



DOI: <https://doi.org/10.38035/jimt.v8i1>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Evaluasi Keandalan Buffer CCPM Melalui Back-Testing Fever Chart dan Rantai Markov pada Proyek Kompresor Bertekanan Sangat Rendah

Danur Widyanto¹, Lusi Ernawati², Samsu Dlukha Nurcholik³, Rizqy Romadhona Ginting⁴, Thorikul Huda⁵, Muqimuddin⁶

¹Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia, 01252022@student.itk.ac.id

²Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia, lusiernawati@lecturer.itk.ac.id

³Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia, dlukha@lecturer.itk.ac.id

⁴Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

⁵Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia, thorikul.h@lecturer.itk.ac.id

⁶Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia, muqimuddin@lecturer.itk.ac.id

Corresponding Author: lusiernawati@lecturer.itk.ac.id²

Abstract: *Dynamic buffer behavior during project execution remains poorly understood when assessed only through a single end-of-project indicator. This single-case, retrospective/counterfactual study proposes a dynamic back-testing framework integrating Schedule-Weighted Progress Analysis (SWPA), the Buffer Consumption Index (BCI), Fever Chart monitoring, and an exploratory Markov chain model. The framework was applied to three Root Square Error Method (RSEM) scenarios using activity-duration reductions of $p = 30\%$, 40% , and 50% . SWPA of 815 activities showed actual progress falling substantially behind schedule in early project stages, with the Schedule Progress Index reaching 0.064 in Week 16. BCI back-testing revealed a paradox: the $p = 50\%$ scenario produced the shortest committed CCPM duration (318 days) yet the lowest final BCI, 3.24, indicating the strongest proportional buffer resilience as measured by this metric. In comparison, the $p = 30\%$ scenario, the most precise in matching its analytical estimate to the network simulation (0.7% difference), produced the highest final BCI (3.69). The Fever Chart showed the project entering the Red Zone by Week 20 of 61 and never recovering; the Laplace-smoothed Markov chain indicated persistent Red Zone conditions. A catch-up mechanism within the Critical Chain absorbed 47.5-85.4% of individual delays before they propagated to the project level. Findings show that mathematically optimal buffer sizing does not guarantee operational reliability, underscoring the need for periodic Fever Chart monitoring during execution.*

Keywords: *Critical Chain Project Management, Buffer Consumption Index, Fever Chart, Markov Chain, schedule reliability*

Abstrak: Perilaku dinamis buffer selama pelaksanaan proyek masih kurang dipahami apabila penilaian kinerja hanya mengandalkan satu indikator pada akhir proyek. Penelitian ini bersifat studi kasus tunggal yang retrospektif/kontrafaktual: penelitian ini mengajukan kerangka back-testing dinamis yang mengintegrasikan Schedule-Weighted Progress Analysis (SWPA), Buffer

Consumption Index (BCI), pemantauan Fever Chart, serta model rantai Markov yang bersifat eksploratif. Kerangka ini diterapkan pada tiga skenario *Root Square Error Method* (RSEM) dengan pengurangan durasi aktivitas sebesar $p = 30\%$, 40% , dan 50% . Evaluasi SWPA terhadap 815 aktivitas menunjukkan progres aktual tertinggal jauh dari rencana pada tahap awal proyek, dengan Indeks Progres Jadwal mencapai 0,064 pada Minggu ke-16. Back-testing BCI mengungkap sebuah paradoks: skenario $p = 50\%$ menghasilkan durasi komitmen CCPM terpendek (318 hari), namun BCI akhir terendah (3,24), yang menunjukkan ketahanan buffer proporsional terkuat berdasarkan metrik ini. Sementara itu, skenario $p = 30\%$, yang paling presisi dalam mencocokkan estimasi analitis dengan simulasi jaringan (selisih 0,7%), justru menghasilkan BCI akhir yang paling tinggi (3,69). Fever Chart menunjukkan proyek memasuki Zona Merah pada minggu ke-20 dari 61 minggu pengamatan dan tidak pernah pulih; model rantai Markov dengan pemulusan Laplace mengindikasikan persistensi tinggi dalam kondisi Zona Merah. Mekanisme catch-up dalam *Critical Chain* menyerap 47,5 – 85,4% keterlambatan individual sebelum merambat hingga tingkat proyek. Temuan menunjukkan bahwa penentuan ukuran buffer yang optimal secara matematis tidak menjamin keandalan operasional, sehingga menegaskan perlunya pemantauan Fever Chart secara berkala selama pelaksanaan.

Kata kunci: Critical Chain Project Management, Buffer Consumption Index, Fever Chart, Rantai Markov, keandalan penjadwalan

PENDAHULUAN

Penurunan lifting minyak nasional Indonesia sejak tahun 2015 telah meningkatkan tekanan pada industri hulu minyak dan gas untuk meningkatkan efisiensi operasional serta mempercepat penyediaan infrastruktur pendukung produksi (Habibie & Ingketria, 2025). Proyek Engineering, Procurement, and Construction (EPC) memegang peran sentral dalam upaya ini karena keterlambatan dalam pemasangan atau peningkatan fasilitas produksi dapat menunda kesiapan operasional dan membatasi kapasitas produksi. Meski demikian, proyek EPC di sektor migas secara inheren bersifat kompleks. Proyek-proyek ini umumnya melibatkan ratusan aktivitas yang saling bergantung, paket pekerjaan multidisiplin, sumber daya khusus, persyaratan keselamatan yang ketat, jendela eksekusi yang terbatas, serta koordinasi yang ekstensif antara pemilik, kontraktor, vendor, dan pemangku kepentingan regulasi (Sugiyanto & Umam, 2021). Karakteristik ini membuat perencanaan dan pengendalian jadwal menjadi sangat menantang.

Keterlambatan jadwal tetap menjadi perhatian yang konsisten di sektor EPC di Indonesia. Sarwani dkk. (2024) melaporkan bahwa sekitar 90% proyek EPC yang dikelola oleh badan usaha milik negara (BUMN) di Indonesia, khususnya di industri pupuk, mengalami keterlambatan, berdasarkan survei kuesioner terhadap 67 responden (41 pemilik proyek, 14 kontraktor, dan 12 konsultan) yang terlibat dalam proyek EPC pada periode 2010–2020. Pola risiko jadwal yang sebanding juga teridentifikasi secara internasional, di mana analisis dokumen lingkup kerja kontraktual pada proyek EPC migas lepas pantai telah digunakan untuk mengukur risiko keterlambatan jadwal sebelum penandatanganan kontrak (Son & Lee, 2019). Keterlambatan ini terkait dengan berbagai faktor, termasuk ketidakpastian durasi aktivitas, keterbatasan sumber daya, masalah koordinasi, dan ketidakmampuan pendekatan penjadwalan konvensional untuk merepresentasikan kendala proyek aktual secara memadai. Akibatnya, jadwal proyek yang dikembangkan berdasarkan asumsi deterministik mungkin tampak layak sebagai baseline, namun hanya menawarkan perlindungan yang terbatas terhadap ketidakpastian selama pelaksanaan.

Critical Path Method (CPM) banyak digunakan untuk menetapkan urutan aktivitas, mengidentifikasi aktivitas kritis, dan mengestimasi durasi total proyek. Namun, CPM konvensional umumnya memperlakukan durasi aktivitas sebagai nilai deterministik dan tidak

menyediakan mekanisme eksplisit untuk mengelola ketidakpastian jadwal atau kontensi sumber daya (Goldratt, 1997). Margin keamanan sering kali tertanam secara terpisah dalam estimasi masing-masing aktivitas, sehingga sulit diidentifikasi, dipantau, dan dikendalikan pada tingkat proyek. Praktik semacam ini juga dapat mendorong efek perilaku seperti *student syndrome*, di mana pekerjaan ditunda hingga mendekati tenggat waktu, dan Hukum Parkinson, di mana suatu aktivitas berkembang untuk menghabiskan waktu yang dialokasikan kepadanya (Leach, 1999).

Beberapa penelitian terbaru (Ensannudin & Perdana, 2023; Mirayudia dkk., 2021; Tian dkk., 2019; Davalu dkk., 2019; Cooper Ordoñez dkk., 2019) telah mengkaji penerapan CCPM terutama pada industri non-migas seperti konstruksi bangunan, infrastruktur pariwisata, dan manufaktur. *Critical Chain Project Management* (CCPM), yang diperkenalkan oleh Goldratt (1997), dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan ini dengan mengintegrasikan hubungan preseden, kendala sumber daya, dan perlindungan jadwal secara terpadu. Alih-alih mempertahankan margin keamanan terpisah pada masing-masing aktivitas, CCPM mengeluarkan sebagian margin tersebut dan mengonsolidasikannya ke dalam buffer yang diposisikan secara strategis. *Project buffer* melindungi tanggal penyelesaian proyek yang dijanjikan, sementara *feeding buffer* melindungi *critical chain* dari keterlambatan yang berasal dari rangkaian aktivitas non-kritis. Struktur ini dimaksudkan untuk meningkatkan transparansi jadwal dan memfasilitasi pengendalian proaktif dengan memungkinkan manajer proyek memantau laju konsumsi proteksi jadwal.

Meski memiliki keunggulan konseptual, evaluasi kinerja CCPM tetap menantang. Kajian retrospektif sebelumnya terhadap proyek pemasangan kompresor Ultra-Low-Pressure (ULP) di Pamaguan Plant milik PT Pertamina Hulu Sanga Sanga (PHSS) merekonstruksi jadwal proyek menggunakan CCPM berdasarkan dokumentasi proyek yang ditampilkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Kajian tersebut menghitung *project buffer* dan *feeding buffer* menggunakan Root Square Error Method (RSEM) serta merangkum kinerja jadwal melalui *buffer utilization* yang diukur pada akhir proyek. Meski indikator titik akhir ini memberikan ukuran ringkas atas total konsumsi buffer, indikator tersebut tidak dapat menjelaskan bagaimana utilitas buffer berubah dari waktu ke waktu, kapan proyek pertama kali memasuki kondisi berisiko tinggi, apakah status buffer-nya kemudian pulih, atau bagaimana keterlambatan pada tingkat aktivitas memambat melalui jaringan *Critical Chain*.



