Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

OPTIMALISASI PENJADWALAN PEMELIHARAAN PESAWAT TERBANG: PERBANDINGAN MILP DAN SGS UNTUK PENGELOLAAN WAKTU, SUMBER DAYA, DAN RISIKO JADWAL

Grace Citra Dewi*
Master's Program in Innovation Management, Faculty of Economics and Business,
Ma Chung University, Malang, Indonesia
Gracedewi@fulbrightmail.org
Raden Mohammad Suaidy Avief
Tentara Nasional Indonesia Angkatan Udara (TNI AU)
s3suaidy@gmail.com
Irhamsyah
Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur
*Corresponding Author: Gracedewi@fulbrightmail.org

Abstract: *This quantitative computational study evaluates the scheduling of two anonymized aircraft maintenance projects comprising 626 activities, 709 precedence relationships and 13 shared resource categories. A mixed-integer linear programming (MILP) schedule is assessed against a serial schedule generation scheme (SGS) under identical PERT expected durations and resource constraints, using Python in Anaconda. Both schedules attain an overall makespan of 57,078 minutes, yet MILP shortens Project A completion by 1,796 minutes (10.49%) against SGS. Workload and horizon-wide average resource utilization are equal, whereas SGS exhibits lower temporal load variation in five categories. Existing 10,000-run resource-aware Beta-PERT Monte Carlo simulations indicate a 5.2% probability of meeting the deterministic completion target, with a P90 duration of 58,872.01 minutes. The findings establish a project-level schedule trade-off but do not demonstrate combined makespan savings or verified gains in individual labor productivity. Inferences remain conditional on calibrated activity-level uncertainty parameters and modeled resource requirements.*
Keywords: *aircraft maintenance; mixed-integer linear programming; resource-constrained project scheduling; Monte Carlo; resource leveling.*

Abstak: Penelitian kuantitatif komputasional ini mengevaluasi penjadwalan dua proyek pemeliharaan pesawat yang disamarkan, mencakup 626 aktivitas, 709 hubungan pendahulu, dan 13 jenis sumber daya bersama. Jadwal mixed-integer linear programming (MILP) dibandingkan dengan serial schedule generation scheme (SGS) menggunakan durasi harapan PERT serta kendala sumber daya yang sama melalui Python pada Anaconda. Kedua jadwal menghasilkan makespan gabungan 57.078 menit; MILP mempercepat penyelesaian Proyek A sebesar 1.796 menit (10,49%) dibandingkan SGS. Beban kerja total dan utilisasi rata-rata sepanjang horizon gabungan tidak berubah, sedangkan SGS menunjukkan pemerataan temporal yang lebih baik pada lima jenis sumber daya. Simulasi Monte Carlo Beta-PERT berbatas sumber daya yang telah tersedia,

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

dengan 10.000 iterasi, menghasilkan peluang 5,20% untuk memenuhi target deterministik serta P90 sebesar 58.872,01 menit. Temuan ini membuktikan perbedaan kinerja penjadwalan pada tingkat proyek, bukan penghematan makespan gabungan atau kenaikan produktivitas individu yang telah terukur. Interpretasi hasil dibatasi oleh input probabilistik yang dikalibrasi dan kebutuhan sumber daya hasil pemodelan.
Kata kunci: *penjadwalan pemeliharaan pesawat; MILP; kendala sumber daya; Monte Carlo; pemerataan sumber daya.*

PENDAHULUAN

Pemeliharaan pesawat merupakan kegiatan yang bergantung pada urutan teknis, ketersediaan tenaga ahli, fasilitas, peralatan, dan batas kapasitas. Ketika beberapa proyek berjalan secara bersamaan, aktivitas yang secara teknis dapat dilakukan paralel tetap dapat saling bersaing atas sumber daya yang sama. Konflik tersebut dapat menimbulkan waktu tunggu dan membuat jadwal yang hanya berorientasi pada durasi aktivitas tidak cukup untuk menggambarkan kelayakan operasional. Literatur perencanaan kapasitas dalam industri maintenance, repair, and overhaul (MRO) menekankan pentingnya menghubungkan jadwal aktivitas dengan kapasitas sumber daya (Dinis et al., 2019), sementara penelitian terbaru membahas model penjadwalan pemeliharaan pesawat dan alokasi tugas berbasis optimasi (Chen et al., 2024), (Ali et al., 2025).

Berbagai pendekatan telah dikembangkan, mulai dari penugasan stasiun dan perencanaan pemeliharaan pesawat militer hingga algoritma optimasi dan metaheuristik (Adimonyemma & Sun, 2025)–(Chen et al., 2026). Namun, hasil suatu metode tidak semestinya dinilai hanya dari satu indikator. Pengurangan waktu selesai satu proyek belum tentu mengurangi makespan gabungan jika proyek lain tetap menentukan akhir horizon. Demikian pula, jadwal dengan makespan yang sama dapat memiliki profil beban temporal berbeda. Perbedaan antara waktu penyelesaian, beban puncak, dan pemerataan sumber daya menjadi persoalan praktis ketika pengelola perlu memilih jadwal yang layak dan dapat dijalankan.

Kesenjangan penelitian yang ditangani artikel ini bersifat evaluatif: dibutuhkan pembandingan dua jadwal dengan durasi aktivitas dan kendala kapasitas yang setara, serta pelaporan yang memisahkan kinerja waktu, profil sumber daya, dan risiko ketidakpastian. Studi optimasi pemeliharaan dan resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) telah menawarkan model serta algoritma yang beragam (Aghileh et al., 2024; Chakrabortty et al., 2021; Ding et al., 2023; Farahmand-Mehr & Mousavi, 2026; Fekri et al., 2024; Goudarzi et al., 2025; Khajesaeedi et al., 2025; Mozhdehi et al., 2024; Peng et al., 2025; Peña et al., 2023; Peña et al., 2024; Qiu et al., 2025; Soltan & Ashrafi, 2025), sedangkan studi tentang durasi dan risiko pemeliharaan mendorong penggunaan analisis probabilistik (Alvarez-Campana et al., 2024; An et al., 2021; Atici & Şenol, 2022; Avief & Hidayat, 2026; Bocewicz et al., 2023; Eltoukhy et al., 2018; Filho et al., 2024; Giacotto et al., 2025; Okunade et al., 2021; Stanton et al., 2023; Zhang et al., 2025). Akan tetapi, pada kasus yang dikaji di sini, belum cukup hanya menyatakan bahwa MILP lebih baik; hasilnya harus diuji terhadap

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

pembanding serial schedule generation scheme (SGS), termasuk kemungkinan tidak adanya pengurangan makespan gabungan.

Penelitian ini bertujuan: (1) membandingkan waktu penyelesaian setiap proyek dan makespan gabungan antara jadwal MILP tersimpan dan SGS dengan input durasi serta kapasitas yang sama; (2) membandingkan beban puncak, utilisasi rata-rata, dan variasi temporal 13 kategori sumber daya; serta (3) mengestimasi peluang memenuhi target deterministik melalui simulasi Monte Carlo Beta-PERT yang tersedia. Kebaruan praktis penelitian terletak pada evaluasi komparatif yang secara eksplisit memisahkan manfaat waktu pada tingkat proyek dari makespan gabungan, pemerataan sumber daya, dan risiko jadwal. Secara teoretis, penelitian bertumpu pada kerangka RCPSP dan prinsip manajemen proyek berbasis kendala: jadwal harus memenuhi precedence dan kapasitas, sedangkan mutu jadwal dinilai melalui beberapa indikator, bukan makespan saja.

Kerangka konseptual penelitian menempatkan metode penjadwalan (MILP dan SGS) sebagai faktor pembeda jadwal, dengan durasi PERT, jaringan precedence, kebutuhan sumber daya, dan kapasitas sebagai input yang dikendalikan. Kinerja dibandingkan melalui tiga kelompok keluaran: (a) waktu penyelesaian proyek dan makespan gabungan; (b) beban puncak, utilisasi, dan koefisien variasi beban; serta (c) peluang penyelesaian pada target tertentu berdasarkan simulasi. Kerangka ini tidak mengasumsikan bahwa satu metode unggul pada seluruh keluaran.

