

Model Sederhana Gerak Meteor di Atmosfer *The Simple Model of Meteor Motion in the Atmosphere*

Arif Alfatah dan Muhammad Farchani Rosyid
Jurusan Fisika FMIPA UGM
farchani@ugm.ac.id

Abstrak

Telah dirumuskan model persamaan gerak meteor di atmosfer akibat pengaruh perubahan medan gravitasi bumi dengan teori gangguan. Dalam perumusan tersebut, meteor dianggap sebagai sebuah bola padat bulat sempurna, kelengkungan permukaan bumi tidak diperhitungkan, gerak rotasi bumi tidak berpengaruh terhadap gerakan meteor, dan medan gravitasi bumi berubah terhadap ketinggian. Model persamaan gerak meteor dirumuskan melalui beberapa tinjauan, yaitu gesekan diabaikan dan gesekan konstan. Selanjutnya, ditampilkan dalam bentuk lintasan gerak meteor di atmosfer akibat pengaruh perubahan medan gravitasi bumi. Penggambaran lintasan tersebut menggunakan model persamaan gerak meteor yang telah di dapatkan terbatas pada dua dimensi.

Kata kunci: meteor, perturbation theory, the gravitational field

Abstract

The model equations of motion of the meteor in the atmosphere due to the influence of changes in Earth's gravitational field has been formulated by the use perturbation theory. In the formulation, meteor regarded as a solid ball perfectly round, not taken into account the curvature of the earth's surface, the motion of the Earth's rotation does not affect the movement of the meteor, and the Earth's gravitational field varies with altitude. Meteor motion equation model formulated by some reviewers, i.e., negligible friction and constant friction. Furthermore, displayed in the form of meteor trajectories in the atmosphere due to the influence of changes in Earth's gravitational field. The depiction of the trajectory of the meteor motion equation model that has been limited to two-dimensional.

Keywords: meteor, perturbation theory, the gravitational field

1. Pendahuluan

Kajian secara teori fisika mengenai fenomena meteor (terutama dinamikanya) pertama kali diungkapkan oleh Ernst J. Öpik pada tahun 1922. Öpik menjelaskan antara lain berkaitan tentang hubungan antara variabel massa dan kecepatan meteor. Intensitas radiasi sebanding dengan massa penguapan yang dibebaskan tiap satu satuan waktu, dengan kata lain kecerahan radiasi bisa digunakan untuk mengukur tingkat ablasi. Garis cahaya atau variasi kecerahan meteor sepanjang jalurnya, digunakan untuk menghitung kerapatan atmosfer (Opik, 2004).

Asumsi dasar yang digunakan oleh para peneliti untuk perumusan gerak meteor dalam atmosfer, pada umumnya mengabaikan perubahan medan gravitasi atau dengan kata lain kuat medan gravitasi yang mempengaruhi meteor selama geraknya adalah konstan. Penelitian ini akan merumuskan model persamaan gerak meteor di atmosfer

dalam pengaruh perubahan medan gravitasi bumi dengan teori gangguan dan menggambarkan lintasan gerak meteor di atmosfer dalam pengaruh medan gravitasi bumi

2. Meteor, the Shooting Star

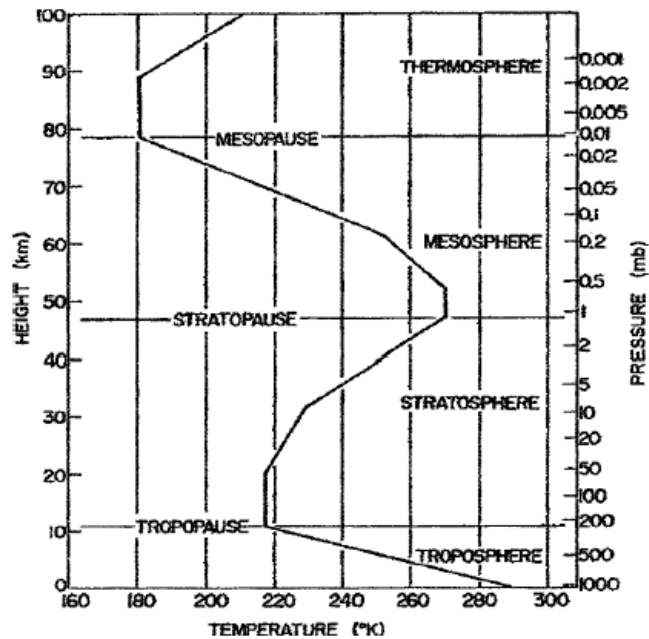
Meteoroid merupakan benda-benda yang mengorbit Matahari dan sedang menuju tumbukan dengan benda-benda seperti planet/satelit. Meteor merupakan serpihan meteoroid yang memasuki atmosfer bumi dan mengalami gesekan dengan atmosfer sehingga terlihat seperti garis cahaya terang di langit, kadang disebut "bintang jatuh (*shooting star*)". Meteor besar dan terang disebut bola api (*fireball*). Meteorit merupakan pecahan/sisa meteor yang mendarat di permukaan planet/satelit (Palen, 2002).

