

Optimasi Kinerja Sistem Sisi Udara dengan Pendekatan Pemodelan Sistem Dinamis

M. Iqbal Rachmansyah*,¹, Nahdalina¹

¹Universitas Gunadarma

Kampus G, Jl. Komjen Pol. M. Jasin, Jawa Barat, Depok, 16451, Indonesia

*E-mail: iqbal.rachmansyah@gmail.com

Diterima: 12 Februari 2024, direvisi: 17 April 2024, disetujui: 16 Mei 2024,
tersedia daring: 28 Juni 2024, diterbitkan: 28 Juni 2024

Abstrak

Peningkatan pergerakan pesawat yang tidak stabil dengan kapasitas landasan pacu (*runway*) yang tetap dapat memicu ketidakseimbangan antara pergerakan dan kapasitas, yang berdampak pada penurunan kinerja sistem sisi udara. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja historis dan proyeksi sistem sisi udara di Bandara Soekarno-Hatta serta menganalisis dampak penerapan skenario optimasi menggunakan pemodelan sistem dinamis. Model ini telah divalidasi dengan margin error rata-rata kurang dari 5% pada variabel DP, DAC, GDP, dan POP. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario optimasi 1, 2, dan 3 mampu menurunkan rata-rata utilisasi *runway* masing-masing sebesar 21,7%, 14,0%, dan 32,6%, serta mengurangi biaya tundaan tahunan sebesar 66,8%, 34,1%, dan 72,8% pada periode 2020–2030. Meskipun skenario 3 menghasilkan penurunan terbaik, skenario 1 direkomendasikan karena memberikan pengaruh yang signifikan dengan perbedaan hasil yang tidak terlalu besar dibandingkan skenario 3.

Kata kunci: optimasi, kinerja, landasan pacu, model sistem dinamis, pesawat.

Abstract

Optimization of Airside System Performance with a System Dynamic Modeling Approach: The increase in unstable aircraft movements with fixed runway capacity can trigger an imbalance between movement and capacity, impacting the decline in airside system performance. This study aims to evaluate the historical and projected performance of the airside system at Soekarno-Hatta Airport and analyze the impact of implementing optimization scenarios using dynamic system modeling. This model has been validated with an average error margin of less than 5% on the DP, DAC, GDP, and POP variables. The simulation results show that optimization scenarios 1, 2, and 3 can reduce the average runway utilization by 21.7%, 14.0%, and 32.6%, respectively, and reduce annual delay costs by 66.8%, 34.1%, and 72.8% in 2020–2030. Although scenario 3 produces the best reduction, scenario 1 is recommended because it has a significant effect with a not-too-large difference in results compared to scenario 3.

Keywords: aircraft, optimization, performance, runway, system dynamics model.

1. Pendahuluan

Kondisi jumlah permintaan pergerakan pesawat yang cenderung bersifat fluktuatif dan bertumbuh, ditambah dengan kondisi jumlah kapasitas infrastruktur sisi udara (pada penelitian ini hanya akan terbatas pada infrastruktur landasan pacu atau *runway*) yang bersifat konstan pada tiap periode waktunya, pada suatu titik tertentu akan menyebabkan terbentuknya suatu kondisi jenuh atau yang sering disebut dengan kondisi ketidakseimbangan pergerakan-kapasitas, yaitu kondisi di mana jumlah pergerakan pesawat yang beroperasi mulai mendekati atau bahkan melebihi jumlah kapasitas infrastruktur tersebut [1]. Kondisi ini akan menyebabkan menurunnya tingkat pelayanan atau kinerja pada sistem sisi udara (sistem interaksi antara pergerakan pesawat dengan infrastruktur *runway*), yang dapat direpresentasikan dari meningkatnya nilai utilisasi infrastruktur atau rasio pergerakan (*Demand* atau D) per kapasitas (*Capacity* atau C), waktu tundaan, dan biaya tundaan yang terjadi pada infrastruktur tersebut [2]. Penurunan kinerja ini akan berdampak pada kerugian finansial dan ekonomi bagi pihak-pihak yang ada pada sistem tersebut, yang meliputi pengelola bandar udara, maskapai penerbangan, dan penumpang [3].

Oleh karena itu, implementasi langkah penyeimbangan pergerakan pesawat dan kapasitas infrastruktur *runway* (selanjutnya disebut optimasi), diperlukan untuk mempertahankan kinerja sistem sisi udara supaya selalu berada dalam kondisi yang optimal [4]. Optimasi perlu diimplementasikan terutama pada sistem yang sudah mulai jenuh karena nilai waktu tundaan dan biaya tundaan pada sistem

sisi udara akan cenderung meningkat secara eksponensial seiring dengan meningkatnya nilai utilisasi infrastruktur pada sistem tersebut, atau ketika jumlah pergerakan pesawat yang ada mulai mendekati jumlah kapasitas infrastrukturnya [5], [6].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem sisi udara pada kondisi historis dan proyeksi, serta menganalisis pengaruh implementasi beberapa skenario optimasi terhadap kinerja sistem sisi udara pada kondisi proyeksi, khususnya kinerja sistem sisi udara yang ada pada Bandar Udara Internasional Soekarno-Hatta (CGK) yang akan dijadikan objek kajian. Proses analisis kinerja sistem sisi udara pada kondisi historis dan proyeksi (kondisi praoptimasi) dan setelah diimplementasikannya beberapa skenario optimasi (kondisi pascaoptimasi) tersebut akan dilakukan dengan menggunakan pendekatan pemodelan sistem dinamis. Adanya interaksi umpan-balik yang saling memengaruhi antarkomponen yang ada pada sistem sisi udara (penumpang, pesawat, dan infrastruktur *runway*), implementasi skenario optimasi yang bersifat strategis/makro, dan kebutuhan dalam menganalisis kinerja sistem sisi udara dari waktu ke waktu menjadi dasar digunakannya pemodelan sistem dinamis dalam mengkaji kinerja suatu sistem sisi udara [7]. Pemodelan sistem dinamis lebih reliabel untuk digunakan pada kondisi yang disebutkan di atas dibandingkan dengan pemodelan sistem lainnya seperti *agent-based* ataupun *discrete event*, di mana kedua pemodelan tersebut lebih cenderung untuk memodelkan suatu sistem yang bersifat proses/operasional, teknis, dan mikro [8]. Pengembangan model sistem dinamis pada penelitian ini dilakukan dengan menelaah dan mengkompilasi beberapa literatur penelitian sebelumnya yang relevan. Model dasar yang telah memenuhi syarat validasi nantinya akan digunakan untuk memproyeksi kinerja sistem sisi udara dan memahami bagaimana pengaruh dari skenario optimasi terhadap kinerja sistem sisi udara yang telah diproyeksikan tersebut.

2. Metodologi

2.1. Metode Pengumpulan Data

Data-data yang dibutuhkan dalam proses penelitian dibagi menjadi 2 (dua) kategori, yaitu data statistik dan data dokumen/manual/jurnal. Data statistik yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 1, sementara data dokumen/manual/jurnal dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Pengumpulan data statistik

Nama Data	Rentang	Sumber
Pergerakan per rute operasi penerbangan	Per bulan selama 7 tahun	Angkasa Pura II
Pegerakan per jenis operasi penerbangan	Per bulan selama 7 tahun, dan per jam selama 1 hari	Angkasa Pura II, AirNav Indonesia
Pergerakan per tipe pesawat	Per tipe pesawat per tahun selama 7 tahun, dan per tipe pesawat per jam selama 1 hari	Angkasa Pura II, AirNav Indonesia
Nilai kurs USD-IDR	Per bulan selama 1 tahun	BPS
Pergerakan per asal-tujuan penerbangan	Per rute per tahun selama 7 tahun, per rute per jam selama 1 hari	Angkasa Pura II, AirNav Indonesia
Tarif tiket standar per asal-tujuan penerbangan	-	Google Flight
Waktu perjalanan standar per asal-tujuan penerbangan	-	Travel Math
PDB	Per tahun selama 7 tahun	BPS
Populasi, kelahiran, dan kematian	Per tahun selama 7 tahun	BPS

Tabel 2. Pengumpulan data dokumen/manual/jurnal.

Nama Data	Jenis Data	Sumber
Karakteristik dan performansi pesawat	Dokumen	[9], [10]
Karakteristik <i>runway</i> Bandar Udara CGK	Dokumen	[11]
<i>Runway use diagram & capacity diagram</i>	Manual	[5]
<i>Runway use diagram & delay index diagram</i>	Manual	[5]
<i>Runway delay time diagram</i>	Manual	[5]
Biaya operasi pesawat	Dokumen	[10]

Nama Data	Jenis Data	Sumber
Elastisitas harga dan waktu	Jurnal	[12]
Karakteristik <i>runway</i> bandar udara domestik di Indonesia	Dokumen	[11]

2.2. Analisis Data

2.2.1. Analisis Karakteristik Sistem Sisi Udara

Analisis dilakukan secara manual dengan menelaah data-data historis terkait karakteristik sistem sisi udara yang ada pada Bandar Udara CGK, meliputi karakteristik pergerakan pesawat, kapasitas infrastruktur, dan kinerja sistem sisi udara. Proses analisis karakteristik pergerakan pesawat menggunakan formulasi yang ada pada Tabel 3, analisis kapasitas infrastruktur menggunakan formulasi yang ada pada Tabel 4, dan analisis kinerja sistem sisi udara menggunakan formulasi yang ada pada Tabel 5. Hasil analisis karakteristik sistem sisi udara akan dijadikan sebagai komponen *parameter* (input) pada model sistem dinamis yang akan dikembangkan selanjutnya.

