

KONSUMSI ENERGI MEKANIK GERAK LANGKAH TUBUH MANUSIA SAAT BERJALAN

MECHANICAL ENERGY CONSUMPTION OF HUMAN BODY MOTION WHEN WALKING

Sardjito, Nani Yuningsih, Kunlestiowati Hadiningrum
(Staf Pengajar KL MKU Politeknik Negeri Bandung)

ABSTRAK

Suatu model gerak rotasi yang dikaitkan dengan gerak selaras sederhana digunakan untuk merumuskan konsumsi energi mekanik yang diperlukan manusia saat melangkah pada gerakan berjalan. Dengan menggunakan parameter-parameter numerik tubuh manusia yang telah diteliti sebelumnya, dihitung konsumsi energi untuk berbagai variasi massa tubuh dan berbagai nilai kelajuan gerak melangkah. Hasil perhitungan model ini dibandingkan dengan konsumsi energi yang selama ini dihitung dengan model perumusan Hukum Margaria

Kata Kunci : konsumsi energi, melangkah, berjalan

ABSTRACT

A rotational motion models associated with simple aligned movement is used to formulate the necessary mechanical energy consumption when a man starts making a walking movement. By using the numerical parameters of the human body that have been studied previously, energy consumption for a wide variety of body mass and various values of the speed of motion step were calculated. The results of the calculation model is compared to the energy consumption calculated by the formulation of Margaria Law model.

Keywords : *energy consumption , stepping , walking*

PENDAHULUAN

Untuk mendeskripsikan fenomena fisis yang terjadi pada suatu sistem, perlu dibuat model penyederhanaan dari sistem tersebut, baik secara visual maupun matematis. Dengan demikian, analisis terhadap sistem lebih mudah dilakukan. Model fenomena fisika terhadap gejala-gejala biologi, dapat dirumuskan melalui konsep-konsep yang berlaku secara umum

dalam ilmu fisika. Gejala alam yang terjadi sering kali tidak cukup dijelaskan secara deskriptif. Justru banyak gejala alam yang lebih mudah dipahami melalui pemodelan, baik itu model visual, maupun matematis. Dengan model tersebut, dapat diperoleh pengembangan lebih lanjut. Hal ini terjadi pada semua bidang ilmu, baik itu ilmu dasar maupun ilmu terapan, termasuk fisika. Untuk mendeskripsikan fenomena fisis yang terjadi pada suatu sistem, perlu

dibuat suatu model penyederhanaan dari sistem tersebut.

Sejauh ini, konsep dan perhitungan fisika hanya diterapkan pada fenomena yang dialami benda mati. Hal ini dapat dimengerti karena perlakuan apa pun terhadap benda mati mudah diukur dan dikendalikan. Penerapan fisika bagi makhluk hidup agak jarang dilakukan; itupun hanya terbatas pada skala yang sangat makro (makhluk hidup dalam sistem) atau yang sangat mikro (fenomena transpor pada sel (Molina, 2001). 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 (Morasso, 2000) terutama karena dinamisnya sifat kehidupan.

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. Sementara penyebab gerak pada tubuh manusia diatur oleh suatu sistem pegas pada otot beserta responsnya, yang lebih terkait dengan terjadinya besar kecilnya energi mekanik. Energi mekanik yang dilakukan manusia pada saat bergerak horizontal (berjalan, berlari) terdiri atas usaha untuk melakukan gerak langkah, baik translasi maupun rotasi, yang meliputi gerak tungkai maupun lengan, energi kinetik untuk mempertahankan laju gerak, serta usaha terkait pengaruh lingkungan - dalam hal ini untuk melawan hambatan udara - dengan koefisien-koefisien yang diperoleh melalui analisis numerik (Kokshenev, 2004 & Sardjito, Yuningsih, Hadiningrum K., 2013).

