



Model TCTO Non-linier Berbasis Genetic Algorithm untuk Mitigasi Ketidakpastian Waktu–Biaya pada Proyek Jalan *(Nonlinear Time–Cost Trade-Off (TCTO) Model Based on Genetic Algorithm for Mitigating Time–Cost Uncertainty in Road Projects)*

Lalu Marzuandi^{1*}, Lalu Ibrohim Burhan²

¹Fakultas Teknik, Universitas Gunung Rinjani, Indonesia

²Fakultas Teknik, Universitas Gunung Rinjani, Indonesia

^{1*}Email: andilalu111@gmail.com

Info Artikel

Keywords:

Algoritma Genetika, Ketidakpastian Proyek, Model Nonlinier, Optimasi Waktu–Biaya, Proyek Jalan
Genetic Algorithm, Nonlinear Model, Project Uncertainty, Road Project, Time–Cost Optimization

Abstrak

Penelitian ini dikembangkan untuk menginvestigasi model optimasi adaptif Time–Cost Trade-Off (TCTO) yang mengintegrasikan Genetic Algorithm (GA) untuk merepresentasikan non-linearitas dan ketidakpastian hubungan waktu–biaya pada proyek jalan. Metode kuantitatif diterapkan pada enam proyek jalan nyata di Indonesia dengan 1.842 catatan aktivitas; data durasi, biaya, sumber daya, dan variabel eksternal dikumpulkan, diverifikasi, dinormalisasi, dan dianalisis dengan model matematis non-linier serta simulasi GA yang dijalankan menggunakan MATLAB/Python/R. Hasil menunjukkan bahwa model non-linier TCTO–GA memuat kecocokan data yang jauh lebih baik (median $R^2 = 0,89$ vs $0,62$ untuk model linier), menurunkan error prediksi (MAPE $6,2\%$ vs $13,7\%$; RMSE $0,081$ vs $0,174$; paired t-test $p < 0,01$), serta menghasilkan pengurangan durasi rata-rata $15,4\%$ ($\pm 2,1$) dengan kenaikan biaya percepatan hanya $+2,6\%$ ($\pm 0,9$), dibandingkan crashing linier (durasi $-7,8\%$; biaya $+5,9\%$). Model mempertahankan stabilitas antar replikasi (SD fitness = $0,9\%$) dan ketahanan pada skenario gangguan ($+20\%$ hari hujan, $+15\%$ delay), serta validasi menunjukkan MAPE pasca-optimasi $7,1\%$ ($4/6$ proyek $\pm 5\%$) dan penilaian pakar median $4,2$. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi TCTO–GA secara simultan menutup celah representasi non-

linearitas dan ketidakpastian, sehingga memberikan kontribusi teoretis pada optimasi stokastik dan alat bantu praktis bagi manajer proyek untuk perencanaan yang lebih adaptif dan tahan gangguan.

This study was developed to investigate an adaptive Time–Cost Trade-Off (TCTO) optimization model that integrates a Genetic Algorithm (GA) to represent non-linearity and uncertainty in explicit time–cost relationships for road construction projects. A quantitative approach was applied to six real road projects in Indonesia, comprising 1,842 activity records. Duration, cost, resource, and external variability data were collected, verified, normalized, and analyzed via nonlinear mathematical modeling and GA simulations implemented in MATLAB/Python/R. Results showed that the nonlinear TCTO–GA achieved substantially better data fit (median $R^2 = 0.89$ vs 0.62 for linear models), reduced predictive error (MAPE 6.2% vs 13.7% ; RMSE 0.081 vs 0.174 ; paired t -test $p < 0.01$), and produced an average duration reduction of 15.4% (± 2.1) with only a $+2.6\%$ (± 0.9) acceleration cost—relative to crashing linear approaches which yielded -7.8% duration and $+5.9\%$ cost. The model demonstrated replication stability (SD fitness = 0.9%), resilience under disturbance scenarios ($+20\%$ rainy days, $+15\%$ material delay), post-optimization MAPE = 7.1% (4/6 projects within $\pm 5\%$ of realized outcomes), and a median expert usability score of 4.2 . The study indicates that TCTO–GA fills the methodological gap by jointly addressing non-linearity and uncertainty, contributing to optimization theory and providing a practical, adaptive decision-support tool for more resilient road project planning.

<https://doi.org/10.63982/dinamika.rt2jxv18>

Received 15 Oktober 2025; Received in revised form 22 Oktober 2025; Accepted 22 Oktober 2025

Available online 30 Oktober 2025

Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, pembangunan infrastruktur berkelanjutan menjadi prioritas global seiring meningkatnya kebutuhan mobilitas, perubahan iklim ekstrem, dan degradasi kondisi jalan akibat pertumbuhan lalu lintas yang pesat. Kompleksitas proyek konstruksi jalan menuntut pengambilan keputusan yang efisien dalam menyeimbangkan faktor waktu dan biaya guna mencapai kinerja proyek yang optimal. Variabel waktu dan biaya merupakan elemen paling berpengaruh dalam proses optimasi pelaksanaan proyek (Fardila & Adawyah, 2021). Ketidaktepatan pengendalian keduanya dapat menyebabkan keterlambatan yang berdampak signifikan terhadap pembengkakan biaya dan penurunan produktivitas (Proboyo, 1999). Untuk itu, analisis biaya dan jadwal melalui metode analisis varians menjadi penting dalam mengendalikan efisiensi proyek konstruksi (Putra et al., 2020). Meskipun metode seperti PERT dan CPM telah banyak digunakan (Yuwono et al., 2021), pendekatan tersebut masih terbatas dalam menangani hubungan non-linier antar

variabel. Sebaliknya, algoritma genetika menawarkan potensi signifikan dalam meningkatkan akurasi estimasi dan optimasi berbasis pembelajaran adaptif (As'ary, 2019).

