

Metode Simulated Annealing untuk Optimasi Biaya Operasional Penerbangan

Nabil Anshari¹, Subairi², Muhammad Abdullah Hafizh³, Endin Rahmanda Putri⁴, Andreas Nugroho Sihananto^{5*}

^{1,2,3,4}Informatika, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

¹21081010143@student.upnjatim.ac.id

²21081010019@student.upnjatim.ac.id

³21081010099@student.upnjatim.ac.id

⁴20081010070@student.upnjatim.ac.id

⁵Informatika, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

*Corresponding author email: andreas.nugroho.jarkom@upnjatim.ac.id

Abstrak— Transportasi adalah inovasi penting yang memfasilitasi berbagai aktivitas manusia. Salah satu mode transportasi utama adalah pesawat terbang yang menawarkan efisiensi waktu. Namun, transportasi udara sering mengalami penundaan dan pembatalan yang berdampak negatif. Industri penerbangan juga menghadapi tantangan biaya operasional yang terus meningkat. Oleh karena itu, diperlukan sistem penjadwalan yang efektif. Algoritma Simulated Annealing (SA), yang terinspirasi oleh proses annealing dalam metalurgi, menawarkan solusi potensial. Algoritma ini bekerja dengan mengeksplorasi ruang solusi secara probabilistik untuk menemukan struktur yang optimal. Dalam konteks penerbangan, SA dapat digunakan untuk mengoptimalkan rute, jadwal penerbangan, dan alokasi sumber daya. Penelitian ini bertujuan mengembangkan algoritma SA yang lebih efisien untuk mengoptimalkan biaya operasional penerbangan. Algoritma menghitung total biaya dan waktu dari jadwal penerbangan dengan menjumlahkan biaya dan waktu dari satu kota ke kota lainnya. Setelah itu dilakukan penukaran acak untuk mendapat berbagai kemungkinan solusi. Pengacakan ini dilakukan dengan cara menukar posisi dua jadwal. Probabilitas solusi yang lebih buruk didasarkan pada perbedaan biaya antara solusi baru dan solusi lama. Jika solusi baru lebih baik, maka probabilitasnya adalah 1. Jika solusi lebih buruk, dapat diterima dengan probabilitas yang berkurang seiring menurunnya suhu annealing. Algoritma SA diimplementasikan untuk menemukan jadwal penerbangan dengan biaya total terendah melalui iterasi dan pengurangan suhu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa program dengan konfigurasi terbaik yaitu *temperature* 15000, iterasi 2000, dan waktu komputasi selama 24 detik dapat menemukan biaya perjalanan terbaik dari dataset dengan hasil 9909.0 atau 999,090 usd.

Kata Kunci— Simulated Annealing, Biaya Penerbangan, Optimasi Biaya, Metalurgi.

I. PENDAHULUAN

Transportasi merupakan salah satu aspek penunjang kemajuan bangsa terutama dalam kegiatan perekonomian negara yang tidak lepas dari pengaruh pertumbuhan jumlah penduduk. Salah satu sarana transportasi pada saat ini yang paling mudah didapatkan dan sering digunakan adalah angkutan umum. Angkutan umum merupakan angkutan yang disediakan untuk keperluan umum yang dilakukan dengan sistem sewa dan bayar dapat berupa mobil penumpang, bus kecil, bus sedang, dan bus besar [14]. Transportasi adalah inovasi penting yang

