MODEL SELARAS BAGI GERAK MANUSIA BERJALAN

(HARMONIC MODEL FOR HUMAN WALKING MOTION)

Sardjito
(Staf Pengajar UP MKU Politeknik Negeri Bandung)
Nani Yuningsih
(Staf Pengajar UP MKU Politeknik Negeri Bandung)

ABSTRAK

Model fisika bagi gerak manusia yang sedang berjalan dapat diturunkan dari persamaan Lagrangian dari energi kinetik dan energi potensialnya. Solusi model ini menyerupai solusi dari persamaan untuk benda yang bergerak selaras dua dimensi, pada arah mendatar serta pada arah vertikal. Perbandingan antara amplitude gerak pusat massa tubuh pada arah mendatar dengan arah vertikal dapat digunakan untuk menentukan kondisi batas antara keadaan berjalan dan berlari.

Kata kunci : gerak manusia berjalan, pemodelan, pusat massa tubuh

ABSTRACT

Physical modeling for human walking motion has be developed from Lagrange equation of its potential and kinetic energy. This model has solution which has same form as harmonic motion in two dimensions, horizontal and vertical. The ratio between vertical and horizontal amplitude of the human body centre of mass motion can be used to determine limiting condition between walking and running.

Keywords : human walking motion, modeling, body centre of mass

PENDAHULUAN

Persoalan biomekanika saat ini merupakan sesuatu yang cukup populer, baik itu di bidang medis, kesehatan, maupun keolahragaan. Analisis biomekanika telah banyak diteliti, namun terbatas pada besaran-besaran kinematika seperti jarak, kecepatan, percepatan, dan waktu. Sedikit sekali pakar yang meneliti besaran-besaran dinamika, itupun hanya terbatas pada gaya, momen gaya, atau momentum. Sedangkan analisis energetika masih jarang dilakukan. Perkembangan teknologi kinetika serta bioteknologi yang berkait dengan metabolisma makhluk hidup, memungkinkan perhitungan neraca energi dalam tubuh dapat dilakukan, misalnya melalui pengukuran kadar asam laktat dalam darah[1,2]. Energi yang dikeluarkan tubuh saat bergerak dapat ditentukan dari kinetika oksigen, energi glikolitik, serta energi fosfagen. Perhitungan energetika dapat pula digunakan untuk menentukan persamaan gerak benda yang bersangkutan, yang biasanya diakhiri dengan penentuan solusi berupa fungsi besarn kinematika (posisi, kecepatan, percepatan) terhadap waktu.

Sejauh ini, konsep dan perhitungan fisika hanya diterapkan pada fenomena yang dialami benda mati. Hal ini dapat dimengerti karena perlakuan apapun yang dilakukan terhadap benda mati mudah diukur dan dikendalikan. Penerapan fisika bagi makhluk hidup agak jarang dilakukan, itupun hanya terbatas pada skala yang sangat makro seperti makhluk hidup dalam sistem atau yang sangat mikro seperti fenomena transport pada sel[3]. Perhitungan besaran-besaran fisika bagi makhluk hidup, khususnya manusia serta bagian-bagian tubuhnya memang dapat dilakukan, namun umumnya hasilnya kurang reliabel dan masih terlampau kasar. Masih banyak faktor koreksi yang harus ditambahkan dan diperhitungkan, terutama karena sifat "dinamis"nya kehidupan.

Manusia yang bergerak tentu saja tak dapat dianggap sebagai partikel atau benda titik, namun kalaupun dianggap benda tegar (*rigid body*), tentu "ketegarannya" atau sifat kelembamannya yang dinyatakan sebagai momen inersia juga bersifat dinamis-tidak konstan. Dengan demikian perlu dibuat model fisika bagi struktur tubuh manusia baik dalam keadaan statik maupun dinamik yang dapat mewakili kedinamisan sifat makhluk hidup dan mencakup seluruh metabolisma yang terjadi di dalamnya.

TINJAUAN PUSTAKA

Usaha mekanik yang dilakukan oleh manusia saat berjalan atau berlari meliputi usaha untuk melakukan percepatan, usaha untuk bergerak melangkah dan usaha untuk melawan hambatan lingkungan seperti gesekan dan redaman. Tinjauan terhadap energi gerak yang dikeluarkan oleh seseorang saat beraktivitas dipengaruhi oleh beberapa komponen gerak seperti massa tubuh, kecepatan gerak, gaya-gaya pendukung, serta penghambat gerakan.

Gerak manusia berjalan atau berlari ditandai dengan lintasan gerak pusat massa orang tersebut. Lintasan ini merupakan hasil

superposisi gerak rektilinear (translasi) serta rotasi ke belakang sepanjang *hypocycloid* [4].

