

Model Empirik Kecepatan Kritis Berjalan dan Berlari

Grace*, Sparisoma Viridi, dan Nuning Nuraini

Diterima xx Juni 2013, direvisi xx Juli 2013, diterbitkan xx Agustus 2013

Abstrak

Fenomena berjalan dan berlari adalah salah satu kegiatan yang dilakukan oleh manusia sehat dalam kehidupan sehari-hari. Ternyata setelah dipahami lebih lanjut gerakan berjalan dan berlari dapat melahirkan beberapa bahasan pemodelan matematika dan fisika yang cukup menarik untuk dikaji. Dengan melakukan eksperimen mandiri, penulis memperoleh data empirik yang berkaitan dengan fenomena berjalan dan berlari dengan daerah eksperimen adalah kampus ITB. Pada makalah ini dibahas model empirik kecepatan kritis berjalan dan berlari berdasarkan eksperimen tersebut. Hasilnya didapatkan kecepatan kritis untuk berjalan dan berlari yang berkaitan dengan panjang kaki seseorang. Makin panjang kaki seseorang maka nilai kecepatan kritisnya akan semakin besar dengan faktor kesebandingan kecepatan kritis dengan akar panjang kaki adalah $1.580 \text{ m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$.

Kata-kata kunci: model empirik, model Alexander, model Sprott, kecepatan kritis, panjang kaki.

Pendahuluan

Fenomena berjalan dan berlari adalah gerakan yang seringkali dilakukan manusia dalam kehidupan sehari-hari. Walaupun tubuh manusia adalah sebuah sistem yang kompleks dan cukup rumit, ternyata gerakan ini dapat dimodelkan dengan pendekatan matematika dan fisika. Bahkan, terdapat kalkulator ilmiah pada beberapa situs atau *website* yang dapat mencari usaha yang dikeluarkan seseorang ketika berjalan atau berlari dengan memberikan data massa, waktu yang digunakan untuk berjalan atau berlari, dan panjang lintasan yang dilalui orang tersebut [1-3]. Beberapa ilmuwan, yaitu Professor R. McNeill Alexander [4] dan J. C. Sprott [5] telah mencoba memodelkan gerakan berjalan dan berlari dengan lebih sederhana. Menariknya lagi, pengkajian kedua model tersebut akan memberikan informasi tentang besar usaha yang dikeluarkan seseorang ketika berjalan maupun berlari serta kecepatan kritis orang tersebut. Kecepatan kritis adalah kecepatan maksimum seseorang dapat berjalan. Terkait dengan studi literatur yang telah dilakukan, akan dilakukan suatu eksperimen untuk mencari kecepatan kritis dari masing-masing orang yang memiliki panjang kaki yang berbeda-beda yang akan dijelaskan dalam bagian Eksperimen. Setelah itu, akan dicari model empirik [6], yaitu model yang didapatkan dari data eksperimen. Hasil pengolahan data dari Model Empirik tersebut kemudian akan dibandingkan dengan hasil pengolahan data oleh Model Alexander [4] dan Model Sprott [5], dan akan dibicarakan dalam bagian Hasil dan Pembahasan.

Eksperimen

Metode yang digunakan merupakan metode kualitatif dengan eksperimen. Alat dan bahan yang digunakan adalah orang-orang yang memiliki panjang kaki di bawah 1 meter, metronom (*metronome*), dan penggaris.

Pengumpulan data melalui eksperimen dilakukan dengan langkah-langkah: (1) ukur panjang kaki seseorang, (2) nyalakan metronom dengan ketukan (*beat*) random, (3) berjalan mengikuti ketukan tersebut, (4) jika pejalan masih bisa berjalan mengikuti ketukan maka ketukan metronom dipercepat sampai pejalan tidak dapat mengikuti ketukan tersebut lagi dan ketukan dicatat, (5) jika pejalan sejak ketukan awal yang random sudah tidak bisa berjalan mengikuti ketukan, maka ketukan metronom diperlambat sampai pejalan dapat berjalan mengikuti ketukan dan ketukan dicatat, (6) ketukan yang dicatat adalah kecepatan kritis pejalan (dalam satuan ketukan per menit atau bpm – *beat per minute*), (7) ukur jarak antara dua kaki ketika berjalan. Tabel 1 memberikan variabel-variabel yang digunakan dalam eksperimen.

Tabel 1. Variabel pada eksperimen.

