

# Pengaruh Konstanta Pegas ( $k$ ) dan Konstanta Redaman ( $c$ ) Pada Pergerakan *Landing Gear* Pesawat Terbang Berawak Menggunakan Simulasi Numerik

Kurnia Hidayat

kurnia.hidayat@lapan.go.id

(29 Desember 2020)

---

## ABSTRAK

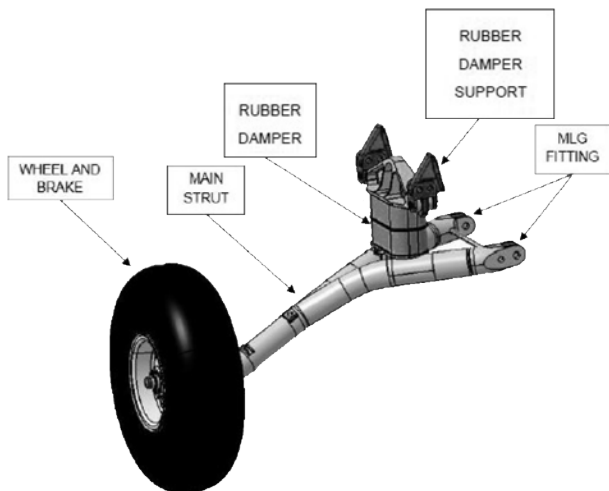
*Landing Gear* adalah salah satu komponen pesawat yang berfungsi untuk menyerap energi saat mendarat, menahan beban pesawat saat taxi (berjalan di landasan) dan melakukan pengereman. Pergerakan *landing gear* saat mendarat akan berisolasi dan mengalami redaman seperti halnya pegas. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis pergerakan *landing gear* secara analitik menggunakan simulasi numerik yang dipengaruhi oleh nilai konstanta pegas ( $k$ ) dan konstanta redaman ( $c$ ) sebagai satu sistem pegas yang terintegrasi. Konstanta redaman ( $c$ ) akan berpengaruh kepada penurunan amplitudo pergerakan *landing gear* dan akan mempercepat menuju kondisi setimbang untuk semakin besar nilai  $c$ . Konstanta pegas ( $k$ ) akan berpengaruh terhadap posisi akhir kesetimbangan *landing gear* dan juga berpengaruh terhadap periode pergerakan *landing gear*.

**Kata kunci:** *landing gear*, simulasi numerik, konstanta pegas, konstanta redaman

# 1. Pendahuluan

## 1.1. Latar Belakang

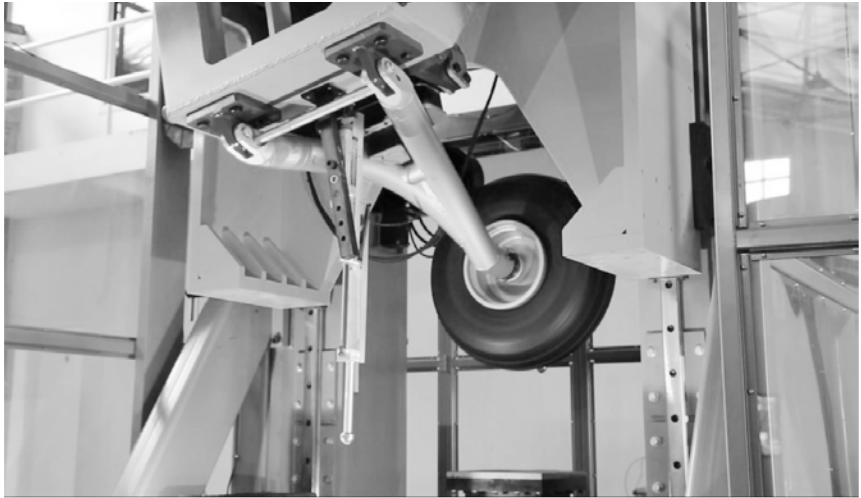
*Landing gear* adalah salah satu komponen pesawat yang terdiri dari ban pesawat dan strut besi penghubung antara ban dengan badan pesawat. *Landing gear* berfungsi untuk menyerap energi saat mendarat, menahan beban pesawat saat taxi (berjalan di landasan) dan melakukan pengereman. Gambar 1 adalah contoh penampakan *landing gear* dari pesawat komuter 19 penumpang.



