

Model Sederhana Gerak Meteor di Atmosfer yang Jatuh Tegak Lurus Terhadap Permukaan Bumi

Nur Fadhila^{1)*}, Yudha Arman¹⁾, Boni Pahlanop Lapanporo¹⁾

¹⁾Program Studi Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Tanjungpura

*Email : nurfadhila2011@gmail.com

Abstrak

Persamaan gerak meteor merupakan persamaan diferensial non linier yang saling terkopel yang sulit diselesaikan secara analitik sehingga diperlukan metode lain. Pada penelitian ini persamaan gerak meteor diselesaikan menggunakan metode Runge Kutta orde-4 dengan penyederhanaan meteor dimodelkan dalam dua geometri yaitu silinder dan bola. Hasilnya model meteor dengan geometri silinder mengalami pengurangan massa lebih kecil dari model meteor dengan geometri bola sehingga kecepatan model meteor dengan geometri silinder pada saat sampai dipermukaan bumi lebih kecil dari model meteor dengan geometri bola.

Kata kunci : *Atmosfer, Meteor, Runge Kutta*

1. Pendahuluan

Sejak miliaran tahun yang lalu permukaan bumi telah dibombardir oleh berbagai benda langit, yang sebagian besar berasal dari sabuk asteroid antara Mars dan Jupiter yang disebut sebagai meteoroid. Meteoroid dengan kecepatan tinggi yang terbakar dan bersinar ketika masuk ke dalam wilayah atmosfer bumi ini disebut sebagai meteor. Pada umumnya kecepatan sebuah meteor yang masuk ke dalam wilayah atmosfer bumi berada pada orde 15 km s^{-1} (Rodrigues, 2013). Dengan kecepatan yang sangat tinggi ini, sebagian besar massa meteor akan habis terbakar sebelum mencapai permukaan bumi akibat adanya panas yang muncul dari gaya gesekan antara meteor dengan atmosfer. Akan tetapi, jika ukuran meteor yang masuk ke atmosfer bumi sangat besar serta bahan penyusunnya merupakan bahan yang tahan panas (memiliki kalor lebur yang besar), maka meteor-meteor tersebut dikhawatirkan akan sampai di permukaan bumi.

Meteor yang sampai ke permukaan bumi ini tentu saja sangat membahayakan bagi kehidupan di bumi. Seperti jatuhnya meteor di Chelyabinsk, Rusia, meskipun tidak menyebabkan korban jiwa namun dampak kerusakan yang diakibatkannya cukup besar (Sample, 2013). Untuk itulah diperlukan suatu analisis terhadap gerak meteor sehingga dapat dilakukan prediksi untuk mengetahui kemungkinan atau peluang meteor tersebut akan sampai ke permukaan bumi atau tidak.

Dalam skripsi ini akan dianalisis gerak meteor dengan menggunakan sebuah model sederhana yang diusulkan oleh Rodrigues, 2013,

namun hanya dibatasi untuk gerak meteor yang jatuh tegak lurus terhadap permukaan bumi. Dalam model tersebut digunakan asumsi bahwa selama gerak meteor di atmosfer terjadi perubahan kuat medan gravitasi akibat perubahan ketinggian, adanya gesekan dengan udara dan ablasi. Nilai gesekan meteor dengan udara sebanding dengan kuadrat kecepatan dari meteor sedangkan nilai dari ablasi sebanding dengan kecepatan meteor pangkat tiga. Dari asumsi-asumsi tersebut, diperoleh persamaan diferensial non linier yang saling terkopel yang sulit diselesaikan secara analitik. Oleh karena itu dalam skripsi ini model tersebut akan diselesaikan secara numerik dengan metode Runge-Kutta dimana metode ini menawarkan penyelesaian persamaan diferensial dengan pertumbuhan *error* yang kecil.

2. Meteor

Meteoroid adalah sebuah benda padat yang bergerak dalam ruang antar planet dengan ukuran lebih kecil dari asteroid dan lebih besar dari sebuah atom. Meteoroid berasal dari reruntuhan komet dan asteroid yang mengorbit matahari. Sebuah meteoroid yang masuk ke atmosfer bumi yang mengakibatkan meteoroid tersebut panas dan bercahaya disebut sebagai meteor. Sedangkan sebuah meteoroid yang mampu mencapai dan menabrak permukaan bumi disebut sebagai meteorit (Rubin dan Grossman, 2010).