Meteoroid memasuki atmosfer dengan kisaran kecepatan sebesar 11000 m/s sampai 72000 m/s dan pada kecepatan tertentu mengalami gerak jatuh bebas hingga menumbuk bumi. Kebanyakan meteor muncul pada ketinggian antara 80 km sampai 110 km, di mana kerapatan udara menjadi cukup tinggi dan memungkinkan terjadinya proses ablasi. Ketinggian lapisan meteor ini bervariasi dan menjadi lebih besar pada saat-saat aktivitas matahari tinggi. Sebuah meteor tingkat kecerahannya mencapai maksimum pada ketinggian 95 km. Biasanya, sebuah meteor secara kasat mata akan tampak dan bertahan paling lama antara 0,1 dan 0,8 detik. Meteor yang sangat terang kadang-kadang meninggalkan bekas lintasan bercahaya samar-samar dan bisa menunjukkan semburan cerah (*flare*) di sepanjang lintasan tersebut (Robinson, 2003).

Secara umum meteorit dibedakan menjadi dua, yaitu meteorit jatuhan (*falls*) dan temuan (*finds*). Klasifikasi atau taksonomi meteorit berdasarkan komposisi dan kelas-kelasnya dibedakan menjadi meteorit tak terbedakan (*undifferentiated*) dan meteorit terbedakan (*differentiated*). Meteorit tak terbedakan contohnya meteorit batuan (*stony*) yaitu chondrites, sedangkan meteorit terbedakan contohnya meteorit batuan achondrites, meteorit batuan-besi (*stony-iron*), dan meteorit besi (*iron*) (Palen, 2002).

3. Atmosfer dan Medan Gravitasi Bumi

Atmosfer tersusun atas beberapa lapisan, yang dinamai menurut gejala fisis yang terjadi di lapisan tersebut. Klasifikasi lapisan atmosfer berdasarkan suhu dan tekanan biasanya terbagi menjadi beberapa lapisan, yaitu *troposfer* ($\pm 0 - 10$ km), *stratosfer* ($\pm 10 - 40$ km), *mesosfer* ($\pm 40 - 80$ km), *termosfer* ($\pm 80 - 560$ km), dan *eksosfer* (± 600 km ke atas). Meteor mulai bersinar karena proses ablasi pada ketinggian sekitar 110 km (bagian bawah lapisan termosfer) dan mulai terbakar pada ketinggian sekitar 80 km (bagian atas lapisan mesosfer). Sedangkan eksosfer adalah lapisan atmosfer yang paling luar dan pada lapisan ini terdapat pantulan cahaya matahari yang dipantulkan oleh partikel debu meteoroid (Saha, 2008).



Gambar 1: Penyebaran suhu rata-rata udara arah vertikal di atmosfer sesuai standar USA tahun 1962.

Medan gravitasi g adalah minus gradien potensial gravitasi, dituliskan;

$$g(r) = -grad \psi = -\mathbf{i} \frac{d\psi}{dx} - \mathbf{j} \frac{d\psi}{dy} - \mathbf{k} \frac{d\psi}{dz} \quad (1)$$

dikarenakan pengaruh medan gravitasi terhadap benda di atmosfer bumi arah sumbu x dan y sangat kecil, maka penulis bisa mengabaikannya, sehingga medan gravitasi yang dialami sebuah benda pada ketinggian z di atas permukaan bumi bisa dinyatakan dalam bentuk:

$$g(r) = -\mathbf{k} \frac{d\psi}{dz} = -g(z)\mathbf{k} \quad (2)$$

besarnya medan gravitasi pada ketinggian z bisa dinyatakan;

$$g(z) = \frac{GM}{(R+z)^2} \quad (3)$$

jika di pertimbangkan nilai z , maka medan gravitasi tidak konstan nilainya dan dengan pertimbangan nilai tersebut ($R \gg z$) bisa diuraikan menggunakan deret Taylor seperti pada persamaan di bawah;