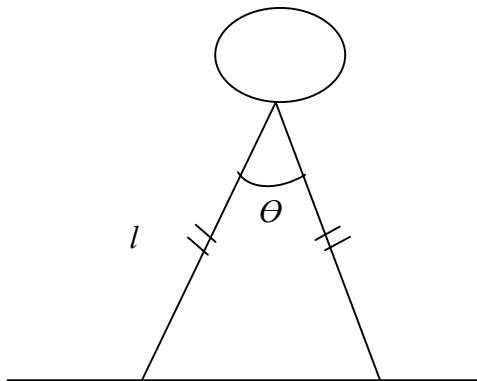
Variabel	Nama Variabel	Satuan
Panjang kaki	l	m
Jarak antara dua kaki	Δs	m
Kecepatan kritis (dari metronom)	v_{krit}	bmp
Sudut yang dibentuk kedua kaki	θ	derajat

Hasil dan diskusi

Hasil eksperimen adalah sebagaimana tercantum pada Tabel 2 dalam kolom pertama sampai keempat. Nilai v_{krit} dalam satuan m/s didapatkan dengan cara

$$v_{krit} \text{ (m/s)} = v_{krit} \text{ (bpm)} \cdot \frac{\Delta s}{60 \text{ s}} \quad (1)$$

Sedangkan untuk mencari nilai θ , pertama-tama bentuk kedua kaki pejalan yang terbuka akan dianggap sebagai sebuah segitiga sama kaki.



Gambar 1. Ilustrasi kedua kaki yang dibentuk seseorang ketika berjalan maupun berlari.

Karena nilai l sudah diketahui, maka dengan hukum segitiga sama sisi akan didapatkan nilai θ . Kemudian melalui Persamaan (1) dan data eksperimen lainnya, dapat diperoleh v_{krit} dalam m/s seperti dalam kolom paling kanan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel data hasil eksperimen.

l (m)	v_{krit} (bpm)	Δs (m)	θ (°)	v_{krit} (m/s)
1	200	0.4	23.074	1.33
0.97	185	0.4	23.8	1.23
0.95	180	0.4	24.24	1.2
0.9	175	0.4	25.42	1.17
0.8	150	0.45	32.67	1.125

Model

Ada dua model yang dapat digunakan sebagai pembandingan hasil eksperimen, yaitu model berjalan dan berlari oleh Alexander dan Sprott. model pertama yang akan dijelaskan adalah model Alexander.

Menurut Alexander, berjalan adalah gerakan di mana salah satu kaki kita jatuh ke tanah sesaat sebelum kaki yang lain diangkat. Ketika salah satu kaki berada di atas tanah, tubuh bergerak sepanjang sebuah lintasan busur lingkaran sehingga tidak ada usaha yang dikeluarkan karena energi kinetik diubah ke energi potensial gravitasi, begitu pula sebaliknya. Usaha dikeluarkan sesaat ketika salah satu kaki menginjak tanah dan kaki yang lain meninggalkan tanah, dan usaha itu tersebut harus dikeluarkan untuk menggantikan energi kinetik yang hilang. Sedangkan ketika berlari, energi kinetik dan energi potensial berubah-ubah secara fluktuatif. Tubuh mencapai ketinggian dan kecepatan maksimum ketika kedua kaki berada di udara. Karena itu, prinsip bandul tidak dapat diterapkan disini. Masing-masing usaha berjalan dan berlari per satuan langkah oleh Alexander adalah sebagai berikut

$$\frac{W_{jalan}}{\Delta s} = \frac{mv_{\theta}^2 \sin \theta}{4l}, \quad (2)$$

$$\frac{W_{lari}}{\Delta s} = \frac{mg \tan \theta}{4}. \quad (3)$$

Gerakan berjalan maupun berlari menurut Sprott hampir sama dengan model Alexander. Bedanya, disini Sprott menganggap bahwa setiap telapak kaki meninggalkan tanah sesaat ketika telapak kaki yang lain menyentuh tanah, kedua kaki menegang ketika bersentuhan dengan tanah seperti jari-jari dari sebuah roda yang berputar. Kelenturan lutut dari kaki yang mengayun bebas menjaga kaki untuk berhubungan dengan tanah ketika kaki mengayun maju, dan kelenturan seperti itu tidak memakan energi yang signifikan atau mengubah periode osilasi alami dari kaki. Energi dikeluarkan untuk mengangkat pusat massa dari tubuh setiap langkahnya, dan energi ini tidak perlu dikeluarkan ketika pusat masa dijatuhkan. Sedangkan ketika berlari, setiap telapak kaki menyentuh tanah dalam waktu yang dapat diabaikan selama gaya impulsif mendorong tubuh sepanjang lintasan parabola sampai kaki yang lainnya menghentak tanah. Energi dikeluarkan untuk mengangkat pusat massa tubuh setiap langkah dan energi ini tidak dikeluarkan lagi ketika pusat massa turun. Jadi didapatkan usaha per satuan waktu oleh Sprott adalah

$$\frac{W_{jalan}}{\Delta t} = \left(\frac{mg}{\pi} \right) \left(\sqrt{\frac{3gl}{2}} \right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\pi^2 v^2}{6gl}} \right), \quad (4)$$

$$\frac{W_{lari}}{\Delta t} = \frac{mgv}{4}. \quad (5)$$

Untuk mendapatkan persamaan kecepatan kritis dari model Alexander, akan disamakan Persamaan (2) dan Persamaan (3) masing-masing di ruas kiri dan ruas kanan, sehingga didapatkan

