

## ANALISIS REKAYASA *INVERT LEVEL* DASAR SALURAN TERHADAP KINERJA HIDROLIS DAN DEVIASI KURVA-S PADA PEKERJAAN PEMASANGAN BOX CULVERT

Didimus Dedy<sup>1\*</sup>, Nur Satria Firmansyah<sup>1</sup>, Fadli Irmansyah<sup>1</sup>, Dwiki Setiawan<sup>1</sup>,  
Sandi Ardiansyah<sup>1</sup>, David Juanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PT. Ichsan Total Teknologi, Jakarta Timur, 13530, DKI Jakarta

\*Email: dedy@binichsan.com

### Abstrak

*Penerapan komponen pracetak kaku seperti Box Culvert pada drainase urban mempercepat konstruksi tetapi rentan terhadap kendala lapangan tak terduga (unforeseen site conditions). Penelitian kuantitatif ini mengkaji rekayasa lapangan dinamis pada Proyek Pembangunan Saluran di Jalan Nusantara X dengan kontrak ketat 90 hari kalender. Masalah muncul pada Minggu ke-4 (M4) berupa genangan air limbah domestik setinggi 24 cm akibat ketidaksesuaian dokumen perencanaan (Detail Engineering Design). Solusi teknis dilakukan melalui perubahan elevasi dasar (invert level) secara radikal dengan memperdalam Manhole PR2 sebesar 23 cm, PR3 sebesar 70 cm, dan PR4 sebesar 80 cm. Evaluasi hidrolis membuktikan rekayasa ini meningkatkan gradien kemiringan efektif hingga +1,30% pada segmen kritis, menghasilkan efek hisap yang menjamin self-cleansing velocity untuk mencegah sedimentasi jangka panjang. Namun, penanganan kendala selama M4 hingga M7 (23,07% durasi kontrak) menghantam fase puncak akselerasi proyek di mana 44,74% bobot rencana dipertaruhkan, memicu varians negatif signifikan pada kurva-S. Penelitian ini menyimpulkan adanya paradoks teknik di mana pengorbanan jadwal konstruksi jangka pendek akibat hambatan bawah permukaan pada hakikatnya merupakan bentuk investasi struktural jangka panjang (lifecycle investment) yang krusial demi mengamankan keberlanjutan fungsi hidrolis drainase perkotaan.*

**Kata Kunci:** Box Culvert, Invert Level, kurva-S, Kemiringan Hidrolis, Unforeseen Site Conditions.

### Abstract

*The Implementing rigid precast box culverts in urban drainage fast-tracks construction but remains vulnerable to unforeseen site conditions. This quantitative study examines a dynamic field engineering intervention at the Jalan Raya Nusantara X drainage project under a strict 90-day contract. A critical issue emerged during Week 4 (W4) when an unmapped 24 cm accumulation of domestic sewage water breached the initial Detail Engineering Design (DED) parameters. Supervisors executed a radical invert level adjustment, deepening Manhole PR2 by 23 cm, PR3 by 70 cm, and PR4 by 80 cm. Hydraulic evaluation confirms that this intervention enhanced the effective channel gradient by +1.30% in the critical segment, creating a localized sump effect that ensures self-cleansing velocity to prevent long-term sedimentation. Conversely, resolving this constraint from W4 to W7 (23.07% of contract duration) disrupted the project's peak acceleration phase, jeopardizing 44.74% of the planned S-curve weightage and driving a stark negative schedule variance. This paper identifies an engineering paradox, concluding that short-term schedule sacrifices driven by subsurface anomalies fundamentally constitute a vital long-term lifecycle structural investment required to guarantee the hydraulic sustainability of urban drainage networks.*

**Keywords:** Box Culvert, Invert Level, S-Curve, Hydraulic Gradient, Unforeseen Site Conditions.

## 1. PENDAHULUAN

Pembangunan sistem drainase perkotaan di kawasan permukiman padat seringkali menghadapi tantangan kompleksitas tata ruang bawah tanah. Modernisasi saluran beralih dari sistem konvensional menuju penggunaan teknologi pracetak seperti U-ditch dan Box Culvert (BC) untuk mempercepat durasi pelaksanaan. Karakteristik utama komponen pracetak ini adalah sifat strukturnya yang kaku (rigid), di mana efektivitas pengalirannya sangat bergantung pada akurasi elevasi dasar saluran (invert level) dalam Detail Engineering Design (DED).