**Gambar 1.** Gambar *Landing Gear* utama<sup>[1]</sup>

*Landing gear* terdiri atas beberapa bagian utama di antaranya ban, *strut* utama, dan juga karet redaman. Untuk menjamin keselamatan pesawat, *landing gear* harus diuji mampu menahan beban pesawat saat mendarat. Salah satu cara yang dilakukan adalah melakukan *Landing Gear Drop Test* (LGDT). LGDT dilakukan dengan metode berikut. *Landing gear* dipasangkan dengan sebuah massa tertentu sesuai dengan beban yang akan ditahan lalu dijatuhkan dari

ketinggian tertentu dari permukaan tanah. Saat dijatuhkan, posisi *Landing gear* setiap saat dipantau menggunakan sensor tertentu. Gambar 2 adalah alat LGDT yang ada di Pusat Teknologi Penerbangan.



**Gambar 2.** Alat *Landing Gear Drop Test* (LGDT) Pustekbang

Saat dijatuhkan, *landing gear* akan mengalami osilasi dan redaman sama seperti sistem pegas. Pergerakan ini jika tidak teredam dengan baik akan menimbulkan kerusakan pada pesawat karena mengalami hentakan yang cukup banyak ketika mendarat. Untuk itu perlu dilakukan kajian untuk mengetahui nilai konstanta pegas ( $k$ ) dan konstanta redaman ( $c$ ) yang dimiliki *landing gear*.

Di Pustekbang telah tersedia banyak data eksperimen dari hasil uji LGDT yang diambil. Data eksperimen dilakukan dengan mengganti dan mencoba beberapa variasi karet redaman (*rubber dumper*). Kebanyakan data belum diolah dan dianalisis. Data eksperimen ini juga belum pernah diolah dan dianalisis secara analitik berdasarkan pendekatan persamaan pegas.

Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis pergerakan *landing gear* secara analitik menggunakan simulasi numerik. Simulasi ini akan melihat bagaimana pemilihan nilai konstanta pegas ( $k$ ) dan konstanta redaman ( $c$ ) dalam pergerakan *landing gear* secara satu sistem yang terintegrasi

## 1.2. Tujuan

Melihat pengaruh nilai konstanta pegas ( $k$ ) dan konstantan redaman ( $c$ ) terhadap gerak *landing gear*.

## 1.3. Manfaat

Penelitian ini diharapkan akan menjelaskan pengaruh karet redaman terhadap pergerakan *landing gear* sehingga diperoleh karakteristik dari karet redaman yang sesuai yang aman untuk pesawat terbang. Bagi penulis, penelitian ini akan menjadi wawasan dasar untuk mengetahui hubungan antara persamaan matematis dan fenomena fisis pergerakan *landing gear*. Sesuai dengan misi satuan kerja dalam hal meningkatkan kualitas penelitian dan pengembangan teknologi penerbangan, penelitian ini akan menjadi sebuah metode baru yang dapat digunakan untuk melihat pengaruh karet redaman terhadap sistem *landing gear*.

## 1.4. Ruang Lingkup

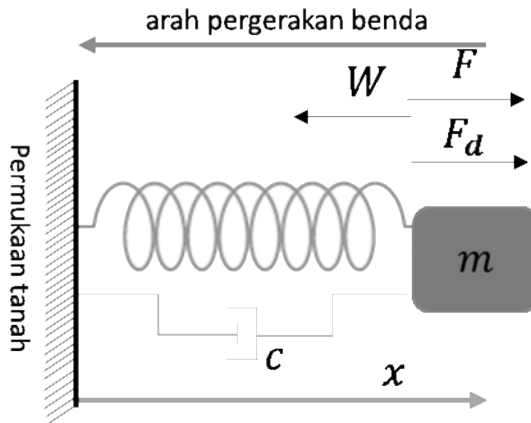
Penelitian ini dibatasi hanya meliputi simulasi numerik terhadap persamaan pegas tentang pemilihan  $k$  dan  $c$  dan hubungannya terhadap hasil gerak *landing gear*.