Energi yang dilakukan manusia pada saat bergerak horizontal seperti berjalan dan berlari terdiri dari usaha untuk melakukan gerak langkah, baik translasi maupun rotasi, yang meliputi gerak tungkai maupun lengan, energi kinetik untuk mempertahankan laju gerak, serta usaha untuk melawan hambatan udara[2,5,6,7] . Pengaruh lingkungan terhadap gerak suatu benda dapat muncul dalam bentuk timbulnya gaya hambat atau gaya dorong, dan hal ini berlaku baik bagi benda mati maupun makhluk hidup. Besar gaya hambat medium resistif, terutama yang bersifat viskos, ditentukan oleh laju gerak relatif benda terhadap medium tersebut. Pengaruh laju terhadap besar gaya hambat masih menjadi perdebatan. Penelitian mutakhir yang didasarkan pada teori tumbukan benda dengan partikel-partikel pembentuk medium resistif, menyebutkan bahwa besar gaya hambat medium berbanding lurus terhadap kuadrat laju benda[7].

METODE

Gerak Pusat Massa Tubuh untuk Keadaan Manusia Berjalan

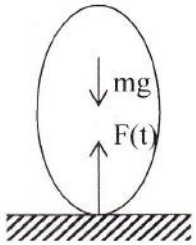
Jika tubuh berjalan dengan laju tunak (*steady state*) v maka persamaan gerak untuk posisinya sebagai fungsi dari waktu (t) :

- Ke arah horisontal dapat ditulis sebagai
  $x(t) = vt$, ...(1)
- Ke arah vertikal dapat ditulis, .
  $y(t) = h$ .....(2)

  dengan h ≡ tinggi pusat massa tubuh dihitung dari acuan.

Dari kedua persamaan diatas diperoleh persamaan posisi secara umum $R(t)$. Besar perpindahannya dari posisi acuan r(t), dapat ditulis sebagai

$\Delta r(t) = R(t) - r(t)$ .....(3)



Gambar 1 : Diagram benda bebas untuk tubuh saat berjalan

Anggap gambar 1 di atas sebagai tubuh manusia dengan gaya-gaya yang bekerja padanya yaitu gaya berat (= mg) dan gaya reaksi oleh tanah (= F(t)). Jika ada gaya penggerak tubuh sebesar $\Delta F(t)$, maka gaya reaksi oleh tanah adalah

$F(t) = \Delta F(t) - mg$ ..... (4)

Gaya penggerak tubuh ini dilakukan oleh sistem internal tubuh dari kontraksi otot tendon dan karena setiap langkah merupakan siklus, maka perata-rataan gaya penggerak ini adalah nol agar kondisi tunak (*steady state*) tetap terpenuhi. Dalam bentuk matematika dapat ditulis sebagai berikut :

$$\langle \Delta F(t) \rangle_{siklus} = \frac{1}{T_{siklus}} \int_0^{T_{siklus}} \Delta F(t) dt = 0 \quad \text{..... (5)}$$

dengan : T_{siklus} ≡ perioda siklus = waktu tempuh satu langkah penuh dan akan merupakan fungsi dari laju, atau dengan kata lain perioda harus ditulis sebagai $T_{siklus}(v)$.

Jika gerak pusat massa dianggap selaras, energi potensial elastiknya akan memiliki bentuk:

$$\Delta U = \frac{1}{2}k\left(\Delta x^2 + \Delta y^2\right), \quad \text{.....(6)}$$

dengan k sebagai koefisien kekakuan yang merupakan fungsi dari v.

Sedangkan energi kinetiknya akan memiliki bentuk:

$$\Delta K = \frac{1}{2}m\left(\Delta \dot{x}^2 + \Delta \dot{y}^2\right), \quad \text{..... (7)}$$

dengan: $\Delta \dot{x} = \dfrac{\partial \Delta x}{\partial t}$

$$\Delta \dot{y} = \frac{\partial \Delta y}{\partial t}$$

Dengan menggunakan kaidah Lagrangian,

$L = \Delta K - \Delta U$, konstan, dengan $\dfrac{\partial L}{\partial t} = 0$,

diperoleh $m\Delta \ddot{r} + k\Delta r = 0,$ ..... (8)

dengan : $\Delta \ddot{r} = \dfrac{\partial^2 \Delta r}{\partial t^2}$ dan $\Delta r = \Delta x + \Delta y$

Persamaan(8) sama dengan persamaan gerak getaran selaras dengan solusi geraknya:

$$\Delta x(t) = A\cos\left(\omega_o t - \frac{\pi}{2}\right),$$

dan

$$\Delta y(t) = B\sin\left(\omega_o t - \frac{\pi}{2}\right),$$

A = amplitudo mendatar

B = amplitudo vertikal.