Tabel 3. Analisis karakteristik pergerakan pesawat

Variabel	Ref	Penjelasan
Rasio pergerakan per rute operasi penerbangan	[13]	$R_{AC-Route} = \frac{D_{AC-Route}}{D_{AC}} \quad (1)$ <p>Di mana, $R_{AC-Route}$: Rasio pergerakan pesawat sesuai rute penerbangan (internasional/domestik), $D_{AC-Route}$: Jumlah pergerakan pesawat sesuai rute penerbangan (internasional/domestik), D_{AC}: Jumlah pergerakan pesawat total.</p>
Rasio pergerakan per jenis operasi penerbangan	[13]	$\%A = \frac{D_{AC-Arrival}}{D_{AC}} \times 100\% \quad (2)$ <p>Di mana, $\%A$: Persentase kedatangan, $D_{AC-Arrival}$: Jumlah pergerakan pesawat yang datang, D_{AC}: Jumlah pergerakan pesawat total.</p>
Rasio waktu sibuk	[13]	$R_{AC-Hour} = \frac{D_{AC-Hour}}{D_{AC-Day}} \quad (3)$ <p>Di mana, $R_{AC-Hour}$: Rasio pergerakan pesawat per jam, $D_{AC-Hour}$: Jumlah pergerakan pesawat per jam, D_{Total}: Jumlah pergerakan pesawat per hari.</p>
Rasio pergerakan per kategori/kelas pesawat	[5]	$R_{AC-Class} = \frac{D_{AC-Class}}{D_{AC}} \quad (4)$ <p>Di mana, $R_{AC-Class}$: Rasio pergerakan sesuai kelas pesawat (kelas B/C/D), $D_{AC-Class}$: Jumlah pergerakan sesuai kelas pesawat (kelas B/C/D), D_{AC}: Jumlah pergerakan pesawat total.</p>
Kapasitas kursi penumpang (PSC)	[14]	<p>Dirumuskan:</p> $PSC_{Class} = \sum \left(\frac{D_{AC-Type}}{D_{AC-Class}} \times Cap_{AC-Type} \right) \quad (5)$ $PSC_W = \sum (PSC_{Class} \times R_{AC-Class}) \quad (6)$ <p>Di mana, PSC_{Class}: Kapasitas kursi penumpang sesuai kelas pesawat, $D_{AC-Type}$: Jumlah pergerakan sesuai tipe pesawat yang ada pada kelas pesawat yang sedang diobservasi, $D_{AC-Class}$: Jumlah pergerakan sesuai kelas pesawat, $Cap_{AC-Type}$: Kapasitas kursi penumpang sesuai tipe pesawat yang ada pada kelas pesawat yang sedang diobservasi, PSC_W: Kapasitas kursi penumpang terbobot, dan $R_{AC-Class}$: Rasio pergerakan sesuai kelas pesawat.</p>
Faktor okupansi penumpang (PLF)	[14]	<p>Dirumuskan:</p> $PLF_W = \sum_{i=1}^r \left(\frac{D_p}{PSC_W \times D_{AC}} \right) \quad (7)$ <p>Di mana, PLF_W: Faktor okupansi penumpang terbobot, D_p: Jumlah pergerakan penumpang, PSC_W: Kapasitas kursi penumpang terbobot, dan D_{AC}: Jumlah pergerakan pesawat total.</p>

Tabel 4. Analisis kapasitas infrastruktur

Variabel	Ref	Penjelasan
Kapasitas <i>runway</i> terfaktor	[5]	$C_{RWY} = C_b \times E \times T \times F_u \quad (8)$ <p>Di mana, C_{RWY}: Kapasitas <i>runway</i> terfaktor, C_b: Kapasitas dasar berdasarkan fungsi konfigurasi <i>runway</i>, <i>mix index</i> (MI), dan persentase kedatangan (%A) yang diinterpolasi ke <i>runway capacity diagram</i> yang sesuai, E: Faktor penyesuaian jalan keluar berdasarkan konfigurasi <i>exit-taxiway</i>, T: Faktor penyesuaian berdasarkan operasi <i>touch-and-go</i>, dan F_u: Faktor utilisasi (= 90%).</p>

Tabel 5. Analisis kinerja sistem sisi udara

Variabel	Ref	Penjelasan
Utilisasi infrastruktur	[2]	Dirumuskan: $Util_{RWY} = D_{AC} / C_{RWY}$ (9) Di mana, $Util_{RWY}$: Utilisasi <i>runway</i> , D_{AC} : Jumlah pergerakan pesawat total, C_{RWY} : Jumlah kapasitas <i>runway</i> .
Waktu tundaan	[5]	Dirumuskan: $Delay_{RWY} = D_{AC} \times [(\%A \times DAHA) + \{(1 - \%A) \times DAHD\}]$ (10) Di mana, $Delay_{RWY}$: Waktu tundaan <i>runway</i> , D_{AC} : Jumlah pergerakan pesawat total, $\%A$: Persentase kedatangan, $DAHA$: Nilai rerata tundaan untuk operasi kedatangan, dan $DAHD$: Nilai rerata tundaan untuk operasi keberangkatan, di mana nilai $DAHA$ dan $DAHD$ didapatkan dari fungsi $Util_{RWY}$, MI, $\%A$, <i>delay index</i> , <i>delay factor</i> , dan <i>profile factor</i> yang diinterpolasi ke <i>runway delay time diagram</i> .
Biaya tundaan	[15]	Dirumuskan: $DelayCost = Delay_{RWY} \times AOC_W$ (11) Di mana, $DelayCost$: Biaya tundaan, $Delay_{RWY}$: Waktu tundaan <i>runway</i> , dan AOC_W : Biaya operasi pesawat terbobot. Nilai AOC_W dapat dirumuskan: $AOC_W = \sum \left(\frac{D_{AC-Type}}{D_{AC}} \times AOC_{AC-Type} \right)$ (12) Di mana, AOC_W : Biaya operasi pesawat terbobot, $D_{AC-Type}$: Jumlah pergerakan sesuai tipe pesawat, D_{AC} : Jumlah pergerakan pesawat total, dan $AOC_{AC-Type}$: Biaya operasi sesuai tipe pesawat.

2.2.2. Pengembangan Model Konseptual

Pengembangan model konseptual dilakukan dalam 2 (dua) tahapan, yaitu dengan mengidentifikasi variabel yang menyebabkan terbentuknya perilaku variabel yang ada pada sistem sisi udara dan pengembangan diagram sebab-akibat. Identifikasi variabel yang menyebabkan terbentuknya perilaku variabel yang ada pada sistem sisi udara didapatkan dari hasil analisis karakteristik sistem sisi udara pada tahap sebelumnya, serta dengan menelaah dan mengkompilasi beberapa literatur penelitian sebelumnya yang relevan dengan model yang akan dikembangkan pada penelitian ini [12], [16], [17], [18]. Variabel-variabel yang telah diidentifikasi akan ditranslasikan ke dalam bentuk diagram sebab-akibat, termasuk di dalamnya mencakup komponen *link* pada variabel yang dianggap berhubungan langsung sebagai relasi sebab-akibatnya, polaritas/kecenderungan pengaruh antarvariabel yang berelasi (apakah berdampak positif/+ atau berdampak negatif/-), serta umpan balik (apakah bersifat menguatkan/R atau menyeimbangkan/B).

Identifikasi variabel dan diagram sebab-akibat yang telah dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan gambar tersebut, terdapat 4 (empat) faktor yang memengaruhi jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang setiap tahunnya, antara lain faktor eksternal yang terdiri atas pertumbuhan PDB dan Populasi, serta faktor internal yang terdiri atas perubahan Tarif Tiket dan Tingkat Pelayanan. Faktor-faktor ini akan saling berinteraksi satu sama lainnya sehingga menjadi suatu faktor koreksi terhadap jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang tiap waktunya. Tanda + pada diagram tersebut menunjukkan bahwa nilai PDB dan Populasi akan berpengaruh positif terhadap jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang, yang dapat diartikan jika jumlah PDB dan Populasi meningkat, maka jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang juga akan cenderung meningkat. Sementara tanda – menunjukkan bahwa perubahan pada Tarif Tiket dan Waktu Perjalanan akan berpengaruh negatif terhadap jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang, yang dapat diartikan jika Tarif Tiket dan Waktu Perjalanan meningkat, maka jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang juga akan cenderung menurun. Berdasarkan Gambar 1 tersebut juga dapat diidentifikasi beberapa umpan-balik, yang menjelaskan kecenderungan rantai hubungan antarvariabel yang saling terkait dalam sistem tersebut, antara lain:

Umpan-balik Utama B1, meliputi Jumlah Pertumbuhan Pergerakan Penumpang - Jumlah Pergerakan Penumpang - Jumlah Pergerakan Pesawat - Jumlah Pergerakan Rerata Jumlah Pergerakan Pesawat per Jam - Utilisasi Infrastruktur - Waktu Tundaan - Biaya Tundaan - Perubahan Tarif Tiket-Jumlah Pertumbuhan Pergerakan Penumpang.

