

SIMULASI PROSEDUR KEDATANGAN PADA *TERMINAL AIRSPACE***Rully Medianto¹, Mahardi Sadono², Hisar M. Pasaribu²**¹Jurusan Teknik Penerbangan, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto, Yogyakarta²Program Studi Aeronotika & Astronotika, FTMD, Institut Teknologi BandungEmail: rullymedianto@gmail.com**Abstract**

Terminal Airspace's performance will directly affect the performance of the airport. The main aspect that should be considered in the analysis of the performance of Terminal Airspace is safety and service. Flight safety shown by arrangement for separation between aircraft in the coming crossing. While aspects of the service are represented by as many aircraft that can be served (capacity) and as long as the delay (delay) that may occur. This paper presents the development of a simulation model that can be used to analyse the capacity and the delay of air traffic of Terminal Airspace. The model is built using the concept of discrete event-based simulation model, and it is used to analyse the arrival procedures for instrument flight called Standard Terminal Arrival Routes (STAR) . The simulation model is built using ARENA®. Analysis was performed on several simulation scenarios such as the use of a different radar separation, runway configurations and inter-arrival time. The results of this analysis can be used as consideration in airport management planning to improve airport capacity and aviation safety.

Keywords: arrival procedures, Terminal Airspace, simulation model, capacity, delay.

Abstrak

Kinerja Terminal Airspace langsung akan mempengaruhi kinerja bandara. Aspek utama yang harus dipertimbangkan dalam analisis kinerja Terminal Airspace adalah keselamatan dan pelayanan. Keselamatan penerbangan yang ditunjukkan oleh pengaturan untuk pemisahan antara pesawat di persimpangan mendatang. Sementara aspek layanan yang diwakili oleh banyak pesawat yang dapat dilayani (kapasitas) dan selama penundaan (delay) yang mungkin terjadi. Makalah ini menyajikan pengembangan model simulasi yang dapat digunakan untuk menganalisis kapasitas dan penundaan lalu lintas udara Terminal Airspace. Model ini dibangun menggunakan konsep diskrit model simulasi berdasarkan aktivitas, dan digunakan untuk menganalisis prosedur kedatangan untuk penerbangan instrumen yang disebut Standard Terminal Arrival Routes (STAR). Model simulasi dibangun menggunakan ARENA ®. Analisis dilakukan pada beberapa skenario simulasi seperti penggunaan pemisahan radar yang berbeda, konfigurasi runway dan waktu antar-kedatangan. Hasil analisis ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan pengelolaan bandara untuk meningkatkan kapasitas bandara dan keselamatan penerbangan.

Kata kunci: prosedur kedatangan, Terminal Udara, model simulasi, kapasitas, keterlambatan

1. Pendahuluan

Pertumbuhan yang tinggi pada transportasi udara harus diimbangi dengan peningkatan pelayanan sistem transportasi udara secara memadai. Peningkatan layanan transportasi udara diantaranya dengan cara meningkatkan kapasitas bandara melalui pengembangan infrastruktur, teknologi dan prosedur penerbangan. Upaya pengembangan prosedur penerbangan diantaranya dilakukan dengan cara pembaharuan prosedur kedatangan (*arrival*) untuk terbang instrumen atau yang lebih dikenal dengan *Standard Terminal Arrival Route* (STAR). Salah satu contoh pembaharuan STAR adalah seperti yang dilakukan oleh Bandara Internasional Soekarno Hatta dimana STAR konvensional ditingkatkan menjadi RNAV (*Area Navigation*) STAR. Pembaharuan tersebut dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas *Terminal Airspace* bandara.

Penelitian ini lebih berfokus pada pengembangan model simulasi *Terminal Airspace* untuk menganalisis prosedur penerbangan khususnya STAR. Model simulasi yang dibangun berupa model simulasi diskrit yang berbasiskan pada kejadian (*discrete-event simulation model*). Pemodelan dilakukan terbatas hanya pada lalu lintas kedatangan. Analisis terutama difokuskan pada kapasitas, keterlambatan dan waktu *holding* pada *Terminal Airspace*.

2. Kajian Pustaka

2.1 *Terminal Airspace*

Terminal Airspace merupakan ruang udara transisional yang berfungsi sebagai jembatan antara bandara dengan sektor en-route. Jumlah dan konfigurasi *Runway*, konfigurasi *airway* dan jumlah serta panjang dari lintasan kedatangan dan keberangkatan akan mempengaruhi ukuran dan bentuknya. beberapa lintasan kedatangan yang berkumpul menuju ke bandara dan lintasan keberangkatan yang menyebar keluar dari bandara akan membentuk ruang udaranya. Peralatan navigasi membantu dalam menentukan titik masuk/keluar ke/dari ruang udaranya. *Terminal Airspace* merupakan sistem dengan kompleksitas yang tinggi dan sangat sensitif terhadap perubahan lalu-lintas, meteorologi, teknis, prosedur, administrasi dan lainnya.

2.2 Model Simulasi Sisi Udara Bandara

Model simulasi bandara dapat dikelompokkan berdasarkan pada tingkatan detailnya menjadi model simulasi makroskopik dan mikroskopik. Pada model makroskopik, elemen sistem pada umumnya dideskripsikan menggunakan model probabilistik contohnya seperti model distribusi normal. Sebaliknya, model mikroskopik merepresentasikan pergerakan individual pesawat udara dan konflik dengan pesawat udara lainnya berdasarkan pada prestasi (performance) individual pesawat udara (Odoni dkk., 1997).