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan desain studi kasus kuantitatif-komputasional. Unit analisis adalah dua proyek pemeliharaan pesawat yang dianonimkan, yaitu Proyek A dengan 429 aktivitas dan Proyek B dengan 197 aktivitas. Data yang dianalisis berupa data sekunder/arsip pemodelan: master aktivitas, relasi pendahulu, estimasi durasi PERT, kebutuhan dan kapasitas sumber daya, jadwal MILP tersimpan, hasil pembentukan jadwal SGS, serta rekap simulasi Monte Carlo. Pengumpulan data dilakukan melalui penelaahan dan konsolidasi delapan berkas pengolahan yang disebut dalam arsip (sumber mentah, master aktivitas, jaringan, CPM, PERT, input RCMPSP, hasil MILP, dan Monte Carlo); bukan melalui wawancara atau pengukuran waktu kerja langsung.

Desain dan Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-komputasional dengan desain studi kasus untuk mengevaluasi penjadwalan pemeliharaan pesawat terbang yang melibatkan keterbatasan sumber daya. Objek penelitian terdiri atas dua proyek pemeliharaan pesawat yang identitasnya disamarkan, yaitu Proyek A dengan 429 aktivitas dan Proyek B dengan 197 aktivitas. Kedua proyek dianalisis sebagai bagian dari sistem penjadwalan yang menggunakan sumber daya bersama.

Kerangka analisis mengacu pada *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP), yaitu permasalahan penjadwalan yang mempertimbangkan durasi aktivitas, hubungan ketergantungan antaraktivitas, serta batas ketersediaan sumber daya. Penelitian membandingkan jadwal Mixed-Integer Linear Programming (MILP) dengan *Serial*

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Schedule Generation Scheme (SGS) berdasarkan input durasi dan kapasitas sumber daya yang sama.

Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa arsip pemodelan dan hasil pengolahan penjadwalan. Data mencakup master aktivitas, jaringan hubungan pendahulu, estimasi durasi aktivitas menggunakan metode PERT, kebutuhan dan kapasitas sumber daya, jadwal MILP yang tersimpan, hasil pembentukan jadwal SGS, serta rekapitulasi simulasi Monte Carlo.

Dataset penelitian mencakup 626 aktivitas, 709 hubungan ketergantungan antaraktivitas, dan 13 kategori sumber daya bersama. Parameter durasi dan kebutuhan sumber daya digunakan sebagai input untuk membangun serta mengevaluasi jadwal. Sebagian parameter aktivitas pada Proyek B merupakan hasil rekonstruksi terkalibrasi, bukan hasil pengukuran historis untuk setiap aktivitas. Oleh karena itu, hasil penelitian ditafsirkan sesuai dengan karakteristik dan asumsi dataset yang dianalisis.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui teknik dokumentasi, yaitu penelaahan, pemeriksaan, dan konsolidasi berkas yang digunakan dalam proses pemodelan penjadwalan. Berkas tersebut meliputi data sumber awal, master aktivitas, jaringan ketergantungan, perhitungan Critical Path Method (CPM), estimasi durasi PERT, input RCPSP, hasil MILP, dan hasil simulasi Monte Carlo.

Data kemudian dikelompokkan berdasarkan informasi aktivitas, durasi, hubungan pendahulu, kebutuhan sumber daya, kapasitas sumber daya, dan keluaran penjadwalan. Pemeriksaan dilakukan untuk memastikan konsistensi data yang digunakan dalam perbandingan kedua metode. Penelitian ini tidak menggunakan wawancara atau pengukuran waktu kerja secara langsung; dengan demikian, data yang dianalisis merepresentasikan arsip pemodelan dan hasil komputasi yang tersedia.

Variabel dan Parameter Penelitian

Variabel pembeda dalam penelitian adalah metode penjadwalan, yaitu MILP dan SGS. Kedua metode dievaluasi menggunakan parameter input yang setara, meliputi durasi aktivitas berdasarkan estimasi PERT, hubungan ketergantungan antaraktivitas, kebutuhan sumber daya setiap aktivitas, serta kapasitas sumber daya yang tersedia.

Kinerja jadwal dinilai melalui tiga kelompok indikator. Pertama, indikator waktu yang meliputi waktu penyelesaian masing-masing proyek dan *makespan* gabungan. Kedua, indikator penggunaan sumber daya yang meliputi beban kerja berbobot, utilisasi rata-rata, beban puncak, dan koefisien variasi beban temporal. Ketiga, indikator risiko jadwal yang meliputi peluang penyelesaian sebelum atau tepat pada target deterministik dan persentil durasi penyelesaian.

Penelitian menerapkan studi kasus kuantitatif berbasis optimasi dan evaluasi simulasi. Unit analisis terdiri atas Proyek A (429 aktivitas) dan Proyek B (197 aktivitas), yang identitas teknisnya disamarkan. Data dikembangkan melalui delapan berkas tahap pengolahan: sumber mentah, master aktivitas, jaringan, CPM, PERT, input RCMPSP, hasil

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

MILP, dan Monte Carlo. Perhitungan komparatif dilakukan di Anaconda/Jupyter menggunakan pandas, NumPy, NetworkX dan Pyomo/HiGHS. Hasil yang digunakan di artikel berasal dari tabel induk XLSX yang diunggah, bukan hasil komputasi yang direkayasa.

Analisis data dilakukan dalam empat tahap. Pertama, validasi struktur jaringan dengan memeriksa 626 aktivitas, 709 relasi precedence, dan tidak adanya siklus. Kedua, pemeriksaan kelayakan jadwal dengan mengecek seluruh relasi pendahulu serta batas kapasitas untuk 13 kategori sumber daya. Ketiga, perbandingan jadwal menggunakan makespan per proyek, makespan gabungan, beban kerja berbobot, utilisasi rata-rata, beban puncak, dan koefisien variasi temporal (CV). Keempat, interpretasi hasil 10.000 replikasi Monte Carlo Beta-PERT untuk menghitung peluang penyelesaian sebelum target dan persentil durasi. Pengolahan yang tercatat menggunakan Python pada Anaconda/Jupyter dengan pandas, NumPy, NetworkX, dan Pyomo/HiGHS. Karena arsip yang tersedia berisi rekap hasil dan bukan seluruh log solver yang dapat dijalankan ulang, penelitian ini memperlakukan jadwal MILP sebagai jadwal tersimpan yang diaudit, bukan mengklaim replikasi independen atas proses optimasi.

Jaringan memiliki 626 aktivitas dan 709 busur pendahulu yang lolos pemeriksaan sebagai graf tanpa siklus. Durasi harapan PERT pada input RCMPSP identik dengan durasi terpilih yang tercatat pada jadwal MILP untuk seluruh 626 aktivitas. Durasi CPM yang lebih besar menggunakan basis durasi berbeda sehingga tidak diperlakukan sebagai pembanding manfaat MILP. Parameter aktivitas pada Proyek B berasal dari rekonstruksi terkalibrasi dan bukan hasil pengukuran historis aktivitas satu per satu.

Notasi, parameter, dan variabel keputusan

Misalkan $I=\{1,\ldots,626\}$ adalah himpunan aktivitas, P himpunan dua proyek, $E \subseteq I \times I$ himpunan 709 hubungan pendahulu, R himpunan 13 kategori sumber daya bersama, dan T himpunan titik waktu diskret pada horizon perencanaan H. Parameter d_i menyatakan durasi harapan PERT aktivitas i (menit), q_{ir} kebutuhan aktivitas i atas sumber daya r, K_r kapasitas sumber daya r, dan p(i) proyek aktivitas i. Parameter durasi yang digunakan identik dengan kolom Duration_PERT_Expected_Min pada file RCMPSP. Untuk Proyek B, parameter PERT tingkat aktivitas merupakan hasil kalibrasi, bukan pengukuran historis langsung.