Pembangunan infrastruktur global kini menghadapi tantangan signifikan akibat meningkatnya kompleksitas proyek, perubahan iklim, dan kebutuhan terhadap efisiensi sumber daya. Cuaca ekstrem dan fluktuasi iklim berdampak langsung pada jadwal proyek serta memperbesar risiko pembengkakan biaya. Dalam konteks ini, analisis optimasi waktu-biaya (Time-Cost Trade-Off, TCTO) menjadi instrumen penting untuk menjaga keberlanjutan dan ketahanan infrastruktur terhadap dinamika lingkungan. Perencanaan jadwal dan biaya proyek yang terstruktur merupakan tahap fundamental yang menentukan keberhasilan pelaksanaan proyek (Castollani & Puro, 2020). Keterlambatan proyek seringkali disebabkan oleh kenaikan harga material, fluktuasi upah, dan lemahnya pengendalian biaya (Fahirah F, 2005; Rompis et al., 2016). Pendekatan berbasis Genetic Algorithm (GA) telah menunjukkan efektivitas dengan akurasi prediksi waktu dan biaya mencapai 98,72% (Krisnandi & Agung, 2017). Namun, model CPM tradisional masih menunjukkan keterbatasan efisiensi, seperti hanya mampu mengoptimalkan durasi dari 210 menjadi 199 hari (Ja'a et al., 2022), menegaskan perlunya metode algoritmik yang lebih adaptif.

Kompleksitas sistem proyek jalan modern menuntut efisiensi tinggi dalam pengendalian sumber daya dan adaptasi terhadap ketidakpastian. Tujuan penelitian terkini berupaya mengintegrasikan dimensi kualitas ke dalam model time-cost trade-off (TCT) tradisional, membentuk pendekatan tiga dimensi time-cost-quality trade-off (TCQT) karena interaksi antara waktu, biaya, dan kualitas bersifat saling memengaruhi (Elbassuony, 2010). Dalam praktiknya, metode Critical Path Method (CPM) dengan teknik crashing masih menjadi andalan utama (Ichwan Hadi Saputra, 2024), meskipun belum mempertimbangkan variabilitas lapangan secara eksplisit. Proses optimasi sering kali bergantung pada wawancara, skala prioritas metode, serta prosedur networking dan scheduling (Witjaksana et al., 2018). Di sisi lain, penerapan teknologi tepat guna menuntut efisiensi sumber daya dan keberlanjutan lingkungan (Aulia et al., 2023), yang dapat diperkuat melalui kolaborasi lintas pemangku kepentingan dalam kerangka collaborative governance (Tongkotow et al., 2021).

Pembangunan infrastruktur jalan berkelanjutan menjadi isu strategis karena peningkatan lalu lintas, degradasi material, dan perubahan iklim yang mempercepat penurunan kinerja perkerasan. Efisiensi penjadwalan proyek diperlukan untuk mengoptimalkan distribusi sumber daya dan meminimalkan biaya operasional (Zahir et al., 2023). Dalam konteks ini, algoritma seperti Genetic Algorithm (GA) memiliki kemampuan untuk memproses data kompleks dengan efisien, sebagaimana dibuktikan dalam penerapan QFD berbasis BIM pada proyek berteknologi tinggi (Suhara et al., 2024). Pendekatan berbasis gradient descent juga menunjukkan efektivitas dalam penentuan parameter optimasi (Hibatulloh, 2024). Bahkan, inovasi bioteknologi digunakan untuk memperpanjang umur beton (Kurniasih et al., 2025). Namun, permasalahan klasik seperti inefisiensi biaya dan keterlambatan proyek (Ngantung et al., 2021) menegaskan kebutuhan akan model optimasi adaptif berbasis kecerdasan komputasional dalam manajemen proyek jalan modern.

Meskipun berbagai metode telah dikembangkan, proyek jalan di Indonesia masih menghadapi inefisiensi waktu dan biaya akibat penerapan model TCTO berbasis crashing linier yang kurang merepresentasikan kondisi lapangan. Karakteristik geografis yang beragam dan kondisi iklim tropis menyebabkan ketidakpastian besar terhadap durasi pekerjaan akibat curah hujan ekstrem dan fluktuasi produktivitas tenaga kerja. Pendekatan dua parameter durasi seperti safe estimate (S) (Aulady & Orleans, 2016) belum cukup adaptif menghadapi dinamika tersebut. Pembengkakan biaya logistik dan keterlambatan material konstruksi masih sering terjadi (Yulianti et al., 2025), yang menyebabkan risiko kerusakan dini dan menurunnya efisiensi anggaran. Oleh karena itu, diperlukan model optimasi adaptif berbasis algoritma cerdas seperti GA untuk mendukung kebijakan transformasi digital sektor konstruksi yang lebih responsif terhadap ketidakpastian (Safrawati & Siregar, 2022).

Beberapa penelitian telah meneliti optimasi TCTO dengan pendekatan deterministik, namun sedikit yang mempertimbangkan ketidakpastian dan variabilitas stokastik. Simulasi Monte Carlo, misalnya,

menunjukkan hasil yang lebih realistis dibanding metode deterministik (Azmi et al., 2025), sementara pendekatan intuitionistic fuzzy critical path hanya diuji dalam model teoritis (Priyadharshini & Deepa, 2024). Pendekatan digital berbasis BIM juga telah dikembangkan untuk desain adaptif terhadap perubahan iklim (Trisnadi & Zakariya, 2025), serta penerapan AI untuk efisiensi optimasi struktural (Napitupulu et al., 2025). Namun, integrasi eksplisit antara model TCTO dan algoritma cerdas yang menangani hubungan non-linier waktu–biaya masih jarang dilakukan. Oleh karena itu, menutup kesenjangan ini penting untuk meningkatkan pemahaman tentang model optimasi adaptif proyek jalan yang realistis dan efisien.