Realita di lapangan seringkali menunjukkan diskrepansi antara dokumen perencanaan dan kondisi topografi riil. Pada Proyek Pembangunan Saluran di Jalan Raya Nusantara X, ditemukan akumulasi air limbah domestik yang menggenang di antara dua manhole, mengindikasikan adanya debit buangan lokal yang tidak terakomodasi dalam DED. Karena sifat BC yang tidak fleksibel terhadap perubahan dimensi vertikal secara instan, penemuan ini memaksa tim pengawas dan kontraktor untuk melakukan rekayasa elevasi dinamis dengan memperdalam posisi manhole penyesuaian secara bertahap, guna menjamin air limbah mengalir secara gravitasi tanpa mengubah elevasi akhir penutup manhole (top level).

Secara akademis, literatur manajemen konstruksi drainase umumnya berfokus pada optimasi durasi menggunakan metode penjadwalan standar. Masih terbatas penelitian yang mengkuantifikasi dampak penyesuaian elevasi akibat unforeseen site conditions terhadap fluktuasi kurva-S pada elemen pracetak berantai. Perubahan kemiringan hidrolis di tengah masa pelaksanaan tidak hanya mengubah volume galian tanah, tetapi juga menciptakan jeda waktu (time lag) akibat proses birokrasi dan penyesuaian metode dewatering. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak teknis dan manajerial dari penyesuaian invert level secara dinamis, ditinjau dari perubahan profil hidrolis dan deviasi kemajuan fisik terhadap kurva-S rencana.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Penerapan elemen beton pracetak menawarkan reduksi waktu pelaksanaan yang signifikan (Wang & Huang, 2024). Namun, sifat mekanisnya yang kaku menuntut toleransi standar kemiringan galian yang ketat, di mana penyimpangan dapat memicu konsentrasi tegangan lokal dan kegagalan fungsi hidrolis (Department of Transport and Main Roads, 2025).

Proyek infrastruktur linear di kawasan padat seringkali dihadapkan pada ketidakpastian kondisi bawah permukaan. Dokumen DED kerap gagal menangkap keberadaan utilitas informal aktif (Amarasekara, et al., 2018). Akumulasi air di area galian bertindak sebagai kontaminan operasi yang menghentikan siklus linear pemasangan (Loddo, Christian; McGinnis, Mitchell, 2023), sehingga memerlukan rekayasa lapangan dinamis untuk mencegah aliran balik (*backwater*).

Dalam manajemen proyek, kurva-S berfungsi melacak kemajuan fisik. Perubahan invert level dikategorikan sebagai *Major Contract Change Order* (CCO) yang memicu deviasi waktu destruktif pada proyek berdurasi ketat (Abdel Hamid, et al., 2025). Time lag administratif dan operasional menyebabkan stagnasi horizontal pada kurva-S aktual, menciptakan celah deviasi negatif yang besar (Susanto & Wiyanto, 2025). Modifikasi vertikal manhole merubah profil hidrolis dan mempengaruhi kecepatan aliran ( $V$ ) berdasarkan Formula Manning, di mana peningkatan kecuraman kemiringan secara teoritis menjaga self-cleansing velocity (Giliomee, et al., 2026); (Wang, et al., 2024)).

## 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Desain Penelitian dan Alur Kerja

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif-kuantitatif yang mengombinasikan dua disiplin ilmu teknik sipil, yaitu rekayasa hidrolika (*hydraulic engineering*) dan manajemen konstruksi (*construction management*). Alur penelitian dirancang untuk menganalisis suatu fenomena hambatan tak terduga (*unforeseen site condition*) dari tahap identifikasi masalah di lapangan hingga kuantifikasi dampaknya terhadap keberlanjutan proyek. Tahapan penelitian secara sistematis dibagi menjadi empat fase utama:

1. Fase Identifikasi & Dokumentasi Lapangan: Mendokumentasikan penemuan genangan air limbah setinggi 24 cm pada segmen kritis.
2. Fase Rekayasa Geometris Dinamis: Melakukan perhitungan ulang elevasi dasar manhole penyesuaian (*invert level engineering*) sebagai solusi teknis agar air mengalir secara gravitasi.
3. Fase Analisis Komparatif Hidrolis: Membandingkan gradien kemiringan (*slope*) rencana DED dengan kemiringan as-built hasil rekayasa lapangan.
4. Fase Analisis Varians Jadwal: Mensimulasikan dan menghitung deviasi kemajuan fisik proyek pada kurva-S akibat time lag operasional selama periode gangguan.

