

Pemodelan *Causal Loop Diagram* Percepatan Proyek terhadap Biaya dan Kualitas Konstruksi

Avrilia D. Maharani^a, Lila Ayu R. Winanda^{a*}, M. Wijyaningtyas^a dan Deviany Kartika^a

^aProgram Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang, Malang, Indonesia 65152

* Corresponding author's e-mail: lilawinanda@lecturer.itn.ac.id

Received: 11 January 2026; revised: 20 January 2026; accepted: 23 January 2026

Abstract: Construction project acceleration is a strategy commonly implemented to overcome schedule delays; however, its application often results in increased costs and reduced work quality when not managed in a systematic and integrated manner. This condition reflects the presence of complex and dynamic interrelationships among time, cost, and quality as the three main elements within the triple constraint framework, which cannot be adequately analyzed using linear approaches. Failure to understand the interactions among these three aspects may lead to project inefficiencies and decreased overall performance. Therefore, an approach capable of explaining cause-effect relationships and feedback mechanisms within construction project systems is required. This study aims to model the causal relationships between project acceleration, cost, and quality in order to obtain a structural understanding of their dynamic interactions. The research method employs a system dynamics approach using causal loop diagram modeling supported by Vensim PLE 10.4.0 software. The research stages include system definition to determine boundaries and identify key variables, model formulation based on a literature review to establish intervariable relationships, and the development of causal loop diagrams to illustrate interactions and feedback structures within the system. The modeling results indicate that the developed system consists of twenty feedback loops and forty-six one-way relationships representing interactions among acceleration, cost, and quality factors within the context of project acceleration. These findings confirm that project acceleration, cost, and quality are not independent variables but are dynamically interconnected. The proposed model provides a conceptual contribution to strengthening systemic understanding in construction project management and can serve as a foundation for strategic decision-making related to more effective and sustainable project acceleration.

Keywords: *project acceleration, dynamic system, cost, quality, Causal Loop Diagram.*

Abstrak: Percepatan proyek konstruksi merupakan strategi yang umum diterapkan untuk mengatasi keterlambatan pelaksanaan, namun penerapannya sering menimbulkan konsekuensi berupa peningkatan biaya dan penurunan kualitas pekerjaan apabila tidak dikelola secara sistemik dan terintegrasi. Kondisi ini mencerminkan adanya keterkaitan yang kompleks dan dinamis antara waktu, biaya, dan kualitas sebagai tiga elemen utama dalam kerangka *triple constraint*, yang tidak dapat dianalisis secara linier. Kegagalan dalam memahami interaksi ketiga aspek tersebut berpotensi menyebabkan inefisiensi proyek dan menurunkan kinerja keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu menjelaskan hubungan sebab – akibat serta mekanisme umpan balik yang terbentuk dalam sistem proyek konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan hubungan sebab – akibat antara percepatan proyek, biaya, dan kualitas guna memperoleh pemahaman struktural terhadap dinamika interaksi ketiganya. Metode penelitian yang digunakan adalah pemodelan sistem dinamik melalui pendekatan *causal loop diagram* dengan bantuan perangkat lunak Vensim PLE 10.4.0. Tahapan penelitian meliputi pendefinisian sistem untuk menentukan batasan dan mengidentifikasi variabel utama, formulasi model berdasarkan studi literatur guna merumuskan hubungan antarvariabel, serta penyusunan *causal loop diagram* untuk menggambarkan interaksi dan struktur umpan balik dalam sistem. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan terdiri atas dua puluh hubungan umpan balik (*feedback loops*) dan empat puluh enam hubungan searah (*one – way relationships*) yang merepresentasikan interaksi antara faktor percepatan, biaya, dan kualitas dalam konteks percepatan proyek. Temuan ini menegaskan bahwa percepatan proyek, biaya, dan kualitas bukanlah variabel yang berdiri sendiri, melainkan saling memengaruhi secara dinamis. Model yang dihasilkan memberikan kontribusi konseptual dalam memperkuat pemahaman sistemik pada manajemen proyek konstruksi serta dapat dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan strategis terkait penerapan percepatan proyek yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci: *percepatan proyek, sistem dinamik, biaya, kualitas, Causal Loop Diagram*

1. Pendahuluan

Konsep *triple constraint* atau *iron triangle* merupakan kerangka dasar dalam manajemen proyek yang menggambarkan keterkaitan antara waktu, biaya, dan kualitas sebagaientu keberhasilan proyek [1]. Waktu merepresentasikan durasi pelaksanaan, biaya mencerminkan sumber daya finansial yang dialokasikan, sedangkan kualitas menunjukkan tingkat kesesuaian hasil proyek terhadap spesifikasi teknis dan kebutuhan pemangku kepentingan [2]. Ketiga aspek ini saling bergantung, sehingga perubahan pada satu aspek akan memengaruhi

aspek lainnya. Upaya percepatan proyek, misalnya sering kali membutuhkan peningkatan biaya dan berpotensi menurunkan kualitas apabila tidak dikelola secara tepat.

Hubungan dalam *triple constraint* bersifat dinamis, bukan statis [1]. Dalam praktik konstruksi, percepatan jadwal umumnya dilakukan melalui penambahan tenaga kerja, lembur, atau metode *fast tracking*, yang dapat meningkatkan biaya serta risiko penurunan kualitas dan *rework*. Oleh karena itu, pengambilan keputusan proyek perlu mempertimbangkan keseimbangan ketiga aspek tersebut secara simultan.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji konsep *triple constraint* sebagai indikator keberhasilan proyek konstruksi yang mencakup aspek waktu, biaya, dan kualitas. [3] menunjukkan bahwa ketidakseimbangan dalam pengelolaan ketiga aspek tersebut berdampak signifikan terhadap kinerja proyek konstruksi gedung. Studi pada proyek konstruksi gedung di Provinsi Aceh menunjukkan bahwa faktor eksternal, tenaga kerja, dan pembiayaan berpengaruh signifikan terhadap pencapaian waktu, biaya, dan kualitas proyek, khususnya selama masa pandemi COVID-19 [4]. Penelitian lain di Jakarta mengungkapkan bahwa kendala waktu, biaya, dan kualitas memiliki keterkaitan erat dengan permasalahan material, metode kerja, dan faktor administrasi proyek [5].

Selain itu, analisis *time – cost – quality trade – off* pada proyek jembatan menunjukkan bahwa optimasi terhadap satu variabel sering kali memengaruhi variabel lainnya, sehingga manajemen proyek memerlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan ketiga aspek tersebut secara bersamaan [6]. Sejumlah penelitian mulai menerapkan pendekatan sistem dinamik untuk menjelaskan kompleksitas proyek konstruksi. Buyang dan Buyang [7] membahas pemodelan faktor penyebab keterlambatan pada proyek pembangunan dermaga pangkalan TNI AL Ambon menggunakan pendekatan sistem dinamik untuk menggambarkan interaksi struktural antar faktor penyebab keterlambatan. Ansari *et al.* [8] memodelkan pengaruh penyebab klaim proyek terhadap kinerja proyek konstruksi dengan pendekatan sistem dinamik, yang menunjukkan bahwa klaim proyek memicu hubungan sebab – akibat yang kompleks serta membentuk *feedback loops*. Selanjutnya, Khadivar *et al.* [9] mengkaji penerapan sistem dinamik dalam manajemen proyek untuk mengatasi kelemahan pendekatan statis yang sering mengabaikan keterlambatan, umpan balik, dan kompleksitas proyek. Melalui simulasi menggunakan Vensim, penelitian ini menganalisis pengaruh kesalahan, *rework*, kolaborasi tim, penjadwalan, dan pengelolaan sumber daya terhadap kinerja proyek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan dinamis berbasis *systems thinking* mampu mengurangi *rework*, menstabilkan penggunaan sumber daya, serta meningkatkan ketepatan waktu dan keberhasilan proyek.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan hubungan kausal antara waktu, biaya, dan kualitas proyek melalui pemodelan *causal loop diagram* dengan menguraikan variabel *triple constraint* ke dalam indikator – indikator yang memengaruhinya. Model yang dikembangkan diharapkan dapat memberikan pemahaman struktural mengenai saling ketergantungan antar variabel *triple constraint* serta menjadi dasar konseptual bagi pengambilan keputusan dan pengembangan penelitian lanjutan berbasis sistem dinamik dalam manajemen proyek konstruksi.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan pemodelan sistem dinamik, yang bertujuan untuk memodelkan hubungan sebab – akibat antara percepatan proyek, biaya, dan kualitas pada proyek konstruksi. Pendekatan ini dipilih karena hubungan antarvariabel dalam

manajemen proyek bersifat kompleks, dinamis, dan saling bergantung, sehingga tidak dapat dianalisis secara linier atau parsial.

