

MODEL BANDUL TERBALIK BAGI KEADAAN MANUSIA BERDIRI

Sardjito

(Staf Pengajar UP MKU Politeknik Negeri Bandung)

Nani Yuningsih

(Staf Pengajar UP MKU Politeknik Negeri Bandung)

ABSTRAK

Model fisika dari gerak tubuh manusia menyerupai bandul fisis yang berayun dengan sendi *ankle* yang bertindak sebagai poros ayunan. Dalam keadaan berdiri tenang, tubuh manusia berayun bolak balik pada arah depan-belakang, ditandai dengan adanya osilasi dari titik berat tubuh. Frekuensi ayunan ini bergantung pada berat, tinggi, dan momen kelembaman tubuh, serta ukuran *ankle*. Gerak osilasi bandul ini dikendalikan juga oleh otot *achilles* pada tungkai belakang yang dalam model fisisnya bertindak sebagai pegas pengendali.

Kata kunci: Pemodelan fisika, osilasi, berdiri, titik berat tubuh, bandul terbalik

ABSTRACT

Human body movement can be modeled physically as inversed pendulum which oscillates with the ankle acts as pivot. During quiet standing, body is swaying in forward-reversed direction. Its swaying frequency depends on body's weight, height, and moment of inertia, and also depends on ankle size. This swaying pendulum is also controlled by Achilles muscle on the leg which has function in the model as control spring.

Keywords: Physics modeling, oscillation, standing, body's centre of gravity, inversed pendulum

PENDAHULUAN

Tubuh manusia merupakan sistem “banyak partikel”, yang sekaligus juga merupakan “benda tegar” yang kompleks dan dinamis. Karena itulah, untuk melakukan analisis fisis bagi tubuh manusia diperlukan pemodelan. Manusia yang sedang berdiri diam, berada dalam keseimbangan statik^[1,2,3,4,5]. Namun model keseimbangan statiknya masih sulit dirumuskan, mengingat perhitungan momen inersia serta pusat massa tubuh harus melibatkan berbagai faktor dinamis dari metabolisme yang terjadi dalam tubuh.

Besaran-besaran mekanik yang terlibat pada gerak tubuh manusia sudah pernah diukur secara empirik^[6]. Namun hasil ini masih belum sesuai dengan perhitungan teoritis. Perhitungan teoritis yang ada selama ini mengasumsikan tubuh manusia sebagai kombinasi beberapa benda tegar-elastik dengan momen inersia sistem yang ekuivalen dengan jumlah momen inersia bagian-bagian tubuh tersebut. Dengan demikian perumusan teoritis yang ada selama ini masih perlu disempurnakan dan dikoreksi.

Tulisan ini membahas penelitian pemodelan mekanik tubuh manusia pada saat berdiri tenang.. Secara teoritis model yang diusulkan adalah model ayunan dengan pegas sebagai pengontrol gerak. Setelah itu dicari solusi dari model tersebut yang lalu dilakukan proses pencocokan (*matching*) dengan keadaan empirik (hasil pengukuran) serta data sekunder dari penelitian biomekanik maupun fisiologi tentang tubuh manusia. Model serta solusi yang diperoleh dapat digunakan untuk kepentingan

berbagai analisis dalam Fisika Biologi, maupun pengetahuan lain yang terkait seperti kedokteran, paramedik, keolahragaan, mekatronika (teknologi robotika), sosio-teknologi, dan sebagainya.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terapan multidisiplin yang memadukan konsep-konsep fisika, biologi, matematika, statistika, serta komputasi yang selama ini dianggap merupakan cabang ilmu pengetahuan yang tidak berkaitan satu dengan yang lainnya, secara langsung maupun tak langsung terlibat dengan fisika biologi, seperti kedokteran, paramedis, keperawatan, olahraga, maupun sosio-teknologi.

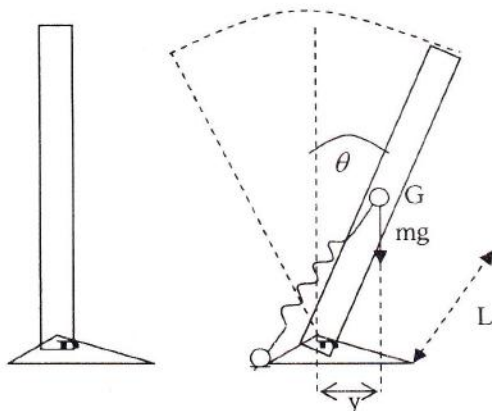
METODE PENELITIAN

Gejala yang terjadi dalam alam ini selalu mengikuti hukum alam yang ditandai dengan adanya keteraturan. Terdapat analogi antara bentuk keteraturan yang satu dengan keteraturan lainnya. Gerak bagian tubuh manusia diasumsikan memiliki analogi dengan gerak benda tegar pada umumnya, dengan demikian dapat dianggap sebagai kombinasi dari beberapa batang kaku, yang elastisitasnya bersifat dinamis (tidak konstan). Derajat kebebasan gerak batang ini terdiri dari komponen gerak translasi pusat massanya serta komponen gerak rotasi di sekitar sendi penggerak bagian tubuh tersebut. Namun karena gerak bagian tubuh ini dikendalikan oleh otot tertentu, maka otot pengendali ini menyerupai mekanisme pegas pengendali gerak batang. Dengan demikian model geraknya

diasumsikan sebagai gerak batang dengan beberapa derajat kebebasan yang dikendalikan oleh pegas.

