JCEMTY Journal of Community Empowerment for Multidisciplinary (JCEMTY)
Volume 04 Number 02 (November 2026)
e-ISSN: 2987-5080; p-ISSN: 2987-5072

Application of the Integrated Construction Evaluation Framework (ICEF) to support the selection of communal wastewater treatment plant construction methods in high groundwater table areas

Penerapan Integrated Construction Evaluation Framework (ICEF) untuk mendukung pemilihan metode konstruksi IPAL komunal di kawasan bermuka air tanah tinggi

Iwan Kuswanto[1], Butyliastri Sulistyaningsih[1], Wahyu Iswandy[1], Dendy Setyawan[2]

[1]Sekolah Tinggi Teknik Raden Wijaya, Mojokerto, Indonesia
[2]Badan Riset dan Inovasi Daerah Provinsi Jawa Timur, Indonesia

Korespondensi: Dendy Setyawan, dendysetyawan1989@gmail.com

Disubmit: 09-07-2026 Direvisi: 26-09-2026 Diterima: 01-10-2026 Dipublikasikan: 02-11-2026

ABSTRACT

Constructing communal wastewater treatment plants in areas with high groundwater tables requires efficient and adaptable methods suited to site conditions. This community service activity aimed to apply the Integrated Construction Evaluation Framework (ICEF) to evaluate construction methods based on cost, implementation time, productivity, material price sensitivity, and geotechnical characteristics. A case study was conducted at a communal wastewater treatment plant project in Kedundung, Mojokerto City, using field observations, project document reviews, comparisons between conventional cast-in-place concrete and prefabricated methods, and integration of findings into the ICEF matrix. The results indicated that prefabricated construction performed better across most indicators, particularly cost efficiency, shorter construction time, higher productivity, and resilience to material price fluctuations. ICEF also helped identify suitable construction methods based on groundwater conditions, budget constraints, project duration, workforce availability, logistical access, and project scale. These findings demonstrate ICEF's potential to support local governments, sanitation managers, consultants, and contractors in planning communal wastewater infrastructure more systematically, efficiently, and sustainably.

Keywords: *community sanitation, communal wastewater treatment plant, construction efficiency, ICEF, prefabricated construction*

ABSTRAK

Pembangunan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) komunal di wilayah dengan muka air tanah tinggi memerlukan metode konstruksi yang efisien, adaptif, dan sesuai dengan kondisi lokasi. Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan menerapkan *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) untuk mengevaluasi metode konstruksi berdasarkan biaya, waktu pelaksanaan, produktivitas, sensitivitas terhadap perubahan harga material, dan karakteristik geoteknik. Kegiatan menggunakan pendekatan studi kasus pada proyek IPAL komunal di Kedundung, Kota Mojokerto, melalui observasi lapangan, telaah dokumen proyek, perbandingan metode beton cor konvensional dan prefabrikasi, serta integrasi hasil evaluasi ke dalam matriks ICEF. Hasil penerapan menunjukkan bahwa metode prefabrikasi memiliki kinerja lebih baik pada sebagian besar indikator, terutama efisiensi biaya, waktu konstruksi yang lebih singkat, produktivitas lebih tinggi, dan ketahanan terhadap fluktuasi harga material. ICEF juga membantu menentukan kesesuaian metode konstruksi berdasarkan kondisi air tanah, keterbatasan anggaran, durasi proyek, ketersediaan tenaga kerja, akses logistik, dan skala proyek. ICEF berpotensi mendukung pemerintah daerah, pengelola sanitasi, konsultan, dan kontraktor dalam merencanakan infrastruktur air limbah komunal secara lebih sistematis, efisien, dan berkelanjutan.

Kata kunci: efisiensi konstruksi, ICEF, IPAL komunal, konstruksi pabrikasi, sanitasi masyarakat

https://doi.org/10.53713/jcemty.v4i2.809

This work is licensed under CC BY-SA License.

Volume 04 Number 02 (November 2026)
e-ISSN: 2987-5080; p-ISSN: 2987-5072

PENDAHULUAN

Pertumbuhan kawasan perkotaan yang disertai peningkatan jumlah penduduk memberikan tekanan semakin besar terhadap penyediaan infrastruktur sanitasi yang layak. Urbanisasi dan peningkatan aktivitas penduduk dapat meningkatkan beban pencemar di perkotaan serta memberikan tekanan terhadap kualitas badan air apabila tidak diimbangi dengan pengelolaan air limbah yang memadai (Chen et al., 2024). Pengelolaan air limbah domestik yang belum optimal dapat memengaruhi kualitas lingkungan, terutama melalui pencemaran badan air dan penurunan kualitas sumber daya air, mengingat air limbah domestik yang tidak diolah masih menjadi salah satu sumber utama pencemaran air di kawasan perkotaan (Widyarani et al., 2022). Ketersediaan sistem sanitasi yang aman menjadi bagian penting dalam pembangunan perkotaan berkelanjutan sekaligus mendukung pencapaian Sustainable Development Goal (SDG) 6 mengenai akses terhadap air bersih dan sanitasi karena pengolahan air limbah berkontribusi terhadap peningkatan kualitas air, pembuangan air limbah yang aman, serta perlindungan kesehatan dan lingkungan (Obaideen et al., 2022). Kebutuhan tersebut menempatkan pembangunan sistem pengolahan air limbah sebagai salah satu aspek yang perlu mendapat perhatian, terutama di kawasan permukiman padat yang memiliki keterbatasan ruang dan kondisi lingkungan yang kompleks.

Program Sanitasi Berbasis Masyarakat (SANIMAS) merupakan salah satu pendekatan yang dikembangkan di Indonesia untuk memperluas pelayanan pengelolaan air limbah melalui sistem desentralisasi berbasis masyarakat, termasuk penggunaan unit pengolahan skala lingkungan seperti IPAL komunal (Leeuwerik, 2025). Sistem komunal memungkinkan pelayanan terhadap sejumlah rumah tangga secara bersama-sama dan menjadi alternatif yang relevan di kawasan permukiman padat karena sistem pengolahan air limbah terdesentralisasi dapat menjembatani kesenjangan antara sistem sanitasi setempat dan jaringan pengolahan terpusat, terutama di wilayah yang belum memperoleh pelayanan sanitasi secara penuh (Varma et al., 2022). Keberhasilan pembangunan IPAL komunal tidak hanya bergantung pada kemampuan sistem dalam mengolah air limbah, tetapi juga dipengaruhi oleh metode konstruksi yang digunakan. Pemilihan metode konstruksi berkaitan dengan kinerja waktu, biaya, kualitas, alokasi sumber daya, serta ketidakpastian selama proses pelaksanaan, sehingga evaluasi terhadap metode yang digunakan menjadi penting untuk meningkatkan kinerja proyek secara keseluruhan (Yuan et al., 2024).