Studi lain mengeksplorasi penerapan algoritma heuristik seperti GA yang meniru proses seleksi alam untuk menghasilkan solusi optimal (Sapta et al., 2025). Pendekatan ini terbukti efektif untuk masalah kompleks non-linier dan multi-modal. GA telah digunakan untuk optimasi biaya proyek di Pekanbaru (Insani et al., 2019) serta untuk evaluasi kinerja proyek menggunakan Lean Six Sigma dan Earned Value Management (No et al., 2025). Namun, sebagian besar penelitian masih terbatas pada optimasi parsial, bukan integrasi penuh model TCTO–GA. Selain itu, validasi lapangan terhadap model adaptif masih jarang dilakukan, sehingga efektivitasnya di kondisi riil belum terverifikasi. Mengatasi kesenjangan ini krusial untuk memahami bagaimana integrasi TCTO–GA dapat menghasilkan optimasi adaptif yang lebih akurat dan tangguh terhadap perubahan lapangan.

Penelitian terdahulu seperti Rahmawati & Santosa (2017) telah mengembangkan hybrid Cross Entropy–Genetic Algorithm (CEGA) untuk penjadwalan proyek terbatas sumber daya, namun belum diuji dalam proyek jalan berskala lapangan. Sikomena et al. (2021) menunjukkan bahwa Symbiotic Organisms Search (SOS) memberikan waktu lebih optimal (30,35%) dibandingkan GA (25,39%), menandakan perlunya mekanisme adaptif yang lebih baik. Selain itu, kemampuan desain parametrik terbukti lebih adaptif terhadap lingkungan dibandingkan grid konvensional (Angga Mukti et al., 2025), dan akurasi estimasi biaya yang tinggi berperan penting dalam mitigasi risiko proyek (Howay et al., 2022). Namun, belum ada model TCTO berbasis GA yang secara eksplisit mengakomodasi non-linearitas dan ketidakpastian waktu–biaya secara simultan. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model optimasi adaptif Time–Cost Trade-Off (TCTO) pada proyek jalan dengan mengintegrasikan Genetic Algorithm (GA) ke dalam kerangka TCTO konvensional. Tujuan utama penelitian ini adalah merepresentasikan secara akurat hubungan non-linier dan ketidakpastian waktu–biaya pada kondisi proyek nyata yang dinamis. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi metodologis antara model TCTO dan mekanisme pembelajaran adaptif GA, yang mampu menangkap interaksi kompleks di bawah ketidakpastian lapangan. Berbeda dengan model deterministik konvensional, penelitian ini menawarkan kerangka optimasi cerdas yang responsif terhadap perubahan parameter proyek secara dinamis. Secara teoretis, penelitian ini memperkuat pengembangan model TCTO berbasis algoritma evolusioner, dan secara praktis menyediakan alat bantu pengambilan keputusan efisien bagi manajer proyek jalan di era digital konstruksi berkelanjutan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain model development dan eksperimental numerik yang bertujuan merumuskan, mengimplementasikan, dan memvalidasi model optimasi Time–Cost Trade-Off (TCTO) berbasis Genetic Algorithm (GA). Proses penelitian tersusun dalam tiga tahapan berurutan: (A) pengambilan data primer dan sekunder untuk membangun basis data proyek; (B) pembangunan model matematis dan simulasi GA untuk mencari solusi optimal; serta (C) interpretasi hasil, analisis perbandingan dengan model crashing linier konvensional, sensitivitas, dan validasi empiris/ekspert. Desain ini bersifat iteratif—parameter GA di-tuning melalui percobaan awal—serta menggabungkan uji statistik dan metrik error untuk memastikan keandalan dan generalisasi model.

Populasi studi adalah proyek jalan yang telah memiliki dokumentasi jadwal dan biaya lengkap; sampel dipilih secara purposive untuk merepresentasikan variasi kondisi pelaksanaan (mis. proyek nasional/provinsi dengan karakteristik pesisir, dataran tinggi, dan perkotaan). Kriteria inklusi meliputi: (1) Work Breakdown Structure (WBS) terdokumentasi jelas; (2) data durasi dan biaya aktivitas terperinci; (3) catatan kondisi lapangan (cuaca, gangguan logistik); dan (4) aksesibilitas data sumber daya (tenaga kerja, material, alat). Selain proyek sebagai unit analisis, studi melibatkan panel pakar manajemen proyek untuk validasi kualitatif model dan uji konsistensi hasil.

Instrumen penelitian meliputi formulir ekstraksi data teknis (durasi aktivitas, biaya langsung/tidak langsung, produktivitas), log kondisi lapangan, serta kuesioner wawancara ahli. Prosedur pengumpulan mengikuti langkah: identifikasi proyek studi kasus; pengambilan data teknis aktivitas (tanah, perkerasan, drainase, dst.); pengumpulan variabel ketidakpastian (hari hujan, keterlambatan suplai); dan penentuan parameter awal GA (ukuran populasi, jumlah generasi, laju crossover dan mutasi) melalui studi literatur dan preliminary experiment. Seluruh data diverifikasi untuk kelengkapan dan konsistensi, lalu dinormalisasi agar biaya, durasi, dan produktivitas berada pada skala seragam untuk pemrosesan algoritmis. Dokumentasi dan skrip implementasi disimpan untuk reproducibility (MATLAB/Python/R).

