

Pengaruh Penggunaan Ban Vulkanisir pada Pesawat Penumpang Komersial: Evaluasi Tingkat Keandalan dan Efektivitas Perawatan

Vera Yuliana Agustini^{1,2*}, Budhi Muliawan Suyitno³, Muhammad Andi Nova⁴, Fathan Mubina Dewadi⁵

^{1,3}Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila

²Program Studi Program Profesi Insinyur, Politeknik Negeri Batam

⁴Teknik Perawatan Pesawat Udara, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam

⁵Program Studi Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Kampus PSDKU PNJ Kota Pekalongan

Article Info

Article history:

Received October

Accepted October

Published November

Keywords:

Landing Frequency

Retread Tires

Wear Out

ABSTRAK

Pesawat udara merupakan moda transportasi yang mengalami peningkatan kebutuhan seiring dengan pertumbuhan mobilitas global, termasuk di Indonesia. Peningkatan jumlah siklus lepas landas dan pendaratan (*flight cycle*) berdampak pada tingginya permintaan terhadap komponen penunjang keselamatan, khususnya ban pesawat. Untuk menekan biaya operasional, maskapai penerbangan kerap menggunakan ban vulkanisir sebagai solusi yang lebih ekonomis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan dan tingkat kegagalan ban vulkanisir pesawat menggunakan pendekatan distribusi *Weibull*. Metode ini digunakan untuk menentukan pola kegagalan, tingkat keandalan, dan efektivitas strategi perawatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat keandalan tertinggi terjadi pada proses vulkanisir ketiga dengan nilai keandalan sebesar 0,99 dan nilai *Mean Time To Failure (MTTF)* sebesar 180 flight cycle. Jenis kegagalan yang paling dominan adalah kegagalan aus (*wear-out*). Strategi perawatan yang paling efektif untuk mengatasi kegagalan ini adalah perawatan preventif melalui inspeksi atau penggantian berkala. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengambilan keputusan perawatan komponen ban pesawat guna meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional.



Corresponding Author:

Vera Yuliana Agustini,
Program Studi Teknik Mesin,
Universitas Pancasila,
Jln. Borobudur No. 7 Cikini, Menteng, RT 09 RW 02, Pegangsaan, Jakarta Pusat, Kota Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota, Jakarta, 10320
Email: [*verayulianaagustini@gmail.com](mailto:verayulianaagustini@gmail.com)

1. PENGANTAR

Pesawat udara merupakan alat transportasi berteknologi tinggi yang berperan penting dalam efisiensi waktu tempuh perjalanan, baik untuk jarak dekat maupun jarak jauh [1], [2], [3]. Pesawat memiliki berbagai sistem teknologi yang saling mempengaruhi kinerjanya satu dengan lainnya. Tiap komponen memiliki keandalan tinggi untuk mendukung tuntutan agar aman dan efisien dalam proses pengoperasian oleh perusahaan maskapai. Keselamatan dan keamanan merupakan hal utama dalam perawatan dan pengoperasian pesawat udara [4]. Mengingat pentingnya hal tersebut, maka perlu dilakukan suatu pemeliharaan yang baik dengan cara melakukan perawatan agar keandalan (*reliability*) dan kondisi siap operasi (*serviceable*) tetap terjaga, sehingga pesawat selalu memenuhi kondisi laik terbang (*airworthy*) dan aman untuk terbang (*safe for flight*) [5].

Salah satu komponen yang krusial dalam pengoperasian pesawat adalah komponen *landing gear* beserta ban pesawatnya [6], [7], [8]. *Landing gear* dan ban pesawat yang berperan penting untuk menopang beban penuh saat *take-off*, pendaratan, serta saat *taxis* di landasan. Beban vertikal, gaya gesek, serta siklus panas-dingin akibat kecepatan tinggi dan penggeraman ekstrem menyebabkan ban mengalami keausan signifikan, sehingga perlu pemeliharaan dan penggantian secara berkala [9], [10], [11].