Di antara dua jenis model tersebut terdapat model pertengahan yaitu model mesoskopik (Pujet, Delcaire, & Feron, 1999) dan *ceno-model* yang diperkenalkan oleh Carr (2004). Sebagian besar model simulasi bandara dibangun berdasarkan pada paradigma simulasi kejadian diskrit (*discrete-event*).

2.3 Kapasitas dan Keterlambatan *Terminal Airspace*

Secara umum kapasitas didefinisikan sebagai jumlah maksimal operasi yang mampu diakomodasi oleh sebuah fasilitas pelayanan dalam suatu periode waktu yang telah ditentukan (Horonjeff et al., 2010). Kapasitas merupakan salah satu indikator penting dalam menentukan kinerja suatu sistem.

Model yang dipergunakan untuk menentukan kapasitas *Terminal Airspace* dapat berupa model yang berdasarkan pada beban kerja (*workload*) petugas pengatur lalu lintas penerbangan, model yang memperhitungkan kapasitas komunikasi udara-darat (*air-ground*)

serta model yang tidak mempertimbangkan pengaruh dari faktor manusia (*human factor*) (Milan Janic, 2000).

Model yang dikembangkan dengan asumsi tanpa adanya campur tangan manusia didalamnya berbasiskan pada konsep model kapasitas ultimate/saturasi *Runway* yang dikembangkan oleh Blumstain (1960). Asumsi yang dipakai adalah adanya permintaan yang kontinyu untuk mendapatkan pelayanan di *Terminal Airspace* pada satuan waktu tertentu (Milan Janic, 2000). Pada awalnya model kapasitas ini dikembangkan secara analitik dengan dasar perhitungan geometris seperti yang dilakukan oleh Milan Janic (2000), namun dengan semakin berkembangnya teknologi komputasi, model simulasi juga mulai digunakan, misalnya oleh Monish dkk. (2011).

Keterlambatan akan muncul apabila permintaan pelayanan (*demand*) mendekati atau bahkan melampaui dari kapasitas yang tersedia. Menurut Federal Aviation Agency (FAA), keterlambatan disebut sebagai perbedaan antara waktu yang dibutuhkan untuk pelayanan terhadap sebuah pesawat udara tanpa adanya gangguan (*interference*) dari pesawat udara lainnya dengan waktu aktual yang dibutuhkan untuk melayani pesawat udara tersebut (Poldy, 1982).

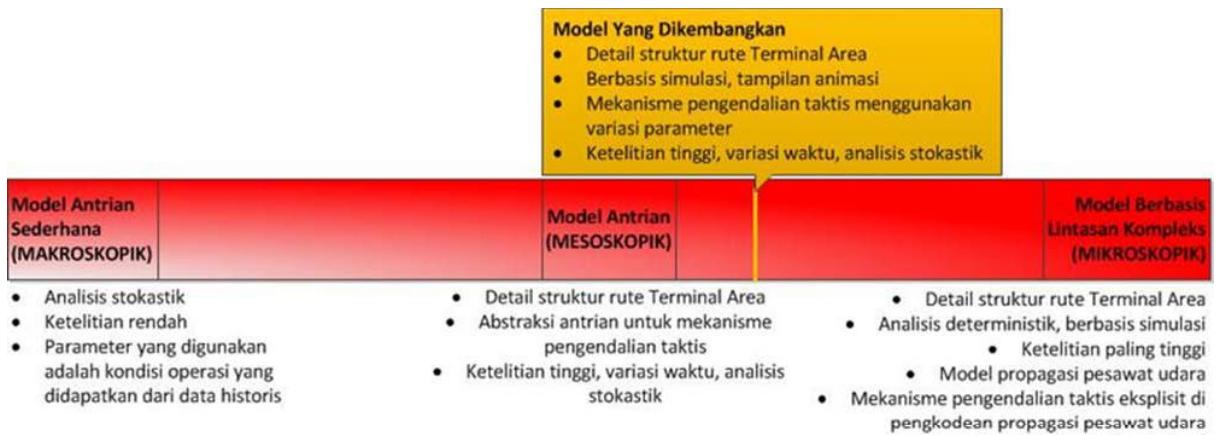
3. Metodologi Pemodelan

3.1 Konsep Pemodelan

Penentuan tingkat kedetailan abstraksi sistem tanpa membuat model terlalu kompleks merupakan tahapan yang penting dan menantang di dalam pemodelan (Kelton dkk., 2007). Penelitian ini menggunakan konsep pemodelan pada tingkatan *ceno-model*. *Ceno-model* memiliki tingkat pemodelan yang lebih detail dibandingkan dengan model makroskopik dan mesoskopik namun masih di bawah kedetailan mikroskopik.

Model makroskopik *Terminal Airspace* pada umumnya dibangun dengan persamaan antrian sederhana yang hanya memodelkan sebuah rute kedatangan dari titik awal kedatangan (*arrival fix*) sampai ke sistem *Runway* tanpa memodelkan geometri rute kedatangan dengan akurat. Karakteristik kedatangan penerbangan didekati dengan distribusi waktu antar-kedatangan (*inter-arrival time*) dan waktu layanan (*service-time*) menggunakan data historis. Model mikroskopik dibangun berbasiskan pada lintasan (*trajectory*) kompleks. Geometri rute *Terminal Airspace* dimodelkan secara akurat dengan menggunakan model propagasi pesawat udara yang memiliki ketelitian cukup tinggi untuk menghasilkan propagasi deterministik penerbangan selama di *Terminal Airspace*.