Kondisi muka air tanah yang tinggi menjadi salah satu tantangan utama dalam pembangunan infrastruktur bawah tanah. Wilayah dengan karakteristik tersebut memiliki risiko rembesan air ke dalam galian, ketidakstabilan tanah, serta kebutuhan pengendalian air selama

pekerjaan berlangsung, terutama ketika tekanan hidraulik dan kondisi geoteknik yang kompleks memengaruhi kestabilan galian (Sun et al., 2024). Metode beton konvensional atau cast in situ membutuhkan rangkaian pekerjaan yang relatif panjang, mulai dari penggalian, pemasangan bekisting, pembesian, pengecoran, hingga proses curing. Kegiatan tersebut menjadi lebih kompleks ketika pekerjaan dilakukan di lokasi dengan muka air tanah tinggi karena proses dewatering perlu dilakukan secara lebih intensif. Penurunan muka air tanah akibat dewatering dan proses penggalian dapat mengubah kondisi tegangan tanah serta memicu penurunan permukaan di sekitar area konstruksi (Li et al., 2025). Perubahan pola aliran air tanah dan pergerakan lapisan tanah akibat kombinasi dewatering dan penggalian juga perlu dikendalikan karena dapat memengaruhi deformasi struktur penahan maupun lingkungan di sekitar galian (Xue et al., 2023). Situasi tersebut dapat meningkatkan biaya, memperpanjang durasi pekerjaan, serta meningkatkan risiko terhadap kualitas konstruksi.

Sistem konstruksi pabrikasi atau *prefabricated construction* menawarkan alternatif yang dapat mengurangi jumlah pekerjaan basah di lapangan. Elemen struktur diproduksi terlebih dahulu dalam lingkungan manufaktur yang lebih terkendali, kemudian dikirim dan dipasang di lokasi pembangunan (Rangasamy & Yang, 2024). Pendekatan *off-site construction* juga dikaitkan dengan peningkatan produktivitas, pengendalian mutu yang lebih baik, pengurangan aktivitas di lokasi proyek, serta siklus pelaksanaan yang lebih singkat dibandingkan dengan pendekatan yang sepenuhnya bergantung pada pekerjaan di lapangan (Tezel & Koskela, 2023). Pola tersebut memungkinkan tahapan produksi berlangsung bersamaan atau terkoordinasi dengan pekerjaan persiapan lokasi sehingga waktu pelaksanaan dapat dipersingkat. Pekerjaan bekisting, pembesian, pengecoran, dan curing di lokasi juga dapat dikurangi. Efektivitas sistem pabrikasi sangat dipengaruhi oleh koordinasi antara produksi komponen, transportasi, dan pemasangan di lapangan karena pengelolaan ketiga tahapan tersebut dapat mengurangi waktu proses dan meningkatkan efisiensi pelaksanaan (Yin et al., 2024). Karakteristik tersebut menjadi relevan bagi pembangunan IPAL komunal pada kawasan dengan kondisi geoteknik yang menuntut pekerjaan lebih cepat dan terkendali.

Permasalahan pemilihan metode konstruksi tidak cukup diselesaikan hanya dengan membandingkan biaya awal. Pendekatan *multi-criteria decision-making* menunjukkan bahwa pemilihan teknologi atau metode konstruksi perlu dilakukan melalui evaluasi beberapa alternatif berdasarkan sejumlah kriteria yang relevan dengan karakteristik proyek (Salaimanimagudam & Jayaprakash, 2024). Pertimbangan waktu, biaya, kualitas, risiko, kondisi lokasi, ketersediaan sumber daya, serta faktor eksternal merupakan bagian penting dalam proses pemilihan metode penyelenggaraan proyek konstruksi (Zhong et al., 2023). Kajian lain mengenai pemilihan sistem konstruksi juga menunjukkan bahwa kecepatan konstruksi, biaya, kondisi lokasi, ketersediaan

sumber daya, teknologi, dan kesulitan logistik perlu ditempatkan dalam satu kerangka pengambilan keputusan yang terintegrasi (ElMarkaby et al., 2023). Hasil evaluasi pembangunan IPAL Komunal di Kelurahan Kedundung, Kota Mojokerto, menunjukkan adanya perbedaan kinerja antara metode konvensional dan metode pabrikasi. Kondisi lokasi yang didominasi tanah lempung lanauan dan memiliki muka air tanah relatif tinggi menunjukkan pentingnya penyesuaian metode konstruksi dengan karakteristik lingkungan setempat.

Integrated Construction Evaluation Framework (ICEF) dikembangkan sebagai pendekatan yang mengintegrasikan efisiensi biaya, efisiensi waktu, produktivitas konstruksi, sensitivitas terhadap perubahan harga material, serta karakteristik lokasi. Kerangka tersebut memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih sistematis karena pilihan metode tidak ditentukan oleh satu indikator saja. Pendekatan multikriteria juga telah digunakan dalam evaluasi konstruksi pabrikasi untuk membandingkan kinerja berdasarkan berbagai aspek secara terpadu sehingga pengambil keputusan dapat menilai kesesuaian metode konstruksi pada kondisi proyek yang berbeda (Jeong & Jeong, 2024). Matriks ICEF juga menunjukkan bahwa metode fabrikasi tidak selalu menjadi pilihan yang mutlak. Kondisi akses logistik yang sulit, misalnya, dapat membuat metode konvensional lebih sesuai, sedangkan kawasan dengan muka air tanah tinggi, keterbatasan waktu, atau anggaran tertentu cenderung lebih menguntungkan bagi metode fabrikasi. Pertimbangan kondisi lokasi menjadi penting karena karakteristik lapangan, ruang penyimpanan, sistem pengangkutan, dan kebutuhan penanganan elemen prefabrikasi dapat memengaruhi biaya logistik serta kelayakan penerapan metode tersebut pada suatu proyek (Lee et al., 2022).

Kebutuhan penguatan kapasitas pemangku kepentingan menjadi penting agar proses pemilihan metode pembangunan IPAL tidak hanya bergantung pada kebiasaan teknis atau pertimbangan biaya sesaat. Pemerintah daerah, kelompok pengelola sanitasi masyarakat, konsultan, serta pelaksana konstruksi memerlukan alat bantu yang mudah dipahami untuk menilai kesesuaian metode dengan kondisi di lapangan. Kajian mengenai penerapan sanitasi perkotaan di Indonesia menunjukkan bahwa keterbatasan kapasitas institusi, pengetahuan teknis, pengelolaan informasi, serta koordinasi antaraktor masih menjadi hambatan penting dalam penyelenggaraan layanan sanitasi yang efektif dan berkelanjutan (Kurniati et al., 2024). Kegiatan pengabdian masyarakat melalui sosialisasi, pendampingan teknis, dan pengenalan penerapan *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) diarahkan untuk memperkuat kemampuan tersebut. Penguatan kapasitas, sosialisasi, pelatihan, serta koordinasi antarpemangku kepentingan juga dipandang sebagai elemen penting dalam meningkatkan keberlanjutan pengelolaan air limbah domestik berbasis masyarakat (Darmastuti et al., 2023). Tujuan kegiatan ini adalah mengevaluasi penerapan ICEF sebagai alat bantu dalam menentukan

metode konstruksi IPAL komunal yang sesuai berdasarkan aspek efisiensi biaya, waktu pelaksanaan, produktivitas konstruksi, sensitivitas terhadap perubahan harga material, serta karakteristik geoteknik lokasi. Kegiatan ini juga bertujuan untuk meningkatkan pemahaman dan kapasitas pemangku kepentingan dalam memilih metode pembangunan IPAL yang lebih efisien, adaptif, dan sesuai dengan kondisi di lapangan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat mendukung proses perencanaan infrastruktur sanitasi yang lebih sistematis, tepat guna, dan berkelanjutan, sesuai dengan karakteristik wilayah serta kebutuhan masyarakat.