memfasilitasi berbagai aktivitas manusia, termasuk pekerjaan dan rekreasi. Kemajuan teknologi transportasi yang terus berkembang telah meningkatkan kepuasan masyarakat secara signifikan. Salah satu mode transportasi utama adalah pesawat terbang. Pesawat terbang menawarkan cara efisien untuk bepergian antar pulau, negara, dan benua, memberikan alternatif penghematan waktu dibandingkan dengan transportasi darat atau laut. Namun, penggunaan transportasi udara seringkali disertai dengan tantangan yang dapat mempengaruhi pengguna layanan. Salah satu masalah yang sangat menonjol adalah seringnya terjadi penundaan dan pembatalan penerbangan. Gangguan ini dapat menyebabkan kerugian yang signifikan baik bagi maskapai penerbangan maupun penumpang. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengatasi masalah ini dengan membangun sistem penjadwalan yang efektif [1]. Penerbangan adalah salah satu industri yang paling kompleks dan dinamis, dan ada banyak masalah operasional yang berdampak pada biaya dan efisiensi. Biaya operasional penerbangan telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir karena peningkatan regulasi keselamatan, biaya bahan bakar, dan biaya perawatan pesawat. Selain itu, perubahan ekonomi di seluruh dunia dan perubahan dalam permintaan pasar telah memperumit masalah manajemen operasional. Oleh karena itu, perusahaan penerbangan harus terus mencari cara baru untuk mengurangi biaya operasional sambil tetap memberikan pelayanan yang baik kepada penumpang. Salah satu metode yang menjanjikan untuk mencapai optimasi ini adalah penggunaan algoritma Simulated Annealing (SA). Algoritma Simulated Annealing (SA) adalah algoritma optimasi berbasis probabilistik yang terinspirasi oleh proses fisika annealing dalam metalurgi, di mana suatu material dipanaskan hingga suhu tinggi dan kemudian didinginkan secara perlahan untuk mencapai struktur kristal yang lebih stabil dan menggunakan jumlah energi yang lebih sedikit. Untuk mencapai optimasi ini, Simulated Annealing (SA) bekerja dengan cara mengeksplorasi proses fisika annealing dalam metalurgi. Perusahaan penerbangan dapat menggunakan Simulated Annealing (SA) untuk menangani berbagai masalah optimasi dalam industri penerbangan, termasuk menemukan rute penerbangan yang paling efisien, mengoptimalkan jadwal penerbangan, dan mengatur alokasi sumber daya seperti pesawat, kru, dan fasilitas pendukung. Dengan menggunakan SA, perusahaan penerbangan dapat mengurangi biaya

operasional, meningkatkan efisiensi operasional, dan mempertahankan atau bahkan meningkatkan kualitas layanan yang diberikan kepada penumpang. Studi-studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa SA dapat menghasilkan solusi yang lebih baik daripada metode heuristik klasik, terutama dalam masalah yang kompleks dan memiliki banyak variabel [7]. Selain itu, SA telah digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk penyelesaian masalah vehicle routing problem (VRP) dan optimasi rute penerbangan, yang menunjukkan bahwa metode ini dapat diandalkan dalam mengoptimalkan biaya operasional penerbangan [8][9]. Namun, menggunakan Simulated Annealing (SA) untuk mengoptimalkan biaya operasional penerbangan tidak mudah, memiliki tantangan tersendiri dalam prakteknya, tantangan utamanya seringkali masalah ini ditangani secara terpisah, sehingga yang dihasilkan hanya solusi lokal. serta terdapat ketidakpastian parameter juga ikut menghambat penggunaan SA. tantangan ini dapat dijawab dengan metode codesharing yang mampu menyelesaikan permasalahan pada skala kecil, namun seiring bertambahnya jadwal penerbangan, ini membuat perangkat lunak konvensional menjadi tidak memadai dan memerlukan peningkatan-peningkatan selanjutnya [10]. Simulated Annealing (SA) memiliki kelemahan utama, yaitu memerlukan waktu komputasi yang lama untuk menemukan solusi yang ideal, terutama untuk masalah dengan skala besar dan kompleksitas tinggi. Selain itu, kinerja Simulated Annealing (SA) sangat bergantung pada parameter awal, seperti suhu awal dan laju pendinginan, yang dapat berdampak pada kualitas dan kecepatan konvergensi solusi [6].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan algoritma Simulated Annealing (SA) yang lebih efisien dan efektif untuk mengoptimalkan biaya operasional penerbangan. Metode yang akan digunakan termasuk mengubah parameter Simulated Annealing (SA), menggunakan teknik hibridisasi dengan algoritma optimasi lainnya, dan menggunakan metode peningkatan performa seperti *parallel computing*. Pemilihan *parallel computing* dimaksudkan untuk mempercepat proses pencarian solusi optimal dan eksplorasi ruang solusi yang lebih luas. Dengan menjalankan SA secara paralel, kita dapat menghindari jebakan solusi lokal dengan lebih efektif dan meningkatkan peluang menemukan solusi global yang optimal. Selain itu, *parallel computing* memanfaatkan sepenuhnya sumber daya komputasi yang tersedia, meningkatkan efisiensi dan kecepatan proses optimasi [11]. Selain itu, penelitian ini akan mengevaluasi kinerja algoritma yang dikembangkan dengan menggunakan teknik hibridisasi ini.

