



Tersedia secara online di <http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jatiunik/index>

JATI UNIK

Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri



Optimalisasi Perawatan Pesawat Terbang dengan CPM, PERT, dan *Linear Programming* pada Perusahaan MRO

Riani Nurdin^{*1}, Uyuunul Maudzoh², Nurfi Ahmadi³

rianinurdin@itda.ac.id¹, uyuunul@itda.ac.id², nurfiahmadi@itda.ac.id³

^{1,2}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto

³Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto

Informasi Artikel

Riwayat Artikel :

Received : 14 – Agustus - 2025

Revised : 4 – Oktober - 2025

Accepted : 13 – Februari - 2026

Keywords :

Aircraft Maintenance; Project Planning; CPM; PERT; Linear Programming

Abstract

Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) companies face significant challenges in completing aircraft maintenance projects on time and within budget. The existing gap lies in the optimization of planning methods integration to minimize project duration and cost. This study aims to assess the balance between time and cost in aircraft maintenance projects by showing the benefits of combining CPM, PERT, and Linear Programming. Data were obtained from the A02-CHECK activity at a national MRO company. CPM and PERT were used to find the critical path and estimate project duration, while LP was used to optimize time and cost on that path. The project duration decreased from 6,199 to 4,547 minutes, with the critical path in activities A-C-E-G-H and an 84.13% success probability. Using LP, the duration dropped further to 4,090 minutes at a total cost of \$202. It can be concluded that the integration of these three methods is effective in accelerating projects without exceeding the budget. The main contribution of this research is the development of an integrated approach to aircraft maintenance project planning which can capable of reducing the risk of delays and budget overruns. In addition, it also provides practical solutions for MRO companies.

Abstrak

Perusahaan *Maintenance, Repair and Overhaul* (MRO) menghadapi tantangan besar dalam menyelesaikan proyek perawatan pesawat tepat waktu dan sesuai anggaran. Kesenjangan yang ada terletak pada belum optimalnya integrasi metode perencanaan untuk meminimalkan waktu dan biaya proyek. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi trade-off antara waktu dan biaya minimum pada proyek perawatan pesawat dengan membuktikan efektivitas integrasi metode CPM, PERT, dan Linear Programming. Data diperoleh dari aktivitas A02-CHECK di sebuah perusahaan MRO nasional. Metode CPM dan PERT digunakan untuk mengidentifikasi jalur kritis dan menghitung estimasi durasi proyek, sedangkan LP digunakan untuk optimasi waktu dan biaya pada jalur kritis. Hasil menunjukkan bahwa durasi proyek dapat dipangkas dari 6.199 menit menjadi 4.547 menit, dengan jalur kritis pada kegiatan A-C-E-G-H dan tingkat probabilitas keberhasilan proyek sebesar 84,13%. Dengan penerapan LP, durasi dapat ditekan menjadi 4.090 menit dengan total biaya sebesar \$202. Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi ketiga metode efektif dalam

Untuk melakukan sitasi pada penelitian ini dengan format: R. Nurdin, U. Maudzoh, and N. Ahmadi, "Optimalisasi Perawatan Pesawat Terbang dengan CPM, PERT, dan Linear Programming pada Perusahaan MRO," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri (JATI UNIK)*, vol. 9, no. 2, pp. 1–13, 2026.

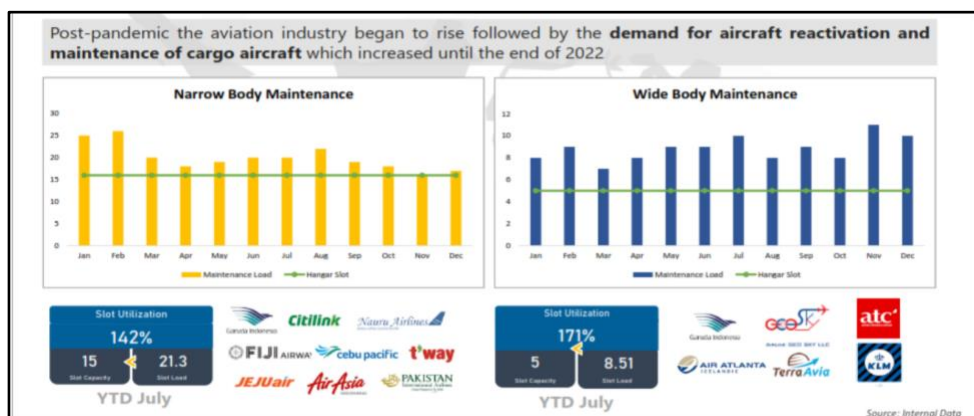
mempercepat proyek tanpa melebihi anggaran. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan pendekatan terpadu dalam perencanaan proyek perawatan pesawat, yang mampu mengurangi risiko keterlambatan dan pemborosan anggaran, serta memberikan solusi praktis bagi perusahaan MRO.