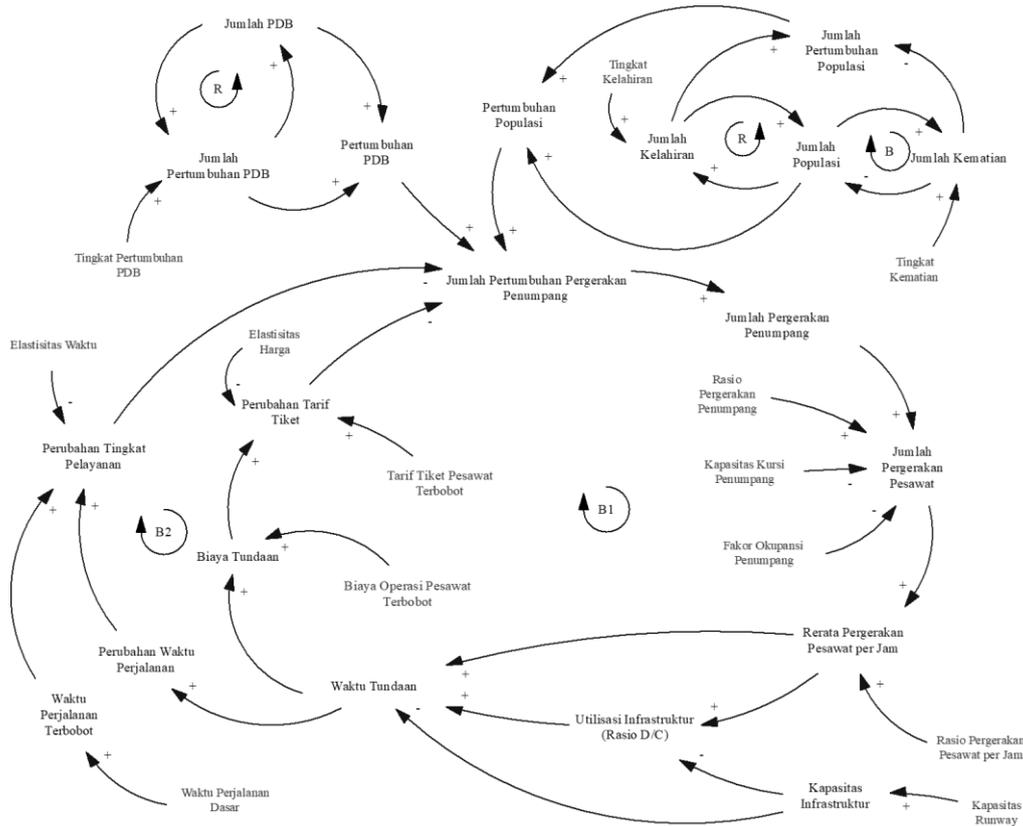
Umpan-balik Utama B2, meliputi Jumlah Pertumbuhan Pergerakan Penumpang - Jumlah Pergerakan Penumpang - Jumlah Pergerakan Pesawat - Rerata Jumlah Pergerakan Pesawat per Jam - Utilisasi Infrastruktur - Waktu Tundaan - Perubahan Tingkat Pelayanan - Jumlah Pertumbuhan Pergerakan Penumpang.

Umpan-balik R pada PDB, meliputi Jumlah PDB - Jumlah Pertumbuhan PDB - Jumlah PDB.

Umpan-balik R pada Kelahiran, meliputi Jumlah Populasi - Jumlah Kelahiran - Jumlah Populasi.

Umpan Balik B pada Kematian, meliputi Jumlah Populasi - Jumlah Kematian - Jumlah Populasi.

Umpan-balik utama yang ada pada model dasar adalah umpan-balik B1 dan B2, di mana perubahan nilai pada semua variabel yang ada dalam rangkaian umpan-balik tersebut akan memengaruhi masing-masing nilai variabel tersebut kembali di waktu yang akan datang. Sementara umpan-balik pendukung, seperti PDB, Kelahiran, dan Kematian hanya akan memengaruhi nilai variabel yang ada pada umpan-balik utama di waktu yang akan datang. Tapi nilai variabel yang ada pada umpan-balik utama tersebut tidak akan memengaruhi nilai variabel PDB, Kelahiran, dan Kematian di waktu yang akan datang. Dapat dilihat pada Seperti yang disajikan pada Gambar 1, variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel lain disebut sebagai variabel eksogen. Selain itu, maka disebut sebagai variabel endogen.



Gambar 1. Diagram sebab-akibat pada model konseptual

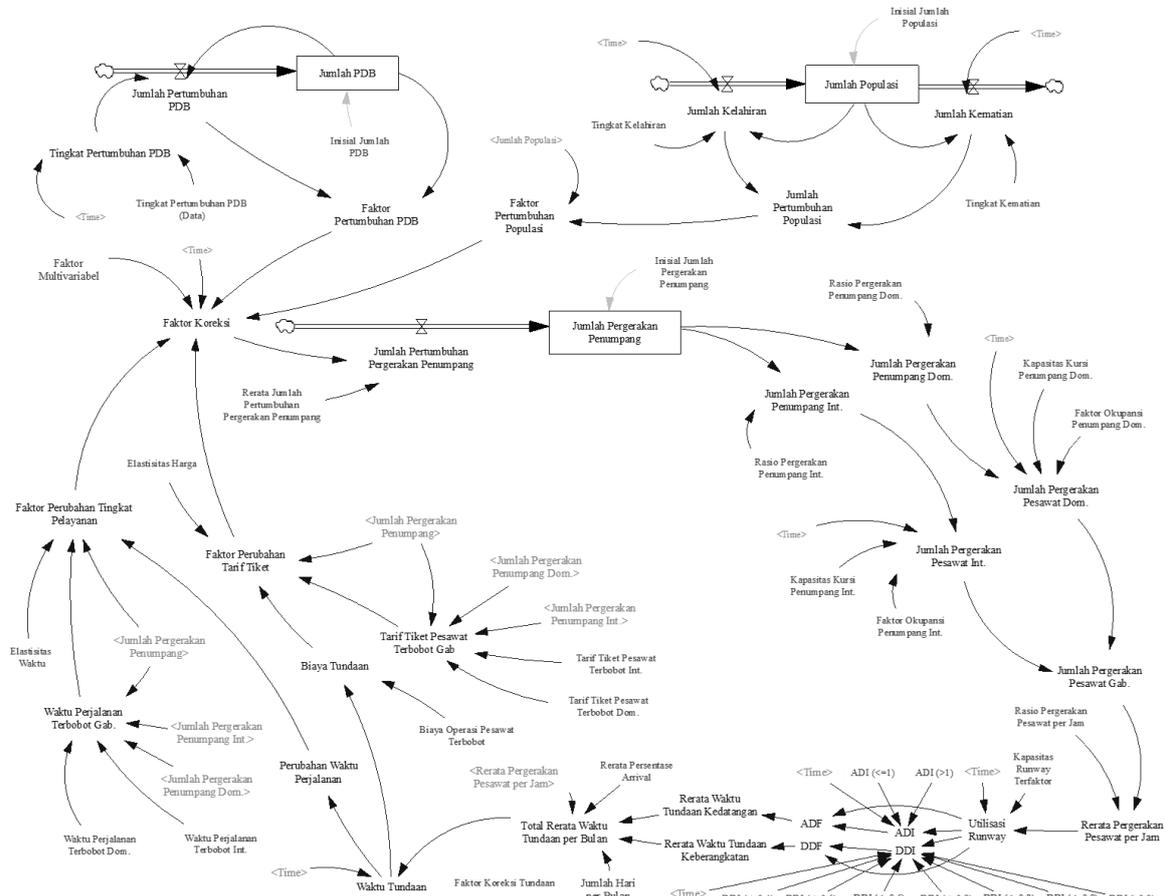
2.2.3. Pengembangan Model Matematis

Pengembangan model matematis didasarkan pada hasil model konseptual yang telah dikembangkan sebelumnya. Pengembangan model matematis dilakukan dalam 2 (dua) tahapan, yaitu dengan mengembangkan diagram persediaan-aliran, serta mendefinisikan formulasi matematis dan nilai data pada tiap variabel yang ada pada diagram tersebut. Variabel yang ada pada diagram persediaan-aliran dapat dikategorikan ke dalam 4 (empat) tipe komponen, yaitu *stock*, *flow*, *auxiliary*, dan *parameter*. Pendefinisian komponen pada tiap variabel yang ada dilakukan dengan menyesuaikan beberapa kondisi, seperti tingkat kedetailan sistem yang ingin dianalisis, keterbatasan data yang dimiliki, dan karakteristik perilaku variabel tiap waktunya.

Komponen *stock*, *flow*, dan *auxiliary* merupakan variabel endogen (bersifat proses dan output), di mana nilainya akan dipengaruhi dan memengaruhi variabel lain yang berelasi dengan variabel tersebut. Sementara komponen *parameter* merupakan variabel eksogen (bersifat input), di mana nilainya hanya akan memengaruhi variabel lain yang berelasi dengan variabel tersebut. Pada model matematis, komponen *stock*, *flow*, dan *auxiliary* akan direpresentasikan oleh formulasi matematis, sementara komponen *parameter* akan direpresentasikan oleh nilai data. Selain itu, nilai data pada komponen

parameter tersebut dapat dikategorikan menjadi 2 (dua) bentuk, yaitu *lookup* (nilai yang berbeda pada tiap titik waktu) atau *constant* (nilai rerata yang sama pada tiap titik waktu).

Identifikasi formulasi dan nilai data antarvariabel yang ada pada diagram persediaan-aliran didapatkan dari hasil analisis karakteristik sistem sisi udara pada tahap sebelumnya, serta dengan menelaah dan mengkompilasi beberapa literatur penelitian sebelumnya yang relevan dengan model yang akan dikembangkan pada penelitian ini. Diagram persediaan-aliran yang telah dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 2. Sementara formulasi dan nilai data antarvariabel yang akan didefinisikan pada diagram persediaan-aliran yang telah dikembangkan dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.



Gambar 2. Diagram persediaan-aliran pada model matematis

Tabel 6. Jenis dan formulasi antarvariabel pada model matematis (*stock / flow / auxiliary*)

Variabel & Notasi	Jenis	Formulasi	Satuan
Jumlah pergerakan penumpang (D_P)	Stock	$D_P = D_P(t-t) + (D_{P-G}) dt$	(13) Orang/tahun
Jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang (D_{P-G})	Flow	$D_{P-G} = D_{P-GR} \times FC$	(14) Orang/tahun
Faktor koreksi (FC)	Auxiliary	$FC = ((F_{POP} + (MAX(F_{LOSC}, F_{AFC}))) \times (F_{PDB})) / (F_{Multi}(Time))$	(15) -
Jumlah pergerakan penumpang internasional (D_{P-Int})	Auxiliary	$D_{P-Int} = (R_{P-Int} / 100) \times D_P$	(16) Orang/tahun
Jumlah pergerakan penumpang domestik (D_{P-Dom})	Auxiliary	$D_{P-Dom} = (R_{P-Dom} / 100) \times D_P$	(17) Orang/tahun
Jumlah pergerakan pesawat internasional (D_{AC-Int})	Auxiliary	$D_{AC-Int} = D_{P-Int} / (PSC_{Int} \times (PLF_{Int}(Time) / 100))$	(18) Pesawat/tahun
Jumlah pergerakan pesawat domestik (D_{AC-Dom})	Auxiliary	$D_{AC-Dom} = D_{P-Dom} / (PSC_{Dom}(Time) \times (PLF_{Dom} / 100))$	(19) Pesawat/tahun
Jumlah pergerakan pesawat gabungan (D_{AC})	Auxiliary	$D_{AC} = D_{AC-Int} + D_{AC-Dom}$	(20) Pesawat/tahun
Rerata pergerakan pesawat per jam ($D_{AC-Hour}$)**	Auxiliary	$D_{AC-Hour} = R_{AC-Hour} \times D_{AC}$	(21) Pesawat/jam
Utilisasi runway ($Util_{RWY}$)**	Auxiliary	$Util_{RWY} = D_{AC-Hour} / C_{RWY}(Time)$	(22) -

