

Pengembangan Model Adaptive Work Breakdown Structure dan Dynamic Critical Path Method untuk Optimasi Docking Armada Tug & Barge Berbasis Supply Chain Opportunity Cost pada PT XYZ

Wisely Josua Parsaoran Siburian*, Silvianita

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email : 6032242013@student.its.ac.id*

Keywords:

Docking, Work Breakdown Structure, Critical Path Method (CPM), Time-Cost Trade-Off (TCTO), Opportunity Cost, Tug & Barge



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Riviera Publishing

Kata Kunci:

Docking, Struktur Rincian Kerja, Metode Jalur Kritis (CPM), Time-Cost Trade-Off (TCTO), Biaya Peluang, Tunda & Tongkang

Abstract

The maritime logistics industry for energy commodities heavily relies on the operational reliability of Tug & Barge fleets. PT XYZ faces challenges with prolonged vessel downtime during docking processes, which triggers financial losses stemming from increased direct shipyard repair costs and supply chain opportunity costs in downstream coal distribution. This study aims to formulate an optimal docking acceleration strategy for PT XYZ's Tug & Barge fleet through the integration of the Work Breakdown Structure (WBS) and the Critical Path Method (CPM). A quantitative-descriptive approach using a case study method is employed to analyze historical data and field interviews. The WBS is hierarchically designed down to the work package level, strictly incorporating the Indonesian Classification Bureau (BKI) statutory regulations to accommodate potential unforeseen work. Critical path analysis (CPM) is utilized to map the sequence of activities dictating the total project duration, which is subsequently optimized through scheduling compression techniques (crashing and fast-tracking). The novelty of this research lies in the modification of the Time-Cost Trade-Off (TCTO) optimization by integrating the Supply Chain Opportunity Cost (SCOC) into the total cost calculation. The results of this study are expected to provide tactical docking scheduling recommendations, minimize fleet downtime, while securing the reliability of the national coal supply chain.

Abstrak

Industri logistik maritim untuk komoditas energi sangat bergantung pada keandalan operasional armada Tug & Barge. PT XYZ menghadapi tantangan dengan waktu henti kapal yang berkepanjangan selama proses docking, yang memicu kerugian finansial akibat meningkatnya biaya perbaikan langsung galangan kapal dan biaya peluang rantai pasokan dalam distribusi batu bara hilir. Studi ini bertujuan merumuskan strategi percepatan docking yang optimal untuk armada Tug & Barge PT XYZ melalui integrasi Work Breakdown Structure (WBS) dan Critical Path Method (CPM). Pendekatan kuantitatif-deskriptif menggunakan metode studi kasus digunakan untuk menganalisis data historis dan wawancara lapangan. WBS dirancang secara hierarkis hingga tingkat paket kerja, secara ketat menggabungkan peraturan undang-undang Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) untuk mengakomodasi potensi pekerjaan tak terduga. Critical path analysis (CPM) digunakan untuk memetakan urutan aktivitas yang menentukan total durasi proyek, yang kemudian dioptimalkan melalui teknik kompresi penjadwalan (crashing dan fast-tracking).

Kebaruan penelitian ini terletak pada modifikasi optimasi Time-Cost Trade-Off (TCTO) dengan mengintegrasikan Supply Chain Opportunity Cost (SCOC) ke dalam perhitungan total biaya. Hasil studi ini diharapkan memberikan rekomendasi penjadwalan docking taktis, meminimalkan waktu henti armada, sekaligus menjamin keandalan rantai pasokan batu bara nasional.

PENDAHULUAN

Industri logistik maritim komoditas energi merupakan pilar strategis bagi ketahanan energi nasional dan kelancaran rantai pasok global (Lee, Kwon, & Ruan, 2019; PT Adaro Logistics, 2024; Purnomo & Tjendrasa, 2020). Dalam distribusi batubara di Indonesia, transportasi perairan pedalaman memegang peran yang tidak tergantikan: tongkang (barge) yang ditarik kapal tunda (tugboat) menjadi moda angkut curah kering utama sepanjang jalur sungai menuju titik transshipment laut lepas (Hao, Jin, & Zhao, 2023). PT XYZ mengoperasikan armada Tug & Barge berskala besar, terutama di koridor Sungai Barito menuju titik tambat kapal besar maupun langsung ke pembangkit listrik (PLTU) domestik, dan studi terdahulu menegaskan bahwa kesiapan armada (vessel availability) merupakan determinan utama kelancaran distribusi batubara dari hulu ke hilir (Purnomo, 2018).