Variabel biner x_{it} bernilai 1 jika aktivitas i dimulai pada waktu t dan 0 selainnya. Variabel C_p menyatakan waktu penyelesaian proyek p; $C_{\max}$ adalah waktu penyelesaian seluruh proyek. Formulasi berikut adalah representasi MILP berbasis waktu diskret untuk menjelaskan struktur matematis masalah, bukan klaim bahwa model time-indexed ini identik dengan formulasi solver dalam arsip.

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Fungsi tujuan dan kendala MILP

$$\text{Minimalkan } C_{max} \quad (1)$$

$$\Sigma_{t\in T_i} x_{it} = 1, \quad \forall i\in I \quad (2)$$

$$\Sigma_{t\in T_j} t\, x_{jt} \geq \Sigma_{t\in T_i} (t + d_i)x_{it}, \quad \forall (i,j)\in E \quad (3)$$

$$\Sigma_{i\in I} q_{ir} \Sigma_{t\in T_i: t\leq \tau<t+d_i} x_{it} \leq K_r, \quad \forall r\in R, \tau\in T \quad (4)$$

$$C_p \geq \Sigma_{t\in T_i} (t + d_i)x_{it}, \quad \forall i\in I \text{ dengan } p(i)=p \quad (5)$$

$$C_{max} \geq C_p, \quad \forall p\in P; \quad x_{it} \in \{0,1\} \quad (6)$$

Persamaan (1) meminimalkan waktu penyelesaian gabungan. Persamaan (2) menjamin setiap aktivitas tepat satu kali dimulai. Persamaan (3) memaksakan hubungan ketergantungan, sedangkan (4) membatasi jumlah kebutuhan sumber daya yang aktif secara serentak. Persamaan (5)–(6) mendefinisikan waktu penyelesaian setiap proyek dan proyek gabungan. T_i adalah himpunan waktu mulai yang layak bagi aktivitas i. Durasi pecahan menit perlu dipetakan secara konsisten ke grid waktu (atau menggunakan formulasi kontinu alternatif) sebelum formulasi ini diterapkan pada solver; hasil angka yang dilaporkan dalam naskah berasal dari jadwal arsip terverifikasi, bukan penyelesaian ulang formulasi (1)–(6).

Indikator evaluasi dan ketidakpastian

$$\text{Percepatan proyek (\%)} = 100 \times (C_{p,SGS} - C_{p,MILP}) / C_{p,SGS} \quad (7)$$

$$W_r = \Sigma_{i\in I} q_{ir}d_i; \quad U_r = 100 \times W_r/(K_r C_{max}) \quad (8)$$

$$CV_r = \sqrt{[(1/C_{max})\int_0^{C_{max}} (L_r(t)-\mu_r)^2\, dt]} / \mu_r \quad (9)$$

$$TE_i = (a_i + 4m_i + b_i)/6; \quad Var_i = [(b_i-a_i)/6]^2 \quad (10)$$

$$P(C_{max} \leq D) = N^{-1} \Sigma_{k=1}^{N} 1\{C_{max,k} \leq D\} \quad (11)$$

Dalam (8), W_r adalah beban kerja berbobot sumber daya, sedangkan U_r merupakan utilisasi rata-rata selama makespan gabungan. Pada (9), $L_r(t)$ menyatakan beban sumber daya r pada waktu t dan μ_r adalah rata-rata temporalnya; CV lebih kecil menunjukkan distribusi beban lebih merata pada horizon yang sama. Persamaan (10) merumuskan waktu harapan dan varians PERT; distribusi Beta-PERT digunakan untuk pembangkitan durasi pada simulasi yang diarsipkan. Persamaan (11) adalah estimator peluang memenuhi target D dari N=10.000 replikasi, dengan $1\{\cdot\}$ fungsi indikator. Hasil probabilitas bersifat bersyarat pada parameter durasi, kapasitas, dan kebijakan penjadwalan ulang yang digunakan.

Untuk aktivitas i dan j, variabel waktu mulai s_i dan durasi d_i memenuhi kendala pendahulu s_j ≥ s_i + d_i apabila i adalah pendahulu j. Pada setiap waktu t dan sumber daya r, jumlah kebutuhan q_ir dari aktivitas yang aktif tidak boleh melampaui kapasitas K_r. Makespan C_max memenuhi C_max ≥ s_i + d_i untuk semua aktivitas. Formulasi MILP menggunakan pembatas aktivitas simultan dan variabel keputusan waktu/alokasi yang sesuai dengan implementasi solver; karena berkas yang diunggah hanya memuat rekap hasil, klaim pemecahan ulang MILP secara independen tidak dibuat. Perbandingan dilakukan terhadap jadwal MILP tersimpan.

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Pembanding SGS dibangkitkan menggunakan urutan topologis leksikografis, penempatan aktivitas pada waktu mulai layak paling awal, dan sumber daya bersama yang sama dengan input MILP. Proses audit meliputi 709 relasi ketergantungan serta profil beban 13 kategori dengan toleransi pencocokan waktu 10^−7 menit. SGS adalah pembanding heuristik yang direkonstruksi untuk penelitian ini, bukan jadwal aktual historis.

Indikator operasional dan risiko

Konteks operasional hasil perlu dibaca sebagai evaluasi perencanaan, bukan laporan kinerja aktual satuan pemeliharaan pada tanggal tertentu. Target 57.078 menit merupakan horizon deterministik dari jadwal yang dianalisis. Data yang tersedia tidak memuat tanggal kalender, log aktual penyelesaian, jam-orang aktual, atau catatan gangguan lapangan yang memungkinkan penilaian apakah target tersebut telah tercapai dalam operasi berjalan. Oleh karena itu, pembahasan kondisi saat ini dibatasi pada implikasi pengelolaan: target deterministik perlu disertai cadangan waktu dan pemantauan risiko, terutama karena peluang pencapaian target dalam simulasi relatif rendah.

Percepatan waktu pada tingkat proyek dihitung sebagai 100 × (T_SGS − T_MILP)/T_SGS. Beban kerja terboboti suatu jenis sumber daya adalah Σ_i(q_ir × d_i). Utilisasi rata-rata selama horizon gabungan H ialah Σ_i(q_ir × d_i)/(K_r × H). Beban puncak menunjukkan intensitas penggunaan maksimum pada satu waktu; koefisien variasi (CV) adalah simpangan baku beban temporal dibagi beban rata-rata dan digunakan untuk evaluasi pemerataan. Indikator ini tidak disamakan dengan produktivitas pekerja berdasarkan output aktual per jam-orang.

Analisis Monte Carlo merujuk pada hasil 10.000 pengulangan yang telah tersedia dalam arsip: distribusi Beta-PERT berdasar parameter a, m, b, seed 20261012, dan penjadwalan ulang dengan SGS berbatas sumber daya. Target deterministik sebesar 57.078 menit. Analisis simulasi menggunakan prioritas SGS yang diwarisi dari baseline MILP; karena itu distribusi yang dilaporkan tidak mewakili uji stokastik berpasangan langsung antara kedua metode.