Konstruksi pesawat terbang (*airframe*) beserta seluruh komponennya umumnya mengikuti salah satu konsep yang berlaku yaitu *safe life*, *fail safe* dan *damage tolerance* [12], [13]. Pada pesawat komersil angkutan penumpang, *Landing gear* dan *fire wall* (tepat dibelakang *engine exhaust*) adalah dua komponen pesawat yang harus memenuhi konsep *fail safe*. Artinya, selama pesawat sedang dioperasikan maka kondisi keduanya wajib selalu prima jauh dari potensi gagal atau mal-fungsi. Dengan banyaknya pesawat yang saat ini dimiliki oleh maskapai penerbangan Indonesia dan frekuensi lepas landas/pendaratan (*takeoff/landing*) yang sangat tinggi, maka kebutuhan ban pesawat terus meningkat setiap tahunnya. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut dan dengan biaya yang cukup mendukung, saat ini maskapai penerbangan menggunakan ban vulkanisir.

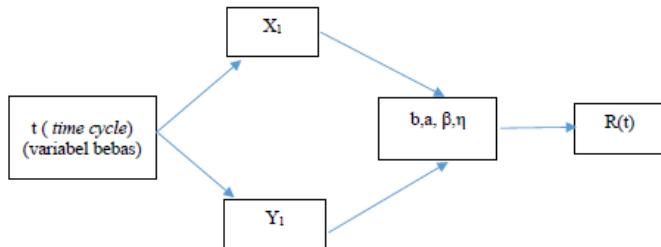
Sebagai upaya efisiensi biaya operasional, penggunaan ban vulkanisir menjadi pilihan bagi banyak maskapai. Namun, kualitas vulkanisir harus tetap memenuhi standar keselamatan penerbangan sipil. Oleh karena itu, Direktorat Jendral Perhubungan Udara Indonesia berusaha memperketat pengawasan terhadap ban pesawat terbang dengan mengeluarkan Surat Edaran Direktorat Jenderal Perhubungan Udara nomor DSKU/2886/STD/2007 yang berlaku 2 November 2007, yang berisi untuk membatasi dan mengawasi penggunaan ban vulkanisir pada pesawat sipil [10].

Penelitian oleh peneliti sebelumnya menunjukkan bahwa keandalan ban vulkanisir masih bervariasi, tergantung pada kualitas bahan, proses vulkanisasi, serta pola pemakaian [14], [15]. Oleh sebab itu, dibutuhkan pendekatan berbasis keandalan untuk memprediksi umur pakai ban dan menganalisis pola kegagalannya. Salah satu metode yang umum digunakan adalah analisis distribusi *Weibull*, yang memungkinkan pengidentifikasi karakteristik kegagalan, apakah bersifat *early failure*, *random*, atau *wear-out* [6], [7], [8], [16].

Distribusi *Weibull* telah terbukti efektif untuk mengevaluasi komponen pesawat, termasuk struktur *airframe* dan sistem *powertrain* [4], serta telah banyak digunakan dalam *predictive maintenance* untuk menganalisis data kegagalan berbasis *time cycle* [12], [13]. Oleh karena itu, maka diperlukannya penelitian terhadap keandalan pada vulkanisir ban pesawat pada pesawat komersial. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan ban vulkanisir pesawat komersial berdasarkan data operasional yang nyata, menggunakan distribusi *Weibull* sebagai pendekatan statistik untuk memodelkan waktu kegagalan berdasarkan *flight cycle*, serta mengidentifikasi kegagalannya.

2. METODE PENELITIAN

Variabel yang akan di teliti dari penelitian ini adalah akan dijelaskan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Jalur Variabel yang Mempengaruhi Keandalan

Time cycle merupakan variabel bebas dimana 1 *flight cycle* yang terhitung ketika pesawat *takeoff* hingga mendarat kembali. Prosedur pengambilan data terhadap t (waktu) dilakukan setiap ban mengalami kegagalan dimana pencatatan waktu atau jam terbang yang telah di tempuh di catat setiap hari. *Flight cycle* merupakan waktu ketika pesawat memulai *takeoff* hingga mendarat kembali.