Variabel & Notasi	Jenis	Formulasi	Satuan
Arrival delay index (ADI)**	Auxiliary	$ADI = IF THEN ELSE (Util_{RWY} \leq 1, ADI_{<=1} (Time), ADI_{>1} (Time))$	(23) -
Departure delay index (DDI)**	Auxiliary	$DDI = IF THEN ELSE (Util_{RWY} \leq 0.4, DDI_{<=0.4} (Time), IF THEN ELSE (Util_{RWY} \leq 0.5, DDI_{<=0.5} (Time), IF THEN ELSE (Util_{RWY} \leq 0.6, DDI_{<=0.6} (Time), IF THEN ELSE (Util_{RWY} \leq 0.7, DDI_{<=0.7} (Time), IF THEN ELSE (Util_{RWY} \leq 0.8, DDI_{<=0.8} (Time), IF THEN ELSE (Util_{RWY} \leq 0.9, DDI_{<=0.9} (Time), DDI_{>0.9} (Time))))))$	(24) -
Arrival delay factor (ADF)**	Auxiliary	$ADF = ADI \times Util_{RWY}$	(25) -
Departure delay factor (DDF)**	Auxiliary	$DDF = DDI \times Util_{RWY}$	(26) -
Rerata waktu tundaan kedatangan (Delay _{Arr})**	Auxiliary	$Delay_{Arr} = IF THEN ELSE (ADF \leq 0.1, 0.05, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.2, 0.1, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.3, 0.25, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.4, 0.45, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.5, 0.7, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.6, 1.1, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.7, 1.8, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.8, 2.9, IF THEN ELSE (ADF \leq 0.9, 4.2, 5.6))))))))))$	(27) Menit/pesawat /jam
Rerata waktu tundaan keberangkatan (Delay _{Dep})**	Auxiliary	$Delay_{Dep} = IF THEN ELSE (DDF \leq 0.1, 0.05, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.2, 0.1, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.3, 0.25, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.4, 0.45, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.5, 0.7, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.6, 1.1, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.7, 1.8, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.8, 2.9, IF THEN ELSE (DDF \leq 0.9, 4.2, 5.6))))))))))$	(28) Menit/pesawat /jam
Total rerata waktu tundaan per bulan (Delay _{Month})**	Auxiliary	$Delay_{Month} = (D_{AC-Hour} \times ((\%A / 100) \times Delay_{Arr}) + ((1 - \%A / 100) \times Delay_{Dep})) \times 24 \times Day_{Month}$	(29) Menit/bulan
Waktu tundaan (Delay _{RWY})	Auxiliary	$Delay_{RWY} = \sum Delay_{Month} / F_{DC} (Time)$	(30) Menit/tahun
Biaya tundaan (Delay _{Cost})	Auxiliary	$Delay_{Cost} = (Delay_{RWY} / 60) \times AOC_w$	(31) Rp/tahun
Faktor perubahan tarif tiket (F _{AFC})	Auxiliary	$F_{AFC} = \epsilon_P \times ((Delay_{Cost} / D_P) / AF_w)$	(32) -
Tarif tiket pesawat terbobot gabungan (AF _w)	Auxiliary	$AF_w = (AF_{w-Int} \times (D_{P-Int} / D_P)) + (AF_{w-Dom} \times (D_{P-Dom} / D_P))$	(33) Rp/orang
Perubahan waktu perjalanan (TT _C)	Auxiliary	$TT_C = Delay_{RWY} / 60$	(34) Jam/tahun
Faktor perubahan tingkat pelayanan (F _{LOSC})	Auxiliary	$F_{LOSC} = \epsilon_T \times ((TT_C / D_P) / TT_w)$	(35) -
Waktu perjalanan terbobot gabungan (TT _w)	Auxiliary	$TT_w = ((TT_{w-Int} / 60) \times (D_{P-Int} / D_P)) + ((TT_{w-Dom} / 60) \times (D_{P-Dom} / D_P))$	(36) Jam/orang
Jumlah PDB (GDP)	Stock	$GDP = GDP (t-dt) + (GDP_G) dt$	(37) Rp/tahun
Jumlah pertumbuhan PDB (GDP _G)	Flow	$GDP_G = (GDP_{GR} / 100) \times GDP$	(38) Rp/tahun
Tingkat pertumbuhan PDB (GDP _{GR})	Auxiliary	$GDP_{GR} = GDP_{GR-Data} (Time)$	(39) %
Faktor pertumbuhan PDB (F _{GDP})	Auxiliary	$F_{GDP} = (GDP_G / GDP) \times 100$	(40) -
Jumlah populasi (POP)	Stock	$POP = POP (t-dt) + (BI - DE) dt$	(41) Orang/tahun
Jumlah kelahiran (BI)	Flow	$BI = (BI_R (Time) / 100) \times POP$	(42) Orang/tahun
Jumlah kematian (DE)	Flow	$DE = (DE_R (Time) / 100) \times POP$	(43) Orang/tahun
Jumlah pertumbuhan populasi (POP _G)	Auxiliary	$POP_G = BI - DE$	(44) Orang/tahun
Faktor pertumbuhan populasi (F _{POP})	Auxiliary	$F_{POP} = (POP_G / POP) \times 100$	(45) -

Tabel 7. Jenis dan nilai data antarvariabel pada model matematis (parameter).

Variabel & Notasi	Nilai Data	Satuan
Inisial jumlah pergerakan penumpang (D _{P-Int})	32,240,936	Orang/tahun
Rerata jumlah pert. pergerakan penumpang (D _{P-GR})	4,163,372	Orang/tahun
Faktor multivariabel (F _{Muti})	Lookup, [(0,-20)-(8,100)], (1,3.99),(2,6.35), (3,6.61), (4,6.92), (5,13.72), (6,24.14), (7,10.29), (8,10.29)	-
Rasio pergerakan penumpang internasional (R _{P-Int})	19.86	%
Rasio pergerakan penumpang domestik (R _{P-Dom})	80.14	%

Variabel & Notasi	Nilai Data	Satuan
Kapasitas kursi penumpang internasional (PSC_{Int})	245	Orang/pesawat
Faktor okupansi penumpang internasional (PLF_{Int})	63.35	%
Kapasitas kursi penumpang domestik (PSC_{Dom})	Lookup, [(0,0)-(8,300)], (1,155), (2,155), (3,155), (4,155), (5,155), (6,155), (7,155), (8,155)	Orang/pesawat
Faktor okupansi penumpang domestik (PLF_{Dom})	90.94	%
Rasio pergerakan pesawat per jam (RAC_{Hour})**	Jan = 0.000111545, Feb = 0.000110178, Mar = 0.000111029, Apr = 0.000112114, Mei = 0.000112824, Jun = 0.000115241, Jul = 0.000114012, Agu = 0.000114882, Sep = 0.000115499, Okt = 0.000116749, Nov = 0.000116108, Des = 0.000119371	-
Kapasitas runway terfaktor (C_{RWY})	92	Pesawat/jam
Arrival delay index ketika utilisasi runway ≤ 1 ($ADI_{\leq 1}$)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,0.86), (2,0.86), (3,0.86), (4,0.86), (5,0.86), (6,0.86), (7,0.86), (8,0.86)	-
Arrival delay index ketika utilisasi runway > 1 ($ADI_{> 1}$)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,1), (2,1), (3,1), (4,1), (5,1), (6,1), (7,1), (8,1)	-
Departure delay index ketika utilisasi runway $\leq 0,4$ ($DDI_{\leq 0,4}$)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,0.63), (2,0.63), (3,0.63), (4,0.63), (5,0.63), (6,0.63), (7,0.63), (8,0.63)	-
Departure delay index ketika utilisasi runway $\leq 0,5$ ($DDI_{\leq 0,5}$)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,0.67), (2,0.67), (3,0.67), (4,0.67), (5,0.67), (6,0.67), (7,0.67), (8,0.67)	-
Departure delay index ketika utilisasi runway $\leq 0,6$ ($DDI_{\leq 0,6}$)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,0.72), (2,0.72), (3,0.72), (4,0.72), (5,0.72), (6,0.72), (7,0.72), (8,0.72)	-
Departure delay index ketika utilisasi runway $\leq 0,7$ ($DDI_{\leq 0,7}$)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,0.78), (2,0.78), (3,0.78), (4,0.78), (5,0.78), (6,0.78), (7,0.78), (8,0.78)	-
Departure delay index ketika utilisasi runway $\leq 0,8$ ($DDI_{\leq 0,8}$)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,0.85), (2,0.85), (3,0.85), (4,0.85), (5,0.85), (6,0.85), (7,0.85), (8,0.85)	-
Departure delay index ketika utilisasi runway $\leq 0,9$ ($DDI_{\leq 0,9}$)	Lookup, [(1,0)-(8,10)], (1,0.91), (2,0.91), (3,0.91), (4,0.91), (5,0.91), (6,0.91), (7,0.91), (8,0.91)	-
Departure delay index ketika utilisasi runway > 0.9 ($DDI_{> 0,9}$)	Lookup, [(1,0)-(8,10)], (1,1), (2,1), (3,1), (4,1), (5,1), (6,1), (7,1), (8,1)	-
Rerata persentase arrival (%A)	50.3	%
Jumlah hari per bulan (Day_{Month})**	Jan = 31, Feb = 28, Mar = 31, Apr = 30, Mei = 31, Jun = 30, Jul = 31, Agu = 31, Sep = 30, Okt = 31, Nov = 30, Des = 31	Hari/bulan
Faktor koreksi tundaan (F_{DC})	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,0.4936), (2,0.5459), (3,0.6168), (4,0.4478), (5,0.4872), (6,0.4352), (7,0.4726), (8,0.4999)	-
Biaya operasi pesawat terbobot (AOC_W)	33,183,207	Rp/jam
Tarif tiket pesawat terbobot internasional (AFW_{Int})	2,713,633	Rp/perjalanan
Tarif tiket pesawat terbobot domestik (AFW_{Dom})	595,713	Rp/perjalanan
Elastistas harga (ϵ_P)	-0.8	-
Waktu perjalanan terbobot internasional (TTW_{Int})	236	Menit/perjalanan
Waktu perjalanan terbobot domestik (TTW_{Dom})	102	Menit/perjalanan
Elastistas harga (ϵ_T)	-1,6	-
Inisial jumlah PDB (GDP_{Int})	2,082,456,100,000,000	Rp
Tingkat pertumbuhan PDB (Data) ($GDP_{GR-Data}$)	Lookup, [(-1,0)-(8,10)], (1,4.63), (2,4.63), (3,6.22), (4,6.49), (5,6.26), (6,5.73), (7,5.06), (8,5.57)	%
Inisial jumlah populasi (POP_{Int})	230,714,804	Orang
Tingkat kelahiran (BI_R)	Lookup, [(0,0)-(8,10)], (1,1.99), (2,1.99), (3,1.99), (4,1.87), (5,1.87), (6,1.87), (7,1.87), (8,1.92)	%
Tingkat kematian (DE_R)	[(0,0)-(8,10)], (1,0.52), (2,0.52), (3,0.52), (4,0.55), (5,0.55), (6,0.55), (7,0.55), (8,0.54)	%