1. Pendahuluan

Sebuah proyek merupakan rangkaian kegiatan yang dilaksanakan secara berurutan dengan tujuan untuk diselesaikan dalam batas waktu, biaya, dan standar kinerja tertentu. Perencanaan sumber daya yang baik dan sesuai dengan kebutuhan proyek akan mendukung pencapaian tujuan secara optimal serta meningkatkan efektivitas dan efisiensi pelaksanaan proyek [1]. Salah satu strategi percepatan proyek yang efektif adalah penjadwalan ulang, karena relatif lebih mudah diimplementasikan dan tidak memerlukan biaya besar. Dalam hal ini, perusahaan perlu mengidentifikasi aktivitas-aktivitas yang bersifat prioritas dan tidak dapat ditunda, sehingga dapat diperoleh estimasi waktu penyelesaian proyek yang lebih realistis [2]. Kondisi ini sangat relevan di tengah tren pertumbuhan industri manufaktur nasional yang terus meningkat. Data BPS [3], menunjukkan bahwa Indeks Produksi Industri Manufaktur skala besar dan menengah naik dari 101,5 pada tahun 2010 menjadi 113,3 pada tahun 2023. Peningkatan kapasitas industri ini juga berpotensi meningkatkan kebutuhan layanan di industri *Maintenance, Repair, and Overhaul* (MRO).

Sebuah perusahaan MRO kelas dunia menjanjikan layanan dengan *Global Standard Quality* dan *Total Solution Services* dengan harga yang terjangkau. Perusahaan ini terus berinovasi dan menyesuaikan layanan sesuai kebutuhan pelanggan. Perusahaan tersebut merupakan satu-satunya MRO nasional yang telah tersertifikasi oleh FAA, EASA, DGCA, dan CASA. Dalam Seminar dan Konvensi Badan Kejuruan Dirgantara Persatuan Insinyur Indonesia pada 31 Agustus 2022, perusahaan menyampaikan bahwa permintaan layanan MRO meningkat pasca pandemi, menandai pulihnya kebutuhan perawatan pesawat. Kondisi ini menunjukkan bahwa maskapai dan operator pesawat akan semakin bergantung pada penyedia layanan MRO berpengalaman [4], namun kapasitas MRO terbatas memenuhi permintaan pasar, hal tersebut juga dihadapi oleh perusahaan selaku MRO nasional. Terlihat pada Gambar 1 bahwa jumlah permintaan perawatan pesawat berbadan besar (*Wide Body*) dan berbadan sempit (*Narrow Body*) melebihi dari slot hanggar yang tersedia, utilitas pemakaian hanggar berada diatas 100%. Perusahaan tersebut memiliki 4 hanggar dengan pembagian hanggar 1 dan hanggar 3 untuk perawatan pesawat *wide body* dengan kriteria *major maintenance*, hanggar 4 untuk perawatan pesawat *narrow body* dengan kriteria *major maintenance*, dan hanggar 2 untuk *line maintenance*. Pada perawatan pesawat *narrow body*

dibutuhkan 17 personel per *shift* sedangkan untuk perawatan pesawat *wide body* dibutuhkan 30 personel per *shift* (Gambar 1).



Gambar 1. Airframe Project 2022
(Sumber : Data Perusahaan)

Menyelesaikan proyek tepat waktu dan sesuai anggaran bukanlah hal yang mudah, terutama karena kompleksitas proyek yang semakin tinggi. Oleh karena itu, perencanaan proyek yang tepat menjadi sangat penting [5]. Metode yang umum digunakan dalam perencanaan, penjadwalan, dan pengendalian proyek adalah *Critical Path Method* (CPM) dan *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). Arsham [6] menunjukkan bahwa PERT efektif dalam mengelola ketidakpastian durasi aktivitas melalui estimasi optimis, realistis, dan pesimis sehingga meningkatkan keandalan jadwal. Selanjutnya, Mudita dan Nagar [7] menegaskan bahwa penerapan CPM mampu mengidentifikasi aktivitas kritis yang berkontribusi signifikan terhadap keterlambatan proyek, bahkan hingga 20% dari total durasi, sehingga membantu manajer proyek dalam menentukan prioritas percepatan. Sejumlah penelitian menegaskan bahwa CPM memiliki peran penting dalam pengendalian proyek, khususnya terkait optimasi waktu. Agyei [5] menunjukkan bahwa penerapan CPM dalam studi kasus yang dikombinasikan dengan teknik lain dapat mempercepat durasi proyek hingga 18% dan memberikan kontribusi signifikan dalam menekan biaya. Temuan serupa dilaporkan oleh Sompie dan Pratisis [8], yang menekankan bahwa CPM efektif dalam mengendalikan waktu pekerjaan konstruksi jalan raya, dengan percepatan proyek mencapai 10% lebih cepat dibandingkan jadwal awal.