Pemodelan dilakukan menggunakan *Causal Loop Diagram* (CLD) sebagai tahap awal dalam sistem dinamik untuk memetakan struktur hubungan kausal dan mekanisme umpan balik (*feedback*) antarvariabel. CLD digunakan untuk membangun pemahaman konseptual mengenai interaksi antar indikator penyusun *triple constraint* sebelum dikembangkan ke tahap kuantitatif atau simulasi numerik.

Secara umum, tahapan penelitian meliputi : (1) studi literatur, (2) identifikasi variabel dan indikator, (3) perumusan variabel dan indikator penelitian, (4) analisis hubungan kausal antar indikator, dan (5) pemodelan *Causal Loop Diagram*.

2.1. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh melalui studi literatur dari jurnal ilmiah nasional dan internasional yang relevan dengan topik percepatan proyek, biaya, dan kualitas dalam proyek konstruksi. Data yang digunakan mencakup konsep teoretis, variabel, indikator, serta arah hubungan antarvariabel sebagaimana dibahas dalam penelitian sebelumnya. Literatur yang digunakan dipilih dari publikasi lima tahun terakhir guna memastikan relevansi dan kebaruan data.

Nazir dan Yadav [10] mengidentifikasi pembengkakan biaya sebagai permasalahan utama dalam proyek konstruksi yang dipengaruhi oleh faktor manajerial, finansial, dan eksternal. Faktor dominan penyebab pembengkakan biaya meliputi keterlambatan pembayaran, masalah pembiayaan, keterlambatan penyerahan lokasi, manajemen lapangan yang buruk, penalti akibat kecelakaan kerja, metode pengadaan *low bid*, penerapan lembur, perubahan desain, serta faktor eksternal seperti cuaca ekstrem, bencana alam, dan permasalahan hukum. Dengan menggunakan metode *relative importance index* dan *cost impact method*, penelitian tersebut menekankan bahwa pengendalian yang efektif terhadap faktor – faktor tersebut sangat penting untuk meminimalkan pembengkakan biaya dan meningkatkan keberhasilan proyek.

Martins *et al.* [11] menyimpulkan bahwa proyek konstruksi *fast track* yang melibatkan *overlapping* aktivitas memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi dibandingkan proyek konvensional, khususnya pada tahap awal dan pada tingkat *overlap* menengah. Risiko utama yang teridentifikasi meliputi kesalahan konstruksi, perubahan desain, gangguan antar tenaga kerja, dan penurunan produktivitas. Penelitian ini menekankan pentingnya manajemen risiko sejak tahap awal dalam penerapan strategi percepatan proyek.

Jamal dan Ian [12] menemukan bahwa keterlambatan proyek konstruksi di Indonesia terutama disebabkan oleh perubahan desain, keterlambatan material, kesalahan perencanaan, lemahnya manajemen proyek, serta rendahnya keterampilan tenaga kerja. Faktor yang paling sering terjadi adalah perubahan desain oleh pemilik, keterlambatan pengiriman material, dan manajemen proyek yang tidak efektif, yang menunjukkan bahwa peningkatan

perencanaan dan koordinasi sangat penting untuk mengurangi keterlambatan proyek.

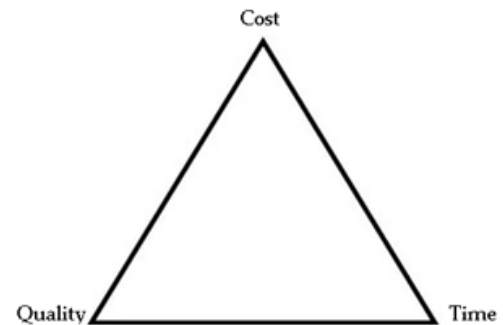
Syafril *dkk.* [13] menyimpulkan bahwa keberhasilan mitigasi risiko pada proyek konstruksi jalan sangat dipengaruhi oleh faktor kontraktual, konstruksi, desain, dan lingkungan. Manajemen risiko yang komprehensif, didukung oleh peningkatan koordinasi, pengendalian kontrak, serta manajemen kualitas material dan peralatan, terbukti mampu mengurangi dampak negatif proyek, meningkatkan efisiensi waktu dan biaya, serta menurunkan risiko kecelakaan kerja.

Amiano *dkk.* [14] menunjukkan bahwa penerapan metode penjadwalan efektif dalam meningkatkan kinerja proyek konstruksi dengan karakteristik pekerjaan tertentu. Metode tersebut secara signifikan mempercepat durasi proyek dan menurunkan biaya tenaga kerja melalui optimasi jadwal aktivitas tanpa memerlukan peningkatan jumlah tenaga kerja yang signifikan, sehingga meningkatkan efisiensi waktu dan biaya secara keseluruhan.

2.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui studi literatur terhadap jurnal ilmiah nasional dan internasional yang relevan dengan manajemen proyek konstruksi. variabel utama penelitian ditentukan berdasarkan konsep *triple constraint*, yang terdiri dari

percepatan proyek (waktu), biaya, dan kualitas (Gambar 1). Ketiga variabel tersebut dipilih karena perubahan pada satu variabel akan memengaruhi dua variabel lainnya, sehingga mencerminkan adanya saling ketergantungan dalam pengelolaan proyek konstruksi.



Gambar 1. Segitiga besi (*iron triangle*) [1]

Indikator penelitian diidentifikasi dari studi penelitian terdahulu yang membahas faktor – faktor yang memengaruhi percepatan proyek, biaya, dan kualitas pekerjaan konstruksi. Literatur yang digunakan dipilih dari publikasi ilmiah lima tahun terakhir untuk menjamin relevansi dan validitas indikator. Setiap indikator kemudian dipetakan ke dalam variabel *triple constraint* sesuai dengan karakteristik dan perannya dalam proyek konstruksi.

Tabel 1. Indikator penelitian

No.	Indikator	(Nazir & Yadav, 2019)	(Jamal & Ian, 2025)	(Syafri et al., 2025)	(Martins et al., 2023)	(Amiano et al., 2025)
Percepatan proyek						
1	Penambahan tenaga kerja	✓				
2	Lembur/overtime				✓	
3	Fast tracking/overlapping					✓
4	Penjadwalan ulang			✓		
5	Pengelolaan peralatan	✓				
Biaya						
6	Perubahan desain	✓	✓	✓		
7	Keterlambatan pembayaran	✓	✓			
8	Material terlambat/pasokan kurang	✓	✓	✓		
9	Fluktuasi harga material/inflasi	✓				
10	Manajemen proyek buruk	✓	✓	✓		
11	Cuaca buruk/force majeure	✓	✓	✓		
12	Masalah hukum/regulasi	✓				
Kualitas						
13	Kesalahan kualitas desain	✓	✓	✓		
14	Dokumen teknis tidak lengkap	✓		✓		
15	Kualitas material	✓	✓	✓		
16	Kelayakan peralatan			✓		
17	Keterampilan tenaga kerja		✓	✓		
18	Pengawasan kualitas rendah	✓	✓	✓		
19	Kondisi lapangan/lingkungan	✓	✓	✓		

Selanjutnya, indikator – indikator yang diperoleh dari berbagai sumber penelitian dikombinasikan dan diseleksi untuk membentuk satu set indikator penelitian yang komprehensif. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa indikator yang digunakan mampu merepresentasikan faktor – faktor utama yang berkontribusi terhadap dinamika percepatan proyek, biaya, dan kualitas secara menyeluruh. Hasil identifikasi dan pengelompokan indikator penelitian disajikan pada Tabel 1. Indikator penelitian, yang menunjukkan keterkaitan antara masing – masing indikator dengan sumber jurnal pendukung.

