

DOI: doi.org/10.21009/03.SNF2018.02.PA.12

PERUMUSAN GAYA ANTAR BUTIRAN PADA KASUS RANTAI BUTIRAN MAGNETIK TERENTANG HORIZONTAL

Aufa Nu'man Fadhilah Rudiawan^{1, a)}, Ismi Yasifa^{1, b)}, dan Sparisoma Viridi^{1, c)}

¹*Kelompok Keahlian Fisika Nuklir dan Biofisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung*

Email: ^{a)}aufa.rudiawan@gmail.com, ^{b)}yasifa.ismi@gmail.com, ^{c)}dudung@fi.itb.ac.id

Abstrak

Magnet kuat, seperti magnet NdFeB, saat ini banyak diproduksi dan dijual dalam bentuk bola (butiran). Bola-bola magnet ini dapat membentuk rantai panjang yang mengingatkan kita kepada sifat mekanik dari tali elastis. Dalam makalah ini akan ditunjukkan perumusan gaya antar butiran pada kasus rantai butiran magnetik terentang horizontal dan kita asumsikan bahwa rantai tersebut menyerupai sebuah tali. Kemudian, ditunjukkan pula sejumlah kasus berbeda dengan menambahkan beberapa bola besi diantara rantai bola magnet. Sampel seperti ini (terdiri dari 2 bahan berbeda) dikenal sebagai bahan komposit. Gaya-gaya yang dilibatkan dalam pemodelan ini yaitu gaya pegas, gravitasi, dan gesek udara dengan menggunakan metode dinamika molekuler.

Kata-kata kunci: besi, butiran, gesekan udara, gravitasi, komposit, magnet, pegas

Abstract

Strong magnet, such as NdFeB, recently produced and sold in the shape of a ball (grain). These magnetic balls can be shaped into a long chain remind us about mechanical properties of elastic string. In this paper will be shown formulation of granular force in the case of magnetic balls chain stretched horizontally and we assumed that the chain as a string. And then also shown some different case by adding some iron balls between magnetic balls chain. A sample like this (consist of 2 different material) known as a composite material. The forces that involved in this modeling are a string, gravitation, and drag force by using the molecular dynamics method.

Keywords: composite, drag, grain, gravitation, iron, magnet, string

PENDAHULUAN

Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering menjumpai material dalam bentuk butiran, atau disebut sebagai material butiran. Material butiran merupakan material yang terdiri dari butiran-butiran bahan lain yang ukurannya lebih kecil, contohnya beras, pasir, dan kacang-kacangan. Material butiran memiliki keunikan yaitu dapat menunjukkan sifat-sifat lain yang kadang hanya dimiliki oleh padatan, cair, atau gas.

Salah satu contoh material butiran yang mulai banyak diteliti adalah butiran-butiran magnetik. Keunggulan butiran-butiran magnetik adalah dijual secara komersial (mudah didapatkan) dan memiliki ukuran milimeter hingga centimeter, sehingga dapat dibentuk dengan menggunakan tangan menjadi bentuk yang sederhana hingga struktur yang sangat kompleks.



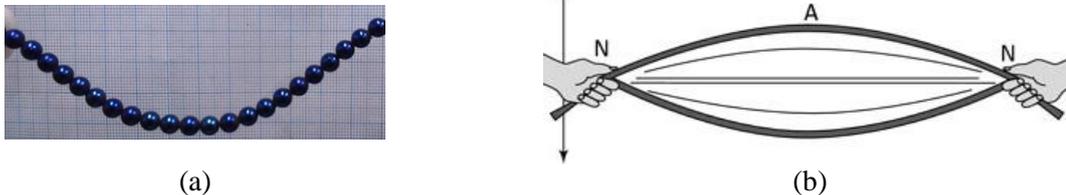
GAMBAR 1. Contoh material butiran: (a) kacang-kacangan dan (b) pasir.



GAMBAR 2. Material butiran magnetik.

Kami melakukan eksperimen menggunakan butiran-butiran magnetik yang dibentuk menjadi sebuah rantai dan direntangkan secara horizontal. Jarak kedua ujung butiran divariasikan sehingga kelengkungan kurva akan berbeda. Keluaran dari eksperimen tersebut berupa koordinat dari masing-masing butiran yang diperoleh dengan bantuan kamera ponsel dan perangkat lunak.