Maulana dan Kurniawan [9] juga menyoroiti efektivitas CPM dalam proyek pembangunan gedung di Gresik, di mana metode ini berhasil mengidentifikasi aktivitas kritis berupa pekerjaan struktur dan pemasangan elemen utama bangunan sehingga memungkinkan efisiensi waktu rata-rata 12% tanpa menambah biaya, karena durasi aktivitas non-kritis dapat diatur ulang tanpa mengganggu jadwal keseluruhan. Sementara itu,

Puspitasari dkk. [10] pada proyek peningkatan jalan juga menegaskan keunggulan CPM dibandingkan metode lain seperti Kurva-S dan prosedur konvensional. Mereka menemukan bahwa aktivitas kritis terutama berada pada rangkaian pekerjaan lapis pondasi, pengaspalan, dan pemadatan, di mana pemendekan durasi berdampak langsung pada total waktu penyelesaian proyek. Hasilnya, CPM menghasilkan penghematan waktu sekitar 9% dari total durasi proyek. Desticioğlu [11] menekankan bahwa penerapan PERT pada proyek industri pertahanan mampu mengidentifikasi estimasi waktu penyelesaian yang lebih realistis, terutama karena metode ini memperhitungkan tiga kemungkinan durasi (optimis, realistis, dan pesimis), sehingga aktivitas yang memiliki ketidakpastian tinggi seperti proses perakitan komponen sensitif dapat diprediksi lebih akurat. Temuan tersebut membuktikan bahwa PERT dapat mengurangi risiko keterlambatan proyek dibandingkan pendekatan deterministik murni.

Sementara itu, Hidayah dkk. [12] melalui studi perbandingan perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi menemukan bahwa penerapan PERT dapat memperkecil deviasi waktu antara rencana dan realisasi, dengan tingkat selisih waktu mencapai 15% lebih rendah dibandingkan perencanaan konvensional. Hal ini memperlihatkan keunggulan PERT dalam menangani proyek yang memiliki tingkat ketidakpastian tinggi. Critical Path Method (CPM) terbukti konsisten meningkatkan efisiensi waktu melalui identifikasi aktivitas kritis, sehingga potensial diterapkan pada penjadwalan proyek perawatan pesawat terbang yang menuntut ketepatan dan keselamatan operasional. Sementara itu, Program Evaluation and Review Technique (PERT) efektif meningkatkan akurasi estimasi durasi dengan pendekatan probabilistik, menjadikannya relevan untuk menangani ketidakpastian dan variabilitas aktivitas dalam perawatan pesawat terbang.

Namun, penggunaan CPM atau PERT secara terpisah seringkali belum cukup optimal dalam mengatasi tantangan efisiensi waktu dan biaya. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode optimisasi berbasis linear programming efektif dalam meningkatkan efisiensi proyek. Studi pada proyek instalasi mekanikal *Heating Ventilation & Air Conditioning* dengan metode CPM dan *linear programming* menemukan percepatan aktivitas dapat mempercepat jadwal, meski menambah biaya sebesar 9,8% dari total proyek, dengan aktivitas kritis berada pada instalasi ducting dan pemasangan unit utama [13]. Sementara itu Klein et al.[14] melalui model *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) mengkaji resource-constrained project scheduling problem (RCPSP). Mereka membuktikan bahwa MILP lebih unggul dalam menentukan jadwal optimal, terutama ketika sumber daya terbatas. Aktivitas kritis dalam penelitian tersebut meliputi pekerjaan yang memiliki

kebutuhan sumber daya tinggi dan ketergantungan kompleks, sehingga pendekatan matematis menjadi jauh lebih efektif. Perspektif finansial juga menjadi pertimbangan dalam penjadwalan proyek. Penelitian pada proyek *Build-Transfer-Lease* (BTL) dengan fasilitas tambahan menggabungkan *multi-optimisasi linear programming* dan Monte Carlo simulation, di mana penambahan fasilitas tambahan dapat menjaga arus kas positif sekaligus meningkatkan *Internal Rate of Return* (IRR). Aktivitas kritis dalam konteks ini bukan berbasis fisik, melainkan terkait alokasi pendanaan dan jadwal konstruksi fasilitas tambahan [15]. Pada ranah teknologi, Feng et al. [16] mengkaji penjadwalan pekerjaan dan alokasi data pada *grid computing* menggunakan MILP iteratif. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan ini lebih efisien dan tangguh dibandingkan metode heuristik, terutama untuk aktivitas kritis seperti penjadwalan komputasi paralel dan distribusi data besar. Selain itu pada studi yang dilakukan oleh Korotaj dan Vařak [17], optimisasi operasi *Water Distribution System* (WDS) dengan *Sequential Linear Programming* (SLP) menunjukkan potensi penghematan biaya operasional yang signifikan, aktivitas kritis pada studi ini mencakup penjadwalan pompa dan distribusi tekanan, yang sangat menentukan efisiensi sistem distribusi air. Dari berbagai temuan tersebut, dapat dilihat bahwa pendekatan optimisasi berbasis linear programming mampu mengurangi waktu, menekan biaya, serta meningkatkan efisiensi pada berbagai sektor. Prinsip serupa dapat diadaptasi pada proyek perawatan pesawat terbang di Indonesia, khususnya dalam lingkup industri MRO nasional. Penerapan metode ini berpotensi meningkatkan efektivitas dan efisiensi penjadwalan perawatan pada fasilitas MRO, sekaligus memastikan seluruh aktivitas berjalan sesuai standar keselamatan operasional penerbangan yang ditetapkan oleh Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, FAA dan EASA.