II. LANDASAN TEORI

A. Biaya

Setiap pakar memiliki pandangan tersendiri mengenai pengertian biaya. Berikut ini adalah beberapa definisi biaya menurut para ahli. Menurut Mulyadi, biaya adalah pengorbanan sumber ekonomi yang diukur dalam satuan uang dan telah terjadi, sedang terjadi, atau mungkin akan terjadi untuk mencapai tujuan tertentu. Harnanto mendefinisikan biaya (*cost*) sebagai jumlah uang yang mencerminkan sumber daya ekonomi yang dikorbankan (baik yang sudah terjadi maupun

yang akan terjadi) untuk memperoleh sesuatu atau mencapai tujuan tertentu [5].

Salah satu komponen dalam penetapan tarif adalah besar biaya operasional kendaraan (BOK), sebagian besar harga tarif sangat dipengaruhi oleh biaya operasional kendaraan. Semakin besar biaya operasional kendaraan maka tarif yang ditetapkan akan semakin mahal dan sebaliknya semakin kecil biaya operasional kendaraan maka tarif yang ditetapkan semakin murah [14].

B. Simulated Annealing

Algoritma Simulated Annealing (SA) adalah suatu teknik yang tangguh untuk menyelesaikan masalah optimisasi kombinatorial yang berat tanpa struktur yang khusus. Metode ini memungkinkan pergerakan bebas dan minimal melepaskan diri lokal. Keunggulan utama algoritma SA adalah bahwa mereka tidak membutuhkan banyak memori komputer. Metode iteratif yang diperkenalkan oleh Metropolis pada tahun 1953, yang meniru pergerakan atom pada titik keseimbangan yang diberikan oleh suhu, adalah dasar Algoritma SA. Kelemahan utama metode ini adalah waktu yang sangat lama untuk proses komputasi dan jumlah iterasi yang sangat besar untuk menemukan jawaban yang tepat [3].

Dalam literasi lain disebutkan Metode Simulated Annealing ini dikembangkan dari sebuah analogi yang diproses pada pendinginan cairan logam sehingga membentuk kristal yang bernama annealing. Annealing ini merupakan teknik yang bernama metalurgi yang menggunakan ilmu penjadwalan untuk bisa menghasilkan efisiensi penggunaan yang optimal. Sehingga bisa disebut metode Simulated Annealing ini merupakan sebuah metode pencarian yang memanfaatkan teori probabilitas dalam mencari global minimum untuk suatu permasalahan dari optimasi. Metode ini biasanya digunakan untuk variabel yang bersifat categorical. Target-nya adalah menemukan solusi yang bagus sehingga bisa diterima untuk mencari solusi yang terbaik [12].

Algoritma Simulated Annealing telah digunakan dalam berbagai bidang, termasuk penjadwalan kuliah di perguruan tinggi, di mana algoritma ini membantu dalam penugasan mata kuliah dan dosen pada slot waktu yang tersedia dengan mempertimbangkan berbagai batasan [15].

C. Optimasi

Kajian teori mengenai optimalisasi dimulai dari pengertian optimalisasi secara umum, pengertian optimalisasi menurut beberapa ahli dan pengertian optimalisasi pembelajaran yang akan dibahas secara rinci. Pengertian optimalisasi menurut adalah hasil yang dicapai sesuai dengan keinginan, jadi optimalisasi merupakan pencapaian hasil sesuai harapan secara efektif dan efisien". Optimalisasi banyak juga diartikan sebagai ukuran dimana semua kebutuhan dapat dipenuhi dari kegiatan-kegiatan yang dilaksanakan [13].

Disebutkan juga optimasi adalah proses mencari solusi terbaik yang tidak selalu berarti mencapai keuntungan tertinggi dalam konteks memaksimalkan keuntungan, atau menekan biaya serendah mungkin dalam konteks meminimalkan biaya. Proses

ini melibatkan pencarian solusi yang optimal berdasarkan berbagai parameter dan batasan yang ada. Dalam banyak kasus, solusi terbaik bukanlah solusi yang absolut sempurna, tetapi merupakan solusi yang paling efektif dan efisien mengingat kendala dan keadaan yang ada. Misalnya, dalam memaksimalkan keuntungan, pertimbangan seperti risiko, sumber daya yang tersedia, dan keberlanjutan mungkin mempengaruhi hasil akhir. Demikian pula, dalam meminimalkan biaya, faktor-faktor seperti kualitas, waktu, dan kepuasan pelanggan juga harus diperhitungkan. Oleh karena itu, optimasi adalah tentang menemukan keseimbangan terbaik di antara berbagai variabel untuk mencapai tujuan yang diinginkan secara holistik dan realistis [4].