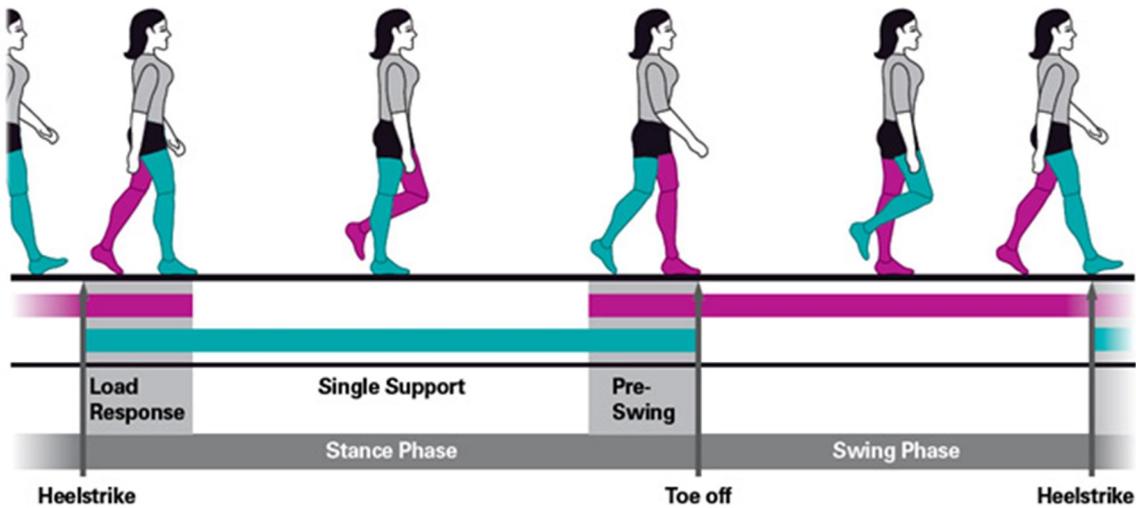
ANALISIS ENERGI UNTUK GERAK LANGKAH MANUSIA

Gerak manusia berjalan atau berlari ditandai dengan lintasan gerak translasi pusat massa orang tersebut. Namun, karena tungkai yang bergerak melangkah tidak dapat dianggap sebagai partikel, tinjauan gerakannya harus memperhitungkan ketegaran tungkai. Karenanya, model yang lebih tepat digunakan adalah model gerak rotasi tungkai dengan pinggul yang merupakan tempat beradanya pusat massa tubuh menjadi sumbu rotasi gerak. Dalam gerak semacam ini, peran tendon sangat penting sebagai komponen penyimpanan energi elastik dan pelepasan saat diperlukan.

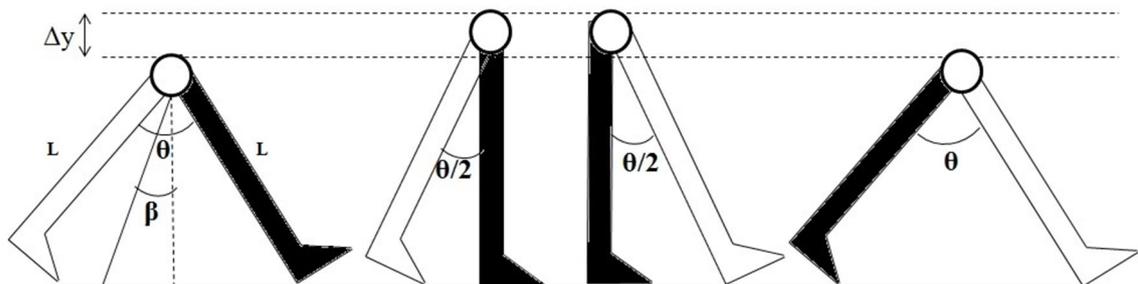
Pada gerak rotasi tungkai saat melangkah, terdapat tiga fasa berturutan. Pertama, saat posisi pusat massa tubuh bergerak naik. Kedua, saat tungkai berayun dengan amplitudo sudut θ . Ketiga, saat posisi pusat massa tubuh kembali bergerak turun. Untuk gerak berjalan, pada saat melangkah, selalu ada satu kaki yang bersentuhan dengan tanah. Jadi, tidak ada saat kaki kedua-duanya melayang (tidak bersentuhan dengan tanah). Inilah yang membedakan gerak berjalan dan berlari.