Pengukuran data di dapat dari data yang ditulis oleh pilot ketika telah selesai melakukan penerbangan. Dalam penelitian ini menggunakan analisis secara kualitatif, yaitu menganalisis keandalan lewat penafsiran nilai Beta dari perhitungan rumus *Weibull Analysis* dan juga dengan cara melihat grafik yang dihasilkan dari perhitungan dengan menggunakan *Microsoft Excel*. Dalam analisis distribusi *Weibull* diperlukan beberapa perhitungan antara lain *failure time*, *adjusted rank*, *median rank*, nilai x , nilai y , nilai a , koefisien r , nilai β dan η . Analisis distribusi terdiri dari beberapa tahap antara lain. Data *failure time* adalah data yang diambil berdasarkan jam terbang (usia ban pesawat) ketika mengalami kerusakan. Pada data *failure time* dilakukan pengambilan data ketika ban pesawat mengalami kegagalan.

Setelah semua data input *failure time* diperoleh, selanjutnya dilakukan *plotting* data. Untuk melakukan *plotting* data dilakukan dengan metode *median rank*. Metode ini merupakan metode pendekatan standar *engineering* untuk melakukan estimasi *plotting* sumbu y .

3. HASIL DAN ANALISIS

Hasil dan pembahasan adalah dua komponen penting dalam suatu penelitian karena keduanya memiliki peran utama dalam membangun pemahaman, interpretasi, dan kontribusi penelitian tersebut

3.1 Hasil

Untuk menghitung keseluruhan data vulkanisir ban pesawat, dilakukan *plotting* pada seluruh kerusakan yang terjadi pada *system* tersebut menggunakan *weibull plot*. Dengan input jumlah jam terbang sebagai *failure time* (t) yang diurutkan berdasarkan terjadinya *failure*, yaitu *failure time* terkecil sampai terbesar.

Untuk melakukan *plotting* data dilakukan dengan *metode rank*. Metode ini merupakan metode pendekatan standar *engineering* untuk melakukan estimasi *plotting* sumbu Y. Metode ini biasanya diaplikasikan pada *Reliability Engineering*.

Berikut langkah-langkah untuk melakukan *plotting*, yaitu dengan melakukan perhitungan beberapa nilai parameter yang dibutuhkan, untuk mencari estimasi nilai beta (β) dan eta (η) sebagai parameter utama *weibull analysis*.

a) Perhitungan *Adjusted Rank*

$$\text{Adjusted Rank} = \frac{\{(Invers rank)x (previous adjusted rank) + (N + 1)\}}{(Invers rank + 1)}$$

Dimana N adalah *number of sample*. Contoh: Untuk order ke-1 dimana $t = 100$ dimana *invers rank* = 150, *previos adjusted rank* = 0 [17].

$$\text{Adjusted Rank} = \frac{\{(150 \times 0) + (150 + 1)\}}{(150 + 1)} = 1$$

b) Perhitungan *Median Rank*

Perkiraan yang tepat untuk metode median rank, dapat menggunakan rumus bernard'ms dimana i adalah nilai adjusted rank. *Median rank* dinyatakan dalam angka desimal. Contoh untuk order ke-1, dimana $i = 1$.

$$\text{Median Rank} = \frac{(i - 0.3)}{(N + 0.4)} = \frac{(1 - 0.3)}{(150 + 0.4)} = 0,004654$$

c) Perhitungan nilai X dan Y

$$X_1 = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - \text{median rank}} \right) \right)$$

$$Y_1 = \ln(t)$$

Contoh untuk order ke-1 dimana *median rank* = 0,004654 dan $t = 100$

$$\begin{aligned} X_1 &= \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - \text{median rank}} \right) \right) \\ &= \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - 0,004654} \right) \right) \\ &= \ln \left(\ln \left(\frac{1}{0,99534} \right) \right) \\ &= \ln \left(\ln (1,00468) \right) \\ X_1 &= -5,3676417 \\ Y_1 &= \ln(t) = \ln(100) \\ Y_1 &= 4,6051702 \end{aligned}$$

d) Penentuan notasi b

Notasi b adalah probabilitas dari presentase kegagalan pada *weibull lines* untuk menentukan nilai *shape parameter* dan karakteristik kegagalan [18].

$$b = \frac{\sum X \cdot \sum Y - \frac{\sum X \cdot \sum Y}{n}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}}$$

Untuk menentukan b harus diketahui nilai sum atau jumlah dari variabel x, y, x^2 , y^2 , dan xy ($\sum x^2, \sum y^2, \sum xy$) [19]. Variabel tersebut mempunyai nilai $\sum x = -85,579363$, $\sum y = 754,64997$, $\sum x^2 = 283,1207$, $\sum y^2 = 3807,677$ dan $\sum xy = -383,152$.

