



PAPER – OPEN ACCESS

Model Penyediaan Suku Cadang Pesawat Berbasis Keandalan pada Sistem Distribusi Dua Eselon di Indonesia

Author : Fidiarta Andika, dan Bermawi Priyatna Iskandar

DOI : 10.32734/ee.v8i1.2704

Electronic ISSN : 2654-704X

Print ISSN : 2654-7031

Volume 8 Issue 1 – 2025 TALENTA Conference Series: Energy & Engineering (EE)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](#).

Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Model Penyediaan Suku Cadang Pesawat Berbasis Keandalan pada Sistem Distribusi Dua Eselon di Indonesia

Fidiarta Andika^a, Bermawi Priyatna Iskandar^a

^aDepartemen Teknik dan Manajemen Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132, Indonesia
33422008@mahasiswa.itb.ac.id

Abstrak

Sebuah model penyediaan suku cadang pesawat berbasis keandalan untuk sistem distribusi dua eselon di Indonesia disajikan dalam penelitian ini. Analisis situasi masalah dan kritikalitas komponen pesawat dilakukan pada tahap awal sebagai basis pengembangan model Kutanoglu dan Mahajan (2009) dengan hasil perlu ditambahkannya elemen biaya spesifik lokasi dan kepatuhan terhadap regulasi penerbangan, serta karakteristik permintaan yang berubah terhadap waktu. Pendekatan metode analitik ini bertujuan untuk mencari optimasi level stok suku cadang di gudang sentral dan lokal dalam rangka memenuhi tingkat layanan yang diminta dengan biaya minimum guna mendukung pengoperasian pesawat B738 Garuda di Indonesia.

Kata Kunci: Suku cadang pesawat, model berbasis keandalan, optimasi level stok.

Abstract

A reliability-based aircraft spare parts provisioning model for a two-echelon distribution system in Indonesia is presented in this study. The analysis of the problem situation and the criticality of aircraft components was conducted at the initial stage as a basis for developing the Kutanoglu and Mahajan (2009) model, with the result that it is necessary to add location-specific cost elements and compliance with aviation regulations, as well as demand characteristics that change over time. This analytical method approach aims to optimize the stock levels of spare parts in central and local warehouses to meet the required service levels at minimum cost, in order to support the operation of Garuda's B738 aircraft in Indonesia.

Keywords: Aircraft spare parts, reliability-based model, stock level optimization.

1. Pendahuluan

Manajemen suku cadang yang efektif adalah salah satu cara untuk memenuhi tujuan efisiensi biaya operasional tinggi di industri penerbangan dengan tetap mengedapankan keselamatan atau keandalan pesawat. Situasi *Aircraft on Ground* (AoG) yang disebabkan oleh kegagalan komponen dapat menyebabkan gangguan layanan, kerugian finansial, dan penurunan reputasi maskapai. Untuk mengatasi situasi tersebut, konsep ketersediaan suku cadang menjadi sangat penting untuk menjamin komponen yang rusak dapat segera diganti setelah pesawat mendarat di tujuan penerbangan [1]. Ada dua cara penyediaan suku cadang : kepemilikan komponen sebagai aset maskapai atau subkontrak ke penyedia jasa perawatan pesawat/MRO (Maintenance, Repair & Overhaul) [2].