Siklus kerja yang tinggi serta tantangan lingkungan yang ekstrem, yaitu sedimentasi sungai, fluktuasi pasang surut, benturan alat bongkar muat, dan korosi akibat paparan batubara basah, mempercepat keausan struktural armada. Kondisi ini menuntut perawatan periodik di galangan melalui pengedokan (docking) yang diatur secara statutori oleh Biro Klasifikasi Indonesia (2024). Docking yang berlarut-larut menimbulkan kerugian finansial berlapis, yakni pembengkakan biaya langsung berupa sewa dok (Kusumadwitya, Mulyatno, & Mursid, 2023; Mulyatno et al., 2024) dan opportunity cost pada rantai pasok hilir berupa gangguan loading rate, penumpukan stockpile, serta risiko demurrage mother vessel (Purnomo, 2018; Hao et al., 2023).

Dari sisi metodologis, integrasi Work Breakdown Structure (WBS) dan Critical Path Method (CPM) terbukti efektif mengurangi ketidakpastian penjadwalan proyek reparasi kapal tunda maupun tongkang (Diswantoro, 2024; Suyuti & Basuki, 2022; Regatama, Amiruddin, & Mulyatno, 2019; Syahada, Rindo, Santosa, & Prasetyo, 2024). Namun, penelitian terdahulu umumnya mengasumsikan ruang lingkup pekerjaan yang statis dan belum memasukkan opportunity cost rantai pasok ke dalam model biaya. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan model Adaptive WBS yang dilengkapi Dynamic CPM sehingga jaringan kerja dapat dihitung ulang secara real-time ketika ditemukan pekerjaan tambahan (unforeseen work), kemampuan yang belum banyak diadopsi pada studi docking tongkang maupun tugboat sebelumnya (Silvianita, Aprillia, Mulyadi, Citrosiswoyo, & Suntoyo, 2018; Zakia & Febrianti, 2021). Penelitian tesis ini berjudul “Pengembangan Model Adaptive Work Breakdown Structure dan Dynamic Critical Path Method untuk Optimasi Docking Armada Tongkang Berbasis Supply Chain Opportunity Cost pada PT XYZ”.

Merancang model Adaptive WBS untuk proyek docking armada Tug & Barge PT XYZ hingga tingkat paket pekerjaan (work package), dengan mekanisme kontingensi ruang lingkup agar pekerjaan tambahan dapat diakomodasi tanpa mengacaukan struktur WBS baseline.

Bagi PT XYZ, penelitian ini menyediakan pedoman taktis dan model penjadwalan ilmiah yang dapat diterapkan tim Technical/Fleet Management untuk mengendalikan dan memitigasi keterlambatan serta mempercepat docking, sehingga utilitas armada optimal, biaya operasional minimal, dan distribusi batubara dalam rantai pasok tetap lancar. Bagi mitra galangan kapal, hasil penelitian menjadi bahan evaluasi dan koordinasi untuk menyelaraskan alur kerja antara pemilik kapal dan galangan, sehingga docking turn-around time lebih singkat dan kapasitas galangan melayani armada lain meningkat. Bagi dunia akademis, penelitian ini menambah literatur empiris tentang penerapan manajemen proyek kontemporer, khususnya integrasi WBS dan CPM, pada sektor maritim yang spesifik, yaitu operasi armada Tug & Barge penunjang komoditas energi yang bersiklus kerja tinggi dan padat modal.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan metode studi kasus pada proyek docking armada Tug & Barge PT XYZ. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengukur dan menganalisis variabel yang dapat dihitung secara matematis, yaitu durasi aktivitas, jalur kritis, biaya proyek, dan alternatif percepatan. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual docking dan karakteristik operasional armada. Studi kasus dipilih karena penelitian berfokus pada satu organisasi dengan karakteristik spesifik sebagai pendukung rantai pasok batubara.

Penelitian dilaksanakan dalam empat tahap. Tahap pertama adalah inisiasi, meliputi studi pendahuluan docking downtime, perumusan masalah, dan kajian literatur. Tahap kedua adalah pengumpulan data. Tahap ketiga adalah pengolahan data melalui penyusunan WBS dan WBS Dictionary, penentuan predecessor, perhitungan CPM, identifikasi jalur kritis, simulasi crashing, dan perhitungan cost slope. Tahap keempat adalah evaluasi dampak percepatan terhadap opportunity cost rantai pasok serta penyusunan rekomendasi.