2.2.4. Simulasi Model Dasar

Model matematis yang telah dikembangkan disimulasikan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Vensim PLE 9.3.5. Model dasar disimulasikan dalam rentang waktu tujuh tahun, mulai dari tahun 2008 (tahun ke-1) hingga tahun 2014 (tahun ke-7). *Timestep* yang digunakan dalam proses simulasi adalah satu tahun, yang berarti nilai yang dihasilkan pada tiap variabel yang ada pada sistem dari proses simulasi

yang dilakukan merupakan representasi dari nilai per tahunnya. Hasil simulasi model dasar akan dijelaskan pada bab Hasil dan Pembahasan.

2.2.5. Validasi Model Dasar

Model dasar yang telah disimulasikan dievaluasi untuk mengukur apakah model tersebut valid (merekpresentasikan sistem nyatanya). Validasi model dilakukan dengan menggunakan *behavior comparison*, yaitu dengan membandingkan beberapa rerata nilai variabel yang ada pada sistem dari hasil simulasi (S) dengan rerata nilai variabel yang ada pada sistem dari data historis/aktual (A), di mana margin *error* di antara keduanya harus $< 5\%$ atau 0,05 [19].

$$\text{Margin Error} = |\bar{S} - \bar{A}| / \bar{A} \quad (46)$$

Validasi model dilakukan dengan membandingkan nilai variabel jumlah pergerakan penumpang (D_P), jumlah pergerakan pesawat (D_{AC}), jumlah PDB (GDP), dan jumlah populasi (POP) hasil simulasi dengan data aktual, pada rentang waktu 2008-2014 (tujuh tahun). Hasil validasi model dasar akan dijelaskan pada bab Hasil dan Pembahasan.

2.2.6. Simulasi Model Dasar Proyeksi

Model dasar yang telah memenuhi syarat validasi dapat digunakan untuk memproyeksi perilaku tiap variabel yang ada pada model tersebut pada waktu yang akan datang di luar rentang waktu yang dimodelkan pada model dasar, ataupun untuk memahami pengaruh dari implementasi skenario optimasi terhadap perilaku tiap variabel yang ada pada sistem. Model dasar diproyeksi mulai tahun 2015 hingga tahun 2030 (enam belas tahun), sebagai representasi perencanaan jangka menengah. Sebagai batasan, proyeksi dilakukan tanpa mempertimbangkan faktor-faktor eksternal lain yang mungkin akan memengaruhi perilaku variabel yang ada pada sistem yang diproyeksikan tersebut. Keadaan pada waktu proyeksi (2015-2030) diasumsikan sama persis dengan keadaan yang terjadi secara historis (2008-2014), yang direpresentasikan dengan tidak adanya perbedaan antara variabel, formulasi, dan nilai data antara kondisi historis dan kondisi proyeksi. Hasil simulasi model dasar proyeksi akan dijelaskan pada bab Hasil dan Pembahasan.

2.2.7. Simulasi Implementasi Skenario Optimasi

Kondisi penurunan kinerja yang terjadi pada sistem sisi udara berdasarkan hasil simulasi model dasar proyeksi menjadi dasar diperlukannya implementasi skenario optimasi, yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja sistem sisi udara pada kondisi proyeksi tersebut. Skenario optimasi yang akan diimplementasikan pada model dasar proyeksi dilakukan dengan mengubah nilai data yang ada pada beberapa variabel *parameter*, tanpa mengubah struktur diagram yang ada (berikut variabel *stock*, *flow*, dan *auxiliary*, beserta formulasinya). Beberapa skenario optimasi yang akan diimplementasikan pada model dasar proyeksi akan dijelaskan sebagai berikut.

2.2.7.1 Skenario 1: pengaturan penggunaan pesawat berkapasitas penumpang lebih besar pada beberapa rute domestik yang memiliki operasi penerbangan dari/ke Bandar Udara CGK

Penggunaan pesawat berkapasitas lebih besar akan dioperasikan pada beberapa rute domestik dengan rasio pergerakan yang cukup tinggi dan karakteristik infrastruktur *runway* yang ada pada bandar udaranya (dimensi *runway*, kode referensi *aerodrome / ARC*, dan *runway PCN strength*) masih dapat melayani operasi pesawat yang lebih besar tersebut (terpenuhinya persyaratan atas *take-off* dan *landing length requirement*, *maximum take off weigh / MTOW*, dan *maximum landing weight / MLW*).

Penggunaan pesawat berkapasitas lebih besar nantinya hanya akan diimplementasikan pada tujuh rute domestik dengan rasio permintaan (rasio jumlah pergerakan per rute terhadap jumlah pergerakan total pada rentang waktu tertentu secara historis) paling dominan, yaitu Makassar (6,8%), Bali (8,4%), Yogyakarta (5,5%), Semarang (4,8%), Surabaya (9,9%), Medan (8,2%), dan Palembang (5,3%). Masing-masing rute akan menggunakan pesawat berkategori D dengan kapasitas penumpang rerata sebesar 261, 261, 216, 261, 246, 261, dan 261 penumpang, di mana sebelumnya pesawat yang beroperasi pada rute tersebut secara rerata historis masih cenderung menggunakan pesawat berkategori C (memiliki kapasitas penumpang yang lebih kecil). Sementara pada rute domestik lain yang rasio pergerakannya tidak dominan

akan tetap menggunakan pesawat yang cenderung beroperasi pada rute tersebut secara rerata historis, yaitu pesawat berkategori C, meskipun infrastruktur *runway* pada rute tersebut mampu untuk melayani operasi pesawat yang berkategori lebih besar.

Hal ini akan berdampak pada berubahnya nilai data pada variabel *parameter* (input) yang ada pada model matematis, yaitu variabel kapasitas kursi penumpang domestik (PSC_{Dom}), di mana nilainya menjadi 211 orang/pesawat dari yang awalnya 155 orang/pesawat. Perubahan nilai data ini akan berpengaruh terhadap menurunnya nilai variabel *auxiliary* (output) jumlah pergerakan pesawat domestik (D_{AC-Dom}) dan jumlah pergerakan pesawat (D_{AC}), di mana menurunnya kedua nilai ini akan memengaruhi nilai variabel *auxiliary* lainnya yang merepresentasikan kinerja sistem sisi udara yang ada, yaitu variabel utilisasi *runway* ($Util_{RWY}$) dan biaya tundaan ($DelayCost$).

2.2.7.2 Skenario 2: penambahan infrastruktur runway baru pada Bandar Udara CGK

Kondisi infrastruktur *runway* pada Bandar Udara CGK yang dimodelkan pada model dasar terdiri dari dua *runway* paralel dengan operasi campuran, di mana jarak separasi antar-*runway* adalah 7687 ft / 2343 m, dan tiap *runway* memiliki dimensi sebesar 3660×60 m dan 3600×60 m.

Penambahan *runway* baru (*runway* 3) direncanakan akan berposisi paralel di atas *runway* 2 yang berada di sisi utara bandar udara, di mana *runway* 3 nantinya juga akan digunakan untuk operasi campuran, dan jarak antara *runway* 2 dan *runway* 3 adalah sekitar 700 – 2499 ft / 213 – 762 m, dengan dimensi sebesar 3660×60 m. Diasumsikan kondisi *flight rules*, jarak *threshold–exit taxiway*, dan jumlah *exit taxiway* pada *runway* baru memiliki pola nilai yang mirip dengan *runway existing*. Nilai persentase kedatangan (%A) dan *mix index* (MI) pada operasi pergerakan juga diasumsikan mengikuti pola pergerakan yang ada secara historis.

Hal ini akan berdampak pada berubahnya nilai data pada variabel *parameter* (input) yang ada pada model matematis, kapasitas *runway* / C_{RWY} (dari 92 pesawat/jam menjadi 107 pesawat/jam), *arrival delay indeks* / $ADI_{<=1}$ (dari 0.86 menjadi 1.00), maupun *departure delay index* / $DDI_{<=0,5}$ (dari 0.67 menjadi 0.66), $DDI_{<=0,6}$ (dari 0.72 menjadi 0.68), $DDI_{<=0,7}$ (dari 0.78 menjadi 0.70), $DDI_{<=0,8}$ (dari 0.85 menjadi 0.72), $DDI_{<=0,9}$ (dari 0.91 menjadi 0.74), dan $DDI_{>0,9}$ (dari 1.00 menjadi 0.76). Meningkatnya nilai kapasitas *runway* dan menurunnya nilai *delay index* ini akan memengaruhi nilai variabel *auxiliary* (output) yang merepresentasikan kinerja sistem sisi udara, yaitu utilisasi *runway* ($Util_{RWY}$) dan biaya tundaan ($DelayCost$).