n = jumlah data

$$b = \frac{(-383,152) - \frac{(-85,579363) \cdot (754,64997)}{150}}{283,1207 - \frac{(-85,579363)^2}{150}}$$

$$b = 0,202300765$$

e) Penentuan notasi a

Notasi a adalah skala parameter dari data yang didapat [20]. Dicari dengan menggunakan regresi linear, dengan rumus yaitu $a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X}$. Dimana \bar{Y} adalah mean (rata-rata) y dan \bar{X} adalah mean (rata-rata) x. masing-masing dapat dicari dengan menggunakan rumus yaitu:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \sum Y / n \\ &= 754,64997 / 150 \\ &= 5,0309998 \\ \bar{X} &= \sum x / n \\ &= -85,579363 / 150 \\ &= -0,5705290867 \end{aligned}$$

Sehingga nilai a yaitu:

$$\begin{aligned} a &= 5,0309998 - (0,202300765 \cdot (-0,5705290867)) \\ a &= 5,146418 \end{aligned}$$

f) Penentuan koefisien korelasi r

Nilai r harus dihitung untuk menguji korelasi masing-masing parameter, nilai r yang benar adalah harus mendekati 1. Jika nilai r mendekati 1, berarti korelasi masing-masing parameter dekat dan benar.

Jika nilai r jauh dari 1, berarti korelasi antara masing-masing parameter jauh, sehingga dianggap salah, penentuan koefisien korelasi r dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n} \right] \times \left[\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}{n} \right]}} \\ r &= \frac{-383,152 - \frac{(-85,579363) \times (754,64997)}{150}}{\sqrt{283,1207 - \frac{(-85,579363)^2}{150}} \times \sqrt{3807,677 - \frac{(754,64997)^2}{150}}} \\ r &= 0,9322500 \end{aligned}$$

g) Penentuan nilai **beta (β)** dan **eta (η)**

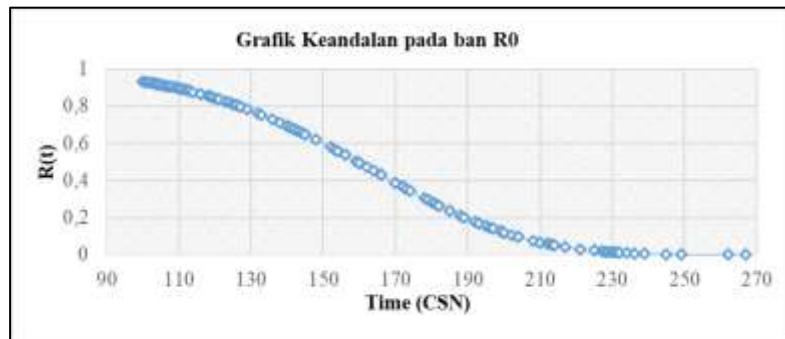
Beta adalah *shape parameter* dari data yang didapat. Nilai beta (β) didapat menggunakan rumus Beta (β) = $1/b$. Dimana β adalah *shape parameter* sebagai probabilitas dari *failure* yang terjadi, sedangkan Eta (η) merupakan karakteristik dari usia data komponen yang mengalami kerusakan (*failure*) [21]. Nilai Eta (η) dicari dengan menggunakan rumus Eta (η) = e^a . Dimana e adalah bilangan natural (EXP) yakni 2,718281828 dengan a sebagai skala parameter data yang didapat.

$$\begin{aligned} \text{Beta} (\beta) &= 1 / b \\ &= 1 / 0,202300765 = 4,943135 \\ \text{Eta} (\eta) &= e^a \\ &= e^{5,146418} = 171,85 \\ R(t) &= \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \\ R(t) &= \exp \left[- \left(\frac{t}{171,85} \right)^{4,943135} \right] \end{aligned}$$