Sumber: Widyanto dkk., 2026

Gambar 1. Progres Instalasi Kompresor ULP di Pamaguan Plant



Sumber: Widyanto dkk., 2026

Gambar 2. Instalasi Kompresor ULP yang Telah Selesai

Penelitian ini memperluas jalur investigasi tersebut tanpa mengulang analisis penentuan ukuran buffer yang telah dilakukan sebelumnya (Widyanto dkk., 2026). Jadwal CCPM hasil rekonstruksi berfungsi sebagai baseline analitis untuk pertanyaan yang secara fundamental berbeda: bagaimana keandalan buffer berkembang selama pelaksanaan proyek. Menjawab pertanyaan ini memerlukan kerangka kerja yang dinamis dan bergantung pada waktu, bukan pada pengukuran tunggal pada akhir proyek. Dalam konteks ini, keandalan buffer merujuk pada kemampuan struktur buffer yang direncanakan untuk menyerap deviasi jadwal dan mempertahankan tanggal penyelesaian proyek yang dijanjikan seiring berjalannya proyek. Secara operasional, keandalan buffer pada penelitian ini dievaluasi melalui tiga kriteria terukur: (1) zona risiko BCI_t pada Fever Chart (Hijau/Kuning/Merah) di setiap titik waktu, (2) proporsi periode pengamatan yang berada pada Zona Merah sepanjang siklus proyek, dan (3) nilai BCI_t akhir sebagai ringkasan ketahanan proporsional pada akhir proyek. Buffer dikatakan andal apabila BCI_t tetap berada pada Zona Hijau/Kuning sepanjang sebagian besar durasi proyek dan tidak menetap pada Zona Merah; sebaliknya, persistensi pada Zona Merah mengindikasikan keandalan buffer yang rendah.

Kebutuhan akan evaluasi empiris yang dinamis ini selaras dengan literatur CCPM yang lebih luas. Ghaffari dan Emsley (2015) mengamati bahwa penelitian CCPM masih didominasi oleh model konseptual dan investigasi berbasis simulasi, sementara validasi empiris dalam beragam lingkungan proyek nyata masih terbatas. Karena karakteristik proyek, tingkat ketidakpastian, struktur sumber daya, dan kondisi eksekusi bervariasi cukup besar, parameter penentuan ukuran *buffer* yang berkinerja baik, baik secara analitis maupun melalui simulasi, belum tentu memberikan perlindungan yang setara ketika diuji pada data proyek aktual. Kalibrasi spesifik konteks dan validasi retrospektif karenanya diperlukan untuk menentukan apakah suatu konfigurasi *buffer* andal secara operasional.

Kajian CCPM yang ada juga cenderung menekankan pada perbaikan jadwal rencana atau pemanfaatan *buffer* pada akhir. Ukuran semacam ini memberikan informasi yang terbatas mengenai evolusi temporal risiko dalam jadwal. Untuk tujuan pengendalian proyek, mengidentifikasi kapan kinerja *buffer* mulai memburuk jauh lebih bernilai dibandingkan hanya mengetahui seberapa banyak *buffer* yang telah terkonsumsi pada saat proyek selesai. Identifikasi dini terhadap lintasan yang merugikan memungkinkan tindakan korektif, seperti realokasi sumber daya, penyusunan ulang urutan aktivitas, penghapusan kendala, atau percepatan pekerjaan kritis, untuk dilaksanakan sebelum buffer tersisa habis.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian ini mengembangkan kerangka back-testing dinamis yang mengintegrasikan tiga komponen analitis yang saling melengkapi. Pertama, *Schedule-Weighted Progress Analysis* (SWPA) mengukur kinerja proyek mingguan dengan memperhitungkan signifikansi penjadwalan pada setiap aktivitas. Kedua, *Buffer Consumption Index* (BCI) dan *fever chart* mengevaluasi konsumsi *buffer* relatif terhadap progres *critical chain* serta mengklasifikasikan kondisi proyek ke dalam zona risiko hijau, kuning, dan merah. Ketiga, model rantai Markov eksploratif mengestimasi perilaku transisi dan persistensi kondisi risiko-buffer ini dari waktu ke waktu. Model rantai Markov sebelumnya telah diterapkan untuk memprediksi deviasi jadwal dan progres konstruksi di luar sektor migas (Rudeli dkk., 2017) menggunakan rantai Markov bersama indikator *earned value* untuk memprediksi deviasi jadwal pada basis data 90 proyek konstruksi perumahan-koperasi, dengan rata-rata galat prediksi di bawah 3%, sementara Mahmoodzadeh dkk. (2021) menerapkan model rantai Markov untuk memprediksi waktu dan biaya konstruksi terowongan di bawah ketidakpastian geologis. Studi-studi lain berfokus terutama pada industri non-migas (Ibaad dkk., 2025; Wijaya dkk., 2024; Sukmono & Lesmana, 2023), atau pada zona risiko proyek secara umum tanpa mengintegrasikan kerangka *buffer* konsumsi (Soltan & Ashrafi, 2025). Penelitian ini memperluas pendekatan rantai Markov ke industri minyak dan gas, dengan menerapkannya secara khusus pada persistensi risiko zona *buffer* dalam kerangka back-testing CCPM. Secara bersama-sama, komponen-komponen ini memberikan penilaian longitudinal atas kinerja jadwal yang tidak dapat diberikan oleh indikator titik akhir tunggal.

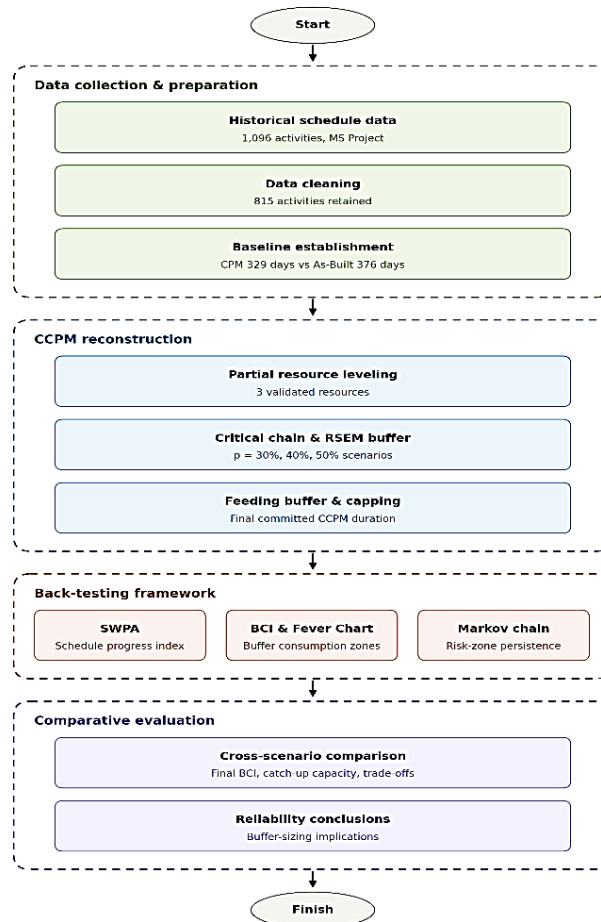
Penelitian ini juga melakukan analisis sensitivitas untuk tiga skenario pengurangan durasi aktivitas RSEM: $p = 30\%$, $p = 40\%$, dan $p = 50\%$. Analisis ini menguji apakah skenario yang menghasilkan kesesuaian terdekat antara estimasi durasi analitis dan berbasis simulasi juga memberikan perlindungan terkuat ketika dievaluasi terhadap data eksekusi aktual. Perbandingan ini penting karena presisi analitis tidak selalu berarti ketahanan operasional. Suatu konfigurasi *buffer* dapat sangat mendekati estimasi simulasi, namun tetap cepat terkonsumsi ketika terpapar pada waktu, besaran, dan perambatan keterlambatan proyek aktual. Parameter penentuan ukuran *buffer* karenanya perlu dinilai menggunakan kriteria akurasi matematis maupun kinerja empiris.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan dua kontribusi utama. Pertama, penelitian ini memperkenalkan kerangka back-testing dinamis terintegrasi yang menggabungkan SWPA, BCI, analisis *fever chart*, dan pemodelan rantai Markov eksploratif untuk mengevaluasi evolusi keandalan *buffer* CCPM selama pelaksanaan proyek. Kedua, penelitian ini membandingkan ketahanan operasional pada tiga skenario sensitivitas RSEM dan menyelidiki *trade off* yang tampak antara presisi analitis dan kinerja *buffer* aktual. Penelitian ini juga mengevaluasi mekanisme catch-up dalam jaringan *Critical Chain*, melalui mana keterlambatan pada aktivitas individual dapat terserap sebagian sebelum memengaruhi tanggal penyelesaian proyek secara keseluruhan. Secara ringkas, novelty penelitian ini terletak pada penambahan dimensi temporal terhadap evaluasi CCPM yang sebelumnya bersifat statis (Widyanto dkk., 2026): back-testing mingguan BCI/Fever Chart dan analisis persistensi zona risiko berbasis rantai Markov, keduanya diterapkan secara retrospektif pada dataset proyek yang sama, bukan pada proyek atau data baru.

Berdasarkan uraian tersebut, tujuan penelitian ini adalah: (1) melakukan back-testing dinamis terhadap hasil SWPA, BCI, *Fever Chart*, dan rantai Markov pada tiga skenario RSEM ($p = 30\%$, $p = 40\%$, dan $p = 50\%$) untuk proyek pemasangan kompresor ULP; (2) mengidentifikasi waktu, lintasan, dan mekanisme yang terkait dengan degradasi keandalan *buffer*; dan (3) mengukur sejauh mana mekanisme catch-up pada jaringan *critical chain* memitigasi perambatan keterlambatan aktivitas individual ke tingkat proyek. Temuan penelitian ini diharapkan dapat mendukung pemilihan *buffer* yang lebih berbasis bukti dan memberikan manajer proyek kerangka kerja peringatan dini yang lebih praktis.

METODE

Metode penelitian ini didasarkan pada Gambar 3. Diagram Alir Metodologi Penelitian terbagi menjadi beberapa alur proses, yang dijabarkan sebagai berikut.



