

# Evaluasi Proyek Overhaul Turbin Gas dengan Metode CPM, PERT, SMED, dan Monte Carlo

Abdul Basit<sup>1</sup>, Bambang Syairudin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia  
Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111  
Email: [6010241034@student.its.ac.id](mailto:6010241034@student.its.ac.id)

## ABSTRAK

Durasi overhaul yang panjang pada pembangkit listrik langsung memengaruhi keandalan operasi dan *Equivalent Availability Factor* (EAF) unit, karena setiap hari tambahan shutdown berarti hilangnya produksi dan meningkatnya risiko keterlambatan proyek. Penelitian ini menyusun model evaluasi overhaul yang memadukan *Critical Path Method* (CPM), *Program Evaluation and Review Technique* (PERT), *Single Minute Exchange of Die* (SMED), dan simulasi Monte Carlo, dengan studi kasus pada major inspection tiga unit turbin gas GT 2.1, GT 2.2, dan GT 2.3 di PLTGU Grati Blok 2. Jadwal proyek dimodelkan dengan Microsoft Project 2019, sedangkan risiko waktu dianalisis melalui simulasi Monte Carlo (1.000 iterasi, distribusi Beta-PERT) pada ModelRisk. Penerapan SMED secara bertahap berhasil memangkas durasi overhaul dari 45 hari pada kondisi eksisting menjadi 38, 35, dan 33 hari pada ketiga skenario percepatan, setara penurunan kumulatif 26,7% yang telah dikonfirmasi oleh realisasi lapangan. Percepatan ini turut mendorong kenaikan EAF unit di seluruh skenario, dengan manfaat finansial bersih yang signifikan terutama pada skenario yang sudah terealisasi penuh, yakni Skenario 3 (GT 2.2). Uji non-parametrik Kruskal-Wallis ( $H = 4.344,81$ ;  $df = 4$ ;  $p < 0,0001$ ) mengonfirmasi bahwa perbedaan durasi antar skenario memang berbeda secara statistik, bukan sekadar variasi acak. Model evaluasi terpadu ini diharapkan dapat menjadi acuan pengambilan keputusan penjadwalan overhaul berbasis risiko pada pembangkit sejenis.

**Kata Kunci:** CPM; PERT; SMED; Simulasi Monte Carlo; Equivalent Availability Factor (EAF).

## ABSTRACT

*Long overhaul durations at power plants directly affect operational reliability and the unit's Equivalent Availability Factor (EAF), since every additional day of shutdown means lost production and a higher risk of project delay. This study builds an overhaul evaluation model that combines the Critical Path Method (CPM), Program Evaluation and Review Technique (PERT), Single Minute Exchange of Die (SMED), and Monte Carlo simulation, using a case study on major inspection projects for three gas turbine units, GT 2.1, GT 2.2, and GT 2.3, at PLTGU Grati Block 2. The project schedule was modeled in Microsoft Project 2019, while time-risk analysis relied on Monte Carlo simulation (1,000 iterations, Beta-PERT distribution) in ModelRisk. Phased SMED implementation cut overhaul duration from 45 days under existing conditions to 38, 35, and 33 days across the three acceleration scenarios, a cumulative 26.7% reduction confirmed by actual field results. This acceleration also raised the unit's EAF across all scenarios and produced a substantial net financial benefit, most notably for Scenario 3 (GT 2.2), the scenario that has been fully realized in the field. The non-parametric Kruskal-Wallis test ( $H = 4,344.81$ ;  $df = 4$ ;  $p < 0.0001$ ) confirmed that the differences in duration across scenarios are statistically real rather than random variation. This integrated evaluation model is intended to serve as a practical reference for risk-based overhaul scheduling decisions at similar power plants.*