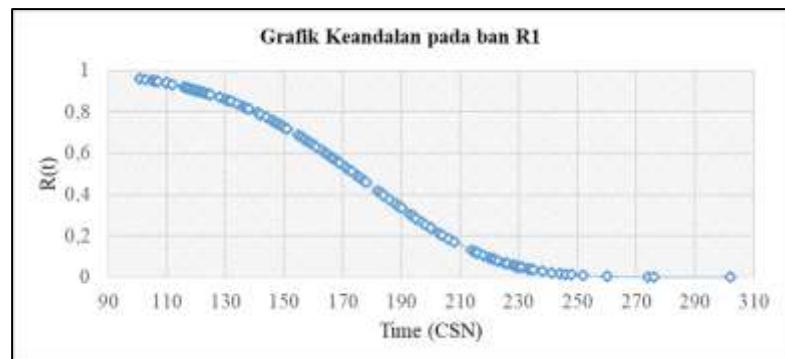
Perhitungan di bawah merupakan perhitungan keandalan R(t) menggunakan contoh time (t) = 100 pada ban baru (R0) Maka di peroleh R (t) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp \left[- \left(\frac{100}{171,85} \right)^{4,943135} \right] \\ R(t) &= 0,993443 \end{aligned}$$

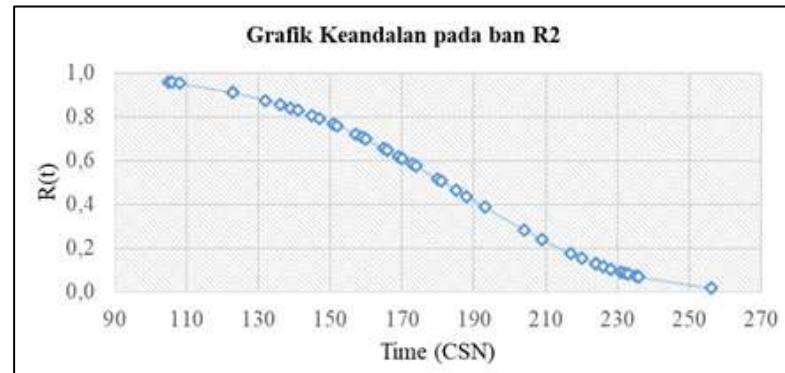
Berikut adalah perbandingan grafik keandalan ban pesawat dari kondisi baru (R0), kemudian vulkanisir pertama (R1), vulkanisir kedua (R2) dan vulkanisir ke 3 (R3) yang akan dijelaskan pada gambar 2 sampai 5.



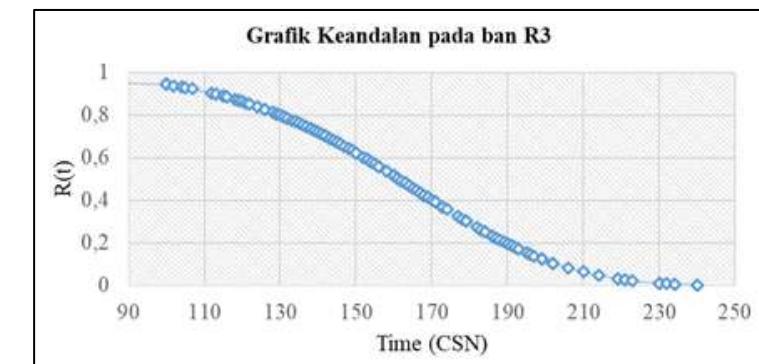
Gambar 2. Grafik R (t) Terhadap waktu (t) R0



Gambar 3. Grafik R (t) Terhadap waktu (t) R1



Gambar 4. Grafik R (t) Terhadap waktu (t) R2



Gambar 5. Grafik R (t) Terhadap waktu (t) R3

3.2. Pembahasan

Pada grafik pertama (R0) terlihat bahwa tingkat keandalan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya jumlah jam terbang. Dengan kata lain semakin besar jumlah jam terbang, maka akan semakin berkurang tingkat keandalan dari ban tersebut. Grafik pertama dengan R0 menunjukkan keandalan mencapai 0,93344 dengan *flight cycle* mencapai waktu (t) 267 *flight cycle*. Grafik kedua dengan R1 menunjukkan keandalan mencapai 0,96065 dengan *flight cycle* mencapai waktu (t) 302 *flight cycle*. Grafik ketiga dengan R2 menunjukkan keandalan mencapai 0,96006 dengan *flight cycle* mencapai waktu (t) 256 *flight cycle*. Grafik keempat dengan R3 menunjukkan keandalan mencapai 0,96802 dengan *flight cycle* mencapai waktu (t) 240 *flight cycle*.