2.2.7.3 Skenario 3: skenario 1 dan skenario 2 yang diimplementasikan secara bersamaan

Skenario optimasi 1 akan dioperasikan mulai awal tahun 2020, sementara skenario optimasi 2 akan diimplementasikan mulai awal tahun 2018. Namun, skenario ini baru mulai dapat dioperasikan sepenuhnya pada awal tahun 2020, dengan asumsi waktu desain dan konstruksi memakan waktu selama kurang lebih 2 tahun. Model dasar proyeksi akan disimulasikan ulang mulai tahun 2020 (sesuai dengan waktu dioperasikannya kedua skenario optimasi tersebut), dengan menggunakan nilai data yang berbeda pada variabel *parameter* sesuai skenario optimasinya. Hasil simulasi implementasi skenario optimasi pada model dasar proyeksi akan dijelaskan pada bab Hasil dan Pembahasan.

2.2.8. Evaluasi Implementasi Skenario Optimasi

Kinerja sistem sisi udara yang direpresentasikan oleh nilai variabel utilisasi *runway* ($Util_{RWY}$) dan biaya tundaan ($DelayCost$) antara sebelum dan setelah diimplementasikannya skenario optimasi perlu dievaluasi, yang dilakukan dengan membandingkan nilai variabel pada kedua kondisi tersebut. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh implementasi skenario optimasi tersebut terhadap kinerja sistem sisi udara yang ada. Hasil evaluasi implementasi skenario optimasi pada model dasar proyeksi akan dijelaskan pada bab Hasil dan Pembahasan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Simulasi-Validasi Model Dasar

Hasil simulasi dan validasi pada beberapa variabel yang ada pada model dasar, antara lain variabel jumlah pergerakan penumpang (D_P), jumlah pergerakan pesawat (D_{AC}), jumlah PDB (GDP), dan jumlah populasi (POP), dapat dilihat pada Tabel 8. Berdasarkan tabel tersebut, dapat dipahami bahwa nilai D_P dan D_{AC} dari hasil simulasi mengalami peningkatan pada tiap tahunnya selama tahun 2008-2014, sementara nilai D_P dan D_{AC} dari data aktual mengalami peningkatan pada tahun 2008-2013 dan mengalami sedikit penurunan pada tahun 2014. Namun demikian, nilai margin *error* pada kedua variabel tersebut secara rerata masih memenuhi syarat validasi, yaitu kurang dari 5% atau 0,05. Sementara nilai GDP dan POP antara hasil simulasi dan data aktual menunjukkan perilaku yang mirip, di mana nilai keduanya mengalami peningkatan tiap tahunnya selama tahun 2008-2014. Nilai margin *error* untuk kedua variabel tersebut secara rerata juga sudah memenuhi syarat validasi, yaitu kurang dari 5% atau 0,05.

Tabel 8. Jenis dan nilai data antarvariabel

Variabel	Data	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Rerata
D_P ($\times 1.000$)	Hasil Simulasi	32.241	39.343	43.805	49.564	54.718	57.225	58.529	47.918
	Data Aktual	32.241	37.144	44.356	51.178	57.773	60.137	57.221	48.579
	Margin <i>Error</i>	0,0000	0,0592	0,0124	0,0315	0,0529	0,0484	0,0229	0,0136
D_{AC}	Hasil Simulasi	224.558	274.021	305.101	345.211	381.108	398.572	407.656	333.747
	Data Aktual	250.173	272.877	305.541	345.508	381.120	399.430	390.984	335.090
	Margin <i>Error</i>	0,1024	0,0042	0,0014	0,0009	0,0000	0,0021	0,0426	0,0040
GDP ($\times 1.000.000.000$)	Hasil Simulasi	2.082.460	2.178.880	2.279.760	2.421.560	2.578.720	2.740.150	2.897.160	2.454.099
	Data Aktual	2.082.456	2.178.850	2.314.459	2.464.566	2.618.932	2.769.053	2.909.182	2.476.785
	Margin <i>Error</i>	0,0000	0,0000	0,0150	0,0174	0,0154	0,0104	0,0041	0,0092
POP ($\times 1.000$)	Hasil Simulasi	230.715	234.107	237.548	241.040	244.222	247.445	250.712	240.827
	Data Aktual	230.715	234.152	237.641	240.873	244.149	247.470	250.835	240.834
	Margin <i>Error</i>	0,0000	0,0002	0,0004	0,0007	0,0003	0,0001	0,0005	0,0000

Keterangan: D_P (jumlah pergerakan penumpang), D_{AC} (jumlah pergerakan pesawat), GDP (jumlah PDB), dan POP (jumlah populasi)

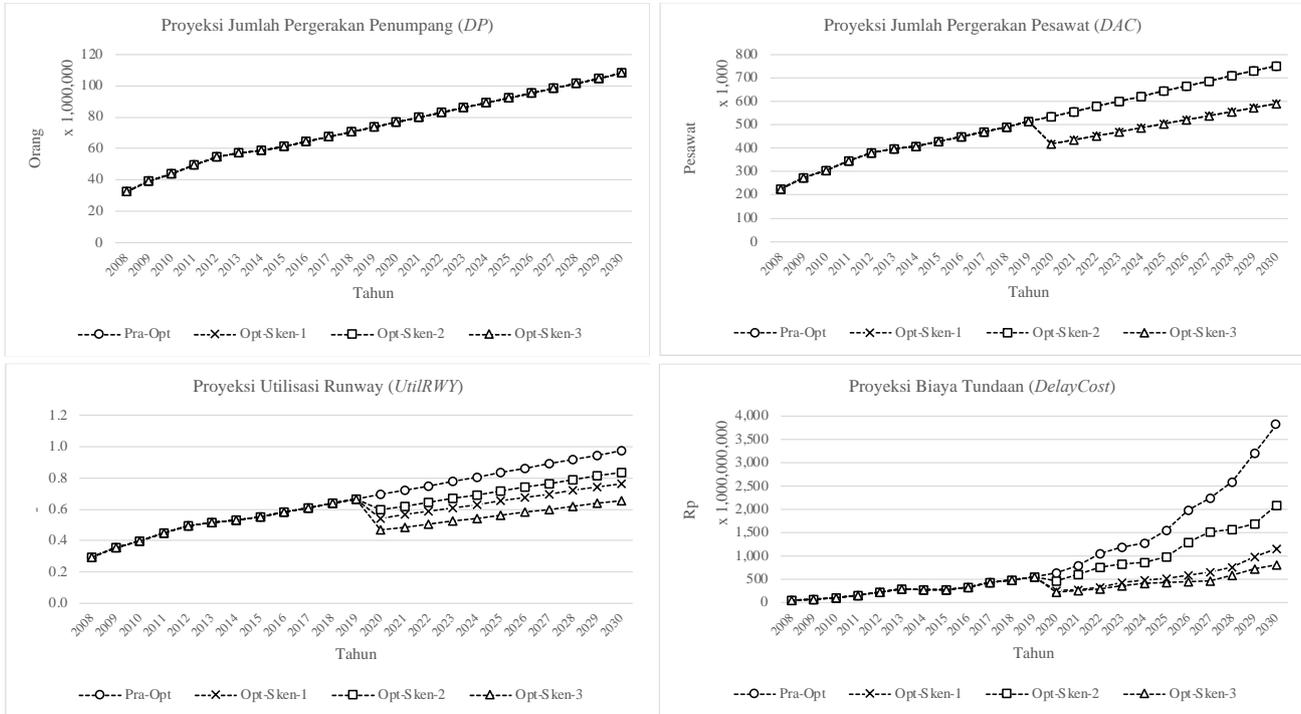
Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa model dasar yang telah dikembangkan sebelumnya sudah cukup merepresentasikan sistem nyatanya, atau bisa dikategorikan sebagai model yang valid. Perilaku variabel-variabel lain yang ada pada model dasar, khususnya variabel yang merepresentasikan kinerja sistem sisi udara, seperti utilisasi *runway* ($Util_{RWY}$) dan biaya tundaan ($DelayCost$) secara historis (2008-2014), juga dapat ditelaah dengan menggunakan nilai dari hasil simulasi yang telah dilakukan. Namun untuk mendapatkan gambaran lebih luas tentang bagaimana perilaku kedua variabel tersebut dari waktu ke waktu, dapat dilakukan dengan menelaah hasil simulasi proyeksi pada bagian berikutnya.

3.2. Hasil Simulasi Model Dasar Proyeksi-Implementasi Skenario Optimasi

Hasil simulasi pada beberapa variabel yang ada pada model, antara lain variabel jumlah pergerakan penumpang (D_P), jumlah pergerakan pesawat (D_{AC}), utilisasi *runway* ($Util_{RWY}$), dan biaya tundaan ($DelayCost$) pada kondisi proyeksi (2015-2030), baik sebelum diimplementasikannya skenario optimasi (praoptimasi) dan setelah diimplementasikannya skenario optimasi (pascaoptimasi), dapat dilihat pada Gambar 3. Keempat variabel tersebut merupakan variabel utama pada model matematis yang merepresentasikan sistem sisi udara secara keseluruhan sehingga dapat digunakan untuk memahami bagaimana pengaruh skenario optimasi yang diimplementasikan pada kondisi proyeksi.