Di antara model makroskopik dan mikroskopik terdapat model mesoskopik seperti yang dikembangkan oleh Monish dkk., (2011). Abstraksi antrian digunakan untuk memodelkan mekanisme pengendalian taktis guna penjaminan separasi. Penjaminan separasi dilakukan dengan vektoring pesawat udara yang membuntuti di belakang (*trailing aircraft*) sehingga tidak melewati batasan separasi yang telah ditentukan pada kondisi aktual.

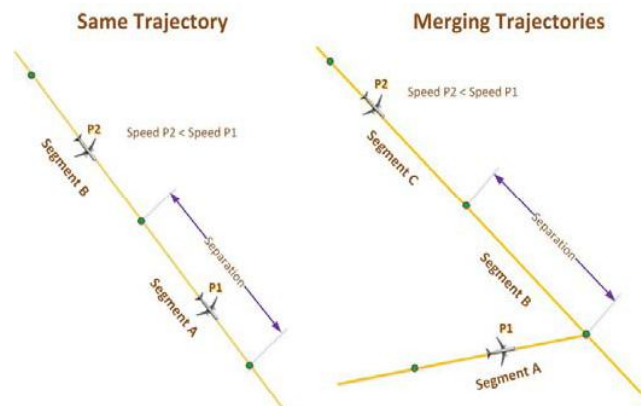


Gambar 1 Spektrum Model *Terminal Airspace* (modifikasi dari Monish dkk., 2011).

Rute kedatangan *Terminal Airspace* dibagi menjadi beberapa segmen. Segmen tersebut disebut dengan server, dengan masing-masing server ditentukan berdasarkan aturan separasi yang berlaku. Separasi dijamin dengan menerapkan aturan bahwa hanya sebuah pesawat udara berada di server tersebut pada satu waktu tertentu. Pesawat yang membuntutinya diharuskan mengantri di server belakangnya sampai dipastikan pesawat di depan telah meninggalkan server. Menunggu di antrian merupakan abstraksi dari vektoring dan waktu tunggu di antrian setara dengan keterlambatan (*delay*) yang diakibatkan oleh vektoring (Monish dkk., 2011).

Pada penelitian ini, untuk menjamin separasi antar pesawat udara agar tetap terjaga maka vektoring pesawat yang membuntuti direpresentasikan dengan pengurangan kecepatan pesawat udara yang dilakukan dengan penambahan waktu tempuh segmen di belakangnya. Hal ini dilakukan apabila pesawat udara di segmen depannya belum meninggalkan segmen tersebut. Pemodelan waktu tempuh pada masing-masing segmen didekati dengan nilai konstan.

Pada Gambar 2 sebuah pesawat udara P1 diikuti oleh pesawat terbang P2 pada sebuah rute yang sejajar. Saat P1 belum meninggalkan Segmen A maka pesawat P2 akan menjalani Segmen B dengan kecepatan yang lebih kecil dibandingkan A1. Dengan kata lain, waktu tempuh P2 di Segmen B akan lebih lama dari pada waktu tempuh P2 di Segmen A. Dengan aturan ini maka separasi antar pesawat P1 dan P2 akan dapat selalu terjaga.



Gambar 2 Pemodelan Separasi Antar Pesawat Udara

Selain separasi, juga perlu dilakukan pemodelan terhadap titik tunggu (*holdingpoint*). *Holdingpoint* ini disediakan untuk menjaga terjaminnya separasi antar pesawat udara, menunggu cuaca membaik (apabila terjadi cuaca buruk) dan menunggu giliran untuk

penggunaan *Runway*. *Holdingspoint* didekati memakai model antrian dengan prinsip First-In First-Out (FIFO). Pesawat yang *holding* harus menjalani sebuah putaran penuh sebelum keluar dari *holdingspoint* tersebut. Lamanya putaran ditentukan oleh prosedur operasi yang berlaku pada bandara. Setiap *holdingspoint* mampu menampung beberapa pesawat tergantung kepada cakupan ketinggian dan separasi ketinggian antar pesawat.

3.2 Perangkat Lunak ARENA

ARENA merupakan sebuah perangkat lunak pemodelan simulasi yang saat ini dikembangkan oleh Rockwell Automation dengan kemampuan untuk membangun model pada berbagai macam area aplikasi. Bahasa simulasi SIMAN menjadi basis dari pengembangan ARENA. ARENA dapat digunakan untuk membangun model kontinu ataupun diskrit (Kelton, Sadowski, & Sturrock, 2007). Model simulasi di ARENA dibangun secara mudah dengan bantuan modul-modul grafis. Model dari sebuah proses dideskripsikan dengan digram alur yang selanjutnya disimulasikan dengan ARENA. ARENA juga menyediakan model animasi dua dimensi. Dengan kemampuan ini maka proses debugging dan verifikasi model akan lebih mudah. Reperesentasi model secara visual akan membantu pemahaman sistem secara utuh sehingga analisis dan pengambilan keputusan akan lebih efektif.