**Keywords:** CPM; PERT; SMED; Monte Carlo Simulation; Equivalent Availability Factor (EAF).

## Pendahuluan

Sebagai infrastruktur kritis dalam sistem ketenagalistrikan nasional, pembangkit listrik menuntut keandalan operasi yang tinggi, terutama bagi PT PLN Indonesia Power yang bertanggung jawab menjaga kontinuitas suplai listrik. Salah satu unit yang mengemban peran ini adalah turbin gas Blok 2 PLTGU Grati di Pasuruan, Jawa Timur, yang sudah beroperasi sejak 1997 dan kini, pada 2025, telah menginjak usia sekitar 28 tahun. Mesin yang sudah berumur lebih dari dua dekade tentu membutuhkan manajemen pemeliharaan yang matang agar availabilitasnya, yang merupakan indikator keandalan utama dalam pembangkitan energi listrik, tetap terjaga [1], [2].

Dalam praktiknya, pemeliharaan turbin gas umumnya mengikuti filosofi time-based, di mana overhaul (*combustion inspection*, *turbine inspection*, dan *major inspection*) dijadwalkan berdasarkan akumulasi *Equivalent Operating Hours* (EOH), pendekatan yang berbeda dengan filosofi reliability-centered maintenance yang menjadwalkan intervensi berdasarkan kondisi aktual komponen, sebagaimana banyak dibahas dalam literatur manajemen pemeliharaan dan keandalan sistem [3], [4], [5], [6]. Konsekuensinya sederhana: semakin lama unit berhenti untuk overhaul, semakin besar pula produksi listrik dan pendapatan yang hilang. Ketiga unit turbin gas berkapasitas 100 MW di Blok 2 PLTGU Grati, yaitu GT 2.1, GT 2.2, dan GT 2.3, masing-masing dijadwalkan menjalani major inspection selama 45 hari, durasi yang lazim dijumpai pada praktik pemeliharaan turbin gas sejenis [7]. Di lapangan, penerapan rekondisi blade ring sebagai kegiatan pre-overhaul pada ketiganya ternyata berhasil memangkas realisasi durasi shutdown menjadi 33-38 hari. Namun, keberhasilan ini belum pernah dievaluasi secara terstruktur, baik dari sisi metode penjadwalan, tingkat risikonya, maupun dampak finansialnya.

Keterlambatan pada proyek overhaul bukan persoalan sepele, sebab setiap hari outage yang melampaui jadwal langsung menambah biaya kehilangan produksi [8], [9]. Untuk mengevaluasi proyek pemeliharaan pembangkit, beberapa pendekatan sudah cukup dikenal, mulai dari *Critical Path Method* (CPM) dan *Program Evaluation and Review Technique* (PERT), teknik penjadwalan jaringan proyek yang telah lama digunakan secara luas pada proyek konstruksi maupun industri [10], [11], [12], yang lazim dipakai pada proyek konstruksi dan pemeliharaan [13], hingga *Single Minute Exchange of Die* (SMED) yang berasal dari industri manufaktur untuk memangkas waktu setup dan pergantian, dengan dukungan teori dari literatur teknik industri [14], [15]. Penelitian terdahulu juga telah menunjukkan keterkaitan antara kegiatan overhaul dan keandalan performansi pembangkit [16]. Risiko keterlambatan akibat ketidakpastian durasi proyek juga telah banyak dikaji melalui analisis kurva-S [13] maupun evaluasi prediktabilitas proyek fast-track [17], namun penelitian yang menggabungkan SMED, CPM, PERT, dan simulasi probabilitas seperti Monte Carlo sekaligus dalam satu evaluasi overhaul turbin gas masih jarang ditemukan.

Mengisi kesenjangan tersebut, penelitian ini disusun dengan enam tujuan: (1) mengevaluasi penjadwalan proyek overhaul pada unit GT 2.1, GT 2.2, dan GT 2.3 di PLTGU Grati Blok 2; (2) mengidentifikasi aktivitas yang paling memengaruhi durasi penyelesaian proyek; (3) menganalisis tingkat risiko keterlambatannya; (4) mengevaluasi peluang percepatan durasi lewat penerapan SMED; (5) menganalisis dampak percepatan tersebut terhadap EAF dan biaya; dan (6) menguji apakah perbedaan durasi antar skenario percepatan signifikan secara statistik. Harapannya, hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai acuan pengambilan keputusan penjadwalan overhaul berbasis risiko pada pembangkit sejenis.