HASIL PENELITIAN

Kualitas input dan hasil deterministic

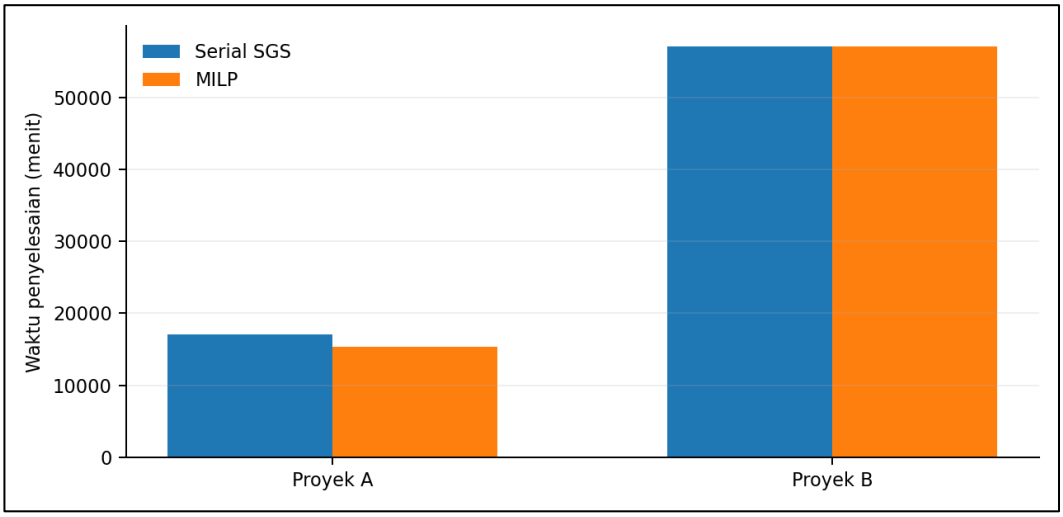
Komponen pemeriksaan	Nilai hasil
Aktivitas	626
Hubungan pendahulu	709
Jenis sumber daya bersama	13
Pelanggaran precedence SGS	0
Pelanggaran kapasitas SGS (toleransi waktu)	0
Makespan gabungan, kedua metode	57.078 menit

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Kesamaan makespan gabungan tidak bermakna identitas jadwal: sebanyak 415 dari 626 aktivitas mempunyai waktu mulai dan selesai yang berbeda pada kedua metode. Karena Proyek B membentuk rantai penentu durasi, batas bawah gabungan telah tercapai dalam model yang dilaporkan.

Efektivitas waktu per proyek

Unit	SGS (menit)	MILP (menit)	Selisih	Relatif
Proyek A	17.116,67	15.320,67	1.796,00	10,49%
Proyek B	57.078,00	57.078,00	0	0%
Gabungan	57.078,00	57.078,00	0	0%



Gambar 1. Waktu penyelesaian per proyek menurut metode penjadwalan.

Keuntungan 10,49% bersifat lokal pada Proyek A ketika dibandingkan terhadap SGS, bukan keunggulan makespan seluruh sistem. Perbedaan konfigurasi aktivitas menimbulkan ruang pilihan pengelolaan tenaga kerja dan fasilitas, namun profil utilisasi belum membuktikan penghematan jam-orang. Waktu penyelesaian proyek perlu ditafsirkan dengan mempertimbangkan karakteristik operasional pemeliharaan pesawat dan keterbatasan sumber daya yang tersedia. Dalam penelitian ini, kedua metode penjadwalan menghasilkan *makespan* gabungan sebesar 57.078 menit atau setara dengan sekitar 951,3 jam. Jika dikonversi ke waktu kontinu, durasi tersebut mencapai sekitar 39,64 hari. Namun, angka ini merepresentasikan horizon waktu model dan tidak dapat langsung disamakan dengan durasi kalender aktual pemeliharaan pesawat, karena penerapan jadwal di lapangan dapat dipengaruhi oleh pola kerja sif, hari libur, waktu tunggu suku cadang, kebutuhan inspeksi tambahan, serta kendala operasional lainnya.

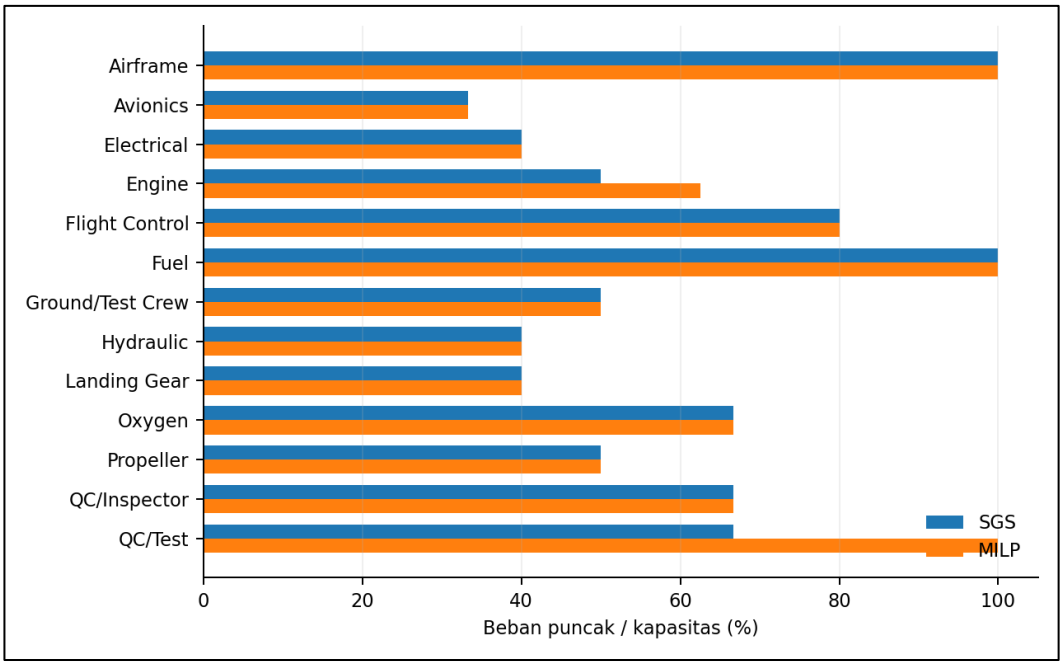
Perbandingan kedua metode menunjukkan bahwa MILP mempercepat penyelesaian Proyek A sebesar 1.796 menit atau sekitar 29,93 jam dibandingkan SGS. Meskipun demikian, percepatan tersebut tidak mengurangi *makespan* gabungan yang tetap

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

sebesar 57.078 menit karena Proyek B masih menentukan akhir horizon penjadwalan. Temuan ini menunjukkan bahwa manfaat percepatan pada tingkat proyek harus dibedakan dari manfaat terhadap penyelesaian keseluruhan pekerjaan. Dalam konteks pengelolaan pemeliharaan pesawat, percepatan satu kelompok pekerjaan belum tentu meningkatkan ketersediaan armada apabila pekerjaan lain yang menentukan akhir jadwal belum selesai.

Kapasitas, beban puncak, dan utilisasi

Kategori	Kapasitas	Puncak SGS	Puncak MILP
Airframe	12	12	12
Avionics	6	2	2
Electrical	5	2	2
Engine	8	4	5
Flight Control	5	4	4
Fuel	4	4	4
Ground/Test Crew	4	2	2
Hydraulic	5	2	2
Landing Gear	5	2	2
Oxygen	3	2	2
Propeller	4	2	2
QC/Inspector	3	2	2
QC/Test	3	2	3



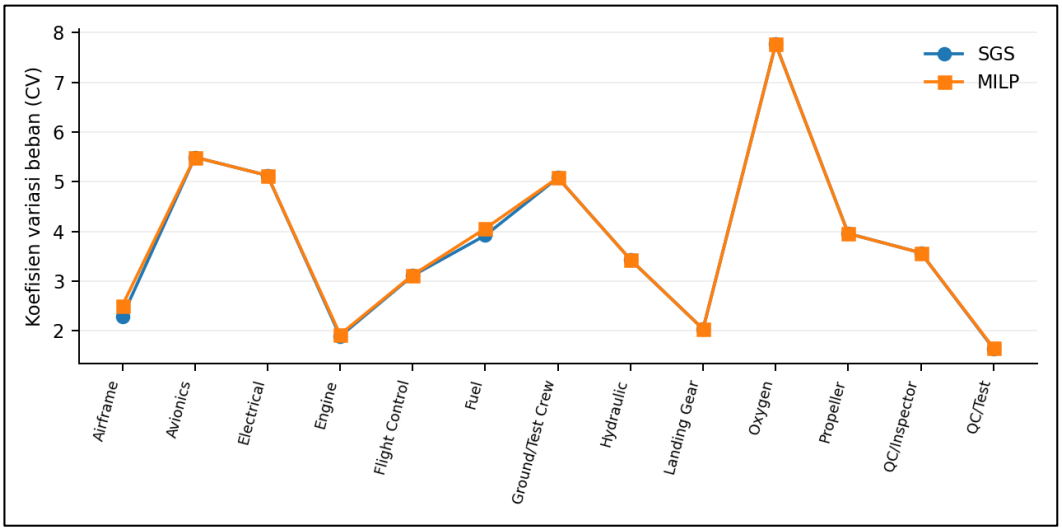
Gambar 2. Persentase beban puncak relatif terhadap kapasitas 13 sumber daya.