Dalam penelitian sebelumnya, rantai butiran magnetik diasumsikan sebagai sebuah tali seperti terlihat pada Gambar 3 dan telah dimodelkan menggunakan persamaan gelombang pada tali.



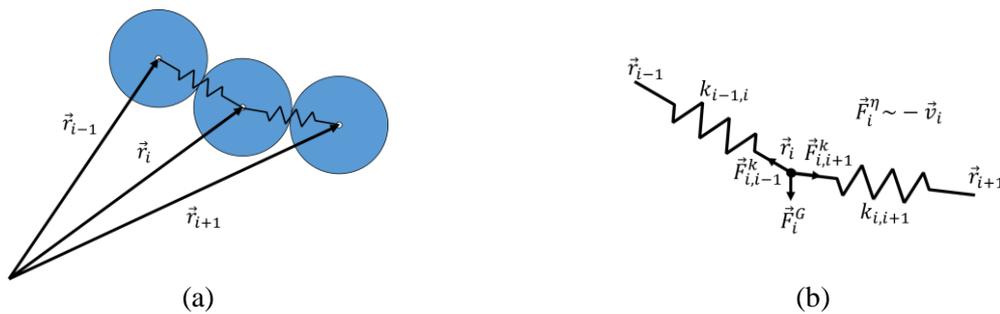
GAMBAR 3. (a) Rantai butiran magnetik eksperimen dan (b) rantai butiran magnetik dimodelkan sebagai sebuah tali.

Pada penelitian ini, kami membuat simulasi dengan menggunakan metode dinamika molekuler untuk memodelkan rantai butiran magnetik tersebut. Rantai butiran magnetik didekati oleh model pegas massa-dengan melibatkan gaya pegas, gaya gravitasi, dan gaya hambat udara. Persamaan gerak benda diturunkan menggunakan Hukum II Newton dan posisi masing-masing butiran ditentukan menggunakan Metode Euler.

LANDASAN TEORI

Model Pegas-Massa dan Diagram Benda Bebas

Model pegas-massa digunakan untuk mengamati interaksi dari sistem banyak-partikel dengan mengasumsikan sebuah benda atau partikel berinteraksi dengan partikel lainnya dengan penghubung berupa pegas tidak bermassa dengan panjang awal tidak nol. Diagram benda bebas merupakan sketsa gambar yang digunakan agar memudahkan dalam menentukan resultan gaya yang bekerja pada suatu benda. Ilustrasi model pegas-massa dan diagram benda bebas terdapat pada GAMBAR 4.



GAMBAR 4. (a) Ilustrasi model pegas-massa dan (b) diagram benda bebas.

Hukum II Newton

Setiap benda yang bergerak mematuhi Hukum II Newton yang berbunyi: “Resultan gaya pada suatu benda sama dengan perkalian massa benda dan percepatannya”. Adapun Hukum II Newton dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m\vec{a}, \\ m_i \vec{a}_i &= \vec{F}_i^G + \vec{F}_{i,j}^k + \vec{F}_{i,n}^k + \vec{F}_i^\eta, \\ \vec{a}_i &= \frac{1}{m_i} (\vec{F}_i^G + \vec{F}_{i,j}^k + \vec{F}_{i,n}^k + \vec{F}_i^\eta). \end{aligned} \tag{1}$$

Gaya Pegas, Gravitasi, dan Gesekan Udara

Sistem fisis yang melibatkan pegas, pendulum, dan perubahan bentuk elastik mematuhi Hukum Hooke. Hukum Hooke menjelaskan bahwa perubahan panjang proporsional terhadap gaya yang diberikan. Hal ini berlaku hanya jika perpindahannya kecil dan masih berada pada batas elastik. Hukum Hooke diterapkan dalam bentuk gaya pegas $\vec{F}_{i,j}^k$.

Gaya gravitasi \vec{F}_i^G merupakan gaya tarik-menarik antara dua buah benda. Dalam kasus ini, bumi akan menarik benda-benda yang ada di atas permukaannya ke arah pusat bumi dan besarnya bergantung pada massa tiap benda. Semakin besar massa suatu benda, maka gaya gravitasinya akan lebih besar. Percepatan gravitasi g bernilai 9.8 m/s^2 .