## Metode Penelitian

Penelitian ini bersifat kuantitatif terapan, dengan studi kasus pada proyek major inspection tiga unit turbin gas di PLTGU Grati Blok 2, yaitu GT 2.1 (2022), GT 2.3 (2023), dan GT 2.2 (2024), termasuk kegiatan rekondisi blade ring pre-overhaul yang menyertainya. Data dikumpulkan dari dua sumber: data primer berupa wawancara dengan personel pelaksana proyek, dan data sekunder berupa dokumen *Work Breakdown Structure*, jadwal Microsoft Project, serta data realisasi durasi tiap aktivitas.

*Critical Path Method (CPM)*. CPM adalah teknik penjadwalan proyek yang mengidentifikasi rangkaian aktivitas dengan total float nol, yang secara langsung menentukan durasi minimum penyelesaian proyek melalui *forward pass* dan *backward pass* [18], [19], [10], [12].

*Program Evaluation and Review Technique (PERT)*. PERT memperluas CPM dengan memperlakukan durasi aktivitas sebagai variabel acak yang diestimasi dari tiga titik waktu, optimis, paling mungkin, dan pesimis, melalui distribusi Beta-PERT, sehingga menghasilkan estimasi waktu ( $t_e$ ) beserta varians ( $\sigma^2$ ) dan standar deviasinya ( $\sigma$ ) [11].

*Single Minute Exchange of Die (SMED)*. SMED adalah metode reduksi waktu setup yang berasal dari industri manufaktur, dengan prinsip utama mengonversi aktivitas setup internal, yang hanya bisa dikerjakan saat mesin berhenti, menjadi setup eksternal yang dapat dikerjakan sebelum mesin atau unit dihentikan [20], [14].

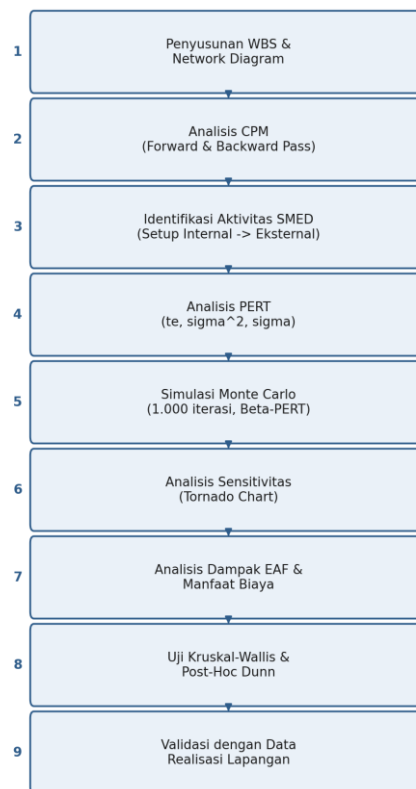
*Simulasi Monte Carlo*. Simulasi Monte Carlo menghasilkan distribusi probabilitas dari suatu proses dengan menjalankan model secara berulang menggunakan nilai input acak yang diambil dari distribusi probabilitas yang telah ditentukan, dalam penelitian ini sebanyak 1.000 iterasi untuk setiap skenario.

Secara garis besar, analisis dilakukan melalui tahapan berikut:

1. Menyusun *Work Breakdown Structure* (WBS) dan jaringan kerja (*network diagram*) untuk setiap skenario proyek.
2. Menganalisis *Critical Path Method* (CPM) lewat *forward pass* dan *backward pass* guna menentukan jalur kritis, total float, dan durasi proyek, baik pada kondisi eksisting maupun pada skenario percepatan [18], [19].