Selama tiga tahun terakhir, perusahaan MRO nasional terus melakukan percepatan proyek maintenance untuk memenuhi tingginya permintaan, namun percepatan tersebut belum didukung analisis biaya dan durasi yang terukur. Meskipun CPM dan PERT mampu mengidentifikasi aktivitas kritis serta memperkirakan durasi dan probabilitas penyelesaian proyek, kedua metode ini belum dapat menentukan kombinasi percepatan dengan biaya minimum. *State of the art* penelitian ini adalah integrasi CPM dan PERT dengan *Linear Programming* (LP), yang membentuk pendekatan optimasi komprehensif untuk mengendalikan trade off waktu biaya secara simultan, didukung pemrosesan model matematis melalui aplikasi analisis kuantitatif berbasis komputer. Tujuan penelitian adalah memperoleh durasi optimal dan biaya minimum pada proyek perawatan A02-CHECK sekaligus menunjukkan bahwa integrasi ketiga metode memberikan hasil yang lebih akurat

dan efisien dibandingkan penggunaan penjadwalan konvensional. Secara teoretis, kombinasi ini memperkuat pemodelan deterministik–probabilistik dengan formulasi LP untuk meminimalkan biaya pada jalur kritis, sementara secara praktikal menyediakan panduan keputusan bagi MRO nasional dalam menentukan aktivitas mana yang harus dipercepat, berapa besar percepatan yang diperlukan, serta estimasi biaya minimum yang harus dikeluarkan untuk mencapai target proyek.

2. Metode Penelitian

2.1 Desain Penelitian

Studi ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk merancang lintasan kritis menggunakan CPM, mengevaluasi estimasi waktu proyek melalui PERT, serta menghitung biaya optimasi dengan LP. Metode CPM digunakan untuk menentukan aktivitas kritis dan durasi minimum proyek berdasarkan estimasi deterministik [18], sedangkan PERT digunakan untuk menangani ketidakpastian durasi melalui tiga estimasi waktu dan perhitungan varians [19]. Kedua metode ini telah terbukti efektif dalam mempercepat proyek di sektor konstruksi maupun industri MRO [20][21][22]. Selanjutnya, LP diterapkan untuk meminimalkan total biaya percepatan dengan mempertimbangkan hasil analisis CPM–PERT serta berbagai batasan sumber daya [23], [24], karena model matematis LP mampu menggambarkan hubungan linier antara variabel keputusan dan tujuan optimasi [25] serta mendukung pengambilan keputusan strategis pada kondisi kapasitas terbatas [26]. Penyelesaian model LP dilakukan menggunakan aplikasi POM-QM *for Windows* untuk menghasilkan perhitungan biaya minimum yang akurat dan aplikatif bagi perusahaan.

2.2 Populasi dan Sampel

Sampel penelitian ini berfokus pada proyek perawatan A02-CHECK untuk pesawat narrow body Airbus A320 di perusahaan MRO nasional. A02-CHECK merupakan bagian dari paket perawatan ringan (*A-Check*) yang dilakukan secara berkala untuk memastikan keandalan dan keselamatan pesawat melalui serangkaian inspeksi visual, pemeriksaan sistem avionik dan mekanik, pengecekan powerplant, serta tugas pelumasan dan penggantian komponen minor. Meskipun termasuk kategori perawatan ringan, A02-CHECK memiliki kompleksitas pekerjaan yang cukup tinggi karena melibatkan banyak aktivitas berurutan dengan ketergantungan teknis yang ketat, sehingga sangat relevan digunakan sebagai sampel dalam penelitian yang mengkaji optimasi durasi dan biaya proyek perawatan menggunakan metode CPM, PERT, dan LP.

2.3 Instrumen Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan beberapa instrumen, antara lain:

- a. Kode Aktivitas, digunakan untuk mengidentifikasi setiap pekerjaan dalam *A02-CHECK*.
- b. Keterangan Aktivitas, menjelaskan jenis pekerjaan yang dilakukan pada tiap tahapan perawatan.
- c. Durasi Aktivitas, merupakan input utama untuk analisis CPM dan PERT dalam menentukan lintasan kritis, durasi total proyek, serta estimasi probabilistik.
- d. Biaya Aktivitas, digunakan sebagai input Linear Programming untuk menentukan biaya minimum percepatan proyek.
- e. Hubungan Ketergantungan Aktivitas (*Precedence Relationship*), ditampilkan secara implisit melalui urutan kode aktivitas dan pengolahan CPM-PERT.

2.4 Prosedur Penelitian

Data primer melalui wawancara teknis dengan *engineer, maintenance planner*, dan supervisor MRO untuk memvalidasi urutan aktivitas, memastikan ketepatan logika pengerjaan, serta mengonfirmasi durasi normal dan crash pada setiap aktivitas *A02-CHECK*. Data sekunder dari dokumen perusahaan, termasuk *Maintenance Planning Document (MPD)*, *task card A02-CHECK*, *spreadsheet* perencanaan proyek, dan *Gantt Chart*. Dokumen ini menyediakan data utama berupa kode aktivitas, deskripsi pekerjaan, durasi aktivitas (normal dan crash), biaya aktivitas dalam USD, serta hubungan ketergantungan antaraktivitas sebagai *input* dalam CPM, PERT, dan LP, sehingga hasil optimasi sesuai kondisi aktual proyek perawatan *A02-CHECK* pada pesawat Airbus A320.