Gambar 3. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Studi Kasus dan Data

Sebelum menguraikan data dan tahapan analisis, perlu ditegaskan definisi tiga istilah jadwal yang digunakan secara konsisten sepanjang penelitian ini. Baseline CPM adalah jadwal rencana awal proyek yang disusun menggunakan *Critical Path Method* sebelum pelaksanaan dimulai, tanpa mempertimbangkan keterbatasan kapasitas sumber daya secara eksplisit. As-Built Schedule adalah jadwal realisasi pelaksanaan proyek, dicatat berdasarkan tanggal mulai dan selesai sesungguhnya di lapangan, yang menjadi tolok ukur pembandingan dalam seluruh proses back-testing. Jadwal CCPM adalah jadwal hasil rekonstruksi retrospektif menggunakan pendekatan *Critical Chain Project Management*, disusun ulang dari Baseline CPM melalui resource levelling dan penyisipan *buffer* (*project buffer* dan *feeding buffer*). Penting untuk digarisbawahi bahwa jadwal CCPM dalam penelitian ini bersifat kontrafaktual: proyek yang dianalisis pada kenyataannya dilaksanakan menggunakan pendekatan CPM konvensional, sehingga seluruh evaluasi CCPM dalam penelitian ini merupakan simulasi retrospektif mengenai potensi kinerjanya, bukan hasil penerapan nyata di lapangan.

Penelitian ini menggunakan data historis proyek pemasangan kompresor ULP di Pamaguan Plant, PHSS, yang sama dengan objek studi dalam penelitian Widyanto dkk. (2026). Periode pelaksanaan proyek berlangsung dari 31 Mei 2024 hingga 25 April 2025 menurut Baseline CPM, dan hingga 11 Juni 2025 menurut As-Built Schedule. Dataset awal mencakup 1.096 aktivitas dalam format Microsoft Project, terdiri atas task leaf dan task summary/rollup. Proses pembersihan data mengikuti kriteria inklusi-eksklusi berikut: (1) 250 summary/rollup

task dikeluarkan berdasarkan identifikasi struktur kode WBS, menyisakan 846 leaf task; (2) 31 aktivitas berstatus milestone (durasi baseline = 0 hari) dikeluarkan; (3) seluruh aktivitas yang tersisa memiliki data durasi aktual lengkap, sehingga tidak ada aktivitas yang dikeluarkan karena data hilang maupun yang memerlukan imputasi. Dengan demikian diperoleh 815 aktivitas ($n = 815$) yang digunakan dalam seluruh tahapan analisis. Baseline CPM menetapkan durasi proyek 329 hari, sedangkan As-Built Schedule menunjukkan realisasi 376 hari, atau keterlambatan 47 hari (14,3%). Karena penelitian ini menggunakan dataset penjadwalan yang sama seperti Widyanto dkk. (2026), perlu ditegaskan bahwa reuse data tersebut tidak disertai pengulangan analisis buffer sizing yang telah dilakukan; kontribusi analitis penelitian ini terletak pada penerapan kerangka back-testing dinamis (SWPA, BCI/Fever Chart, model Markov chain) yang belum dilakukan pada studi terdahulu, sebagaimana dijelaskan pada bagian Pendahuluan.

Rekonstruksi Critical Chain dan Perhitungan Buffer (RSEM)

Kapasitas lima kandidat sumber daya kunci yang diuji dalam resource levelling parsial adalah sebagai berikut: Tim Las, Cap = 2 tim bekerja bersamaan (produktivitas 30 diameter-inch per hari per tim); Tim Piping & Mekanikal, Cap = 1 tim; Tim Sipil, Cap = 1 tim; Tim Elektrikal dan Instrumentasi (E&I), Cap = 1 tim; dan Alat Angkat, Cap = 1 unit (kapasitas 55 ton, dibatasi 1 unit karena keterbatasan ruang di lokasi). Suatu hari kalender t dikategorikan sebagai hari konflik bagi sumber daya r apabila jumlah aktivitas yang membutuhkan sumber daya tersebut dan aktif secara simultan pada hari t melebihi $Cap(r)$: $\sum_{i \in A(t)} req(i,r) \leq Cap(r)$, $\forall t, r \in R$, dengan $A(t)$ adalah himpunan aktivitas yang aktif pada waktu t dan $req(i,r)$ adalah kebutuhan sumber daya r oleh aktivitas i , yang dipetakan dari deskripsi aktivitas/WBS pada dokumen jadwal. Persentase hari konflik dihitung berdasarkan basis 330 hari kerja (bukan hari kalender). Ketiga sumber daya yang divalidasi (Tim Las: 2,1%; E&I: 7,6%; Alat Angkat: 7,9%) dipilih karena proporsi hari konfliknya jelas terpisah dan lebih rendah dibandingkan dengan Sipil (54,2%) dan Piping & Mekanikal (36,7%).

Critical chain direkonstruksi melalui *resource levelling parsial* terhadap tiga sumber daya kunci yang telah tervalidasi berdasarkan pengujian hari konflik dan verifikasi komposisi personel di lapangan, yaitu Tim Las, Tim Elektrikal dan Instrumentasi (E&I), serta Alat Angkat. *Project buffer* (PB) dihitung menggunakan *Root Square Error Method* (RSEM) berdasarkan deviasi antara durasi aman (Ds_i) dan durasi agresif (Da_i) pada aktivitas *critical chain*:

$$\sigma_i = (Ds_i - Da_i) / 2 \quad (1)$$

$$PB = 2 \times \sqrt{(\sum \sigma_i^2)} \quad (2)$$

Di mana Ds_i dan Da_i masing-masing adalah durasi aman dan durasi agresif aktivitas ke- i pada *critical chain*, sesuai dengan prinsip RSEM yang diadaptasi dari Goldratt (1997) dan Newbold (1998). Durasi agresif Da_i diturunkan dari durasi aman Ds_i melalui pendekatan persentase pemotongan tetap: $Da_i = (1 - p) \times Ds_i$, dengan $p \in \{30\%, 40\%, 50\%\}$ diterapkan secara seragam pada seluruh aktivitas *critical chain* untuk skenario yang bersangkutan (misalnya, pada $p = 50\%$, $Da_i = 0,5 \times Ds_i$ untuk setiap aktivitas). Pendekatan persentase tetap ini dipilih karena kesederhanaan dan konsistensi penerapannya lintas skenario sensitivitas, dibandingkan dengan alternatif seperti estimasi tiga titik (optimistik-realistis-pesimistik) yang memerlukan data historis durasi per aktivitas yang tidak tersedia pada dataset ini. Durasi komitmen CCPM, dilambangkan TCCPM (total durasi CCPM), diperoleh dengan menempatkan *project buffer* pada akhir *critical chain*:

$$T_{CCPM} = EF_{\text{end of critical chain}} + PB \quad (3)$$

Untuk menilai kekokohan hasil terhadap asumsi durasi agresif, digunakan tiga skenario pemotongan durasi $p \in \{30\%, 40\%, 50\%\}$, masing-masing menghasilkan jadwal CCPM final setelah penyisipan *feeding buffer* dan prosedur *capping*, dengan durasi komitmen berturut-turut 365 hari ($p = 30\%$), 344 hari ($p = 40\%$), dan 318 hari ($p = 50\%$).

Penyisipan *feeding buffer* ke dalam jaringan proyek secara aktual dapat menghasilkan nilai yang melebihi *slack (total float)* yang tersedia pada *feeding chain* terkait. Wilkens (2000) menjelaskan bahwa kondisi tersebut dapat menyebabkan tanggal penyelesaian proyek bergeser lebih lambat daripada yang diharapkan, karena *feeding buffer* yang terlalu besar mengubah sebagian aktivitas nonkritik menjadi bagian dari jalur kritis baru. Untuk mengatasi hal ini, penelitian ini menerapkan prosedur *capping* dengan formula $FB_{m,capped} = \min(FB_m, Slack_o)$, dengan $Slack_o$ adalah nilai *Total Slack* pada aktivitas ujung *feeding chain* (predecessor langsung dari titik pertemuan dengan *critical chain*), yang diambil dari jadwal hasil *resource levelling* sebelum penyisipan *buffer* apa pun. Sebagai ilustrasi numerik, pada skenario $p = 50\%$, *feeding buffer* FB1 (Piping painting – Commissioning) memiliki nilai FB_m hasil RSEM sebesar 76,41 hari, sedangkan $Slack_o$ pada aktivitas tersebut adalah 61,8 hari; diperoleh $FB1, capped = \min(76,41; 61,8) = 61,8$ hari. Karena perhitungan *slack* pada jaringan CPM bersifat global, penyisipan atau pembatasan satu *buffer* dapat mengubah nilai *Total Slack* aktivitas lain, sehingga *capping* dilakukan secara iteratif (hingga 3 tahap pada skenario $p = 50\%$) hingga tidak ada lagi *feeding buffer* yang menyebabkan perubahan status menjadi kritis. Prosedur ini terbukti memperkecil selisih antara hasil analitis dan simulasi jaringan: sebelum *capping*, selisih berkisar 14,2%–38,6%; setelah *capping*, selisih berkurang menjadi 0,7%–2,3% pada ketiga skenario. Prosedur ini diterapkan pada seluruh 17 *feeding buffer* yang disisipkan ke dalam jadwal CCPM final pada ketiga skenario sensitivitas.