3. Mengidentifikasi aktivitas setup internal (yang dikerjakan saat unit shutdown) yang berpotensi diubah menjadi setup eksternal (dikerjakan sebelum shutdown) dengan prinsip *Single Minute Exchange of Die* (SMED), terutama pada rekondisi blade ring dan inspeksi komponen kritis.
4. Melakukan analisis *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) untuk menghitung estimasi waktu ( $t_e$ ), varians ( $\sigma^2$ ), dan standar deviasi ( $\sigma$ ) tiap aktivitas berdasarkan tiga titik estimasi, optimis, paling mungkin, dan pesimis, dengan distribusi Beta-PERT.
5. Menjalankan simulasi Monte Carlo sebanyak 1.000 iterasi di ModelRisk untuk memperoleh distribusi probabilitas durasi proyek tiap skenario, mencakup mean, standar deviasi, P90, dan probabilitas penyelesaian tepat waktu  $P(T \leq \text{target})$ .
6. Melakukan analisis sensitivitas dengan rank correlation coefficient (Spearman) untuk melihat aktivitas mana yang paling berkontribusi terhadap variansi total durasi proyek, divisualisasikan lewat Tornado Chart.
7. Menghitung dampak percepatan durasi terhadap *Equivalent Availability Factor* (EAF) unit, sekaligus melakukan analisis manfaat biaya yang mencakup penghematan biaya overhead dan nilai produksi listrik yang kembali diperoleh akibat berkurangnya hari shutdown.
8. Menguji beda non-parametrik Kruskal-Wallis [21] terhadap hasil simulasi Monte Carlo kelima skenario (Eksisting, Skenario 1-4), dilanjutkan uji post-hoc Dunn dengan koreksi Bonferroni [21] untuk melihat pasangan skenario mana yang berbeda signifikan.
9. Memvalidasi hasil dengan membandingkannya terhadap data realisasi aktual di lapangan, serta melalui diskusi dengan personel pelaksana proyek.

Analisis ini dijalankan dengan bantuan Microsoft Excel untuk pengolahan data, Microsoft Project 2019 untuk pemodelan jadwal, dan ModelRisk untuk simulasi Monte Carlo serta analisis statistik dan visualisasinya.



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian

## Hasil Dan Pembahasan

Analisis CPM memperlihatkan bagaimana penerapan SMED secara bertahap mengubah sejumlah aktivitas setup internal, seperti rekondisi blade ring, inspeksi spare part, dan pre-cleaning komponen, menjadi setup eksternal yang dikerjakan sebelum unit shutdown. Ringkasan efisiensi SMED pada setiap skenario disajikan pada Tabel 1.

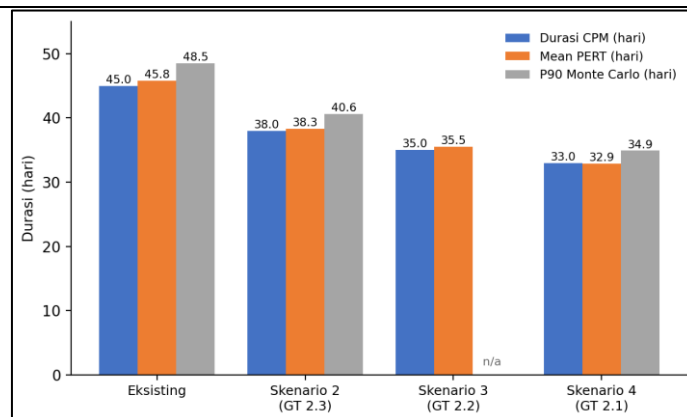
**Tabel 1.** Ringkasan efisiensi SMED per skenario

Skenario	Setup Internal Eksisting (hari)	Setup Internal Setelah SMED (hari)	Efisiensi SMED (%)	Pengurangan Jalur Kritis (hari)	Durasi Realisasi (hari)
Eksisting	14,0	14,0	0%	0	45
Skenario 2 (GT 2.3)	14,0	4,5	67,9%	7	38
Skenario 3 (GT 2.2)	14,0	0,5	96,4%	10	35
Skenario 4 (GT 2.1)	14,0	0,5	96,4% + Crash	12	33