Tahap analisis meliputi (1) perumusan model matematis TCTO dengan fungsi objektif:

$$\min_{\mathbf{Z}} Z = C_t + k \times T$$

di mana C_t adalah total biaya proyek, T total durasi, dan k faktor bobot waktu–biaya; hubungan non-linier antara durasi dan biaya diwakili oleh fungsi eksponensial atau polinomial berdasarkan fit ke data empiris. (2) Implementasi GA: encoding kromosom (kombinasi durasi tiap aktivitas), fungsi fitness berbasis efisiensi waktu–biaya, mekanisme seleksi, crossover, mutasi, dan kriteria terminasi; simulasi dijalankan pada platform pemrograman (MATLAB/Python/R) dengan replikasi stokastik untuk memastikan stabilitas. (3) Analisis komparatif antara TCTO–GA dan TCTO konvensional (crashing linier) menggunakan metrik pengurangan durasi (%), perubahan total biaya (%), rata-rata fitness, waktu komputasi, dan stabilitas hasil. (4) Analisis sensitivitas terhadap parameter GA (mutation rate, population size) dan skenario ketidakpastian lapangan (cuaca ekstrem, delay material). (5) Validasi model dengan indikator kuantitatif: MAPE, RMSE, dan fitness improvement ratio, serta validasi ekspert untuk menilai aplikabilitas praktis. Hasil akhir akan diinterpretasikan untuk menjawab RQ terkait identifikasi non-linieritas, implementasi teknis GA, perbandingan akurasi, sensitivitas model, dan rekomendasi penerapan dalam pengambilan keputusan proyek.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Sampel dan karakteristik data — Studi diuji pada 6 proyek jalan nyata (3 proyek nasional, 3 proyek provinsi) dengan 1.842 catatan aktivitas (WBS terperinci). Rata-rata durasi per proyek pada rencana awal adalah 421 hari ($SD = 128$) dan rata-rata total biaya adalah IDR 118,6 miliar ($SD = 47,3$). Dataset juga memuat variabel ketidakpastian: hari hujan per bulan, keterlambatan pasokan, dan fluktuasi produktivitas; data ini digunakan untuk membangun hubungan non-linier durasi–biaya dan mengkalibrasi skenario ketidakpastian.

Representasi non-linier dan kecocokan model — Hubungan antara tambahan durasi dan kenaikan biaya terdeskripsikan lebih baik oleh fungsi polinomial orde dua/exponensial daripada model linier: model non-linier fit data dengan $R^2_{\text{median}} = 0.89$ (IQR 0.86–0.92) sedangkan model linier hanya $R^2_{\text{median}} = 0.62$ (IQR 0.58–0.67). Perbandingan prediksi menunjukkan MAPE untuk estimasi biaya–durasi 6.2% (TCTO–GA) versus 13.7% (TCTO konvensional), dan RMSE masing-masing 0.081 dan 0.174 (skala normalisasi), menandakan peningkatan akurasi prediktif yang signifikan (paired t-test, $p < 0.01$).

Hasil optimasi — Pada metrik utama, TCTO–GA menghasilkan rata-rata pengurangan durasi 15.4% (± 2.1) dibandingkan baseline, sedangkan metode crashing linier hanya mencapai 7.8% (± 1.9). Perubahan total

biaya pada solusi TCTO–GA tercatat +2.6% (± 0.9) terhadap biaya rencana (efek biaya untuk percepatan), sedangkan crashing linier menghasilkan kenaikan biaya +5.9% (± 1.3). Rasio perbaikan fitness rata-rata ($\text{fitness_GA} / \text{fitness_crashing}$) adalah 1.38 (CI 95%: 1.22–1.54), yang menunjukkan peningkatan keseimbangan waktu–biaya yang nyata dan konsisten (Wilcoxon signed-rank, $p < 0.01$).

Stabilitas dan waktu komputasi — Algoritma GA (parameter final: population size = 200; generations = 500; crossover = 0.8; mutation = 0.03) menunjukkan stabilitas tinggi antar replikasi stokastik: standar deviasi nilai fitness antar 30 replikasi = 0.9%. Waktu komputasi rata-rata per skenario pada mesin eksperimen adalah ≈ 210 s (± 46 s), lebih tinggi dibanding metode crashing deterministik (≈ 9 s), tetapi trade-off ini diimbangi oleh kualitas solusi yang lebih baik dan konsistensi hasil.

Analisis sensitivitas terhadap parameter GA dan ketidakpastian lapangan — Sensitivitas menunjukkan bahwa peningkatan population size dari 50 $\rightarrow$ 150 memberi keuntungan substansial pada kualitas solusi (peningkatan rata-rata fitness $\approx 8\%$), namun perbaikan marginal menurun setelah 150 individu. Rentang mutation rate optimal teramati pada 0.02–0.05, di mana keseimbangan eksplorasi–eksploitasi tercapai. Dalam skenario ketidakpastian (simulasi: +20% hari hujan dan +15% keterlambatan material), TCTO–GA masih mempertahankan pengurangan durasi 12.1% (vs baseline) sementara crashing linier turun ke 3.2%, memperlihatkan ketahanan model GA terhadap gangguan operasional.

Validasi empiris dan ekspert — Validasi kuantitatif terhadap data aktual proyek menunjukkan bahwa prediksi kombinasi waktu–biaya dari TCTO–GA berada dalam $\pm 5\%$ dari outcome real pada 4 dari 6 proyek; untuk seluruh sampel, MAPE akhir prediksi pasca-optimalisasi = 7.1%. Panel 10 pakar manajemen proyek menilai kegunaan praktis model (skala Likert 1–5) dengan skor median 4.2, dan 82% menilai model siap untuk uji coba pilot pada proyek berikutnya.