III. METODE PENELITIAN

A. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Kaggle, sebuah platform yang menyediakan berbagai dataset publik untuk analisis dan pengembangan model data. Dataset yang dipilih berjudul "hflights," yang berisi data penerbangan yang dapat digunakan untuk analisis penjadwalan dan optimasi biaya operasional. Dataset "hflights" mencakup informasi detail mengenai penerbangan, seperti tanggal keberangkatan dan kedatangan, identifikasi unik untuk setiap penerbangan, kota asal (Origin) dan kota tujuan (Dest) dari penerbangan, waktu keberangkatan (DepTime) dan waktu kedatangan (ArrTime), waktu yang dihabiskan dalam penerbangan (ActualElapsedTime), serta informasi mengenai keterlambatan keberangkatan dan kedatangan (DepDelay dan ArrDelay).

B. Pengolahan Data

Langkah selanjutnya adalah pengolahan data yang dilakukan untuk mempersiapkan dataset penerbangan sebelum dilakukan analisis lebih lanjut. Data awal diambil dari dataset "hflights" yang diunduh dari Kaggle, sebuah platform sumber data publik. Dataset ini mencakup berbagai informasi penting mengenai penerbangan, seperti tanggal keberangkatan dan kedatangan, kode penerbangan, kota asal dan tujuan, serta waktu yang dihabiskan dalam penerbangan. Namun, sebelum data dapat digunakan untuk analisis, langkah pertama adalah membersihkan data dari nilai yang hilang atau tidak valid. Oleh karena itu, baris yang memiliki nilai NaN pada kolom 'ActualElapsedTime' dan 'ArrTime' dihapus menggunakan metode `.dropna()`. Hal ini penting untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam analisis selanjutnya adalah data yang lengkap dan konsisten. Setelah proses pembersihan selesai, data yang sudah dibersihkan disimpan ke dalam file CSV baru dengan nama "hflights_cleaned.csv". Data yang sudah diproses ini akan menjadi dasar untuk tahap selanjutnya dalam penelitian, yaitu analisis dan optimasi penjadwalan penerbangan menggunakan metode Simulated Annealing. Dengan melakukan pengolahan data ini secara teliti, diharapkan hasil analisis yang dihasilkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam dan solusi yang lebih efektif dalam pengelolaan jadwal penerbangan dan pengoptimalan biaya operasional.

C. Analisis Hasil

Dalam penelitian ini, parameter Simulated Annealing dimodifikasi secara berulang untuk menganalisis variasi hasil yang dihasilkan oleh algoritma. Percobaan ini untuk memahami dampak perubahan parameter terhadap kinerja algoritma dalam menemukan solusi optimal. Dengan mengubah parameter tersebut, seperti menurunkan `initial_temp` untuk mengintensifkan eksplorasi awal, meningkatkan `iteration_limit` untuk memberikan lebih banyak iterasi, serta secara tidak langsung juga mengubah `delta_temp` untuk mengatur laju penurunan suhu, variasi hasil dieksplorasi untuk mengidentifikasi sensitivitas algoritma terhadap parameter yang berbeda. Hasil analisis ini diharapkan memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang perilaku algoritma Simulated Annealing dalam menyelesaikan masalah optimasi dalam berbagai kondisi eksperimental.

D. Visualisasi Hasil

Dalam metode penelitian ini, visualisasi hasil algoritma Simulated Annealing dimaksudkan untuk memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang bagaimana biaya perjalanan berevolusi selama proses pencarian solusi. Dengan menggunakan diagram garis, perubahan biaya perjalanan dari setiap iterasi dapat terlihat secara jelas, memungkinkan peneliti untuk mengamati pola-pola yang muncul dalam penyelesaian masalah. Grafik ini memberikan gambaran tentang seberapa cepat algoritma konvergen terhadap solusi optimal dan seberapa stabil kinerjanya seiring berjalannya waktu. Dengan menganalisis visualisasi ini, dapat diidentifikasi apakah algoritma mencapai solusi yang baik dalam waktu yang wajar atau jika diperlukan penyesuaian lebih lanjut terhadap parameter atau strategi pencarian. Selain itu, melalui perbandingan antara biaya saat ini dan biaya terbaik dari setiap iterasi, dapat dievaluasi sejauh mana algoritma berhasil dalam meningkatkan solusi seiring berjalannya iterasi. Analisis visual ini menjadi penting dalam memahami kinerja algoritma Simulated Annealing dalam menyelesaikan masalah optimasi yang kompleks.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pembersihan Dataset