Dari hasil berdasarkan gambar 3 sampai 6, terlihat R3 menunjukkan keandalan tertinggi, dengan *flight cycle* mencapai waktu (t) 240 *flight cycle*, berikut adalah hal hal yang mempengaruhi keandalan tertinggi berada pada R3.

1. *Tire Design*

- a. Original *tread depth* adalah perbedaan tinggi kembang antara ban baru dan vulkanisir,
- b. *Stiffness* adalah perbedaan level kekakuan antara ban baru dan vulkanisir
- c. Perbedaan material compound (*rubber* dan *chemical* yang di pakai)
- d. Perbedaan *tread shape* yang membentuk bagian permukaan ban
- e. Perbedaan proses di mesin building pada saat produksi

2. *Operational*

- a. *Tire contact pressure* antara permukaan ban dan landasan
- b. Load atau berat pesawat
- c. Panjang landasan dan permukaan landasan

Perhitungan MTTF (Mean Time To Failure)

Nilai MTTF pada ban baru tanpa vulkanisir (R0)

$$n = (1 + (1/4,943135))$$

$$n = 1,202 \text{ dibulatkan } n=1,2$$

Dengan melihat table fungsi gamma (Γ n) versus n, diperoleh nilai $\Gamma=0,91817$ sehingga MTTF = 189,67

Nilai MTTF pada ban vulkanisir pertama (R1)

$$n = (1 + (1/5,232036))$$

$$n = 1,191 \text{ dibulatkan } n=1,19$$

Dengan melihat table fungsi gamma (Γ n) versus n, diperoleh nilai $\Gamma=0,92089$ sehingga MTTF = 204,83

Nilai MTTF pada ban vulkanisir kedua (R2)

$$n = (1 + (1/5,17087))$$

$$n = 1,193 \text{ dibulatkan } n=1,19$$

Dengan melihat table fungsi gamma (Γ n) versus n, diperoleh nilai $\Gamma=0,92089$ sehingga MTTF= 214,27.

Nilai MTTF pada ban vulkanisir ketiga (R3)

$$n = (1 + (1/5,241021))$$

$$n = 1,158 \text{ dibulatkan } n=1,16$$

Dengan melihat table fungsi gamma (Γ n) versus n, diperoleh nilai $\Gamma=0,9298$ sehingga MTTF= 184,73.

Hal utama dalam menganalisis keandalan (*Reliability*) vulkanisir ban pesawat dengan menggunakan pendekatan distribusi Weibull adalah harus mengetahui aturan yang digunakan agar dapat menterjemahkan nilai yang didapatkan berdasarkan hasil perhitungan. Parameter yang digunakan dalam analisis ini yaitu nilai β (*shape parameter*). Nilai β dikategorikan dalam tiga kategori pada tingkat kegagalan.

Pertama, jika nilai beta (β) $< 1,0$, maka kategori ini sebagai *infant mortalities shape*, ini artinya terdapat kegagalan pada usia dini (*early age*), kemudian laju kegagalan berkurang (*failure rate decreasing*) pada usia pemakaian ban pesawat. Selanjutnya, jika nilai beta (β) = 1,0 maka ini dikategorikan sebagai *random failure*, yang artinya ban baru atau lama memiliki probabilitas sama terhadap *failure*. Laju kegagalan (*failure rate*) pada interval ini adalah konstan. Kategori terakhir, bila nilai (β) $> 1,0$, maka ini akan masuk pada kategori *wear*

out, yang artinya untuk laju kegagalan *failure rate increasing* (meningkat). Nilai β yang dihasilkan dari R0, R1, R2 dan R3 memiliki nilai lebih dari 1, sehingga di kategorikan *wear out* dan perlu perhatian khusus pada ban tersebut khususnya untuk *preventive maintenance*nya.