Fluida merupakan segala sesuatu yang dapat mengalir –pada umumnya dalam fasa gas atau cair. Ketika terdapat suatu kecepatan relatif antara suatu fluida dan benda, benda tersebut merasakan gaya gesek \vec{F}_i^η yang berlawanan dengan gerak dalam arah dimana fluida mengalir relatif terhadap benda. Kekentalan fluida adalah η .

$$\begin{aligned} \vec{F}_i^G &= m_i \vec{g}, \\ \vec{F}_{i,j}^k &= -k_{ij} (\vec{r}_{ij} - \vec{l}_{ij}) \\ \vec{F}_i^\eta &= -3\pi\eta D_i \vec{v}_i. \end{aligned} \tag{2}$$

Metode Euler

Metode numerik yang paling populer untuk menyelesaikan masalah persamaan diferensial biasa (PDB) disebut sebagai metode beda hingga. Nilai perkiraan diperoleh untuk solusi pada serangkaian titik-titik kisi dan nilai perkiraan pada suatu titik diperoleh dengan menggunakan beberapa nilai yang diperoleh pada langkah sebelumnya. Salah satu metode yang sederhana namun kurang efisien secara

komputasi diperkenalkan pertama kali oleh Leonhard Euler. Salah satu penerapan dari metode Euler adalah untuk menentukan kecepatan dan posisi butiran pada satu langkah waktu Δt berikutnya

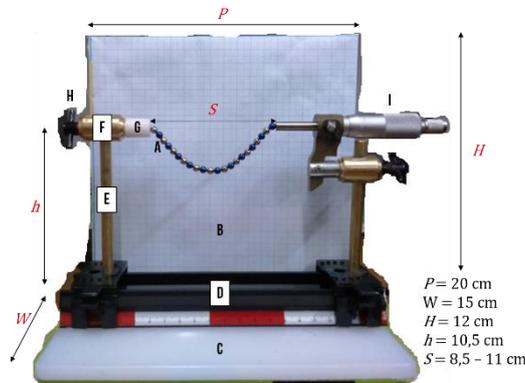
$$\begin{aligned} \vec{v}_i(t + \Delta t) &= \vec{v}_i(t) + \vec{a}_i(t) \Delta t, \\ \vec{r}_i(t + \Delta t) &= \vec{r}_i(t) + \vec{v}_i(t) \Delta t. \end{aligned} \tag{3}$$

ALAT & BAHAN

Alat dan bahan yang digunakan untuk eksperimen adalah

- Butiran magnet (A)
- Layar pengamatan (B)
- Talenan (C)
- Rel presisi (D)
- Batang kuningan (E)
- Manice (F)
- Teflon (G)
- Pengunci (H)
- Mikrometer skrup (I)
- Kamera ponsel

Foto alat percobaan ditunjukkan pada GAMBAR 5.



GAMBAR 5. Alat percobaan.

Spesifikasi sampel butiran magnetik ditunjukkan pada TABEL 1.

TABEL 1. Spesifikasi sampel butiran magnetik.

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
N	22	butir	Jumlah butiran
D	0.50	cm	Diameter butiran
M	0.57	gram	Massa butiran
M	0.05	gram/cm	Rapat massa butiran