Dataset yang dipilih untuk penelitian ini berjudul "hflights". Dataset ini menjadi fokus penelitian karena potensinya dalam analisis penjadwalan penerbangan dan optimasi biaya operasional dalam industri penerbangan. berikut adalah head /data awal dari dataset ini :

Origin	Dest	DepTime	ArrTime	ActualElapsedTime	DepDelay	ArrDelay
IAH	DFW	1400.0	1500.0	60.0	0.0	-10.0
IAH	DFW	1401.0	1501.0	60.0	1.0	-9.0
IAH	DFW	1352.0	1502.0	70.0	-8.0	-8.0
IAH	DFW	1403.0	1513.0	70.0	3.0	3.0
IAH	DFW	1405.0	1507.0	62.0	5.0	-3.0
IAH	DFW	1359.0	1503.0	64.0	-1.0	-7.0
IAH	DFW	1359.0	1509.0	70.0	-1.0	-1.0
IAH	DFW	1355.0	1454.0	59.0	-5.0	-16.0
IAH	DFW	1443.0	1554.0	71.0	43.0	44.0
IAH	DFW	1443.0	1553.0	70.0	43.0	43.0

Gbr. 1. Head dataset

Langkah pertama adalah memproses dataset nya dengan menghilangkan data `ActualElapsedTime` yang NaN menggunakan metode `.dropna()`. Hal ini penting untuk

memastikan bahwa data yang digunakan dalam analisis selanjutnya adalah data yang lengkap dan konsisten. berikut adalah proses pembersihan dataset di google collab:

```
import pandas as pd

# Membaca file CSV
df = pd.read_csv("/content/hflights.csv")

# Menghapus baris yang memiliki nilai NaN di kolom 'ActualElapsedTime' dan 'ArrTime'
df_cleaned = df.dropna(subset=['ActualElapsedTime', 'ArrTime'])

# Menyimpan hasil ke file CSV baru
df_cleaned.to_csv("/content/hflights_cleaned.csv", index=False)
```

Gbr. 2. Pembersihan dataset

Setelah proses pembersihan selesai, data yang sudah dibersihkan disimpan ke dalam file CSV baru dengan nama "hflights_cleaned.csv". Data yang sudah diproses ini akan menjadi dasar untuk tahap selanjutnya dalam penelitian, yaitu analisis dan optimasi penjadwalan penerbangan menggunakan metode Simulated Annealing.

B. Matriks Biaya dan Waktu

Matriks biaya, waktu, dan operasional dihitung dengan menggunakan data penerbangan yang tersedia:

- 1) Matriks biaya: Pada matriks ini menghitung total biaya yang diperlukan untuk perjalanan antara dua kota melalui persamaan "(1)". Komponen biaya yang dipertimbangkan adalah waktu perjalanan sebenarnya (ActualElapsedTime), jarak tempuh (Distance), dan waktu di udara (AirTime).

$$time_matrix[i][j] = ActualElapsedTime + Distance + AirTime \quad (1)$$

- 2) Matriks waktu (*Time Matrix*): Matriks ini menghitung selisih waktu kedatangan dan keberangkatan antara dua kota, tertera pada persamaan "(2)". Selisih ini memberikan gambaran tentang durasi perjalanan.

$$time_matrix[i][j] = [ArrTime - DepTime] \quad (2)$$

- 3) Matriks Operasional (*Operational Matrix*): Matriks ini menghitung waktu operasional yang digunakan antara dua kota, yang secara langsung terkait dengan ActualElapsedTime.

$$operational_matrix[i][j] = [ActualElapsedTime] \quad (3)$$

C. Fungsi Objektif

Fungsi Objektif menghitung total biaya dan waktu berdasarkan jadwal penerbangan yang diberikan. Fungsi ini digunakan untuk menghitung bobot dari komponen biaya :

- 1) Total Biaya (*Total Cost*):

Total biaya adalah jumlah dari semua biaya antara kota yang terjadwal, dengan mempertimbangkan biaya bahan bakar dan biaya operasional, mengacu pada persamaan "(4)".

$$\sum_{k=1}^{n-1} (\omega_{fuel} \cdot cost_matrix[s_k][s_{k+1}] + \omega_{ops} \cdot ops_matrix[s_k][s_{k+1}]) \quad (4)$$

Keterangan :

- ω_{fuel} adalah bobot untuk biaya bahan bakar.
- ω_{ops} adalah bobot untuk biaya operasional.
- s_k adalah kota pada posisi ke- k dalam jadwal penerbangan.