2.3. Sistem Dinamik

Pemodelan sistem dinamik dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis untuk mencapai tujuan penelitian. Proses dimulai dengan studi literatur terhadap jurnal ilmiah dan sumber referensi yang relevan dengan percepatan proyek, biaya, dan kualitas dalam proyek konstruksi guna memahami konsep dasar dan hubungan teoretis antarvariabel. Selanjutnya, dilakukan identifikasi dan pemilihan variabel serta indikator penelitian berdasarkan konsep *triple constraint* dan temuan penelitian terdahulu. Variabel utama penelitian ditentukan berdasarkan konsep *triple constraint*, yang terdiri dari: percepatan proyek (waktu), biaya proyek dan kualitas proyek. Ketiga variabel tersebut dipilih karena perubahan pada satu variabel akan memengaruhi dua variabel lainnya, sehingga mencerminkan adanya saling ketergantungan dalam pengelolaan proyek konstruksi.

Indikator penelitian diidentifikasi melalui hasil studi literatur yang membahas faktor – faktor yang memengaruhi masing – masing variabel. Setiap indikator kemudian dipetakan ke dalam variabel *triple constraint* sesuai dengan karakteristik dan perannya dalam proyek konstruksi. Indikator dari berbagai sumber dikombinasikan dan diseleksi untuk membentuk satu set indikator penelitian yang komprehensif.

Hasil identifikasi indikator seperti tersaji pada Tabel 1 menunjukkan keterkaitan setiap indikator dengan sumber jurnal pendukung. Secara ringkas, indikator penelitian terdiri dari: 5 indikator percepatan proyek, 7 indikator biaya dan 7 indikator kualitas.

Tahap berikutnya adalah perumusan variabel dan indikator. Perumusan variabel dan indikator dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis berdasarkan konsep *triple constraint*, yang menyatakan bahwa kinerja proyek konstruksi ditentukan oleh keterkaitan antara waktu (percepatan proyek), biaya, dan kualitas. Ketiga variabel tersebut dirumuskan sebagai variabel utama karena perubahan pada salah satu variabel akan memengaruhi variabel lainnya secara langsung maupun tidak langsung melalui mekanisme umpan balik.

Variabel percepatan proyek didefinisikan sebagai upaya manajerial dan teknis untuk memperpendek durasi pelaksanaan proyek dari rencana awal. Variabel ini dirumuskan berdasarkan strategi percepatan yang umum diterapkan dalam proyek konstruksi, yaitu penambahan tenaga kerja, penerapan lembur (*overtime*), *fast tracking* atau *overlapping* aktivitas, penjadwalan ulang, dan pengelolaan peralatan. Indikator – indikator tersebut dipilih

karena secara konsisten diidentifikasi dalam literatur sebagai faktor yang memengaruhi laju penyelesaian pekerjaan serta memiliki implikasi langsung terhadap biaya dan kualitas proyek.

Variabel biaya proyek didefinisikan sebagai total pengeluaran yang dikeluarkan selama pelaksanaan proyek konstruksi, termasuk biaya langsung dan tidak langsung. Indikator biaya ditetapkan berdasarkan faktor – faktor penyebab pembengkakan biaya yang paling sering dilaporkan dalam penelitian terdahulu, yaitu perubahan desain, keterlambatan pembayaran, keterlambatan material atau pasokan yang tidak mencukupi, fluktuasi harga material atau inflasi, manajemen proyek yang buruk, cuaca buruk atau kondisi *force majeure*, serta aspek hukum dan regulasi. Indikator – indikator ini mencerminkan faktor internal dan eksternal yang secara dinamis memengaruhi stabilitas biaya proyek.

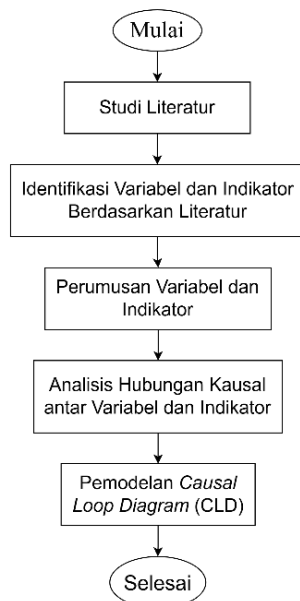
Variabel kualitas proyek didefinisikan sebagai tingkat kesesuaian hasil pekerjaan konstruksi terhadap spesifikasi teknis, standar mutu, dan kebutuhan pemilik proyek. Indikator kualitas dirumuskan berdasarkan faktor teknis, sumber daya, dan lingkungan kerja yang memengaruhi mutu pekerjaan, meliputi kesalahan kualitas desain, kelengkapan dokumen teknis, kualitas material, kelayakan peralatan, keterampilan tenaga kerja, tingkat pengawasan kualitas, serta kondisi lapangan atau lingkungan. Indikator – indikator tersebut dipilih karena berperan langsung dalam menentukan mutu hasil konstruksi dan sering terpengaruh oleh keputusan percepatan proyek.

Seluruh indikator yang dirumuskan kemudian dipetakan ke dalam masing – masing variabel utama dan digunakan sebagai elemen penyusun model sistem dinamik. Indikator – indikator tersebut menjadi dasar dalam analisis hubungan kausal antarvariabel, penentuan arah pengaruh (positif atau negatif), serta penyusunan *Causal Loop Diagram* untuk merepresentasikan struktur umpan balik dalam sistem pelaksanaan proyek konstruksi.

Tahap selanjutnya adalah analisis hubungan antar indikator. Analisis hubungan antar indikator dilakukan secara kualitatif berbasis studi literatur. Setiap pasangan indikator dianalisis untuk menentukan arah pengaruh positif atau negatif. Hubungan positif (+) menunjukkan bahwa peningkatan suatu indikator akan meningkatkan indikator lainnya, sedangkan hubungan negatif (–) menunjukkan bahwa peningkatan suatu indikator akan menurunkan indikator lainnya. Penetapan hubungan kausal ini tidak menggunakan perhitungan statistik, melainkan didasarkan pada konvergensi temuan empiris dan teoritis dari literatur yang relevan.

Hasil analisis ini menjadi dasar dalam pembentukan struktur hubungan kausal dan mekanisme umpan balik pada model sistem. Untuk menentukan arah dan jenis pengaruh (positif atau negatif) berdasarkan literatur, yang menjadi dasar penetapan hubungan sebab – akibat dalam sistem.

Tahap akhir adalah penyusunan *Causal Loop Diagram* (CLD) untuk memvisualisasikan hubungan sebab – akibat dan struktur umpan balik antara variabel percepatan proyek, biaya, dan kualitas. CLD dibangun dengan menghubungkan seluruh indikator berdasarkan arah pengaruh yang telah dianalisis sebelumnya.