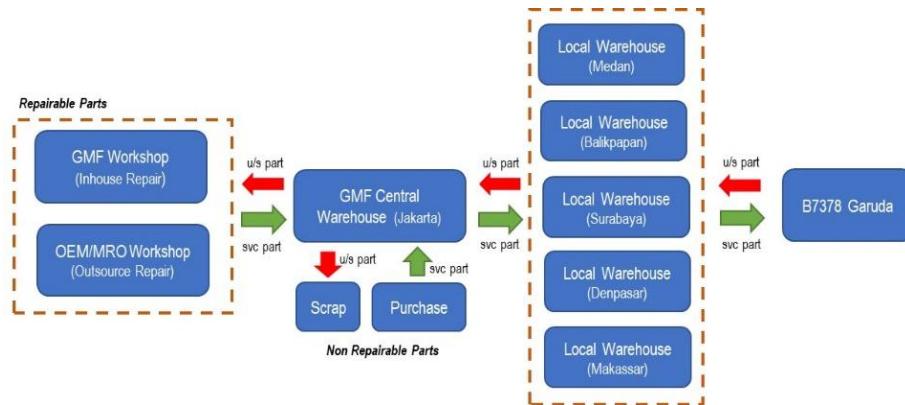
Teknik peramalan permintaan tradisional dengan pendekatan *time series* seperti MA (*Moving Average*), ARMA (*Auto Regressive Moving Average*), dan EWMA (*Exponential Weight Moving Average*) kurang akurat karena pola tidak menentu/*erratic* dan tidak merata/*lumpy* yang mendominasi permintaan suku cadang pesawat terbang [3]. Pengembangan metode setelahnya seperti metode Croston dan pendekatan Bootstrap, telah dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut, meskipun belum konsisten akurat. Karena permintaan suku cadang pengganti secara langsung dipengaruhi oleh distribusi kegagalannya, yang biasanya diwakili oleh distribusi Weibull, eksponensial, atau log-normal tergantung pada jenis komponen-nya, model peramalan berbasis keandalan telah menjadi alternatif utama [4]. Permintaan untuk semua suku cadang pesawat, baik untuk komponen yang dapat diperbaiki/*repairable parts* ataupun komponen yang tidak dapat diperbaiki/*non repairable parts* dapat diprediksi lebih baik oleh model berbasis keandalan.

Karena *repairable parts* akan mengalami perbaikan dan dapat dipasang antar pesawat, mereka menimbulkan kompleksitas dalam pendistribusian. Sebuah sistem distribusi dua eselon terdiri atas *central depot* yang terdiri atas pusat perbaikan/*workshop* dan gudang sentral dan *local bases* yang terdiri atas gudang lokal telah dirancang menggunakan model *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control* (METRIC) [5]. Skenario berbagi suku cadang antar gudang lokal terdekat pada kondisi darurat yang dikenal dengan *Emergency Lateral Transhipment (ELT)*, batasan kapasitas pusat perbaikan, dan konsep *multi-item* dan *multi-indenture* telah ditambahkan sebagai pengembangan model awal [6]. Kompleksitas penyediaan suku cadang pesawat di dunia nyata belum sepenuhnya dapat dicari solusi optimalnya dengan METRIC karena model ini mengasumsikan laju permintaan yang konstan (*Poisson demand*), dengan mengabaikan konsekuensi dari *imperfect maintenance* dari *repairable parts* sehingga mengakibatkan prediksi permintaan yang tidak akurat. Hal ini berdampak pada kekurangan atau kelebihan stok suku cadang di gudang sehingga mengakibatkan kerugian finansial dan tidak tercapainya tingkat layanan yang dipersyaratkan.

Dalam tulisan ini, penulis memodelkan penyediaan suku cadang pesawat berbasis keandalan pada sistem distribusi dua eselon yang mencakup satu gudang sentral dan pusat perbaikan/penyediaan suku cadang di Jakarta serta lima gudang lokal yang berlokasi di Medan, Balikpapan, Surabaya, Denpasar, dan Makassar. Model ini mencakup *repairable* dan *non repairable parts*, mempertimbangkan berbagai tingkat kritikalitas suku cadang berdasarkan *Essential Code* (EC) dari *Maintenance Program* (MP) pesawat berbadan kecil/narrow body aircraft B738 yang dioperasikan oleh maskapai Garuda Indonesia. Dengan prediksi kegagalan berbasis keandalan, dikombinasikan dengan perencanaan distribusi suku cadang sesuai dengan realitas operasional maskapai penerbangan Indonesia, diharapkan dapat memberikan tingkat layanan 99% yang dipersyaratkan dengan biaya layanan yang rendah sehingga menjadikan penelitian ilmiah ini berkontribusi secara signifikan untuk memecahkan persoalan dunia nyata.