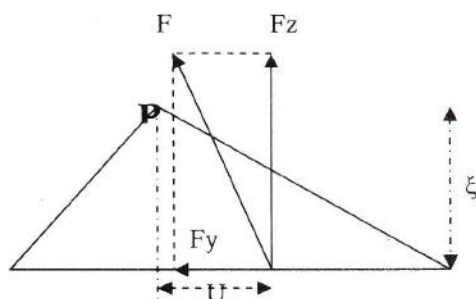
Pada saat berdiri tenang, tubuh manusia dimodelkan sebagai bandul dengan poros berada pada sendi *ankle*, dan berayun di sekitar poros ini ke arah depan dan belakang.

Model ayunan terbalik untuk keadaan manusia berdiri ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1 Model ayunan terbalik untuk manusia berdiri

Jika bagian poros *ankle* (P) diperbesar akan tampak seperti gambar.2.



Gambar 2 Bagian poros *ankle* yang diperbesar dengan P $\equiv$ poros yang terletak pada sendi "*ankle*"

G $\equiv$ titik berat tubuh (dalam kondisi berdiri tenang dan normal, terletak sejauh y di depan P).

$\xi \equiv$ Tinggi poros *ankle*

Untuk menahan agar tidak jatuh ke depan karena gaya berat, otot tungkai belakang aktif menahan seperti pegas. Otot ini dikenal sebagai "*plantar flexor/gastrocnemius*"⁽²⁾, yang berada pada tendon *achilles*/tumit. Dalam kenyataannya ada otot lain yang mencegah gerak relatif bagian tubuh satu terhadap yang lain, dan sementara hal ini diabaikan untuk penyederhanaan derajat kebebasan sistem.

Otot penahan ini tidak dapat "mengunci" posisi tubuh sehingga tubuh berayun ke depan dan ke belakang. Jika I adalah momen inersia tubuh (minus kaki) terhadap titik P, F adalah gaya reaksi tanah terhadap telapak kaki, m = massa tubuh (minus kaki, jadi besarnya sekitar 0,982 kali massa total tubuh ⁽⁷⁾), L = jarak P ke G, persamaan gerak untuk tubuh dalam keadaan berdiri dapat ditulis sebagai

$$F_y = m \frac{d^2 y}{dt^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$F_z = m \frac{d^2 z}{dt^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = mgL \sin \theta - M \dots \dots \dots (3)$$

Dimana :

$\theta \equiv$ sudut antara tubuh dengan garis vertikal;

M $\equiv$ torsi oleh *flexorplantar* untuk melawan torsi gaya berat;

$$M = UF_z + \xi F_y \dots \dots \dots (4)$$

F_x dan $F_z \equiv$ komponen gaya reaksi tanah.

Untuk sudut kemiringan tubuh terhadap vertikal (θ) yang kecil, dapat dilakukan pendekatan :

$L \sin \theta \approx L \theta$ sehingga

$$y \approx L \theta \dots \dots \dots (5)$$

Jika persamaan (1), (2), (3), dan (4) disubstitusikan pada persamaan (5), serta dengan mengambil bahwa pada arah vertikal

$F_z = mg$, maka :

Persamaan (4) dapat ditulis

$$M = Umg + \xi m \frac{d^2 y}{dt^2} \text{ dan}$$

persamaan (3) dapat ditulis

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = mgy - \left[Umg + \xi m \frac{d^2 y}{dt^2} \right], \text{ sedang}$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{L} \frac{d^2 y}{dt^2}, \text{ maka diperoleh}$$

$$y - U = \left[\frac{\xi}{g} + \frac{I}{mgL} \right] \frac{d^2 y}{dt^2} \dots \dots \dots (6)$$

atau

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \omega_c^2 (y - U) \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{dengan } \omega_c = \frac{g}{\xi + \frac{I}{mL}} \text{ atau}$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\xi + \frac{I}{mL}}} \dots \dots \dots (8).$$

Persamaan (7) merupakan persamaan Gerak Selaras, dalam hal ini ayunan dengan frekuensi karakteristik/alamiah diberikan oleh persamaan (8).