Kerangka Back-Testing

Karena *As-Built Schedule* pada proyek ini dilaksanakan menggunakan pendekatan CPM konvensional dan bukan CCPM, seluruh analisis pada bagian ini bersifat back-testing retrospektif: data aktual proyek diterapkan kembali pada baseline CCPM yang direkonstruksi untuk menilai potensi kinerjanya seandainya CCPM diterapkan sejak awal.

a. Schedule-Weighted Progress Analysis (SWPA)

SWPA mengadaptasi konsep *Planned Value/Earned Value* dari standar *Earned Value Management* (EVM), namun menggunakan bobot durasi aktivitas (bukan biaya) serta metode pengukuran progres 0/100 (Project Management Institute, 2019). Metode 0/100 dipilih untuk dataset ini karena sebagian besar aktivitas pada jadwal proyek berdurasi pendek dan bersifat diskret (memiliki kriteria selesai yang jelas), sehingga pengukuran biner selesai/belum selesai lebih objektif dibandingkan estimasi persentase penyelesaian parsial yang bersifat subjektif. Bobot durasi digunakan sebagai pengganti bobot biaya karena data biaya aktual per aktivitas tidak termasuk dalam cakupan dataset penjadwalan yang digunakan pada penelitian ini:

$$PP_t = \left[\sum_{i \in \text{planned finish} \leq t} DS_i / \sum_{i=1}^n DS_i \right] \times 100\%$$

$$EP_t = \left[\sum_{i \in \text{actual finish} \leq t} DS_i / \sum_{i=1}^n DS_i \right] \times 100\%$$

PP_t (*Planned Progress*) dan EP_t (*Earned Progress*) menggantikan istilah *Planned Value* (PV) atau *Earned Value* (EV) standar dalam *Earned Value Management* untuk menghindari kesan bahwa analisis ini mencerminkan kinerja biaya. Untuk mencegah ambiguitas lebih lanjut, istilah PV/EV tidak digunakan kembali pada bagian selanjutnya dari naskah ini; seluruh pembahasan progres jadwal merujuk secara konsisten pada notasi PP_t/EP_t . Perbedaan SWPA dengan EVM standar bersifat konseptual, bukan sekadar penggantian istilah: EVM standar mengukur nilai pekerjaan yang diselesaikan dalam satuan moneter berdasarkan anggaran yang dialokasikan (*Budget at Completion*), sehingga secara inheren mensyaratkan data biaya aktual

per aktivitas. SWPA menggantikan basis moneter tersebut dengan bobot durasi aman (DS_i) dari Baseline CPM, sehingga indikator yang dihasilkan murni mencerminkan kemajuan jadwal dari sisi alokasi waktu dalam rencana, terlepas dari implikasi biaya atau realisasi anggaran. Konsekuensinya, SWPA tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan efisiensi biaya proyek dan interpretasinya perlu dibatasi secara eksplisit pada dimensi jadwal. Indeks Progres Jadwal (IPJ_t) dan Deviasi Progres Jadwal (DPJ_t) bukan istilah baku, melainkan istilah adaptasi yang dianalogikan dari *Schedule Performance Index* (SPI) dan *Schedule Variance* (SV) yang lazim digunakan dalam praktik EVM (Tian dkk., 2019), namun dihitung berdasarkan bobot durasi sebagaimana didefinisikan pada Persamaan (4) dan (5):

$$IPJ_t = EP_t / PP_t \quad (4)$$

$$DPJ_t = EP_t - PP_t \quad (5)$$

b. Buffer Consumption Index (BCI) dan Fever Chart

BCI pada waktu t mengukur laju konsumsi buffer relatif terhadap laju penyelesaian *critical chain*, diadaptasi dari kerangka *fever chart* Newbold (1998) dan Leach (1999), dan sejalan dengan batas toleransi konsumsi buffer secara proporsional yang diusulkan untuk pengendalian proyek secara umum (Martens & Vanhoucke, 2017):

$$BCI_t = (BC_t / PB) / (CC_t / CL) \quad (6)$$

$$BU_t = BC_t / PB \quad (7)$$

Di mana BC_t adalah akumulasi *buffer* yang terkonsumsi hingga waktu t (dioperasionalkan sebagai deviasi maksimum antara tanggal selesai aktual dan tanggal selesai rencana CCPM pada aktivitas *critical chain* yang telah selesai), PB adalah *project buffer* total, CC_t adalah panjang *critical chain* yang telah diselesaikan, dan CL adalah panjang total *critical chain*. Operasionalisasi BC_t sebagai deviasi maksimum (bukan kumulatif) dipilih karena penelitian ini bersifat back-testing retrospektif tanpa sistem pelacakan buffer aktual secara langsung (live buffer tracking) sebagaimana tersedia pada penerapan CCPM real-time; deviasi maksimum merepresentasikan titik erosi perlindungan buffer terparah yang telah teramati hingga waktu t , konsisten dengan sifat jalur kritis di mana penyelesaian proyek ditentukan oleh aktivitas dengan keterlambatan terbesar pada rantai tersebut, bukan oleh rata-rata atau akumulasi deviasi seluruh aktivitas yang telah selesai. Definisi ini merupakan adaptasi penelitian terhadap konsep buffer penetration pada kerangka *fever chart* konvensional (Newbold, 1998; Leach, 1999), yang pada penerapan CCPM real-time umumnya diperoleh langsung dari selisih tanggal penyelesaian aktual proyek terhadap baseline yang dipantau berkelanjutan, bukan direkonstruksi dari data historis. Klasifikasi zona risiko (Zona Hijau $BCI_t \leq 1$, Zona Kuning $1 < BCI_t \leq 2$, Zona Merah $BCI_t > 2$) mengikuti ambang konvensional yang lazim digunakan pada praktik *fever chart* CCPM (Newbold, 1998; Goldratt, 1997); yang bersifat adaptasi pada penelitian ini adalah operasionalisasi BC_t itu sendiri (deviasi maksimum) sebagaimana dijelaskan di atas, bukan ambang zona risikonya.

c. Model Markov Chain (Eksploratif)

Untuk mengestimasi persistensi statistik kondisi zona risiko, digunakan model Markov chain tiga keadaan (Hijau, Kuning, Merah) berdasarkan klasifikasi mingguan BCI_t . Probabilitas transisi dihitung sebagai:

$$P_{ij} = n_{ij} / \sum_j n_{ij} \quad (8)$$

Karena keterbatasan jumlah observasi menghasilkan sel matriks tak terdefinisi (pembagian dengan nol), diterapkan Laplace smoothing:

$$P_{ij} = (n_{ij} + 1) / (\sum_j n_{ij} + k) \quad (9)$$

Dengan $k = 3$ (jumlah *state*) (Loban, 2022). Distribusi stasioner $\pi = (\pi H, \pi K, \pi M)$ yang menggambarkan proporsi waktu jangka panjang pada tiap zona diperoleh melalui:

$$\pi P = \pi; \pi H + \pi K + \pi M = 1 \quad (10)$$

Diselesaikan menggunakan metode iterasi pangkat (*power iteration*) dimulai dari distribusi awal seragam dengan kriteria konvergensi $\|\pi^{(k+1)} - \pi^{(k)}\| < \varepsilon$, $\varepsilon = 10^{-5}$ (norma Euclidean antar-iterasi berurutan); kriteria tersebut terpenuhi setelah 40 iterasi (selisih norma antara iterasi ke-39 dan ke-40 $\approx 4,39 \times 10^{-6}$), dengan verifikasi normalisasi ($\pi H + \pi K + \pi M = 1$) pada setiap tahap iterasi untuk memastikan validitas hasil. Sejalan dengan keterbatasan data dari satu proyek tunggal, hasil model Markov chain diposisikan sebagai analisis eksploratif dan tidak menjadi kriteria utama untuk menilai efektivitas jadwal.

Perangkat Lunak Pengolahan Data

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan menggunakan dua perangkat lunak. Microsoft Project digunakan untuk merekonstruksi jaringan *precedence* proyek, menjalankan *resource levelling parsial* terhadap tiga sumber daya tervalidasi, mengidentifikasi *critical chain* dan feeding chain, serta mensimulasikan penyisipan *project buffer* dan *feeding buffer* ke dalam jadwal (termasuk proses *capping*). Hubungan antaraktivitas direpresentasikan menggunakan *Precedence Diagramming Method* (PDM) (Piney, 2017; Oliveira & Santos, 2015; Nisar & Suzuki, 2015; Ljiljanić dkk., 2022; Maheswari, 2015), yaitu teknik penjadwalan proyek yang digunakan untuk menggambarkan hubungan ketergantungan antaraktivitas dalam bentuk jaringan, sehingga urutan pelaksanaan pekerjaan dapat ditentukan secara logis dan sistematis. Microsoft Excel digunakan untuk seluruh perhitungan kuantitatif lanjutan, meliputi perhitungan RSEM (Persamaan 1–3), SWPA (Persamaan 4–5), BCI/Fever Chart (Persamaan 6–7), serta matriks probabilitas transisi dan iterasi pangkat pada model Markov chain (Persamaan 8–10).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ringkasan Rekonstruksi CCPM Tiga Skenario

Ketiga skenario RSEM menghasilkan durasi komitmen CCPM yang lebih pendek dibandingkan dengan durasi *As-Built* (376 hari), sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1. Skenario $p = 30\%$ memiliki presisi tertinggi antara estimasi analitis dan simulasi penyisipan *buffer* (selisih 0,7%), sedangkan $p = 40\%$ memiliki selisih terbesar (2,3%) akibat interaksi antara *feeding buffer* dan *slack* yang tersedia dalam jaringan proyek; skenario $p = 50\%$ menghasilkan selisih menengah (1,6%). Persentase selisih dihitung sebagai $(TCCPM \text{ setelah capping} - TCCPM \text{ analitis}) / TCCPM \text{ analitis} \times 100\%$; lihat Subbab 2.2 untuk rincian prosedur *capping*.

Tabel 1. Ringkasan Durasi dan Project Buffer pada Tiga Skenario Sensitivitas RSEM

Skenario	Project Buffer (hari)	TCCPM Final (hari)	Selisih vs <i>As-Built</i>
$p = 30\%$	20,42	365	-11 hari
$p = 40\%$	27,23	344	-32 hari
$p = 50\%$	34,04	318	-58 hari

Kinerja Progres Jadwal (SWPA)

Evaluasi SWPA pada 61 titik peninjauan mingguan (31 Mei 2024 – 30 Juni 2025) terhadap keseluruhan 815 aktivitas menunjukkan bahwa Indeks Progres Jadwal (IPJ_t) berada di

bawah 1 pada sebagian besar periode pelaksanaan. Kondisi terendah terjadi pada minggu ke-16, dengan $IPJ_t = 0,064$, yang mencerminkan progres aktual yang jauh tertinggal akibat keterlambatan pekerjaan piling pada fase awal proyek. Indikasi pemulihan sempat terjadi pada minggu ke-32 hingga ke-42 (DPJ_t positif), namun tidak bertahan hingga akhir proyek. Progres rencana (PP_t) mencapai 100% pada minggu ke-52, sedangkan progres aktual (EP_t) baru mencapai 100% pada minggu ke-59, selisih 7 minggu yang konsisten dengan keterlambatan proyek sebesar 47 hari (14,3%).