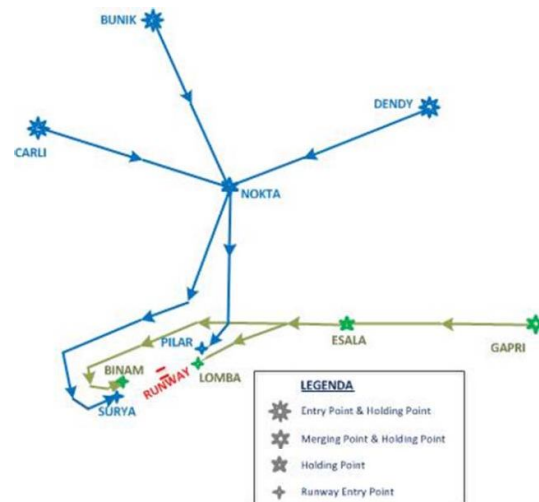
4. Proses Pemodelan

Pembangunan model *Terminal Airspace* pada penelitian ini berpatokan pada prosedur kedatangan untuk penerbangan instrumen yang disebut dengan Standard Terminal Arrival Routes (STAR). Lebih khusus lagi, STAR yang digunakan adalah STAR R-NAV 1. Pada Model Kedatangan *Terminal Airspace* Bandara Internasional Soekarno-Hatta, untuk entry *point* ada 4 (empat) buah yaitu CARLI, BUNIK, DENDY dan GAPRI.

Entitas sistem yang berupa pesawat udara akan meninggalkan sistem melalui empat buah titik yang merupakan *Runway* entry gate untuk final approach *Runway* 25R/L dan *Runway* 07R/L yaitu PILAR, LOMBA, SURYA dan BINAM. Pada sistem juga ditentukan 6 (enam) titik tunggu (*holdingspoint*) yang terdiri dari empat buah entry *point* ditambah dengan 2 (dua) *holdingspoint* lainnya yaitu ESALA dan NOKTA. NOKTA juga merupakan titik pertemuan dari beberapa penggal rute (*merging point*).

Pada model yang dibangun, entitas akan dibangkitkan pada dua sektor yaitu Sektor Utara dan Sektor Timur. Entitas dari sektor timur akan masuk ke dalam sistem melalui entry *point* CARLI, BUNIK dan DENDY. Sedangkan pada Sektor Timur akan masuk melalui entry *point* GAPRI. Pada Sektor Utara, entitas yang dibangkitkan akan memasuki entry *point* dengan presentase kesempatan yang sama.

Selain titik-titik khusus yang telah disebutkan di atas, masih ada titik-titik lainnya yang disebut dengan *fixpoint* yang menjadi patokan dalam menentukan jalur kedatangan *Terminal Airspace*. Semua titik-titik tersebut selanjutnya dihubungkan oleh garis-garis yang menjadi jalur kedatangan yang utuh. Terdapat 6 (enam) penggal yang dibentuk oleh titik-titik tersebut. Pada titik akhir penggal tersebut terdapat batasan kecepatan maksimal yang harus ditaati oleh pesawat udara yang menjalani rute tersebut. Gambar berikut menunjukkan penggal-penggal yang membentuk Model Kedatangan *Terminal Airspace* Bandara Internasional Soekarno-Hatta.

Gambar 3 Model Kedatangan *Terminal Airspace*.

Sesuai dengan konsep pemodelan yang telah disampaikan pada sub bab sebelumnya, penggal-penggal tersebut selanjutnya dibagi lagi menjadi beberapa segmen yang lebih kecil. Segmen tersebut memiliki panjang sesuai dengan aturan separasi radar yang diterapkan terhadap model *Terminal Airspace* yaitu 5 NM, 4 NM atau 3 NM. Karena tidak semua penggal habis dibagi maka diberlakukan pembulatan terhadap sisa pembagian tersebut. Apabila sisa pembagian kurang dari setengah nilai segmen maka akan digabung dengan segmen terakhir penggal tersebut, namun apabila lebih dari setengah nilai penggal maka akan menjadi penggal tersendiri.

Penjagaan separasi dilakukan saat pesawat akan meninggalkan *holdingpoint* dan saat pesawat berada di segmen jalur kedatangan. Pada *holdingpoint*, pesawat akan meninggalkan *holdingpoint* apabila tidak terdapat pesawat di dalam segmen persis di depan *holdingpoint* atau apabila segmen tertentu dari jalur berbeda namun jalur tersebut akan bertemu pada satu *merging point* yang sama dengan jalur yang akan dilalui oleh pesawat tersebut dalam kondisi kosong.

Pesawat harus melakukan putaran pada *holdingpoint* apabila kedua kondisi tersebut tidak dapat dipenuhi. Putaran pesawat pada *holdingpoint* didekati melalui distribusi normal yang memiliki nilai mean 1 menit dengan deviasi rata-rata 0,1 menit. Sesuai dengan prosedur *holding* yang diterbitkan maka setiap *holdingpoint* maksimal hanya mampu menampung *holding* maksimal untuk enam buah pesawat. Aturan antrian pada *holdingpoint* menggunakan aturan First-In First-Out (FIFO).