Tabel 2 merangkum hasil analisis PERT dan simulasi Monte Carlo (1.000 iterasi, distribusi Beta-PERT) untuk setiap skenario. Skenario 4 (GT 2.1) tampil sebagai yang terbaik secara probabilistik, dengan mean PERT tersingkat (32,9 hari) dan risiko keterlambatan paling rendah (47,3%). Menariknya, Skenario 3 (GT 2.2) justru menunjukkan pola berbeda: meski standar deviasinya paling kecil (1,3 hari), yang berarti durasinya paling konsisten, risiko keterlambatannya malah paling tinggi di antara ketiga skenario percepatan (65,7%), karena target durasi 35 hari ditetapkan sangat dekat dengan mean PERT-nya sendiri (35,5 hari).

**Tabel 2.** Ringkasan hasil analisis CPM, PERT, dan simulasi Monte Carlo

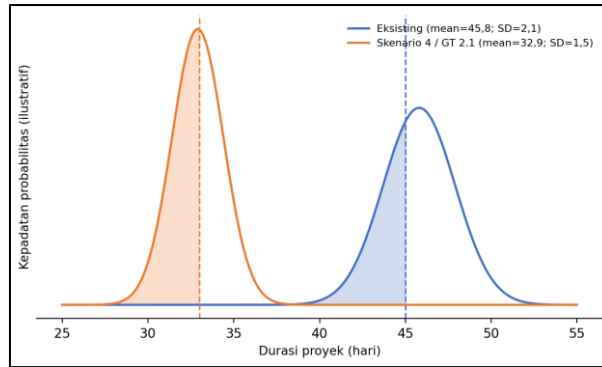
Skenario	Durasi CPM (hari)	Mean PERT (hari)	SD PERT (hari)	P90 Monte Carlo (hari)	Risiko Keterlambatan (%)
Eksisting	45	45,8	2,1	48,5	69,2
Skenario 2 (GT 2.3)	38	38,3	1,74	40,6	57,8
Skenario 3 (GT 2.2)	35	35,5	1,3	–	65,7
Skenario 4 (GT 2.1)	33	32,9	1,5	34,9	47,3



**Gambar 2.** Perbandingan durasi CPM, mean PERT, dan P90 Monte Carlo per skenario

Pada kondisi eksisting, probabilitas penyelesaian tepat waktu dari pendekatan analitik PERT/Normal (35,2%) dan simulasi Monte Carlo (30,8%) hanya berselisih 4,4%, sementara nilai P90 dari kedua pendekatan persis sama (48,5 hari). Pola ini konsisten di seluruh skenario lain, dengan selisih P90 antara pendekatan analitik dan simulasi tidak lebih dari 0,17 hari.

Salah satu temuan menarik dari penelitian ini adalah bahwa durasi CPM yang paling singkat tidak otomatis berarti risiko keterlambatan yang paling rendah. Skenario 3 (GT 2.2) memang punya standar deviasi paling kecil di antara seluruh skenario (1,3 hari), yang artinya durasinya paling konsisten, tetapi justru memiliki risiko keterlambatan tertinggi (65,7%). Sebabnya, target durasi 35 hari ditetapkan terlalu dekat dengan mean PERT-nya sendiri (35,5 hari), sehingga sekitar separuh kemungkinan hasil simulasi jatuh di atas target tersebut. Sebaliknya, Skenario 4 (GT 2.1) menetapkan target 33 hari yang berada tepat di atas mean PERT-nya (32,9 hari), sehingga lebih dari separuh iterasi simulasi selesai sebelum target tercapai dan risiko keterlambatannya menjadi yang terendah (47,3%). Dari sini terlihat bahwa posisi target penjadwalan relatif terhadap mean probabilistiknya sama pentingnya dengan durasi rata-rata itu sendiri dalam menentukan seberapa andal sebuah jadwal proyek.