Gambar 2. Alur penelitian

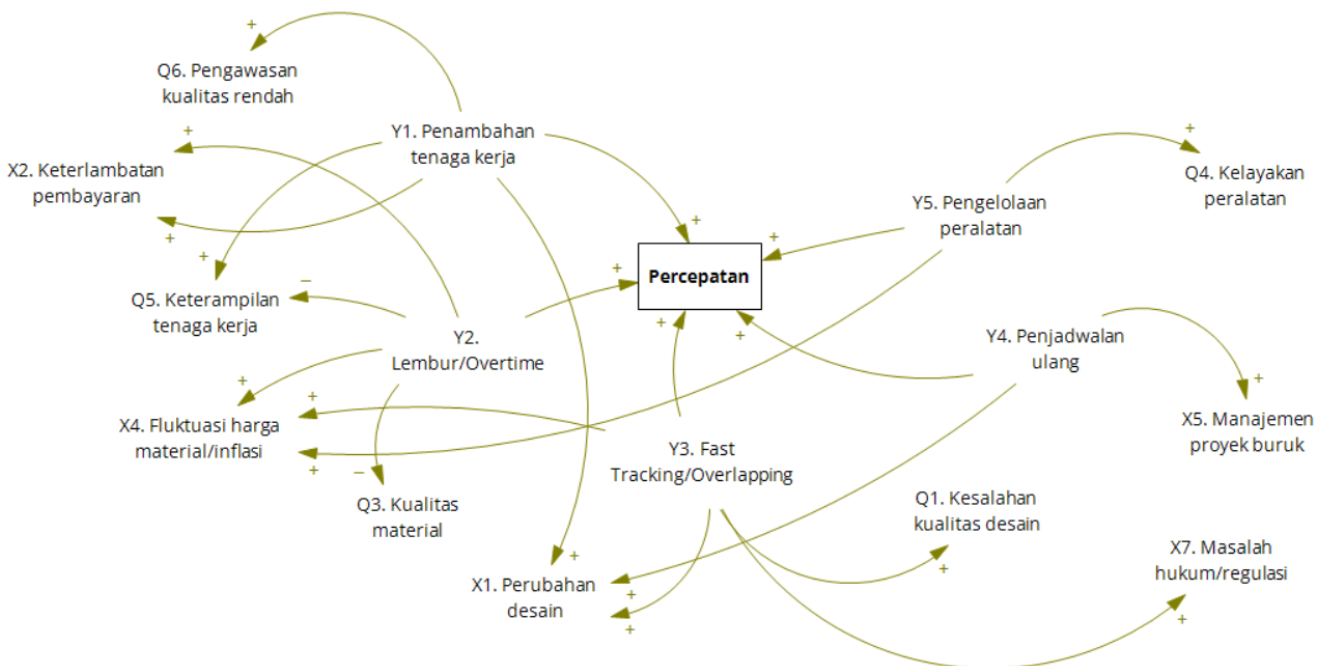
Model CLD yang dihasilkan merepresentasikan secara konseptual dinamika interaksi antar variabel dalam sistem pelaksanaan proyek konstruksi. Model ini digunakan sebagai kerangka pemahaman sistem dan dasar pengembangan model lanjutan berbasis *stock flow diagram* dan simulasi sistem dinamik pada penelitian selanjutnya. Alur penelitian secara rinci disajikan pada Gambar 2.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian ini disajikan dalam bentuk pemodelan *Causal Loop Diagram* (CLD) yang menggambarkan

hubungan sebab – akibat antara faktor percepatan proyek terhadap biaya dan kualitas konstruksi. Model *causal loop diagram* menunjukkan bahwa percepatan proyek merupakan bagian dari suatu sistem yang kompleks dengan berbagai interaksi dan mekanisme umpan balik, sehingga dampaknya terhadap kinerja proyek tidak bersifat linier. Struktur model dikembangkan berdasarkan studi literatur dan menggambarkan interaksi dinamis antarvariabel melalui mekanisme umpan balik positif (+) dan negatif (-).

Hasil pemodelan percepatan pada Gambar 3. menunjukkan bahwa percepatan proyek dipengaruhi oleh beberapa strategi utama, yaitu penambahan tenaga kerja, penerapan lembur/overtime, *fast tracking/overlapping*, penjadwalan ulang, dan pengelolaan peralatan. Seluruh strategi tersebut memiliki hubungan positif terhadap percepatan proyek, yang berarti bahwa peningkatan intensitas strategi percepatan akan meningkatkan laju penyelesaian pekerjaan [13, 15, 16, 17, 18]. Penambahan tenaga kerja berpengaruh positif terhadap perubahan desain, karena peningkatan jumlah pekerja meningkatkan kompleksitas koordinasi di lapangan serta kemungkinan terjadinya kesalahan pelaksanaan yang memerlukan revisi desain [19]. Penambahan tenaga kerja juga berpengaruh positif terhadap keterlambatan pembayaran, karena meningkatnya kebutuhan tenaga kerja akan menambah kebutuhan kas operasional dan memberikan tekanan tambahan pada arus kas proyek [20]. Selain itu, penambahan tenaga kerja berpengaruh positif terhadap keterampilan tenaga kerja apabila tambahan tenaga kerja memiliki pengalaman yang relevan, namun secara bersamaan juga memberikan dampak positif terhadap penurunan pengawasan kualitas akibat meningkatnya beban kerja pengawasan [21].



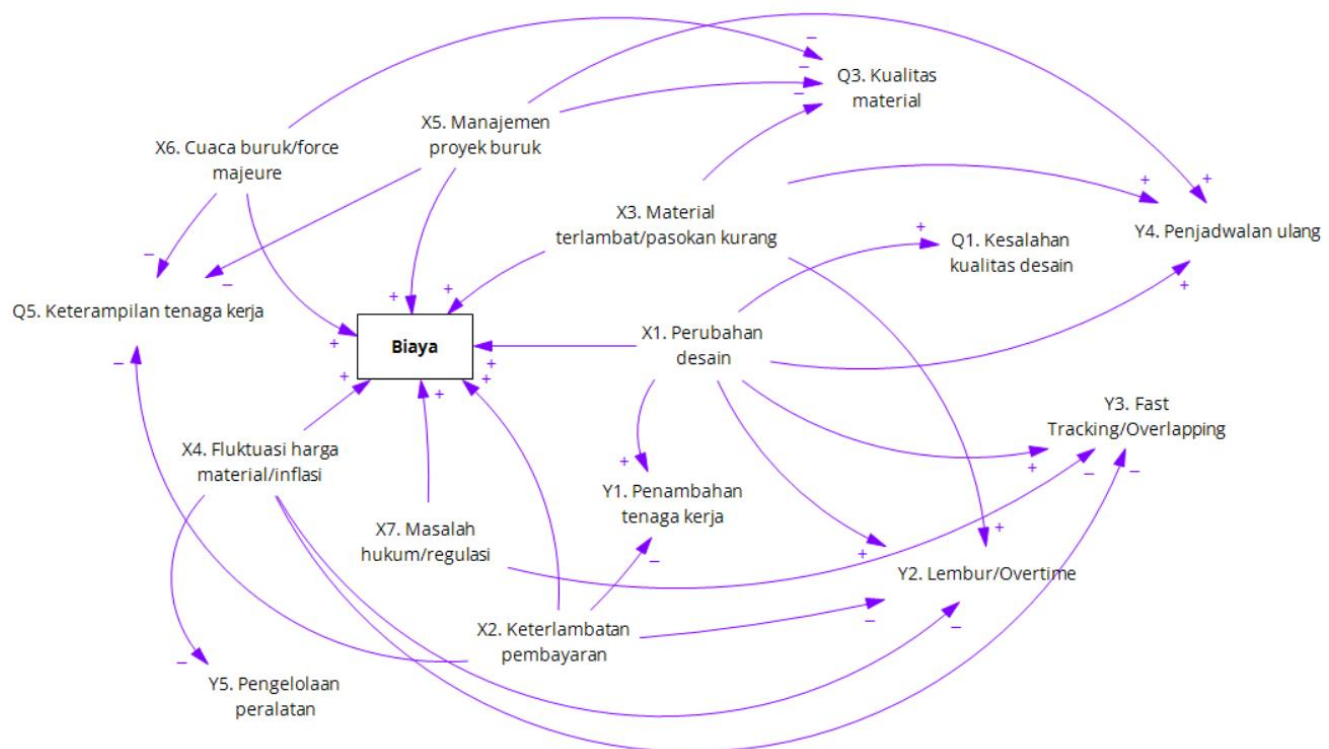
Gambar 3. Model Percepatan

Penerepan lembur berpengaruh positif terhadap fluktuasi harga material dan keterlambatan pembayaran,

karena meningkatnya biaya tenaga kerja dan intensitas penggunaan sumber daya akan meningkatkan total

pengeluaran proyek serta tekanan finansial [22, 23]. Sebaliknya, penerapan lembur berpengaruh negatif terhadap kualitas material dan keterampilan tenaga kerja, yang mencerminkan dampak kelelahan dan menurunnya ketelitian kerja akibat jam kerja yang berkepanjangan [24]. Strategi *fast tracking* berpengaruh positif terhadap perubahan desain, fluktuasi harga material, serta permasalahan hukum atau regulasi, karena tumpang tindih aktivitas dan percepatan pengadaan meningkatkan risiko teknis, finansial, dan kontraktual [11, 25, 26]. *Fast tracking* juga berpengaruh positif terhadap kesalahan kualitas desain, yang menunjukkan bahwa pemadatan jadwal meningkatkan kemungkinan terjadinya ketidakakuratan desain [27].