METODE PELAKSANAAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain studi kasus komparatif untuk membandingkan kinerja metode konstruksi pabrikasi dan beton konvensional dalam pembangunan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) komunal di kawasan dengan muka air tanah tinggi. Pendekatan studi kasus dipilih agar karakteristik lokasi, kapasitas pelayanan, dan spesifikasi teknis tetap sama sehingga perbedaan hasil terutama dipengaruhi oleh metode konstruksi. Evaluasi dilakukan menggunakan *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) yang mengintegrasikan lima indikator, yaitu efisiensi biaya, efisiensi waktu, produktivitas konstruksi, sensitivitas terhadap perubahan harga material, dan karakteristik lokasi.

Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada proyek pembangunan IPAL Komunal di Kelurahan Kedundung, Kecamatan Magersari, Kota Mojokerto, Provinsi Jawa Timur. Lokasi dipilih secara purposif karena mewakili kawasan permukiman padat dengan muka air tanah sekitar 1,5–2,0 m dari permukaan tanah yang memengaruhi proses konstruksi. Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan untuk mengidentifikasi kondisi aktual dan memverifikasi pelaksanaan pekerjaan. Data sekunder meliputi Rencana Anggaran Biaya (RAB), jadwal waktu, gambar kerja, spesifikasi teknis, laporan penyelidikan tanah, serta data harga material dari HSPK daerah dan Badan Pusat Statistik (BPS). Seluruh data diverifikasi melalui triangulasi antara dokumen proyek dan hasil observasi untuk meningkatkan validitas penelitian.

Variabel Penelitian

Objek penelitian terdiri atas dua metode konstruksi, yaitu beton konvensional (cast in situ) dan sistem pabrikasi (*prefabricated construction*). Evaluasi dilakukan berdasarkan lima indikator, yaitu: (1) efisiensi biaya yang diukur dari total biaya konstruksi (Rp); (2) efisiensi waktu

berdasarkan durasi pelaksanaan (hari); (3) produktivitas konstruksi yang dinyatakan dalam jumlah kepala keluarga (KK) yang terlayani per hari; (4) sensitivitas biaya terhadap perubahan harga material (%); dan (5) karakteristik lokasi yang direpresentasikan oleh kedalaman muka air tanah (m).

Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan secara bertahap. Tahap pertama adalah menghitung efisiensi biaya berdasarkan perbandingan total biaya konstruksi kedua metode menggunakan data RAB. Tahap kedua mengevaluasi efisiensi waktu berdasarkan durasi pelaksanaan pekerjaan struktur utama. Tahap ketiga menghitung produktivitas konstruksi berdasarkan jumlah kepala keluarga yang dapat dilayani per hari. Tahap keempat melakukan analisis sensitivitas menggunakan *one-way sensitivity analysis dengan* skenario perubahan harga material sebesar −20%, −10%, 0%, +10%, dan +20% untuk mengevaluasi ketahanan ekonomi masing-masing metode terhadap fluktuasi harga. Selanjutnya, seluruh hasil analisis diintegrasikan ke dalam *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) sehingga menghasilkan model evaluasi komprehensif sebagai dasar pemilihan metode konstruksi IPAL komunal pada kawasan dengan karakteristik geoteknik yang serupa.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian meliputi: (1) identifikasi lokasi dan pengumpulan data proyek; (2) verifikasi data melalui observasi lapangan; (3) analisis efisiensi biaya; (4) analisis efisiensi waktu; (5) analisis produktivitas konstruksi; (6) analisis sensitivitas terhadap fluktuasi harga material; serta (7) integrasi seluruh indikator ke dalam *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) untuk menghasilkan rekomendasi metode konstruksi yang paling efisien dan sesuai dengan kondisi muka air tanah yang tinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lokasi Penelitian

Pelaksanaan kegiatan dilakukan pada proyek pembangunan IPAL Komunal di Kelurahan Kedundung, Kecamatan Magersari, Kota Mojokerto, yang berada di kawasan permukiman padat dengan muka air tanah relatif tinggi. Kondisi tanah didominasi lempung lanauan (silty clay) dengan muka air tanah sekitar 1,2–2,0 m pada musim hujan dan 2,0–2,5 m pada musim kemarau. Karakteristik tersebut meningkatkan kompleksitas pekerjaan galian karena membutuhkan pengendalian rembesan air secara intensif. Muka air tanah yang tinggi pada pekerjaan galian dapat meningkatkan kesulitan pelaksanaan dan risiko keselamatan, termasuk

terjadinya aliran air ke dalam galian, pergerakan material tanah, serta ketidakstabilan lereng, sehingga sistem dewatering menjadi bagian penting dalam pekerjaan konstruksi bawah tanah (Du et al., 2023). Metode beton konvensional (cast in-situ) memerlukan proses dewatering secara kontinu selama pekerjaan tulangan, bekisting, dan pengecoran, sehingga berpotensi meningkatkan risiko longsoran galian, infiltrasi air, dan keterlambatan pekerjaan. Metode pabrikasi dapat mengurangi intensitas pekerjaan di lokasi karena komponen atau elemen struktur diproduksi dan dirakit sebagian di lingkungan off-site, kemudian diangkut untuk pemasangan akhir di lokasi proyek. Pendekatan tersebut juga dilaporkan dapat meningkatkan produktivitas serta mengurangi waktu siklus dan risiko keterlambatan dibandingkan proses konstruksi yang lebih bergantung pada aktivitas di lapangan (Tezel & Koskela, 2023).

Karakteristik geoteknik lokasi menjadi faktor penting dalam menentukan kesesuaian metode konstruksi IPAL Komunal. Kondisi geologi dan hidrologi merupakan bagian dari faktor teknis yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan metode konstruksi bawah tanah karena berkaitan dengan keselamatan, kelayakan teknis, dan efektivitas pelaksanaan konstruksi (Huynh et al., 2025). Muka air tanah yang tinggi berpengaruh terhadap kebutuhan pengendalian air, tingkat risiko pelaksanaan, serta potensi perubahan biaya dan durasi pekerjaan. Evaluasi metode konstruksi dalam kegiatan ini tidak hanya mempertimbangkan aspek biaya dan waktu, tetapi juga kesesuaiannya dengan kondisi lapangan melalui *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF). Penggunaan pendekatan evaluasi multikriteria relevan untuk pemilihan metode konstruksi infrastruktur bawah tanah karena keputusan konstruksi melibatkan sejumlah kriteria yang saling berhubungan, termasuk kondisi proyek, dampak lingkungan, aspek ekonomi, dan karakteristik teknis dari setiap alternatif metode (Lin et al., 2023). Pendekatan ICEF dalam kegiatan ini dengan demikian memberikan dasar evaluasi yang lebih komprehensif untuk menentukan metode pembangunan IPAL yang efisien dan adaptif terhadap karakteristik lingkungan setempat.