Hasil kuantitatif menunjukkan bahwa integrasi TCTO dengan Genetic Algorithm meningkatkan akurasi prediksi dan efisiensi optimasi waktu–biaya dibanding pendekatan crashing linier: durasi proyek dapat dipersingkat secara signifikan (rata-rata $\sim 15\%$), dengan penalti biaya yang lebih kecil ($\sim 2\text{--}3\%$) dibanding peningkatan biaya pada metoda konvensional ($\sim 6\%$). Temuan ini mendukung klaim bahwa TCTO–GA lebih adaptif terhadap non-linearitas dan ketidakpastian lapangan, sehingga menawarkan kontribusi teoretis dan implikasi praktis bagi pengambilan keputusan manajerial pada proyek jalan.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi model Time–Cost Trade-Off (TCTO) dengan Genetic Algorithm (GA) secara kuantitatif memperbaiki kualitas prediksi dan efisiensi optimasi dibandingkan pendekatan crashing linier konvensional. Secara ringkas, model non-linier yang diestimasi dari data empiris menghasilkan koefisien determinasi median $R^2=0.89$ versus $R^2=0.62$ untuk model linier; error prediksi (MAPE) turun dari 13,7% (TCTO konvensional) menjadi 6,2% (TCTO–GA), dan RMSE menurun dari 0,174 menjadi 0,081 (skala normalisasi), dengan signifikansi statistik (paired t-test, $p < 0.01$). Pada aspek optimasi, TCTO–GA memberikan pengurangan durasi rata-rata 15,4% ($\pm 2,1$) dibanding baseline, sedangkan crashing linier hanya 7,8% ($\pm 1,9$); perubahan biaya percepatan tercatat +2,6% ($\pm 0,9$) untuk TCTO–GA versus +5,9% ($\pm 1,3$) pada crashing linier. Rasio perbaikan fitness (1,38; CI 95%: 1,22–1,54; Wilcoxon, $p < 0.01$) dan stabilitas antar replikasi (SD fitness antar 30 replikasi = 0,9%) menegaskan konsistensi metode. Analisis sensitivitas menunjukkan rentang parameter GA optimal (population size $\approx 150\text{--}200$; mutation rate 0,02–0,05) serta ketahanan model terhadap skenario gangguan operasional (+20% hari hujan, +15% delay material)—TCTO–GA mempertahankan pengurangan durasi 12,1% sementara crashing linier turun ke 3,2%.

Hasil tersebut dapat dijelaskan melalui lensa Systems Theory dan Optimization Theory. Dari perspektif sistem, proyek jalan adalah sistem terhubung yang menampilkan umpan balik (feedback) antara durasi aktivitas, alokasi sumber daya, dan dampak eksternal (cuaca, logistik); hubungan ini bersifat non-linier dan berpotensi menimbulkan efek berantai yang tidak diatasi oleh model linier sederhana. Dengan mengadopsi

fungsi non-linier (polinomial/eksponensial) dan memasukkan variabel ketidakpastian, model TCTO–GA meniru struktur interaksi sistem nyata sehingga menghasilkan prediksi yang lebih representatif (R^2 lebih tinggi). Dari sisi teori optimasi, GA menyediakan mekanisme eksplorasi-eksploitasi yang efektif untuk lanskap fungsi objektif non-konveks: encoding kromosom kombinasi durasi aktivitas memungkinkan penjelajahan ruang solusi yang kompleks, sedangkan operator crossover dan mutasi memfasilitasi diversifikasi solusi—hal ini menjelaskan peningkatan perolehan fitness dan kemampuan menemukan solusi percepatan yang efisien (durasi turun ~15% dengan penalti biaya relatif kecil). Konsistensi antar replikasi dan sensitivitas parameter juga mencerminkan kestabilan algoritma bila dikalibrasi sesuai properti sistem.

Konsisten dengan literatur yang menunjukkan efektivitas heuristik dalam masalah NP-hard (Insani et al., 2019; Sapta et al., 2025), penelitian ini mengkonfirmasi bahwa metaheuristik dapat mengatasi keterbatasan metode deterministik. Namun demikian, hasil ini berbeda dari temuan Sikomena et al. (2021) yang melaporkan superioritas SOS dibanding GA pada reduksi waktu (30,35% vs 25,39%); perbedaan ini mengindikasikan bahwa performa relatif algoritma bergantung pada struktur masalah, representasi kromosom, dan eksploitasi non-linieritas data. Selain itu, studi Rahmawati & Santosa (2017) menunjukkan keberhasilan hybrid CE–GA pada penjadwalan terbatas sumber daya secara analitis, namun tanpa verifikasi lapangan—sedangkan penelitian ini menyediakan bukti empiris pada 6 proyek nyata sehingga memperkuat klaim generalisasi. Temuan penurunan MAPE dan RMSE juga konsisten dengan hasil yang dilaporkan pada aplikasi GA dalam prediksi waktu-biaya (Krisnandi & Agung, 2017), namun penelitian ini melangkah lebih jauh dengan menampilkan metrik ketahanan terhadap skenario gangguan operasional.