Pada saat terjadi gerak satu langkah sempurna, titik pusat massa tubuh akan berpindah arah mendatar, sejauh x , dengan $x = 2L \sin(\theta/2)$, dengan L adalah panjang tungkai, dan θ adalah sudut terbesar antara tungkai depan dengan tungkai belakang (lihat gambar 2)

Perhatikan gambar berikut ini



Gambar 1. Gerak Satu Langkah Sempurna



Gambar 2. Satu Langkah Sempurna

Jika β adalah sudut yang dibentuk tungkai ayun terhadap arah vertikal, torsi yang dilakukan otot tungkai tersebut M sehingga memenuhi persamaan

$$M = I \frac{d^2 \beta}{dt^2} + \frac{\mu \cdot g \cdot L}{2} \sin \beta \dots\dots\dots(1)$$

Untuk β yang cukup kecil ($\sin \beta \approx \beta$), diperoleh

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} + \frac{\mu \cdot g \cdot L}{2I} \beta = \frac{M}{I} \dots\dots\dots(2)$$

dengan μ menyatakan massa tungkai , g menyatakan percepatan gravitasi , L panjang tungkai dan I menyatakan momen inersia tungkai.

Bila terdapat gangguan dari luar (misal gaya gesekan/hambatan, dan sebagainya), persamaan (1) harus ditulis dalam bentuk

$$M = I \frac{d^2 \beta}{dt^2} + \frac{\mu \cdot g \cdot L}{2} \beta + M_{\text{luar}} \dots\dots\dots(3)$$

dengan M_{luar} menyatakan torsi karena adanya pengaruh luar tersebut.

Sementara pengaruh luar dianggap belum ada ($M_{\text{luar}} = 0$), dari keadaan awal

$$\beta(0) = -\frac{\theta}{2}, \text{ dan } \frac{d\beta}{dt} = \omega_0 \text{ serta dari}$$

definisi bahwa $\omega = \sqrt{\frac{\mu \cdot g \cdot L}{2I}}$,

persamaan (2) dapat diselesaikan menjadi

$$\beta(t) = \left(\frac{\theta}{2} + \frac{M}{I\omega^2}\right) \cos \omega t + \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega t + \frac{M}{I\omega^2} \dots\dots\dots(4)$$

Dari solusi ini, terlihat adanya kesesuaian antara gerak tungkai (osilasi) dengan apa yang sudah dibahas dalam penelitian terdahulu (Sardjito, Yuningsih, Hadiningrum, 2013).

Untuk satu langkah sempurna, tungkai berayun dari posisi $\beta(0) = -\frac{\theta}{2}$ hingga ke posisi $\beta(T) = +\frac{\theta}{2}$ dengan perpindahan pusat massa tubuh sejauh

$x = 2L \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ dan waktu yang diperlukan untuk kondisi tersebut adalah T.

Jadi, $T = \frac{2L \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{V}$ dengan V

menyatakan kecepatan rerata gerak pusat massa pada arah mendatar.

Jika persamaan (4) diselesaikan untuk menentukan nilai torsi M, dengan memasukkan

nilai $\beta(T) = \frac{\theta}{2}$, diperoleh

$$M = \frac{I\omega^2\theta}{2} \left[\frac{1 + \cos(\omega T)}{1 - \cos(\omega T)} \right] - \left[\frac{\omega_0 \sin(\omega T)}{\omega (1 - \cos(\omega T))} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Selama satu periode gerak langkah sempurna, dapat didefinisikan daya rerata sebagai

$$P_R = \frac{W}{T} = \frac{\int M d\beta}{T} \text{ dengan batas } \beta \text{ dari } -\frac{\theta}{2} \text{ hingga } +\frac{\theta}{2}$$

Dengan demikian, diperoleh

$$P_R = \frac{M\theta}{T} = \frac{M\theta V}{2L \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \dots\dots\dots(6)$$