Penjadwalan ulang proyek berpengaruh positif terhadap buruknya manajemen proyek dan perubahan desain, karena seringnya penyesuaian jadwal mencerminkan kelemahan dalam perencanaan dan pengendalian serta sering memerlukan modifikasi desain yang menyertainya [25], [11]. Pengelolaan peralatan berpengaruh positif terhadap fluktuasi harga material akibat meningkatnya biaya operasional dan pemeliharaan [28]. Selain itu, pengelolaan peralatan yang efektif berpengaruh positif terhadap kelayakan peralatan, sehingga meningkatkan keandalan dan kinerja peralatan [29].



Gambar 4. Model biaya

Hasil pemodelan biaya pada **Gambar 4.** menunjukkan bahwa peningkatan biaya proyek dipengaruhi oleh berbagai indikator yang saling terkait dan berinteraksi secara dinamis sepanjang siklus hidup proyek. Perubahan desain secara konsisten muncul sebagai salah satu faktor paling dominan yang diidentifikasi dalam berbagai penelitian sebagai penyebab utama pembengkakan biaya proyek konstruksi [30]. Keterlambatan pembayaran terbukti memiliki korelasi positif dengan peningkatan biaya proyek [31]. Demikian pula, keterlambatan material atau kekurangan pasokan material menunjukkan hubungan positif dengan eskalasi biaya proyek, faktor eksternal, seperti kondisi cuaca buruk atau kejadian *force majeure* juga berkontribusi positif terhadap peningkatan biaya proyek [32]. Selain itu, aspek hukum atau regulasi juga terbukti memiliki hubungan positif dengan total biaya proyek [33].

Perubahan desain berpengaruh positif terhadap penambahan tenaga kerja, penerapan lembur, strategi *fast tracking*, dan penjadwalan ulang proyek, karena perubahan

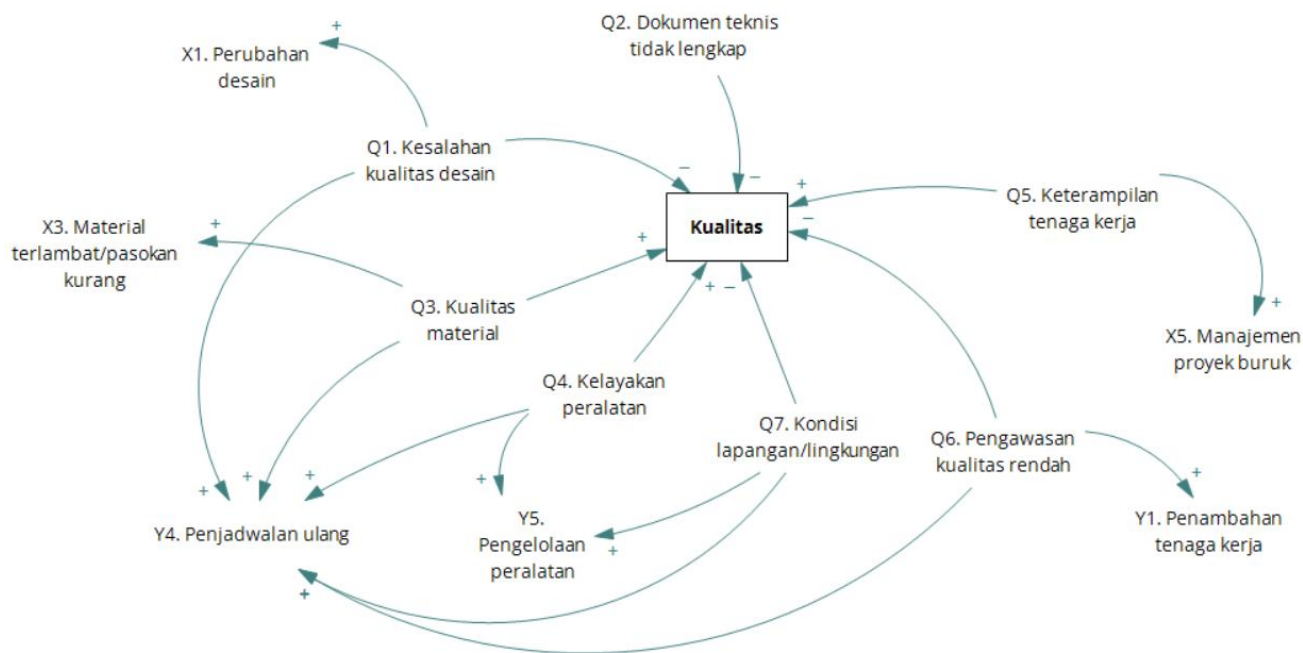
lingkup pekerjaan meningkatkan beban kerja, tekanan jadwal, dan kebutuhan sumber daya [34, 35, 36, 37]. Perubahan desain juga berpengaruh positif terhadap kesalahan kualitas desain, yang menunjukkan meningkatnya risiko inkonsistensi dan revisi akibat seringnya perubahan desain [38]. Keterlambatan pembayaran berpengaruh positif terhadap penambahan tenaga kerja dan penerapan lembur, karena keterbatasan arus kas membatasi kemampuan kontraktor untuk membiayai tenaga kerja tambahan dan jam kerja yang diperpanjang [39]. Keterlambatan pembayaran juga berdampak negatif terhadap tingkat keterampilan tenaga kerja, yang mencerminkan menurunnya motivasi, produktivitas, dan kualitas tenaga kerja [40].

Keterlambatan pengiriman material atau berkurangnya pasokan material berpengaruh positif terhadap penjadwalan ulang dan penerapan lembur sebagai langkah korektif untuk mengejar keterlambatan jadwal [41]. Namun demikian, keterlambatan material berdampak negatif terhadap kualitas

material, yang sering kali disebabkan oleh penggunaan material alternatif atau melemahnya proses pengendalian kualitas [42]. Fluktuasi harga material/inflasi berpengaruh negatif terhadap penerapan lembur, strategi *fast tracking*, dan pengelolaan material, karena ketidakstabilan biaya membatasi kemampuan kontraktor untuk mempercepat pekerjaan atau meningkatkan intensitas penggunaan peralatan [28, 20].

Buruknya manajemen proyek berpengaruh positif terhadap penjadwalan ulang proyek, yang menunjukkan lemahnya praktik perencanaan dan pengendalian [2]. Pada saat yang sama, manajemen proyek yang buruk berdampak

negatif terhadap keterampilan tenaga kerja dan kualitas material, yang mencerminkan kelemahan dalam koordinasi sumber daya dan penjaminan kualitas [43]. Kondisi cuaca buruk atau *force majeure* berdampak negatif terhadap kualitas material dan keterampilan tenaga kerja, karena kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan menurunkan efektivitas kerja dan mengurangi kualitas pekerjaan konstruksi [42, 43]. Permasalahan hukum atau regulasi juga berdampak negatif terhadap penerapan strategi *fast tracking*, akibat meningkatnya risiko kontraktual dan keterbatasan kepatuhan yang menghambat percepatan jadwal [26].



Gambar 5. Model kualitas

Hasil pemodelan kualitas pada **Gambar 5.** menunjukkan bahwa kualitas proyek dipengaruhi oleh berbagai faktor. Kesalahan kualitas desain memiliki hubungan negatif terhadap kualitas proyek; semakin tinggi tingkat kesalahan desain, semakin rendah kualitas pekerjaan akibat ketidaksesuaian spesifikasi dan meningkatnya potensi pekerjaan ulang [44]. Dokumen teknis yang tidak lengkap juga memiliki hubungan negatif terhadap kualitas, karena gambar kerja dan spesifikasi teknis yang tidak jelas meningkatkan risiko kesalahan interpretasi di lapangan [45].