Pengumpulan Data dan Definisi Variabel

Data primer diperoleh melalui wawancara terstruktur dengan Port Engineer, Fleet Manager, dan Project Manager galangan untuk memvalidasi urutan ketergantungan aktivitas dan batas percepatan (crash limit), serta observasi lapangan terhadap proses docking dan pekerjaan tambahan (unforeseen work). Data sekunder meliputi standard repair list, laporan harian proyek docking historis periode 2024–2026, rincian biaya (RAB closing), tarif sewa fasilitas dok, dan tarif charter armada. Variabel operasional penelitian meliputi paket pekerjaan (work package), durasi normal (NT), durasi percepatan (CT), biaya normal (NC), biaya percepatan (CC), dan jalur kritis (rangkaian aktivitas dengan total float = 0).

Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan dalam lima langkah. Pertama, repair list disusun menjadi WBS berorientasi serahan hingga Level 4 dengan kode akun unik. Kedua, hubungan antaraktivitas dipetakan dengan Precedence Diagramming Method menggunakan relasi Finish-to-Start. Ketiga, jalur kritis dihitung dengan algoritma CPM melalui hitungan maju dan mundur:

$$EF_i = ES_i + t_i; \quad ES = \max(EF \text{ predecessor}); \quad LS_i = LF_i - t_i; \quad LF = \min(LS \text{ successor}); \quad TF_i = LS_i - ES_i$$

Keempat, crashing dilakukan dengan menghitung cost slope setiap aktivitas kritis, mengompresi aktivitas dengan cost slope terkecil satu hari demi satu hari, lalu menghitung ulang jaringan untuk mendeteksi munculnya jalur kritis baru hingga mencapai crash limit atau titik optimal.

$$\text{Cost Slope} = (\text{CC} - \text{NC}) / (\text{NT} - \text{CT})$$

Kelima, analisis Time-Cost Trade-Off (TCTO) membandingkan total biaya setiap skenario, dengan biaya tidak langsung yang diperluas mencakup Supply Chain Opportunity Cost (SCOC), yaitu kehilangan pendapatan harian akibat kapal tidak beroperasi:

$$\text{TC} = \sum \text{DC}_i + (\text{IC} \times \text{T}) + (\text{OC} \times \text{T})$$

Pada rumus tersebut, DC adalah biaya langsung, IC adalah biaya tidak langsung harian (sewa fasilitas dok), OC adalah opportunity cost harian, dan T adalah durasi proyek. Skenario terpilih adalah skenario dengan TC minimum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data Historis Docking

Data historis tiga proyek docking PT XYZ (Tabel 1) menunjukkan pola perpanjangan durasi akibat pekerjaan tambahan yang teridentifikasi setelah marking dan survei kondisi aktual kapal.

Tabel 1. Rekapitulasi Durasi dan Biaya Docking Historis Armada PT XYZ

Proyek	Jenis Kapal	Rencana (hari)	Realisasi (hari)	Deviasi (hari)	Biaya Realisasi (Rp)	Keterangan
Docking 1	Tug & Barge (Floating Crane)	34	57 (on-dock)	+23	2.958.871.709	Pier-to-pier ≈ 77 hari; pekerjaan tambahan signifikan pada replating dan steelwork
Docking 2	Tug & Barge (Crane Barge)	35	35	0	–	Kontrak awal 15 hari, bertambah 15 + 5 hari akibat dua putaran temuan marking survey
Docking 3	Floating Crane/Crane Barge	–	28	–	–	Intermediate survey; pier-to-pier 60 hari

Pada Docking 2, durasi kontrak awal 15 hari meningkat 133% menjadi 35 hari, sedangkan pada Docking 1 durasi realisasi mencapai hampir dua kali rencana. Perbandingan bobot rencana kontrak dengan biaya realisasi Docking 1 per kategori pekerjaan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Bobot Rencana Kontrak dan Proporsi Biaya Realisasi per Kategori Pekerjaan (Docking 1)

Kategori Pekerjaan	Bobot Rencana (%)	Biaya Realisasi (Rp)	Proporsi Realisasi (%)	Deviasi (pp)
Docking & Undocking	4,77	92.600.000	3,13	–1,64
General Service	10,04	202.556.000	6,85	–3,19
Cleaning	3,60	140.750.000	4,76	+1,16
Blasting & Painting + Supply Paint	14,40	173.285.088	5,86	–8,54
Outfitting	11,75	552.752.062	18,68	+6,93
Steel Work / Replating	9,28	638.908.716	21,59	+12,31
Piping Work	12,13	492.194.094	16,63	+4,50
Mechanical Work	13,07	252.540.000	8,54	–4,53
Electrical	10,61	284.515.000	9,62	–0,99
Carpentry	10,34	127.860.750	4,32	–6,02
Lain-lain (material tambahan)	–	910.000	0,03	–
Total	100,00	2.958.871.709	100,00	

Bobot Blasting & Painting merupakan gabungan Blasting & Painting (10,61%) dan Supply Paint (3,79%).