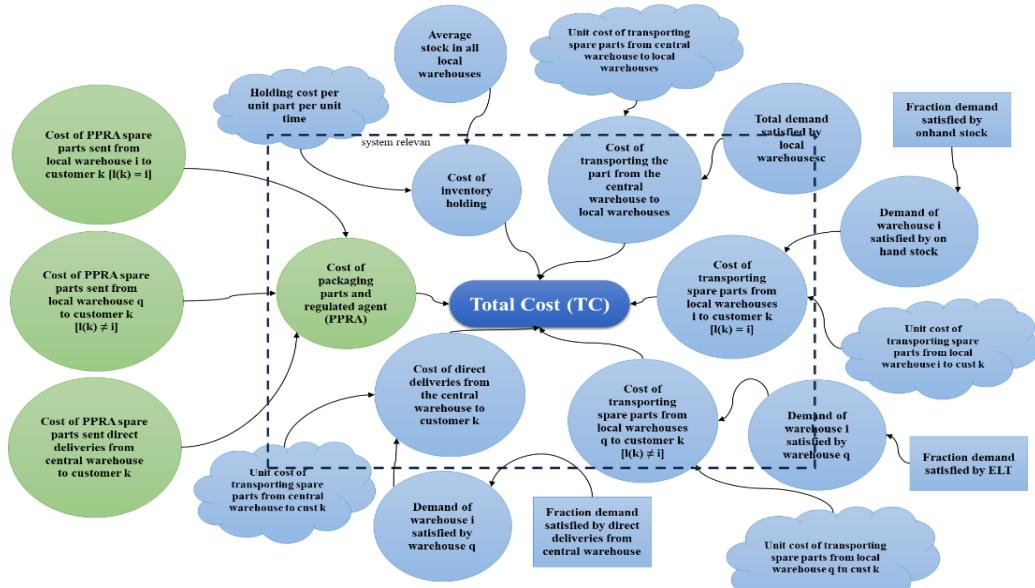
2. Formulasi Model

Armada B738 Garuda mayoritas digunakan untuk penerbangan rute domestik, dimana tujuan dengan frekuensi tertingginya adalah menuju kota-kota besar yaitu Jakarta, Medan, Balikpapan, Surabaya, Denpasar, dan Makassar. Jakarta berperan sebagai hub utama yang memiliki fasilitas pemeliharaan lengkap dan gudang sentral, serta lima kota besar lainnya yang juga memiliki layanan pemeliharaan ringan dan gudang lokal untuk mengantisipasi kebutuhan suku cadang saat terjadi kerusakan komponen. Setelah mendarat, pesawat menjalani inspeksi teknis, dan jika ditemukan kerusakan akan diganti oleh stok suku cadang yang berasal dari gudang lokal di Lokasi tersebut dan komponen yang rusak akan dikirim ke gudang sentral di Jakarta. Di sana, apabila komponen tersebut adalah *repairable parts*, akan diperbaiki oleh anak perusahaan MRO Garuda ("GMF") atau disubkontrakkan ke pihak ketiga, sementara *non repairable parts* akan di-scrap diganti dengan stok yang berada di gudang sentral. Deskripsi sistem penyediaan suku cadang dapat dilihat pada gambar 1, dimana tantangan terbesar adalah bagaimana menentukan item dan jumlah suku cadang yang harus disiapkan sebagai persediaan, baik di gudang pusat maupun gudang lokal, dengan mempertimbangkan kapasitas perbaikan untuk *repairable parts* dan *lead time* pengadaan untuk *non repairable parts* agar dapat mencapai tingkat layanan 99% dengan biaya seminimum mungkin.