Gambar 1. Meteor Leonid (Navicore, 2009)

Meteor dapat terlihat pada jarak sekitar 75 km sampai 120 km di atas permukaan bumi dan biasanya hancur pada ketinggian 50 sampai 95 km (Jenniskens, 2006). Penampakan meteor tersebut disebabkan oleh panas yang dihasilkan oleh tekanan ram pada saat meteoroid memasuki atmosfer. Tekanan ram merupakan tekanan yang dihasilkan untuk benda yang bergerak dengan kecepatan supersonik atau hipersonik di dalam medium fluida. Tekanan ram ini dapat menghasilkan gaya hambat yang besar.



Gambar 2. Kawah meteor Barringer, Arizona, Amerika Serikat (Ikhlusal, 2009)

Tabrakan meteor ukuran besar ke Bumi dapat menghasilkan kawah. Sebagai contoh adalah kawah besar di Arizona, Amerika Serikat dengan diameter 1.200 meter dan kedalaman 200 meter. Kawah itu terbentuk sekitar 50.000 tahun yang lalu oleh meteor besi yang berdiameter sekitar 30–50 meter (Ikhlusal, 2009).

Tumbukan lain juga pernah terjadi di Tunguska, Siberia Barat. Diperkirakan meteor yang sampai ke permukaan Bumi berdiameter sekitar 60 meter dan terdiri dari bagian-bagian yang lepas. Sebelum benar-benar mencapai permukaan Bumi meteor tersebut hancur sehingga tidak membentuk kawah seperti di Arizona. Meskipun begitu, hamparan hutan seluas 500 km musnah terbakar. Suara ledakan

terdengar oleh separuh penduduk Inggris (Ikhlusal, 2009).

3. Persamaan Gerak Meteor

Persamaan gerak jatuh meteor di atmosfer diperoleh berdasarkan hukum Newton tentang gerak. Selain gaya gravitasi yang bekerja pada meteor, proses utama fisika yang bekerja pada benda hipersonik adalah gaya gesek yang disebabkan gesekan dengan udara dan ablasi yaitu proses pengurangan massa yang disebabkan oleh penguapan material akibat pemanasan dan deformasi (Rodrigues, 2013).



Gambar 3. Komponen gaya yang bekerja pada meteor

Berdasarkan gambar 2. Gaya-gaya yang bekerja pada meteor dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} \tag{1}$$

$$-f_d + W = m \frac{dv}{dt} \tag{2}$$

dengan f_d = gaya gesek (N)
 W = gaya berat (N)

Persamaan gerak jatuh meteor digambarkan sebagai berikut

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_a C_D A v^2 + mg \sin \theta \tag{3}$$

dengan m = massa meteor (kg)
 ρ_a = kerapatan atmosfer (kg/m^3)
 C_D = koefisien gesekan atmosfer
 A = luas permukaan meteor (m^2)
 v = kecepatan meteor (m/s)
 g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)
 θ = sudut datang meteor terhadap permukaan bumi

Suku pertama pada sisi kanan dari persamaan (3) merupakan gaya gesek yang diberikan oleh atmosfer sedangkan suku kedua merupakan komponen gaya gravitasi yang searah dengan kecepatan meteor.

Pada persamaan (3), $g(z)$ dan $\rho(z)$ merupakan percepatan gravitasi dan kerapatan atmosfer yang nilainya masing-masing bergantung pada z yang merupakan ketinggian meteor dari permukaan bumi. Secara matematis

dirumuskan sebagai berikut (Ivanov dan Ryzhanskii, 1999)

$$g(z) = g_0 \left(1 - \frac{z}{R_T}\right) \quad (4)$$

dengan $g_0 = 9,81 \text{ m/s}^2$ adalah percepatan gravitasi pada permukaan bumi dan $R_T = 6,371 \times 10^6 \text{ m}$ merupakan jari-jari bumi.

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H} \quad (5)$$

dengan $\rho_0 = 1,22 \text{ kg / m}^3$ adalah kerapatan atmosfer pada permukaan laut dengan H merupakan sebuah konstanta $H = 8,1 \times 10^3 \text{ m}$.