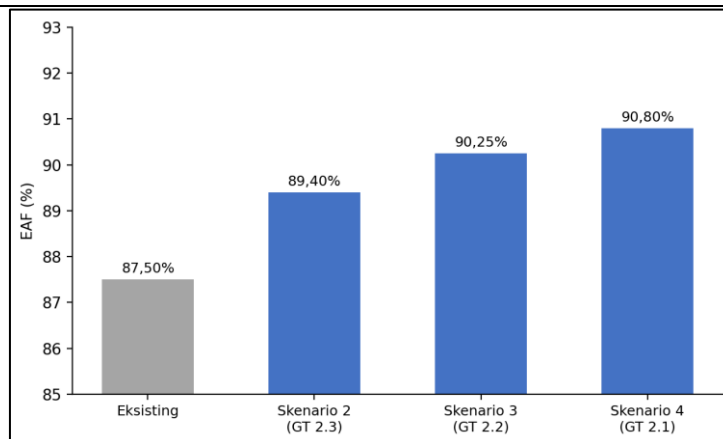
**Gambar 3.** Ilustrasi kurva distribusi probabilitas durasi (pendekatan normal berdasarkan mean dan SD PERT)

Kesesuaian yang tinggi antara hasil analitik PERT/Normal dan simulasi Monte Carlo, dengan selisih probabilitas maksimum hanya 4,4% dan selisih P90 tidak lebih dari 0,17 hari, mengindikasikan bahwa pendekatan analitik PERT/Normal sudah cukup andal sebagai alat estimasi cepat untuk perencanaan awal. Meski begitu, simulasi Monte Carlo tetap dibutuhkan untuk menangkap ketidaknormalan distribusi durasi pada aktivitas-aktivitas dengan variasi tinggi, sekaligus untuk menghasilkan analisis sensitivitas lewat Tornado Chart.

Dari sisi operasional, setiap hari pengurangan durasi overhaul berkontribusi menaikkan EAF sekitar 0,275%, sejalan dengan prinsip keandalan dan ketersediaan sistem yang banyak dibahas dalam literatur reliability engineering [4], [5]. Tabel 3 menyajikan dampak percepatan durasi terhadap EAF pada setiap skenario, sekaligus hasil analisis manfaat biaya yang dihitung secara rinci khusus untuk Skenario 3 (GT 2.2), karena skenario inilah yang sudah terealisasi penuh di lapangan.

**Tabel 3.** Dampak percepatan durasi terhadap EAF dan manfaat finansial

Skenario	Durasi (hari)	EAF (%)	ΔEAF (%)	Manfaat Finansial Bersih
Eksisting	45	87,5	–	–
Skenario 2 (GT 2.3)	38	89,4	+1,9	–
Skenario 3 (GT 2.2)	35	90,25	+2,75	Rp19,48 miliar/unit/siklus
Skenario 4 (GT 2.1)	33	90,80	+3,3	–



**Gambar 4.** Peningkatan Equivalent Availability Factor (EAF) per skenario

Manfaat finansial bersih Skenario 3 sebesar Rp19,48 miliar per unit per siklus overhaul ini berasal dari dua komponen: penghematan biaya overhead langsung sebesar Rp846,55 juta (4,3% dari manfaat kotor) dan nilai energi yang kembali diperoleh dari 10 hari percepatan sebesar Rp18,72 miliar (95,7% dari manfaat kotor), setelah dikurangi biaya investasi SMED tambahan sebesar Rp88,95 juta, sejalan dengan rasionalitas ekonomis pengurangan waktu setup yang juga ditekankan dalam literatur manajemen operasi [22].

Dari sisi ekonomi, struktur manfaat finansial Skenario 3 cukup jelas memperlihatkan bahwa nilai energi yang dipulihkan karena unit kembali beroperasi lebih cepat (95,7% dari manfaat kotor) jauh lebih dominan dibandingkan penghematan biaya overhead langsung (4,3%). Artinya, nilai ekonomis utama dari percepatan overhaul ini sebenarnya bersumber dari pulihnya kapasitas produksi listrik, bukan sekadar dari efisiensi biaya pelaksanaan proyek. Rasio manfaat terhadap investasi SMED yang sangat tinggi, lebih dari 200 kali lipat untuk komponen nilai energi saja, semakin memperkuat alasan untuk berinvestasi pada kegiatan pre-overhaul seperti rekondisi blade ring eksternal.