4.1 Validasi Model

Untuk memastikan model yang telah dibangun bekerja sesuai dengan karakteristik sistem aslinya dan hasil yang dikeluarkan dari simulasi model di dalam level akurasi yang masih dapat diterimadilakukan validasi model (Huynh & Walton, 2005). Metode validasi model yang pertama adalah dengan animasi. Metode ini digunakan untuk mengamati tingkah laku operasi model selama simulasi berjalan (Sargent, 2005). Beberapa entitas diamati pergerakannya mulai dari saat masuk sistem sampai keluar dari sistem, dengan demikian dapat diketahui apakah entitas bergerak dengan benar sesuai dengan konsep pemodelan yang telah ditentukan. Beberapa pertanyaan yang dapat dijawab melalui validasi animasi ini diantaranya adalah apakah entitas bergerak sesuai dengan rute pendaratannya, apakah model antrian di *holdingpoint* telah berjalan sesuai aturan yang diterapkan dan apakah aturan separasi telah diterapkan. Hasil dari validasi animasi ini diperkuat dengan validasi data dan grafis operasional.

Dari hasil pengamatan animasi terlihat bahwa entitas menjalani rute kedatangannya sesuai dengan rute pendaratan yang telah ditentukan. Sedangkan dari hasil pengamatan di *holdingpoint* aturan antrian juga telah berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Hasil validasi data dan grafis operasional juga terlihat bahwa aturan separasi yang diterapkan telah dijalankan secara tepat oleh model, tidak terdapat entitas yang melanggar aturan separasi yang telah ditetapkan.

Metode terakhir yang digunakan untuk memvalidasi model adalah metode pengujian kondisi ekstrem. Struktur model dan keluarannya harus masuk akal untuk setiap kombinasi ekstrim variabel-variabel sistem (Martis, 2006). Pengujian dilakukan dengan memberikan waktu antar-kedatangan yang bervariasi mulai dari 4, 3, 2 dan 1 menit serta untuk waktu ekstrim yaitu 0,5 menit. Dari hasil pengujian pada empat titik keluaran (*Runway Entry Gate*) serta titik merging NOKTA dan titik *holding* ESALA tidak terdapat pelanggaran separasi antar pesawat untuk setiap konfigurasi penggunaan *Runway*.

4.2 Pelaksanaan Simulasi

Model simulasi yang telah dibangun selanjutnya dijalankan dengan 100 replikasi yang independen secara statistik untuk setiap set simulasi. Masing-masing replikasi memiliki panjang 100 menit dengan waktu pemanasan (*warm up*) 40 menit. Keluaran juga direkam dalam format Comma Separated Value (CSV) yang dapat diolah lebih lanjut menggunakan MICROSOFT EXCEL.

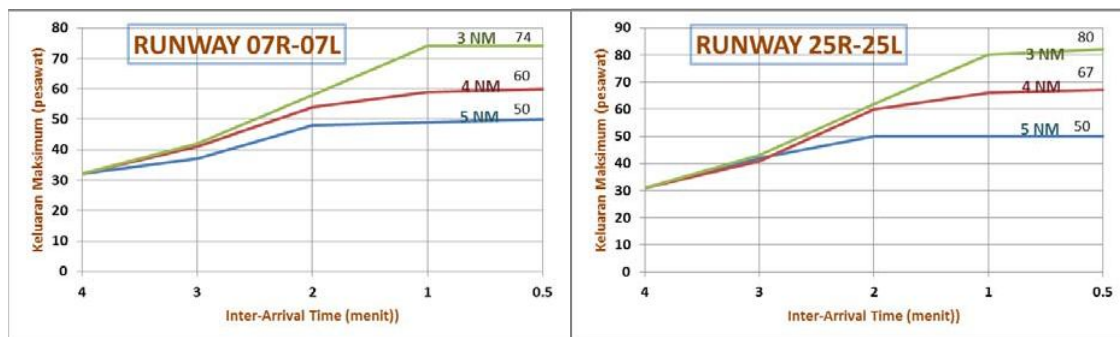
Guna menganalisis kapasitas, keterlambatan dan waktu *holding* pada *Terminal Airspace*, dijalankan beberapa skenario simulasi dengan menerapkan beberapa parameter yang diduga akan mempengaruhi keluaran simulasi.

- Konfigurasi *Runway* yang dipakai: 07R-07L dan 25L-25R.
- Aturan separasi minimum antar pesawat : 5 NM, 4 NM dan 3 NM.
- Inter-Arrival Time (IAT) - uniform dengan deviasi $\pm 10\%$ (dalam menit) : 4, 3, 2,1 dan 0,5.

5. Hasil Simulasi

5.1 Kapasitas *Ultimate*

Kapasitas *ultimateTerminal Airspace* direpresentasikan dengan keluaran maksimum pada aturan separasi yang berlaku. Perhitungan kapasitas yang didapatkan dari simulasi merupakan kapasitas *ultimate* karena belum memasukkan pengaruh faktor manusia di dalamnya. Lokasi yang dijadikan referensi untuk melakukan penghitungan adalah keluaran pada *RunwayEntry Gate* karena setiap pesawat udara yang melakukan pendaratan akan melewati *fixpoint* tersebut sekaligus merupakan titik akhir dari model simulasi.