Berdasarkan Gambar 3 tersebut, dapat dipahami bahwa nilai jumlah pergerakan penumpang (D_P) pada kondisi proyeksi mengalami peningkatan dari tahun ke tahun secara linear, mulai dari ± 76 juta penumpang per tahun di tahun 2020 hingga ± 107 juta penumpang per tahun di tahun 2030. Berdasarkan hasil simulasi, terdapat perbedaan yang sangat kecil antara nilai D_P pada kondisi praoptimasi dan pascaoptimasi. Berdasarkan Tabel 6 sebelumnya, nilai D_P dari waktu ke waktu dipengaruhi oleh variabel faktor koreksi (F_C) yang terdiri atas variabel faktor perubahan tarif tiket (F_{AFC}), faktor perubahan tingkat

pelayanan (F_{LOSC}), faktor pertumbuhan PDB (F_{GDP}), dan faktor pertumbuhan populasi (F_{POP}). Variabel F_{GDP} dan F_{POP} memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap perubahan nilai F_C dibandingkan variabel F_{AFC} dan F_{LOSC} , sehingga perubahan variabel F_{GDP} dan F_{POP} akan berpengaruh lebih signifikan terhadap perubahan nilai jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang ($DP-G$). Ketiga skenario optimasi yang akan diimplementasikan pada kondisi proyeksi hanya akan mengubah nilai F_{AFC} dan F_{LOSC} sebagai fungsi turunannya, namun tidak akan mengubah nilai F_{GDP} dan F_{POP} . Hal tersebut yang pada akhirnya menyebabkan nilai DP pada kondisi pascaoptimasi tidak memiliki perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan nilai DP pada kondisi praoptimasi.



Gambar 3. Hasil simulasi proyeksi praoptimasi dan pascaoptimasi

Sementara itu, nilai jumlah pergerakan pesawat (DAC) pada kondisi proyeksi juga mengalami peningkatan dari tahun ke tahun secara linear mengikuti pola pergerakan penumpang yang ada. Namun, terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara nilai DAC pada kondisi praoptimasi dan juga pascaoptimasi. Nilai DAC pada kondisi praoptimasi mengalami peningkatan dari tahun ke tahun secara linear, mulai dari ± 534 ribu pesawat per tahun di tahun 2020 hingga ± 751 ribu pesawat per tahun di tahun 2030. Implementasi skenario optimasi 1 dan 3 menyebabkan nilai DAC menjadi lebih kecil, di mana nilainya menjadi ± 418 ribu pesawat per tahun di tahun 2020 hingga ± 588 ribu pesawat per tahun di tahun 2030. Sementara itu, implementasi optimasi skenario 2 sama sekali tidak memengaruhi nilai DAC . Berdasarkan Tabel 6 dan 7 sebelumnya, dapat dipahami bahwa nilai DAC dari waktu ke waktu hanya dipengaruhi oleh variabel jumlah pergerakan penumpang (DP), faktor okupansi penumpang (PLF), dan kapasitas kursi penumpang (PSC). Implementasi skenario optimasi 1 dan 3 yang akan mengubah nilai PSC , sementara optimasi skenario 2 yang hanya akan mengubah nilai kapasitas runway (C_{RWY}), menjadi penyebab perubahan nilai DAC pada kondisi pascaoptimasi hanya akan dipengaruhi oleh implementasi optimasi skenario 1 dan 3 saja.

Nilai utilisasi runway ($Util_{RWY}$) pada kondisi proyeksi juga cenderung mengalami peningkatan dari tahun ke tahun secara linear mengikuti pola pergerakan pesawat yang ada. Namun juga terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara nilai $Util_{RWY}$ pada kondisi praoptimasi dan pascaoptimasi. Sebagai catatan, nilai $Util_{RWY}$ yang ditampilkan pada bagian ini adalah nilai $Util_{RWY}$ per jam pada bulan Desember berdasarkan nilai rerata pergerakan pesawat per jam ($DAC-Hour$) pada bulan Desember dan kapasitas runway (C_{RWY}) yang ada. Perilaku variabel $Util_{RWY}$ per jam pada bulan lain memiliki pola perilaku yang sama seperti pada bulan Desember, hanya saja memiliki nilai yang lebih kecil. Hal ini dikarenakan rerata jumlah pergerakan pesawat per jam pada bulan lain memiliki nilai yang lebih kecil sebagai fungsi dari nilai rasio pergerakan pesawat per jam yang juga lebih kecil dibandingkan bulan Desember. Nilai $Util_{RWY}$

per jam pada bulan Desember yang memiliki nilai paling maksimum di antara bulan yang lain tersebut, dapat digunakan sebagai representasi perilaku kinerja sistem sisi udara yang terjadi dari waktu ke waktu. Nilai $Util_{RWY}$ pada kondisi praoptimasi mengalami peningkatan dari tahun ke tahun secara linear, mulai dari 0,694 di tahun 2020 hingga 0,975 di tahun 2030. Implementasi skenario optimasi 1, 2, dan 3 menyebabkan nilai $Util_{RWY}$ menjadi lebih kecil, di mana secara berturut-turut nilainya menjadi 0,544 di tahun 2020 hingga 0,764 di tahun 2030 (skenario 1), 0,597 di tahun 2020 hingga 0,838 di tahun 2030 (skenario 2), dan 0,467 di tahun 2020 hingga 0,657 di tahun 2030 (skenario 3).

Sementara itu, nilai biaya tundaan ($DelayCost$) pada kondisi proyeksi cenderung mengalami peningkatan dari tahun ke tahun secara eksponensial mengikuti perilaku nilai $Util_{RWY}$ yang ada. Berdasarkan hasil simulasi, juga terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara nilai $DelayCost$ pada kondisi praoptimasi dan pascaoptimasi. Sebagai catatan, nilai waktu tundaan ($Delay_{RWY}$) tidak dijelaskan lebih detail karena memiliki pola perilaku yang sangat mirip dengan nilai $DelayCost$ yang ada karena secara teoritis, $DelayCost$ merupakan besaran $Delay_{RWY}$ yang diukur dalam satuan ekonomis. Oleh karena itu, perilaku $DelayCost$ juga dapat digunakan secara tidak langsung untuk memahami perilaku $Delay_{RWY}$ yang terjadi dari waktu ke waktu. Nilai $DelayCost$ pada kondisi praoptimasi mengalami peningkatan dari tahun ke tahun secara eksponensial, mulai dari ±Rp 642 miliar per tahun di tahun 2020 hingga ±Rp 3,81 triliun per tahun di tahun 2030. Implementasi skenario 1, 2, dan 3 menyebabkan nilai $DelayCost$ menjadi lebih kecil, di mana secara berturut-turut nilainya menjadi ±Rp 266 miliar per tahun di tahun 2020 hingga ±Rp 1,16 triliun per tahun di tahun 2030 (skenario 1), ±Rp 466 miliar per tahun di tahun 2020 hingga ±Rp 2,09 triliun per tahun di tahun 2030 (skenario 2), dan ±Rp 232 miliar per tahun di tahun 2020 hingga ±Rp 816 miliar per tahun di tahun 2030 (skenario 3).

Berdasarkan grafik $Util_{RWY}$ dan $DelayCost$, dapat dipahami bahwa nilai $DelayCost$ akan meningkat secara eksponensial sesuai dengan peningkatan yang terjadi pada nilai $Util_{RWY}$, di mana nilai $DelayCost$ akan meningkat secara signifikan ketika nilai $Util_{RWY}$ semakin mendekati 1. Grafik $DelayCost$ pada kondisi praoptimasi menunjukkan bentuk garis yang cukup landai antara tahun 2008 – 2019, yaitu ketika $Util_{RWY}$ memiliki nilai antara 0,291 (tahun 2008) hingga 0,666 (tahun 2019). Namun bentuk garisnya berubah menjadi lebih curam antara tahun 2020 – 2030, yaitu ketika nilai $Util_{RWY}$ memiliki nilai antara 0,694 (tahun 2020) hingga 0,975 (tahun 2030). Implementasi skenario optimasi 2 yang menurunkan nilai $Util_{RWY}$ menjadi 0,597 di tahun 2020 hingga 0,838 di tahun 2030 menyebabkan nilai $DelayCost$ menjadi lebih kecil dan mengubah bentuk garis pada grafik $DelayCost$ menjadi lebih landai jika dibandingkan dengan kondisi praoptimasi sebelumnya, meskipun secara umum masih menunjukkan pola yang cukup curam. Sementara itu, implementasi skenario optimasi 1 dan 3 yang juga menurunkan nilai $Util_{RWY}$, di mana secara berturut-turut nilainya menjadi 0,544 di tahun 2020 hingga 0,764 di tahun 2030 (skenario 1), serta 0,467 di tahun 2020 hingga 0,657 di tahun 2030 (skenario 3), juga menyebabkan nilai $DelayCost$ menjadi lebih kecil dan mengubah pola garis pada grafik $DelayCost$ menjadi landai, mirip seperti pola garis $DelayCost$ yang terjadi pada kondisi praoptimasi antara tahun 2008-2019. Kondisi ini akan menyebabkan selisih $DelayCost$ yang terjadi antara kondisi praoptimasi dan pascaoptimasi selama tahun 2020-2030 akan semakin besar pada tiap tahunnya.

3.3. Hasil Evaluasi Implementasi Skenario Optimasi

Evaluasi terkait seberapa besar pengaruh implementasi beberapa skenario optimasi terhadap kinerja sistem sisi udara, yang direpresentasikan oleh nilai utilisasi *runway* ($Util_{RWY}$) dan biaya tundaan ($DelayCost$), dapat dilihat pada Tabel 9. Berdasarkan tabel tersebut, dapat dipahami bahwa implementasi skenario optimasi 1, 2, dan 3 akan berpengaruh terhadap pengurangan nilai $Util_{RWY}$ per jam secara rerata (2020 – 2030), masing-masing sebesar 21,7%, 14,0%, dan 32,6% apabila dibandingkan dengan kondisi praoptimasi. Sementara itu, implementasi skenario optimasi 1, 2, dan 3 juga akan berpengaruh terhadap pengurangan nilai $DelayCost$ per tahun secara rerata (2020 – 2030), masing-masing sebesar 66,8%, 34,1%, dan 72,8% apabila dibandingkan dengan kondisi praoptimasi.