- 2) Total Waktu (*Total Time*):

Total waktu adalah jumlah dari semua waktu perjalanan antara kota-kota yang dijadwalkan, dengan mempertimbangkan bobot biaya waktu.

$$\sum_{k=1}^{n-1} (\omega_{time} \cdot time_matrix[s_k][s_{k+1}]) \quad (5)$$

Keterangan :

- ω_{time} adalah bobot untuk biaya waktu.
- s_k adalah kota pada posisi ke- k dalam jadwal penerbangan.

D. Fungsi Swap

Fungsi *swap* melakukan pertukaran dua kota dalam jadwal untuk menghasilkan solusi tetangga yang baru. Pertukaran dua kota dalam jadwal penerbangan dapat menghasilkan solusi baru yang lebih baik atau lebih buruk.

E. Fungsi Probabilitas Penerimaan

Probabilitas Penerimaan memungkinkan melakukan pertukaran dua kota dalam jadwal untuk menghasilkan solusi tetangga yang baru. Pertukaran dua kota dalam jadwal penerbangan dapat menghasilkan solusi baru yang lebih baik atau lebih buruk. Jika biaya baru lebih rendah, maka $P(\text{accept}) = 1.0$, dan jika biaya baru lebih tinggi, maka $P(\text{accept})$ diketahui melalui persamaan "(6)".

$$e = \frac{old_cost - new_cost}{T} \quad (6)$$

Keterangan:

- old_cost adalah total biaya dari solusi saat ini.
- new_cost adalah total biaya dari solusi baru.
- T adalah suhu saat ini (temperature).

F. Fungsi Simulated Annealing

Fungsi Simulated Annealing bertujuan untuk menemukan jadwal penerbangan dengan biaya total terendah melalui iterasi dan pengurangan suhu secara bertahap.

Prosedur Iterasi:

A) Inisiasi

- Inisialisasi jadwal penerbangan acak.
- Hitung biaya dan waktu awal menggunakan fungsi objektif.

B) Proses Interasi.

Untuk setiap iterasi:

- Buat solusi tetangga dengan menukar dua kota dalam jadwal.
- Hitung biaya dan waktu untuk solusi baru.
- Jika solusi baru lebih baik, terima solusi baru.

- Jika solusi baru lebih buruk, terima solusi baru dengan probabilitas tertentu.
- Simpan solusi terbaik yang ditemukan.

C) Pengurangan Suhu

Suhu T diturunkan setelah setiap iterasi sesuai dengan jadwal penurunan suhu pada persamaan “(7)”

$$T_{New} = T_{Current} - \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{T_{Initial}}{iterationlimit} \quad (7)$$

G. Hasil Penelitian

Dalam analisa hasil, fokus kami adalah mencari suhu awal dan banyak iterasi yang menghasilkan *cost* paling minimum dengan waktu yang efisien, kami melakukan 3 kali percobaan setiap suhu dan iterasi yang sama untuk memastikan hasil yang akurat. Hasil percobaan kami menunjukkan Tabel 1.

TABEL I
HASIL PERCOBAAN

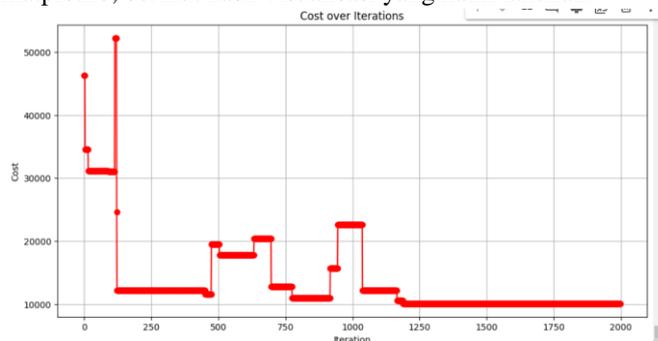
No	Temp/iterasi	Best iter	Best Cost	Time
1	1000/2000	0	10102.5	21
2	5000/2000	704	10102.5	21
3	5000/3000	499	10137.0	24
4	5000/4000	235	10102.5	28
5	10000/2000	48	10137.0	24
6	10000/3000	498	10102.5	25
7	10000/4000	3622	10102.5	28
8	15000/2000	1613	9909.0	24
9	15000/3000	536	10339.0	23
10	15000/4000	44	10102.5	24