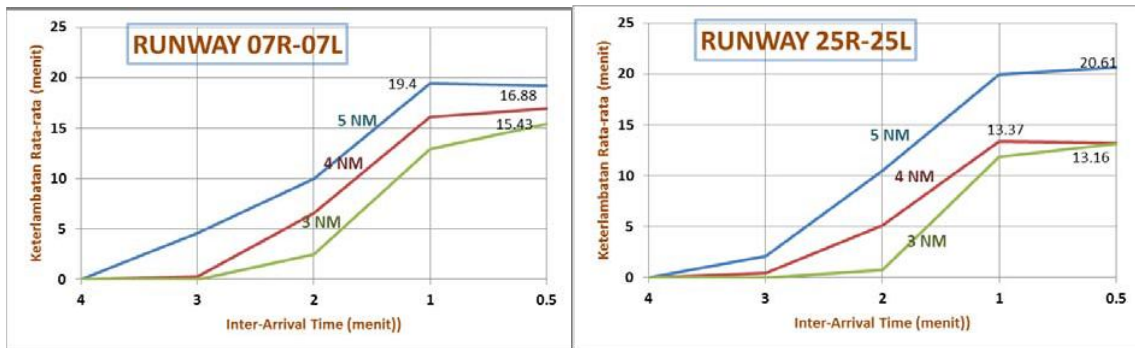


Gambar 4 Grafik Kapasitas *UltimateRunway*.

Dari Gambar 4 dapat kita amati bahwa pada penggunaan separasi sebesar 5 NM keluaran maksimum mencapai 50 pesawat per jam pada IAT 0,5 menit dan 60 pesawat per jam untuk separasi 4 NM dengan IAT yang sama. Sedangkan keluaran maksimum terbesar pada *Runway* 07R-07L dicapai sebesar 74 pesawat per jam saat diterapkan aturan separasi 3 NM. Penerapan aturan separasi 5 NM dengan IAT 0,5 menit pada *Runway* 25R-25L menghasilkan keluaran maksimum sebesar 50 pesawat per jam. Sedangkan pada penerapan separasi 4 NM didapatkan keluaran maksimum 67 pesawat per jam pada IAT 1 menit. Keluaran maksimum terbesar pada *Runway* 25R-25L didapatkan pada IAT 0,5 menit dengan penerapan separasi 3 NM dengan 80 pesawat per jamnya.

5.2 Keterlambatan Rata-rata

Keterlambatan pada pesawat yang bergerak di Terminal Area terutama disebabkan oleh penjagaan separasi antar pesawat udara. Pesawat udara “dipaksa” untuk mengurangi kecepatan ataupun melakukan *holding* agar jarak separasi dengan pesawat di depannya tetap terjaga. Besarnya keterlambatan untuk setiap pesawat didapatkan dari lamanya waktu yang ditempuh sebuah pesawat selama bergerak di *Terminal Airspace* pada kondisi simulasi tertentu dikurangi dengan saat pesawat bergerak tanpa adanya gangguan. Seperti halnya penghitungan keluaran maksimum, penghitungan keterlambatan juga dihitung pada titik-titik *Runway Entry Gate*.

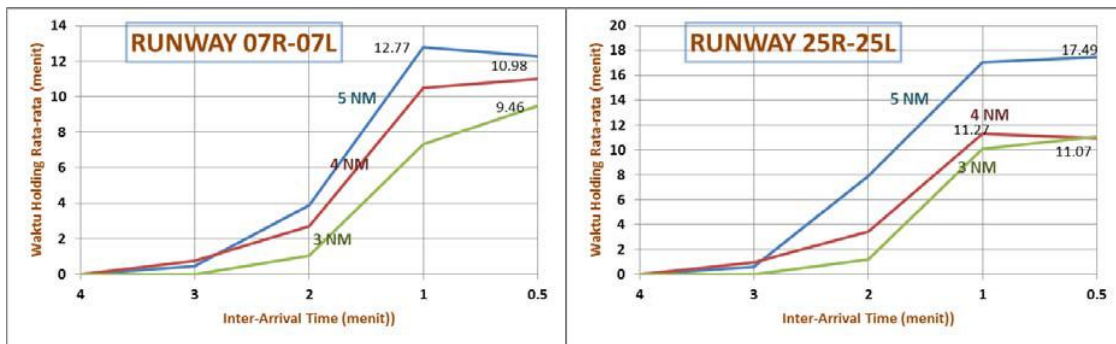


Gambar 5 Grafik Keterlambatan Rata-rata

Keterlambatan rata-rata terlama yang terjadi pada *Runway* 07R-07L saat penerapan separasi 5 NM adalah pada saat IAT 1 menit dengan angka mencapai 19,4 menit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Sedangkan untuk separasi 4 NM dan 3 NM memiliki angka keterlambatan rata-rata tertinggi masing-masing 16,88 dan 15,43 menit saat IAT 0,5 menit. Keterlambatan rata-rata pada *Runway* 25R-25L dengan separasi 5 NM adalah 20,61 menit yang didapatkan saat IAT 0.5 menit. Berbeda dengan *Runway* 07R-07L, pada penerapan separasi 4 NM, keterlambatan rata-rata tertinggi untuk *Runway* 25R-25L sebesar 13,37 menit untuk IAT 1 menit. Sedangkan penerapan separasi 3 NM akan memberikan nilai keterlambatan tertinggi sebesar 13.16 menit saat IAT 0,5 menit.

5.3 Waktu Holding Rata-rata

Holding dilakukan pada titik-titik *holding* tertentu dengan melakukan satu putaran penuh. Pada satu titik *holding* dimungkinkan untuk menampung *holding* beberapa pesawat sekaligus. Pada model simulasi yang dibangun, rata-rata setiap titik *holding* mampu menampung enam buah pesawat sekaligus. Pesawat akan meninggalkan titik *holding* apabila jarak separasi dengan pesawat lainnya telah terpenuhi.