Tahap pertama adalah analisis jalur kritis menggunakan metode CPM dan PERT, dengan penyusunan jaringan kerja berdasarkan urutan dan durasi aktivitas perawatan *A02-CHECK* untuk mengidentifikasi lintasan kritis dan menentukan waktu minimum penyelesaian proyek, sedangkan PERT untuk menghitung estimasi probabilistik durasi proyek yang berkaitan dengan ketidakpastian waktu dan aktivitas yang tidak memiliki kelonggaran (*slack*). Tahap kedua mengoptimasi biaya menggunakan LP, dengan memanfaatkan hasil analisis CPM–PERT sebagai dasar formulasi model. Variabel keputusan pada aktivitas yang dapat dipercepat, dan fungsi tujuan untuk meminimalkan total biaya percepatan. Hasil tahapan untuk menentukan durasi minimum proyek perawatan, mengidentifikasi aktivitas prioritas yang perlu dipercepat, serta menghitung estimasi biaya optimal sebagai rekomendasi strategis bagi perusahaan MRO dalam meningkatkan efisiensi waktu dan biaya pada layanan perawatan pesawat *narrow body*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perencanaan Pelaksanaan Program Perawatan A02-CHECK

Pelaksanaan program perawatan A02-*Check* pada pesawat Airbus A320 merupakan perawatan rutin wajib untuk menjamin keselamatan operasional. Perencanaan yang sistematis penting agar target tercapai melalui pengelompokan task card dan penentuan urutan pekerjaan: *General Visual Inspection* (GVI), *Functional Check* (FNC), *Detailed Inspection* (DET), *Specialized Detailed Inspection* (SDI), *Operational Check* (OPC), *Restoration* (RST), *Visual Check* (VCK), dan *Servicing* (SVC) (Tabel 1).

Perawatan A02-CHECK memiliki waktu normal 6199 menit dengan biaya perawatan sebesar \$1.389, dapat diselesaikan waktu maksimal 4547 menit, biaya sebesar \$1.066. Waktu tercepat yang dapat dilakukan pada perawatan A02-CHECK menggunakan metode CPM adalah 4090 menit dengan biaya sebesar \$1.433. Jadwal pelaksanaan perawatan A02-CHECK memiliki lintasan kritis yaitu A-C-E-G-H. Hasil ini sesuai dengan penelitian Iman dkk. [26], yang menunjukkan bahwa proyek dapat diselesaikan dalam 54 hari, atau 24 hari lebih cepat dibandingkan perkiraan awal (Tabel 1).

Tabel 1. Aktivitas Perencanaan Perawatan A02-CHECK dan Penjadwalan CPM

Code	Task	Predecessor	Biaya (\$)		Waktu(Menit)		On Critical Path	Activity Time	Earliest Start	Earliest Finish	Latest Start	Latest Finish	Slack
			Normal	Crash	Normal	Crash							
A	GVI	-	174	216	775	668	Yes	775	0	775	0	775	0
B	FNC	A	248	311	1282	1170	no	1282	775	2057	1741	3023	966
C	DET	A	149	171	556	519	Yes	556	775	1331	775	1331	0
D	SDI	B	25	99	155	139	no	155	2057	2212	3023	3178	966
E	OPC	C	384	471	1882	1700	Yes	1882	1331	3213	1331	3213	0
F	RST	D	50	62	215	163	no	215	2212	2427	3178	3393	966
G	VCK	E	74	124	180	50	Yes	180	3213	3393	3213	3393	0
H	SVC	F, G	285	451	1154	947	Yes	1154	3393	4547	3393	4547	0
Jumlah			1389	1905	6199	5356	Project Completion Time		4547		Minutes		
							Total Cost of Project		\$1,389				
							Number of Critical Path(s)		1		(Cost on CP = \$1,066)		

(Sumber : Data Perusahaan)

CPM-PERT menunjukkan durasi proyek 4.090 menit dengan 1 jalur kritis (A-C-E-G-H) dan slack 0. Total biaya \$1.905 (CP \$1.433). Total varians kritis 6.099,08; deviasi standar proyek $\sqrt{6.099,08} = 78,1$ menit, menunjukkan risiko waktu moderat. Meskipun penjadwalan perawatan A02-CHECK tersebut diperkirakan selesai dalam waktu 4547 menit, hal ini tidak menjamin bahwa itu akan benar-benar selesai dalam waktu tersebut. Demikian perlu untuk mengetahui probabilitas bahwa batas waktu proyek akan terpenuhi [5] (Tabel 2). Seluruh perkiraan waktu kegiatan merupakan nilai tunggal dengan asumsi waktu kegiatan diketahui secara pasti dengan menggunakan perkiraan waktu aktivitas tunggal. Namun pada kenyataannya, karena adanya ketidakpastian dalam melaksanakan setiap kegiatan, maka dilakukan perkiraan waktu kegiatan yang tidak dapat dipastikan [27].