$$g(z) = \frac{GM}{R^2} - \frac{2GM}{R^3} z + \frac{3GM}{R^4} z^2 - \dots \quad (4)$$

dengan memisalkan $K = \frac{GM}{R^2}$ dan $\varepsilon = \frac{1}{R}$, maka didapatkan bentuk persamaan;

$$g(z) = K - 2K\varepsilon z + 3K\varepsilon^2 z^2 - \dots \quad (5)$$

4. Persamaan Gerak Meteor

Anggapan baru dengan meninjau meteor ketika memasuki atmosfer bumi akan mengalami gerak jatuh bebas dipercepat dengan medan gravitasi tidak konstan, jika memperhitungkan teori gangguan, maka akan didapatkan solusi persamaan gerak jatuh bebas yang baru.

$$z(t) = (B + D\varepsilon + 3BD\varepsilon^2) + (A + C\varepsilon + 3AD\varepsilon^2 + 3BC\varepsilon^2)t + \left(\frac{1}{2}K - 6\varepsilon K - \frac{3}{2}D\varepsilon^2K + 3AC\varepsilon^2 + 3B^2\varepsilon^2\right)t^2 - \left(\frac{1}{3}A\varepsilon K - \frac{3}{2}C\varepsilon^2K + 4AB\varepsilon^2K\right)t^3 + \left(\frac{1}{12}\varepsilon K^2 + A^2\varepsilon^2K + \frac{5}{4}B\varepsilon^2K^2\right)t^4 - \left(\frac{3}{4}A\varepsilon^2K^2\right)t^5 + \left(\frac{1}{8}\varepsilon^2K^3\right)t^6 \quad (6)$$

Gesekan yang terjadi antara fluida atmosfer dengan meteor yang jatuh, akan mempengaruhi bentuk persamaan gerak meteor. Gaya gesekan yang berperan bisa ditinjau memenuhi hukum Stokes dan dinyatakan dengan persamaan

$$f = 6\pi\mu R_o \cdot v = \beta \left(\frac{dr}{dt}\right) \quad (7)$$

Dengan medan gravitasi yang ada hanya pada sumbu z sebesar $g(z) = K - 2K\varepsilon z + 3K\varepsilon^2 z^2 + \dots$ dan gesekan yang berperan pada tiga arah sumbu x , y , dan z , sehingga pada arah sumbu x dan y didapatkan persamaan;

$$x = c_1 + c_2 \cdot e^{-\frac{\beta}{m}t} \quad (8)$$

$$y = c_1 + c_2 \cdot e^{-\frac{\beta}{m}t} \quad (9)$$

Sedangkan pada arah sumbu z , didapatkan solusi akhir

$$z(t) = \left(c_4 + c_8\varepsilon + 3c_4c_8\varepsilon^2\right) + \left(c_2 + c_6\varepsilon - 2c_2\varepsilon \frac{Km^2}{\beta^2} + 3c_2c_8\varepsilon^2 - 3c_6\varepsilon^2 \frac{Km}{\beta} + 3c_4c_6\varepsilon^2 - 3c_2c_4\varepsilon^2 - 6c_2c_4\varepsilon^2 \frac{Km^2}{\beta^2}\right)e^{-\frac{\beta}{m}t} - \left(3c_2c_6\varepsilon^2 - 6c_2^2\varepsilon^2 \frac{Km^2}{\beta^2}\right)e^{-\frac{2\beta}{m}t} - \left(6c_2c_4\varepsilon^2 \frac{Km}{\beta} + 6c_2\varepsilon^2 \frac{K^2m^3}{\beta^3}\right)t \cdot e^{-\frac{\beta}{m}t} + \left(\frac{Km}{\beta} - 2c_4\varepsilon \frac{Km}{\beta} + 3c_8\varepsilon^2 \frac{Km}{\beta} - 6c_4^2\varepsilon^2 \frac{Km}{\beta}\right)t + \left(3c_2\varepsilon^2 \frac{K^2m^2}{\beta^2}\right)t^2 \cdot e^{-\frac{\beta}{m}t} + \left(\varepsilon \frac{K^2m^2}{\beta^2} + 9c_4\varepsilon^2 \frac{K^2m^2}{\beta^2}\right)t^2 - \left(3\varepsilon^2 \frac{K^3m^3}{\beta^3}\right)t^3 \quad (10)$$