### 3.2. Objek Studi Kasus dan Data Geometris Eksisting

Objek kajian dalam penelitian ini adalah proyek pembangunan saluran galian linear sepanjang total durasi kontrak dengan masa pelaksanaan 90 hari kalender (13 Minggu). Komponen struktural yang digunakan merupakan kombinasi antara saluran beton pracetak terbuka (U-ditch) dan saluran tertutup (Box Culvert / BC). Secara spesifik, segmen yang mengalami kendala teknis dan menjadi fokus analisis berada pada manhole PR1 hingga PR5 yang menggunakan komponen Box Culvert ukuran 80 (BC 80).

Detail konfigurasi panjang saluran per segmen studi kasus disajikan dalam Tabel 3.1 berikut:

**Tabel 3.1. Konfigurasi Jarak Antar-Manhole dan Jenis Komponen Saluran**

| Segmen     | Jarak (L)  | Jenis Pracetak        | Keterangan Wilayah                              |
|------------|------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| PR0 – PR1  | 25,0 meter | <i>U-ditch</i> 60     | Area Hulu ( <i>Upstream</i> )                   |
| PR1 – PR2  | 38,0 meter | <i>Box Culvert</i> 80 | Zona Transisi Hulu                              |
| R2 – PR3   | 36,0 meter | <i>Box Culvert</i> 80 | Titik Temuan Genangan (Pusat Masalah)           |
| PR3 – PR4  | 26,0 meter | <i>Box Culvert</i> 80 | Zona Penyesuaian Elevasi                        |
| PR4 – PR5  | 12,0 meter | <i>Box Culvert</i> 80 | Zona Perlintasan Jalan ( <i>Road Crossing</i> ) |
| PR5 – PR6  | 40,0 meter | <i>U-ditch</i> 80     | Area Hilir ( <i>Downstream</i> )                |
| PR6 – PR6a | 6,0 meter  | <i>Box Culvert</i> 80 | Area Hilir                                      |
| PR6a – PR7 | 38,5 meter | <i>U-ditch</i> 80     | Titik Akhir/sambung ke saluran lain             |

### 3.3. Metode Analisis Hidrolis (Perubahan Gradien Kemiringan)

Untuk mengetahui dampak dari rekayasa vertikal dasar manhole terhadap unjuk kerja aliran hidrolis, dilakukan perhitungan gradien kemiringan saluran (S). Formula dasar yang digunakan untuk menghitung kemiringan antar-manhole adalah:

$$S = \frac{\Delta z}{L} \quad (1)$$

Dimana S adalah gradien kemiringan saluran (m/m atau %).  $\Delta z$  adalah selisih elevasi vertikal invert level antara manhole hulu dan hilir pada satu segmen (meter). L adalah jarak horizontal antar-manhole (meter). Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai kemiringan rencana ( $S_{plan}$ ) yang tertera pada dokumen DED asli dari instansi pemilik proyek dengan nilai kemiringan aktual pasca-penyesuaian ( $S_{actual}$ ). Matriks perubahan elevasi dasar ( $\Delta z_{adj}$ ) yang diaplikasikan di lapangan sebagai variabel input analisis hidrolis ini meliputi:

- Penurunan Manhole PR2 ( $\Delta z$  PR2) = -23cm (-0,23m);
- Penurunan Manhole PR3 ( $\Delta z$  PR3) = -70cm (-0,70m);
- Penurunan Manhole PR4 ( $\Delta z$  PR4) = -80cm (-0,80m);

Selanjutnya, perubahan gradien kemiringan ini akan divalidasi menggunakan persamaan kontinuitas pengaliran untuk memastikan tidak terjadi potensi aliran balik (*backwater effect*) pada hulu PR1 maupun luapan di hilir PR5.

### 3.4. Metode Analisis Manajemen Waktu (Simulasi Deviasi kurva-S)

Dampak manajerial dari rekayasa lapangan ini diukur melalui besarnya deviasi kemajuan fisik pada kurva-S proyek. Periode kritis terjadinya kendala di lapangan, mulai dari penghentian pemasangan komponen pracetak akibat genangan air, proses negosiasi teknis, perubahan metode kerja galian dalam (*over-excavation*), penambahan pompa dewatering, hingga penyelesaian level lantai kerja (*bedding preparation*) yang baru terjadi antara Minggu ke-4 (M4) hingga Minggu ke-7 (M7). Langkah-langkah analisis varians jadwal meliputi:

1. Ekstraksi Bobot Rencana ( $W_{plan}$ ): Mengambil data persentase bobot mingguan rencana dari Dokumen kurva-S awal yang ada di spreadsheet kontraktual.