## 2. Landasan Teori

### 2.1. Sistem Pegas Teredam pada Landing Gear

*Landing gear* pesawat komuter 19 penumpang secara sederhana dapat dimisalkan sebagai sistem pegas dengan peredam. Menurut batasan pada Ruang Lingkup, sistem pegas terdiri dari satu massa, satu pegas dan satu redaman. Pergerakan dari *landing gear* saat mendarat dapat dimodelkan melalui pergerakan dari sistem pegas ini.

Pada umumnya, terdapat tiga gaya yang bekerja pada sistem pegas di *landing gear* yaitu gaya pegas ( $F_x$ ), gaya berat ( $W$ ) dan gaya redaman ( $F_d$ ). Perhatikan Gambar 3, posisi *landing gear* dinyatakan oleh  $x$ , koefisien redaman dinyatakan dengan  $c$ , dan koefisien pegas dinyatakan oleh  $k$ .



Gambar 3. Diagram bebas sistem *Landing Gear*

Untuk pegas dengan panjang  $l$ , Gaya Pegas ( $F_x$ ) yang terjadi linier terhadap perubahan posisi *landing gear* ( $x$ ). Hubungan ini dinyatakan dengan hukum Hooke melalui persamaan berikut.

$$F_x = -k\Delta x \quad (1)$$

$F_x$  adalah gaya dalam satuan Newton,  $k$  adalah konstanta pegas dalam satuan Newton per meter, dan  $\Delta x$  adalah perubahan jarak yang terjadi terhadap kondisi awal panjang pegas  $l$ . Perubahan jarak ini secara matematis dinyatakan sebagai  $\Delta x = x - l$ . Oleh karena itu, gaya pegas yang terjadi pada *landing gear* adalah sebagai berikut.

$$F_x = -k(x - l) \quad (2)$$

Gaya redaman ( $F_d$ ) yang terjadi pada sistem akan sebanding dengan kecepatan benda ( $v = \frac{dx}{dt}$ ). Gaya redaman ( $F_d$ ) dinyatakan oleh Persamaan 3 berikut. Gaya Berat ( $W$ ) dinyatakan oleh Persamaan 4 berikut dimana  $m$  adalah massa total pesawat saat mendarat dan  $g$  adalah gravitasi bumi.

$$F_d = -cv = -c \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

$$W = m \cdot g \quad (4)$$

Jika dimisalkan arah pergerakan benda sebagai arah positif, maka dapat diturunkan persamaan resultan gaya dari sistem pegas ini sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \sum F &= -F_x - F_d + W \\ \sum F &= k(x - l) + c \frac{dx}{dt} + m \cdot g \\ -m \cdot a &= k(x - l) + c \frac{dx}{dt} + m \cdot g \\ -m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} &= k(x - l) + c \frac{dx}{dt} + m \cdot g \\ m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k(x - l) + c \frac{dx}{dt} + m \cdot g &= 0 \\ m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + kx - kl + c \frac{dx}{dt} + mg &= 0 \\ m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx - kl + mg &= 0 \\ \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{c}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x + \left( -\frac{kl}{m} + g \right) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Pada persamaan 5, didapatkan bahwa sistem pergerakan *landing gear* saat mendarat merupakan persamaan linier orde 2 *non homogen*. Penurunan persamaan 5 ini sesuai dengan penurunan dalam Buku *Elementary Differential Equation and Boundary Value Problems* karangan William E Boyce dan Richard C Diprima halaman 192–195<sup>[2]</sup>. Persamaan 5 ini selanjutnya akan menjadi dasar untuk mencari pergerakan grafik yang sesuai untuk koefisien-koefisien tertentu.