Gambar 1. Sistem penyediaan suku cadang untuk armada B738 Garuda

Penelitian ini mengembangkan model integer *non-linier programming* oleh Kutanoglu dan Mahajan (2009) untuk mendapatkan model penyediaan suku cadang pesawat B738 Garuda berbasis keandalan. Model ini pada dasarnya sudah merepresentasikan masalah yang dihadapi pada dunia nyata; namun, asumsi tentang tingkat permintaan yang konstan tetap menjadi keterbatasan dan menjadi perbaikan penting dalam penelitian ini. Hal lain yaitu evaluasi terhadap elemen pembentuk fungsi objektif total biaya yang dinilai belum mencerminkan kondisi operasional pesawat Garuda B738 di Indonesia. Untuk memperbaikinya, analisis situasi masalah/*problem situation analysis* akan dilakukan untuk mengidentifikasi elemen biaya yang relevan dalam sistem penyediaan suku cadang pesawat. Memahami situasi secara menyeluruh dengan memahami semua aspek dan sistem penting yang terkait dengan masalah tersebut adalah prasyarat untuk intervensi sistem yang sukses, dimana sistem relevan-nya akan dimodelkan menggunakan *influence diagram* [7]. Pedoman IATA (*International Air Transport Association*) [8] and *Maintenance Program's Essential Code (EC) classifications*—EC-1 (*No-Go item*) and EC-2 (*Go-If item*)—digunakan senagai referensi untuk menentukan komponen kritikal yang harus disiapkan stok-nya di gudang sentral dan lokal. Komponen yang masuk dalam kategori *No-Go item* berarti pesawat tidak dapat diberangkatkan apabila komponen dalam kategori ini tidak berfungsi, sementara *Go-If item* dimana pesawat dapat diberangkatkan dengan syarat komponen yang tidak berfungsi harus segera diganti dalam periode waktu tertentu. Permintaan atas komponen kritikal ini diprediksi menggunakan data kegagalan aktual komponen tersebut selama pengoperasian-nya di pesawat dalam kurun waktu



Gambar 2. Sistem relevan total biaya penyediaan suku cadang pesawat B738 Garuda

tertentu menggunakan analisis berbasis keandalan. Laju permintaan dimodelkan menggunakan distribusi Weibull, yang mengakomodir tiga jenis profil laju permintaan yang mungkin, yaitu laju yang meningkat, menurun, atau konstan untuk semua komponen kritis *repairable* dan *non repairable parts*.

Sistem penyediaan suku cadang pesawat B738 Garuda di Indonesia dimodelkan menggunakan *influence diagram* yang sangat berguna untuk menampilkan proses transformasi sistem dalam hal hubungan struktural dan kausal antara komponen sistem seperti terlihat pada gambar 2. Dengan pemahaman situasi masalah ini, penulis mengidentifikasi beberapa masukan untuk model yang ada sebagai berikut :

- Biaya penyimpanan suku cadang di semua gudang diasumsikan sama. Faktanya, biaya sewa gudang per meter persegi di setiap lokasi akan bervariasi, dan luas area yang dibutuhkan juga akan bergantung pada jumlah stok di tiap gudang. Level stok akan dipengaruhi oleh laju pemenuhan stok yang berbeda dari gudang sentral ke tiap gudang lokal ulang karena perbedaan waktu yang dibutuhkan untuk pengiriman.
- Penambahan elemen biaya karena pengemasan suku cadang ketika akan didistribusikan, mengikuti standar ICAO ATA 300 dan biaya *Regulated Agent (RA)* untuk suku cadang yang masuk dalam kategori *Dangerous Goods (DG)* sesuai dengan Peraturan Menteri Perhubungan Indonesia nomor 53 tahun 2015 tentang "Keamanan Kargo dan Pos serta Rantai Pasokan Kargo dan Pos yang Diangkut dengan Pesawat Udara" yang memerlukan inspeksi khusus oleh *Regulated Agent (RA)* untuk suku cadang yang diklasifikasikan sebagai *Dangerous Goods (DG)*.
- Mengakomodasi *time-varying demand*, mengacu pada dengan data kegagalan aktual yang dialami oleh suatu komponen, umumnya *repairable parts*. Ketika *repairable parts* diperbaiki, perbaikan hanya dilakukan sesuai dengan masalah yang muncul (tanpa memperbaiki seluruh subsistem komponen) dan kembali digunakan untuk operasional. *Partial repair* ini dikenal sebagai *imperfect maintenance*, dan kondisi ini akan mempengaruhi interval waktu kegagalan berikutnya (interval waktu antara dua kejadian tidak independen).