2. Identifikasi Jeda Waktu (*Time Lag*): Menghitung selisih waktu operasional yang hilang akibat penanganan rembesan air limbah domestik masyarakat selama rentang waktu 3 minggu (M4-M7).
3. Perhitungan Deviasi Progres (*Variance*): Menghitung nilai varians progres mingguan pada masa kritis dengan rumus:

$$Variance (\%) = W_{actual} - W_{plan} \quad (2)$$

4. Analisis *Ripple Effect* Jalur Kritis: Menganalisis bagaimana hambatan pada segmen jalan tengah (PR2–PR4) menahan pasokan logistik komponen pracetak berikutnya (Box Culvert dan U-ditch hilir), sehingga mendistorsi proyeksi bentuk kurva-S dari bentuk ideal (*smooth S-curve*) menjadi pola horizontal stagnan.

### 3.5. Analisis Komparatif Alternatif Solusi

Untuk menjamin objektivitas akademis dan membuktikan bahwa rekayasa penurunan invert level merupakan solusi paling optimal, penelitian ini melakukan analisis komparatif teoretis menggunakan pendekatan *Value Engineering* dan estimasi biaya siklus hidup (*lifecycle cost*). Berdasarkan tinjauan literatur dan kaidah rekayasa drainase perkotaan, tiga opsi mitigasi dievaluasi: (1) Penurunan Invert Level (Opsi A - *As-Built*), (2) Sistem *Bypass Pumping* Kontinu (Opsi B), dan (3) Peninggian Elevasi Dasar Saluran (Opsi C).

Analisis biaya-manfaat (*Cost-Benefit Analysis*) dirangkum dalam matriks evaluasi pada Tabel 3.2. Estimasi biaya pada Tabel 3.2 diindeksasikan berdasarkan volume pekerjaan standar dan harga satuan umum konstruksi wilayah Jakarta.

**Tabel 3.2. Matriks Analisis Komparatif Alternatif Solusi**

| Parameter Evaluasi                   | Opsi A: Penurunan Invert Level ( <b>Dipilih</b> )                                                      | Opsi B: Bypass Pumping Kontinu                                                                             | Opsi C: Peninggian Profil Saluran                                                     |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Biaya Konstruksi Awal (CAPEX)        | Moderat (Galian ekstra, urugan pasir tambahan, dewatering sementara, perkuatan <i>sheetpile</i> )      | Tinggi (Sewa pompa submersible, generator, perpipaan <i>bypass</i> , struktur rumah pompa)                 | Rendah (Hanya penambahan volume urugan tanah di bawah <i>bedding</i> )                |
| Biaya Operasional & Perawatan (OPEX) | Sangat Rendah (Sistem gravitasi pasif, tanpa komponen mekanis yang bergerak)                           | Sangat Tinggi Konsumsi bahan bakar/listrik 24 jam, penggantian pompa periodik, tenaga kerja <i>standby</i> | Rendah (Sistem gravitasi pasif)                                                       |
| Kinerja Hidrolis Jangka Panjang      | Optimal (Memenuhi <i>self-cleansing velocity</i> , aliran gravitasi stabil, risiko sedimentasi rendah) | Rendah (Sangat rentan terhadap kegagalan mekanis, <i>fail-catastrophic</i> saat listrik mati)              | Tidak Terpenuhi (Gradien kemiringan menjadi negatif/mundur, memicu <i>backwater</i> ) |
| Kendala Fisik & Sosial               | Dapat diatasi dengan metode galian berpenyangga sementara                                              | Kebisingan tinggi, risiko luapan saat <i>maintenance</i> , mengganggu permukiman warga                     | Tidak Memungkinkan (Benturan dengan <i>clearance</i> elevasi aspal jalan eksisting)   |

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Rekayasa Geometris dan Validasi Kinerja Hidrolis