5. Model Sederhana Gerak Meteor

Model pertama (Model 1) gerak meteor yang ditampilkan adalah dengan tinjauan medan gravitasi vertikal yang diterapkan konstan serta gesekan diabaikan. Dengan persamaan gerak vertikal dan horisontal diwakili oleh;

$$z = z_o + \dot{z}.t + \frac{1}{2} \ddot{z} t^2 \quad (11)$$

$$x = x_o + \dot{x}_o.t \quad (12)$$

Model kedua (Model 2) gerak meteor yang ditampilkan adalah dengan tinjauan medan gravitasi vetikal yang diterapkan berubah serta gesekan diabaikan. Dengan persamaan gerak vertikal dan horisontal diwakili oleh;

$$z = \left(v_o \cdot \cos \theta \right) t + \left(\frac{1}{2} K - 6\varepsilon K + \frac{3}{4} \varepsilon (v_o \cdot \cos \theta)^2 \right) t^2 + \left(\frac{1}{6} v_o \cdot \cos \theta \cdot \varepsilon K - \frac{3}{4} v_o \cdot \cos \theta \cdot \varepsilon K \right) t^3 + \left(\frac{1}{12} \varepsilon K^2 + \frac{1}{4} (v_o \cdot \cos \theta)^2 \varepsilon^2 K \right) t^4 - \left(\frac{3}{8} v_o \cdot \cos \theta \cdot \varepsilon^2 K^2 \right) t^5 + \left(\frac{1}{8} \varepsilon^2 K^3 \right) t^6 \quad (13)$$

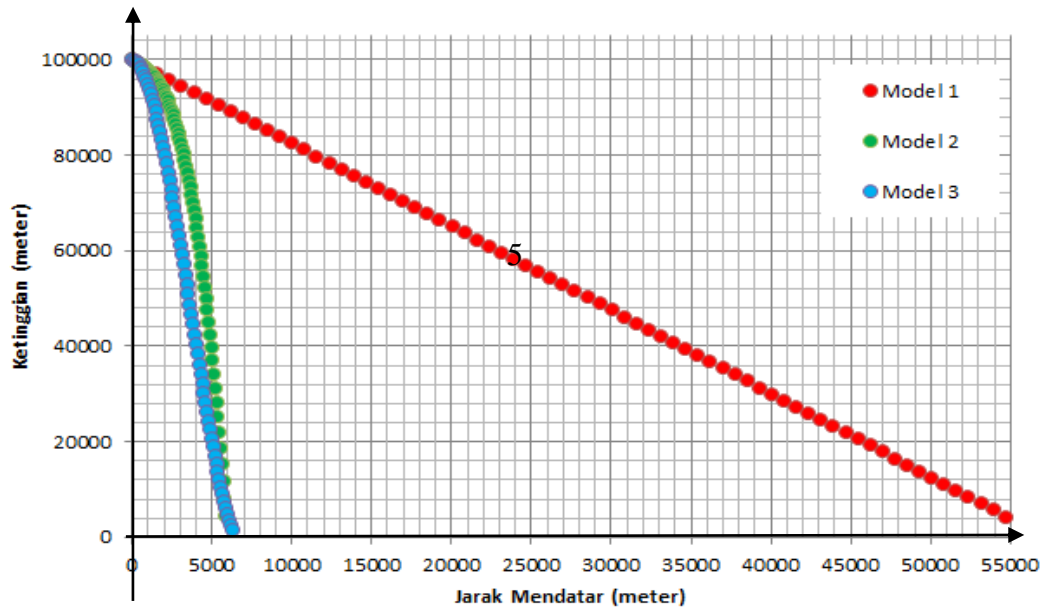
$$x = x_o + \dot{x}_o.t \quad (14)$$

Model ketiga (Model 3) gerak meteor yang ditampilkan adalah dengan tinjauan medan gravitasi vetikal yang diterapkan berubah serta ada gesekan konstan yang berpengaruh. Dengan persamaan gerak vertikal dan horisontal diwakili oleh;