$$v_{krit} = \sqrt{\frac{gl}{\cos \theta}} \quad (6)$$

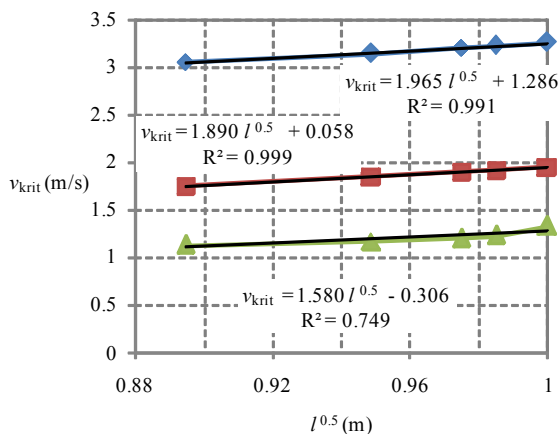
Dengan menyamakan Persamaan (4) dan Persamaan (5) akan didapatkan persamaan kecepatan kritis model Sprott

$$v_{krit} = \frac{12}{5\pi} \sqrt{\frac{2gl}{3}} \quad (7)$$

Data perbandingan kecepatan kritis dari ketiga model akan dijelaskan pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Tabel 3. Data kecepatan kritis ketiga model.

l (m)	v_{krit} (m/s)		
	Alexander	Sprott	Empirik
1.00	3.26	1.95	1.33
0.97	3.22	1.92	1.23
0.95	3.20	1.90	1.20
0.90	3.14	1.85	1.17
0.80	3.05	1.75	1.13



Gambar 2. Nilai kecepatan kritis v_{krit} untuk berbagai panjang kaki l menurut model: Alexander (♦), Sprott (■), dan empirik (▲).

Model empirik memberikan persamaan

$$v_{krit} = 1.58\sqrt{l} - 0.306, \quad (8)$$

yang berbeda dengan kedua model sebelumnya dalam Persamaan (6) dan (7). Gradien dari v_{krit}

untuk fungsi terhadap $l^{0.5}$ berturut-turut untuk model Alexander, Sprott, dan empirik adalah 1.965, 1.890, dan 1.580. Asumsi saat membuat model merupakan pembeda fungsi kecepatan kritis dari dua model pertama. Untuk model empirik nilai yang diperoleh baru berdasarkan orang-orang dengan panjang kaki antara rentang 0.8 sampai 1.0 m. Untuk orang-orang yang lebih pendek atau panjang kakinya dapat diperoleh hasil yang berbeda.

Kemudian, belum ada verifikasi besar usaha berlari dan berjalan dari model Alexander dan model Sprott karena sebenarnya tubuh manusia adalah sistem yang kompleks, maka model yang disajikan masih dirasa terlalu sederhana. Dengan demikian kecepatan kritis yang diusulkan kedua model tersebut belum dapat dipastikan pula validitasnya.

Selanjutnya, diharapkan akan dilakukan lebih banyak lagi eksperimen sehingga didapatkan model yang lebih akurat.

Kesimpulan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa semakin panjang kaki seseorang nilai kecepatan kritisnya akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan prediksi model Alexander dan model Sprott di mana kecepatan kritis berbanding lurus dengan akar panjang kaki, yang kira-kira sesuai dengan model empirik. Untuk rentang panjang kaki dari 0.8-1.0 m, model empirik memberikan nilai kecepatan kritis 1.13-1.33 m/s, yang lebih kecil dari kecepatan kritis yang diperkirakan model Alexander (3.05-3.26 m/s) dan model Sprott (1.75-1.95 m/s).

Ucapan terima kasih

Presentasi penelitian ini didukung oleh Program Riset Inovasi KK ITB dalam tahun 2013 dengan SPK No. 418/I1.C01/PL/2012.

Referensi

- [1] "Walk / Run Metabolic Calculator", URI <http://www.exrx.net/Calculators/WalkRunMETs.html> [2013.07.16].
- [2] "Energy Expenditure", URI <http://www.brianmac.co.uk/energyexp.htm> [2013.07.16].
- [3] "Walking Calorie Burn Calculator", URI <http://www.shapesense.com/fitness-exercise/calculators/walking-calorie-burn-calculator.aspx> [2013.07.16].
- [4] R. M. Alexander, "Modelling, step by step", Plus, University of Cambridge, 1 Jan 2001, URI <http://plus.maths.org/content/modelling-step-step> [2013.02.23].

- [5] J. C. Sprott, "Energetics of walking and running", University of Wisconsin, 7 Apr 2009, URI <http://sprott.physics.wisc.edu/technote/walkrun.htm> [20130305].
- [6] Grace, "Perbandingan Model Berlari dan Berjalan dalam Kampus ITB", Skripsi S.Si., FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

Grace*

Mathematics Department
Institut Teknologi Bandung
gracesuhendra91@gmail.com

Sparisoma Viridi

Nuclear Physics and Biophysics Research Division
Institut Teknologi Bandung
dudung@fi.itb.ac.id

Nuning Nuraini

Industrial and Financial Mathematics Research
Division
Institut Teknologi Bandung
nuning@math.itb.ac.id

*Penulis korespondensi