4. Ablasi

Ablasi merupakan proses pengurangan massa yang disebabkan oleh penguapan material akibat pemanasan. Gesekan meteor dengan udara menyebabkan suhu permukaan meteor dapat mencapai $6 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$, yang lebih tinggi dari suhu permukaan matahari, sehingga menyebabkan penguapan pada permukaan meteor. Proses ablasi ini juga mempengaruhi gaya gesek, karena gaya gesek bergantung pada luas penampang meteor yang akan berkurang dengan adanya proses ablasi. Secara matematis proses ablasi dirumuskan sebagai berikut (Rodrigues, 2013)

$$Q \frac{dm}{dt} = -\frac{1}{2} C_H \rho_a A v^3 \quad (6)$$

dengan Q = Kalor ablasi (kalor laten) (J/kg)
 C_H = koefisien perpindahan panas
 ρ_a = kerapatan meteor (kg/m^3)
 A = luas permukaan meteor (m^2)
 v = kecepatan meteor (m/s)

Q merupakan sebuah fungsi dari jenis bahan dan proses khusus pada ablasi. Nilai Q untuk berbagai jenis asteroid dan komet dapat dilihat pada tabel 1 (Chyba, dkk, 1993). Berdasarkan pengamatan meteor secara fotografi diketahui bahwa $C_H = 0,1$ (Bronshen, 1983).

Tabel 1. Parameter-parameter untuk beberapa bahan penyusun meteor (Rodrigues, 2013)

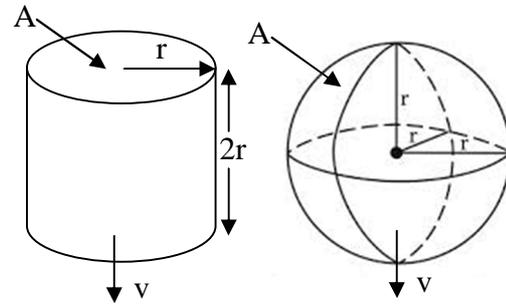
Bahan Penyusun	$\rho_m (10^3 \text{ kg/m}^3)$	$v (\text{km/s})$	$Q (10^6 \text{ J/kg})$
Besi	7,9	15	8,0
Batu	3,5	15	8,0
Karbon	2,2	15	5,0

Persamaan (2.3) dan (2.6) merupakan persamaan diferensial orde pertama yang saling terkopel. Persamaan diferensial pertama menggambarkan variasi intensitas kecepatan meteor v . Persamaan diferensial kedua

menggambarkan pengurangan massa proyektil karena proses ablasi (Rodrigues, 2013).

5. Model Meteor

Untuk menggambarkan deformasi pada bentuk meteor yang disebabkan oleh ablasi, maka pada penelitian ini dipilih model meteor dengan geometri silinder dan bola homogen.



Gambar 4. Model meteor

Meteor dengan geometri silinder dan bola memang tidak ada di alam, tetapi model geometri ini membuat lebih mudah untuk menghitung deformasi yang disebabkan oleh ablasi. Untuk geometri silinder massa meteor diberikan oleh

$$m = \rho_m V = (\pi r^2)(2r)\rho_m \quad (7)$$

dengan ρ_m merupakan kerapatan massa meteor, sehingga diperoleh

$$r = \left(\frac{m}{2\pi\rho_m}\right)^{1/3} \quad (8)$$

sehingga

$$A = \pi \left(\frac{m}{2\pi\rho_m}\right)^{2/3} \quad (9)$$

dan untuk geometri bola massa meteor diberikan oleh

$$m = \rho_m V = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\rho_m \quad (10)$$

dengan ρ_m merupakan kerapatan massa meteor, sehingga diperoleh

$$r = \left(\frac{3m}{4\pi\rho_m}\right)^{1/3} \quad (11)$$

sehingga

$$A = 4\pi \left(\frac{3m}{4\pi\rho_m}\right)^{2/3} \quad (12)$$

6. Metode Runge Kutta

Metode Runge Kutta yaitu suatu metode yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial secara numerik atau pendekatan sehingga mendapatkan

penyelesaian yang lebih signifikan daripada penyelesaian secara analitik. Metode Runge Kutta merupakan salah satu algoritma pemecahan diferensial dengan prinsip deret Taylor. Metode ini mencapai keakuratan dari suatu pendekatan Taylor tanpa memerlukan turunan-turunan tingkat tinggi (Matthew dan Fink, 2004).