Tabel 2. Ringkasan SWPA pada Titik Peninjauan Kunci

Minggu	PP_t (%)	EP_t (%)	IPJ_t	DPJ_t (poin %)
W16	5,74	0,37	0,064	-5,37
W32	43,73	46,26	1,058	+2,53
W42	65,60	68,52	1,045	+2,92
W52	100	98,59	0,986	-1,41
W59 (EP=100%)	100	100	1,000	0,00

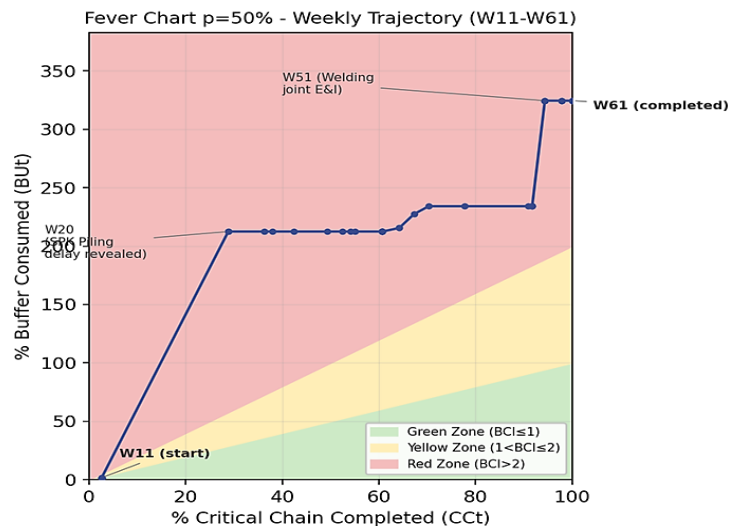
Back-Testing Buffer Consumption Index dan Fever Chart

Untuk melengkapi gambaran progres agregat pada Subbab 3.2, analisis berikut menelusuri lebih dalam bagaimana *buffer* terkonsumsi relatif terhadap progres *Critical Chain* dari waktu ke waktu. *Back-testing* BCI pada skenario utama ($p = 50\%$, $CL = 114,5$ hari) menunjukkan bahwa proyek memasuki Zona Merah sejak Minggu ke-20 (16 September 2024) dan tidak pernah kembali ke zona yang lebih rendah hingga proyek selesai pada Minggu ke-61, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 3. Sesuai definisi BC_t pada Persamaan (6)–(7) (Subbab 2.3b), nilai $BCI_t = 7,37$ pada Minggu ke-20 diperoleh dari $BC_t = 72,3$ hari, yaitu deviasi maksimum tanggal selesai aktual terhadap tanggal selesai rencana CCPM di antara aktivitas *critical chain* yang telah selesai pada titik tersebut, dibagi terhadap rasio progres *critical chain* (CC_t/CL). Nilai BCI_t mengalami lonjakan tajam hingga mencapai 7,37 pada minggu ke-20, dipicu oleh keterlambatan aktivitas “SPK Piling” sebesar 73 hari dibandingkan dengan rencana CCPM ($BC_t = 72,3$ hari mendekati namun tidak identik dengan 73 hari karena BC_t mengacu pada tanggal selesai aktual-vs-rencana pada aktivitas *critical chain* yang telah selesai, bukan durasi keterlambatan aktivitas itu sendiri secara langsung). Lonjakan kedua terjadi pada Minggu ke-51 akibat keterlambatan aktivitas “Welding (joint) and Inspection” pada jalur piping sebesar 111 hari, yang menjadi deviasi tunggal terbesar ($BC_t = 110,4$ hari) dan jauh melampaui buffer proyek sebesar 34,04 hari.

Tabel 3. Ringkasan BCI dan Zona Fever Chart pada Titik Peninjauan Kunci ($p = 50\%$)

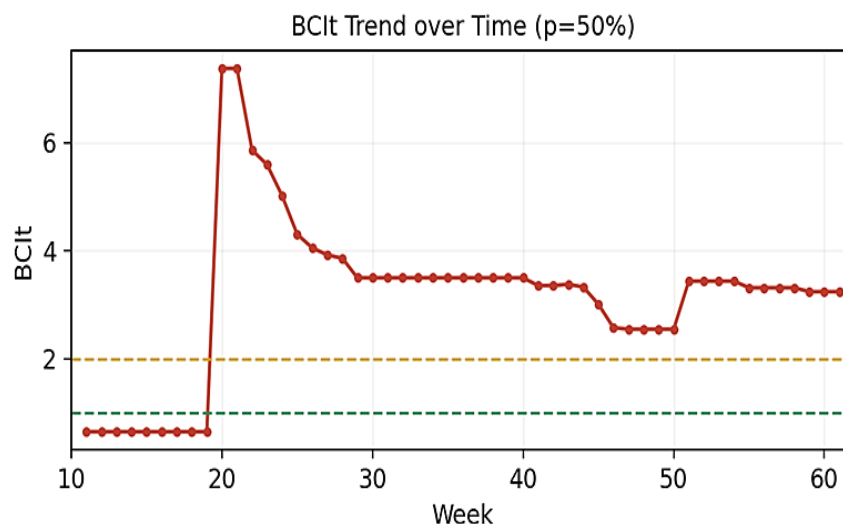
Minggu	CC_t (%)	BC_t (hari)	BCI_t	Zona
W20	28,82	72,3	7,37	Merah
W40	60,70	72,3	3,50	Merah
W46	90,83	79,7	2,58	Merah
W51	94,32	110,4	3,44	Merah
W61 (selesai)	100,00	110,4	3,24	Merah

Temuan ini menunjukkan adanya konsentrasi deviasi durasi pada kelompok pekerjaan Struktur Baja, Elektrikal & Instrumentasi, serta Piping. Hal ini menegaskan bahwa konsumsi buffer pada proyek yang diteliti didorong oleh sejumlah kecil aktivitas dengan deviasi ekstrem, bukan oleh akumulasi keterlambatan kecil yang tersebar merata.



Gambar 4. Fever Chart Skenario $p = 50\%$ (% Critical Chain Selesai vs % Buffer Terpakai)

Cara membaca Gambar 4 adalah sebagai berikut. Sumbu X (horizontal) menyatakan persentase *Critical Chain* yang telah diselesaikan (CC_t), bergerak dari 0% (belum mulai) hingga 100% (selesai) seiring berjalannya waktu. Sumbu Y (vertikal) menyatakan persentase *Project Buffer* yang telah terpakai (BU_t) relatif terhadap besaran *buffer* total (34,04 hari untuk $p = 50\%$); nilai di atas 100% berarti keterlambatan telah melampaui kapasitas *buffer* tersebut. Tiga area warna latar merepresentasikan zona risiko: Hijau ($BCI_t \leq 1$, konsumsi *buffer* masih lebih lambat daripada laju penyelesaian pekerjaan), Kuning ($1 < BCI_t \leq 2$, perlu kewaspadaan), dan Merah ($BCI_t > 2$, *buffer* terkonsumsi jauh lebih cepat daripada progres pekerjaan). Garis lintasan menunjukkan perjalanan mingguan proyek dari titik awal (W11) hingga akhir (W61); lonjakan tajam pada W20 dan W51 menandai minggu ketika suatu aktivitas kritis baru terungkap mengalami keterlambatan besar, yang langsung mendorong titik pengamatan jauh ke Zona Merah. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4, sejak Minggu ke-20, lintasan mingguan proyek tetap berada pada Zona Merah hingga akhir periode pengamatan pada Minggu ke-61, tanpa satu pun titik yang kembali ke Zona Hijau maupun Zona Kuning.



Gambar 5. Tren BCI terhadap Waktu, Skenario $p = 50\%$ (garis putus-putus hijau = batas $BCI = 1$; garis putus-putus kuning = batas $BCI = 2$)

Gambar 5 memberikan perspektif pelengkap terhadap Gambar 4 dengan menampilkan nilai BCI_t secara langsung seiring waktu (minggu ke-11 hingga ke-61). Nilai BCI_t melonjak tajam pada minggu ke-20 hingga mencapai 7,37, nilai tertinggi selama periode pengamatan

akibat terungkapnya keterlambatan dalam aktivitas “SPK Piling”. Setelah lonjakan tersebut, nilai BCI_t menurun secara bertahap hingga mendekati kisaran 3,2 – 3,5 pada sebagian besar periode pertengahan proyek. Penurunan ini bukan disebabkan oleh berkurangnya BC_t (yang bersifat kumulatif dan tidak pernah menurun dalam operasionalisasi penelitian ini), melainkan oleh peningkatan CC_t pada penyebut rasio BCI_t seiring bertambahnya aktivitas *Critical Chain* yang telah diselesaikan, yang merupakan konsekuensi matematis dari definisi pada Persamaan (7). Lonjakan kedua terjadi pada Minggu ke-51 akibat keterlambatan aktivitas “Welding (joint) and Inspection”, sehingga mendorong BCI_t kembali naik sebelum akhirnya menetap pada nilai 3,24 saat proyek selesai. Sepanjang periode pengamatan, nilai BCI_t tidak pernah kembali di bawah ambang 2,0 (batas Zona Kuning/Merah) setelah minggu ke-20, sebagaimana ditunjukkan oleh garis putus-putus kuning pada Gambar 5.

Perbandingan BCI akhir proyek pada ketiga skenario sensitivitas mengungkap *trade off* penting (bukan paradoks dalam pengertian kontradiktif, karena penurunan BCI_t pada buffer yang lebih besar merupakan konsekuensi matematis langsung dari membesarnya penyebut PB pada Persamaan 6, sementara deviasi aktual yang diserap relatif tetap besar) dalam penelitian ini, sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Skenario $p = 30\%$ yang memiliki presisi analitis-simulasi terbaik (selisih 0,7%) justru menghasilkan BCI_t akhir tertinggi (3,69) dan BU_t akhir sebesar 368,51%. Sebaliknya, skenario $p = 50\%$, meskipun presisinya bukan yang terbaik (selisih 1,6%), justru menghasilkan BCI_t akhir terendah (3,24) dan BU_t akhir sebesar 324,37%, yaitu proporsi konsumsi buffer paling rendah secara relatif di antara ketiga skenario terhadap besaran buffer masing-masing, bukan bukti ketahanan absolut, karena seluruh skenario tetap berakhir pada Zona Merah.