Replating, Outfitting, dan Piping Work bersama-sama menyerap 56,9% biaya realisasi, jauh di atas 33,2% yang direncanakan. Sebaliknya, pekerjaan non-struktural seperti Carpentry dan Mechanical terealisasi di bawah rencana. Pola ini menunjukkan bahwa kompleksitas pekerjaan struktural cenderung diestimasi terlalu rendah. Intensitas sumber daya juga memperlihatkan pola yang sama (Tabel 3).

Tabel 3. Ringkasan Man-Days per Bidang Pekerjaan pada Docking Historis

Bidang Pekerjaan	Total Man-Days (pax-hari)	Hari Aktif Kerja	Puncak Tenaga Kerja (pax/hari)	Proporsi (%)
Cleaning	105	13	12	8,7
MEPC (Mechanical-Electrical-Piping-Coating)	99	28	6	8,2
Replating (Steel Work)	1.005	64	30	83,1
Total	1.209	—	—	100,0

Replating menyerap 83,1% man-days selama 64 hari aktif kerja, dengan lonjakan tenaga kerja dari 10–14 pax menjadi 20–30 pax per hari pada minggu ketiga hingga kelima akibat temuan marking lanjutan. Kesenjangan antara bobot kontrak dan intensitas sumber daya ini menjadi indikator kuantitatif unforeseen work dan dasar penetapan Replating & Steel Work sebagai kandidat utama jalur kritis.

Penyusunan WBS Adaptif

WBS disusun berorientasi serahan hingga empat level, yaitu proyek docking (Level 1), kelompok kerja (Level 2), paket pekerjaan per area (Level 3), dan aktivitas rinci (Level 4). Sepuluh kelompok kerja Level 2 diberi kode A–J, misalnya D (Steel Work/Replating) yang terurai menjadi D.1 Replating Lambung (15 hari), D.2 Replating Main Deck (10 hari), dan D.3 Replating Struktur Internal (10 hari). WBS Dictionary mendokumentasikan deliverable, PIC, dan durasi normal setiap paket pekerjaan. Sifat adaptif WBS terletak pada ruang eksplisit untuk menambahkan subkode baru (misalnya D.4, D.5) apabila ditemukan unforeseen work saat pelaksanaan. Hal inilah yang membedakannya dari WBS konvensional yang menutup penambahan lingkup setelah kontrak disepakati.

Jaringan Kerja dan Jalur Kritis (CPM)

Dua belas aktivitas disusun dengan logika Finish-to-Start mengikuti alur docking aktual. Hasil hitungan maju dan mundur disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Aktivitas, Predecessor, Durasi Normal, dan Hasil Perhitungan CPM

Kode	Aktivitas	Predecessor	Durasi (hari)	ES	EF	LS	LF	TF	Status
A	Slip-Up (Docking)	–	1	0	1	0	1	0	Kritis
B	General Service & Survei Awal	A	2	1	3	1	3	0	Kritis
C	Cleaning (Tangki & General)	B	5	3	8	3	8	0	Kritis
D	Replating & Steel Work	C	35	8	43	8	43	0	Kritis
E	Blasting & Painting Lambung	D	10	43	53	46	56	3	–
F	Outfitting (Winch, Jangkar, Mooring)	D	12	43	55	44	56	1	–
G	Piping System	D	12	43	55	44	56	1	–
H	Mechanical Work	D	10	43	53	43	53	0	Kritis
I	Electrical Work	H	3	53	56	53	56	0	Kritis
J	Carpentry & Interior	D	8	43	51	48	56	5	–
K	Final Survey Class & Persiapan Undocking	E, F, G, I, J	2	56	58	56	58	0	Kritis
L	Slip-Down (Undocking)	K	1	58	59	58	59	0	Kritis

Durasi total proyek pada kondisi normal adalah 59 hari dengan jalur kritis A → B → C → D → H → I → K → L. Replating & Steel Work menyumbang 35 dari 59 hari (59,3%), sejalan dengan temuan data historis bahwa replating merupakan sumber utama keterlambatan. Electrical Work menjadi kritis karena EF-nya (hari ke-56) merupakan yang terbesar di antara predecessor K. Aktivitas paralel lain memiliki float 1–5 hari, sehingga tenaga kerja dari aktivitas dengan float besar, seperti Carpentry (TF = 5 hari), dapat dialihkan ke aktivitas kritis tanpa memengaruhi durasi proyek.