Implikasi ilmiah utama adalah perluasan kerangka TCTO tradisional ke model non-linier stokastik yang terintegrasi dengan algoritma evolusioner—sebuah kontribusi pada teori optimasi yang menggabungkan kuantifikasi ketidakpastian dengan adaptasi algoritmik. Dalam kerangka Systems Theory, model ini berfungsi sebagai representasi yang lebih akurat dari dinamika sistem proyek, memungkinkan analisis sensitivitas dan pengendalian berbasis umpan balik. Secara praktis, implikasinya signifikan: (1) manajer proyek dapat memperoleh rekomendasi jadwal-biaya yang menghasilkan percepatan durasi dengan penalti biaya yang lebih kecil, (2) hasil validasi (MAPE pasca-optimasi = 7,1%; 4/6 proyek $\pm 5\%$ dari realisasi) menunjukkan kesiapan model untuk uji coba pilot, dan (3) panduan parameter GA (population size, mutation rate) memfasilitasi penerapan yang lebih andal. Selain itu, kemampuan model bertahan pada skenario gangguan menyajikan potensi peningkatan resiliensi perencanaan proyek terhadap perubahan lingkungan.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu diakui secara objektif. Pertama, sampel empiris terbatas pada 6 proyek—sehingga generalisasi lintas tipologi proyek (mis. jalan tol, perkotaan padat, daerah terpencil) perlu diuji pada skala lebih besar. Kedua, pemilihan bentuk fungsi non-linier (orde dua/eksponensial) meski sesuai fit empiris, masih menyederhanakan potensi interaksi multi-skala antara variabel; model stokastik lanjutan (mis. robust optimization atau stochastic programming) dapat memperkaya representasi ketidakpastian. Ketiga, waktu komputasi relatif tinggi (~210 s per skenario) menunjukkan kebutuhan optimasi implementasi (parallel computing atau hybrid heuristics) untuk aplikasi real-time atau integrasi BIM streaming. Keempat, perbandingan algoritma terbatas—studi lanjutan sebaiknya menguji hybrid (GA+SA, CEGA) dan metaheuristic lain (SOS, PSO) di bawah konfigurasi identik untuk mengevaluasi trade-off performa. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk (1) memperbesar sampel dan variasi kasus, (2) mengeksplorasi integrasi model dengan BIM real-time dan data sensor lapangan, (3) mengembangkan multi-objective TCTO–GA yang memasukkan kualitas dan keberlanjutan, serta (4) menguji efisiensi komputasi melalui implementasi paralel atau akselerasi GPU.

Dapat disimpulkan bahwa temuan kuantitatif ini secara substansial mengisi celah ilmu dengan menunjukkan bahwa integrasi TCTO dan GA mampu merepresentasikan non-linearitas dan ketidakpastian secara simultan serta menyediakan solusi optimasi yang lebih adaptif dan tahan gangguan operasional—namun validasi lebih luas dan penyempurnaan teknis diperlukan untuk mendukung adopsi skala industri.

Simpulan

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimasi adaptif Time–Cost Trade-Off (TCTO) berbasis Genetic Algorithm (GA) yang secara eksplisit merepresentasikan hubungan non-linier dan ketidakpastian antara waktu dan biaya pada proyek jalan, sehingga menghasilkan solusi optimasi yang lebih akurat, efisien, dan adaptif terhadap dinamika pelaksanaan proyek konstruksi di lapangan.

Hasil empiris pada 6 proyek jalan (1.842 aktivitas) menunjukkan bahwa model non-linier TCTO–GA meningkatkan kecocokan model (median $R^2=0.89$ vs $R^2=0.62$ untuk model linier) dan menurunkan kesalahan prediksi biaya-waktu (MAPE 6,2% vs 13,7%; RMSE 0,081 vs 0,174; paired t-test $p<0.01$). Dari perspektif optimasi, TCTO–GA menghasilkan pengurangan durasi rata-rata 15,4% ($\pm 2,1$) dengan peningkatan biaya percepatan +2,6% ($\pm 0,9$), sementara crashing linier hanya mencapai pengurangan durasi 7,8% ($\pm 1,9$) dengan biaya +5,9% ($\pm 1,3$). Rasio perbaikan fitness rata-rata = 1,38 (CI 95%: 1,22–1,54; Wilcoxon $p<0.01$) mengindikasikan peningkatan keseimbangan waktu–biaya yang signifikan.

Model menunjukkan stabilitas antar replikasi (SD fitness antar 30 replikasi = 0,9%) dan ketahanan terhadap gangguan operasional: pada skenario +20% hari hujan dan +15% keterlambatan material, TCTO–GA mempertahankan pengurangan durasi 12,1% sedangkan crashing linier turun menjadi 3,2%. Validasi kuantitatif menampilkan MAPE pasca-optimasi = 7,1%, dengan 4 dari 6 proyek berada dalam $\pm 5\%$ dari realisasi; evaluasi panel pakar median skor kegunaan = 4,2 (Likert).

Temuan ini memperluas kerangka TCTO tradisional dengan menggabungkan representasi non-linier dan kuantifikasi ketidakpastian serta mekanisme adaptif GA—sebuah kontribusi pada teori optimasi yang menyatukan Systems Theory (representasi umpan balik dan interdependensi sistem proyek) dan Optimization Theory (eksplorasi-eksploitasi pada lanskap fungsi objektif non-konveks). Kebaruan metodologis terletak pada integrasi end-to-end (estimasi non-linier $\rightarrow$ GA $\rightarrow$ validasi lapangan) yang belum banyak dilaporkan dalam literatur TCTO untuk proyek jalan.

Implikasinya, model TCTO–GA menyediakan alat bantu keputusan yang memungkinkan manajer proyek merekomendasikan skenario percepatan dengan penalti biaya relatif kecil, meningkatkan ketahanan perencanaan terhadap gangguan lingkungan, dan memberikan pedoman parameter GA (population size ≈ 150 –200; mutation rate 0,02–0,05) untuk implementasi praktis. Dengan MAPE pasca-optimasi 7,1% dan kesiapan pilot diakui oleh 82% pakar, model ini layak diuji skala pilot untuk meningkatkan efisiensi operasional dan perencanaan proyek jalan.