## 2.2. Syarat Awal Sistem pada Landing Gear

Pada *Landing Gear Drop Test*, terdapat beberapa kondisi awal yang terjadi saat tes dilakukan. Yang pertama adalah *landing gear* akan dijatuhkan pada ketinggian tertentu dari permukaan tanah ( $x_0$ ). Dari ketinggian  $x_0$  sampai pada ketinggian  $l$  dari permukaan tanah (kondisi saat *landing gear* mencapai tanah), *landing gear* dianggap bergerak jatuh bebas sebelum mulai berisolasi saat Landing Gear mencapai tanah.

Melalui formulasi Gerak Lurus Berubah Beraturan, bisa didapatkan kecepatan *landing gear* sesaat sebelum mencapai tanah. Diketahui bahwa berlaku:

$$t_{\text{tanah}} = \sqrt{\frac{2\Delta h}{g}}$$

$$t_{\text{tanah}} = \sqrt{\frac{2(x_0 - l)}{g}} \quad (6)$$

$$\Delta h = \frac{1}{2}gt_{\text{tanah}}^2$$

$$x_0 - x(t_{\text{tanah}}) = \frac{1}{2}gt_{\text{tanah}}^2$$

$$x(t_{\text{tanah}}) = x_0 - \frac{1}{2}gt_{\text{tanah}}^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 v_{\text{tanah}} &= \sqrt{2g\Delta h} \\
 v_{\text{tanah}} &= \sqrt{2g(x_0 - l)}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Secara fisis  $v_{\text{tanah}}$  merupakan kecepatan awal yang dialami *landing gear* sesaat saat roda pesawat mencapai tanah. Menurut Atik Bintoro (2013)<sup>[3]</sup>, kecepatan awal ini akan menjadi pemicu awal dari isolasi yang terjadi pada *landing gear*. Semakin besar  $v_{\text{tanah}}$ , maka akan semakin besar gaya yang akan menimbulkan isolasi tersebut dan akan mengakibatkan posisi *landing gear* saat isolasi pertama akan jauh lebih dalam (*landing gear* tertekan lebih dalam).

Selanjutnya dari Persamaan (6) dan Persamaan (8), didapatkan syarat awal bagi Persamaan (5) yaitu

$$v\left(\sqrt{\frac{2(x_0 - l)}{g}}\right) = \sqrt{2g(x_0 - l)}$$

Syarat awal tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$x(0) = x_0 \text{ dan } \frac{dx}{dt}\left(\sqrt{\frac{2(x_0 - l)}{g}}\right) = \sqrt{2g(x_0 - l)} \tag{9}$$

Dari Persamaan (5), (6) dan (7), pergerakan posisi *landing gear* dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 x(t) &= x_0, \text{ untuk } t = 0 \\
 x(t) &= x_0 - \frac{1}{2}gt^2, \text{ untuk } 0 < t \leq \sqrt{\frac{2(x_0 - l)}{g}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

$x(t)$  solusi dari Persamaan (5) dengan syarat batas Persamaan (9)



### 2.3. Metode Beda Hingga Tengah

Dalam penelitian ini digunakan Metode Beda Hingga Tengah untuk mencari solusi dan pergerakan dari *landing gear* saat kondisi  $x(\mathbf{t})$  berlaku Persamaan (5). Menurut Harijono Djojodiharjo (2000)<sup>[4]</sup>, turunan pertama dan turunan kedua dari  $x(\mathbf{t})$  dapat dihampiri dengan metode ini sebagai berikut.

$$\frac{dx}{dt}(t_i) = \frac{x(t_{i+1}) - x(t_{i-1}))}{2\Delta t} \quad (11)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2}(t_i) = \frac{x(t_{i+1}) - 2x(t_i) + x(t_{i-1}))}{\Delta t^2} \quad (12)$$

## 3. Hasil dan Analisis

### 3.1. Persamaan Numerik Linier Orde Dua

Simulasi dilakukan dengan membagi waktu pengamatan ( $\mathbf{t}$ ) sama besar (misal sebesar  $\Delta \mathbf{t}$ ). Dengan jumlah partisi maksimal adalah  $N + 1$  (dimana  $N = \text{floor}\left(\frac{\mathbf{t}}{\Delta \mathbf{t}}\right)$ ). Untuk mendapatkan persamaan numerik yang akan digunakan untuk simulasi, dilakukan substitusi Persamaan (11) dan Persamaan (12) ke dalam Persamaan (5).