Analisis Crashing

Crashing hanya diterapkan pada aktivitas kritis yang dapat dipercepat, yaitu D, H, dan I. Slip-up, general service, cleaning, final survey, dan slip-down terikat prosedur baku galangan dan waktu tunggu keselamatan (gas-freeing). Crash limit replating dihitung dari produktivitas aktual 0,1286 ton/hari/tim (1 tim = 10 pax) untuk lingkup 27 ton. Dengan 6 tim (kondisi normal) durasinya 35 hari, sedangkan dengan 10 tim (kapasitas maksimum area lambung) durasinya 21 hari.

Tabel 5. Data Crashing dan Cost Slope Aktivitas Kritis

Kode	Aktivitas	NT (hari)	CT (hari)	Normal Cost (Rp)	Crash Cost (Rp)	Cost Slope (Rp/hari)	Ranking
D	Replating & Steel Work	35	21	638.908.716	773.079.546	9.583.631	1
H	Mechanical Work	10	7	252.540.000	315.675.000	21.045.000	2
I	Electrical Work	3	2	284.515.000	355.643.750	71.128.750	3

Normal cost berasal dari RAB closing Docking 1. Crash cost replating mengasumsikan 40% material dan 60% jasa dengan premi lembur +35% pada komponen jasa; Mechanical dan Electrical memakai premi +25%.

Berbasis biaya aktual, Replating & Steel Work justru memiliki cost slope terendah, sedangkan Electrical Work tertinggi karena nilai pekerjaannya besar (Rp284,5 juta) untuk durasi hanya 3 hari. Kompresi dilakukan secara iteratif (Tabel 6).

Tabel 6. Iterasi Crashing pada Titik-Titik Penting

Iterasi	Aktivitas Dikompresi	Durasi D (hari)	Durasi H (hari)	Durasi Proyek (hari)	Direct Cost (Rp)
0	– (normal)	35	10	59	2.977.961.710
1	D	34	10	58	2.987.545.341
7	D	28	10	52	3.045.047.125
14	D (crash limit)	21	10	45	3.112.132.540
15	H	21	9	44	3.133.177.540
16	H	21	8	44	3.154.222.540

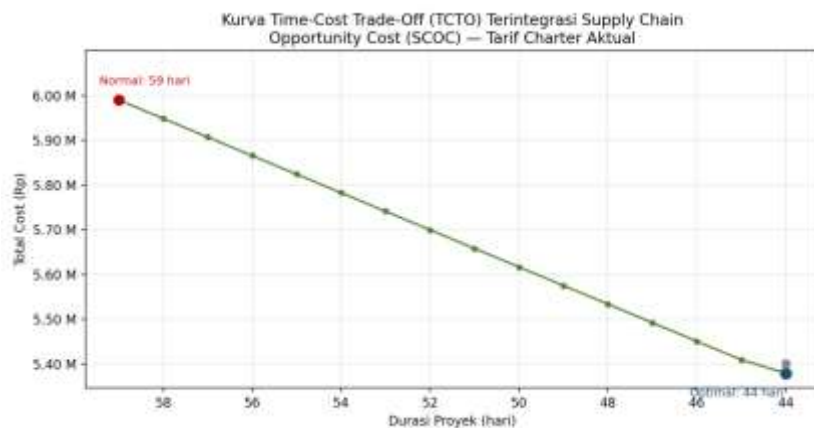
Aktivitas D dikompresi penuh pada iterasi 1–14 (35 → 21 hari), kemudian H dikompresi pada iterasi 15 sehingga durasi proyek menjadi 44 hari. Iterasi 16 tidak lagi menurunkan durasi karena jalur paralel F/G (12 hari, tidak dapat dikompresi) menjadi pengendali durasi baru, sehingga iterasi ini hanya menambah biaya dan tidak dipilih. Electrical Work tidak pernah dikompresi karena cost slope-nya selalu lebih mahal daripada D dan H.

Analisis TCTO Terintegrasi SCOC

Biaya tidak langsung menggunakan tarif sewa fasilitas dok aktual sebesar Rp1.050.000/hari, sedangkan opportunity cost dihitung dari tarif charter aktual Rp1,5 miliar/bulan, atau sekitar Rp50.000.000/hari. Perbandingan skenario normal dan optimal disajikan pada Tabel 7 dan Gambar 1.