Terkait dengan nilai koefisien maka ada beberapa interpretasi. Pertama, jika nilai $r = 0$ maka ini dapat dikatakan bahwa tidak ada hubungan korelasi. Kedua, bila nilai $r =$ mendekati 0 maka ini dapat diartikan bahwa hubungan antara variabel tersebut sangat lemah atau dapat juga dikatakan bahwa tidak ada hubungan korelasi. Selanjutnya, jika nilai $r = +1$ atau nilainya tersebut mendekati +1 maka ini dapat diartikan bahwa hubungan antara variabel tersebut sangat kuat dan dapat dikatakan positif. Koefisien terakhir yaitu bila nilai $r = -1$ atau mendekati -1 ini berarti hubungan antara variabel tersebut dapat dikatakan bahwa sangat kuat dan negatif.

Pada kriteria Guideford (*guideford empirical rule*) kita dapat menemukan terkait tinggi rendahnya suatu nilai korelasi. Jika nilai adalah < 0.20 artinya tidak ada korelasi. Pada nilai 0.20 sampai < 0.40 maka ini artinya korelasi rendah. Pada nilai 0.40 sampai < 0.70 ini artinya korelasi sedang. Pada nilai 0.70 sampai < 0.90 ini artinya korelasi tinggi. Pada nilai 0.90 sampai < 1.00 maka ini merupakan korelasi sangat tinggi. Sedangkan pada nilai 1.00 maka ini merupakan korelasi sempurna. Dalam distribusi *Weibull* (x dan y), maka nilai r adalah nilai koefisien korelasi antara masing-masing parameter. Pada perhitungan distribusi *Weibull*, maka nilai r harus mendekati nilai 1 (satu) sebagai syarat validitas parameter.

Berdasarkan dari interpretasi nilai koefisien korelasi maka nilai r yang diperoleh memiliki hubungan antara parameter yang cukup kuat dan positif. Apabila dikalkulasikan dengan Guideford maka nilai r yang diperoleh memiliki korelasi yang tinggi. Jika mengacu pada hasil perhitungan diperoleh bahwa r dari R0, R1, R2 dan R3 adalah 0,9, dengan demikian perhitungan diatas memenuhi persyaratan koefisien korelasi (korelasi sangat tinggi).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa *reliability* pada vulkanisir ban pesawat penumpang komersial yang telah dilakukan, maka didapat beberapa parameter yang bisa disimpulkan yaitu dari hasil perhitungan keandalan dihasilkan pada R3 menghasilkan nilai tertinggi yaitu 0,986029, dengan demikian ban yang telah dilakukan vulkanisir memiliki kualitas lebih bagus dari pada ban baru. Hal ini dikarenakan oleh beberapa faktor yang mempengaruhi seperti proses vulkanisir di pabrik dan juga proses operasional. Dengan hasil analisis tersebut perlu dilakukan *preventive maintenance* terhadap ban baru agar keandalan yang dapatkan lebih handal sehingga *cost* yang di keluarkan lebih hemat. MTTF yang dicapai setiap ban baru dan vulkanisir memiliki waktu yang berbeda beda. dengan R2 memiliki waktu tertinggi yang dicapai yaitu 214 *flight cycle*. Hasil perhitungan ini akan menjadi acuan untuk menentukan pada waktu paling tepat dilakukan proses *maintenance*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada civitas akademik Universitas Pancasila yang telah memberikan wadah sebagai media berkegiatan terlebih melakukan penelitian mendalam.

DAFTAR PUSTAKA (10 PT)

- [1] F. M. Dewadi *et al.*, *Konsep Pesawat Terbang*. Kota Solok, Sumatera Barat: PT Mafy Media Literasi Indonesia, 2024.
- [2] M. A. Nova *et al.*, “Pengaruh Engine Bleed Trip Terhadap Tingkat Kebutuhan Pergantian Komponen Pada Pesawat B737-800,” 2024.
- [3] M. A. Nova, L. G. J. Putra, and Z. F. Emzain, “Komparasi Efektivitas Tiga Tipe Starter Generator yang Digunakan Pada Engine Pesawat ATR,” *AVITEC*, vol. 3, no. 2, p. 131, Jul. 2021, doi: 10.28989/avitec.v3i2.1027.
- [4] M. B. Şenol, “Evaluation and prioritization of technical and operational airworthiness factors for flight safety,” *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 92, no. 7, pp. 1049–1061, 2020, doi: 10.1108/AEAT-03-2020-0058.
- [5] M. Kasanga and Dr. T. Malama, “Performance Assessment of the Maintenance Reliability Programs for Flight Safety in the Zambian Aviation Industry,” *International Journal of Research and Scientific Innovation*, vol. 09, no. 12, pp. 05–13, 2022, doi: 10.51244/IJRSI.2022.91201.
- [6] A. Japutra, A. D. Dirgantara, D. Kusuma, and K. D. Lestari, “Pemilihan Material Untuk Landing Gear Pesawat,” vol. 1, no. 1, pp. 42–51, 2025.
- [7] S. A. Alfath and A. H. A. Rasyid, “Analisis Pembebatan Statik Dan Dinamik Pada Pengembangan Axle Main Landing Gear Pesawat Boeing 737-800 Menggunakan Pendekatan Finite Element,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2018.