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{c}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x + \left(-\frac{kl}{m} + g\right) &= 0 \\ \left(\frac{x(t_{i+1}) - 2x(t_i) + x(t_{i-1}))}{\Delta t^2}\right) + \frac{c}{m} \cdot \left(\frac{x(t_{i+1}) - x(t_{i-1}))}{2\Delta t}\right) + \frac{k}{m}x(t_i) + \left(-\frac{kl}{m} + g\right) &= 0 \\ \left(1 + \frac{c}{m}\Delta t\right)x(t_{i+1}) + \left(-2 + \frac{k}{m}\Delta t^2\right)x(t_i) + \left(1 - \frac{c}{m}\Delta t\right)x(t_{i-1}) + \left(-\frac{kl}{m}\Delta t^2 + g\Delta t^2\right) &= 0 \\ \left(1 + \frac{c}{m}\Delta t\right)x(t_{i+1}) &= \left(2 - \frac{k}{m}\Delta t^2\right)x(t_i) + \left(-1 + \frac{c}{m}\Delta t\right)x(t_{i-1}) + \left(\frac{kl}{m}\Delta t^2 - g\Delta t^2\right) \\ x(t_{i+1}) &= \frac{\left(2 - \frac{k}{m}\Delta t^2\right)}{\left(1 + \frac{c}{m}\Delta t\right)}x(t_i) + \frac{\left(-1 + \frac{c}{m}\Delta t\right)}{\left(1 + \frac{c}{m}\Delta t\right)}x(t_{i-1}) + \frac{\left(\frac{kl}{m}\Delta t^2 - g\Delta t^2\right)}{\left(1 + \frac{c}{m}\Delta t\right)} \end{aligned} \quad (13)$$

Persamaan (13) akan diterapkan untuk waktu  $t > t_{\text{tanah}}$  dimana  $t_{\text{tanah}}$  bernilai seperti pada Persamaan (6). Untuk  $0 < t < t_{\text{tanah}}$ , persamaan numerik yang digunakan adalah Persamaan 14 berikut.

$$x(t_i) = x_0 - \frac{1}{2}g(\Delta t * (i - 1))^2 \quad (14)$$

Misalkan posisi partisi saat *Landing Gear* mencapai tanah adalah  $n$ , maka berlaku persamaan numerik dari Persamaan (8) adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt}(t_n) &= \sqrt{2g(x_0 - l)} \\ \frac{x(t_{n+1}) - x(t_{n-1})}{2\Delta t} &= \sqrt{2g(x_0 - l)} \\ x(t_{n+1}) &= x(t_{n-1}) + 2\Delta t\sqrt{2g(x_0 - l)} \end{aligned} \quad (15)$$

Sehingga, didapatkan beberapa titik partisi  $x$  yang telah diberikan nilainya, yaitu  $x(t_1) = x_0$  dan  $x(t_{n+1}) = x(t_{n-1}) + 2\Delta t\sqrt{2g(x_0 - l)}$ .

### 3.2. Hasil Simulasi dan Analisis

Simulasi dilakukan dengan nilai parameter seperti pada Tabel 1 berikut.