Nilai persentase pengurangan rerata pada variabel $DelayCost$ lebih besar dibandingkan variabel $Util_{RWY}$, baik itu pada skenario optimasi 1, 2, ataupun 3. Apabila merujuk pada grafik $Util_{RWY}$, dapat dipahami bahwa selisih nilai $Util_{RWY}$ antara kondisi praoptimasi dan pascaoptimasi selama tahun 2020 – 2030 cenderung sama dari tahun ke tahun. Sementara pada grafik $DelayCost$, selisih nilai $DelayCost$

antara kondisi praoptimasi dan pascaoptimasi selama tahun 2020-2030 cenderung semakin besar dari ke tahun ke tahun. Hal ini yang menyebabkan selisih nilai $DelayCost$ secara rerata antara kondisi praoptimasi dan pascaoptimasi lebih besar dibandingkan selisih nilai $Util_{RWY}$ secara rerata, yang pada akhirnya juga akan menyebabkan nilai persentase pengurangan rerata pada variabel $DelayCost$ menjadi lebih besar dibandingkan variabel $Util_{RWY}$.

Tabel 9. Hasil evaluasi implementasi skenario optimasi

	$Util_{RWY}$	$DelayCost$
Rerata (2020-2030)		
Praoptimasi	0,834	Rp 1.845.309.909.091
Optimasi - Skenario 1	0,654	Rp 584.81.363.636
Optimasi - Skenario 2	0,717	Rp 1.152.835.181.818
Optimasi - Skenario 3	0,562	Rp 458.288.000.000
% Perubahan Rerata		
Optimasi - Skenario 1	21,7%	66,8%
Optimasi - Skenario 2	14,0%	34,1%
Optimasi - Skenario 3	32,6%	72,8%

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dipahami bahwa implementasi skenario optimasi 1 berpengaruh lebih besar terhadap penurunan nilai $Util_{RWY}$ dan $DelayCost$ dibandingkan skenario optimasi 2. Pengaturan penggunaan pesawat berkapasitas penumpang lebih besar pada beberapa rute domestik yang akan mengubah rerata nilai kapasitas kursi penumpang domestik (PSC_{Dom}) dari 155 orang/pesawat menjadi 211 orang/pesawat ternyata dapat memberikan hasil yang lebih signifikan terhadap penurunan nilai $Util_{RWY}$ dan juga $DelayCost$ dibandingkan dengan penambahan infrastruktur *runway* baru yang akan mengubah nilai kapasitas *runway* (C_{RWY}) dari 92 pesawat / jam menjadi 107 pesawat / jam. Perubahan nilai PSC_{Dom} yang lebih signifikan dibandingkan dengan perubahan nilai C_{RWY} pada saat pascaoptimasi, menjadi penyebab implementasi skenario optimasi 1 akan lebih signifikan memengaruhi nilai $Util_{RWY}$ dan $DelayCost$ dibandingkan skenario optimasi 2. Namun demikian, gabungan implementasi kedua skenario tersebut secara bersamaan, secara otomatis akan berpengaruh lebih besar terhadap penurunan nilai $Util_{RWY}$ dan $DelayCost$ yang terjadi pada sistem.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan validasi pada beberapa variabel yang ada pada model dasar, antara lain variabel jumlah pergerakan penumpang (D_P), jumlah pergerakan pesawat (D_{AC}), jumlah PDB (GDP), dan jumlah populasi (POP), dapat disimpulkan bahwa model dasar yang telah dikembangkan dapat dikategorikan sebagai model yang valid karena nilai margin *error* untuk keempat variabel tersebut secara rerata sudah memenuhi syarat validasi, yaitu kurang dari 5% atau 0,05. Perilaku semua variabel yang ada pada model, baik itu pada kondisi historis, proyeksi, ataupun setelah diimplementasikannya skenario optimasi, dapat ditelaah menggunakan nilai hasil simulasi berdasarkan model dasar yang telah valid tersebut.

Berdasarkan hasil implementasi skenario optimasi pada kondisi proyeksi, dapat dipahami bahwa implementasi skenario optimasi 1, 2 dan 3 tidak akan terlalu memengaruhi nilai jumlah pergerakan penumpang (D_P) apabila dibandingkan dengan kondisi praoptimasi. Hal ini disebabkan karena nilai jumlah pertumbuhan pergerakan penumpang (D_{P-G}) jauh lebih signifikan dipengaruhi oleh perubahan pada variabel faktor pertumbuhan PDB (F_{GDP}) dan faktor pertumbuhan populasi (F_{POP}), dibandingkan faktor perubahan tarif tiket (F_{AFC}) dan faktor perubahan tingkat pelayanan (F_{LOSC}), sementara ketiga skenario yang akan diimplementasikan hanya akan mengubah nilai F_{AFC} dan F_{LOSC} saja sebagai fungsi turunannya, namun tidak akan mengubah nilai F_{GDP} dan F_{POP} . Implementasi skenario optimasi 1 dan 3 akan menurunkan nilai jumlah pergerakan pesawat (D_{AC}), namun implementasi skenario optimasi 2 tidak memengaruhi nilai D_{AC} . Hal ini disebabkan karena nilai D_{AC} hanya dipengaruhi oleh perubahan pada variabel jumlah pergerakan penumpang (D_P), faktor okupansi penumpang (PLF), dan kapasitas kursi

penumpang (PSC), sementara skenario 2 hanya akan mengubah nilai kapasitas runway (C_{RWY}) saja tanpa mengubah ketiga variabel yang akan memengaruhi nilai D_{AC} tersebut, beda halnya dengan skenario 1 dan 3 yang akan mengubah nilai PSC .

Sementara itu, implementasi skenario optimasi 1, 2, dan 3 akan berpengaruh terhadap pengurangan nilai utilisasi runway ($Util_{RWY}$) per jam secara rerata (2020 – 2030), masing-masing sebesar 21,7%, 14,0%, dan 32,6% apabila dibandingkan dengan kondisi praoptimasi. Selain itu, implementasi skenario optimasi 1, 2, dan 3 juga akan berpengaruh terhadap pengurangan nilai biaya tundaan ($DelayCost$) per tahun secara rerata (2020 – 2030), masing-masing sebesar 66,8%, 34,1%, dan 72,8% apabila dibandingkan dengan kondisi praoptimasi.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dipahami bahwa meskipun pengurangan nilai $Util_{RWY}$ dan $DelayCost$ pada implementasi skenario 3 lebih besar, namun apabila diperhatikan lebih detail, selisih nilai antara skenario 1 dan 3 tidak terlalu jauh. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa skenario 1 merupakan skenario yang perlu menjadi prioritas untuk diimplementasikan pada sistem karena berpengaruh sangat signifikan terhadap pengurangan nilai $Util_{RWY}$ dan $DelayCost$ apabila dibandingkan dengan implementasi kedua skenario lainnya.

Daftar Pustaka

- [1] Y. Bai, "Analysis of Aircraft Arrival Delay and Airport On-Time Performance," Thesis Report, Department of Civil and Environmental Engineering University of Central Florida, USA, 2006.
- [2] R. Horonjeff, F. X. McKelvey, W. J. Sproule, and S. B. Young, "Planning and Design of Airports 5th Edition," McGraw Hill, USA, 2010.
- [3] J. Qin, "System Dynamics Based Simulation Modelling for Airport Revenue Analysis," Doctor of Philosophy Thesis, UWA Business School, Australia, 2016.
- [4] S. G. Hamzawi, "Lack of Airport Capacity: Exploration of Alternatives Solutions," *Transport Research -A*, vol. 26A, no. 1, pp. 47-58, 1992.
- [5] Federal Aviation Administration (FAA), "AC 150/5060-5 Airport Capacity and Delay," FAA Publication, USA, 1983.
- [6] H. B. Thiagaraj and C. V. Seshiaiah, "A Queueing Model for Airport Capacity and Delay Analysis," *Applied Mathematical Sciences*, vol. 8, no. 72, pp. 3561-3575, 2014.
- [7] S. P. Shepherd, "A Review of System Dynamics Models Applied in Transportation," *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, vol. 1, no. 2, pp. 83-105, 2014.
- [8] B. Jovanovski, R. Minovski, S. Voessner, and G. Lichtenegger, "Combining System Dynamics and Discrete Event Simulations – Overview of Hybrid Simulation Models," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 10, pp. 135-142, 2014.
- [9] Federal Aviation Administration (FAA), "AC 150/5300-13A Airport Design," FAA Publication, USA, 1983.
- [10] U.S. Department of Transportation (US-DOT), "2013 DOT Form 41 - Aircraft Operating Cost," US-DOT Publication, USA, 2013.
- [11] Dirjen Perhubungan Udara Kementerian Perhubungan RI, "Aeronautical Information Publication Indonesia Vol. II," AIP Indonesia, 2016.
- [12] E. Suryani, S. Y. Chou, and C. H. Chen, "Air Passenger Demand Forecasting and Passenger Terminal Capacity Expansion: A System Dynamics Framework," *Expert Systems with Applications*, no. 37, pp. 2324-2339, 2010.
- [13] Angkasa Pura II (AP II), "Data Statistik Angkutan Udara," PT. Angkasa Pura II, 2015.
- [14] K. Kolker, P. Bieblich, and K. Lutjens, "From Passenger Growth to Aircraft Movements," *Science Direct Journal of Air Transport Management*, pp. 1-8, 2016.
- [15] S. Landau, G. Weisbrod, and B. Alstadt, "Applying Benefit-cost Analysis for Airport Improvements: Challenges in a Multimodal World," *Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board*, no. 2177, pp. 1-7, 2010.
- [16] B. Miller and J. P. Clarke, "The Hidden Value of Air Transportation Infrastructure," *Technological Forecasting and Social Change*, no. 74, pp. 18-35, 2007.
- [17] S. P. Shepherd, "A Review of System Dynamics Models Applied in Transportation," *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, vol. 1, no. 2, pp. 83-105, 2014.
- [18] E. Yuliatwati, S. P. Hadiwardoyo, B. Susantono, and T. Tjahjono, "System Dynamics Model for Airport Characterization in Hub-and-Spoke Networks," *International Journal of Technology (IJTech)*, no. 5, pp. 733-742, 2015.
- [19] A. Maryani, S. Wignojoebroto, and S. G. Pratiwi, "A System Dynamics Approach for Modelling Construction Accidents," *Procedia Manufacturing*, vol. 4, pp. 392-401, 2015.