Pada metode Runge Kutta, semakin tinggi ordennya semakin tinggi pula tingkat ketelitian yang akan didapatkan. Di sisi lain, parameter yang diperlukan juga akan lebih banyak. Pada umumnya, penyelesaian persamaan diferensial biasa akan menggunakan metode Runge Kutta orde-4. Runge Kutta orde-4 membutuhkan 1 nilai awal untuk memulainya (y_0) dan potongan dari empat perhitungan deret Taylor (Suparno, 2008).

Metode Runge Kutta orde-4 digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial orde pertama sebagai berikut

$$\frac{dy}{dt} = v$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\rho_a C_D A v^2}{2m} + g \sin\theta$$

dan

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{C_H \rho_a A v^3}{2Q}$$

Ketiga fungsi ini diselesaikan menggunakan metode Runge Kutta, sehingga

$$f = \begin{bmatrix} f_2(y,m,v) \\ f(v) \\ f_3(y,m,v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_H \rho_a A v^3}{2Q} \\ v \\ -\frac{\rho_a C_D A v^2}{2m} + g \sin\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

dengan

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} f_2(y, m, v) \\ v \\ f(y, m, v) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} k_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} f_2\left(a_1, m + \frac{1}{2}k_1, a_2\right) \\ v + \frac{1}{2}a_2 \\ f\left(y + \frac{1}{2}a_1, m, v + \frac{1}{2}a_2\right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} k_3 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} f_2\left(b_1, m + \frac{1}{2}k_2, b_2\right) \\ v + \frac{1}{2}b_2 \\ f\left(y + \frac{1}{2}b_1, m, v + \frac{1}{2}b_2\right) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} k_4 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} f_2(c_1, m + k_3, c_2) \\ v + c_2 \\ f(y + c_1, m, v + c_2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Sehingga diperoleh

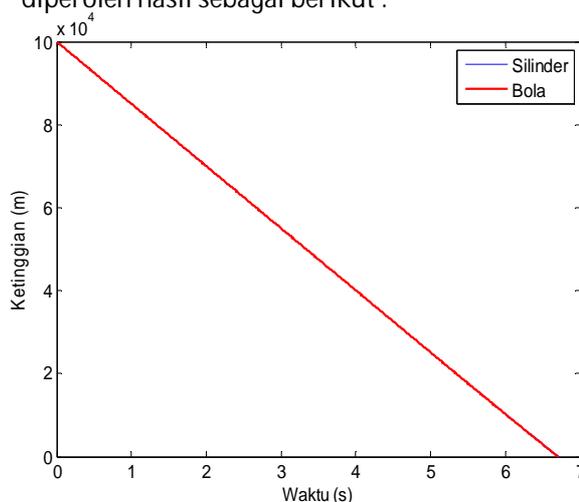
$$\begin{bmatrix} m_{i+1} \\ y_{i+1} \\ v_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ y_i + \frac{1}{6}(a_1 + 2b_1 + 2c_1 + d_1) \\ v_i + \frac{1}{6}(a_2 + 2b_2 + 2c_2 + d_2) \end{bmatrix} \quad (18)$$

7. Hasil dan Diskusi

7.1 Perbandingan Model Meteor Berdasarkan Geometri

Model meteor yang digunakan dalam penelitian ini adalah model meteor dengan geometri silinder dan bola homogen dengan bahan penyusun besi. Dalam model tersebut digunakan asumsi bahwa selama gerak meteor di atmosfer terjadi perubahan kuat medan gravitasi akibat perubahan ketinggian, adanya gesekan dengan udara dan ablasi. Dengan asumsi tersebut, maka model ini akan diselesaikan menggunakan metode Runge Kutta orde-4.

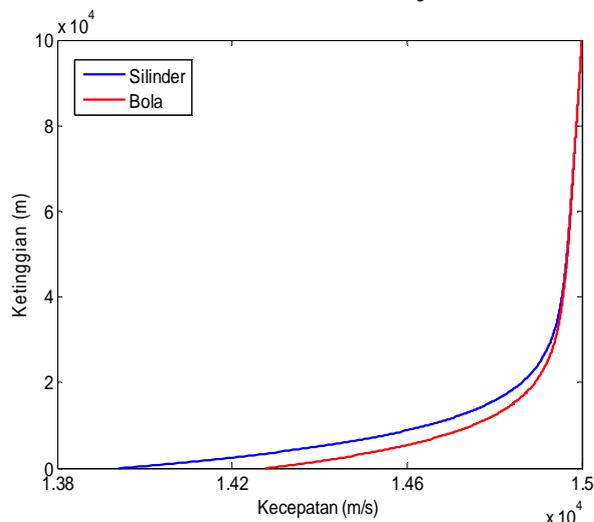
Parameter-parameter yang digunakan adalah $C_D = 1,7$ yang merupakan nilai koefisien gesek untuk geometri silinder, $C_D = 0,42$ untuk geometri bola, $Q = 8 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ untuk kalor ablasi, massa awal meteor $m_0 = 2,19 \times 10^7 \text{ kg}$, ketinggian awal $z_0 = 100 \text{ km}$ dari permukaan laut, dan kecepatan awal $v_0 = 15 \text{ kms}^{-1}$ pada saat meteor memasuki atmosfer. Berdasarkan parameter-parameter tersebut dengan menggunakan metode Runge Kutta orde-4 maka diperoleh hasil sebagai berikut :