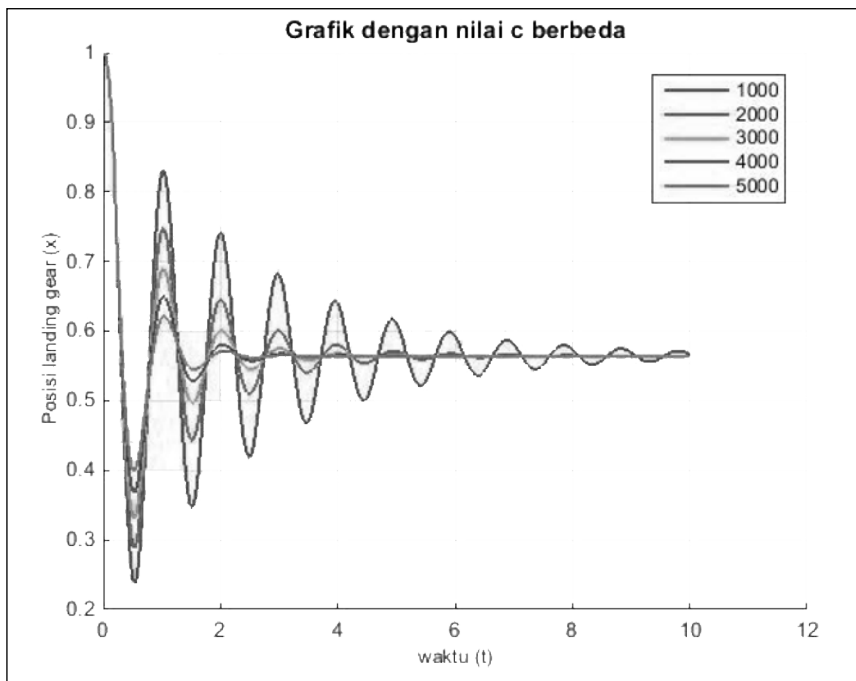
**Tabel 1.** Nilai Parameter yang digunakan dalam simulasi

|                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Massa ( $m$ )                | 2400 kg               |
| $\Delta t$                   | 9.5e-3 s              |
| Percepatan gravitasi ( $g$ ) | 9.81 m/s <sup>2</sup> |
| $x_0$                        | 1 m                   |
| $l$                          | 0.8 m                 |
| Waktu Pengamatan ( $t$ )     | 10 s                  |

Massa seberat 2400 kg adalah massa total dari alat LGDT beserta dengan *landing gear* yang pernah dilakukan pengujian di Pusat Teknologi Penerbangan. Pemilihan panjang *landing gear* ( $l$ ) berdasarkan perkiraan

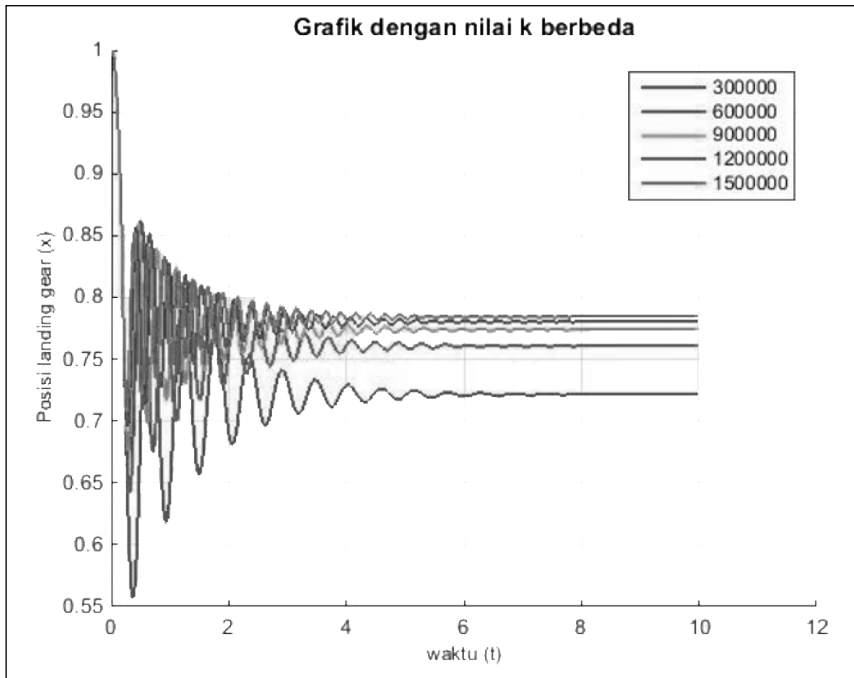
panjang dari *landing gear* pesawat komuter 19 penumpang. Dalam tesis Dony Hidayat (2017) [1], dipilih *drop displacement* sebesar 0.2 meter. *Drop displacement* ini adalah ketinggian *landing gear* dari tanah sebelum dilepaskan saat pengujian. Oleh karena itu, dipilih  $x_0$  bernilai 1 meter (berasal dari penjumlahan panjang *landing gear* dan besar *drop displacement*). Pemilihan  $x_0$  menurut persamaan (8) akan berpengaruh terhadap  $v_{\text{tanah}}$ . Sehingga untuk keperluan regulasi CASR no 23.473 (d)<sup>[5]</sup>, nilai ini dapat diubah.