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Tidak terjadi pelanggaran kapasitas pada kedua jadwal dalam audit yang dilaporkan. Engine memiliki beban puncak empat unit pada SGS dan lima pada MILP, sedangkan QC/Test meningkat dari dua menjadi tiga. Pada semua kategori, beban kerja terboboti dan utilisasi rata-rata horizon gabungan kedua jadwal sama; hal tersebut merupakan konsekuensi dari kebutuhan–durasi tiap aktivitas dan horizon gabungan yang identik.

Pemerataan beban dan trade-off

Kategori	CV SGS	CV MILP
Airframe	2.2857	2.5060
Avionics	5.4932	5.4932
Electrical	5.1264	5.1264
Engine	1.8879	1.9238
Flight Control	3.1094	3.1212
Fuel	3.9192	4.0577
Ground/Test Crew	5.0797	5.0797
Hydraulic	3.4308	3.4308
Landing Gear	2.0333	2.0333
Oxygen	7.7696	7.7696
Propeller	3.9563	3.9563
QC/Inspector	3.5691	3.5691
QC/Test	1.6418	1.6546



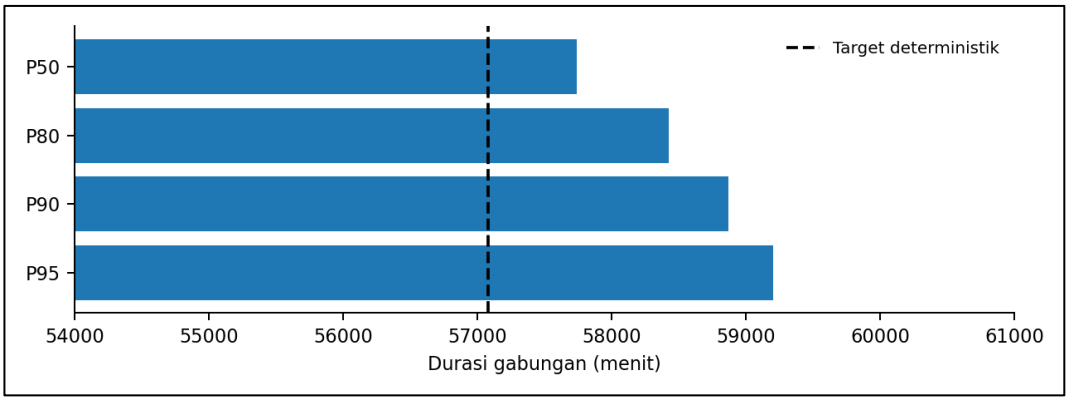
Gambar 3. Perbandingan koefisien variasi beban temporal SGS dan MILP.

SGS menghasilkan CV lebih kecil pada Airframe, Engine, Flight Control, Fuel, dan QC/Test, sedangkan delapan kategori relatif sama dalam presisi tabel. Oleh karena itu, klaim bahwa MILP memperbaiki pemerataan sumber daya tidak didukung oleh data. Temuan lebih tepat ditafsirkan sebagai trade-off antara penyelesaian lebih awal pada Proyek A dan distribusi beban yang lebih rata pada beberapa kelompok sumber daya.

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

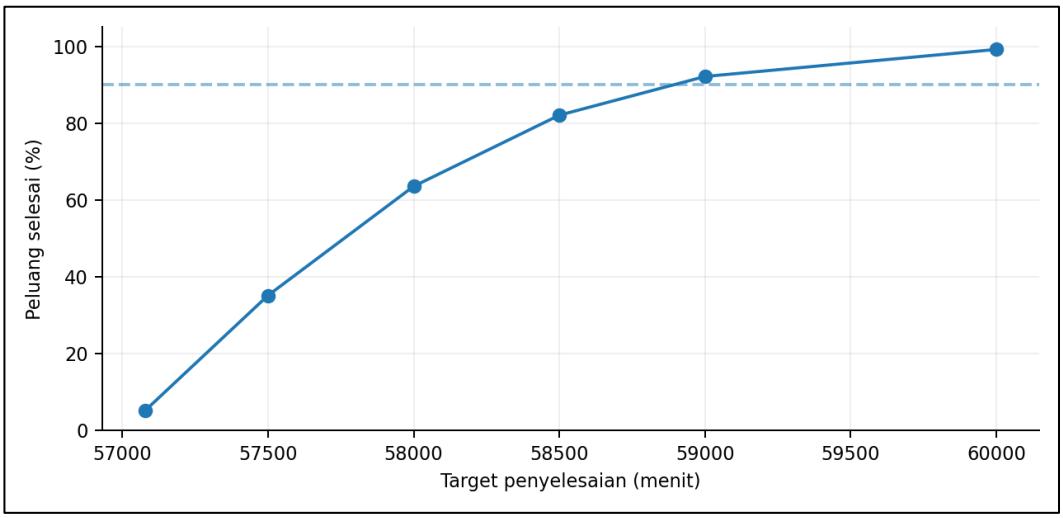
Risiko jadwal dalam Monte Carlo

Indikator	Proyek A	Proyek B	Gabungan
Rerata durasi (menit)	15.887,87	57.888,51	57.888,51
P90 (menit)	16.626,17	58.872,01	58.872,01
P95 (menit)	16.896,44	59.202,20	59.202,20
Peluang memenuhi target	100%	5,20%	5,20%



Gambar 4. Persentil penyelesaian gabungan dan target deterministik.

Target (menit)	Peluang selesai	Risiko terlambat
57078	5.20%	94.80%
57500	35.17%	64.83%
58000	63.57%	36.43%
58500	82.07%	17.93%
59000	92.14%	7.86%
60000	99.18%	0.82%



Gambar 5. Kurva peluang penyelesaian terhadap target waktu.

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Pada target 57.078 menit, peluang selesai menurut parameter model adalah 5,20%. P90 sebesar 58.872,01 menit menunjukkan tambahan waktu sekitar 1.794,01 menit dibandingkan target deterministik. Angka tersebut adalah hasil simulasi bersyarat dan tidak dapat dianggap sebagai tingkat keberhasilan historis sesungguhnya. Model menggunakan distribusi input terkalibrasi, kapasitas dimodelkan, dan satu kebijakan penjadwalan yang disimulasikan ulang.

PEMBAHASAN

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa MILP mempercepat penyelesaian Proyek A sebesar 1.796 menit atau 10,49% dibandingkan SGS, tetapi tidak mengurangi makespan gabungan karena Proyek B tetap menentukan akhir horizon pada 57.078 menit. Temuan ini konsisten dengan kerangka RCPSP: kelayakan jadwal ditentukan secara bersama oleh relasi pendahulu dan kapasitas sumber daya, sedangkan perbaikan pada satu bagian jaringan belum tentu mengubah jalur atau proyek yang menentukan penyelesaian keseluruhan. Dengan demikian, manfaat MILP pada kasus ini bersifat lokal pada waktu selesai Proyek A, bukan bukti penghematan total durasi operasi.

Dari perspektif manajemen proyek dan pengelolaan kapasitas MRO, jadwal perlu dievaluasi melalui indikator yang saling melengkapi (Ali et al., 2025; Chen et al., 2024; Dinis et al., 2019). Beban kerja berbobot dan utilisasi rata-rata kedua jadwal sama karena durasi aktivitas, kebutuhan sumber daya, dan horizon gabungan yang digunakan sama. Namun, MILP menunjukkan puncak yang lebih tinggi pada Engine dan QC/Test, sementara SGS memiliki CV lebih rendah pada Airframe, Engine, Flight Control, Fuel, dan QC/Test. Artinya, optimasi yang menekankan waktu selesai tidak otomatis menghasilkan beban yang lebih merata. Hasil ini mendukung penggunaan tujuan multiobjektif atau aturan penjadwalan yang mempertimbangkan makespan, pemerataan beban, dan kemudahan pelaksanaan secara bersamaan, sebagaimana relevan dalam literatur penjadwalan multi-proyek dan sumber daya multikeahlian (Aghileh et al., 2024; Chakrabortty et al., 2021; Ding et al., 2023; Farahmand-Mehr & Mousavi, 2026; Fekri et al., 2024; Goudarzi et al., 2025; Khajesaeedi et al., 2025; Mozhdehi et al., 2024; Peng et al., 2025; Peña et al., 2023; Peña et al., 2024; Qiu et al., 2025; Soltan & Ashrafi, 2025).