Evaluasi Efisiensi Biaya Konstruksi

Perbandingan biaya konstruksi dilakukan terhadap metode beton konvensional (cast in-situ) dan metode pabrikasi menggunakan volume pekerjaan serta kapasitas IPAL yang sama sehingga perbedaan biaya sepenuhnya mencerminkan pengaruh metode konstruksi. Rekapitulasi biaya masing-masing metode disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi RAB per Item Pekerjaan

Item Pekerjaan	Volume	Konvensional (Rp)	Pabrikasi (Rp)	Selisih (Rp)
Pekerjaan Galian dan Urugan	150 m³	89.500.000	67.500.000	22.000.000
Pekerjaan Dewatering	120 m²	145.000.000	-	145.000.000
Pekerjaan Lantai Kerja	80 m³	35.200.000	28.500.000	6.700.000
Pekerjaan Beton Struktur	95 m³	287.000.000	-	287.000.000
Pekerjaan Pembesian	12.500 kg	168.750.000	-	168.750.000
Pekerjaan Bekisting	380 m²	97.500.000	-	97.500.000
Elemen Pracetak (produksi + kirim)	1 paket	-	765.000.000	-765.000.000
Pekerjaan Pemasangan Pracetak	1 paket	-	58.000.000	-58.000.000
Pekerjaan Waterproofing	95 m³	49.200.000	45.500.000	3.700.000
Pekerjaan Penutupan dan Perapihan	1 ls	78.500.000	32.811.433,70	45.688.566,30
Overhead & Profit (10%)	-	172.290.000	90.664.857,61	81.625.142,39
Total		1.761.940.178,21	997.311.433,70	764.628.744,51

Berdasarkan Tabel 1, biaya pembangunan IPAL Komunal dengan metode beton konvensional mencapai Rp1.761.940.178,21, sedangkan metode pabrikasi sebesar Rp997.311.433,70. Selisih biaya sebesar Rp764.628.744,51 menunjukkan penghematan sekitar 43,4% pada metode pabrikasi. Efisiensi tersebut terutama berasal dari berkurangnya pekerjaan lapangan seperti dewatering, bekisting, pembesian, pengecoran, dan curing. Temuan tersebut sejalan dengan kajian mengenai kinerja ekonomi konstruksi prefabrikasi yang menunjukkan bahwa pemindahan sebagian aktivitas konstruksi dari lokasi proyek ke proses fabrikasi dapat memberikan keuntungan dari aspek biaya dan waktu pelaksanaan dibandingkan dengan konstruksi konvensional, meskipun besar manfaat ekonomi tetap dipengaruhi oleh karakteristik proyek (Aghasizadeh et al., 2022). Proses fabrikasi elemen yang dilakukan di pabrik membuat pekerjaan di lokasi lebih terfokus pada pemasangan elemen pracetak dan penyelesaian sambungan, sehingga kebutuhan tenaga kerja, peralatan, serta pekerjaan basah (wet works) dapat ditekan. Sistem *off-site construction* juga memungkinkan sebagian besar proses produksi berlangsung dalam lingkungan yang lebih terkendali dan mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja di lokasi, sehingga berpotensi meningkatkan produktivitas serta menurunkan biaya proyek (Amarasinghe et al., 2025).

Pekerjaan dewatering menjadi komponen yang paling berpengaruh terhadap perbedaan biaya, dengan nilai sekitar Rp145 juta pada metode konvensional. Kondisi muka air tanah yang tinggi menyebabkan kebutuhan pengendalian air selama pekerjaan galian menjadi lebih besar, sehingga meningkatkan kompleksitas dan risiko pelaksanaan. Penelitian pada pekerjaan galian di bawah muka air tanah menunjukkan bahwa sistem dewatering diperlukan untuk mengendalikan muka air dan menjaga stabilitas galian, sementara karakteristik geologi dan hidrogeologi menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas serta keamanan sistem tersebut (Pujades-Garnes et al., 2024). Sistem pabrikasi memberikan keuntungan ekonomi karena durasi pekerjaan di dalam galian lebih singkat, tidak memerlukan bekisting konvensional dalam jumlah besar, mengurangi kebutuhan tenaga kerja lapangan, dan meminimalkan kehilangan material. Produksi elemen dalam lingkungan terkendali juga memberikan peluang pengendalian mutu yang lebih sistematis pada konstruksi off-site, terutama melalui pengawasan proses produksi, pengendalian kualitas komponen, dan ketertelusuran mutu sebelum elemen dipasang di lokasi proyek (Liu et al., 2022).

Penghematan sebesar 43,4% menunjukkan bahwa efisiensi metode pabrikasi tidak hanya ditentukan oleh teknologi konstruksi, tetapi juga oleh karakteristik lokasi, kebutuhan pekerjaan lapangan, dan kondisi teknis proyek. Hasil ini memperkuat pentingnya mempertimbangkan kondisi lapangan dan risiko pelaksanaan dalam pemilihan metode pembangunan IPAL Komunal. Pertimbangan ekonomi juga relevan dalam pengembangan sistem pengolahan air limbah terdesentralisasi karena konfigurasi modular, kapasitas sistem, kondisi lahan, kemampuan teknis, serta keterbatasan anggaran dapat memengaruhi keputusan investasi dan jumlah fasilitas yang dapat dikembangkan (Na Talang et al., 2022). Penggunaan sistem pabrikasi pada program sanitasi pemerintah berpotensi meningkatkan jumlah unit layanan yang dapat dibangun dengan anggaran yang sama, sehingga mendukung perluasan akses sanitasi secara lebih efisien. Pendekatan tersebut juga sejalan dengan pengembangan sistem sanitasi berbasis komunitas di Indonesia, yang menunjukkan bahwa keberlanjutan fasilitas pengolahan air limbah terdesentralisasi perlu dinilai secara terpadu melalui aspek teknis, finansial, kelembagaan, pengelolaan, partisipasi masyarakat, dan lingkungan (Cecilia et al., 2024).