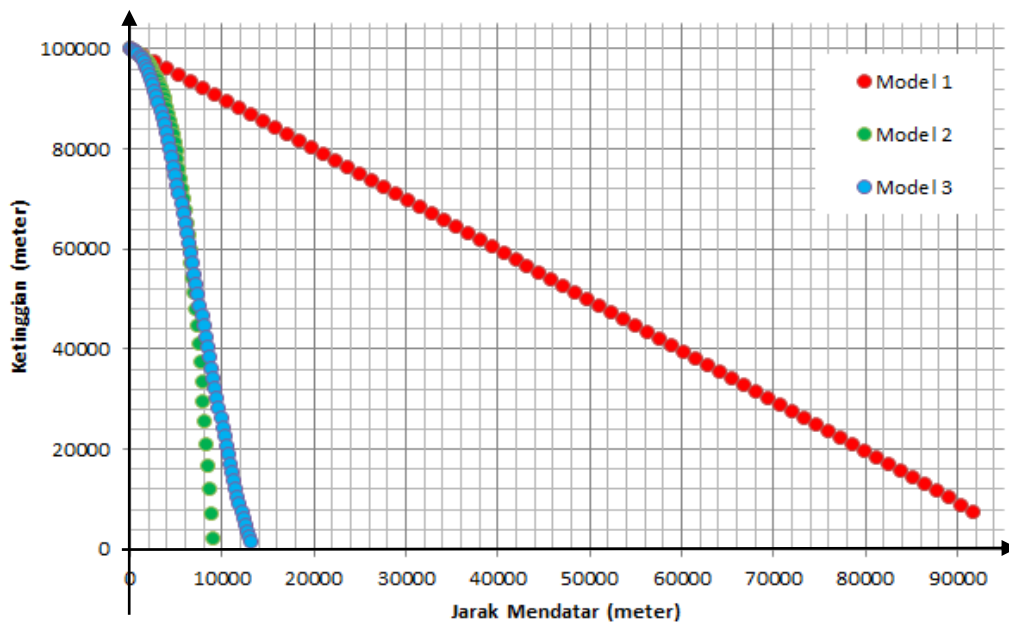
$$z = \left(8 \frac{Km}{\beta} v_o \cos \theta \right) e^{-\frac{\beta}{m}t} - \left(6\varepsilon^2 \frac{Km^2}{\beta^2} v_o \cos \theta \right) e^{-\frac{2\beta}{m}t} - \left(6\varepsilon \frac{Km^2}{\beta^2} v_o \cos \theta \right) t \cdot e^{-\frac{\beta}{m}t} + \left(\frac{Km}{\beta} - 2\varepsilon \frac{Km^2}{\beta^2} v_o \cos \theta + 2\varepsilon \frac{K^2 m^3}{\beta^3} - 3\varepsilon^2 \frac{m^3}{\beta^3} v_o^2 \cos^2 \theta \right) t + \left(\varepsilon \frac{K^2 m^2}{\beta^2} + 9\varepsilon^2 \frac{K^2 m^3}{\beta^3} v_o \cos \theta - 9\varepsilon^2 \frac{K^3 m^4}{\beta^4} \right) t^2 - \left(3\varepsilon^2 \frac{K^3 m^3}{\beta^3} \right) t^3 \quad (15)$$

$$x = \frac{m \cdot v_o \cdot \sin \theta}{\beta} - \frac{m \cdot v_o \cdot \sin \theta \cdot e^{-\frac{\beta}{m}t}}{\beta} \quad (16)$$

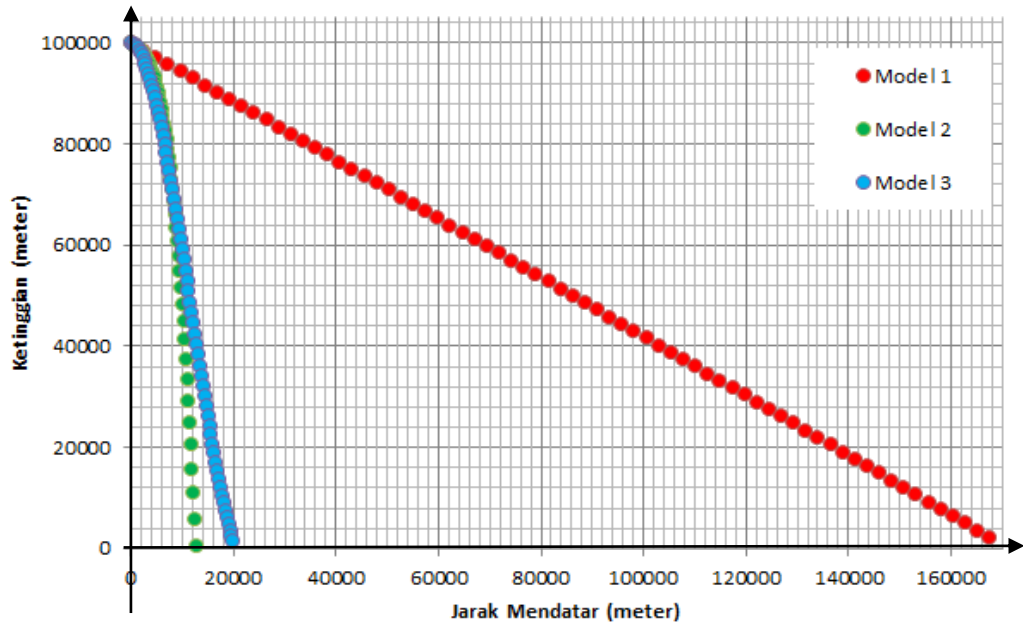
dengan $\beta = 6\pi\mu R_o$, μ adalah koefisien viskositas udara pada suhu 20°C yaitu sebesar 0,000018 kg/m.s, R_o adalah jejari rata-rata meteor sampel yaitu penulis ambil sebesar 1 m dan m adalah massa sampel meteor yaitu penulis ambil 10 kg, serta sudut tumbukan θ yang berbeda-beda, maka didapatkan model lintasan yang diinginkan.