Selain daya untuk berayunnya tungkai selama gerak ini, dikeluarkan juga daya yang terkait dengan perubahan vertikal posisi pusat massa tubuh, yang untuk tiap langkah besarnya

$$P_{PM} = \frac{mg\Delta y}{\frac{1}{2}T} = \frac{m \cdot g \cdot V \left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \dots\dots\dots(7)$$

m adalah massa tubuh sehingga daya total tiap langkah adalah

$$P = P_R + P_{PM} \dots\dots\dots(8)$$

Dari besaran daya ini, dapat ditentukan konsumsi energi yang dikeluarkan tiap kilogram massa tubuh untuk setiap kilometer jarak yang ditempuh sebagai

$$KE = \frac{P}{mV} \text{ dalam satuan } \frac{kJ}{kgkm} \dots(8.a)$$

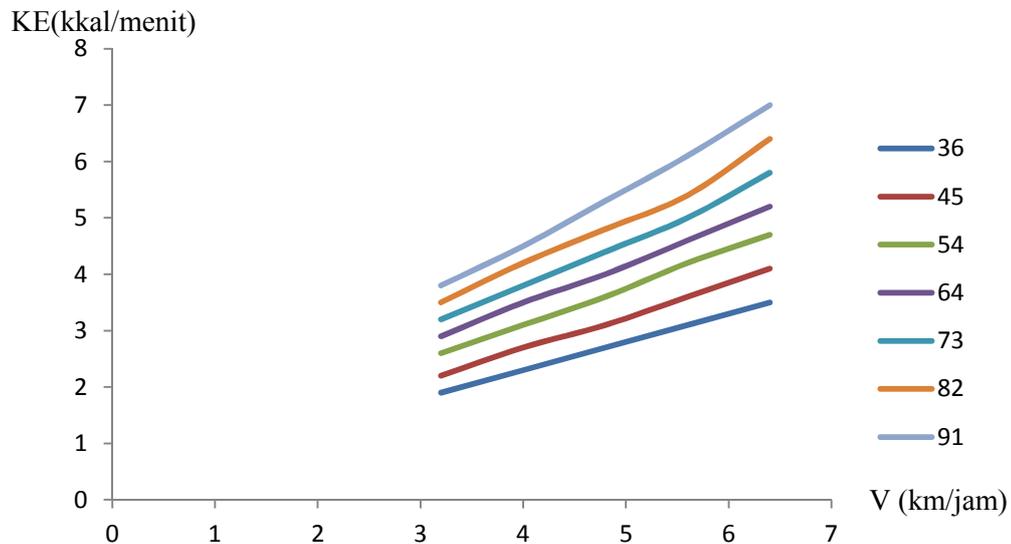
dengan P dihitung dari persamaan-persamaan (6,7 dan 8).

$$\text{atau } KE = \frac{0,24P}{mV} \text{ dalam satuan } \frac{kcal}{kgkm} \dots(8.b)$$

Beberapa nilai konsumsi energi yang dihitung dari persamaan di atas dapat dilihat pada tabel 1 dan gambar 5 berikut ini:

Tabel 1. Konsumsi energi (KE dalam kkal/menit) untuk berbagai nilai massa tubuh (m, kg) dalam berbagai kecepatan (v, km/jam) menurut perhitungan

v(km/jam)	m(kg)						
	36	45	54	64	73	82	91
3.2	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8
4.0	2.3	2.7	3.1	3.5	3.8	4.2	4.5
4.8	2.7	3.1	3.6	4.0	4.4	4.8	5.3
5.6	3.1	3.6	4.2	4.6	5.0	5.4	6.1
6.4	3.5	4.1	4.7	5.2	5.5	6.4	7.0



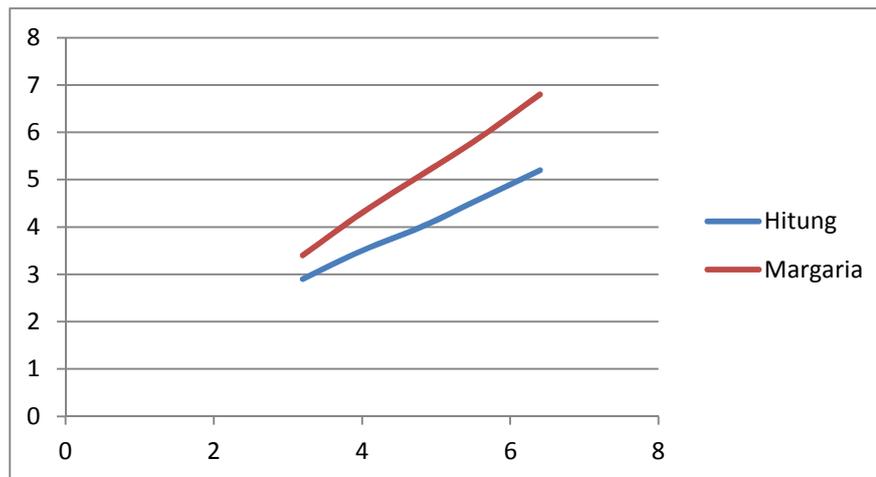
Gambar 3. Nilai Konsumsi Energi (KE, kkal/menit) untuk berbagai kecepatan (v, km/jam) dan berbagai massa tubuh (m, kg)