Terdapat dua jenis simulasi nimerik yang dilakukan. Simulasi pertama adalah dengan memilih konstanta pegas ( $k$ ) tetap. Dalam simulasi ini dipilih nilai konstanta pegas ( $k$ ) 100.000  $N/m$ . Nilai konstanta redaman ( $c$ ) disimulasikan dalam lima nilai berbeda yaitu 1000, 2000, 3000, 4000 dan 5000  $Ns/m$ . Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



**Gambar 4.** Grafik dengan nilai  $c$  berbeda dan  $k$  bernilai  $1e5 N/m$

Simulasi kedua adalah dengan memilih konstanta redaman ( $c$ ) tetap. Dalam simulasi ini dipilih nilai konstanta redaman ( $c$ )  $2000 \text{ Ns/m}$ . Nilai konstanta pegas ( $k$ ) disimulasikan dalam lima nilai berbeda yaitu  $3e5$ ,  $6e5$ ,  $9e5$ ,  $1.2e6$ , dan  $1.5e6 \text{ N/m}$ . Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



**Gambar 5.** Grafik dengan nilai  $k$  berbeda dan  $c$  bernilai  $2e3 \text{ N/m}$

Pemilihan nilai konstanta pegas ( $k$ ) dan konstanta redaman ( $c$ ) pada simulasi ini tidak jauh berbeda dari yang dilakukan oleh Dony Hidayat dkk (2017) [6]. Dalam paper tersebut, nilai konstanta pegas ( $k$ ) yang digunakan adalah  $5e5$ ,  $5.5e5$  dan  $5.9e5 \text{ N/m}$  dan nilai konstanta redaman ( $c$ ) yang digunakan adalah 1600, 1800 dan  $2000 \text{ Ns/m}$ .

Pada simulasi pertama Gambar 4, untuk nilai konstanta redaman ( $c$ ) yang berbeda terjadi perbedaan amplitudo pada kelima grafik. Nilai  $c$  terkecil 1000  $Ns/m$  menunjukkan amplitudo yang paling besar dan lebih lambat berhenti berisolasi dibandingkan dengan data grafik lainnya. Sebaliknya nilai  $c$  terbesar 5000  $Ns/m$  menunjukkan amplitudo yang kecil dan lebih cepat berhenti berisolasi dibandingkan dengan data grafik lainnya.

Perlu diperhatikan pada Simulasi Pertama Gambar 4, tidak terdapat perbedaan periode dari kelima grafik. Periode adalah bilangan positif terkecil  $p$  sehingga terjadi pengulangan nilai grafik [7]. Dalam Gambar 4, posisi kelima grafik saat posisi *landing gear* bernilai nol jatuh di waktu yang sama. Dan pengulangan nilai nol ini juga jatuh di waktu yang sama. Menurut William E Boyce dan Richard C Diprima dalam buku *Elementary Differential Equation and Boundary Value Problems* hal 197 mengatakan bahwa periode pada pergerakan sistem ini adalah

$$T = 2\pi \left( \frac{m}{k} \right)^{\frac{1}{2}} [2].$$

Sehingga jika dalam simulasi ini dipilih nilai  $k$  yang selalu tetap, maka akan mengakibatkan periode ( $T$ ) sistem yang tetap.