- [8] L. A. N. Wibawa, "Simulasi Umur Fatik Rangka Main Landing Gear Menggunakan Metode Elemen Hingga," *4/9/2024*, vol. 10, no. 2, pp. 120–126, 2021.
- [9] F. Ramadhan and I. M. Arsana, "Sistem Pemeliharaan Ban Pesawat Terbang Airbus A320," *Jurusan teknik mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 95–102, 2023.
- [10] S. Wahyuni, "Analisis Terhadap Pesawat Penumpang Komersil Wings Air Yang Mengalami Insiden Pecah Ban Menurut Asas Keamanan Dan Keselamatan Konsumen," *Krtha Bhayangkara*, vol. 13, no. 1, pp. 164–187, 2019, doi: 10.31599/krtha.v13i1.19.
- [11] Y. Li and Dr. W. Wang, "Heat Generation of Aircraft Tires at Landing," *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 9, no. 1, pp. 1–17, 2022, doi: 10.15394/ijaaa.2022.1680.
- [12] Roberta Lazzari, "a Comparison Between Safe Life , Damage Tolerance and a Comparison Between Safe Life , Damage Tolerance and Probabilistic Approaches To Aircraft Structure Fatigue Design," *Aerotecnica Missili & Spazio*, vol. 81, no. January 2002, pp. 53–64, 2002.
- [13] Z. Feng, K. Mao, T. Zou, and Y. Yang, "Discussion on airworthiness requirement of widespread fatigue damage - Safe-life methodology or damagetolerance methodology," *Procedia Engineering*, vol. 80, pp. 392–398, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.09.096.
- [14] F. Franciscus, "Feasibility Analysis of Development of Aircraft Tire Retreading Facilities in Indonesia and Its Development Strategy," *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, vol. 6, no. 1, 2021.
- [15] B. Rohit, P. D. Gowda, N. B. Nagaraju, and S. Meghana, "Life and Failure of Aircraft Wheels – A Review," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 520, no. 1, p. 012002, Apr. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/520/1/012002.
- [16] M. Pelt, K. Stamoulis, and A. Apostolidis, "Data analytics case studies in the maintenance, repair and overhaul (MRO) industry," *MATEC Web of Conferences*, vol. 304, p. 04005, 2019, doi: 10.1051/matecconf/201930404005.
- [17] F. Franciscus, "Review Facility Development of Aircraft Tire Retreading in Indonesia," *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, vol. 5, no. 2, p. 4, 2020.
- [18] F. Franciscus, "PENELITIAN FREDDY FRANCISCUS SEMESTER GASAL 2018/2019 S/D SEMESTER GASAL 2020/2021," *Jurnal Teknologi Dirgantara*.
- [19] D. Chen, J. Wu, Y. Wang, B. Su, and Y. Liu, "High-speed tribology behaviors of aircraft tire tread rubber in contact with pavement," *Wear*, vol. 486, p. 204071, 2021.
- [20] F. Franciscus, "FEASIBILITY ANALYSIS OF DEVELOPMENT OF AIRCRAFT TIRE RETREADING FACILITIES IN INDONESIA AND ITS DEVELOPMENT STRATEGY".
- [21] A. B. Irez and E. Bayraktar, "Design of a low-cost aircraft structural material based on epoxy: recycled rubber composites modified with multifunctional nano particles," in *Mechanics of Composite and Multi-functional Materials, Volume 5: Proceedings of the 2019 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, Springer, 2020, pp. 73–80.