Dengan $\omega_o = \dfrac{2\pi}{T_{siklus}} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ atau $k = m\omega^2$,

dan m = massa tubuh.

Untuk gerak selaras, gaya penggeraknya memiliki bentuk

$\Delta F(t) = -k\Delta r$ .....(9)

Pada arah horisontal, komponennya

$$\Delta F_x(t) = -m\omega_o^2 \Delta x(t), \text{ dan}$$

pada arah vertikal, komponennya

$$\Delta F_y(t) = -m\omega_o^2 \Delta y(t).$$

Bentuk lintasan titik berat pusat massa tubuh, secara implisit memiliki persamaan :

- Arah horisontal

$$: x(t) = vt + A\cos\left(\omega_o t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{.....(10.a)}$$

- Arah vertikal

$$: y(t) = h + B\sin\left(\omega_o t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{.....(10.b)}$$

Tinjauan terhadap osilasi titik pusat massa tubuh pada arah vertikal dan arah horizontal dapat mengarah pada kondisi batas antara model berjalan dan berlari. Tubuh dikatakan berjalan bila amplitude gerak osilasi titik pusat massa arah vertikal masih lebih kecil daripada amplitude gerak osilasi titik pusat massa arah horizontal (x dan y membentuk ellips yang cenderung datar). Bila bentuk ellips makin meruncing ke arah tegak, suatu saat ellips akan berubah menjadi lingkaran, dan ini terjadi pada saat amplitude vertikal sama dengan amplitude horizontal. Pada keadaan ini, terjadi perubahan status gerak, dari berjalan menjadi berlari, karena pada saat itu mulai terjadi gerak melayang, yakni ada fase saat tubuh tidak bersentuhan dengan lantai.

Data mengenai gerak titik pusat massa tubuh saat berjalan yang diperoleh melalui analisis rekaman video seorang pejalan yang berjalan dengan sangat cepat sebagai berikut (rekaman untuk gerak satu langkah penuh , pada laju gerak langkah ke depan sebesar 3,8 m/s):

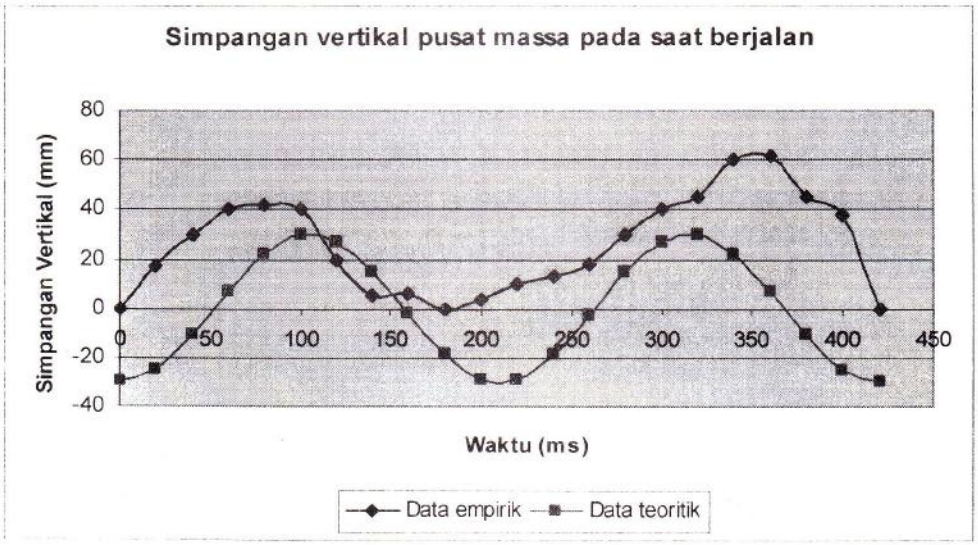
Tabel 1 : Simpangan titik pusat massa arah vertikal pada keadaan berjalan

Waktu (ms)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Simpangan (mm)	0	17	30	40	42	40	20	5	6	0	4

Waktu (ms)	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420
Simpangan (mm)	10	13	18	30	40	45	60	62	45	38	0

Sedangkan secara teoritik, lintasan gerak pusat massa pada arah vertikal (persamaan 10.b) dapat digambar dengan memilih $v, h, A, B,$ dan ω_0 konstan