Dari hasil percobaan, terlihat bahwa pada percobaan pertama, iterasi terbaik (*best iter*) tercatat sebagai 0. Hal ini mengindikasikan bahwa iterasi tidak berhasil di-tracking karena algoritma yang digunakan mengharuskan suhu (*temperature*) lebih tinggi dari jumlah iterasi. Ketika suhu lebih rendah dari jumlah iterasi, algoritma tidak dapat menjalankan iterasi secara efektif, sehingga tidak ada iterasi yang tercatat sebagai terbaik. Namun, pada hasil percobaan selanjutnya, saat suhu dinaikkan sehingga lebih tinggi dari jumlah iterasi, terlihat adanya iterasi terbaik (*best iter*) dan biaya terbaik (*best cost*) yang sesuai. Ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu

memungkinkan algoritma untuk berfungsi dengan lebih baik, menghasilkan iterasi dan biaya yang optimal.

Dari semua perhitungan yang dilakukan, percobaan kedelapan menghasilkan biaya terbaik (*best cost*) dengan nilai 9909.0. Percobaan ini menggunakan suhu sebesar 15000 dan jumlah iterasi sebanyak 2000, dengan waktu komputasi selama 24 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi suhu dan iterasi tersebut adalah yang paling optimal dalam konteks percobaan yang dilakukan. Kombinasi ini memberikan keseimbangan yang tepat antara suhu dan jumlah iterasi, memungkinkan algoritma untuk mengeksplorasi solusi secara efektif dan efisien. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa untuk mencapai hasil yang optimal, suhu harus cukup tinggi untuk memungkinkan iterasi yang memadai, seperti yang dibuktikan oleh percobaan kedelapan dengan suhu 15000 dan 2000 iterasi.

lalu dilakukan visualisasi pada proses perubahan biaya perjalanan setiap iterasi yang dilakukan dengan menggunakan matplotlib, berikut hasil visualisasi yang kami lakukan:



Gbr. 2. Visualisasi hasil

Dari diagram tersebut terlihat bahwa program dimulai dari menghasilkan *best cost* yang acak, lalu perlahan menemukan solusi yang lebih baik, dan pada iterasi selanjutnya program masih menerima solusi yang lebih buruk, namun seiring bertambahnya iterasi program menjadi lebih selektif terhadap solusi buruk yang akan diterima dan program berakhir dengan menemukan solusi terbaik nya.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan algoritma Simulated Annealing (SA) untuk mengoptimalkan biaya operasional penerbangan dengan hasil yang cukup optimal, meskipun masih bisa dikembangkan lebih lanjut. Algoritma ini memanfaatkan matriks biaya, waktu, dan operasional yang dihitung dari data penerbangan, dengan memperhitungkan komponen seperti waktu perjalanan, jarak tempuh, dan waktu di udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SA efektif dalam mengurangi biaya operasional dan meningkatkan efisiensi penerbangan. Algoritma ini bekerja dengan menukar dua kota dalam jadwal penerbangan dan menerima solusi baru berdasarkan probabilitas yang ditentukan oleh perbedaan biaya dan suhu saat ini. Walaupun algoritma SA menunjukkan hasil

yang menjanjikan, keberhasilannya sangat bergantung pada parameter awal seperti suhu awal dan laju pendinginan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menyempurnakan parameter ini dan mengeksplorasi kombinasi dengan algoritma optimasi lainnya. Secara keseluruhan, algoritma SA yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat membantu perusahaan penerbangan mengurangi biaya operasional, meningkatkan efisiensi, dan mempertahankan kualitas layanan yang tinggi bagi penumpang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada para pembaca yang telah meluangkan waktu untuk membaca artikel ini. Kami berharap artikel ini memberikan wawasan yang bermanfaat mengenai optimasi biaya operasional penerbangan menggunakan algoritma Simulated Annealing.

Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada seluruh tim yang telah bekerja keras dan berdedikasi dalam menyelesaikan artikel ini. Tanpa kerjasama dan usaha bersama, artikel ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik.