Evaluasi Efisiensi Waktu Pelaksanaan

Efisiensi waktu merupakan salah satu indikator utama dalam mengevaluasi kinerja metode konstruksi karena berpengaruh langsung terhadap biaya proyek, pemanfaatan sumber daya, dan risiko keterlambatan penyelesaian pekerjaan. Perbandingan durasi pelaksanaan dilakukan terhadap metode beton konvensional (cast in-situ) dan metode pabrikasi pada volume pekerjaan

dan kapasitas IPAL yang sama. Rekapitulasi durasi setiap tahapan pekerjaan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Durasi Pekerjaan per Tahapan

Tahapan Pekerjaan	Konvensional (hari)	Pabrikasi (hari)	Selisih
Persiapan & Mobilisasi	3	3	0
Pekerjaan Galian	4	4	0
Pemasangan Sheet Pile & Dewatering	5	-	5
Lantai Kerja	2	2	0
Pemasangan Bekisting	3	-	3
Pembesian	4	-	4
Pengecoran Beton	3	-	3
Perawatan Beton (curing)	7	-	7
Produksi Elemen Pracetak	-	10*	-10
Pengiriman Elemen Pracetak	-	2	-2
Pemasangan Elemen Pracetak	-	5	-5
Penyambungan & Waterproofing	2	3	-1
Penutupan & Perapihan	5	2	3
Overlap antar tahap	-4	-5	1
Total Durasi	30	19	11

Berdasarkan Tabel 2, metode beton konvensional memerlukan waktu pelaksanaan 30 hari, sedangkan metode pabrikasi hanya 19 hari. Selisih 11 hari menunjukkan percepatan sebesar 36,7% pada sistem pabrikasi. Efisiensi waktu tersebut dipengaruhi oleh perbedaan tahapan konstruksi. Metode konvensional membutuhkan pekerjaan bekisting, pembesian, pengecoran, curing, serta dewatering yang dilakukan secara berurutan, sehingga waktu pelaksanaan menjadi lebih panjang. Penerapan konstruksi off-site dapat mempersingkat durasi proyek melalui penyederhanaan aliran pekerjaan dan pengurangan aktivitas yang harus diselesaikan secara langsung di lokasi konstruksi (Da Rocha et al., 2023). Metode pabrikasi memungkinkan produksi elemen struktur berlangsung di pabrik bersamaan dengan pekerjaan persiapan lokasi. Elemen pracetak dapat langsung dipasang setelah pekerjaan galian selesai tanpa melalui proses pengecoran dan curing di lapangan. Karakteristik konstruksi prefabrikasi yang memisahkan proses produksi komponen, transportasi, dan perakitan lapangan juga memungkinkan pengaturan sumber daya dan penjadwalan pekerjaan yang lebih efisien untuk memperpendek durasi proyek (Song et al., 2023).

Percepatan pelaksanaan terutama berasal dari berkurangnya aktivitas pada lintasan kritis (*critical path*), khususnya pekerjaan bekisting, pembesian, pengecoran, curing, dan dewatering. Penyederhanaan tahapan tersebut mengurangi waktu tunggu antarpekerjaan sekaligus

menekan risiko keterlambatan akibat cuaca dan rembesan air tanah. Faktor lingkungan dan cuaca diketahui berpengaruh terhadap variasi waktu pemasangan elemen beton pracetak, dengan temperatur dan kecepatan angin termasuk faktor yang paling konsisten memengaruhi waktu instalasi di lapangan (Jeong et al., 2024). Tingkat percepatan sebesar 36,7% menunjukkan bahwa manfaat metode pabrikasi semakin nyata pada kawasan dengan muka air tanah tinggi karena pekerjaan yang rentan terhadap gangguan kondisi geoteknik dapat diminimalkan. Pengurangan durasi selama 11 hari juga berpotensi menekan biaya tidak langsung (indirect cost), mengurangi paparan proyek terhadap perubahan biaya selama masa konstruksi, dan mempercepat operasional IPAL. Hubungan antara pengendalian jadwal konstruksi prefabrikasi, pengurangan durasi, dan penghematan total biaya juga telah ditunjukkan melalui optimasi pengadaan komponen off-site yang mempertimbangkan jadwal konstruksi dan kapasitas produksi pabrik (Chen et al., 2023). Penerapan metode fabrikasi pada program sanitasi dengan target waktu yang terbatas dan kondisi geoteknik yang kompleks dapat mendukung penyediaan layanan sanitasi kepada masyarakat secara lebih cepat dan efisien.

Evaluasi Produktivitas Konstruksi

Produktivitas konstruksi menggambarkan kemampuan suatu metode dalam menghasilkan keluaran proyek berdasarkan waktu dan sumber daya yang digunakan. Pada penelitian ini, produktivitas diukur berdasarkan jumlah kepala keluarga (KK) yang dapat dilayani setiap hari selama proses pembangunan. Indikator ini dipilih karena lebih merepresentasikan kinerja pembangunan IPAL komunal dibandingkan ukuran produktivitas yang hanya didasarkan pada volume pekerjaan atau jumlah tenaga kerja. Hasil perhitungan produktivitas disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan produktivitas

Material	Konvensional (%)	Pabrikasi (%)	Keterangan
Semen	12,00%	8,00%	Terkandung dalam elemen pracetak
Besi Beton	9,50%	6,50%	Terkandung dalam elemen pracetak
Agregat	7,00%	5,00%	Terkandung dalam elemen pracetak
Kayu Bekisting	5,50%	-	Tidak digunakan pada pabrikasi
Lain-lain	66,00%	80,50%	-
Total	100%	100%	-

Berdasarkan Tabel 3, metode pabrikasi menghasilkan produktivitas sebesar 2,63 KK per hari, lebih tinggi dibandingkan metode beton konvensional yang mencapai 1,67 KK per hari. Penerapan sistem pabrikasi meningkatkan produktivitas sekitar 57,5% dan mempercepat

penyediaan layanan sanitasi kepada masyarakat. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh penyederhanaan tahapan pekerjaan di lapangan karena sebagian besar proses pembesian, bekisting, pengecoran, dan curing telah diselesaikan di pabrik. Pekerjaan di lokasi kemudian lebih terfokus pada pemasangan elemen pracetak, penyambungan, dan penyelesaian akhir, sehingga koordinasi pekerjaan dan penggunaan tenaga kerja menjadi lebih efisien. Kondisi ini sejalan dengan temuan bahwa sistem konstruksi off-site dan manufaktur beton pracetak memiliki potensi meningkatkan produktivitas melalui lingkungan produksi yang lebih terkendali, pengurangan ketergantungan terhadap tenaga kerja di lokasi, serta peningkatan efisiensi proses produksi (Amarasinghe et al., 2025). Produksi elemen dalam kondisi yang terkendali juga menghasilkan mutu yang lebih seragam serta menekan potensi pekerjaan ulang (rework), sehingga waktu dan sumber daya dapat dimanfaatkan secara lebih optimal. Pengendalian risiko rework pada konstruksi prefabrikasi terbukti penting karena optimalisasi proses dan koordinasi antartahapan dapat menurunkan dampak pekerjaan ulang terhadap biaya dan waktu secara signifikan (Shen et al., 2022). Keunggulan ini semakin penting pada kawasan dengan muka air tanah tinggi karena berkurangnya pekerjaan basah dan aktivitas di dalam galian dapat menekan risiko teknis serta keterlambatan pelaksanaan. Peningkatan produktivitas tersebut menunjukkan bahwa pemilihan metode konstruksi yang sesuai dengan karakteristik lokasi dapat mendukung efisiensi anggaran, mempercepat penyelesaian proyek, dan membantu pencapaian target pelayanan sanitasi masyarakat secara lebih efektif.