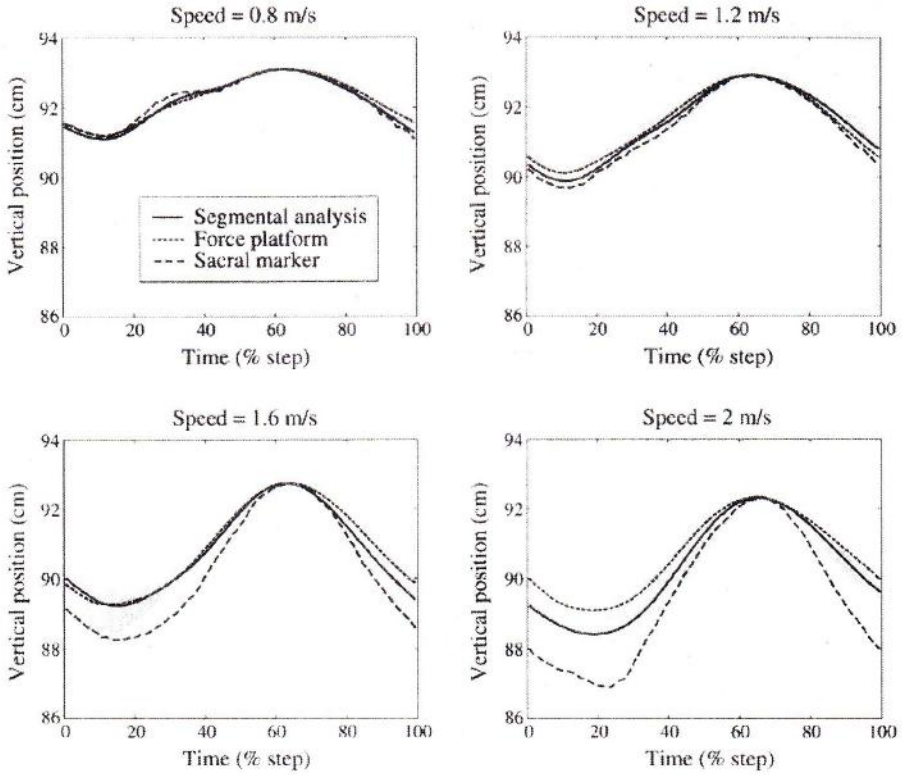
Grafik simpangan titik pusat massa arah vertikal terhadap waktu pada keadaan berjalan secara teoritik maupun secara empirik dapat dilihat pada gambar 2



Gambar 2

Perbandingan simpangan vertikal pusat massa tubuh pada saat berjalan secara teoritik dan empirik

Sementara itu, dari penelitian yang dilakukan oleh Gard et al [8], diperoleh gambaran mengenai simpangan vertikal titik pusat massa tubuh pada saat berjalan untuk satu langkah penuh untuk berbagai laju horisontal gerak seperti pada gambar 3 berikut ini.



Gambar 3

Simpangan vertikal pusat massa tubuh saat berjalan terhadap waktu untuk berbagai laju gerak horisontal [8]

Dari gambar 3 dapat dilihat bahwa amplitude gerak vertikal titik pusat massa akan bertambah besar seiring bertambahnya laju gerak horizontal. Bila laju horizontal makin diperbesar, suatu saat akan terjadi perubahan status gerak dari berjalan menjadi berlari. Hal ini terkait erat dengan perbandingan antara amplitude vertikal dengan amplitude horizontal. Menurut model yang dikemukakan oleh Alexander[9], kondisi kritis perubahan dari berjalan menjadi berlari terjadi pada laju gerak sebesar :

$$v_{kritis} = \sqrt{\frac{gH}{\cos\delta}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

dengan H menyatakan panjang tungkai, dan δ menyatakan sudut yang dibentuk tungkai dengan garis vertikal. Untuk kondisi subyek yang diamati, nilai laju kritis ini terjadi pada angka 3,9 m/s.

Untuk tinjauan gerak titik berat pada arah horizontal, mengingat sulitnya mengukur besaran osilasi arah horizontal karena terlalu dominannya komponen gerak mendatar seluruh tubuh, maka dilakukan pengukuran laju gerak titik pusat massa ke arah depan, yang didasarkan dari turunan persamaan (10.a) terhadap waktu yaitu

$dx/dt = v - \omega_0 A \cos(\omega_0 t - \pi/2)$.