Hasil Monte Carlo memperlihatkan peluang 5,20% untuk menyelesaikan pekerjaan dalam 57.078 menit, sedangkan P90 mencapai 58.872,01 menit. Secara manajerial, selisih sekitar 1.794 menit antara target deterministik dan P90 dapat dipakai sebagai indikasi awal kebutuhan buffer waktu dalam perencanaan, bukan sebagai angka cadangan yang berlaku universal. Estimasi ini bergantung pada parameter Beta-PERT, hasil kalibrasi durasi aktivitas, kapasitas yang dimodelkan, dan kebijakan penjadwalan ulang SGS. Karena tidak tersedia simulasi stokastik berpasangan untuk kedua metode, data tidak mendukung klaim bahwa MILP atau SGS lebih tangguh terhadap ketidakpastian. Hal ini sejalan dengan kebutuhan mengintegrasikan ketidakpastian ke dalam perencanaan pemeliharaan (Alvarez-Campana et al., 2024; An et al., 2021; Atici & Şenol, 2022; Avief & Hidayat, 2026; Bocewicz

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

et al., 2023; Eltoukhy et al., 2018; Filho et al., 2024; Giacotto et al., 2025; Okunade et al., 2021; Stanton et al., 2023; Zhang et al., 2025).

Penelitian memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, analisis menggunakan satu kasus yang terdiri atas dua proyek sehingga generalisasi ke armada, organisasi, atau tipe pemeliharaan lain harus dilakukan dengan hati-hati. Kedua, sebagian parameter aktivitas Proyek B merupakan hasil rekonstruksi terkalibrasi dan bukan pengukuran historis per aktivitas. Ketiga, kebutuhan dan kapasitas sumber daya merupakan input pemodelan, sedangkan data jam-orang, output pekerjaan, dan catatan gangguan aktual tidak tersedia; karena itu produktivitas tenaga kerja aktual tidak dapat dihitung. Keempat, arsip yang dianalisis tidak menyediakan log solver independen yang lengkap untuk audit ulang optimalitas, sehingga hasil MILP ditafsirkan sebagai jadwal tersimpan yang dibandingkan dengan SGS. Kelima, simulasi ketidakpastian menggunakan satu kebijakan penjadwalan ulang dan tidak merupakan eksperimen berpasangan antara MILP dan SGS. Penelitian selanjutnya disarankan memvalidasi durasi dan kapasitas melalui catatan lapangan, menguji beberapa kasus pemeliharaan, menjalankan simulasi stokastik dengan skenario acak yang sama untuk setiap metode, serta membangun model multiobjektif yang menimbang makespan, variasi beban, dan buffer risiko.

Studi metode proyek multikeahlian (Mozhdehi et al., 2024), (Goudarzi et al., 2025), (Aghileh et al., 2024), (Soltan & Ashrafi, 2025), (Khajesaeedi et al., 2025), (Farahmand-Mehr & Mousavi, 2026), (Ding et al., 2023), (Qiu et al., 2025), (Chakrabortty et al., 2021), (Peng et al., 2025), (Peña et al., 2023), (Fekri et al., 2024), (Peña et al., 2024) memberi konteks bahwa kinerja bergantung pada aturan prioritas, aktivitas yang dapat diparalelkan, serta fungsi tujuan. CV yang lebih rendah pada SGS dalam lima kategori juga menandakan potensi pentingnya model multiobjektif: minimisasi waktu selesai proyek tertentu dapat bertentangan dengan pemerataan sumber daya. Pembentukan fungsi tujuan gabungan, misalnya kombinasi makespan, ketimpangan beban dan risiko waktu, merupakan agenda lanjutan dan belum menjadi hasil komputasi penelitian ini.

Temuan Monte Carlo sejalan secara konseptual dengan pentingnya ketidakpastian pemeliharaan (Avief & Hidayat, 2026), (Okunade et al., 2021), (Eltoukhy et al., 2018), (Zhang et al., 2025), (Stanton et al., 2023), (Atici & Şenol, 2022), (Bocewicz et al., 2023), (Giacotto et al., 2025), (Filho et al., 2024), (An et al., 2021), (Alvarez-Campana et al., 2024). Meskipun hasil deterministik memenuhi target, ketidakpastian aktivitas meningkatkan distribusi penyelesaian yang diharapkan. Namun, tidak tersedia bukti simulasi stokastik terpisah bagi kebijakan SGS dan MILP menggunakan 10.000 bilangan acak berpasangan; karena itu tidak dapat disimpulkan salah satunya lebih robust.

Penelitian ini menjawab tiga pertanyaan penelitian. Pertama, pada perbandingan jadwal dengan input yang sama, MILP mempercepat penyelesaian Proyek A sebesar 1.796 menit (10,49%), tetapi tidak mengubah waktu penyelesaian Proyek B maupun makespan gabungan yang tetap 57.078 menit. Kedua, kedua jadwal memenuhi kendala kapasitas dan memiliki beban kerja berbobot serta utilisasi rata-rata yang sama; namun SGS menghasilkan CV lebih rendah pada lima kategori sumber daya, sehingga MILP tidak dapat dinyatakan

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

lebih unggul dalam pemerataan beban. Ketiga, simulasi Monte Carlo 10.000 iterasi memperkirakan peluang 5,20% untuk memenuhi target 57.078 menit dan P90 sebesar 58.872,01 menit. Secara keseluruhan, hasil mendukung evaluasi jadwal berdasarkan beberapa indikator sekaligus, bukan hanya waktu penyelesaian satu proyek. Kesimpulan dibatasi oleh parameter durasi yang sebagian dikalibrasi, kebutuhan sumber daya hasil pemodelan, dan tidak tersedianya data produktivitas aktual. Penelitian lanjutan perlu memvalidasi parameter dengan data lapangan dan membandingkan metode melalui simulasi stokastik berpasangan serta optimasi multiobjektif.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil. Pertama, model penjadwalan pemeliharaan pesawat yang digunakan bergantung pada asumsi dan parameter yang ditetapkan, termasuk estimasi durasi aktivitas, hubungan ketergantungan antaraktivitas (*precedence constraints*), kebutuhan sumber daya, dan kapasitas sumber daya yang tersedia. Oleh karena itu, perbedaan antara jadwal yang dihasilkan model dan kondisi operasional aktual dapat terjadi apabila parameter tersebut tidak sepenuhnya merepresentasikan dinamika pemeliharaan di lapangan.

Kedua, perbandingan antara Mixed-Integer Linear Programming (MILP) dan Serial Schedule Generation Scheme (SGS) terbatas pada konfigurasi permasalahan dan skenario yang dianalisis. Kinerja kedua metode dapat berubah ketika jumlah aktivitas, kompleksitas hubungan ketergantungan, jumlah proyek yang dikerjakan secara bersamaan, dan keterbatasan sumber daya mengalami perubahan. Dengan demikian, hasil penelitian belum dapat digeneralisasikan untuk seluruh jenis operasi pemeliharaan pesawat tanpa pengujian lebih lanjut.

Ketiga, evaluasi efisiensi dalam penelitian ini berfokus pada waktu penyelesaian proyek, *makespan* gabungan, pemanfaatan sumber daya, dan risiko keterlambatan berdasarkan simulasi Monte Carlo. Aspek lain, seperti biaya pemeliharaan, ketersediaan suku cadang, perubahan prioritas operasional pesawat, gangguan tidak terencana, serta dampak keputusan penjadwalan terhadap kesiapan armada, belum sepenuhnya tercakup dalam model evaluasi.