Gambar 5. Grafik ketinggian meteor sebagai fungsi waktu

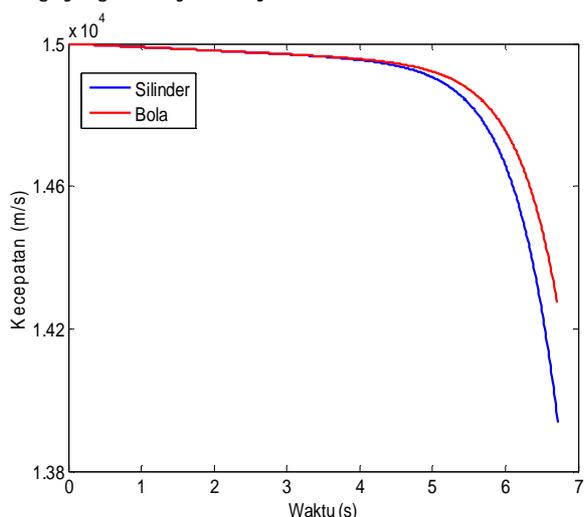
Pada gambar 5. terlihat bahwa dengan ketinggian awal 100 km, waktu yang dibutuhkan

meteor dengan geometri silinder dan bola hampir sama untuk sampai dipermukaan bumi. Selisih antara kedua model ini hanya 0,01 s.



Gambar 6. Grafik kecepatan meteor sebagai fungsi ketinggian

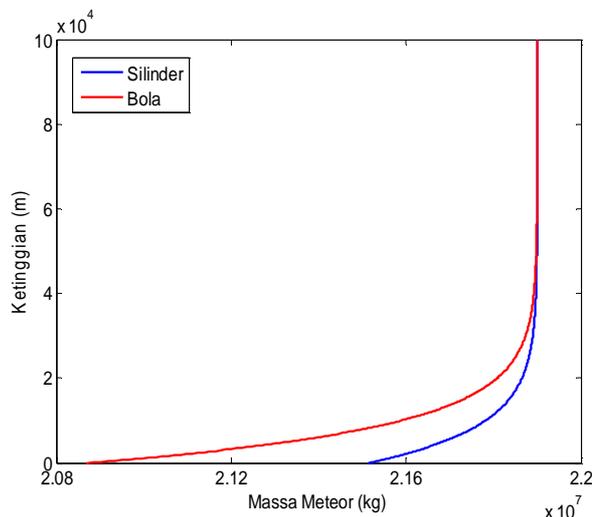
Pada gambar 6. terlihat bahwa untuk kedua geometri, kecepatan meteor akan berkurang pada saat menuju permukaan bumi. Hal ini disebabkan oleh gaya gesek yang dihasilkan meteor lebih besar dari gaya gravitasi sehingga gerak meteor akan mengalami perlambatan. Pada grafik juga terlihat bahwa pengurangan kecepatan yang dialami meteor dengan geometri silinder lebih besar daripada meteor dengan geometri bola. Hal ini disebabkan oleh ablasi atau pengurangan massa yang dialami oleh meteor dengan geometri bola lebih besar, sehingga luas bidang kontak dan gaya geseknya menjadi kecil.



Gambar 7. Grafik kecepatan meteor sebagai fungsi waktu

Pada gambar 7. terlihat bahwa dengan kecepatan awal 15 km s^{-1} , meteor dengan

geometri silinder lebih besar mengalami pengurangan kecepatan daripada meteor dengan geometri bola. Pengurangan kecepatan ini dipengaruhi oleh luas bidang kontak akibat proses ablasi dari kedua geometri sehingga gaya gesek yang dialami oleh meteor akan berbeda. Meteor dengan geometri bola mengalami pengurangan massa lebih besar, sehingga luas bidang kontak dan gaya geseknya menjadi kecil.