Analisis Sensitivitas Biaya terhadap Fluktuasi Harga Material

Fluktuasi harga material merupakan salah satu sumber ketidakpastian yang memengaruhi kelayakan ekonomi proyek konstruksi, terutama pada proyek infrastruktur yang memiliki proporsi biaya material cukup besar. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya membandingkan biaya konstruksi pada kondisi dasar (baseline), tetapi juga mengevaluasi ketahanan ekonomi metode beton konvensional dan pabrikasi melalui analisis sensitivitas terhadap perubahan harga material. Hasil simulasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Analisis Sensitivitas

Skenario	Perubahan Harga	Biaya Konvensional (Rp)	Biaya Pabrikasi (Rp)	Efisiensi Biaya (%)
1	-20%	1.556.706.300	883.546.100	43,20%
2	-10%	1.659.323.200	940.428.800	43,30%
3	Baseline (0%)	1.761.940.178	997.311.434	43,40%
4	10%	1.864.557.200	1.054.194.100	43,50%
5	20%	1.967.174.100	1.111.076.700	43,50%

Analisis sensitivitas dilakukan pada lima skenario perubahan harga material, yaitu −20%, −10%, 0%, +10%, dan +20%, untuk menilai kestabilan efisiensi biaya kedua metode konstruksi. Berdasarkan Tabel 6, metode pabrikasi tetap menghasilkan biaya yang lebih rendah pada seluruh skenario, dengan efisiensi sebesar 43,4% pada kondisi dasar dan sekitar 43,5% ketika harga material meningkat hingga 20%. Penurunan harga material sedikit memperkecil selisih biaya, tetapi tidak mengubah posisi metode pabrikasi sebagai alternatif yang lebih ekonomis. Stabilitas tersebut relevan dengan temuan bahwa biaya konstruksi prefabrikasi terbentuk melalui interaksi dinamis berbagai faktor, sehingga evaluasi biaya tidak cukup dilakukan secara statis tetapi perlu mempertimbangkan perubahan dan keterkaitan antarvariabel yang memengaruhi struktur biaya proyek (Luo et al., 2022). Keunggulan metode pabrikasi terutama berasal dari berkurangnya pekerjaan bekisting, pembesian, pengecoran, curing, dan dewatering, sehingga kebutuhan tenaga kerja, peralatan, dan waktu pelaksanaan dapat ditekan. Pengelolaan material dan penjadwalan juga memiliki hubungan langsung dengan biaya konstruksi prefabrikasi karena keterlambatan pasokan dapat meningkatkan biaya tenaga kerja, peralatan, penyimpanan, dan keterlambatan proyek, sedangkan integrasi perencanaan material dan jadwal dapat menghasilkan solusi biaya yang lebih stabil dan efisien (Zhang et al., 2025). Stabilitas efisiensi pada berbagai skenario menunjukkan bahwa sistem pabrikasi memiliki ketahanan ekonomi (*economic robustness*) yang lebih baik serta memberikan kepastian anggaran yang lebih tinggi, terutama pada pembangunan IPAL Komunal di kawasan dengan muka air tanah tinggi. Pemilihan metode konstruksi pada program sanitasi masyarakat perlu mempertimbangkan tidak hanya perubahan harga material, tetapi juga produktivitas, risiko pelaksanaan, dan karakteristik geoteknik lokasi agar penggunaan anggaran lebih efisien dan adaptif terhadap kondisi lapangan.

Pengembangan *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF)

Penelitian ini mengembangkan *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) sebagai kerangka evaluasi multidimensi untuk mendukung pemilihan metode konstruksi IPAL Komunal pada kawasan dengan muka air tanah tinggi. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya mengevaluasi biaya, waktu, atau produktivitas secara terpisah, ICEF mengintegrasikan lima indikator utama, yaitu efisiensi biaya, efisiensi waktu, produktivitas konstruksi, sensitivitas terhadap fluktuasi harga material, dan karakteristik lokasi. Matriks pemilihan metode konstruksi berdasarkan kelima indikator tersebut disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Matriks Pemilihan Metode

Kriteria	Kondisi	Konvensional	Pabrikasi	Rekomendasi
Muka Air Tanah	Tinggi (<2 m)	✗ (Kendala berat)	✓ (Sangat sesuai)	Pabrikasi
	Normal (>3 m)	✓ (Sesuai)	✓ (Sesuai)	Tergantung durasi
Waktu Proyek	Singkat (<25 hari)	✗ (Tidak mungkin)	✓ (Mungkin)	Pabrikasi
	Normal (25-35 hari)	✓ (Mungkin)	✓ (Sangat mungkin)	Pabrikasi lebih baik
Anggaran	Terbatas (<Rp 1,2 M)	✗ (Over budget)	✓ (Mungkin)	Pabrikasi
	Cukup (>Rp 1,5 M)	✓ (Mungkin)	✓ (Lebih hemat)	Pabrikasi
Tenaga Kerja	Terbatas kualitasnya	✗ (Risiko mutu)	✓ (Kualitas terjamin)	Pabrikasi
	Tersedia terampil	✓ (Sesuai)	✓ (Sesuai)	Tergantung harga
Akses Logistik	Sulit (jalan sempit)	✓ (Material di lokasi)	✗ (Elemen besar sulit)	Konvensional
	Mudah	✓ (Sesuai)	✓ (Sesuai)	Tergantung kriteria lain
Skala Proyek	1 unit (50 KK)	✓	✓ (Efisiensi 44%)	Pabrikasi
	>5 unit	✗	✓ (Efisiensi lebih besar)	Pabrikasi

Berdasarkan Tabel 5, metode pabrikasi menunjukkan kinerja yang lebih baik pada sebagian besar indikator evaluasi, dengan efisiensi biaya sebesar 43,4%, percepatan waktu pelaksanaan 36,7%, dan peningkatan produktivitas konstruksi sebesar 57,5% dibandingkan metode beton konvensional. Keunggulan ekonomi metode pabrikasi tetap bertahan pada perubahan harga material hingga ±20%, yang menunjukkan tingkat kepastian biaya yang relatif stabil. Temuan mengenai keunggulan biaya dan waktu tersebut sejalan dengan kajian mengenai konstruksi prefabrikasi yang menunjukkan bahwa proses produksi di luar lokasi dapat memberikan manfaat ekonomi dan efisiensi pelaksanaan dibandingkan pendekatan konstruksi konvensional, meskipun besar manfaatnya dipengaruhi oleh karakteristik proyek dan sistem produksinya (Aghasizadeh et al., 2022). Kondisi muka air tanah yang tinggi semakin memperkuat keunggulan metode ini karena kebutuhan pekerjaan basah (*wet works*) dan dewatering dapat dikurangi. Kondisi tersebut menjadi penting karena pekerjaan konstruksi di bawah muka air tanah memerlukan pengelolaan dewatering yang tepat untuk menjaga kestabilan galian, keselamatan konstruksi, serta mengurangi dampak pemompaan air tanah terhadap lingkungan sekitar (Pujades-Garnes et al., 2024). Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan metode konstruksi

perlu mempertimbangkan aspek biaya, waktu, produktivitas, risiko ekonomi, dan karakteristik geoteknik secara terpadu agar keputusan yang diambil lebih sesuai dengan kondisi lapangan.