Gambar 6 Grafik Waktu *Holding* Rata-rata.

Nilai waktu *holding* rata-rata tertinggi *Runway* 07R-07L untuk separasi 5 NM didapatkan saat IAT 1 menit sebesar 12,77 menit. Sedangkan nilai waktu *holding* rata-rata tertinggi untuk separasi 4 dan 3 NM dicapai untuk IAT 0,5 menit sebesar 10,98 dan 9,46 menit. Waktu *holding* rata-rata untuk *Runway* 07R-07L ditunjukkan oleh Gambar 6. Penerapan separasi 5 NM dan 3 NM untuk *Runway* 25R-25L memberikan waktu *holding* rata-rata tertinggi pada IAT 0,5 menit. Nilai rata-rata waktu *holding*-nya berturut-turut adalah 17,49 dan 11,07 menit. Sedangkan pada penerapan separasi 4 NM didapatkan nilai rata-rata waktu *holding* adalah 11,27 menit untuk IAT 1 menit.

6. Diskusi

Kapasitas, yang ditunjukkan oleh keluaran maksimum model *Terminal Airspace* dengan separasi 3 NM mencapai 80 pesawat per jamnya (*Runway* 25R-25L). Sedangkan dengan penerapan separasi 4 NM mencapai 67 (*Runway* 25R-25L). Pada kondisi aktual saat ini, dengan aturan separasi 5 NM, CGK hanya mampu melayani maksimum 50 pesawat per jamnya (*Runway* 07R-07L dan *Runway* 25R-25L).

Kinerja model *Terminal Airspace* dengan separasi yang lebih kecil terlihat lebih baik dalam hal melayani jadwal penerbangan dengan kepadatan tinggi. Selain kapasitas, parameter kinerja lainnya juga lebih membaik dengan penerapan separasi yang lebih kecil. Keterlambatan rata-rata dan waktu *holding* rata-rata akan lebih menurun. Pengurangan angka keterlambatan rata-rata dapat mencapai 36% apabila dilakukan pengurangan separasi sampai dengan 3 NM seperti yang ditunjukkan oleh hasil pengamatan pada *Runway* 25R-25L. Dengan penerapan separasi yang lebih kecil, pengurangan waktu *holding* rata-rata juga mencapai angka 36 %.

Perbedaan dalam penggunaan konfigurasi *Runway* juga memberikan pengaruh pada perbedaan parameter yang diamati. Terlihat bahwa *Runway* 25R-25L mempunyai kapasitas ultimate yang lebih tinggi dibandingkan dengan *Runway* 07R-07L. Perbedaan akan makin tinggi saat separasi yang diterapkan makin kecil. Bila pada separasi 5 NM tidak terdapat perbedaan maka selisih kapasitas ultimate pada 4 NM adalah 3 pesawat. Pada separasi 3 NM selisihnya mencapai 6 pesawat.

Selisih tersebut dimungkinkan karena lintasan kedatangan *Runway* 07R-07L lebih panjang dibandingkan *Runway* 25R-25L. Lintasan yang lebih panjang mengakibatkan jumlah segmen yang dibentuknya pun semakin banyak. Selisih segmen yang dibentuk akan semakin tinggi saat separasi yang diterapkan semakin pendek. Jumlah segmen yang lebih banyak akan berakibat pada seringnya pengurangan kecepatan di segmen. Dengan semakin sempit IAT maka akan semakin sering pula pengurangan kecepatan di segmen.

Pengaruh pemilihan konfigurasi *Runway* juga terlihat pada angka rata-rata keterlambatan dan rata-rata waktu *holding*. Pada *Runway* 07R-07L terlihat bahwa angka rata-rata

keterlambatannya lebih tinggi dibandingkan pada *Runway 25R-25L*. Sebaliknya angka rata-rata waktu *holding* pada *Runway 25R-25L* lebih tinggi dibandingkan pada *Runway 07R-07L*. Hal tersebut memperlihatkan bahwa keterlambatan pada *Runway 07R-07L* sebagian besar disumbang akibat pengurangan kecepatan di lintasan kedatangan. Sebaliknya keterlambatan pada *Runway 25R-25L* sebagian besar terjadi akibat pesawat yang mengalami *holding*.

Dari beberapa fakta di atas terlihat bahwa pengurangan separasi akan secara signifikan menambah kapasitas ultimate *Terminal Airspace* CGK. Pengurangan separasi juga akan mengurangi keterlambatan rata-rata serta jumlah *holding* dan waktu *holding* rata-rata. Selain pengurangan separasi, strategi lain yang diusulkan untuk meningkatkan kinerja *Terminal Airspace* CGK adalah dengan pemerataan jadwal penerbangan sehingga tidak terjadi kepadatan jadwal penerbangan pada rentang waktu tertentu saja.

Hasil pengamatan selama simulasi berjalan menunjukkan bahwa model mampu menampilkan karakteristik *Terminal Airspace* CGK secara baik. Aturan separasi antar pesawat berhasil diterapkan. Aturan *holding* juga dapat diikuti dengan baik oleh model. Tampilan animasi dari pergerakan pesawat di rute penerbangan sangat membantu dalam proses validasi dan analisis model. Pengaturan kecepatan simulasi dan penghitungan statistik yang dimiliki oleh ARENA memberikan efisiensi dalam proses analisis.