Tabel 2. Penjadwalan Tercepat CPM -Analisa PERT

CPM	On	Activity	Earliest	Earliest	Latest	Latest	Slack	PERT	Optimistic	Most Likely	Pessimistic	Activity	Standard	Variance
	Critical Path	Time	Start	Finish	Start	Finish			Time	Time	Time	Time	Deviation	
A	Yes	668	0	668	0	668	0	A	668	775	875	773,83	34,5	1190,25
B	no	1170	668	1838	1671	2841	1003	B	1082	1282	1382	1265,33	50	2500
C	Yes	519	668	1187	668	1187	0	C	519	556	656	566,5	22,83	521,36
D	no	139	1838	1977	2841	2980	1003	D	100	155	255	162,5	25,83	667,36
E	Yes	1856	1187	3043	1187	3043	0	E	1772	1882	1982	1880,33	35	1225
F	no	163	1977	2140	2980	3143	1003	F	163	215	315	223	25,33	641,78
G	Yes	100	3043	3143	3043	3143	0	G	140	180	280	190	23,33	544,44
H	Yes	947	3143	4090	3143	4090	0	H	947	1154	1254	1136,17	51,17	2618,03
Project Completion Time			4090		Minutes			Project results						
Total Cost of Project			\$1,905		(Cost on CP = \$1,433)			Sum of crit act var			6099,08			
Number of Critical Path(s)			1					Square root of total			78,1			

(Sumber : olah data penelitian)

Diperlukan penilaian standar deviasi dari hasil analisa menggunakan metode CPM. Perhitungan dapat menggunakan persamaan (1).

$$S = \sqrt{\sum(\sigma^2 CPM)} \tag{1}$$

$$S = \sqrt{1190 + 521,36 + 1225 + 544,44 + 2618}$$

$$S = \sqrt{6099,08} = 78,1$$

Kemudian menghitung probabilitas bahwa perawatan akan berhasil diselesaikan dengan asumsi batas waktu (*Td*) adalah 4625,1 menit (yaitu waktu perkiraan penyelesaian + standar deviasi). Nilai *Te* dan *S* digunakan untuk mengurangi adanya resiko penyelesaian suatu proyek, nilai *Z* digunakan untuk penentu peluang waktu dalam menyelesaikan proyek dengan waktu perkiraan. Nilai *Z* dihitung menggunakan persamaan (2).

$$z = \frac{T(d)-T(e)}{S} \tag{2}$$

$$z = \frac{4625,1 - 4547}{78,1} = 1.0$$

Diperoleh nilai *Z* adalah 1.0 dengan nilai distribusi normal 0,8413. Dengan demikian, besarnya probabilitas proyek perawatan *A02-CHECK* dapat diselesaikan dalam waktu 4547 menit di jalur kritis sebesar 84,13%.

3.2 Linear Programming (LP)

Perencanaan perawatan A02-CHECK memiliki durasi tercepat 4.090 menit. Diperlukan analisis LP untuk mengevaluasi peluang percepatan dengan biaya tambahan minimum. Hasil CPM untuk menganalisis *trade-off* waktu-biaya guna mencapai target penyelesaian optimal dengan model matematis LP (Tabel 3).

Tabel 3. Model matematis LP

Komponen	Elemen	Model
Variabel Keputusan (Xi)	XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH	Waktu percepatan tiap simpul (8 variabel sesuai jumlah simpul proyek)
Fungsi Tujuan (Minimasi Biaya Percepatan)	Min Z	0,394XA + 0,566XB + 0,583XC + 4,65XD + 0,48XE + 0,24XF + 0,385XG + 0,803XH
Slope Cost (r = ΔC/Δt)	A=0,394 ; B=0,566 ; C=0,583 ; D=4,65 ; E=0,48 ; F=0,24 ; G=0,385 ; H=0,803	Koefisien biaya percepatan per menit
Kendala 1: Batas Maksimum Percepatan (menit)	XA≤107 ; XB≤112 ; XC≤37 ; XD≤16 ; XE≤182 ; XF≤52 ; XG≤130 ; XH≤207	Batas <i>crash time</i> tiap aktivitas

Komponen	Elemen	Model
Kendala 2: Hubungan Ketergantungan Aktivitas	$YC-YA+XA \geq 775$; $YE-YC+XC \geq 556$; $YG-YE+XE \geq 1882$; $YH-YG+XG \geq 180$; $YB-YA+XA \geq 775$; $YD-YB+XB \geq 1282$; $YF-YD+XD \geq 155$; $YH-YF+XF \geq 215$; $YFINISH-YH+XH \geq 1154$	Menjaga urutan dan waktu kejadian tercepat
Kendala 3: Durasi Proyek	$YFINISH \leq 4090$ $YFINISH = 4090$	Total durasi proyek percepatan ditetapkan 4.090 menit

(Sumber : olah data penelitian)

3.3 Optimasi LP dan Perbandingan antar Metode

Optimasi LP mengidentifikasi aktivitas yang layak dipercepat secara ekonomis, yaitu $XA = 107$ menit, $XC = 37$ menit, $XE = 182$ menit, $XG = 130$ menit, dan $XH = 1$ menit, seluruhnya memiliki reduced cost = 0 yang menandakan berada dalam basis solusi optimal. Sementara itu, XB , XD , dan XF tidak dipercepat karena memiliki reduced cost positif (0,566; 4,65; dan 0,24), yang berarti setiap tambahan percepatan satu menit pada aktivitas tersebut justru meningkatkan nilai fungsi tujuan (biaya) secara tidak efisien. Secara teknis, slope cost tertinggi pada aktivitas D (4,65) menjadikannya paling mahal untuk dipercepat, sedangkan aktivitas F (0,24) relatif lebih ekonomis namun tidak strategis terhadap jalur kritis (Tabel 4).