Tabel 7. Perbandingan Skenario Normal dan Skenario Optimal Hasil TCTO

Komponen	Skenario Normal	Skenario Optimal	Selisih
Durasi proyek (hari)	59	44	-15 (-25,4%)
Direct Cost (Rp)	2.977.961.710	3.133.177.540	+155.215.830
Indirect Cost (Rp)	61.950.000	46.200.000	-15.750.000
Opportunity Cost/SCOC (Rp)	2.950.000.000	2.200.000.000	-750.000.000
Total Cost (Rp)	5.989.911.710	5.379.377.540	-610.534.170 (-10,2%)

**Gambar 1.** Kurva Time-Cost Trade-Off Terintegrasi Supply Chain Opportunity Cost

Titik optimal berada pada durasi 44 hari dengan penghematan total biaya Rp610,5 juta (10,2%), meskipun biaya langsung naik Rp155,2 juta. Tanpa SCOC, TCTO konvensional akan menyimpulkan bahwa crashing tidak menguntungkan, karena kenaikan biaya langsung (Rp155,2 juta) jauh melebihi penghematan biaya tidak langsung (Rp15,75 juta). Dengan SCOC, percepatan hingga 44 hari terbukti menguntungkan, tetapi harus selektif berdasarkan cost slope setiap aktivitas, bukan dengan mempercepat semua pekerjaan kritis.

Tabel 8. Sensitivitas Durasi Optimal dan Penghematan terhadap Variasi Opportunity Cost

Variasi	Opportunity Cost (Rp/hari)	Durasi Optimal (hari)	Penghematan Total Cost (%)
-30%	35.000.000	44	7,6
-20%	40.000.000	44	8,5
-10%	45.000.000	44	9,4
0% (nilai aktual)	50.000.000	44	10,2
+10%	55.000.000	44	10,9
+20%	60.000.000	44	11,6
+30%	65.000.000	44	12,2

Durasi optimal 44 hari bersifat robust pada seluruh rentang $\pm 30\%$, karena gabungan biaya tidak langsung dan opportunity cost harian (Rp36,05–66,05 juta) selalu berada di atas cost slope D (Rp9,58 juta) dan H (Rp21,05 juta), tetapi di bawah cost slope I (Rp71,13 juta). Yang berubah secara linear hanya besaran penghematan, yaitu 7,6%–12,2%. Dengan demikian, rekomendasi tetap valid meskipun tarif charter berfluktuasi.

Pembahasan dan Implikasi Manajerial

Penelitian ini menghasilkan tiga temuan utama. Pertama, replating dan steel work merupakan sumber dominan unforeseen work dan downtime, sehingga WBS perlu dirancang adaptif. Kedua, jalur kritis didominasi aktivitas persiapan dan pekerjaan struktural-mekanikal-elektrikal dengan durasi normal 59 hari. Ketiga, keputusan percepatan yang optimal bersifat selektif: Replating & Steel Work dan Mechanical Work layak dipercepat, sedangkan Electrical Work sebaiknya tidak dipercepat. Posisi penelitian ini terhadap studi terdahulu disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan Cakupan Metodologis dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian	Objek Studi	WBS Adaptif	CPM	Crashing	Integrasi SCOC
Dev & Saha (2021)	Benchmarking waktu dan tenaga kerja reparasi kapal	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak
Diswantoro (2024)	Pembangunan Tugboat 156,67 DWT	Tidak	Ya	Tidak	Tidak
Iqbal dkk. (2023)	Reschedule reparasi TB. Pancaran 811 & BG. Alika 101	Sebagian	Ya	Tidak	Tidak
Kusumadwitya dkk. (2023)	Pembangunan kapal tanker 7900 DWT	Tidak	Ya	Ya	Tidak
Hao dkk. (2023)	Joint scheduling barge-tugboat (rantai pasok)	Tidak	Tidak	Tidak	Sebagian
Penelitian ini	Docking armada Tug & Barge PT XYZ (kasus riil)	Ya	Ya	Ya	Ya

Implikasi praktisnya adalah sebagai berikut:

- Tahap kontrak: WBS adaptif dimasukkan ke dalam dokumen kontrak disertai klausul batas waktu persetujuan pekerjaan tambahan pasca-marking.
- Tahap survei dan marking: penyelesaian marking area replating diprioritaskan di awal docking.
- Tahap pelaksanaan: opsi penambahan tim untuk replating dan mechanical disiapkan sebagai standar operasi, sedangkan pekerjaan kelistrikan tidak dimasukkan dalam skema percepatan rutin.
- Tahap evaluasi: RAB closing setiap proyek didokumentasikan secara konsisten untuk memperkaya basis data dan meningkatkan akurasi model WBS-CPM-TCTO.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data pada Bab IV, penelitian ini menghasilkan empat kesimpulan utama. Pertama, model Adaptive Work Breakdown Structure berhasil disusun hingga tingkat work package (Level 3) yang mencakup 18 paket pekerjaan dengan struktur kode yang fleksibel terhadap penambahan subkode baru tanpa mengubah baseline WBS. Penerapan model ini terbukti relevan dalam mengakomodasi perubahan pekerjaan, khususnya pada aktivitas Replating & Steel Work. Meskipun hanya memiliki bobot 21,59% dari volume kontrak, aktivitas tersebut menyerap 83,1% dari total man-days akibat dua putaran unforeseen work pada tahap marking. Temuan ini menunjukkan pentingnya struktur WBS yang adaptif dalam mengakomodasi pekerjaan tambahan selama proses docking. Kedua, penerapan Dynamic Critical Path Method menunjukkan bahwa durasi jalur kritis meningkat dari 39 hari pada kondisi baseline menjadi 59 hari pada kondisi dinamis. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh bertambahnya durasi pekerjaan Replating & Steel Work dari 15 menjadi 35 hari, tanpa mengubah komposisi aktivitas pada jalur kritis, yaitu $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow L$. Hasil tersebut menegaskan bahwa Replating & Steel Work merupakan aktivitas paling kritis yang perlu mendapatkan perhatian dan pengendalian sejak tahap perencanaan hingga pelaksanaan proyek. Ketiga, integrasi Supply Chain Opportunity Cost ke dalam formulasi Time-Cost Trade-Off (TCTO-SCOC) terbukti memengaruhi keputusan strategi percepatan proyek. Model TCTO konvensional yang tidak memperhitungkan Opportunity Cost akan menyimpulkan bahwa percepatan melalui crashing tidak layak dilakukan. Sebaliknya, dengan mempertimbangkan Opportunity Cost berdasarkan tarif charter aktual sebesar Rp50.000.000 per hari, strategi percepatan menghasilkan penghematan total biaya sebesar Rp610.534.170 atau 10,2%. Hasil ini juga menunjukkan ketahanan model terhadap fluktuasi tarif charter hingga $\pm 30\%$, sehingga pertimbangan biaya peluang menjadi faktor penting dalam pengambilan keputusan percepatan proyek docking.

PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada dukungan finansial yang diterima untuk pelaksanaan penelitian ini dan/atau penerbitan artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Seluruh penulis berkontribusi dalam penyusunan konsep penelitian, pengembangan metodologi, pengumpulan dan analisis data, penyusunan naskah, serta revisi naskah. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir naskah.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Penulis menyatakan bahwa kecerdasan artifisial (AI) generatif digunakan dalam penyusunan manuskrip ini. Penulis mengakui penggunaan AI generatif untuk membantu meningkatkan kejelasan bahasa dan memperbaiki struktur tata bahasa manuskrip. Penggunaan tersebut dilakukan dengan mematuhi pedoman etika yang berlaku mengenai penggunaan dan pengungkapan AI generatif dalam penelitian ilmiah. Setiap penulis telah memberikan kontribusi intelektual yang substansial terhadap karya ini. Seluruh isi manuskrip telah ditelaah

secara cermat untuk memastikan keakuratannya, dan penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas integritas serta isi akhir manuskrip

REFERENSI

- Biro Klasifikasi Indonesia. (2024a). Guidelines for docking survey and underwater inspection. BKI.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2024b). Rules for classification and surveys of ships, Part 1: Classification and surveys. BKI.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2024c). Rules for hull construction and maintenance. BKI.
- Burke, R. (2018). Project management: Planning and control techniques (6th ed.). Routledge.
- Chou, J. S., & Yang, J. G. (2018). Project management knowledge and effects on construction project outcomes. *Automation in Construction*, 92, 1–12.
- Dev, A., & Saha, M. (2021). Ship repairing time and labour. MARTECH 2017: 12th Biennial International Conference and Exhibition, Towards 2030: Maritime Sustainability through People and Technology. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=3753689>
- Diswanto, G. P. (2024). Analisis optimalisasi jadwal dengan menggunakan Critical Path Method (CPM) pada proyek pembangunan kapal Tugboat 156,67 DWT. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 12(1). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/43220>
- Gray, C. F., & Larson, E. W. (2021). Project management: The managerial process (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Hao, L., Jin, J. G., & Zhao, K. (2023). Joint scheduling of barges and tugboats for river–sea intermodal transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 173, 103106.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2020). Operations management: Sustainability and supply chain management (13th ed.). Pearson.
- International Maritime Organization. (2023a). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). IMO.
- International Maritime Organization. (2023b). International Safety Management Code (ISM Code). IMO.
- International Maritime Organization. (2024). Guidelines on ship maintenance and repair management. IMO.
- Iqbal, M. F., Santosa, A. W. B., & Trimulyono, A. (2023). Reschedule reparasi kapal TB. Pancaran 811 dan BG. Alika 101. *Jurnal Teknik Perkapalan*. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/38061/0>
- Kerzner, H. (2022). Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling (13th ed.). Wiley.
- Kusumadwitya, A., Mulyatno, I. P., & Mursid, O. (2023). Analisis optimalisasi waktu dan biaya pada proyek pembangunan kapal angkut tank 7900 DWT. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 11(1), 97–104. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/36305>
- Lee, P. T. W., Kwon, O. K., & Ruan, X. (2019). Sustainability challenges in maritime logistics and supply chain integration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 1–16.