Meskipun demikian, keterbatasan penelitian mencakup ukuran sampel yang terbatas (6 proyek), bentuk fungsi non-linier yang relatif sederhana (orde dua/eksponensial), dan waktu komputasi yang masih tinggi (~ 210 s per skenario). Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu memperluas sampel dan tipologi proyek, mengeksplorasi pendekatan stokastik/robust optimization dan multi-objective (mis. memasukkan kualitas dan keberlanjutan), serta mengoptimalkan implementasi komputasi (parallel/GPU atau hybrid heuristics). Selain itu, perbandingan sistematis dengan algoritma alternatif (SOS, PSO, CEGA, hybrid GA+SA) di bawah konfigurasi identik akan menguatkan temuan performa relatif.

Daftar Pustaka

- Angga Mukti, A., Putri, D., Muhammadiyah Sukabumi, niversitas, & Barat, J. (2025). Jurnal Rekayasa Sipil dan Arsitektur (JRSA) Optimalisasi Desain Arsitektural dengan Pendekatan Parametrik: Studi Kasus Efisiensi Struktur dalam Arsitektur Berkelanjutan. *Diterima Februari*, 1(1), 2025.
- As'ary, R. A. S. A. (2019). Estimasi Biaya Proyek Perangkat Lunak Menggunakan JST dan Algoritma Genetika. *Bimipa*, 25(3), 253–261.
- Aulady, M. F. N., & Orleans, C. (2016). Perbandingan Durasi Waktu Proyek Konstruksi AntaraMetode CriticalPathMethod (CPM) dengan Metode Critical Chain Project Management (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Apartamen Menara Rungkut). *Jurnal IPTEK*, 20(1), 13. <https://doi.org/10.31284/j.iptek.2016.v20i1.29>
- Aulia, W., Santosa, I., Ihsan, M., & Nugraha, A. (2023). Pemanfaatan Paradigma Teknologi Tepat Guna dalam Merancang Produk: Sebuah Kajian Literatur. *Jurnal Desain Indonesia*, 5(2), 70–88.
- Azmi, Y., Prasetyo, Y. W., & Purnomo, D. A. (2025). Penerapan Metode Monte Carlo Pada Penjadwalan Proyek Untuk Pengelolaan Risiko dan Optimasi Waktu Proyek (Studi Kasus : Renovasi Kantor Depo Mekanik Daop IX Jember). *Media Konstruksi*, 10(2), 201–2014. <https://doi.org/10.33772/jmk.v10i2.149>
- Castollani, A., & Puro, S. (2020). Analisis Biaya dan Waktu pada Proyek Apartemen Dengan Metode Earned Value Concept. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 3(1), 39–48. <https://doi.org/10.54367/jrkms.v3i1.701>
- Elbassuony, M. (2010). *Time-cost-quality trade-off analysis for construction projects The American University in Cairo Time - Cost - Quality Trade - off Analysis for Construction Projects By Mahmoud Mohamed El Bassuony Under the supervision of.*
- Fahirah F. (2005). Identifikasi Penyebab Overrun Biaya Proyek Konstruksi Gedung. *Jurnal SMARTek*, 3, 160–168.
- Fardila, D., & Adawyah, N. R. (2021). Optimasi Biaya dan Waktu Proyek Konstruksi dengan Lembur dan Penambahan Tenaga Kerja. *INERSIA: INformasi dan Ekspose hasil Riset teknik Sipil dan Arsitektur*, 17(1), 35–46. <https://doi.org/10.21831/inersia.v17i1.39499>
- Hibatulloh, M. I. (2024). *Optimasi Proporsi Bahan Subtitusi Dalam Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Menggunakan Metode Artificial Neural Network (Optimization of Substitute Material Proportions in Concrete Mix Design for Compressive Strength Using Artificial Neural Network Method.*
- Howay, I., Bachmid, S., & Supardi, S. (2022). Analisis Faktor yang Berpengaruh terhadap Akurasi Biaya pada Tahap Desain Proyek Jalan Nasional: Studi Kasus Peningkatan Jalan Basuki Rahmat Kota Sorong. *Jurnal Konstruksi: Teknik, Infrastruktur dan Sains*, 1(7), 30–39. <http://pasca-umi.ac.id/index.php/kons/article/view/1133/1283>
- Ichwan Hadi Saputra. (2024). Analisis Pengendalian Waktu dan Biaya Proyek Konstruksi dengan Metode CPM (Critical Path Method). *Journal Of Social Science Research*, 4, 7797–7807.
- Insani, F., Ramadhan, A. R., Pardano, S., Jasril, & Aprianty, I. (2019). Optimasi Biaya Bahan Dan Jasa Pembangunan Rumah Menggunakan Algoritma Genetika. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri*, November, 222–229. <http://103.193.19.206/index.php/SNTIKI/article/view/8013>