Hasil uji non-parametrik Kruskal-Wallis terhadap simulasi Monte Carlo seluruh skenario, dengan total 5.000 observasi gabungan dari lima skenario yang masing-masing 1.000 iterasi, disajikan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Hasil uji Kruskal-Wallis dan post-hoc Dunn

Statistik	Nilai
Statistik H (Kruskal-Wallis)	4.344,81
Derajat bebas (df)	4
Jumlah observasi (N)	5.000 (5 skenario × 1.000 iterasi)
Nilai kritis $\chi^2$ ( $\alpha = 0,05$ ; $df = 4$ )	9,49
p-value	< 0,0001
Keputusan	Tolak H0 (distribusi durasi kelima skenario berbeda)
Post-hoc Dunn (Bonferroni)	Seluruh pasangan skenario berbeda signifikan, kecuali Eksisting vs Skenario 1 ( $p = 1,000$ )

Hasil uji Kruskal-Wallis dan post-hoc Dunn menjadi bukti inferensial bahwa perbedaan durasi antar skenario memang signifikan secara statistik, bukan sekadar perbedaan yang terlihat sepintas di angka. Tidak adanya perbedaan signifikan antara kondisi Eksisting dan Skenario 1 ( $p = 1,000$ ) justru memperkuat validitas internal model, karena Skenario 1 memang didefinisikan sebagai baseline CPM tanpa penerapan SMED, sehingga secara teknis distribusinya wajar setara dengan kondisi eksisting.

Penelitian ini tentu punya keterbatasan. Validasi hasilnya hanya didasarkan pada satu siklus realisasi proyek untuk masing-masing unit (GT 2.1, GT 2.2, dan GT 2.3) pada satu studi kasus di PLTGU Grati Blok 2, sehingga generalisasi ke pembangkit lain masih memerlukan validasi lebih lanjut. Faktor eksternal di luar kendali proyek, seperti perubahan regulasi atau kondisi sistem kelistrikan nasional, juga belum dimasukkan ke dalam analisis. Untuk penelitian selanjutnya, akan menarik untuk mengeksplorasi penerapan SMED pada aktivitas lain di luar rekondisi blade ring, misalnya inspeksi dan rekondisi combustor basket, nozzle, dan transition piece, komponen kritis pada operasi turbin gas [7], yang menurut analisis Tornado Chart juga berkontribusi cukup besar terhadap variansi total durasi proyek.

## Simpulan

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil memadukan CPM, PERT, SMED, dan simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi proyek major inspection turbin gas GT 2.1, GT 2.2, dan GT 2.3 di PLTGU Grati Blok 2. Penerapan SMED terbukti mampu mengonversi aktivitas rekondisi blade ring dari setup internal menjadi setup eksternal, memangkas durasi jalur kritis hingga 10 hari pada Skenario 3, dari 45 hari menjadi 35 hari. Analisis CPM, PERT, dan simulasi Monte Carlo menunjukkan kesesuaian yang tinggi antar pendekatan, sekaligus mengungkap bahwa risiko keterlambatan tidak hanya ditentukan oleh durasi rata-rata, tetapi juga oleh posisi target jadwal relatif terhadap mean probabilitiknya. Percepatan durasi ini turut menaikkan EAF unit di seluruh skenario, dengan manfaat finansial bersih yang signifikan pada Skenario 3 (GT 2.2) sebagai skenario yang telah terealisasi penuh di lapangan. Uji Kruskal-Wallis ( $H = 4.344,81$ ;  $df = 4$ ;  $p < 0,0001$ ) dan post-hoc Dunn turut mengonfirmasi bahwa perbedaan durasi antar skenario memang signifikan secara statistik.