Data mengenai kecepatan gerak titik pusat massa tubuh saat berjalan yang diperoleh melalui analisis rekaman video seorang pejalan yang berjalan dengan sangat cepat

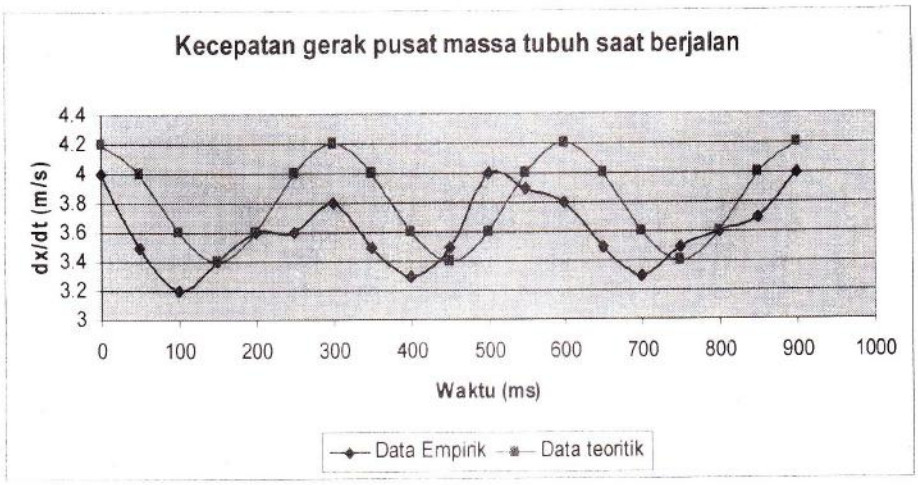
sebagai berikut (rekaman untuk gerak satu langkah penuh , pada laju gerak langkah ke depan sebesar 3,8 m/s) dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Kecepatan gerak pusat massa tubuh arah horizontal saat berjalan

Waktu (ms)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
dx/dt (m/s)	4,0	3,5	3,2	3,4	3,6	3,6	3,8	3,5	3,3	3,5

Waktu (ms)	500	550	600	650	700	750	800	850	900
dx/dt (m/s)	4,0	3,9	3,8	3,5	3,3	3,5	3,6	3,7	4,0

Grafik antara kecepatan horizontal titik pusat massa terhadap waktu, pada saat berjalan secara empiris dan teoritis (untuk nilai v = 3,8 m/s dan T = 300 ms) dapat dilihat pada gambar 4



Gambar 4 Kecepatan gerak pusat massa tubuh saat berjalan

Dari gambar 4 dapat dilihat bahwa kecepatan pusat massa pada arah horizontalpun mengalami osilasi, dengan demikian dapat disimpulkan bahwa simpangan pada arah horisontalpun mengalami osilasi, sesuai dengan yang dinyatakan dalam persamaan (10.a).

KESIMPULAN

Dalam keadaan berjalan, pusat massa tubuh manusia mengalami osilasi, baik pada arah vertikal maupun pada arah horizontal, yang nilai amplitudonya bergantung pada laju gerak horizontal tubuh ke depan. Perbandingan antara amplitude vertikal dengan amplitude horizontal gerak pusat massanya menentukan keadaan batas antara berjalan atau berlari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pembantu Direktur I Politeknik Negeri Bandung serta Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (UPPM) yang telah mendukung penelitian ini melalui dana hibah Penelitian Unggulan Jurusan di Politeknik Negeri Bandung tahun 2006/2007.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Sardjito, (1996), Energi mekanik yang dilakukan pelari top dunia dalam lomba lari 100 meter, *Spektrum,3/1/1996*

[2] Sardjito, (1999), Analisis energetika pelari 100 m, *Jurnal Fisika HFI, 2(4), 1999*

[3] Winter D.A., (2005), *Biomechanics and motor control of human movement,* John Wiley, 2nd ed.

[4] Kokshenev V.B., (2004), Dynamics of human walking, *arXiv:physics/0404089 v1, 19 April 2004*

[5] Ward Smith A.J., (1985), A mathematical theory of running and its application to the performance of world class athletes, *Journal of biomechanics,18,* pp. 337-349

[6] Sardjito, (1999), Pengurangan waktu tempuh pelari 100 meter karena bantuan angin, *Jurnal Fisika HFI, 2(3), 1999*

[7] Molina M.I., (2001), A simple solvable model of body motion in a one dimensional resistive medium, *arXiv:physics/0102052, 16 Feb. 2001*

[8] S.A. Gard et al.(2004), Comparison of kinematic and kinetic methods for computing the vertical motion of the body center of mass during walking, *Human Movement Science 22*, pp. 597-610

[9] Alexander R.McNeill, (2001), Modelling, step by step, ***+Plus magazine,*** January 2001, pp 1-6