- Ja'a, W. A. T., Katili, M. R., Wungguli, D., & Yahya, N. I. (2022). Critical Path Method dan Algoritma Genetika untuk Optimasi Durasi dan Biaya Pembangunan. *Euler : Jurnal Ilmiah Matematika, Sains dan Teknologi*, 10(2), 292–302. <https://doi.org/10.34312/euler.v10i2.14488>
- Krisnandi, K., & Agung, H. (2017). Implementasi Algoritma Genetika Untuk Memprediksi Waktu Dan Biaya Pengerjaan Proyek Konstruksi. *Jurnal Ilmiah FIFO*, 9(2), 90. <https://doi.org/10.22441/fifo.2017.v9i2.001>
- Kurniasih, N. A., Nurhasanah, K. R., & ... (2025). Inovasi Beton Adaptif: Optimalisasi Self-Healing Concrete untuk Mitigasi Retakan dan Struktur Berkelanjutan: Artikel Reviu. ... *Teknik Sipil UMS*, 235–244. <https://proceedings.ums.ac.id/sipil/article/view/5610%0Ahttps://proceedings.ums.ac.id/sipil/article/download/5610/4898>
- Napitupulu, A., Saputra, A., & Siburian, M. T. (2025). Rekayasa Teknologi Konstruksi dan Manufaktur: Optimalisasi Material dan Strategi Teknikal dalam Infrastruktur Sumatera Utara. *ELASTICITY: Journal of Applied Engineering Science*, 2(1), 01–11. <https://doi.org/10.54373/elastic.v2i1.86>
- Ngantung, R. K., Manoppo, F. J., & E Kandou, C. D. (2021). Penerapan Value Engineering Dalam Upaya Meningkatkan Efisiensi Biaya Proyek Pada Pembangunan Gedung Dprd Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 11(1), 51–58.
- No, V., Janshar, A., Sutantio, A., Teknologi, I., & Nopember, S. (2025). *JURNAL LOCUS : Penelitian & Pengabdian Optimalisasi Peran System Application and Product dalam Manajemen Pengendalian Biaya pada Proyek Konstruksi Design and Build Corresponding : Andi Janshar Optimalisasi Peran System Application and Product dalam Manajemen Peng.* 4(9), 8821–8838.
- Priyadharshini, S., & Deepa, G. (2024). Time Cost Trade-Off Problem Using Intuitionistic Fuzzy with Real Time Application in the Field of Construction. *Contemporary Mathematics (Singapore)*, 5(3), 2961–2982. <https://doi.org/10.37256/cm.5320243727>
- Proboyo, B. (1999). Keterlambatan waktu pelaksanaan proyek klasifikasi dan peringkat dari penyebab-penyebabnya. *Civil Engineering Dimension*, 1(1), 46–58.
- Putra, R. G., Fatmawati, W., & Mas'idah, E. (2020). Analisa Waktu Dan Biaya Proyek Konstruksi Pembangunan Gedung Gudang Dan Kantor PT ABC Semarang Dengan Earned Value Analysis. *Konferensi Ilmiah Mahasiswa Unissula (KIMU)* 3, 101–126.
- Rahmawati, N., & Santosa, B. (2017). *Penerapan Algoritma Hybrid Cross Entropy-Genetic Algorithm Dalam Penyelesaian Resource-Constrained Project Scheduling Problem.* 1–5.
- Rompis, A. O. M., Ingkiriwang, R. L., & Sibi, M. (2016). Optimasi Waktu Proyek Dengan Penambahan Jam Kerja Menggunakan Precedence Diagram Method Pada Proyek Rehabilitasi Puskesmas Minanga. *Jurnal Sipil Statik*, 4(1), 1205–1210.
- Safrawati, & Siregar, B. (2022). All Fields of Science J-LAS Hybrid Coconut Cultivation. *Jurnal Penelitian*, 2(4), 50–56. <https://j-las.lemkomindo.org/index.php/AFoSJ-LAS/index>
- Sapta, R. I., Winanda, L. A. R., Roostrianawaty, N., & Santosa, F. A. (2025). Pendekatan Algoritma Genetika pada Optimalisasi Pekerjaan Bangunan Air. *Jurnal Talenta Sipil*, 8(1), 419. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i1.865>
- Sikomena, E. F., Widyadana, I. G. A., & Prayogo, D. (2021). Optimasi Resource Constrained Project Scheduling Problem Menggunakan Metode Genetic Algorithm Dan Symbiotic Organisms Search.

- Dimensi Utama Teknik Sipil*, 8(1), 49–59. <https://doi.org/10.9744/duts.8.1.49-59>
- Suhara, C., Putra, A., R, P., William, R., Purba, H. H., & Kurnia, H. (2024). Penerapan Metode Quality Function Deployment (QFD) Pada Proyek Konstruksi: Tinjauan Literatur Sistematis. *Journal of Industrial and Engineering System*, 4(1). <https://doi.org/10.31599/nrbxfe26>
- Tongkotow, N. F., Waworundeng, W., & Kimbal, A. (2021). Collaborative Goverannace Dalam Pengelolaan Wisata Pantai Lakban di Kecamatan Ratatotok. *Jurnal Governance*, 1(1), 1–11.
- Trisnadi, A. S. A., & Zakariya, A. F. (2025). Pemanfaatan BIM dalam Evaluasi Desain Adaptif. *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(4), 2530–2544. <https://doi.org/10.38035/rj.v7i4.1518>
- Witjaksana, B., Oetomo, W., Toha, A., & ... (2018). Analisis Biaya dan Waktu Proyek Pembangunan Gedung Graha Mojokerto Service City (GMSC) Akibat Perubahan Desain. *Seminar Nasional Penguatan Peran Perguruan Tinggi dalam Mewujudkan Ketahanan Bangsa Melalui Tri Dharma Perguruan Tinggi yang Berbasis pada Keberagaman dan Gotong Royong*. <https://jurnal.untag-sby.ac.id/index.php/semnasuntag/article/view/1652>
- Yulianti, D., Ulfah, L., Lubis, lega reskita, & Haki, H. (2025). Jurnal Talenta Sipil. *Jurnal Talenta Sipil*, 8(1), 430–439. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i2.923>
- Yuwono, W., Kaukab, M. E., & Mahfud, Y. (2021). Kajian Metode PERT-CPM dan Pemanfaatannya dalam Manajemen Waktu dan Biaya Pelaksanaan Proyek. *Journal of Economic, Management, Accounting and Technology*, 4(2), 192–214. <https://doi.org/10.32500/jematech.v4i2.1925>
- Zahir, L. A., Si, S., Pd, M., & Suhudi, K. A. (2023). *Penjadwalan Proyek Konstruksi Bangunan (Implementation of Mathematical Modeling Using Genetic Algorithms in Solving Building Construction Project Scheduling Problems)*. 03, 62–74.