Nilai waktu kejadian tercepat simpul menunjukkan struktur jaringan optimal dengan $YA = 0$ menit sebagai awal proyek dan $YH = 2937$ menit sebelum aktivitas akhir. Total durasi proyek setelah optimasi ditetapkan sebesar 4090 menit sesuai batasan model.

Perbandingan metode menunjukkan peningkatan kinerja yang terukur. Perencanaan awal perusahaan membutuhkan 6199 menit dengan biaya \$1389. Pendekatan CPM-PERT mampu menurunkan durasi menjadi 4547 menit dengan biaya \$1066, menghasilkan efisiensi waktu 1652 menit (26,6%). Namun, LP menghasilkan durasi optimal 4090 menit dengan biaya percepatan minimum hanya \$202. Dibanding perencanaan awal, LP menghemat 2109 menit (34,0%) dengan struktur biaya percepatan yang jauh lebih terkendali.

Kontribusi utama pendekatan LP dalam perusahaan MRO adalah kemampuannya mengintegrasikan *trade-off* waktu-biaya secara kuantitatif dan simultan, bukan sekadar mengidentifikasi jalur kritis seperti CPM atau estimasi probabilistik seperti PERT. LP memberikan keputusan percepatan berbasis optimasi matematis sehingga aktivitas yang tidak ekonomis secara eksplisit dieliminasi dari skenario percepatan. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi CPM, PERT, dan LP menghasilkan model pengambilan keputusan yang lebih presisi, efisien, dan aplikatif dalam manajemen perawatan pesawat terbang berbasis biaya minimum dan durasi optimal.

Tabel 4. Optimasi LP dan Perbandingan Metode Eksisting, CPM- PERT dan LP dan Efisiensi

Komponen	Variabel / Metode	Nilai	Keterangan
Hasil LP – Variabel Percepatan (Xi)	XA	107	Percepatan maksimum, reduced cost = 0
	XB	0	Tidak dipercepat, reduced cost = 0,566
	XC	37	Percepatan maksimum, reduced cost = 0
	XD	0	Tidak dipercepat, reduced cost = 4,65
	XE	182	Percepatan maksimum, reduced cost = 0
	XF	0	Tidak dipercepat, reduced cost = 0,24
	XG	130	Percepatan maksimum, reduced cost = 0
	XH	1	Percepatan minimal, reduced cost = 0
Waktu Kejadian Tercepat (Yi)	YA	0	Waktu mulai proyek
	YB	1285	
	YC	668	
	YD	2567	
	YE	1187	
	YF	2722	
	YG	2887	
	YH	2937	
Perbandingan Metode	Perusahaan	6199 menit / \$1389	Perencanaan awal
	CPM & PERT	4547 menit / \$1066	Analisis jalur kritis
	LP	4090 menit / \$202	Durasi optimal, biaya percepatan minimum
Efisiensi LP	Penghematan waktu	2109 menit	Dibanding perencanaan awal
	Strategi	Fokus aktivitas jalur kritis	Biaya tambahan ditekan minimum

(Sumber : olah data penelitian)

4. Kesimpulan

Studi ini menghasilkan temuan bahwa, penerapan metode CPM dan PERT mampu memberikan waktu minimal yang dapat dilakukan perusahaan dalam melaksanakan proyek perawatan A-CHECK 02 sebesar 4547 menit dari waktu awal sebesar 6199 menit, dengan jalur kritis pada kegiatan yaitu A-C-E-G-H. Tingkat probabilitas keberhasilan proyek sebesar 84,13%. Dan hasil penelitian menggunakan metode CPM dan PERT dengan *Linear Programming* dapat memberikan waktu dan biaya optimal melalui jalur kritis akibat dilakukan percepatan proyek sesuai dengan permintaan pengguna sebesar 4090 menit dan biaya \$202. Oleh karena itu, perusahaan dapat mempertimbangkan penggunaan metode ini dalam penjadwalan proyek perawatan pesawat terbang guna mengoptimalkan efisiensi waktu dan biaya.

Daftar Pustaka

- [1] A. Husen, *Manajemen Proyek Edisi Revisi*. 2011.
- [2] H. A. Taha, “Operations Research: An Introduction Eighth Edition,” 2007.
- [3] Badan Pusat Statistik, “Perkembangan Indeks Produksi Industri Manufaktur,” 2024.
- [4] S. Ichou and Á. Veress, “Technology Roadmap for Aircraft Maintenance, Repair and Overhaul,” *Repüléstudományi Közlemények*, vol. 34, no. 3, 2022, doi: 10.32560/rk.2022.3.2.

