bahwa operasional tetap berjalan (karena adanya fasilitas tenda), namun efisiensinya turun. Selisih antara kapasitas yang hilang pada jam-jam tersebut

dikategorikan sebagai *Loss Time* akibat faktor lingkungan.

### C. Analisis Inefisiensi Durasi Penuangan (*Casting Performance*)

Analisis terhadap durasi penuangan (*pouring duration*) per armada dilakukan untuk mengevaluasi performa operasional *Concrete Pump*. Manajemen menetapkan target durasi penuangan rata-rata sebesar 15 menit 00 detik per armada. Analisis Rata-Rata dibandingkan dengan target durasi rencana penuangan menunjukkan angka yang sangat positif dengan rata-rata aktual sebesar 14 menit 53 detik. Keberhasilan mencapai target rata-rata 15 menit tidak lantas menunjukkan bahwa seluruh siklus operasional berjalan tanpa kendala. Terdapat variasi durasi antar armada yang cukup lebar, di mana pencapaian armada yang cepat menutupi performa armada yang sangat lambat. Fenomena inilah yang sering kali menjadi akar penyebab keterlambatan yang tidak terdeteksi secara statistik. *Loss Time* dari durasi penuangan 7 jam 48 menit dihitung dengan Persamaan 3.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara durasi penuangan per armada (*Pouring Duration*) dengan laju produktivitas per jam. Berdasarkan visualisasi tersebut, dapat diidentifikasi bahwa setiap lonjakan durasi penuangan di atas target (garis putus-putus hijau) secara otomatis menekan grafik produktivitas aktual (garis merah).



**Gambar 5.** Produktivitas berbanding dengan durasi tuang

Meskipun mayoritas armada selesai dalam durasi <15 menit, terdapat sejumlah armada dengan durasi penuangan yang jauh melampaui target ini sangat mungkin terjadi karena:

1. Kendala Teknis Mendadak: *Clogging* (penyumbatan) pada pipa pompa atau

gangguan mekanis pada belalai pompa (*boom*).

2. Kualitas Beton (*Slump*): Truk yang terjebak *headway* lama cenderung memiliki beton yang lebih kaku (Chakraborty et al., 2023), sehingga waktu penuangannya membengkak drastis.
3. Faktor Logistik Internal: Kendala manuver truk di area sempit yang menghambat proses *back-up* ke posisi pompa.
4. *Concrete pump* sudah sampai pada titik *fatigue*

Efek dari durasi yang tidak seragam menciptakan ketidakteraturan ritme. Satu saja truk yang mengalami kendala penuangan akan mengakibatkan antrean pada pompa tersebut dan menurunkan *output* produktivitas per jam secara instan, meskipun truk-truk sebelumnya bekerja sangat cepat. Akumulasi dari durasi penuangan yang 'tidak sesuai target' inilah yang memberikan kontribusi pada *loss time* operasional.

### D. Analisis Inefisiensi Akibat Kualitas yang Tidak Sesuai

Berdasarkan data operasional, terdapat total 49 armada (TM) yang mengalami penolakan di lokasi proyek (*Actual Frequency*). Kejadian penolakan ini merupakan titik kritis kehilangan waktu karena pompa yang telah dialokasikan tidak mendapatkan suplai volume, sementara waktu operasional terus berjalan. Mengingat tidak adanya data waktu tunggu spesifik untuk setiap armada yang di-reject, *loss time* dihitung menggunakan pendekatan Target Durasi Siklus QC Standar. Diasumsikan setiap armada yang di-reject tetap memakan waktu minimum penuangan rencana sebesar 10 menit (5 menit *slump test* & 5 menit antrian) untuk proses pemeriksaan, pengambilan sampel, hingga instruksi pemulangan armada. Penolakan 49 unit TM ini setara dengan kehilangan volume beton sekitar 343 m<sup>3</sup>:

1. Kehilangan Volume: Penolakan ini menjelaskan mengapa akumulasi volume aktual semakin tertinggal jauh dari garis rencana.
2. Kehilangan Waktu: Secara total, proses penolakan ini menyumbang keterlambatan sebesar 8,17 jam (49 x 10 menit).