Tabel 4. Perbandingan BCI Akhir Proyek antar Skenario Sensitivitas

Skenario	Project Buffer (hari)	BC_t Akhir (hari)	BU_t Akhir (%)	BCI_t Akhir	Zona
$p = 30\%$	20,42	75,25	368,51	3,69	Merah
$p = 40\%$	27,23	92,50	339,70	3,40	Merah
$p = 50\%$	34,04	110,42	324,37	3,24	Merah

Trade off tersebut dapat dijelaskan oleh besaran *project buffer* yang berbeda pada tiap skenario. Karena ketiga skenario menghadapi pola keterlambatan absolut yang secara umum sebanding (didominasi oleh aktivitas “SPK Piling” dan “Welding (joint) and Inspection” yang sama), skenario dengan *project buffer* lebih besar ($p = 50\%$: 34,04 hari) menghasilkan rasio konsumsi *buffer* yang secara proporsional lebih rendah dibandingkan skenario dengan buffer lebih kecil ($p = 30\%$: 20,42 hari). Dengan demikian, kriteria presisi matematis (kesesuaian estimasi analitis terhadap simulasi) dan kriteria ketahanan operasional (kemampuan menyerap deviasi aktual) dapat menghasilkan urutan preferensi skenario yang berlawanan, sehingga pemilihan parameter buffer sizing tidak dapat didasarkan pada satu kriteria saja. Pola konsumsi buffer yang sangat bergantung pada konteks proyek ini konsisten dengan temuan pada studi CCPM empiris lain; Nugroho dan Suroso, (2023), misalnya, melaporkan bahwa proyek konstruksi flyover jalan tol dengan karakteristik risiko yang berbeda juga menghasilkan tingkat konsumsi buffer pada Zona Merah, sehingga menguatkan argumen bahwa ambang *buffer* generik tidak serta-merta dapat diasumsikan berlaku secara seragam lintas jenis proyek.

Model Markov Chain: Persistensi Zona Risiko

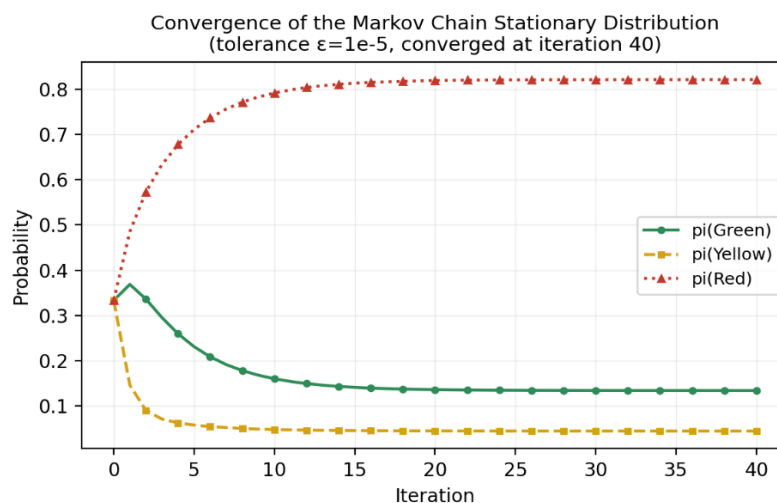
Sebagai analisis pelengkap yang bersifat eksploratif, model Markov chain berikut diestimasi dari sampel yang sangat terbatas, yaitu 50 transisi antarminggu dari satu proyek tunggal, sehingga hasilnya perlu diinterpretasikan sebagai indikasi pola, bukan sebagai estimasi probabilitas yang presisi atau dapat digeneralisasi. Dari 61 titik peninjauan mingguan, diperoleh 51 observasi BCI_t terdefinisi (Minggu ke-11 hingga ke-61) yang menghasilkan 50 pasangan transisi. Matriks transisi menunjukkan bahwa seluruh 41 observasi pada Zona Merah tetap berada di Zona Merah pada minggu berikutnya (proporsi empiris murni $41/41 = 100\%$, dihitung

langsung dari data tanpa penyesuaian statistik apa pun), tanpa satu pun transisi keluar yang teramati, sementara tidak terdapat satu pun observasi yang berasal dari Zona Kuning. Laplace smoothing dengan $k = 3$ (jumlah state) dipilih karena merupakan pendekatan smoothing standar yang menambahkan bobot minimal dan seragam pada setiap kemungkinan transisi, sehingga tidak memperkenalkan asumsi prior yang condong ke arah tertentu; pendekatan ini diperlukan semata-mata untuk mengatasi sel matriks tak terdefinisi akibat pembagian dengan nol pada baris Zona Kuning yang tidak memiliki observasi sama sekali, bukan untuk mengubah estimasi pada baris Zona Merah yang telah memiliki observasi memadai (41 transisi). Setelah penerapan Laplace smoothing ($k = 3$), probabilitas bertahan di Zona Merah menurun sedikit dari proporsi empiris 100% menjadi estimator tersmoothing sebesar 95,5%, Kedua angka ini perlu dibedakan secara eksplisit: 100% adalah proporsi empiris murni yang diamati langsung dari data, sedangkan 95,5% adalah hasil estimator setelah smoothing yang digunakan pada perhitungan distribusi stasioner selanjutnya. Probabilitas berpindah ke Zona Hijau maupun Zona Kuning masing-masing hanya 2,3%.

Tabel 5. Matriks Probabilitas Transisi dengan Laplace Smoothing ($k=3$)

Dari atau Ke	Hijau	Kuning	Merah
Hijau	0,750	0,083	0,167
Kuning	0,333	0,333	0,333
Merah	0,023	0,023	0,955

Distribusi stasioner yang diperoleh melalui iterasi pangkat terhadap matriks menghasilkan $\pi_{\text{Hijau}} = 13,4\%$, $\pi_{\text{Kuning}} = 4,5\%$, dan $\pi_{\text{Merah}} = 82,1\%$. Nilai ini merupakan implikasi matematis dari distribusi jangka panjang rantai Markov yang diestimasi (long-run distribution of the estimated chain), bukan prediksi empiris mengenai perilaku proyek di masa depan. Sebagai proyeksi matematis dari matriks yang diestimasi dari sampel terbatas, nilai ini tidak dimaksudkan sebagai prediksi presisi, dan interpretasinya perlu dibatasi pada tataran struktur matematis model yang diestimasi, bukan dibaca sebagai pernyataan bahwa proyek 'akan' menghabiskan 82,1% waktunya pada Zona Merah. Karakteristik ini layak disebut sebagai kondisi absorbing-like secara empiris, meskipun bukan absorbing state dalam pengertian matematis murni karena probabilitas keluar dari Zona Merah tidak sepenuhnya nol setelah dilakukan smoothing. Sejalan dengan sifat eksploratifnya, hasil ini tidak digeneralisasikan ke proyek lain tanpa validasi lebih lanjut menggunakan data dari beberapa proyek.



Gambar 6. Konvergensi Distribusi Stasioner Markov Chain melalui Iterasi Pangkat

Gambar 6 menampilkan proses iterasi pangkat yang dimulai dari distribusi awal seragam $\pi(0) = (1/3, 1/3, 1/3)$ hingga mencapai kondisi konvergen berdasarkan kriteria $\|\pi^{(k+1)} - \pi^{(k)}\| < \epsilon$

($\varepsilon = 10^{-5}$) setelah 40 iterasi. Lintasan π Merah (garis merah, titik-titik, penanda segitiga) meningkat tajam pada iterasi awal dan stabil mendekati 0,821, sementara π Hijau (garis hijau, solid, penanda bulat) dan π Kuning (garis kuning, putus-putus, penanda kotak) menurun dan stabil, masing-masing mendekati 0,134 dan 0,045. Ketiga lintasan dibedakan melalui kombinasi warna, gaya garis, dan bentuk penanda agar tetap dapat dibedakan pada reproduksi grayscale. Pola konvergensi yang cepat dan stabil ini menunjukkan bahwa hasil distribusi stasioner tidak sensitif terhadap pilihan distribusi awal, meskipun tetap perlu diinterpretasikan secara hati-hati mengingat matriks probabilitas yang mendasarinya diestimasi dari jumlah observasi yang terbatas (50 transisi dari satu proyek).

Mekanisme Catch-Up sebagai Mitigasi Resiko

Meskipun *Fever Chart* dan model Markov chain menunjukkan kondisi ketahanan *buffer* yang buruk, penelitian ini juga menemukan mekanisme *catch-up* pada jaringan *critical chain* yang meredam dampak keterlambatan aktivitas individual terhadap penyelesaian proyek. Istilah “menyerap” dan “catch-up” pada penelitian ini didefinisikan sebagai metrik deskriptif, selisih antara gap aktivitas terburuk dan keterlambatan tingkat proyek, bukan klaim mekanisme sebab-akibat; penurunan gap tersebut dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti float pada aktivitas berikutnya, perubahan urutan pelaksanaan, atau percepatan durasi aktual aktivitas lain yang tidak diverifikasi secara kausal dalam penelitian ini. Pada skenario $p = 50\%$, keterlambatan aktivitas “Welding (joint) and Inspection” sebesar 110,4 hari terhadap rencana CCPM hanya berkontribusi 58 hari terhadap keterlambatan penyelesaian proyek secara keseluruhan, sebuah pola schedule compression yang bersifat deskriptif; selisih 52,4 hari (47,5%) berhasil diserap melalui percepatan relatif pada aktivitas-aktivitas berikutnya dalam jaringan *critical chain*. Perlu dicatat bahwa aktivitas dengan gap terburuk pada ketiga skenario sensitivitas adalah aktivitas yang sama, yaitu “Welding (joint) and Inspection” dengan tanggal Actual Finish yang identik; nilai gap-nya berbeda antarskenario semata-mata karena durasi agresif (Da_i) rencana berubah seiring nilai p . Pola serupa, namun dengan proporsi lebih besar, ditemukan pada skenario yang lebih konservatif, sebagaimana dirangkum pada Tabel 6.