Keempat, hasil simulasi Monte Carlo merepresentasikan estimasi risiko berdasarkan distribusi probabilitas dan asumsi ketidakpastian yang digunakan. Oleh karena itu, ketepatan estimasi peluang penyelesaian proyek sangat bergantung pada kesesuaian distribusi durasi aktivitas dan parameter simulasi dengan kondisi aktual. Hasil simulasi sebaiknya dipahami sebagai estimasi risiko berdasarkan skenario yang dimodelkan, bukan sebagai jaminan terhadap waktu penyelesaian operasional yang sesungguhnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja metode Mixed-Integer Linear Programming (MILP) dan Serial Schedule Generation Scheme (SGS) dalam penjadwalan

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

pemeliharaan pesawat terbang berdasarkan waktu penyelesaian proyek, distribusi penggunaan sumber daya, dan risiko ketercapaian target waktu. Berdasarkan hasil analisis terhadap dua proyek pemeliharaan yang terdiri atas 626 aktivitas dan 709 hubungan ketergantungan, diperoleh tiga kesimpulan utama.

Pertama, **perbandingan waktu penyelesaian menunjukkan bahwa MILP dan SGS menghasilkan makespan gabungan yang sama, yaitu 57.078 menit atau sekitar 951,3 jam**. Meskipun demikian, pada Proyek A, MILP menghasilkan waktu penyelesaian 1.796 menit atau sekitar 29 jam 56 menit lebih cepat dibandingkan SGS. Keunggulan tersebut belum menurunkan waktu penyelesaian keseluruhan karena akhir jadwal gabungan ditentukan oleh Proyek B. Dengan demikian, efektivitas suatu metode penjadwalan tidak cukup dinilai berdasarkan percepatan pada satu proyek, tetapi juga perlu mempertimbangkan pengaruhnya terhadap makespan keseluruhan.

Kedua, **perbandingan distribusi penggunaan sumber daya menunjukkan bahwa kedua metode memenuhi batasan kapasitas sumber daya yang dimodelkan, tetapi menghasilkan pola penjadwalan yang berbeda**. Sebanyak 415 dari 626 aktivitas memiliki waktu mulai atau selesai yang berbeda antara jadwal MILP dan SGS. SGS menunjukkan koefisien variasi beban temporal yang lebih rendah pada lima kategori sumber daya, yaitu Airframe, Engine, Flight Control, Fuel, dan QC/Test. Sebaliknya, MILP menghasilkan beban puncak yang lebih tinggi pada kategori Engine dan QC/Test. Temuan ini menunjukkan adanya perbedaan karakteristik distribusi beban antara kedua metode, sehingga pemilihan metode perlu mempertimbangkan karakteristik sumber daya dan kebutuhan operasional yang menjadi prioritas.

Ketiga, **analisis risiko jadwal menggunakan simulasi Monte Carlo sebanyak 10.000 iterasi menunjukkan bahwa peluang penyelesaian sesuai target 57.078 menit diperkirakan sebesar 5,20%**. Nilai persentil ke-90 (P90) mencapai 58.872,01 menit, atau sekitar 1.794 menit lebih lama daripada target deterministik. Hasil ini mengindikasikan bahwa target waktu yang dihasilkan dari penjadwalan deterministik perlu dievaluasi dengan mempertimbangkan ketidakpastian durasi aktivitas. Namun, estimasi tersebut merupakan hasil simulasi berdasarkan asumsi dan parameter model, bukan probabilitas empiris yang telah terverifikasi dalam operasi pemeliharaan nyata.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa MILP dan SGS memiliki kelebihan yang berbeda dan tidak dapat dinyatakan bahwa salah satu metode selalu lebih unggul. MILP memberikan percepatan pada Proyek A, sedangkan SGS menunjukkan distribusi beban temporal yang lebih merata pada sejumlah kategori sumber daya. Sementara itu, simulasi Monte Carlo memperlihatkan pentingnya memasukkan ketidakpastian dalam evaluasi target penyelesaian. Oleh karena itu, pemilihan metode penjadwalan sebaiknya didasarkan pada tujuan operasional, karakteristik sumber daya, batas waktu, dan tingkat risiko yang dapat diterima. Penerapan lebih lanjut pada kondisi operasional nyata memerlukan validasi menggunakan data historis, kalender kerja, ketersediaan suku cadang, serta waktu tunggu dan kendala pemeliharaan aktual.

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

SARAN

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian, terdapat beberapa rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Pertama, penelitian mendatang disarankan menggunakan data historis pemeliharaan pesawat dari organisasi pemeliharaan atau fasilitas *maintenance, repair, and overhaul* (MRO) untuk mengkalibrasi durasi aktivitas, kebutuhan tenaga kerja, kapasitas fasilitas, dan pola ketidakpastian operasional. Penggunaan data aktual diharapkan dapat meningkatkan validitas model serta memperkuat relevansi hasil bagi pengambilan keputusan.

Kedua, pengujian model perlu diperluas pada berbagai ukuran dan kompleksitas permasalahan, termasuk peningkatan jumlah aktivitas, penjadwalan beberapa pesawat secara simultan, dan variasi kapasitas sumber daya. Pengujian tersebut dapat membantu mengidentifikasi kondisi ketika MILP menghasilkan solusi yang lebih baik serta kondisi ketika SGS menjadi alternatif yang lebih efisien dari sisi waktu komputasi.

Ketiga, model penjadwalan dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan fungsi tujuan yang lebih komprehensif, seperti minimisasi biaya pemeliharaan, pengurangan waktu tunggu, pemerataan beban kerja, dan peningkatan kesiapan armada. Pengembangan model multiobjektif dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kompromi antara kecepatan penyelesaian, efisiensi sumber daya, biaya, dan keandalan jadwal.

Keempat, penelitian selanjutnya dapat mengintegrasikan ketidakpastian durasi aktivitas, kerusakan yang tidak terencana, keterlambatan kedatangan suku cadang, dan perubahan prioritas pemeliharaan ke dalam model penjadwalan dinamis. Integrasi tersebut dapat dilengkapi dengan validasi menggunakan data operasional aktual untuk menilai ketahanan jadwal terhadap perubahan kondisi.

Terakhir, penerapan model pada lingkungan operasional nyata perlu dilakukan melalui studi kasus atau uji coba terbatas. Evaluasi terhadap jadwal yang dihasilkan dapat dibandingkan dengan praktik penjadwalan yang digunakan oleh organisasi pemeliharaan, sehingga manfaat model terhadap waktu penyelesaian, pemanfaatan sumber daya, dan ketepatan pemenuhan target dapat diukur secara lebih objektif.

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

DAFTAR PUSTAKA

Adimonyemma, J., & Sun, Y. (2025). Optimization model for large-scale long-term aircraft maintenance scheduling and station assignment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 202*, Article 104302. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104302

Aghileh, M., Tereso, A., Alvelos, F., & Monteiro Lopes, M. O. (2024). Multi-project scheduling under uncertainty and resource flexibility: A systematic literature review. *Production & Manufacturing Research, 12*(1). https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2319574

Agostinho, F., Martinho, M., Alves, T., & Andrade, A. R. (2025). Planning maintenance tasks in airline operating companies: A mathematical programming model applied to a case study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 239*(6), 1609–1629. https://doi.org/10.1177/1748006X251317248

Ali, K., Rudinskas, D., & Leonavičiūtė, V. (2025). Optimizing aircraft maintenance tasks allocation using mixed integer linear programming. *Aviation, 29*(3), 164–173. https://doi.org/10.3846/aviation.2025.24535

Altner, D. S., et al. (2025). Military aircraft flight and maintenance scheduling with many additional considerations. *Journal of Defense Modeling and Simulation*. https://doi.org/10.1177/15485129251383566

Alvarez-Campana, P., Villafanez, F., Acebes, F., & Poza, D. (2024). Simulation-based approach for multiproject scheduling based on composite priority rules. *International Journal of Simulation Modelling, 23*(1), 29–40. https://doi.org/10.2507/IJSIMM23-1-667