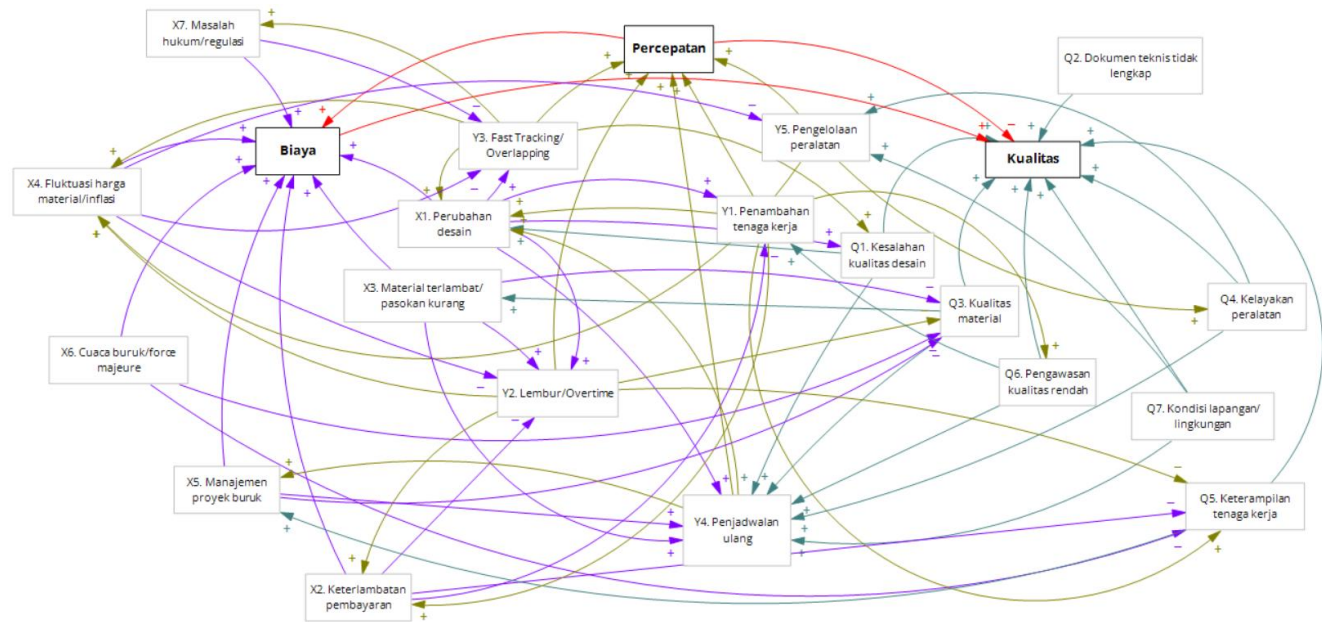
Sebaliknya, kualitas material memiliki hubungan positif terhadap kualitas proyek, di mana penggunaan material yang memenuhi standar spesifikasi teknis secara langsung meningkatkan kualitas pekerjaan dan daya tahan hasil konstruksi [44]. Kelayakan peralatan juga memiliki korelasi positif terhadap kualitas, karena peralatan yang layak, berfungsi dengan baik, dan terpelihara mendukung ketepatan metode pelaksanaan dan presisi pekerjaan [46]. Keterampilan tenaga kerja berhubungan positif dengan kualitas proyek, karena tenaga kerja yang terampil dan berpengalaman mampu melaksanakan pekerjaan sesuai dengan spesifikasi dan standar kualitas [42]. Pengawasan kualitas yang rendah memiliki korelasi negatif terhadap

kualitas proyek, karena sistem pengawasan yang lemah menghambat deteksi dini terhadap penyimpangan kualitas [47]. Kondisi lapangan atau lingkungan juga memiliki hubungan negatif terhadap kualitas apabila kondisi tidak mendukung, seperti cuaca ekstrem atau keterbatasan akses lokasi [44].

Kesalahan kualitas desain memiliki hubungan positif dengan perubahan desain, karena semakin sering perubahan desain dilakukan, semakin besar potensi terjadinya kesalahan akibat keterbatasan penyesuaian gambar, spesifikasi, dan koordinasi teknis [38]. Selain itu, kesalahan kualitas desain juga berpengaruh positif terhadap penjadwalan ulang, karena kesalahan desain memicu revisi pekerjaan dan penyesuaian jadwal [48]. Kualitas material memiliki hubungan positif dengan keterlambatan material atau kekurangan pasokan serta penjadwalan ulang. Gangguan pasokan memaksa penggunaan material alternatif atau percepatan pekerjaan, yang berpotensi menurunkan kualitas pekerjaan [42, 48]. Kelayakan peralatan memiliki hubungan positif dengan pengelolaan peralatan dan juga berpengaruh positif terhadap penjadwalan ulang, yang menunjukkan bahwa pengelolaan peralatan yang baik dan penjadwalan ulang berkontribusi langsung terhadap peningkatan kualitas [29, 49].

Dari perspektif sumber daya manusia, keterampilan tenaga kerja memiliki hubungan positif dengan manajemen proyek yang buruk [43]. Selain itu, rendahnya pengawasan kualitas berpengaruh positif terhadap penambahan tenaga kerja dan penjadwalan ulang. Meskipun penambahan

tenaga kerja dan penjadwalan ulang berkaitan dengan kuantitas sumber daya, tanpa pengawasan yang memadai hal tersebut tidak selalu meningkatkan kualitas dan justru dapat meningkatkan kompleksitas pengawasan kualitas [48].



Gambar 6. Pemodelan *Causal Loop Diagram*

Gambar 6 menunjukkan integrasi variabel percepatan, biaya, dan kualitas proyek yang saling memengaruhi dalam membentuk kinerja proyek secara keseluruhan. Secara umum, hasil pemodelan *Causal Loop Diagram* (CLD) dalam penelitian ini mengonfirmasi sebagian besar temuan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa percepatan proyek memiliki implikasi sistemik terhadap biaya dan kualitas konstruksi. Temuan bahwa perubahan desain berperan sebagai faktor dominan yang memicu peningkatan biaya dan penurunan kualitas sejalan dengan hasil penelitian [30, 37, 38], yang menegaskan bahwa perubahan desain meningkatkan kebutuhan sumber daya, memicu pekerjaan ulang (*rework*), serta memperbesar risiko kesalahan teknis. Demikian pula, hubungan positif antara keterlambatan pembayaran dan peningkatan biaya proyek mengonfirmasi temuan [39] dan [40], yang menunjukkan bahwa gangguan arus kas berdampak langsung pada efisiensi operasional, produktivitas tenaga kerja, dan stabilitas pengendalian biaya.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan kajian [11] dan [25] yang menyatakan bahwa penerapan *fast tracking* atau *overlapping* aktivitas cenderung meningkatkan risiko perubahan desain, kesalahan kualitas, dan permasalahan kontraktual apabila tidak diimbangi dengan koordinasi dan pengendalian yang memadai. Selain itu, temuan bahwa penerapan lembur berdampak negatif terhadap keterampilan tenaga kerja dan kualitas pekerjaan mendukung hasil penelitian [24], yang menekankan bahwa kelelahan kerja akibat jam kerja berkepanjangan menurunkan ketelitian dan kualitas hasil konstruksi.

Namun demikian, penelitian ini juga menunjukkan nuansa yang berbeda dibandingkan beberapa kajian sebelumnya. Beberapa penelitian, seperti [14], melaporkan bahwa percepatan proyek melalui optimasi penjadwalan dapat meningkatkan efisiensi waktu tanpa berdampak signifikan terhadap biaya dan kualitas. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh pendekatan sistemik yang digunakan dalam penelitian ini, di mana CLD mengungkap bahwa dampak percepatan tidak berdiri sendiri, melainkan bergantung pada interaksi simultan antara faktor sumber daya, manajemen proyek, dan kondisi eksternal. Dengan kata lain, percepatan proyek dapat memberikan hasil positif dalam konteks tertentu, namun berpotensi menimbulkan efek berantai negatif apabila dilakukan tanpa pengendalian sistem yang memadai.

Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini dibandingkan penelitian terdahulu terletak pada kemampuannya mengintegrasikan berbagai temuan empiris ke dalam satu kerangka sistem dinamik, sehingga hubungan antara percepatan proyek, biaya, dan kualitas tidak hanya dipahami secara parsial, tetapi sebagai suatu sistem yang saling bergantung dan membentuk mekanisme umpan balik. Pendekatan ini memperkaya literatur manajemen proyek dengan memberikan pemahaman konseptual yang lebih holistik terhadap dinamika triple constraint dalam konteks percepatan proyek konstruksi.