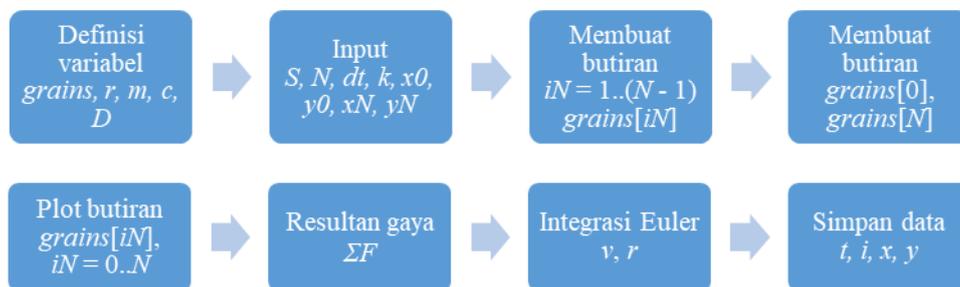
EKSPERIMEN DAN SIMULASI

Eksperimen ditujukan untuk menentukan koordinat masing-masing butiran. Sejumlah 22 butir magnet berbetuk bola dengan diameter 0.5 cm ditempelkan hingga membentuk seperti rantai. Kemudian kedua ujung rantai butiran magnet tersebut ditempelkan pada alat eksperimen. Jarak kedua ujung rantai tersebut diatur dengan memutar milimeter sekrup dengan nilai awal 11 cm. Sampel difoto dengan menggunakan kamera. Gambarnya disimpan, ukurannya disesuaikan dan dipotong bagian yang tidak perlu agar memudahkan pekerjaan. Berikutnya dengan menggunakan perangkat lunak yang dipublikasikan oleh Sparisoma V. pada 2014 kita dapat memperoleh data koordinat masing-masing butiran dalam sumbu x dan y Kartesian dan menyimpannya dalam *spreadsheet*. Diagram alir eksperimen dapat dilihat pada GAMBAR 6.



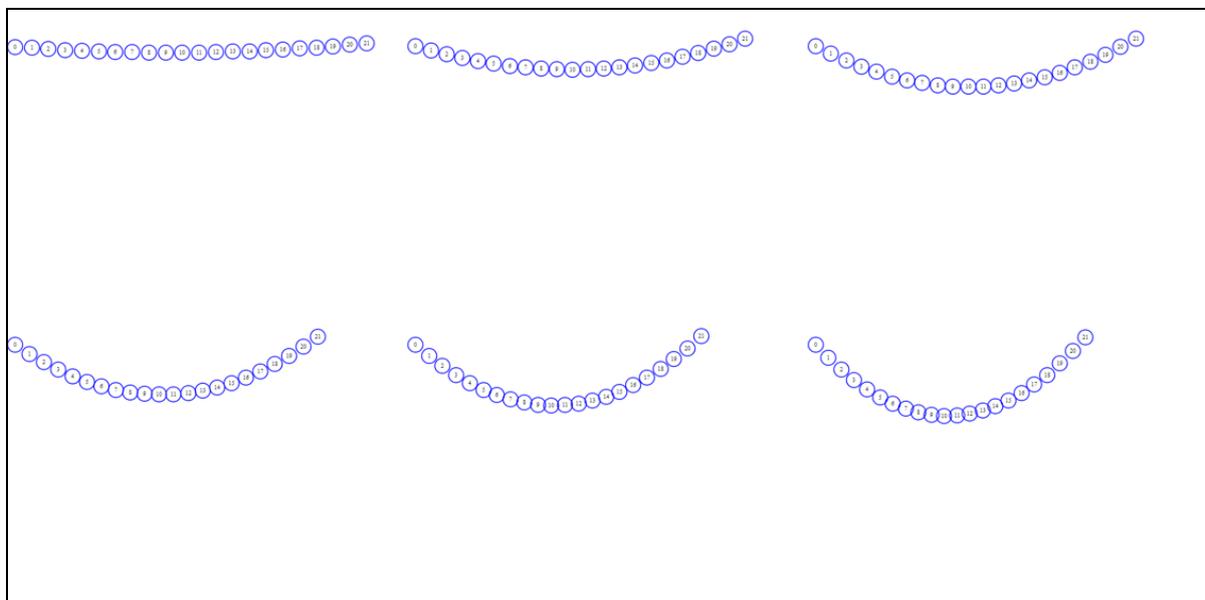
GAMBAR 6. Diagram alir eksperimen.

Sementara dengan simulasi kita bisa menentukan konstanta pegas yang (dalam penelitian ini dimodelkan) sebagai penghubung antar masing-masing butiran. Nilai parameter-parameter pada eksperimen digunakan juga pada simulasi, diantaranya jumlah butiran N , diameter butiran D dan koordinat awal kedua ujung butiran (x_0, y_0) dan (x_N, y_N) . Nilai konstanta pegas dimasukkan ke dalam simulasi dengan metode *trial-error*, artinya dicoba satu-persatu berapakah nilai k yang menghasilkan koordinat akhir butiran paling mendekati eksperimen. Dalam simulasi ini digunakan metode Euler untuk melakukan integrasi percepatan dan kecepatan sehingga posisi masing-masing butiran dapat ditentukan. Diagram alir simulasi dapat dilihat pada GAMBAR 7.