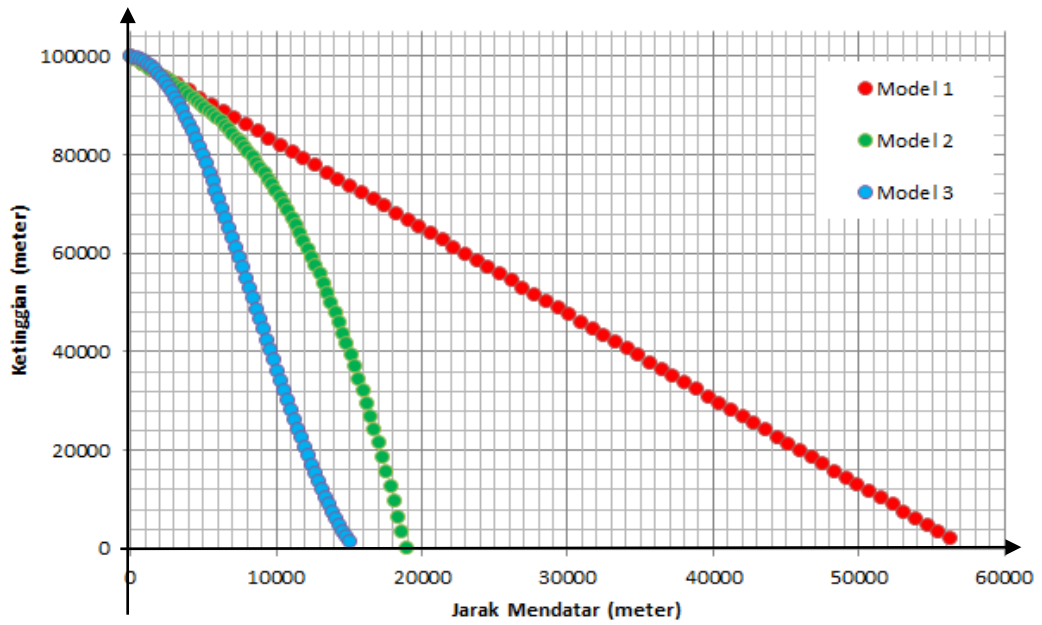
Gambar 2. Tiga model gerak meteor untuk sudut tumbukan 30° dan kecepatan awal 11000 m/s.