Usulan terhadap perbaikan model Kutanoglu dan Mahajan untuk dapat digunakan dalam menemukan solusi penyediaan suku cadang B738 Garuda di Indonesia dirangkum dalam tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Perbandingan antara model awal dan usulan perbaikan

No	Comparison Subject	(Kutanoglu & Mahajan, 2009)	This Research
1	Holding cost per unit item per unit time (h)	Identical for all local warehouse	Unique for each local warehouse
	Replenishment lead time (L)	Identical for all local warehouse	Unique for each local warehouse
2.	Total cost variables	1. Inventory holding cost 2. Cost of transporting part from central to local warehouse 3. Cost of delivering on-hand stock to customer 4. Cost of ELT (Emergency Lateral Transhipment) 5. Cost of direct deliveries from central warehouse to customer	1. Inventory holding cost 2. Cost of transporting part from central to local warehouse 3. Cost of delivering on-hand stock to customer 4. Cost of ELT 5. Cost of direct deliveries from central warehouse to customer 6. Cost of packaging & RA for transporting part from central to local warehouse 7. Cost of packaging & RA for ELT 8. Cost of packaging & RA Direct deliveries from central warehouse to customer
3	Demand rate	Constant (λ)	Time-varying [$\lambda(t)$]

3. Hasil dan Diskusi

Keandalan didefinisikan sebagai probabilitas bahwa peralatan atau sistem akan menyelesaikan tugas tertentu dalam kondisi yang ditentukan selama periode tertentu, dimana laju permintaan (λ) sebagai parameter kunci yang digunakan untuk analisis dalam konsep ini. Dalam sebagian besar model untuk komponen pesawat, laju permintaan diasumsikan independen antar permintaan dan mengikuti distribusi eksponensial [9], sementara aktualnya akan didapat permintaan yang tidak menentu dan tidak teratur [10]. Dengan karakteristik permintaan yang berubah terhadap waktu/time-varying tersebut, distribusi Weibull paling cocok untuk memodelkan semua profil laju permintaan suku cadang (*infant mortality, constant, wear-out*) dengan rumusan:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (1)$$

Parameter $\lambda(t)$, laju permintaan yang berubah terhadap waktu/time-varying akan menambah kompleksitas dalam penyelesaian model matematis; oleh karenanya dapat didekati dengan nilai ekivalen ($\hat{\lambda}$) yang dihitung sebagai berikut:

$$\hat{\lambda} = \frac{\int_0^{t_1} \lambda(t) dt}{t} \quad (2)$$

Berdasarkan diskusi di atas, model matematis yang diusulkan sebagai fungsi objektif untuk penyediaan suku cadang B738 Garuda di Indonesia dengan sistem distribusi dua eselon adalah:

$$\begin{aligned} \text{Total cost} = & \sum_i h_i (S_i - \frac{\hat{\lambda}_i}{\mu_i}) + c(1 - \gamma)\hat{\lambda} + \sum_i \sum_k \beta_i \hat{\lambda}_{ik} u_{ik} + \rho \sum_i \sum_{q,q \neq i} \sum_k \omega_{iq} \alpha_i \hat{\lambda}_{ik} u_{qk} + \\ & v\gamma\hat{\lambda} + gd(1 - \gamma)\hat{\lambda} + \sum_i \sum_{q,q \neq i} \sum_k \omega_{iq} \alpha_i \hat{\lambda}_{ik} g_{qk} d_{qk} + g d \gamma \hat{\lambda} \end{aligned} \quad (3)$$