Pada simulasi kedua Gambar 5, untuk nilai konstanta pegas ( $k$ ) yang berbeda terjadi perbedaan posisi solusi *landing gear* saat telah teredam. Pada saat *landing gear* berhenti berisolasi, tidak ada percepatan dan kecepatan yang terjadi pada *landing gear*. Dengan kata lain untuk waktu yang sangat besar (misal  $t_{\infty}$ ), maka berlaku  $\frac{d^2}{dt^2}x(t_{\infty}) = 0$  dan  $\frac{d}{dt}x(t_{\infty}) = 0$ . Jika dua kondisi ini disubstitusikan pada Persamaan 5, maka didapatkan persamaan  $\frac{k}{m}x(t_{\infty}) + \left(-\frac{kl}{m} + g\right) = 0$ . Sehingga posisi *landing gear* saat telah berhenti berisolasi adalah  $x(t_{\infty}) = \left(1 - \frac{m}{k}g\right)$ .

$$x(t_{\infty}) = \left(1 - \frac{m}{k}g\right) \quad (16)$$

Berikut akan dibandingkan posisi *landing gear* saat  $t = 10$  s antara hasil simulasi dan hasil Persamaan 16 dari simulasi kedua.

**Tabel 2.** Perbandingan posisi *landing gear* saat  $t = 10$  s di Simulasi Kedua

| Konstanta redaman ( $k$ ) | Hasil Simulasi ( $u(N + 1)$ ) | Solusi Persamaan 16 |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 300000 $N/m$              | 0.7215                        | 0.72152             |
| 600000 $N/m$              | 0.7608                        | 0.76076             |
| 900000 $N/m$              | 0.7738                        | 0.77384             |
| 1200000 $N/m$             | 0.7804                        | 0.78038             |
| 1500000 $N/m$             | 0.7843                        | 0.784304            |

Berdasarkan data pada Tabel 2 dapat disimpulkan bahwa solusi numerik telah sesuai dengan solusi analitik dari persamaan 16. Selain itu dapat disimpulkan bahwa pergantian nilai  $k$  dapat mempengaruhi posisi kesetimbangan *landing gear*. Semakin kecil nilai  $k$ , semakin besar jarak posisi kesetimbangan dari panjang *landing gear* awal  $l$ . Sehingga untuk mengatur posisi setimbang dapat dilakukan dengan pergantian nilai  $k$ .

## 4. Penutup

### 4.1. Kesimpulan

Konstanta redaman ( $c$ ) akan berpengaruh kepada amplitudo beserta penurunan amplitudo pergerakan *landing gear*. Semakin besar nilai  $c$ , maka akan semakin cepat *landing gear* mencapai posisi kesetimbangan. Sedangkan konstanta pegas ( $k$ ) akan berpengaruh kepada posisi akhir kesetimbangan *landing gear*. Semakin kecil nilai  $k$ , maka akan semakin besar jarak posisi kesetimbangan *landing gear* terhadap panjang awal *landing gear*  $l$ . Berdasarkan persamaan periode, dapat juga dikatakan bahwa konstanta pegas ( $k$ ) juga akan berpengaruh kepada periode pergerakan *landing gear*.

## Daftar Pustaka

- [1] Hidayat, Dony,. 2017. Simulasi dan Pengujian Eksperimental Main Landing Gear Pesawat Komuter Kapasitas 19 Penumpang. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Depok.
- [2] Boyce, William E, dan Diprima, Richard C,. 2012. *Elementary Differential Equation and Boundary Value Problems 10th Edition*. US : JohnWiley & Sons, Inc.
- [3] Bintoro, Atik,. 2013. Analisis Beban Hentak Struktur Penyangga Landing Gear Pesawat Nirawak LSU 03. Jurnal Teknologi Dirgantara Vol 10 No 2.
- [4] Djojodihardjo, Harijono,. 2000. Metode Numerik. Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama.
- [5] Kemenhub, *Civil Aviation Safety Regulations (CASR) Part 23 Amd. 2*, 2014.
- [6] Hidayat, Doni, Istiyanto, Jos, Sumarsono, DA, & Marta, Aryandi. 2017. Investigasi Gaya Kontak/Impak Pada Main Landing Gear Pesawat Komuter Dengan Pendekatan Multi-Body. Jurnal Teknologi Dirgantara.
- [7] <https://asimtot.wordpress.com/2011/06/19/periode-dan-amplitudo-fungsi-trigonometri/>, diakses pada 24 Agustus 2018.