Integrated Construction Evaluation Framework (ICEF) dikembangkan melalui empat tahapan, yaitu identifikasi karakteristik lokasi, evaluasi biaya dan waktu pelaksanaan, analisis produktivitas dan sensitivitas harga material, serta sintesis seluruh indikator untuk menentukan metode konstruksi yang paling sesuai. Pendekatan multikriteria relevan digunakan dalam pemilihan sistem konstruksi karena mampu mengakomodasi berbagai faktor yang saling berkaitan dalam proses pengambilan keputusan, termasuk karakteristik proyek, kinerja pelaksanaan, dan kebutuhan sistem konstruksi di luar lokasi (*off-site construction*) (Assaf et al., 2023). Kerangka ini menghubungkan kondisi geoteknik dengan kinerja konstruksi dalam proses pengambilan keputusan yang sistematis dan transparan. Pendekatan serupa pada pembangunan infrastruktur bawah tanah menunjukkan bahwa pemilihan metode konstruksi dapat dilakukan melalui hierarki keputusan dan evaluasi multikriteria untuk menghadapi kondisi proyek yang kompleks serta ketidakpastian lingkungan konstruksi (Lin et al., 2023). Penerapan ICEF dapat menjadi alat bantu bagi pemerintah daerah, konsultan perencana, dan pelaksana konstruksi dalam memilih metode pembangunan IPAL berdasarkan kebutuhan dan karakteristik wilayah. Penggunaan kerangka tersebut juga berpotensi mendukung pengelolaan program sanitasi masyarakat yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Keterbatasan kegiatan ini terletak pada cakupan pelaksanaan yang masih berfokus pada satu lokasi, yaitu pembangunan IPAL Komunal di Kelurahan Kedundung, Kota Mojokerto, serta perbandingan yang terbatas pada dua metode konstruksi, sehingga hasil yang diperoleh belum sepenuhnya merepresentasikan variasi kondisi geoteknik, kapasitas layanan, dan skala proyek di wilayah lain. Evaluasi fasilitas pengolahan air limbah berbasis masyarakat menunjukkan bahwa keberlanjutan sistem tidak hanya dipengaruhi oleh aspek teknis, tetapi juga oleh faktor pengelolaan, partisipasi masyarakat, finansial, kelembagaan, dan lingkungan. Oleh karena itu, penerapan dalam konteks lokasi yang berbeda diperlukan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif (Cecilia et al., 2024). Rencana pengabdian masyarakat ke depan diarahkan pada perluasan penerapan *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) melalui kegiatan sosialisasi, pendampingan teknis, dan pelatihan kepada pemerintah daerah, kelompok pengelola sanitasi masyarakat, serta pelaksana konstruksi dalam menentukan metode pembangunan IPAL yang sesuai dengan kondisi lapangan. Penguatan kapasitas melalui pelatihan dan pembelajaran berbasis pengalaman telah dilaporkan dapat meningkatkan pemahaman aparatur pemerintah daerah terhadap pengelolaan sanitasi dan pelayanan lingkungan, sehingga pendekatan tersebut relevan untuk mendukung proses diseminasi dan penerapan kerangka evaluasi di tingkat lokal (Mani et al., 2023). Implementasi pada beberapa

Volume 04 Number 02 (November 2026)
e-ISSN: 2987-5080; p-ISSN: 2987-5072

lokasi dengan karakteristik lingkungan dan skala pelayanan yang berbeda juga perlu dilakukan untuk menilai kemudahan penerapan, konsistensi hasil, serta manfaat praktis ICEF sebagai alat bantu pengambilan keputusan. Pengembangan kegiatan tersebut diharapkan dapat memperkuat kapasitas pemangku kepentingan lokal dalam merencanakan infrastruktur sanitasi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan, sesuai dengan kebutuhan masyarakat.

SIMPULAN DAN SARAN

Kegiatan pengabdian masyarakat ini menunjukkan bahwa penerapan metode konstruksi fabrikasi dalam pembangunan IPAL komunal di kawasan dengan muka air tanah tinggi memberikan keunggulan dari aspek efisiensi biaya, waktu pelaksanaan, produktivitas, serta ketahanan terhadap perubahan harga material dibandingkan dengan metode beton konvensional. Penerapan *Integrated Construction Evaluation Framework* (ICEF) juga memberikan pendekatan yang lebih sistematis dalam menentukan metode konstruksi dengan mempertimbangkan kondisi teknis, ekonomis, dan karakteristik geoteknik lokasi secara terpadu. Pemanfaatan kerangka tersebut berpotensi membantu pemerintah daerah, kelompok pengelola sanitasi masyarakat, konsultan, dan pelaksana konstruksi dalam merencanakan pembangunan infrastruktur sanitasi yang lebih efisien, adaptif, dan sesuai dengan kondisi di lapangan. Pengembangan kegiatan selanjutnya perlu diarahkan pada sosialisasi, pendampingan teknis, dan pelatihan penggunaan ICEF kepada para pemangku kepentingan, disertai penerapan di lokasi dengan karakteristik lingkungan, kapasitas layanan, dan skala pembangunan yang lebih beragam agar manfaat praktis, konsistensi penerapan, serta keberlanjutan penggunaan kerangka tersebut dalam mendukung pengelolaan sanitasi masyarakat dapat semakin diperkuat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini, khususnya Pemerintah Kota Mojokerto, pelaksana pembangunan IPAL Komunal di Kelurahan Kedundung, serta semua pihak yang telah membantu penyediaan data dan pelaksanaan penelitian hingga artikel ini dapat diselesaikan.

REFERENSI

Aghasizadeh, S., Tabadkani, A., Hajirasouli, A., & Banihashemi, S. (2022). Environmental and economic performance of prefabricated construction: A review. *Environmental Impact Assessment Review, 97*, 106897. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106897

Amarasinghe, A. A. S. R., Agdas, D., & Dawes, L. (2025). Evaluating labour productivity and profitability in precast concrete manufacturing. *Engineering, Construction and Architectural Management, 32*(13), 148–173. https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2024-0666

Assaf, M., Hussein, M., Abdelkhalek, S., & Zayed, T. (2023). A multi-criteria decision-making model for selecting the best project delivery systems for offsite construction projects. *Buildings, 13*(2), 571. https://doi.org/10.3390/buildings13020571

Cecilia, S., Murayama, T., Nishikizawa, S., & Suwanteep, K. (2024). Stakeholder evaluation of sustainability in a community-led wastewater treatment facility in Jakarta, Indonesia. *Environment, Development and Sustainability, 26*, 8497–8523. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03056-9

Chen, G., Huang, J., Wang, J., Wei, J., Shou, W., Cao, Z., Pan, W., & Zhou, J. (2023). Optimal procurement strategy for off-site prefabricated components considering construction schedule and cost. *Automation in Construction, 147*, 104726. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104726

Chen, X., Li, Z., Chao, L., Hu, Y., Hao, Y., Wang, Y., Liang, R., Li, K., & Pu, X. (2024). Conflict between urbanization and water environmental protection: Lessons from the Xiangjiang River Basin in China. *Water Research, 252*, 121237. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121237

Da Rocha, C. G., Wijayaratna, K., Jong, K., & Haller, D. (2023). Examining off-site construction from a flow viewpoint. *Journal of Construction Engineering and Management, 149*(3), 05023001. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-12004