Penelusuran lebih lanjut terhadap data pendukung penelitian (rincian gap aktivitas per titik pada jalur *critical chain*) mengidentifikasi beberapa aktivitas spesifik yang secara berurutan berkontribusi terhadap penyempitan gap tersebut setelah puncak keterlambatan pada aktivitas “Welding (joint) and Inspection”. Tiga aktivitas pada rangkaian instrumentasi Elektrikal dan Instrumentasi (E&I) yang langsung mengikuti jalur *critical chain* menunjukkan gap yang menyempit secara bertahap sebagaimana dirangkum pada Tabel 7, dengan penurunan gap hampir 65 hari dalam rangkaian enam aktivitas instrumentasi yang berurutan. Aktivitas “Hand fire extinguisher” mencatat gap terendah kedua sepanjang jalur *critical chain* pasca-piling, yaitu 21,3 hari, sebelum gap kembali meningkat pada aktivitas Commissioning (96,6 hari) sebagai titik akhir jalur kritis. Pola ini mengindikasikan bahwa penyempitan gap tidak terjadi secara merata pada seluruh rangkaian aktivitas setelah titik keterlambatan kritis, melainkan terkonsentrasi pada kelompok aktivitas instrumentasi tertentu yang berhasil dilaksanakan mendekati durasi rencana. Identifikasi ini bersifat deskriptif berdasarkan penelusuran data pendukung dan belum mengonfirmasi mekanisme kausal yang melatarbelakangi percepatan tersebut.

Tabel 6. Selisih antara Keterlambatan Aktivitas Kritis Terburuk dan Keterlambatan Penyelesaian Proyek (Efek *Catch-Up*)

Skenario	BCt Aktivitas Terburuk (hari)	Keterlambatan Proyek (hari)	Ter-catch up (hari)	% Ter-catch up
$p = 30\%$	75,25	11	64,25	85,40%
$p = 40\%$	92,50	32	60,50	65,40%
$p = 50\%$	110,42	58	52,42	47,50%

Tabel 7. Ringkasan Gap Aktivitas Instrumentasi E&I Pasca-Puncak Keterlambatan (Skenario p = 50%)

Aktivitas	Gap (Hari)
Pressure Safety Valve	45,4
Pressure Control Valve	53,5
Pressure Transmitter	74,4

Pola ini mengungkap *trade-off* penting: semakin agresif pemotongan durasi (p semakin besar), semakin sempit ruang durasi rencana yang tersedia bagi aktivitas-aktivitas berikutnya untuk memampatkan jadwal, sehingga kapasitas *catch-up* menurun (dari 85,4% pada p = 30% menjadi 47,5% pada p = 50%). Dengan demikian, skenario p = 50% memberikan ketahanan buffer proporsional terbaik (Tabel 4), namun kapasitas *catch-up* paling terbatas terhadap keterlambatan aktivitas ekstrem merupakan *trade-off* yang perlu dipertimbangkan bersama, bukan sebagai kriteria yang berdiri sendiri, dalam pemilihan parameter RSEM pada proyek instalasi migas serupa.

Implikasi Praktis

Secara keseluruhan, temuan pada Subbab 3.3 – 3.5 menunjukkan bahwa ukuran *buffer* yang optimal secara matematis (baik dari sisi presisi analitis maupun durasi komitmen terpendek) tidak secara otomatis menjamin keandalan operasional terhadap deviasi ekstrem. Sinyal peringatan dini pada *Fever Chart* telah muncul sejak sepertiga awal durasi proyek (minggu ke-20 dari 61 minggu), jauh sebelum dampak kumulatif terakumulasi pada akhir proyek. Hal ini menegaskan bahwa manfaat CCPM pada proyek instalasi migas kompleks lebih bergantung pada disiplin pemantauan *Fever Chart* secara berkala (mingguan/weekly monitoring during execution) selama eksekusi berlangsung, dibandingkan dengan sekadar ketepatan perhitungan *buffer* di atas kertas. Kesimpulan ini melengkapi dan memperdalam temuan buffer utilization statis dalam studi terdahulu (Widyanto dkk., 2026). Sebagai arah pengembangan metodologis lanjutan, pendekatan RSEM konvensional yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilengkapi dengan metode dekomposisi jaringan (network decomposition) yang diusulkan oleh She dkk. (2021) dan Peng (2022), yang berpotensi memberikan estimasi *buffer* yang lebih sensitif terhadap struktur jaringan proyek dibandingkan RSEM konvensional, khususnya pada proyek dengan banyak titik pertemuan dalam *feeding chain* seperti pada kasus yang diteliti.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini mengajukan kerangka *back-testing* dinamis untuk mengevaluasi keandalan *buffer* CCPM pada proyek pemasangan kompresor ULP di Pamaguan Plant, PHSS, sebagai pelengkap evaluasi *buffer utilization* statis dalam studi terdahulu (Widyanto dkk., 2026). Kesimpulan disusun dengan mengacu langsung pada ketiga tujuan penelitian yang dirumuskan pada bagian Pendahuluan.

Pertama, terkait *back-testing* SWPA, BCI/*Fever Chart*, dan model Markov chain pada tiga skenario sensitivitas RSEM (p = 30/40/50%): evaluasi SWPA terhadap 815 aktivitas menunjukkan Indeks Progres Jadwal (IPJ_t) berada di bawah 1 pada sebagian besar periode pelaksanaan, dengan titik terendah pada minggu ke-16 (IPJ_t = 0,064) dan penyelesaian aktual tertinggal 7 minggu dari rencana. *Back-testing* BCI/*Fever Chart* mengungkap *trade off* penting: skenario RSEM dengan presisi analitis-simulasi terbaik (p = 30%) menghasilkan BCI akhir tertinggi (3,69), sedangkan skenario p = 50%, meskipun presisinya bukan yang terbaik (selisih 1,6%), justru menghasilkan BCI akhir terendah (3,24) secara proporsional, tetapi kapasitas *catch-up* paling terbatas. Seluruh skenario tetap berakhir pada Zona Merah, sehingga tidak satu pun skenario dapat diklaim mencapai ketahanan buffer absolut. Sebagai analisis pelengkap yang bersifat eksploratif dan berbasis sampel terbatas dari satu proyek tunggal, model Markov chain mengindikasikan potensi persistensi Zona Merah yang tinggi, dengan probabilitas

bertahan 95,5% dan distribusi stasioner jangka panjang sebesar 82,1%. Nilai ini perlu dipahami sebagai indikasi pola, bukan sebagai prediksi presisi yang dapat digeneralisasi ke proyek lain.

Kedua, terkait titik waktu dan mekanisme degradasi keandalan *buffer: Fever Chart* mengidentifikasi titik degradasi sejak minggu ke-20 dari 61 minggu observasi, dipicu oleh keterlambatan aktivitas “SPK Piling” dan diperparah oleh keterlambatan “Welding (joint) and Inspection” pada minggu ke-51. Secara mekanistik, degradasi ini didorong oleh konsentrasi deviasi durasi pada kelompok pekerjaan Struktur Baja, Elektrikal & Instrumentasi, dan Piping, yang konsisten dengan temuan Pareto pada studi terdahulu (Widyanto dkk., 2026), serta oleh besaran *project buffer* yang berbeda antarskenario: *buffer* yang lebih besar ($p = 50\%$) memberikan ketahanan proporsional yang lebih baik terhadap deviasi absolut yang sebanding, sehingga pemilihan tingkat pemotongan durasi RSEM turut menentukan seberapa cepat suatu proyek terdorong ke Zona Merah.

Ketiga, terkait peran mekanisme catch-up: jaringan *critical chain* terbukti menyerap 47,5–85,4% keterlambatan aktivitas individual, sehingga keterlambatan tersebut tidak merambat sepenuhnya ke tingkat proyek, dengan kapasitas *catch-up* yang menurun seiring semakin agresifnya pemotongan durasi (dari 85,4% pada $p = 30\%$ menjadi 47,5% pada $p = 50\%$). Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa pemilihan parameter *buffer sizing* pada proyek instalasi migas kompleks perlu mempertimbangkan kriteria ketahanan operasional berbasis *back-testing*, bukan semata-mata presisi matematis, serta menegaskan pentingnya pemantauan *Fever Chart* mingguan (near-real-time weekly monitoring) selama proyek berlangsung, sesuai dengan interval evaluasi 61 titik peninjauan mingguan yang digunakan pada penelitian ini.

Keterbatasan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, seluruh evaluasi CCPM bersifat retrospektif dan kontrafaktual: proyek yang dianalisis pada kenyataannya telah dilaksanakan menggunakan pendekatan CPM konvensional, sehingga hasil *back-testing* menggambarkan potensi kinerja CCPM, bukan hasil penerapan nyata di lapangan. Kedua, *critical chain* yang tervalidasi hanya mencakup tiga dari lima sumber daya kunci yang teridentifikasi (Tim Las, E&I, dan Alat Angkat); dua sumber daya lainnya (Sipil dan Piping & Mekanikal) dikeluarkan dari model karena bukti konflik kapasitas yang tidak masuk akal. Ketiga, model rantai Markov bersifat eksploratif dan diestimasi dari sampel yang sangat terbatas (50 transisi antarminggu dari satu proyek tunggal), sehingga hasilnya sebaiknya diinterpretasikan sebagai indikasi pola, bukan sebagai probabilitas yang presisi dan dapat digeneralisasi. Keempat, *Schedule-Weighted Progress Analysis* (SWPA) menggunakan bobot durasi aktivitas, bukan bobot biaya, sehingga tidak dapat dijadikan dasar untuk mengevaluasi kinerja biaya proyek. Kelima, BC_t sebagai indikator utama penelitian ini merupakan operasionalisasi yang dikembangkan dan diadaptasi sendiri oleh penulis (bukan ukuran *buffer consumption* baku yang telah divalidasi secara luas pada literatur CCPM), sehingga *construct validity*-nya belum diuji secara independen terhadap ukuran konsumsi *buffer* standar lain; validasi silang semacam ini disarankan pada penelitian mendatang. Keenam, karena penelitian ini menggunakan dataset proyek yang sama dengan studi terdahulu (Widyanto dkk., 2026), terdapat potensi bias familiaritas peneliti terhadap karakteristik data yang dapat memengaruhi interpretasi kualitatif hasil.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memvalidasi model rantai Markov pada proyek jamak (multi-project) guna memperkuat generalisasi estimasi probabilitas transisi antar zona risiko. Penelitian mendatang juga disarankan memvalidasi BC_t terhadap ukuran *buffer consumption* standar lain (misalnya *actual buffer penetration* yang dipantau langsung pada penerapan CCPM real-time) untuk menguji *construct validity*-nya secara independen, serta melakukan uji sensitivitas terhadap pilihan nilai *smoothing* (k) pada model Markov chain untuk

menilai seberapa besar hasil distribusi stasioner bergantung pada pilihan parameter tersebut. Integrasi data biaya aktual per aktivitas juga disarankan agar analisis kinerja jadwal dapat dilengkapi dengan *Earned Value Management* (EVM) standar, bukan hanya SWPA berbasis durasi. Selain itu, penentuan ukuran *project buffer* dan *feeding buffer* dapat dibandingkan antara *Root Square Error Method* (RSEM) dan simulasi Monte Carlo berbasis distribusi probabilitas durasi aktivitas yang lebih lengkap. Bagi praktisi, penerapan CCPM pada proyek instalasi migas serupa di masa mendatang disarankan disertai pemantauan *Fever Chart* secara berkala (mingguan) selama eksekusi berlangsung, khususnya terhadap sumber daya bersama seperti Alat Angkat yang menunjukkan proporsi konflik tertinggi di antara sumber daya tervalidasi, agar tindakan korektif dapat diambil segera setelah sinyal peringatan dini muncul, bukan menunggu hingga dampak kumulatif terjadi pada akhir proyek.