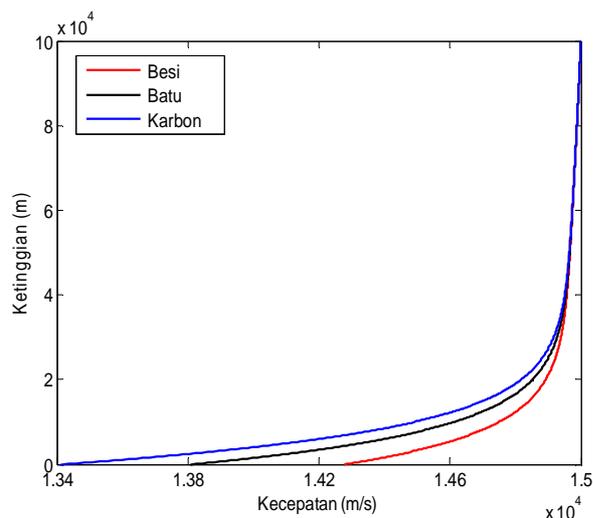


Gambar 8. Grafik massa meteor sebagai fungsi ketinggian

Pada gambar 8. terlihat bahwa untuk kedua geometri massa meteor akan berkurang pada saat menuju permukaan bumi. Hal ini disebabkan oleh ablasi yaitu, peristiwa gesekan meteor dengan udara yang menyebabkan suhu permukaan meteor dapat mencapai $6 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ sehingga menyebabkan penguapan pada permukaan meteor. Besarnya pengurangan massa akibat proses ablasi sebanding dengan kecepatan meteor pangkat tiga. Pengurangan massa meteor dengan geometri bola lebih besar daripada meteor dengan geometri silinder. Pada grafik juga terlihat bahwa meteor dengan massa awal $2,19 \times 10^7 \text{ kg}$ akan menabrak permukaan bumi, karena massa meteor pada saat di permukaan bumi masih $2,151 \times 10^7 \text{ kg}$ untuk geometri silinder dan $2,087 \times 10^7 \text{ kg}$ untuk geometri bola.

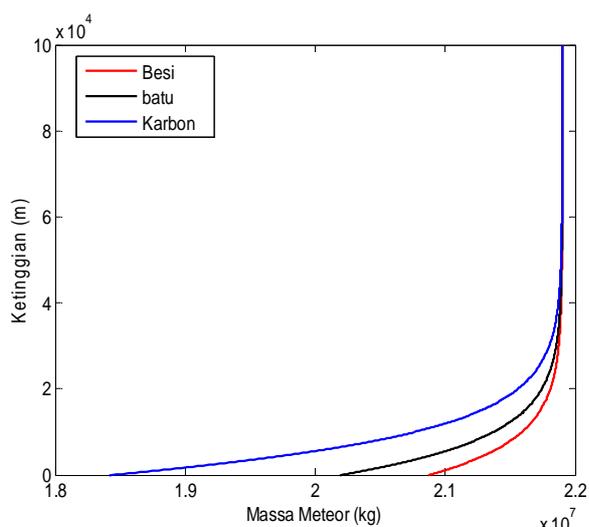
7.2 Perbandingan Model Meteor Berdasarkan Bahan Penyusun

Bahan penyusun meteor yang digunakan pada penelitian ini adalah besi, batu dan karbon. Parameter-parameter bahan penyusun meteor dapat di lihat pada tabel 1. Berdasarkan parameter-parameter tersebut dengan menggunakan metode Runge Kutta orde-4 maka diperoleh hasil sebagai berikut :



Gambar 9. Grafik kecepatan meteor sebagai fungsi ketinggian

Pada gambar 9. terlihat bahwa untuk ketiga bahan penyusun, kecepatan meteor akan berkurang pada saat menuju permukaan bumi. Hal ini disebabkan oleh gaya gesek yang dihasilkan meteor lebih besar dari gaya gravitasi sehingga gerak meteor akan mengalami perlambatan. Pada grafik juga terlihat bahwa pengurangan kecepatan yang paling besar dialami meteor dengan bahan penyusun karbon. Hal ini disebabkan oleh luas bidang kontak untuk meteor dengan bahan penyusun karbon lebih besar daripada batu dan besi. Luas bidang kontak meteor dipengaruhi oleh massa jenis bahan penyusun meteor. Artinya, untuk massa yang sama, semakin kecil massa jenis suatu bahan penyusun meteor maka semakin besar luas bidang kontakannya, sehingga gaya geseknya juga besar.