Darmastuti, L., Rustiadi, E., Fauzi, A., & Purwanto, Y. J. (2023). Stakeholder analysis of sustainable wastewater management: A case study of Bogor, Indonesia. *Sustainability, 15*(15), 11826. https://doi.org/10.3390/su151511826

Du, S., Liu, P., Wang, W., Shi, W., Li, Q., Li, J., & Li, J. (2023). Numerical simulation and analysis of the influencing factors of foundation pit dewatering under a coupled radial well and curtain. *Water, 15*(10), 1839. https://doi.org/10.3390/w15101839

ElMarkaby, A., Sanad, A., Elyamany, A., & Yehia, E. (2023). Multi-criteria decision support system for bridge construction system selection utilizing value engineering and TOPSIS. *Innovative Infrastructure Solutions, 8*, Article 295. https://doi.org/10.1007/s41062-023-01267-7

Huynh, N. M., Le-Hoai, L., Chuong Nguyen, V. H., & Tran, C. (2025). An assessment framework for underground construction methods in the pre-construction stage: A technical perspective. *International Journal of Construction Management, 25*(3), 265–277. https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2313833

Jeong, E., Jang, J., Lee, S., Ahn, S., & Kim, T. W. (2024). Quantitative analysis of the factors influencing field installation time for precast concrete building components: An empirical study. *Journal of Management in Engineering, 40*(3), 04024010. https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-5816

Jeong, J., & Jeong, J. (2024). Sustainability in prefabricated construction: Enhancing multicriteria analysis and prediction using machine learning. *Journal of Construction Engineering and Management, 150*(8), 04024081. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-14227

Kurniati, A. S., Nastiti, A., Ufaira, R. M., Safira, K. F., & Sakti, A. D. (2024). Navigating the path: Regulatory readiness and stakeholder insights in Indonesia's citywide inclusive sanitation landscape. *Discover Sustainability, 5*, 321. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00538-2

Lee, Y., Kim, J. I., Flager, F., & Fischer, M. (2022). Methodology to estimate logistics costs for vertically transported prefabricated wall panels. *Journal of Computational Design and Engineering, 9*(4), 1348–1368. https://doi.org/10.1093/jcde/qwac055

Leeuwerik, R. N. C. (2025). Tracing prescribed knowledge flows in wastewater management policies: An AI-assisted, governmentality-informed framework with insights from Indonesia. *Environmental Management, 75*(12), 3461–3478. https://doi.org/10.1007/s00267-025-02277-0

Li, K., Chen, S., Pei, R., & Chen, J. (2025). Theoretical prediction study on drawdown and surface settlement induced by dewatering and excavation in unconfined aquifers. *Computers and Geotechnics, 179*, Article 107041. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.107041

Lin, S.-S., Zhou, A., & Shen, S.-L. (2023). Optimal construction method evaluation for underground infrastructure construction. *Automation in Construction, 152*, 104921. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104921

Liu, Y., Yao, F., Ji, Y., Tong, W., Liu, G., Li, H. X., & Hu, X. (2022). Quality control for offsite construction: Review and future directions. *Journal of Construction Engineering and Management, 148*(8), 03122003. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002317

Luo, L., Wu, X., Hong, J., & Wu, G. (2022). Fuzzy cognitive map-enabled approach for investigating the relationship between influencing factors and prefabricated building cost considering dynamic interactions. *Journal of Construction Engineering and Management, 148*(9), 04022081. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002336

Mani, S. K., Roquaiya, & Masilamani, R. J. (2023). In-service training of urban local body functionaries for Swachh Bharat Mission (Urban). *Journal of Education for Sustainable Development, 17*(1), 19–41. https://doi.org/10.1177/09734082231186905

Na Talang, R. P., Sirivithayapakorn, S., & Polruang, S. (2022). Life cycle impact assessment and life cycle cost assessment for centralized and decentralized wastewater treatment plants in Thailand. *Scientific Reports, 12*, 14540. https://doi.org/10.1038/s41598-022-18852-y

Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S., & Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus, 7*, 100112. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112

Pujades-Garnes, E., Badiella, G., Jurado, A., Carrera, J., & Vázquez-Suñé, E. (2024). An approach for the design of dewatering systems: The case of an excavation for the construction of the assembly shaft of a tunnel boring machine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 83*, 296. https://doi.org/10.1007/s10064-024-03778-8

Rangasamy, V., & Yang, J.-B. (2024). The convergence of BIM, AI and IoT: Reshaping the future of prefabricated construction. *Journal of Building Engineering, 84*, Article 108606. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108606

Salaimanimagudam, M. P., & Jayaprakash, J. (2024). Selection of digital fabrication technique in the construction industry: A multi-criteria decision-making approach. *Frontiers of Structural and Civil Engineering, 18*(7), 977–997. https://doi.org/10.1007/s11709-024-1075-1

Shen, K., Li, X., Cao, X., & Zhang, Z. (2022). Prefabricated construction process optimization based on rework risk. *Journal of Construction Engineering and Management, 148*(6), 04022031. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002277

Song, Y., Wang, J., Lu, J., & Si, X. (2023). Research on collaborative scheduling of multiple projects of prefabricated building based on the niche genetic-raccoon family optimization

algorithm. *Alexandria Engineering Journal, 64*, 1015–1033. https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.054

Sun, Y., Jiang, Z., Tong, L., Sun, J., Cui, J., Zhou, X., & Liu, S. (2024). Optimization of confined aquifer dewatering for long-deep excavation using simulation–optimization method. *Underground Space, 17*, 246–266. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.11.009

Tezel, A., & Koskela, L. (2023). Off-site construction in highways projects: Management, technical, and technology perspectives from the United Kingdom. *Construction Management and Economics, 41*(6), 475–499. https://doi.org/10.1080/01446193.2023.2167218

Varma, V. G., Jha, S., Raju, L. H. K., Kishore, R. L., & Ranjith, V. (2022). A review on decentralized wastewater treatment systems in India. *Chemosphere, 300*, 134462. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134462

Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: Generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(22), 32397–32414. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19057-6

Xue, T., Xue, X., Long, S., Chen, Q., Lu, S., & Zeng, C. (2023). Effect of pre-existing underground structures on groundwater flow and strata movement induced by dewatering and excavation. *Water, 15*(4), Article 814. https://doi.org/10.3390/w15040814

Yin, J., Huang, R., Sun, H., & Cai, S. (2024). Multi-objective optimization for coordinated production and transportation in prefabricated construction with on-site lifting requirements. *Computers & Industrial Engineering, 189*, Article 110017. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110017

Yuan, Z., Man, Q., Guan, Z., Yi, C., Zheng, M., Chang, Y., & Li, H. X. (2024). Simulation and optimization of prefabricated building construction considering multiple objectives and uncertain factors. *Journal of Building Engineering, 86*, 108830. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108830

Zhang, L., Lin, X., & Wang, M. (2025). Material ordering based on activity delay in multi-project scheduling of prefabricated buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering, 29*(4), 100062. https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100062

Zhong, Q., Tang, H., Chen, C., & Martek, I. (2023). A comprehensive appraisal of the factors impacting construction project delivery method selection: A systematic analysis. *Journal of*

Asian Architecture and Building Engineering, *22*(2), 802–820. https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2060983