Kontribusi Author

Seluruh penulis berkontribusi secara signifikan terhadap penelitian ini. Kontribusi meliputi konseptualisasi penelitian, penyusunan kerangka teori, pengumpulan data, analisis data, interpretasi hasil, penulisan naskah, revisi ilmiah, serta persetujuan akhir atas naskah yang akan dipublikasikan. Seluruh penulis menyatakan telah membaca dan menyetujui versi final artikel ini.

Pernyataan Pengungkapan AI

Selama penyusunan naskah ini, penulis menggunakan Perplexity secara terbatas untuk mencari referensi penelitian (pencarian literatur awal berdasarkan kata kunci topik); alat tersebut tidak digunakan untuk menghasilkan, menulis, atau menyunting isi ilmiah naskah ini. Seluruh referensi yang diperoleh melalui pencarian tersebut telah diverifikasi secara mandiri oleh penulis terhadap sumber aslinya (artikel jurnal, prosiding, atau buku yang bersangkutan) sebelum dikutip. Penulis telah memeriksa dan menyunting kembali konten tersebut secara menyeluruh serta bertanggung jawab penuh atas seluruh isi publikasi ini.

Acknowledgment

Penelitian ini dibiayai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Institut Teknologi Kalimantan (LPPM-ITK) melalui Kontrak Penelitian No. 17388/IT10.L1/PPM.04/2026. Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Kalimantan atas dukungan akademik dan fasilitas penelitian yang diberikan. PT Pertamina Hulu Sanga Sanga telah menyediakan data proyek yang esensial bagi penelitian ini. Apresiasi khusus disampaikan kepada Indra Ariani atas dukungan dan kontribusinya yang berharga. Masukan konstruktif dari para reviewer dan editor telah meningkatkan kualitas naskah ini.

REFERENSI

- Cooper Ordoñez, R. E., Vanhoucke, M., Coelho, J., Anholon, R., & Novaski, O. (2019). A study of the critical chain project management method applied to a multiproject system. *Project Management Journal*, 50(3), 322–334. <https://doi.org/10.1177/8756972819832203>
- Davalu, B., Khosravi, M. J., Sheikhi, M. S., & Sheikhi, H. (2019). Comparison of the critical path method and critical chain project management effectiveness using inferential statistics in dam construction projects. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(8), 53–62.
- Ensannudin, & Perdana, S. (2023). Implementation of lean project management in the oil pipeline replacement project in the Rokan area. *Nusantara of Engineering*, 6(2), 109–117. <https://doi.org/10.29407/noe.v6i2.21095>

- Ghaffari, M., & Emsley, M. W. (2015). Current status and future potential of the research on critical chain project management. *Project Management Journal*, 46(1), 54–70. <https://doi.org/10.1002/pmj.21482>
- Goldratt, E. M. (1997). *Critical chain*. North River Press.
- Habibie, Y. H., & Ingketrta, E. (2025). Update on oil and gas security: Indonesia. In *Proceedings of the 8th Oil and Gas Security Network Forum*
- Ibaad, M. I., Siringoringo, M., Purnamasari, I., Yuniarti, D., & Suyitno. (2025). Application of the fuzzy time series Markov chain method to forecast electronic money transaction values in Indonesia. *Jurnal Gaussian*, 14(2), 290–301. <https://doi.org/10.14710/j.gauss.14.2.290-301>
- Leach, L. P. (1999). Critical chain project management improves project performance. *Project Management Journal*, 30(2), 39–51. <https://doi.org/10.1177/875697289903000207>
- Ljiljanić, N., Rajić, Z., & Paunović, T. (2022). Use of PERT (program evaluation and review technique) and PDM (precedence diagramming method) in organizing modern vegetable seedling production. *Ekonomika Poljoprivrede*, 69(1), 119–138. <https://doi.org/10.5937/ekoPolj2201119L>
- Loban, J. M. (2022). Analisis Markov untuk perpindahan merek kartu GSM (studi kasus mahasiswa FMIPA Universitas Tribuana Kalabahi). *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(2), 151–158. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6090242>
- Maheswari, J. U., Charlesraj, V. P. C., Goyal, A., & Mujumdar, P. (2015). Application of relationship diagramming method (RDM) for resource-constrained scheduling of linear construction projects. *Procedia Engineering*, 123, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.095>
- Mahmoodzadeh, A., Mohammadi, M., Abdulhamid, S. N., Nejati, H. R., Gharrib Noori, K. M., Ibrahim, H. H., & Hama Ali, H. F. (2021). Predicting construction time and cost of tunnels using Markov chain model considering opinions of experts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 116, 104109. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104109>
- Martens, A., & Vanhoucke, M. (2017). A buffer control method for top-down project control. *European Journal of Operational Research*, 262(1), 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.034>
- Mirayudia, L. E. G., Bintana, I. B. P., & Paramita, I. G. A. P. D. (2021). Analysis of lean construction methods and CCPM scheduling in reducing non-physical construction waste (case study: PKP-PK building construction project at I Gusti Ngurah Rai Airport). *Proceedings of the National Vocational Civil Engineering Seminar*, 9(1), 274–282.
- Newbold, R. C. (1998). *Project management in the fast lane: Applying the theory of constraints*. CRC Press.
- Nisar, A., & Suzuki, K. C. (2015). Critical activity effect on project duration in precedence diagram method scheduling network. In *Proceedings of the International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES)* (pp. 314–322). <https://doi.org/10.5220/0005281503140322>
- Nugroho, D. T., & Suroso, A. (2023). Penggunaan critical chain project management method terhadap perencanaan waktu pelaksanaan fly over jalan tol. *Jurnal Konstruksia*, 14(2), 44–65. <https://doi.org/10.24853/jk.14.2.44-65>
- Oliveira, J., & Santos, J. (2015). Critical activity effect on project duration in the precedence diagram method. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP)* (pp. 367–374).
- Peng, J., & Peng, C. (2022). Buffer sizing in critical chain project management by brittle risk entropy. *Buildings*, 12(9), 1390. <https://doi.org/10.3390/buildings12091390>
- Piney, C. (2017). A new view of the precedence diagramming model. *PM World Journal*, 6(1), 1–12.

- Project Management Institute. (2019). *The standard for earned value management (ANSI/PMI 19-006-2019)*. Project Management Institute.
- Rudeli, N., Santilli, A., Puente, I., & Viles, E. (2017). Statistical model for schedule prediction: Validation in a housing-cooperative construction database. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(11), 04017083. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001396](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001396)
- Sarwani, S., Baihaqi, I., & Utomo, C. (2024). Causes of delay in EPC projects: The case of Indonesia. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 14(2), 618–628. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.19744>
- She, B., Chen, B., & Hall, N. G. (2021). Buffer sizing in critical chain project management by network decomposition. *Omega*, 102, 102382. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102382>
- Soltan, S., & Ashrafi, M. (2025). Application of reinforcement learning for integrating project risk analysis and risk response planning: A case study on construction projects. *Journal of Project Management*, 10, 71–86. <https://doi.org/10.5267/j.jpm.2024.11.001>
- Son, B.-Y., & Lee, E.-B. (2019). Using text mining to estimate schedule delay risk of 13 offshore oil and gas EPC case studies during the bidding process. *Energies*, 12(10), 1956. <https://doi.org/10.3390/en12101956>
- Sugiyanto, & Umam, A. N. (2021). Analysis of project implementation time performance using the performance intensity method. *Rang Teknik Journal*, 4(1), 52–67. <https://doi.org/10.31869/rtj.v4i1.2100>
- Sukmono, T., & Lesmana, M. S. (2023). Implementasi Markov chain untuk meminimumkan biaya perawatan mesin spiral menggunakan enumerasi sempurna. *Jurnal Teknik Industri*, 9(1), 132–143. <https://doi.org/10.24014/jti.v8i2.21081>
- Tian, M., Liu, R. J., & Zhang, G. J. (2019). Solving the resource-constrained multi-project scheduling problem with an improved critical chain method. *Journal of the Operational Research Society*, 71(8), 1243–1258. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1609883>
- Widyanto, D., Ernawati, L., Nurcholik, S. D., Ginting, R. R., & Huda, T. (2026). Comparative evaluation of Critical Path Method and Critical Chain Project Management for ultra low-pressure compressor installation in the oil and gas industry. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 11(2), 566–577. <https://doi.org/10.12962/j25481479.v11i2>
- Wijaya, D. E., Rasyid, N. A., Tandirerung, N. W., Rahayu, M. A., Al Faruqi, F., Ekasari, M., Erliana, D., & Putri, A. R. (2024). Application of the Markov chain method to predict rice crop yields in Bulukumba Regency. *Journal of Mathematics, Computations, and Statistics*, 7(2), 323–338. <https://doi.org/10.35580/jmathcos.v7i2.4432>
- Wilkens, T. T. (2000). Critical path, or chain, or both? *PM Network*, 14(7), 68–74.