Penemuan akumulasi air limbah setinggi 24 cm di area antara Manhole PR2 dan PR3 mengindikasikan adanya ketidaksesuaian elevasi rencana DED terhadap debit buangan domestik eksisting. Untuk mengatasinya tanpa merubah elevasi atas penutup manhole (*top level*), dilakukan penurunan invert level secara bertahap pada manhole-manhole penyesuaian. Menggunakan rumus

gradien kemiringan dalam persamaan (2), berikut adalah perbandingan matematis antara desain awal (DED) dengan hasil rekayasa aktual di lapangan (*As-Built*):

1. Segmen PR1 – PR2 (L = 38m):

- Manhole PR2 diperdalam sebesar 23 cm. Penurunan ini menambah curam gradien hulu menuju PR2 sebesar:

$$\Delta S_{PR1-PR2} = \frac{0.23}{38} 100\% = +0.6 \% \quad (3)$$

- Pembahasan: Peningkatan kemiringan sebesar 0,60% dari desain awal mempercepat laju aliran menuju PR2, mencegah pengendapan di zona transisi hulu.

2. Segmen PR2 – PR3 (L = 36 m):

- Titik utama genangan air limbah (24 cm) berada di PR3. Manhole PR3 diturunkan secara radikal sebesar 70 cm, sementara PR2 turun 23 cm. Selisih penurunan bersih antar kedua manhole ini adalah 70cm - 23cm = 47cm.
- Penambahan kemiringan efektif pada segmen kritis ini adalah:
- 

$$\Delta S_{PR2-PR3} = \frac{0.47}{36} 100\% = +1.3 \% \quad (4)$$

- Pembahasan: Ini adalah rekayasa paling krusial. Peningkatan gradien hingga 1,30% menciptakan efek hisap (sump effect) yang secara hidrolis berhasil menarik air limbah yang semula menggenang statis, mengonversinya menjadi aliran dinamis yang memenuhi self-cleansing velocity.

3. Segmen PR3 – PR4 (L = 26 m):

- Manhole PR4 diperdalam sebesar 80 cm. Selisih penurunan bersih dengan PR3 (70 cm) adalah 80cm - 70cm = 10cm.
- Penambahan kemiringan efektif pada segmen ini adalah

$$\Delta S_{PR3-PR4} = \frac{0.1}{26} 100\% = +0.38 \% \quad (5)$$

4. Segmen PR4 – PR5 (L = 12 m - *Road Crossing*):

- Karena PR4 turun 80 cm sedangkan PR5 di bagian hilir harus dipertahankan sesuai elevasi rencana untuk menyambung ke saluran U-ditch eksisting, maka aliran harus dinaikkan kembali atau dinormalisasi setinggi 80 cm dalam jarak pendek 12 meter sebelum memasuki PR5.

Sebagai validasi, berikut perhitungan matematis untuk membuktikan klaim pencegahan sedimentasi, dilakukan perhitungan kecepatan aliran menggunakan Persamaan Manning pada BC 80 (dimensi 0,8 x 0,8 m). Dengan asumsi aliran penuh, radius hidrolis  $R = 0,267m$ , dan koefisien kekasaran beton  $n = 0,013$ .

- Gradien awal DED ( $S_{plan}$ ) = 0,20%
- Penambahan gradien  $\Delta S = +1,3\%$
- Gradien aktual ( $S_{actual}$ ) = 1,5%

$$V = \frac{1}{0.013} 0,267^{2/3} \sqrt{0,015} = 2,83 \frac{m}{s} \quad (6)$$

Hasil perhitungan membuktikan secara matematis bahwa kecepatan aliran aktual (2,83 m/s) jauh melampaui batas minimum *self-cleansing velocity* (0,60 m/s). Peningkatan gradien ini menciptakan efek hisap (*sump effect*) yang mengonversi genangan statis menjadi aliran dinamis.

#### 4.2 Analisa Deviasi Kurva S dan Dampak Manajerial

Proyek ini memiliki masa kontrak yang ketat, yaitu 90 hari kalender (13 Minggu). Penemuan kendala genangan air, proses evaluasi teknis, penentuan solusi rekayasa, hingga pelaksanaan galian tambahan (*over-excavation*) dan dewatering intensif memakan waktu dari Minggu ke-4 (M4) hingga Minggu ke-7 (M7). Secara manajerial, rentang waktu penanganan masalah sepanjang 3 minggu ini memiliki dampak signifikan terhadap kinerja waktu proyek:

1. Persentase Durasi Terdampak: Rentang waktu 3 minggu di dalam total masa kontrak 13 minggu merepresentasikan 23,07% dari keseluruhan waktu proyek:

$$\text{Waktu Terdampak} = \frac{3 \text{ minggu}}{13 \text{ minggu}} 100\% = 23.07\% \quad (7)$$

Menghabiskan hampir seperempat durasi total kontrak hanya untuk menyelesaikan konflik elevasi sepanjang 100 meter (PR1-PR5) menciptakan risiko keterlambatan (*schedule risk*) yang masif bagi sisa pekerjaan hilir.