Berdasarkan temuan-temuan tersebut, PT PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pemeliharaan PLTGU Grati disarankan menjadikan Full SMED (Skenario 3) sebagai standar prosedur pemeliharaan untuk seluruh unit turbin gas Blok 2, dengan rekondisi blade ring eksternal dijadwalkan minimal 30 hari sebelum shutdown. Untuk ke depannya, penelitian lanjutan dapat memperluas penerapan SMED ke aktivitas inspeksi komponen kritis lain, sekaligus mengembangkan sistem monitoring berbasis data secara real-time agar prediksi jadwal pada proyek overhaul berikutnya semakin akurat.

## Daftar Pustaka

- [1] A. A. Putra Damara, I. Wijaya Kusuma, and A. Sri Komaladewi, "Analisa kinerja mesin pembangkit listrik tenaga gas unit 1 blok 1 di PT. Indonesia Power Grati POMU.," 2021.
- [2] D. Marsudi, "Pembangkitan Energi Listrik," 2005.
- [3] J. Moubrey, *Reliability-centred maintenance*. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [4] C. E. Ebeling, "Introduction to reliability and maintainability engineering," 1997.
- [5] A. Govil, "Reliability engineering," 1983.

- [6] A. Daryus, "Manajemen pemeliharaan mesin [Diktat kuliah]. Universitas Darma Persada,," 2007.
- [7] H. Arimura, R. Magoshi, S. Jyo, and Y. Fukuizumi, "Mitsubishi G-series gas turbines operating experience & improvements update," 1970.
- [8] P. F. Kaming, P. O. Olomolaiye, G. D. Holt, and F. C. Harris, "Factors influencing construction time and cost overruns on high-rise projects in Indonesia," 1997, doi: 10.1080/014461997373132.
- [9] Project Management Institute., *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)*. Project Management Institute, Inc., 2013.
- [10] J. D. Stevens, "Techniques for construction network scheduling," 1990.
- [11] F. H. Lermen, M. de F. Morais, C. Matos, R. Röder, and C. Röder, "Optimization of times and costs of project of horizontal laminator production using PERT/CPM technical," no. 3, Sep. 2016, doi: 10.14807/ijmp.v7i3.423.
- [12] T. Uher, "Programming and scheduling techniques," 2003.
- [13] H. M. Mohamad, M. I. Mohamad, I. Saad, N. Bolong, J. Mustazama, and S. N. M. Razali, "A case study of s-curve analysis: Causes, effects, tracing and monitoring project extension of time," no. 4, Apr. 2021, doi: 10.28991/cej-2021-03091679.
- [14] K. Herr, "Dramatically reduce set-up time and increase production flexibility with SMED,," 2014.
- [15] Gavriel. Salvendy, *Handbook of industrial engineering : technology and operations management*. Wiley, 2001.
- [16] D. Shyong, W. Foon, and M. Terziovski, "The impact of operations and maintenance practices on power plant performance," 2014.
- [17] A. A. Alhomadi, R. Dehghan, and J. Y. Ruwanpura, "The predictability of fast-track projects," 2011. doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.247.
- [18] S. Aulia and H. Cipta, "Network planning analysis using CPM and PERT methods on optimization of time and cost," 2023, doi: 10.33395/sinkron.v8i1.11961.
- [19] H. A. Baits, I. A. Puspita, and A. F. Bay, "Combination of Program Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM) for project schedule development," 2020, doi: 10.30880/ijje.2020.12.03.009.
- [20] M. Afonso, A. T. Gabriel, and R. Godina, "Proposal of an innovative ergonomic SMED model in an automotive steel springs industrial unit," May 2022, doi: 10.1016/j.aime.2022.100075.
- [21] G. K. and J. R. A. Bhattacharyya, "Statistics - Principles and methods ( 6th ed.)," 1977.
- [22] S. Gupta and M. Starr, "Production and operations management systems," 2014.