Meskipun penelitian ini berhasil memodelkan hubungan sebab – akibat antara percepatan proyek, biaya, dan kualitas melalui pendekatan *causal loop diagram*, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicermati. Pertama, model disusun sepenuhnya berdasarkan studi literatur sehingga belum

didukung oleh data empiris kuantitatif untuk menguji kekuatan, arah, dan sensitivitas hubungan antarvariabel secara numerik. Kedua, pemodelan CLD bersifat kualitatif dan konseptual, sehingga belum mampu merepresentasikan besaran pengaruh variabel maupun dinamika perubahan sistem terhadap waktu, serta belum dapat digunakan untuk simulasi skenario kebijakan atau prediksi kinerja proyek. Ketiga, penelitian ini belum membedakan konteks spesifik proyek, seperti jenis pekerjaan, skala proyek, dan karakteristik organisasi kontraktor, sehingga generalisasi hasil masih bersifat umum. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai kerangka konseptual awal yang dapat dikembangkan lebih lanjut ke dalam model *stock flow diagram* dan simulasi sistem dinamik berbasis data lapangan agar memperoleh hasil yang lebih aplikatif dan kontekstual.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pemodelan *causal loop diagram* dengan pendekatan sistem dinamik berbasis studi literatur, penelitian ini secara spesifik mengidentifikasi dua puluh hubungan umpan balik dan empat puluh enam hubungan kausal searah yang menggambarkan interaksi antara strategi percepatan proyek, faktor biaya, dan kualitas konstruksi dalam kerangka *triple constraint*. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa penerapan percepatan proyek melalui penambahan tenaga kerja, lembur, *fast tracking*, penjadwalan ulang, dan pengelolaan peralatan tidak hanya mempercepat penyelesaian pekerjaan, tetapi juga memicu peningkatan biaya serta berpotensi menurunkan kualitas apabila tidak diimbangi dengan manajemen yang efektif.

Secara umum, temuan ini menegaskan bahwa percepatan proyek merupakan bagian dari sistem yang kompleks dan saling bergantung, di mana perubahan pada satu variabel akan memengaruhi variabel lainnya melalui mekanisme umpan balik yang bersifat memperkuat maupun menyeimbangkan. Oleh karena itu, pengelolaan percepatan proyek dalam berbagai jenis dan skala proyek konstruksi perlu dilakukan dengan perspektif sistemik yang mempertimbangkan dampak simultan terhadap biaya dan kualitas. Model *causal loop* yang dikembangkan dapat digunakan sebagai kerangka konseptual awal untuk mendukung pengambilan keputusan strategis dalam manajemen proyek. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model ini ke dalam simulasi sistem dinamik berbasis data empiris agar dapat mengevaluasi berbagai skenario kebijakan percepatan proyek secara lebih akurat dan aplikatif.

Daftar Pustaka

- [1] K. Harold, *Project Management A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2025.
- [2] PMI, *Optimize Risk Responses*, Pennsylvania: Project Management Institute, 2021.
- [3] A.K. Hassan, A.Q. Adeleke, and T.D.M, "The Effects of Project Triple Constraint on Malaysia Building Projects", *Social Science and Humanities Journal*, vol. 3, no. 05, pp. 1222-1238, 2019.
- [4] T.A. Billah, Abdullah, and A.T. Bulba, "Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Triple Constraints Proyek Konstruksi Gedung di Provinsi Aceh dalam Masa Pandemi Covid 19", *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 99-112, 2023.
- [5] M. Natalia, Riswandi, D. Oktaviani, and M.H. Putri, "Analisis Faktor-Faktor Penyebab Kendala Triple Constraint Proyek Konstruksi di Kota Jakarta Akibat Pandemi Covid-19", *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 160-174, 2021.
- [6] A. Rizal, "Analisis Time Cost Quality Trade Off Pada Proyek Pembangunan Jembatan (Studi Kasus Proyek Pembangunan Jembatan Ngelo)", *Siimo Engineering: Journal Teknik Sipil*, vol. 2, pp. 37-42, 2018. <https://doi.org/10.31934/siimo.v2i1.446>
- [7] C.G. Buyang and J. Buyang, "Pemodelan Faktor Keterlambatan Proyek Penataan Dermaga Lantamal Ambon dengan Sistem Dinamik", *Jurnal Simetrik*, vol. 10, no. 2, pp. 355-361, 2020.
- [8] R. Ansari, M. Khalilzadeh, R. Taherkhani, and J. Antucheviciene, "Performance Prediction of Construction Projects Based on the Causes of Claims : A System Dynamics Approach", *Sustainability*, vol. 14, no. 7, pp. 1-19, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14074138>
- [9] A. Khadivar, M.D. Nayeri, A. Nazari, and P. Sangin, "Design Project Management Model with System Dynamics Approach", *International Journal of Project Management*, vol. 44, no. 11, pp. 735-748, 2023.
- [10] F. Nazir and E.V. Yadav, "Factors Affecting Cost Overrun in Construction Projects", *International Journal of Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 4831-4833, 2019. <https://doi.org/10.35940/ijeat.b4415.129219>
- [11] C.G. Martins, S.M. Bogus, and V. Valentin, "Perceptions of Construction Risks Due to Fast-Track Activity Overlapping", *Eng.* vol. 4, no. 4, pp. 2879-2895, 2023. <https://doi.org/10.3390/eng4040162>
- [12] Jamal and M.R. Ian, "Analisis Faktor Penyebab Keterlambatan Proyek Konstruksi di Indonesia", *Kajian Teknik Sipil*, vol. 10, no. 1, pp. 1-8, 2025.
- [13] Syafril, A. Soekiman, and A.A.R. Pratiwi, "Analisis Faktor - Faktor Terkait Mitigasi Manajemen Risiko Pekerjaan Konstruksi Pada Preservasi Jalan Siborongborong Jalan ke Sibolga (Tarutung)-Jalan Sisingamangraja (Padangsidempuan) Provinsi Sumatera Utara", *Jurnal Sosial dan Sains*, vol. 5, no. 4, pp. 1-18, 2025. <https://doi.org/10.59188/jurnalsosains.v5i4.32145>
- [14] S.F. Amiano, A. Brita, P. Gawe, V.H. Puspasari, and A. Purwanto, "Analisis Penjadwalan Proyek Menggunakan Metode Repetitive Scheduling Method", *Jurnal Teknik*, vol. 10, no. 2, pp. 12986-12993, 2025.
- [15] D. Fardila and N.R. Adwayah, "Optimasi Biaya dan Waktu Proyek Konstruksi dengan Lembur dan Penambahan Tenaga Kerja", *Inersia Informasi Dan*

- Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 17, no. 1, pp. 35-46, 2021.
- [16] P. Zulhijjah, R. Djamaluddin, and D.P. Sari, "Analisis Percepatan Proyek Menggunakan Metode Crashing dengan Penambahan Jam Kerja Lembur Optimum", *Jurnal Ilmiah Teknik Unida*, vol. 3, no. 1, pp. 16-27, 2022. <https://doi.org/10.55616/jitu.v3i1.214>
- [17] A.F. Akhirudin, "Percepatan Waktu Pengerjaan Proyek Konstruksi dengan Menggunakan Metode Fast Track", *Menara Jurnal Teknik Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 26-4, 2018.
- [18] S.H. Rizqy, *Optimalisasi Percepatan Pelaksanaan Proyek Gedung Extension Rawat Inap 3 Lantai RSU Kaliwates-Jember*, Jember: Universitas Muhammadiyah Jember, 2024.
- [19] P.E.D. Love, D.J. Edwards, and J. Smith, "Rework Causation: Emergent Theoretical Insights and Implications for Research", *Journal of Construction Engineering And Management*, vol. 142, no. 6, pp. 1-21, 2016.
- [20] E. Oluwaseun, E. Nnadi, and J. Najjobyo, "Financial And Operational Effects of Cost Estimation Inaccuracy, Material Price Volatility, and Payment Delays in Nigerian Construction Projects", *Smart Construction and Sustainable Cities*, vol. 3, no. 29, pp. 1-13, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44268-025-00076-4>
- [21] N.V. Tam, N.Q. Toan, D.T. Hai, and N.L.D. Quy, "Critical Factors Affecting Construction Labor Productivity: A Comparison Between Perceptions of Project Managers and Contractors", *Cogent Business Management*, vol. 8, no. 1, pp. 1-14, 2021, <https://doi.org/10.1080/23311975.2020.1863303>
- [22] B. Saluy, M. Djamil, S. Madelan, and Y. Pangkey, "Analysis of Labor Overtime And Productivity In Construction Projects", *Seybold Report.*, vol. 17, no. 09, pp. 559-565, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7073499>
- [23] Satriono and A. Sigit, "Optimalisasi Biaya Dan Waktu Proyek Menggunakan Metode Crashing Dengan Penambahan Waktu Kerja (Lembur) dan Sistem Kerja Shift", *Teknisia*, vol. 23, no. 2, pp. 505-515, 2021.
- [24] Mirnayani and H. Paradiba, "The Impact of Overtime Duration Variations on Labor Productivity in Apartment Construction Projects: A Study on Engineering and Disaster Management in the Construction Sector", *Calamity: A Journal of Disaster Technology and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 116-131, 2025. <https://doi.org/10.61511/calamity.v2i2.2025.1321>
- [25] N.A.A. Aziz, M.S. Misnan, M. Mustapa, N.M. Shukery, and S.H. Mahmud, "Fast Track Construction: A Review of Potential Risks and Strategies in Project Management", *The International Journal of Research and Innovation in Social Science*, vol. 9, no. 2454, pp. 4000-4016, 2025, <https://dx.doi.org/10.47772/IJRIS.2025.90300318>
- [26] A.M. Afify, K.M. Khorshid, and A.A. Radwan, "Predicting Potential Risks Associated With Fast-Track Projects", *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, vol. 19, no. 72, pp. 538-557, 2024. <https://doi.org/10.21608/aej.2024.269209.1625>
- [27] K.K. Naji, M. Gunduz, and M. Adalbi, "Analysis of Critical Project Success Factors - Sustainable Management of the Fast-Track Construction Industry", *Buildings*, vol. 13, no. 11, pp. 1-17, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13112890>
- [28] A.R. Anireddy, "Material Cost Fluctuations: Analyzing the Effects of Market Volatility on Civil Project Budgets", *International Journal of Scientific Research*, vol. 13, no. 10, pp. 1606-1610, 2024.
- [29] S.S. Chandra, Chandra, S.M., Sepasgozar, V.R.P. Kumar, A.K. Singh, L. Krishnaraj, and B.O. Awuzie, "Assessing Factors Affecting Construction Equipment Productivity using Structural Equation Modeling", *Buildings*, vol. 13, no. 2, pp. 1-15, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13020502>
- [30] S. Dong, M. Ahmed, and V. Chatpattananan, "Analysis of Key Factors of Cost Overrun in Construction Projects Based on Structural Equation Modeling", *sustainability*, vol. 17, no. 5, pp. 1-14, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17052119>
- [31] S. Alshihri, K. Al-Gahtani, and A. Almohsen, "Risk Factors That Lead to Time and Cost Overruns of Building Projects in Saudi Arabia", *Buldings*, vol. 12, no. 7, pp. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12070902>
- [32] F.A. Suryawinata, "Analisis Faktor-Faktor Penyebab Cost Overruns Proyek Konstruksi Gedung: Kajian Literatur Sistematis", *Journal of Sustainable Construction*, vol. 4, no. 1, pp. 77-88, 2024.
- [33] O. Afana, R. Al Zubaidi, S.A. Dabous, and F. Ibrahim, "Categories and Factors of Cost Overrun in Construction Projects: A Systematic Review", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no. 6, pp. 18330-18347, 2024. <https://doi.org/10.48084/etasr.9006>
- [34] M. Waty and H. Sulistio, "Impact of Change Orders on Decreasing Labor Productivity in Road Construction Projects (Approach using Structural Equation Modeling)", *Management and Production Engineering Review*, vol. 15, no. 4, pp. 1-12, 2024, <https://doi.org/10.24425/mper.2024.153114>
- [35] Y. Mattar, M.A. Alzaim, M. AlAli, I. Alkhatib, and S. Beheiry, "The Impact of Change Orders Caused by Legislative Changes on Program Management in the UAE Construction Industry", *Buildings*, vol. 14, no. 5, pp. 1-25, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14051294>
- [36] K.S. Al-Tameemi, "The Impact of Schedule Compression Techniques on Construction Project Timelines: A Case Study in Basrah, Iraq", *Open Civil Engineering Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 1-12, 2024,

- <https://doi.org/10.2174/0118741495360335241205110710>
- [37] E.M.H.Ismail and A.E.E. Sobaih, "A Proposed Model for Variation Order Management in Construction Projects", *Buildings*, vol. 14, no. 3, pp. 1-16, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14030726>
- [38] J.S. Ramadhan, "Impact of Change Orders on Cost Overruns and Delays in Large-Scale Construction Projects", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 15, no. 1, pp. 20291-20299, 2025. <https://doi.org/10.48084/etasr.9449>
- [39] A. Chadee, H. Ali, S. Gallage, and U. Rathnayake, "Modelling the Implications of Delayed Payments on Contractors' Cashflows on Infrastructure Projects", *Civil Engineering Journal*, vol. 9, no. 01, pp. 52-71, 2023. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-01-05>
- [40] A. Raditya, S. Hardjomuljadi, and M. Amin, "Faktor Dampak Keterlambatan Pembayaran Kontraktor Kepada Subkontraktor Pada Proyek Jalan Tol", *Konstruksia*, vol. 13, no. 7, pp. 1-16, 2021. <https://doi.org/10.24853/jk.13.1.1-16>
- [41] Nurlaelah and I. Rahmattullah, "The Impact of Construction Material Supply Delays on Contractor X in Jakarta, Indonesia", *Engineering and Technology Journal*, vol. 10, no. 5, pp. 4657-4661, 2025. <https://doi.org/10.47191/etj/v10i05.01>
- [42] R. Ananda, E. Mulyani, and Rafie, "Analisis Keterlambatan dan Kualitas Hasil Pekerjaan Pada Proyek Konstruksi Gedung", *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, dan Tambang*, vol. 8, no. 1, pp. 1-7, 2021. <https://doi.org/10.26418/jelast.v8i1.46036>
- [43] M. Latif, E. M. Saleem, and D.S.M. Cheema, "Analyzing the Key Factors Contributing to Project Delays in the Construction Industry: A Comprehensive Study", *Journal of Development and Social Sciences*, vol. 4, no. 3, pp. 936-944, 2023. [https://doi.org/10.47205/jdss.2023\(4-III\)85](https://doi.org/10.47205/jdss.2023(4-III)85)
- [44] S. Wijayanthi and A. Al Huda, "Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Pekerjaan pada Proyek Konstruksi", *Prosiding Seminar Keinsinyuran 2023*, pp. 976-982, 2023.
- [45] E.F. Atwan, *Enhancing Construction Document Integrity A Comprehensive Approach to Measure and Improve Quality*, Boca Raton: CRC Press, 2024.
- [46] Y.I. Silalahi, L. Masthura, and N. Fahriana, "Analisis Faktor - Faktor Penentu Keberhasilan Proyek Konstruksi Berdasarkan Mutu, Biaya dan Waktu", *Jurnal Komposit*, vol. 7, no. 2, pp. 233-239, 2023. <https://doi.org/10.32832/komposit.v7i2.14240>
- [47] A.S. Williams, *Quality Control Measures in Construction Projects*, Boca Raton: CRC Press, 2025.
- [48] C. Araújo-Rey and M. A. Sebastián, "An Approach to the Analysis of Causes of Delays in Industrial Construction Projects through Planning and Statistical Computing", *Sustainability*, vol. 3, no. 7, pp. 1-16, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13073975>
- [49] E.O. Elgendi and A.A. Mohy, "An Impact Of Equipment Selection on Construction Projects : Case Study of A Road Project in Egypt", *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 20, no. 4, pp. 1271-1281, 2022. <https://doi.org/10.5937/jaes0-38963>

This page is intentionally left blank