2. Dampak Horizontal pada kurva-S (*Ripple Effect*):

Pemasangan saluran pracetak bersifat linear dan berantai. Berdasarkan kurva-S rencana, periode M4 hingga M7 seharusnya merupakan fase dengan kemiringan kurva paling terjal (progres mingguan tertinggi), karena pada saat itulah alat berat bekerja penuh memasang komponen Box Culvert 80 yang memiliki bobot persentase (Bobot %) sangat besar. Akibat adanya rekayasa galian vertikal ini, aktivitas pemasangan pracetak mengalami stagnasi horizontal pada kurva-S Aktual. Tenaga kerja dan ekskavator dialihkan untuk:

- Melakukan pengurasan (*dewatering*) air limbah domestik yang terus mengalir dari pemukiman warga.
- Melakukan penggalian tanah ekstra (*over-excavation*) sedalam hingga 80 cm di bawah level rencana awal.
- Melakukan penguatan dinding tanah galian guna mencegah kelongsoran akibat galian yang semakin dalam, serta penataan ulang pasir urug (*bedding preparation*) sebagai fondasi Box Culvert.

3. Konsekuensi *Work Over* (Tambah Kurang):

Meskipun elevasi atas manhole tetap sejajar dengan tanah sekitar, perubahan kedalaman galian merubah volume pekerjaan secara signifikan. Penggalian yang lebih dalam membutuhkan volume urugan pasir dasar yang lebih tebal dan presisi agar segmen kaku Box Culvert tidak mengalami patahan sambungan (*joint failure*) akibat tekanan tanah lateral pasca-konstruksi.

Untuk memahami seberapa destruktif dampak rekayasa invert level galian terhadap lini masa proyek, perlu ditinjau distribusi bobot rencana kerja pada periode terjadinya kendala (Minggu ke-4 hingga Minggu ke-7). Berdasarkan dokumen penjadwalan kontraktual, proyek ini menerapkan strategi akselerasi linear di pertengahan durasi. Matriks distribusi bobot rencana mingguan sepanjang periode kritis tersebut disajikan pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1. Matriks Bobot Rencana Kontraktual pada Periode Kritis (M4–M7)**

| Periode Pelaksanaan | Bobot Rencana | Bobot Aktual | Varians (%) | Karakteristik Fase Konstruksi            |
|---------------------|---------------|--------------|-------------|------------------------------------------|
| M4                  | 10,37%        | 9,1%         | -1.27       | Akhir Fase Persiapan & Awal Ekskavasi    |
| M5                  | 23,44%        | 12,5%        | -10.94      | Puncak Pemasangan <i>Box Culvert</i> 80  |
| M6                  | 36,51%        | 15,8%        | -20.71      | Puncak Pemasangan <i>Box Culvert</i> 80  |
| M7                  | 51,86%        | 21,0%        | -30,86      | Fase Agresif Struktur Pembantu & Manhole |

*Catatan: Angka diolah berdasarkan nilai dasar dari berkas kurva-S rencana aktual proyek*

Berdasarkan Tabel 4.1, total bobot rencana yang dialokasikan pada rentang M4 hingga M7 adalah sebesar 44,74%. Angka ini membuktikan secara empiris bahwa jendela waktu 4 minggu tersebut merupakan fase krusial akumulasi progres terbesar dalam siklus hidup proyek 90 hari kalender ini. Lompatan bobot mingguan yang sangat drastis terjadi pada M5 dan M6 (masing-masing sebesar 13,07%), yang bertepatan dengan jadwal kedatangan dan pemancangan massal komponen Box Culvert 80 di zona tengah saluran (segmen PR1 hingga PR5).