Kami juga ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada Bapak Andreas Nugroho, S.Kom, M.Kom yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan insight yang sangat berharga selama proses penelitian ini. Bimbingan beliau telah membantu kami dalam mengatasi berbagai tantangan dan menyelesaikan artikel ini dengan baik.

Terima kasih atas semua dukungan dan kontribusi yang diberikan. Semoga artikel ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pembaca dan komunitas akademik.

REFERENSI

- [1] R. Mardiyah and M. Ujianita Romdhini, "Penerapan Algoritma Genetika dalam Penjadwalan Penerbangan di Bandara Internasional Lombok," *Eigen Mathematics Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 48–58, 2018, [Online]. Available: <http://eigen.unram.ac.id>.
- [2] M. Lukman Hakim and M. Hasibuan, "Penerapan Metode Simulated Annealing Untuk Penjadwalan Perkuliahan," *CTIS*, vol. 5, no. 2, 2021.
- [3] Ü. Başaran Filik and M. Kurban, "Solving unit commitment problem using modified subgradient method combined with simulated annealing algorithm," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2010, 2010, doi: 10.1155/2010/295645.
- [4] A. Wahyu Kristianingrum, "Optimalisasi Pengembangan Usaha Mikro Kecil Dan Menengah Dalam Meningkatkan Perekonomian Masyarakat (Studi Kasus UMKM Griya Batik Tulis Rahayu Desa Sumbergedong Kecamatan Trenggalek)," pp. 15–36, 2020, [Online]. Available: <http://repo.iain-tulungagung.ac.id/19252/>
- [5] R. Ramadhan, M. Handayani, Ardian, and N. N. Purba, "Perhitungan Job Order Costing Pada Workshop PT. Get Karya Mandiri," *Jurnal Ilmiah Akuntansi*, vol. 9, no. 2, pp. 70–82, Sep. 2022.
- [6] Brown, T. (2019). Route optimization in aviation using simulated annealing. *Journal of Air Transport Management*, 74, 1-1
- [7] H. Raoofpanah and V. Ghezavati, "Extended hybrid tabu search and simulated annealing algorithm for location-inventory model with multiple products, multiple distribution centers and multiple capacity levels," *Prod. Eng.*, vol. 13, no. 6, pp. 649–663, 2019, doi: 10.1007/s11740-019-00919-x.
- [8] H. Kusdarwanto, "Optimasi Rute Penerbangan Untuk Penjadwalan Kalibrasi Terhadap Alat Bantu Navigasi Udara Dengan Metode Algoritma Saving-Ants," pp. 1–127, 2010, [Online]. Available: <http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/2016-11/20274557-T41084-HeruKusdarwanto.pdf>
- [9] S. Xiao, P. Peng, P. Zheng, and Z. Wu, "A Hybrid Adaptive Simulated Annealing and Tempering Algorithm for Solving the Half-Open Multi-Depot Vehicle Routing Problem," *Mathematics*, vol. 12, no. 7, 2024, doi: 10.3390/math12070947.
- [10] K. Kızılođlu and Ü. S. Sakallı, "Integrating Flight Scheduling, Fleet Assignment, and Aircraft Routing Problems with Codesharing Agreements under Stochastic Environment," *Aerospace*, vol. 10, no. 12, 2023, doi: 10.3390/aerospace10121031.
- [11] G. Serazzi, *Performance Engineering*. 2024. doi: 10.1007/978-3-031-36763-2.
- [12] N. S. B. Ginting, N. Faizah, and W. Nurcahyo, "Sistem Informasi Geografis untuk Menentukan Rute Lokasi Wisata Danau Toba dengan Metode Simulated Annealing", *D Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 13–25, Jan. 2023.
- [13] M. A. Al Hafidh, "Optimalisasi Biaya Transportasi Pengiriman Barang dengan Menerapkan Metode Potensial," 2021.
- [14] R. Said, A. Maitimu, E. Talakua, T. Sipil, and P. N. Ambon, "Tinjauan Biaya Operasional Kendaraan Umum Trayek Morella-Batu Merah Rute Jmp," *Jurnal SIMETRIK*, vol. 12, no. 2.
- [15] Wiktasari, T. Prahasto, and J. E. Suseno, "Metode Simulated Annealing untuk Optimasi Penjadwalan Perguruan Tinggi."