Model matematis Total Cost (TC) sebagai kriteria kinerja akan terdiri atas biaya penyimpanan stok di semua gudang, biaya pengangkutan bagian dari gudang sentral ke gudang lokal i , biaya pengangkutan bagian dari gudang lokal i ke pelanggan k ketika $l(k)=i$, biaya pengangkutan bagian dari gudang lokal q ke pelanggan k ketika $l(k) \neq q$, biaya pengiriman langsung dari gudang pusat ke pelanggan k , biaya pengemasan dan *Regulated Agent* (RA) untuk pengangkutan bagian dari gudang pusat ke gudang lokal i , biaya pengemasan dan *Regulated Agent* (RA) untuk pengangkutan bagian dari gudang lokal q ke pelanggan k ketika $l(k) \neq q$, dan biaya pengemasan dan *Regulated Agent* (RA) untuk pengiriman langsung dari gudang pusat ke pelanggan k .

Notasi yang digunakan dalam model di atas adalah sebagai berikut :

n	Jumlah gudang lokal
i	Indeks gudang lokal digunakan untuk mewakili lokasi pelanggan, $i = 1, 2, \dots, n$
q	Indeks gudang lokal digunakan untuk mewakili lokasi lain, $q = 1, 2, \dots, n$
k	Indeks pelanggan
$l(k)$	Gudang lokal yang ditugaskan kepada pelanggan k
S_i	Base stock di gudang lokal i
S	Total stok ($S = \sum_{i=1}^n S_i$)
λ_{ik}	Laju permintaan rata-rata pelanggan k yang ditugaskan ke gudang lokal i
λ_i	Total laju permintaan di gudang lokal i ($\sum_{ikl(k)=i} \lambda_{ik}$)
λ	Total laju permintaan ($\lambda = \sum_i \lambda_i$)
L_i	Waktu tunggu rata-rata pengisian stok di gudang i
μ_i	Laju kedatangan pesanan pengisian stok di gudang lokal i ($=1/L_i$)
β_i	Fraksi permintaan gudang lokal i yang dipenuhi dari <i>on-hand stock</i>
α_i	Fraksi permintaan gudang lokal i yang dipenuhi melalui ELT

γ	Fraksi dari total permintaan yang dipenuhi dari gudang sentral melalui pengiriman langsung
ω_{iq}	Probabilitas menggunakan gudang lokal q sebagai sumber ELT untuk pelanggan di lokasi i
ρ	Faktor biaya penalti
h	Biaya penyimpanan per unit barang per unit waktu
c	Unit biaya transportasi suku cadang dari gudang sentral ke gudang lokal
u_{qk}	Unit biaya transportasi suku cadang dari gudang lokal q ke pelanggan k
v	Unit biaya transportasi suku cadang dari gudang sentral ke pekangan melalui pengiriman langsung
g	Unit biaya pengemasan suku cadang
d	Unit biaya <i>Regulated Agent (RA)</i> per suku cadang
g_{qk}	Unit biaya pengemasan suku cadang untuk transportasi gudang lokal q ke k

Mempertahankan ketersediaan suku cadang berbasis waktu sebesar 99% seperti yang dipersyaratkan oleh pelanggan menjadi konstrain dari model optimasi yang diformulasikan. Tingkat layanan berbasis waktu didefinisikan sebagai persentase total permintaan yang dipenuhi dalam target waktu yang ditentukan sesuai dengan kritikalitas komponennya, dirumuskan:

$$\text{Time-based Service Level} = F_w = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \left(\beta_i \Lambda_{wi} + \alpha_i \sum_{q=1}^n \omega_{iq} \Lambda'_{wiq} \right)$$

for w in $W = \{w_1, w_2, \dots, w_z\}$ (4)