An, Y., Chen, X., Li, Y., Zhang, J., & Jiang, J. (2021). Flexible job-shop scheduling and heterogeneous repairman assignment with maintenance time window and employee timetable constraints. *Expert Systems with Applications, 186*, Article 115693. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115693

Atici, U., & Şenol, M. B. (2022). Determining aircraft maintenance times in civil aviation under the learning effect. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 94*(8), 1366–1378. https://doi.org/10.1108/AEAT-05-2021-0153

Avief, R. M. S., & Hidayat, S. (2026). A risk-integrated CPM-PERT and Monte Carlo simulation approach for aircraft overhaul scheduling: Empirical evidence from military maintenance systems. *Journal Européen des Systèmes Automatisés, 59*(3), 641–649. https://doi.org/10.18280/jesa.590308

Bocewicz, G., Golińska-Dawson, P., Szwarc, E., & Banaszak, Z. (2023). Preventive maintenance scheduling of a multi-skilled human resource-constrained project's portfolio. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 119*, Article 105725. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105725

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Cha, G., Park, J., & Moon, I. (2023). Military aircraft flight and maintenance planning model considering heterogeneous maintenance tasks. *Reliability Engineering & System Safety, 239*, Article 109497. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109497

Chakrabortty, R. K., Rahman, H. F., Haque, K. M. A., Paul, S. K., & Ryan, M. J. (2021). An event-based reactive scheduling approach for the resource-constrained project scheduling problem with unreliable resources. *Computers & Industrial Engineering, 151*, Article 106981. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106981

Chen, G., He, W., Tian, Y., & Ma, K. (2024). Resource-constrained project scheduling with multiple states: Bi-objective optimization model and case study of aircraft maintenance. *Computers & Industrial Engineering, 191*, Article 110169. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110169

Chen, N., Zhang, Y., Li, L., & Zheng, Y. (2026). Multi-objective optimization of robustness of aircraft scheduled maintenance task scheduling duration based on improved NSGA-II. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 47*(8). https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2025.32675

Ding, H., Zhuang, C., & Liu, J. (2023). Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction, 153*, Article 104958. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958

Dinis, D., Barbosa-Póvoa, A., & Teixeira, Â. P. (2019). A supporting framework for maintenance capacity planning and scheduling: Development and application in the aircraft MRO industry. *International Journal of Production Economics, 218*, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.04.029

Eltoukhy, A. E. E., Chan, F. T. S., Chung, S. H., & Niu, B. (2018). A model with a solution algorithm for the operational aircraft maintenance routing problem. *Computers & Industrial Engineering, 120*, 346–359. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.002

Farahmand-Mehr, M., & Mousavi, S. M. (2026). Resource-constrained multi-project scheduling problems considering time-dependent reliability of resources: A new immune genetic local search algorithm. *Kybernetes, 55*(6), 2571–2606. https://doi.org/10.1108/K-04-2024-0895

Fekri, M., Heydari, M., & Mahdavi Mazdeh, M. (2024). Bi-objective optimization of flexible flow shop scheduling problem with multi-skilled human resources. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 133*, Article 108094. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108094

Filho, J. N. M., de Mesquita, A. C. P., Abrahão, F. T. M., & Rocha, G. C. (2024). An innovative method to solve the maintenance task allocation and packing problem. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 30*(1), 284–305. https://doi.org/10.1108/JQME-08-2023-0069

Giacotto, A., Marques, H. C., & Martinetti, A. (2025). Prescriptive maintenance: A comprehensive review of current research and future directions. *Journal of Quality*

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

in Maintenance Engineering, 31(1), 129–173. https://doi.org/10.1108/JQME-07-2023-0064

Goudarzi, E., Esmaeeli, H., Parsa, K., & Asadzadeh, S. (2025). Proposing new clustering-based algorithms for the multi-skilled resource-constrained multi-project scheduling problem with resource leveling adjustments. *Kybernetes, 54*(2), 1049–1081. https://doi.org/10.1108/K-06-2023-1044

Guo, Z., Wen, X., & Huang, X. (2026). Aircraft maintenance scheduling optimization: State-of-the-art and emerging trends. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 209*, Article 104767. https://doi.org/10.1016/j.tre.2026.104767

Hu, X., Na, R., & Li, H. (2026). Intelligent scheduling optimization for multi-aircraft collaborative maintenance. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 26*(2), 148–158. https://doi.org/10.16097/j.cnki.1009-6744.2026.02.014

Khajesaeedi, S., Sadjadi, S. J., Barzinpour, F., & Moghaddam, R. T. (2025). Resource-constrained project scheduling problem: Review of recent developments. *Journal of Project Management, 10*(1), 1–26. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2024.12.002

Li, C., Zhang, Y., Su, X., & Wang, X. (2022). An improved optimization algorithm for aeronautical maintenance and repair task scheduling problem. *Mathematics, 10*(20), Article 3777. https://doi.org/10.3390/math10203777

Mozhdehi, S., Baradaran, V., & Hosseinian, A. H. (2024). Multi-skilled resource-constrained multi-project scheduling problem with dexterity improvement of workforce. *Automation in Construction, 162*, Article 105360. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105360

Okunade, O. S., Obuseh, M. N., & Charles-Owaba, O. E. (2021). Preventive maintenance scheduling of fleet of aircraft using contiguous-cells transportation model: A case study. *International Journal of Industrial and Systems Engineering, 39*(2), 247–269. https://doi.org/10.1504/IJISE.2021.118287

Peng, J., Gao, W., Li, Y., He, S., Wang, K., & Xu, M. (2025). A heuristic solution for multi-mode resource-constrained project scheduling problem with transfer times: The multi-project case. *Expert Systems with Applications, 290*, Article 128122. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128122

Peña, C., Romero, D., & Noguez, J. (2024). Parameterization techniques to support human learning curves forecasting and optimization: Review, method, and proposed framework. *Computers & Industrial Engineering, 193*, Article 110314. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110314

Peña, D. A., Osorio, A. F., Orejuela, J. P., & Idarraga, J. C. (2023). Multi-skilled workforce scheduling with training and welfare considerations. *Engineering Management in Production and Services, 15*(3), 27–41. https://doi.org/10.2478/emj-2023-0018

Arthavidya Jurnal Ilmiah Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis
Universitas Wisnuwardhana Malang
Volume 28, Nomor 2, Oktober 2026, hal: 294 - 314
p-issn: 1410-8755, e-issn: 2579-6070
Submitted : 18 Oktober 2026
Published : 24 November 2026

Pimapunsri, K., Weeranant, D., & Riel, A. (2021). Genetic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem in aircraft heavy maintenance. *Suranaree Journal of Science and Technology, 28*(6). https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85130588829&partnerID=40&md5=ae5da44f7f4a38c8a48062079343dc42

Qi, L., Lv, C., Zhang, T., & Wang, Y. (2026). Dynamic multi-objective aviation maintenance scheduling: An algorithmic framework. *Scientific Reports, 16*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-026-40304-0

Qiu, K., Chen, L., & Dauzère-Pérès, S. (2025). Robust optimization approach for the resource-constrained project scheduling problem with uncertain activity release times. *Computers & Operations Research, 184*, Article 107215. https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107215

Soltan, S., & Ashrafi, M. (2025). A new optimization model for multi-project scheduling considering dynamic resource allocation. *Soft Computing, 29*(15–16), 5143–5158. https://doi.org/10.1007/s00500-025-10891-7

Stanton, I., Munir, K., Ikram, A., & El-Bakry, M. (2023). Predictive maintenance analytics and implementation for aircraft: Challenges and opportunities. *Systems Engineering, 26*(2), 216–237. https://doi.org/10.1002/sys.21651

Zeng, J., et al. (2026). A hybrid reverse learning particle swarm optimization method for aircraft maintenance scheduling based on the resource-constrained project scheduling problem model. *Machines, 14*(6), Article 622. https://doi.org/10.3390/machines14060622

Zhang, M., et al. (2025). An approximate dynamic programming approach for solving aircraft fleet engine maintenance problem: Methodology and a case study. *European Journal of Operational Research, 321*(3), 958–973. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.008