### E. Analisis Kelelahan Kerja (*Fatigue*) Akibat Faktor Lingkungan di Basement 3

*Fatigue* juga dialami oleh para pekerja menunjukkan adanya kelelahan yang bersifat akumulatif akibat beban kerja yang berlangsung terus-menerus meskipun telah diterapkan sistem rotasi kerja. Hal ini menunjukkan bahwa kelelahan tidak semata-mata disebabkan oleh beban kerja yang monoton, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor kejenuhan alami serta kondisi kerja yang kurang nyaman, seperti suhu yang panas. Dalam kondisi tersebut, rotasi kerja memang membantu mengurangi kejenuhan tugas, namun tidak sepenuhnya menghilangkan kelelahan karena pekerja tetap berada dalam lingkungan yang sama secara terus-menerus. Akibatnya, terjadi penurunan konsentrasi dan stamina, terutama menjelang akhir waktu kerja. Kondisi ini diperparah oleh kejenuhan kerja, terutama jika aktivitas yang dilakukan bersifat monoton atau berulang. Seiring bertambahnya waktu kerja, kemampuan fisik dan konsentrasi pekerja menurun, sehingga meningkatkan risiko kesalahan dan menurunkan produktivitas (Umer et al., 2023); (Antwi-Afari et al., 2017). Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan waktu kerja, seperti pemberian waktu istirahat dan rotasi tugas, belum berjalan secara optimal.

Selain itu, kondisi *Basement 3* yang memiliki ventilasi udara kurang memadai turut memperburuk tingkat *fatigue* yang dialami pekerja. Meskipun telah tersedia penyedot udara sebagai upaya mitigasi, sirkulasi udara yang dihasilkan belum optimal dalam mengatasi kondisi pengap dan panas di area kerja. Lingkungan dengan kualitas udara yang kurang baik dapat menyebabkan ketidaknyamanan, rasa lelah lebih cepat, serta menurunkan performa kerja. Dengan demikian, *fatigue* yang dialami pekerja merupakan hasil dari kombinasi faktor kejenuhan kerja dan kondisi lingkungan yang belum sepenuhnya mendukung kesehatan dan kenyamanan kerja.

### F. Analisis Keterlambatan Berhimpit (*Concurrent Delay*)

Setelah mengidentifikasi variabel penghambat secara parsial, dilakukan analisis *Concurrent Delay* untuk melihat bagaimana interaksi antar faktor tersebut secara simultan menggeser jadwal penyelesaian penuangan

beton. Berdasarkan data yang dihimpun, keterlambatan bukan disebabkan oleh variabel tunggal, melainkan hasil akumulasi dari beberapa kejadian.

Berdasarkan data observasi yang dirangkum pada Tabel 2 dilakukan dekomposisi terhadap penyebab deviasi pada setiap fase penuangan sebagai berikut:

- Fase 1 & 2: Fluktuasi produktivitas disebabkan oleh *learning curve* alat dan personil di awal penuangan, di mana sempat terjadi penurunan output akibat durasi *headway* yang tinggi di jam-jam pertama. Memasuki Fase 2, produktivitas kembali mengalami hambatan yang didominasi oleh kendala mekanis minor pada beberapa unit *concrete pump* yang baru mulai beroperasi secara penuh, sehingga grafik aktual belum mampu mencapai garis rencana secara stabil.
- Fase 3: Fenomena *Concurrent Delay* Fase ini merupakan titik awal terbentuknya *execution gap* yang signifikan akibat terjadinya *concurrent delay*. Faktor penyebabnya bersifat multifaktoral, mencakup keterlambatan logistik, gangguan cuaca berupa hujan, serta kendala teknis pada titik tuang (*pouring duration*).
- Fase 4: Optimasi Operasional (*Recovery Phase*)  
Fase 4 tercatat sebagai periode paling optimal di mana grafik aktual mendekati atau bahkan melampaui rencana. Hal ini terjadi karena variabel hambatan yang muncul hanyalah *delay* logistik murni tanpa gangguan teknis di lapangan. Selain itu, rata-rata *headway* pada fase ini berada dalam kondisi ideal (minim kemacetan), sehingga suplai material dapat diserap secara maksimal oleh alat di lokasi proyek.
- Fase 5: Puncak Deviasi dan *System Fatigue*  
Pada fase akhir, terjadi kembali *concurrent delay* yang jauh lebih kompleks. Kesenjangan eksekusi dipicu oleh kombinasi antara kemacetan eksternal pada hari kerja (Senin) yang merusak *headway*, gangguan pada beberapa unit *concrete pump*, serta munculnya gejala *system fatigue* (kelelahan sistem). *Fatigue* ini mencakup penurunan performa alat akibat durasi kerja kontinu yang ekstrem serta

penurunan produktivitas tenaga kerja di lapangan.

Akumulasi dari seluruh hambatan ini menyebabkan penuangan berakhir melampaui durasi 53 jam yang direncanakan.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan hipotesis bahwa deviasi durasi pada penuangan *mass concrete* dipicu oleh kombinasi kompleks antara faktor logistik dan kendala operasional lapangan. Temuan utama menunjukkan terjadinya pembengkakan durasi sebesar 16,3 jam (30,7%) dari rencana awal 53 jam menjadi 69,3 jam. Melalui dekomposisi data, ditemukan bahwa keterlambatan logistik (seperti fluktuasi *headway* armada) berkontribusi sebesar 49% terhadap total deviasi. Sementara itu, 51% sisanya di-atribusi-kan kepada kendala operasional lapangan yang bersifat *concurrent*, meliputi pembengkakan durasi penuangan, kejadian *slump reject*, gangguan cuaca hujan, serta gejala *system fatigue* pada alat dan tenaga kerja di fase akhir. Analisis terhadap 1.819 unit armada mengonfirmasi bahwa efisiensi penuangan sangat bergantung pada sinkronisasi antara kecepatan suplai eksternal dan kesiapan teknis di titik tuang. Penelitian ini memberikan kontribusi pada literatur manajemen konstruksi melalui metode kuantifikasi *execution gap* yang memisahkan tanggung jawab logistik dan operasional secara terukur.

Meskipun memberikan gambaran komprehensif, penelitian ini memiliki keterbatasan pada fokus tunggal di satu proyek *high-rise* serta belum menyertakan analisis dampak finansial secara mendalam. Oleh karena itu, arah rekomendasi penelitian di masa depan adalah pengembangan sistem monitoring berbasis *Artificial Intelligence* (AI) untuk prediksi produktivitas secara real-time serta studi lebih lanjut mengenai mitigasi *system fatigue* pada pengecoran kontinu skala besar. Secara manajerial, penelitian ini menyimpulkan bahwa pengawasan mutu beton (*slump*) dan kesiapan mekanis alat di lapangan memegang peranan vital yang setara, bahkan sedikit lebih tinggi, dibandingkan manajemen logistik jalan raya. Untuk prediksi produktivitas secara real-time serta studi lebih lanjut mengenai mitigasi *system fatigue* pada pengecoran kontinu skala besar. Secara manajerial, penelitian ini menyimpulkan bahwa pengawasan mutu beton