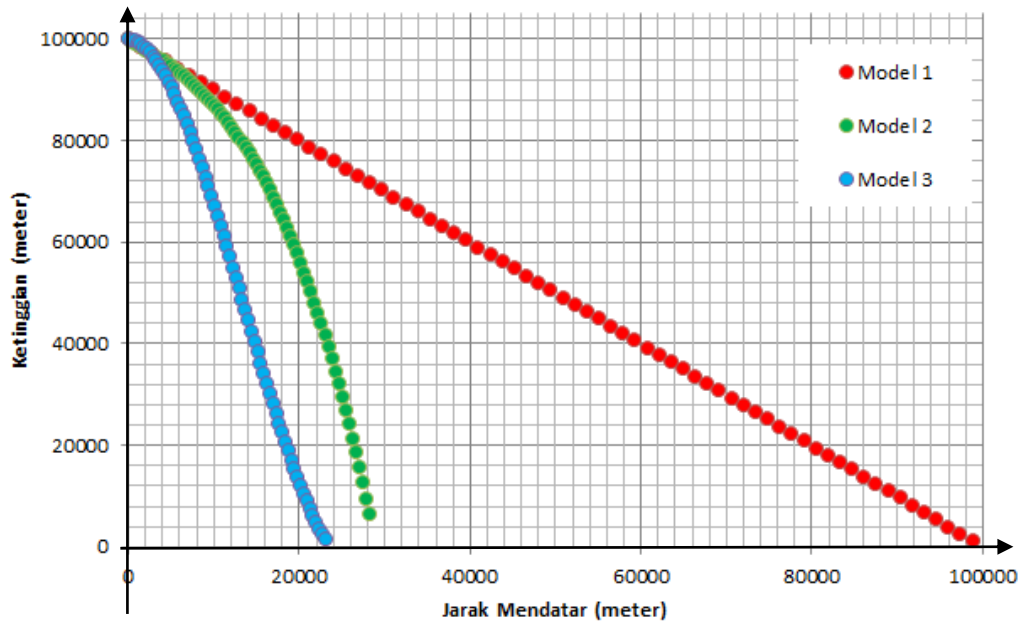
Gambar 3. Tiga model gerak meteor untuk sudut tumbukan 45° dan kecepatan awal 11000 m/s.



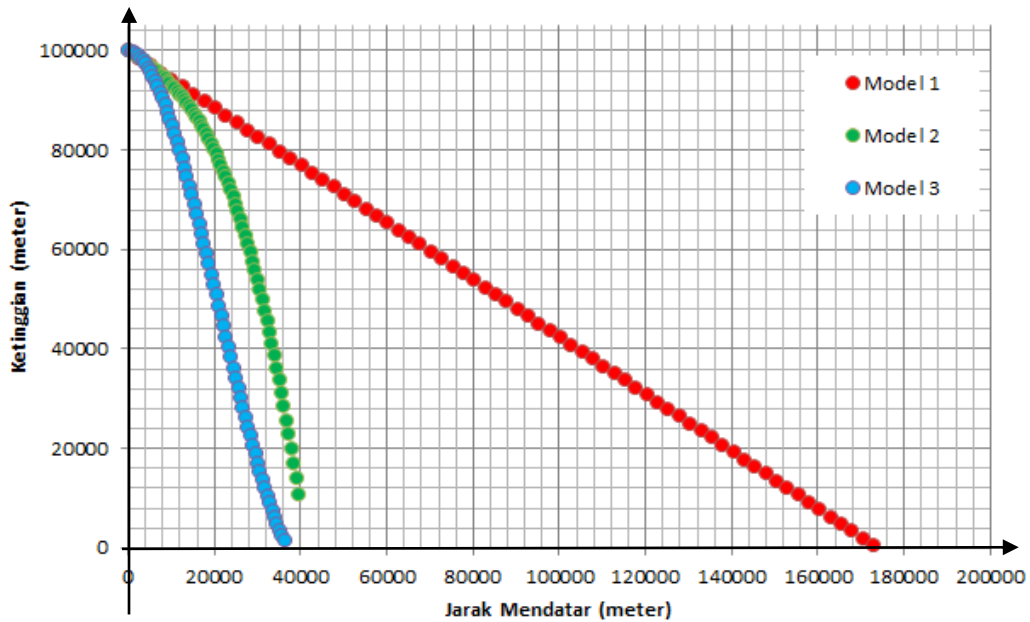
Gambar 4. Tiga model gerak meteor untuk sudut tumbukan 60° dan kecepatan awal 11000 m/s.



Gambar 5: Tiga model gerak meteor untuk sudut tumbukan 30° dan kecepatan awal 72000 m/s.



Gambar 6: Tiga model gerak meteor untuk sudut tumbukan 45° dan kecepatan awal 72000 m/s.



Gambar 7: Tiga model gerak meteor untuk sudut tumbukan 60° dan kecepatan awal 72000 m/s.

Anggapan dasar untuk model 1 gerak meteor adalah selama gerakanya, meteor dipengaruhi oleh medan gravitasi bumi konstan dan gesekan diabaikan. Anggapan dasar untuk model 2 gerak meteor adalah selama gerakanya, meteor dipengaruhi oleh medan gravitasi bumi tidak konstan dan gesekan diabaikan. Sedangkan, anggapan dasar untuk

model 3 gerak meteor adalah selama geraknya, meteor dipengaruhi oleh medan gravitasi bumi konstan dan gesekan konstan diperhitungkan.