Ketika rembesan air limbah domestik setinggi 24 cm ditemukan menggenangi di titik PR3 pada M4, seluruh rangkaian pekerjaan linear pracetak di belakangnya otomatis terhenti (*chain-delay effect*). Alat berat ekskavator dan tenaga kerja yang seharusnya melakukan penutupan progres harian terpaksa dialihkan untuk menangani pekerjaan non-standar, meliputi:

1. Operasional dewatering darurat secara kontinu.
2. Penambahan kedalaman galian manual (*over-excavation*) hingga sedalam 80 cm di luar profil DED.
3. Stabilisasi lereng galian tanah yang melunak akibat kontaminasi air limbah.

Dampak dari pengalihan sumber daya ini menyebabkan capaian progres aktual pada M5, M6, dan M7 bergerak mendekati garis horizontal (stagnan). Secara akademis, kondisi ini menciptakan Varians Negatif Progres Kumulatif yang tajam pada akhir M7. Kerugian waktu (*time loss*) sebesar 23,07% dari total durasi kontrak ini tidak hanya menunda serah terima pekerjaan, melainkan memaksa kontraktor untuk melakukan pengerjaan lembur (*overtime*) berbiaya tinggi pada sisa minggu hilir (M8 hingga M13) demi mengejar ketertinggalan kurva akumulatif rencana yang telah menembus angka 51,86% di Minggu ke-7.

## 5. Kesimpulan: Paradoks Fleksibilitas Struktur Pracetak terhadap Efisiensi Siklus Hidup Drainase Perkotaan

Penelitian ini mengonfirmasi adanya trade-off antara rigiditas jadwal kontrak dengan rigiditas komponen struktural pracetak. Penggunaan Box Culvert menuntut kepastian tanah dasar yang absolut. Ketika dihadapkan pada ketidakpastian bawah permukaan seperti buangan limbah informal, realokasi waktu konstruksi jangka pendek (*time lag* sebesar 23,07%) menjadi konsekuensi teknis yang tidak terhindarkan.

Penyesuaian jadwal di pertengahan proyek ini merupakan bentuk mitigasi dan investasi teknis jangka panjang (*lifecycle structural investment*) yang berhasil mencegah kegagalan fungsi hidrolis. Keberhasilan proyek drainase perkotaan dengan sistem pracetak tidak hanya diukur dari ketepatan garis linear kurva-S kontraktual, melainkan dari fleksibilitas rekayasa (*engineering resilience*) dalam merespons deviasi jadwal demi menjamin keberlanjutan fungsi hidrolis saluran secara menyeluruh.

## Pernyataan Konflik Kepentingan (*Conflict of Interest*)

Para penulis adalah staf profesional dari PT. Ichsan Total Teknologi, yang terlibat dalam pelaksanaan proyek yang dikaji. Untuk menjaga objektivitas akademis, data lapangan telah diverifikasi melalui dokumen kontraktual dan catatan pengawas independen, serta analisis dilakukan menggunakan parameter standar teknik sipil yang dapat direproduksi. Tidak ada pendanaan eksternal yang memengaruhi interpretasi hasil penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

Abdel Hamid, M., Almutairi, N. S., Musleh, N. & Abdelhaleem, H. M., 2025. A Risk-Based Prioritization Framework for Contractual Claim Drivers in Public Construction Projects: Evidence from Kuwait. *Buildings*, 15(20), p. 3637.

Amarasekara, W. D. L., Perera, B. A. K. S. & Rodrigo, M. N. N., 2018. Impact of Differing Site Conditions on Construction Projects. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 10(3).

Department of Transport and Main Roads, 2025. *Design Criteria for Precast Drainage Pits (Technical Note 23)*, Queensland: Department of Transport and Main Roads.

Giliomee, T. M. D., Loots, I. & van Dijk, M., 2026. Inlet modifications for increased box culvert capacity: a numerical modelling approach. *Water Science & Technology*, 93(4), pp. 469-482.

Loddo, Christian; McGinnis, Mitchell, 2023. *Managing the risks beneath the surface of infrastructure projects*, Melbourne: WSP insights.

Susanto, A. E. & Wiyanto, H., 2025. Analisis Pengaruh Keterlambatan Proyek Terhadap Estimasi Biaya Dan Waktu Penyelesaian Proyek X Di Sawangan. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(1).

Wang, D. & Huang, J., 2024. Automated Generation and Internal Force Visualization for Box Culvert Based on Building Information Modeling. *Applied Science*, 14(6), p. 2543.

Wang, S. et al., 2024. Research on the method of identifying vertical earth pressure of hinged prefabricated culvert box culvert on the top slab. *Scientific Reports* 14, p. 18844 (2024).