(*slump*) dan kesiapan mekanis alat di lapangan memegang peranan vital yang setara, bahkan sedikit lebih tinggi, dibandingkan manajemen logistik jalan raya.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 207. (2005). *ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete*.
- ACI Committee 304. (2000). *ACI 304R-00 Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete*.
- Antwi-Afari, M. F., Li, H., Edwards, D. J., Pärn, E. A., Seo, J., & Wong, A. Y. L. (2017). Biomechanical analysis of risk factors for work-related musculoskeletal disorders during repetitive lifting task in construction workers. *Automation in Construction*, 83, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.AUTCON.2017.07.007>
- Chakraborty, P., Farhan, M., Das, S. R., & Sen, D. (2023). INVESTIGATION ON PROPERTIES OF READY MIXED CONCRETE OVER TRANSIT TIME. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 35(2), 41–49. <https://doi.org/10.11113/mjce.v35.20289>
- Chen, J., & Trejo, D. (2016). Influence of truck drum revolution count on fresh and hardened concrete characteristics. *ACI Materials Journal*, 113(1), 25–34. <https://doi.org/10.14359/51687978>
- Ezeldin, A. S., & El-Hakim, Y. (2023). Analysis of Concurrent Delays in the Construction Industry. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 251, 25–40. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1029-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1029-6_3)
- Galić, M., & Kraus, I. (2016). Simulation Model for Scenario Optimization of the Ready-Mix Concrete Delivery Problem. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 11(2), 7–18. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2016-0014>
- Hasan, A., Sahoo, N. R., Ghosh, A., & Jha, K. N. (2021). A Queuing Model to Improve the Utilization of Concreting Equipment. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-3977-0\\_75](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-3977-0_75)
- Hsie, M., Huang, C. Y., Hsiao, W. T., Wu, M. Y., & Liu, Y. C. (2022). Optimization on Ready-Mixed Concrete Dispatching Problem via Sliding Time Window Searching. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(8), 3173–3187. <https://doi.org/10.1007/S12205-022-1273-0>

- Konior, J., & Szóstak, M. (2020). The S-curve as a tool for planning and controlling of construction process-case study. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/app10062071>
- Mahgoub, M., Hussein, M., & Mousa, A. (2024). Extended discharge time of ready-mixed concrete: Myth or necessity? *Construction and Building Materials*, *437*, 136913. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136913>
- Ninpan, K., Huang, S., Vitillo, F., Assaad, M. A., Benmiloud Bechet, L., & Plana, R. (2024). Mitigating Co-Activity Conflicts and Resource Overallocation in Construction Projects: A Modular Heuristic Scheduling Approach with Primavera P6 EPPM Integration. *Algorithms*, *17*(6). <https://doi.org/10.3390/a17060230>
- Park, M., Kim, W. Y., Lee, H. S., & Han, S. (2011). Supply chain management model for ready mixed concrete. *Automation in Construction*, *20*(1), 44–55. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2010.07.005>
- Patil, P. P., & Salgud, P. R. R. (2019). Determination of Downtime Cost of Ready-Mix Concrete Plant and Transit Mixer. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, *8*(9), 3105–3108. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I8760.078919>
- Ridder, H. G. (2017). The theory contribution of case study research designs. *Business Research*, *10*(2), 281–305. <https://doi.org/10.1007/s40685-017-0045-z>
- Umer, W., Yu, Y., Fordjour Antwi Afari, M., Anwer, S., & Jamal, A. (2023). Towards automated physical fatigue monitoring and prediction among construction workers using physiological signals: An on-site study. *Safety Science*, *166*, 106242. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2023.106242>
- Wang, Z., Barak, R., Sacks, R., Yevu, S. K., Bentur, A., & Hadjidemetriou, G. M. (2026). Construction productivity and digital technologies. *Automation in Construction*, *183*, 106768. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2026.106768>
- Zeyad, A. M., & Almalki, A. (2020). Influence of mixing time and superplasticizer dosage on self-consolidating concrete properties. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(3), 6101–6115. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.04.013>
- Zhang, R., Deng, R., Zhang, Z., & Mao, Y. (2025). Vision-based real-time progress tracking and productivity analysis of the concrete pouring process. *Developments in the Built Environment*, *21*, 100609. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2025.100609>