Notasi tambahan yang digunakan pada model ini :

w	Target waktu pemenuhan suku cadang
F_w	Tingkat layanan berbasis waktu untuk target waktu pemenuhan w
Λ_{wi}	Total permintaan lokal yang berada dalam target waktu w dari gudang i
Λ'_{wiq}	Total permintaan pelanggan i yang berada dalam target waktu w dari gudang lokal q

4. Kesimpulan dan Penelitian Lanjutan

Sistem distribusi dua eselon dengan satu gudang sentral dan pusat perbaikan/penyediaan suku cadang di Jakarta serta lima gudang lokal di Medan, Balikpapan, Surabaya, Denpasar, dan Makassar adalah objek pengembangan model penyediaan suku cadang berbasis keandalan dalam studi ini. Untuk membuat pendekatan yang diusulkan lebih aplikatif dalam operasional armada B738 Garuda di Indonesia, model Kutanoglu dan Mahajan (2009) perlu dimodifikasi dengan menambahkan parameter biaya spesifik lokasi dan kepatuhan terhadap persyaratan regulasi Indonesia, serta memasukkan laju permintaan yang berubah terhadap waktu.

Untuk mendapatkan solusi yang optimal, penelitian ini harus dilanjutkan dengan penentuan level stok di tiap gudang, menggunakan data aktual kegagalan komponen kritis pesawat B738 Garuda dalam pengembangan algoritma enumerasi implisit. Algoritma ini kemudian juga digunakan untuk menganalisis sensitivitas total biaya terkait dengan berbagai parameter yang mempengaruhi dan menyelidiki manfaat prioritas antara gudang lokal dalam kasus Transshipment Lateral Darurat (ELT). Selain itu, analisis sensitivitas digunakan juga untuk menyelidiki bagaimana perubahan pada berbagai parameter sistem mempengaruhi kinerja model penyediaan suku cadang pesawat B738 Garuda.

Referensi

- [1] J. Kilpi and A. P. J. Vepsäläinen, "Pooling of spare components between airlines," *J Air Transp Manag*, vol. 10, no. 2, pp. 137–146,

- 2004, doi: 10.1016/j.jairtraman.2003.09.001.
- [2] J. Kilpi, J. Töyli, and A. Vepsäläinen, "Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components," *Int J Prod Econ*, vol. 117, no. 2, pp. 360–370, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2008.12.001.
- [3] A. A. Ghobbar and C. H. Friend, "Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the yield of aviation: a predictive model," 2003. [Online]. Available: www.sciencedirect.comwww.elsevier.com/locate/dsw
- [4] A. F. Lowas and F. W. Ciarallo, "Reliability and operations: Keys to lumpy aircraft spare parts demands," *J Air Transp Manag*, vol. 50, pp. 30–40, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jairtraman.2015.09.004.
- [5] H. C. Lau and H. Song, "Multi-echelon repairable item inventory system with limited repair capacity under nonstationary demands," *International Journal of Inventory Research*, vol. 1, no. 1, p. 67, 2008, doi: 10.1504/ijir.2008.019209.
- [6] E. Kutanoglu and M. Mahajan, "An inventory sharing and allocation method for a multi-location service parts logistics network with time-based service levels," *Eur J Oper Res*, vol. 194, no. 3, pp. 728–742, May 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2007.12.032.
- [7] H. G. Daellenbach and D. McNickle, *Management Science: Decision Making through Design Thinking*, 2005.
- [8] IATA (International Air Transport Association), *Guidance Material and Best Practices for Inventory Management 2nd Edition Guidance Material and Best Practices for Inventory Management*. 2015.
- [9] N. Z. Kontrec, G. V. Milovanović, S. R. Panić, and H. Milošević, "A reliability-based approach to nonrepairable spare part forecasting in aircraft maintenance system," *Math Probl Eng*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/731437.
- [10] A. F. Lowas and F. W. Ciarallo, "Reliability and operations: Keys to lumpy aircraft spare parts demands," *J Air Transp Manag*, vol. 50, pp. 30–40, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jairtraman.2015.09.004.