Walau demikian, model simulasi ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Model hanya mampu merepresentasikan satu tipe pesawat dengan asumsi kecepatan yang konstan pada tiap segmen. Padahal pada sistem nyata pesawat dikelompokkan menjadi tiga tipe yang memiliki karakteristik kecepatan pendekatan (*approach*) masing-masing.

7. Kesimpulan

Model simulasi yang dilengkapi dengan animasi merupakan salah satu metode yang handal dan efektif untuk merepresentasikan dan menganalisis sistem yang kompleks seperti operasi *Terminal Airspace*. Beberapa skenario simulasi telah diimplementasikan pada Bandara International Soekarno-Hatta. Walau demikian masih terdapat beberapa keterbatasan yang dimiliki oleh model, diantaranya adalah hanya mampu merepresentasikan pergerakan satu tipe pesawat dan mengasumsikan pergerakan pesawat di tiap segmen adalah konstan. Peningkatan kemampuan model simulasi masih dimungkinkan. Hal tersebut dilakukan antara lain dengan memasukkan tipe pesawat lainnya dan pemodelan kecepatan pesawat di segmen yang berdasarkan data pergerakan sesungguhnya.

Metode validasi model yang telah dijalankan berupa validasi terhadap pergerakan pesawat di lintasan kedatangan dan penjaminan separasi antar pesawat. Validasi pergerakan pesawat pada *Terminal Airspace* dilakukan dengan bantuan fasilitas animasi yang dimiliki oleh model simulasi. Validasi penjaminan separasi antar pesawat dilakukan dengan bantuan tampilan grafik dan pengolahan data yang dihasilkan melalui simulasi. Masih diperlukan metode validasi yang lebih handal agar model simulasi lebih mendekati sifat dan karakteristik sistem nyata. Salah satu metode validasi yang disarankan adalah dengan membandingkan data hasil simulasi terhadap data operasi penerbangan aktual (misal waktu tempuh pesawat pada rute kedatangan).

Pada penelitian ini, model simulasi *Terminal Airspace* telah digunakan untuk mengamati pengaruh penerapan separasi antar pesawat udara pada berbagai IAT terhadap nilai keluaran maksimum, keterlambatan rata-rata dan waktu *holding* rata-rata. Pengaruh perubahan parameter tersebut telah dianalisis dan selanjutnya dapat digunakan sebagai pertimbangan guna perencanaan dan pengembangan operasi penerbangan di CGK. Pengembangan yang disarankan antara lain berupa pengurangan separasi dan pemerataan jadwal penerbangan.

Model simulasi yang telah dibangun selanjutnya dapat dimanfaatkan guna optimasi operasi *Terminal Airspace*, misalnya optimasi penggunaan konfigurasi *Runway*, jadwal penerbangan dan posisi *holdingpoint*. Pengembangan selanjutnya adalah dengan menyertakan operasi bandara yang lebih luas seperti untuk operasi *Runway*, *taxiway*, *apron* dan *enroute*. Hasil analisis simulasi dan optimasi kemudian dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dan perencanaan dalam pengelolaan bandara guna meningkatkan keselamatan dan efektifitas operasi penerbangan.

Daftar Pustaka

- [1] Carr, Francis R. (2004) : *Robust Decision-Support Tools for Airport Surface Traffic*, Dissertation for Doctor of Philosophy at Massachusetts Institute Of Technology, February 2004.
- [2] Horonjeff, R., McKelvey, F.X., Sproule, W.J., dan Young, S.B. (2010) : *Planning and Design of Airports*. 5th ed, The McGraw-Hill Companies, New York, USA.
- [3] Huynh, N, and Walton, M. (2005): *Methodologies for Reducing Truck Turn Time at Marine Container Terminals*, The University of Texas at Austin.
- [4] Martis, M.S. (2006) : *Validation of Simulation Based Models: a Theoretical Outlook*, The Electronic Journal of Business Research Methods, 4 (1): 39–46.
- [5] Janic, M. (2000) : *Air Transport System Analysis and Modelling*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
- [6] Kelton W.D., Sadowski R., Sadowski D., (2002) : *Simulation with Arena, Second Edition*, McGraw-Hill, New York.
- [7] Medianto, R., (2013) : *Analisis Prosedur Kedatangan Pada Terminal Airspace Menggunakan Model Simulas*, Tesis, Program Studi Magister Aeronotika Dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [8] Monish, D.T., Vaddi, S., Wiraatmadja, S., dan Cheng, V.H.L. (2011) : *A Queuing Framework for Terminal Area Operations*, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Portland, Oregon, USA, 1–21.
- [9] Neufville, R.D. dan Odoni, A. (2013) : *Airport Systems: Planning Design, and Management, 2nd Edition*, McGraw Hill, New York, USA.
- [10] Odoni, A.R., Bowman, J., Deyst, J.J., Feron, E., Hansman, R.J. dan Kuchar, J.K. (1997) : *Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts, Modeling Research Under NASA/AATT, Final Report*, International Center For Air Transportation Massachusetts Institute Of Technology.
- [11] Poldy, F. (1982) : *Airport Runway Capacity and Delay: Some Models for Planners and Managers*, BITRE, Canberra, Australia.
- [12] Pujet, N., Delcaire B. dan Feron E. (1999) : *Input-Output Modeling And Control Of The Departure Process Of Congested Airports*, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Portland, Oregon. 1–18.
- [13] Sargent, Robert G. (2005): *Verification and Validation Of Simulation Models*, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, 130–143.