- Li, K. X., Jin, M., Qi, G., Shi, W., & Ng, A. K. Y. (2022). Maritime supply chain resilience and operational performance. *Transportation Research Part E*, 158, 102585.
- Lock, D. (2020). *Project management* (11th ed.). Routledge.
- Meredith, J. R., Mantel, S. J., & Shafer, S. M. (2021). *Project management: A managerial approach* (10th ed.). Wiley.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2008). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran. Pemerintah Republik Indonesia.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 31 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bidang Pelayaran. Pemerintah Republik Indonesia.
- Pinto, J. K. (2023). *Project management: Achieving competitive advantage* (6th ed.). Pearson.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). Project Management Institute.
- PT Adaro Logistics. (2024). Annual report and sustainability report. PT Adaro Logistics.
- Purnomo, H. (2018). Transportation strategy in optimization the economic value and operational reliability (Case study of PT Adaro Metcoal (AMC), subsidiary company of PT Adaro Energy Tbk) [Master's final project, Institut Teknologi Bandung].
- Purnomo, H., & Tjendrasa, K. (2020). Transportation strategy in optimization the economic value and operational reliability. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0008430903290336>
- Ramadhan, F., Nugroho, D., & Santoso, B. (2024). Optimization of docking project duration using CPM and PERT approaches. *Maritime Transport Research*, 5, 100089.
- Regatama, G., Amiruddin, W., & Mulyatno, I. P. (2019). Analisis network planning reparasi kapal SPB Titan 70 dengan metode Critical Path Method. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(4).
- Schwalbe, K. (2022). *Information technology project management* (10th ed.). Cengage Learning.
- Shcherbina, O. (2017). Development of imitation model for selection of tug-barge vessels for work on the line. *Transportation Research Procedia*, 20, 614–621.
- Silvianita, N., Aprillia, N., Mulyadi, Y., Citrosiswoyo, W., & Suntoyo. (2018). Cost and time analysis of graving dock project. *MATEC Web of Conferences*, 177, 01028. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817701028>
- Sitorus, R., Hidayat, M., & Prasetyo, A. (2023). Time-cost trade-off analysis in ship docking projects using crashing method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 1024.
- Suyuti, A. M., & Basuki, M. (2022). Analisis perbandingan penjadwalan proyek dengan Critical Path Method (CPM) dan Critical Chain Project Management (CCPM) pada reparasi kapal BG KFT 8005. *Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan*, 2, 152–165.
- Syahada, K. N., Rindo, G., Santosa, A. W. B., & Prasetyo, N. A. (2024). Analisis reschedule keterlambatan proyek reparasi dua kapal dengan metode Critical Path Method (CPM) dan Time Cost Trade Off (TCTO) pada KM. Kendhaga Nusantara 4 dan TB. Sorowako Star. *Jurnal Integrasi*, 16(2). <https://doi.org/10.30871/ji.v16i2.8451>
- Verzuh, E. (2021). *The fast forward MBA in project management* (6th ed.). Wiley.
- Wang, H., Zhao, X., & Wang, J. (2021). Critical path optimization and schedule compression in

- complex engineering projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(8), 2105–2125.
- Yang, Z., Bonsall, S., Wang, J., & Li, K. X. (2020). A risk-based approach to ship maintenance scheduling and operational reliability. *Ocean Engineering*, 217, 107925.
- Zakia, & Febrianti, D. (2021). The critical path method in construction project rescheduling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 832(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/832/1/012009>