- [5] W. Agyei, "Project Planning And Scheduling Using PERT And CPM Techniques With Linear Programming: Case Study," *International Journal Of Scientific & Technology Research*, vol. 4, p. 8, 2015, [Online]. Available: www.ijstr.org
- [6] H. Arsham, "Managing project activity-duration uncertainties," *Omega (Westport)*, vol. 21, no. 1, 1993, doi: 10.1016/0305-0483(93)90043-K.
- [7] M. Mudita and D. Nagar, "Project Management techniques: PERT and CPM," *Asian Journal of Computer Science Engineering(AJCSE)*, vol. 2, no. 2, 2017.
- [8] B. F. Sompie and P. Pratasias, "Sistem Pengendalian Waktu Pada Pekerjaan Konstruksi Jalan Raya Dengan Menggunakan Metode CPM," *Sipil Statik*, vol. 3, no. 1, 2015.
- [9] A. Maulana and F. Kurniawan, "Time Optimization Using Cpm, Pert And Pdm Methods In The Social And Department Of Kelautan Building Development Project Gresik District," 2019.
- [10] D. P. Puspitasari, N. A. S. Purwono, and F. E. Poerwodihardjo, "Analisis Perbandingan Penjadwalan Proyek Dengan Metode CPM, PERT, KURVA-S (Studi Kasus Peningkatan Jalan Menganti Kesugihan)," *Teodolita: Media Komunkasi Ilmiah di Bidang Teknik*, vol. 23, no. 1, 2022, doi: 10.53810/jt.v23i1.441.
- [11] B. Desticioğlu, "Project Planning With CPM And Pert Methods: Example Of Defence Industry," *Journal of Naval Sciences and Engineering*, vol. 18, no. 2, 2022.
- [12] R. Hidayah, A. Ridwan, and Y. Cahyo, "Analisa Perbandingan Manajemen Waktu Antara Perencanaan Dan Pelaksanaan," *Jurmateks*, vol. 1, no. 2, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v1i2.416>.
- [13] A. H. Paras, E. G. R. Gacuan, E. Halim, A. A. N. P. Redi, and J. D. German, "Optimizing Project Scheduling Using Linear Programming Approach: A Case Study of Heating Ventilation & Air Conditioning Mechanical Installation," *Procedia Comput Sci*, vol. 234, pp. 683–690, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.03.054.
- [14] N. Klein, M. Gnägi, and N. Trautmann, "Mixed-integer linear programming for project scheduling under various resource constraints," *Eur J Oper Res*, vol. 319, no. 1, pp. 79–88, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2024.06.036.
- [15] W. Jung, B. Koo, and S. H. Han, "A multi-objective linear programming framework for evaluating the financial viability of supplementary facilities in Build-Transfer-Lease projects in Korea," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 29–37, Jan. 2012, doi: 10.1007/s12205-012-1496-6.
- [16] S. Feng *et al.*, "Alternative mixed integer linear programming optimization for joint job scheduling and data allocation in grid computing," *Future Generation Computer Systems*, vol. 175, p. 108075, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.future.2025.108075.
- [17] B. Korotaj and M. Vašak, "Predictive control of a general water distribution system by using sequential linear programming," *Control Eng Pract*, vol. 156, p. 106232, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.conengprac.2024.106232.

- [18] D. A. Saputra M, E. Satria, and G. A. Pandey, "Optimalisasi Proses Perakitan Pesawat Tanpa Awak dengan Metoda Critical Path Methods (CPM)," *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, vol. 15, no. 1, 2016, doi: 10.25077/josi.v15.n1.p87-92.2016.
- [19] I. Soeharto, *Manajemen Proyek (Dari Konseptual Sampai Operasional) Jilid 1 Edisi Kedua*, vol. 60, no. 5. 2012.
- [20] N. Nahendra, I. N. Daulay, and A. Paramitha, "The optimization of Gebe Airport project using PERT and CPM method," *Operations Management and Information System Studies*, vol. 2, no. 4, 2022.
- [21] A. Aziz, M. N. Brohi, T. R. Soomro, T. M. Ghazal, H. M. Alzoubi, and M. Alshurideh, "Aircraft Turnaround Manager (ATM): A Solution to Airport Operations," in *Studies in Computational Intelligence*, vol. 1056, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-12382-5_36.
- [22] E. Nursanti, R. M. S. Avief, Sibut, and M. Kertaningtyas, "Parallel Series Scheduling for Aircraft Overhaul Maintenance," 2019. doi: 10.2991/icoi-19.2019.112.
- [23] O. M. Elmabrouk, "A Linear Programming Technique for the Optimization of the Activities in Maintenance Projects," 2011.
- [24] D. D. Kantianis, "The Impact Of Overheads Variation On Time-Cost Optimisation Of Building Infrastructure Projects," *European Project Management Journal*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.18485/epmj.2020.10.2.3.
- [25] Frederick. S. Hiller and G. J. Lieberman, *Introduction - Operations Research*. 2014.
- [26] Y. M. R. Aboelmagd, "Linear programming applications in construction sites," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.11.006.
- [27] S. A. Adebawale and E. D. Oluboyede, "Network analysis and building construction: Implications for timing and costing of activities," *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 90–100, 2011, [Online]. Available: <http://www.academicjournals.org/jcect>