Hasil pengujian terhadap konsumsi energi, yang dihitung dari persamaan di atas, akan dicocokkan dengan pernyataan Hukum Margaria (Cavagna,

Saibene, & Margaria, 1963), yang menyatakan bahwa konsumsi energi ini mendekati angka 1 kkal/kg km.

Tabel 2. Perbandingan nilai Konsumsi Energi (KE, kkal/menit) menurut Hitungan dan Hukum Margaria

V (km/jam)	36kg		45kg		54kg		64kg		73kg		82kg		91kg	
	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M
3.2	1.9	1.9	2.2	2.4	2.6	2.9	2.9	3.4	3.2	3.9	3.5	4.3	3.8	4.8
4.0	2.3	2.4	2.7	3.0	3.1	3.6	3.5	4.3	3.8	4.8	4.2	5.2	4.5	6.0
4.8	2.7	2.9	3.1	3.6	3.6	4.3	4.0	5.1	4.4	5.8	4.8	6.3	5.3	7.2
5.6	3.1	3.3	3.6	4.2	4.2	5.0	4.6	5.9	5.0	6.8	5.4	7.6	6.1	8.4
6.4	3.5	3.8	4.1	4.8	4.7	5.7	5.2	6.8	5.5	7.8	6.4	8.7	7.0	9.6



Gambar 6. Perbandingan nilai Konsumsi Energi (kkal/menit) antara Hitungan dengan Hukum Margaria untuk massa tubuh 64 kg

SIMPULAN

Telah dirumuskan model konsumsi energi yang diperlukan bagi gerak manusia saat berjalan pada fase melangkah. Model ini diawali dengan tinjauan gerak rotasi tungkai saat melangkah yang kemudian dihitung usaha mekaniknya. Jika dibandingkan dengan model yang dinyatakan dengan Hukum Margaria, konsumsi energi yang dirumuskan melalui model gerak rotasi ini memiliki nilai sedikit lebih kecil.

Ucapan Terima Kasih

Makalah ini merupakan bagian dari Kegiatan Penelitian Fundamental berjudul "Model Biomekanika dari Dinamika Titik

Berat dan Titik Pusat Tekanan Tubuh Manusia Saat Berdiri, Berjalan, dan Berlari". Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktur Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan kepercayaan melalui Hibah Penelitian Fundamental Tahun Anggaran 2014 kepada tim penulis melalui Surat Perjanjian Nomor: 333.3/PL.1.R5/PL/2013, tanggal : 5 Maret 2014.

DAFTAR PUSTAKA

Cavagna, G.A., F. P. Saibene, & R. Margaria. 1963. "External Work in Walking", *J. Appl. Physiol.* **18**, 1-9.

- Kokshenev V.B. 2004. "Dynamics of Human Walking", *arXiv:physics/0404089 v1*, 19 April 2004.
- Molina M.I. 2001. "A Simple Solvable Model of Body Motion in a One Dimensional Resistive Medium", *arXiv:physics/0102052*, 16 Feb. 2001.
- Morasso PG, Schieppatti. 2000. *Biological Cybernetics* 82-2000, pp 1622-1626.
- Sardjito, Yuningsih N., Hadiningrum K. 2013. "Analisis Kinematika Gerak Pusat Massa Tubuh Manusia Saat Berjalan", *Prosiding IRWNS 2013*, pp. 297-301