Gambar 10. Grafik massa meteor sebagai fungsi ketinggian

Pada gambar 10. terlihat bahwa untuk ketiga bahan penyusun, massa meteor akan berkurang pada saat menuju permukaan bumi. Hal ini disebabkan oleh ablasi yaitu, peristiwa gesekan meteor dengan udara sehingga menyebabkan penguapan pada permukaan meteor. Pengurangan massa meteor dengan geometri yang sama dipengaruhi oleh massa jenis bahan penyusunnya. Semakin besar massa jenisnya maka semakin kecil pengurangan massanya. Hal ini bisa dilihat pada gambar 10., dimana meteor dengan massa jenis bahan penyusun paling besar, yaitu besi ($\rho_m = 7,9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$), mengalami pengurangan massa lebih kecil daripada batu dan karbon. Pada grafik juga terlihat bahwa meteor (massa awal $2,19 \times 10^7 \text{ kg}$) dengan bahan penyusun besi, batu dan karbon akan menabrak permukaan bumi, karena massa meteor pada saat di permukaan bumi masih $2,087 \times 10^7 \text{ kg}$ untuk meteor dengan bahan penyusun besi, $2,019 \times 10^7 \text{ kg}$ untuk meteor dengan bahan penyusun batu dan $1,842 \times 10^7 \text{ kg}$ untuk meteor dengan bahan penyusun karbon.

8. Kesimpulan

Hasil Penelitian menunjukkan bahwa model meteor dengan geometri silinder mengalami pengurangan massa lebih kecil dari model meteor dengan geometri bola sehingga kecepatan model meteor dengan geometri silinder pada saat sampai dipermukaan bumi lebih kecil dari model meteor dengan geometri bola. Meteor dengan bahan penyusun besi mengalami pengurangan massa paling kecil daripada meteor dengan bahan penyusun batu dan karbon.

DAFTAR PUSTAKA

- Bronshten, V.A., 1983, *Physics of Meteoritic Phenomena*, D.Reidel Publishing Company.
- Chyba, C.F., Thomas, P.J., Zahnle, K.J., 1993, *The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid*, Nature 361,p. 40.
- Erickson, P. J., 1998, *Millstone Hill UHF Meteor Observations: Preliminary Results*, Atmospheric Sciences Group, MIT Haystack Observatory Westford, MA 01886, USA.
- Ikhlasul, 2009, *Meteor, Meteoroid, dan Meteorit*, Diktat Kuliah Universitas Negeri Yogyakarta.

- Ivanov, A.G., and Ryzhanskii, V.A., 1999, *Fragmentation of a small celestial body entering the atmosphere of a planet*, *Combustion, Explosion, Shock Waves*, Volume 35, Issue 5, pp 581-590.
- Jenniskens, P., 2006, *Meteor Showers and their Parent Comets*, New York: Cambridge University Press, p. 372.
- Matthew, J.H., and Fink, K.K., 2004, *Numerical Methods Using Matlab*, 4th Edition, Prentice-Hall Inc.
- Navicore, 2009, *A meteor during the peak of the 2009 Leonid Meteor Shower*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Meteoroid>
- Rochmad, 2011, *Metode Numerik*, Jurusan Matematika FMIPA, Universitas Negeri
- Rodrigues, H., 2013, *Modelling the motion of meteors in the Earth's atmosphere*, *European Journal of Physics*, Volume 34, pp 1135-1143.
- Rubin, A.E., 2010, *Meteorite and Meteoroid : New Comprehensive Definitions*, *Meteoritics & Planetary Science* 45, Nr 1, pp 114–122 .
- Sample, I., 2013, *Scientists reveal the full power of the Chelyabinsk meteor explosion*, *The Guardian*.<http://www.theguardian.com/science/2013/nov/06/chelyabinsk-meteor-russia>.
- Suparno, S., 2008, *Komputasi untuk Sains dan Teknik: Dalam Matlab*, Edisi III, Departemen Fisika-FMIPA, Universitas Indonesia.