GAMBAR 7. Diagram alir simulasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN



GAMBAR 8. Koordinat butiran simulasi untuk jarak kedua ujung butiran 8,5 – 11 cm dengan selisih 0,5 cm

Simulasi dinamika molekuler dilakukan untuk kasus rantai butiran magnetik terentang horizontal. Pada GAMBAR 8 terdapat koordinat dari masing-masing butiran untuk jarak kedua ujung butiran 8,5 – 11 cm dengan selisih 0,5 cm. Hasil dari simulasi berupa konstanta pegas, waktu, dan galat simulasi ditunjukkan pada TABEL 2.

TABEL 2. Konstanta pegas, waktu, dan galat simulasi

S (cm)	k	t (s)	Galat (%)
11.00	1000	7.43	0.72
10.50	280	34.7	0.33
10.00	170	54.8	0.86
9.50	140	89.8	1.17
9.00	115	68.1	2.01
8.50	100	81.6	2.92
Rata-rata	1.34		

Untuk setiap kolom tabel diberi indikator warna merah untuk menunjukkan nilai yang lebih tinggi dan warna putih untuk nilai yang lebih rendah.

Nilai konstanta pegas k terbesar diperoleh saat jarak kedua ujung butiran $S = 11$ cm yang berarti gaya pegas antar butiran sangat kuat. Nilai k semakin kecil seiring berkurangnya nilai S , yang berarti gaya pegas antar butiran semakin lemah sehingga memungkinkan perubahan posisi yang cenderung lebih besar.

Kolom t menunjukkan waktu lamanya simulasi berjalan hingga mencapai kondisi setimbang. Kondisi setimbang merupakan kondisi ketika rantai butiran magnetik cenderung tidak lagi mengalami perubahan posisi. Pada simulasi ini, gaya gesekan udara turut serta meredam pergerakan butiran untuk mencapai kondisi setimbang. Faktor lain yang mempengaruhi lama waktu simulasi adalah jarak kedua ujung butiran S dan nilai konstanta pegas k . Semakin besar nilai S maka waktu simulasi t akan lebih lama, sementara semakin besar nilai k maka waktu simulasi t akan lebih cepat. Waktu simulasi t yang paling lama terjadi ketika $S = 9,5$ cm dan 8,5 cm.

KESIMPULAN & SARAN

Model pegas-massa dapat digunakan dalam simulasi pada kasus rantai butiran magnetik terentang horizontal dengan melibatkan gaya pegas, gaya gravitasi, dan gaya gesek udara. Galat yang diperoleh sebesar 1,34% akibat penghentian simulasi secara manual dan penentuan nilai konstanta pegas secara *trial-error*.

Pengembangan yang dapat dilakukan dari penelitian ini adalah kita dapat melakukan simulasi untuk banyak variasi, seperti mengubah massa butiran, jenis butiran, jumlah butiran, dan sebagainya atau dikenal sebagai bahan komposit. Selain itu, dapat juga ditambahkan gaya-gaya pada simulasi, seperti interaksi dipol dan gaya gesek antar butiran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr.rer.nat. Sparisoma Viridi, S.Si selaku dosen pembimbing atas bimbingannya dalam mengerjakan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Kendall E. Atkinson, "Numerical Methods for Ordinary Differential Equations," in *An Introduction to Numerical Analysis*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1989, pp. 341-356.
- [2] Y. Bin, D. Hongwang, W. Haitao, and X. Wei, "The Simulation of Cable Harness Based on Mass-Spring Model," in *MATEC Web of Conferences*, 2015, pp. 1-4.

- [3] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, "Force and Motion I," in *Fundamental of Physics (9th ed.)*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 91-98.
- [4] S. Viridi, S. N. Khotimah, Widayani Novitrian, L. Haris, and D. P. Aji, "Studying Brazil-Nut Effect History Line Using Disk- Formed Objects, Scanner, and Web Browser," in *International Conference on Advances in Education Technology (ICAET)*, 2014, pp. 162-165.