Model 1 gerak meteor pada gambar 2 sampai gambar 7 di atas, terlihat bahwa perubahan ketinggian dengan perubahan jarak horisontal hubungannya linier. Artinya, perubahan ketinggian dan jarak horisontal selalu konstan. Padahal, jika penulis melihat persamaan gerak arah vertikal dengan arah horisontal maka akan menghasilkan bentuk gerak peluru/ parabolik. Hal ini dikarenakan kecepatan awal meteor sangat besar sehingga gerak peluru yang terbentuk tidak begitu terlihat.

Model 2 gerak meteor pada gambar di atas, menjelaskan bahwa perubahan ketinggian dengan perubahan jarak horisontal hubungannya parabolik. Artinya, perubahan ketinggian semakin besar dan perubahan jarak horisontal konstan sehingga persamaan kedua ini mampu menampilkan dengan lebih jelas bentuk gerak peluru meteor. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan teori gangguan bisa menampilkan gerak meteor di atmosfer dalam bentuk gerak parabolik.

Model 3 gerak meteor pada gambar di atas, menjelaskan bahwa perubahan ketinggian dengan perubahan jarak horisontal hubungannya parabolik dengan arah parabolik berubah. Hal ini memberi pengertian bahwa pada awalnya, perubahan ketinggian semakin besar dan perubahan jarak horisontalnya semakin kecil, kemudian secara bertahap pada akhir geraknya perubahan ketinggian semakin kecil dengan perubahan jarak horisontalnya tetap semakin kecil.

Perubahan ketinggian yang semakin besar mengindikasikan bahwa medan gravitasi tidak konstan, kemudian perubahan jarak horisontal semakin kecil mengindikasikan bahwa gesekan terlihat perannya memberikan hambatan pada gerak meteor arah horisontal. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan teori gangguan bisa menampilkan gerak meteor di atmosfer dalam bentuk gerak parabolik dan faktor gesekan walaupun kecil bisa ditunjukkan.

6. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

1. Persamaan untuk model gerak meteor di atmosfer telah diturunkan, antara lain;
 - Persamaan gerak meteor di atmosfer untuk medan gravitasi tidak konstan dan gesekan diabaikan sesuai persamaan (13) dan (14).
 - Persamaan gerak meteor di atmosfer untuk medan gravitasi tidak konstan dan gesekan konstan sesuai persamaan (15) dan (16).
2. Gambaran lintasan gerak meteor di atmosfer telah di tampilkan (gambar 2 sampai dengan gambar 7) dalam dimensi dua, mencakup di dalamnya semua anggapan dasar yang dibangun. Yaitu, gerak meteor di atmosfer untuk medan gravitasi tidak konstan dan gesekan diabaikan (model 2), serta gerak meteor di atmosfer untuk medan gravitasi tidak konstan dan gesekan konstan (model 3).
3. Teori gangguan (*perturbation theory*) bisa digunakan untuk meninjau lebih lanjut gangguan kecil perubahan medan gravitasi dan gesekan yang bekerja pada gerak meteor di atmosfer

Saran

Untuk kajian lebih lanjut, ada beberapa hal yang bisa disarankan;

1. Perlu didiskusikan persamaan model gerak untuk gesekan yang tidak konstan, yakni faktor perbedaan kerapatan partikel atmosfer di setiap lapisan atmosfer.
2. Perlu didiskusikan anggapan bahwa meteor tidak sebagai sebuah bola padat bulat sempurna melainkan sebuah bola lonjong padat.
3. Perlu dikaji bahwa efek rotasi gerak meteor diperhitungkan
4. Perlu dikaji anggapan bahwa selama geraknya meteor meledak.
5. Perlu dikaji anggapan bahwa selama geraknya meteor mengalami perubahan massa akibat ablasi meteor.

Daftar Pustaka

- Opik, E.J., 2004, *Physics of Meteor Flight in the Atmosphere*, Dover Publications. Inc, Mineola New York.
- Palen, S.E., 2002, *Theory and Problems of Astronomy (Schaum's Outline Series)*, The McGraw-Hill Companies. Inc, USA
- Robinson, L.J., 2002, *Astronomy Encyclopedia*, Philip's-an imprint of Octopus Publishing Group, London.
- Saha, K., 2008, *The Earth's Atmosphere (Its Physics and Dynamics)*, Springer, New York.