Untuk seseorang yang bermassa 76,7 kg dan tinggi badan 173 cm, persen berat masing-masing bagian tubuh dan letak titik pusat massa dari ujung bagian-bagian tubuh dapat dilihat pada tabel 1 ^[7]

Tabel 1. Proporsi berat dan posisi pusat massa bagian tubuh⁽⁷⁾

Bagian tubuh	% berat	Segmen titik pusat massa (COM) dari ujung
Kaki	1,8	0,506
Tungkai (lutut-ankle)	4,4	0,433
Paha (pinggul-lutut)	11,2	0,433
Lengan bawah (siku-tangan)	2,6	0,682
Lengan atas (bahu-siku)	3,3	0,430
Kepala, leher, tubuh	53,4	0,540

Dari data tabel diatas diperoleh momen inersia $I = 85,02 \text{ kg.m}^2$, posisi titik pusat massa $L = 0,933 \text{ m}$, posisi ankle $\xi = 0,065 \text{ m}$ dari bidang tumpu, dan percepatan gravitasi $g = 9,79 \text{ m/s}^2$, maka frekuensi alamiah model ayunan ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (8)

dan didapat sebesar $f_c = 0,397 \text{ Hz}$. Hasil perhitungan teoritik ini selanjutnya dibandingkan dengan hasil analisis terhadap data empirik. Data empirik diperoleh dari hasil pengamatan video seseorang yang sedang berdiri seperti dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Data pengamatan waktu dan simpangan untuk keadaan manusia berdiri

Waktu (detik)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Simpangan (mm)	2,0	-2,0	-3,0	-2,0	1,0	2,2	3,0	2,5	2,0	4,0

Waktu (detik)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
Simpangan (mm)	3,0	2,0	1,5	3,0	2,0	0,5	0	-0,8	-1,8	-1,0

Waktu (detik)	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
Simpangan (mm)	0	2,0	0,2	-0,5	-1,5	-0,5	2,0	-0,2	-2,2	-2,0

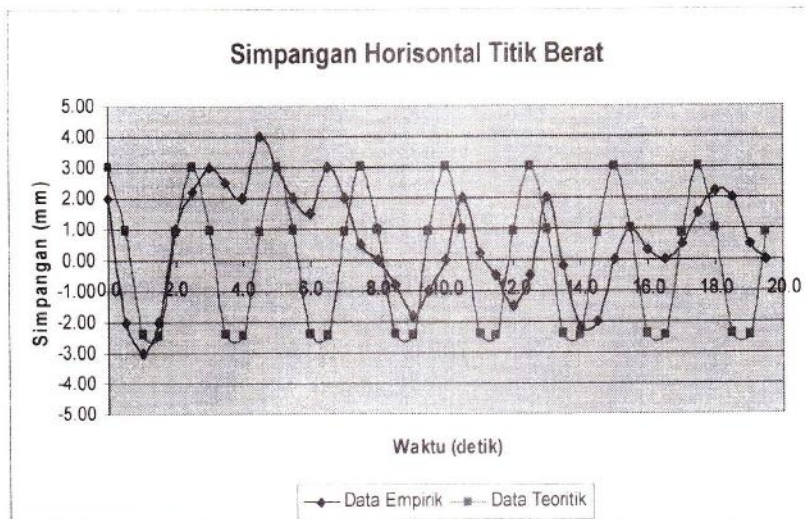
Waktu (detik)	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5
Simpangan (mm)	0	1,0	0,3	0	0,5	1,5	2,2	2,0	0,5	0

Perbandingan antara perhitungan teoritik dengan analisis empirik dapat dilihat pada gambar 3.

Grafik untuk perhitungan teoritik disederhanakan dengan mengambil nilai $U = 0$, sehingga persamaan 7 mempunyai bentuk yang lebih sederhana yakni

$\frac{d^2 y}{dt^2} = \omega_c^2(y)$ yang berarti solusinya hanya berupa fungsi sinusoida sederhana.

Dari gambar 3 diperoleh perioda empirik gerak titik berat tubuh manusia dengan asumsi model bandul terbalik adalah $T = \frac{19,5s}{7,5} = 2,6s$ yang berarti frekuensi alamiahnya $f_c = 0,384 \text{ Hz}$.



Gambar 3 Simpangan horisontal titik berat secara teoritik dan empirik

Dari bahasan di atas dapat diambil kesimpulan bahwa model teoritik untuk keadaan manusia berdiri sebagai sistem bandul terbalik cukup memadai karena cukup mendekati data empirik (dapat dilihat dari frekuensi alamiahnya, secara teoritik 0,397 Hz sedangkan secara empirik didapat sebesar 0,384 Hz.). Perbedaannya adalah bahwa dalam kenyataannya tubuh manusia berosilasi tidak sebagai gerak selaras sederhana bebas (secara matematis bukan fungsi sinusoida sederhana), dan memang pendekatan teoritisnyapun memang demikian, karena grafik teoritis pada

gambar di atas merupakan penyederhanaan dengan mengambil nilai $U = 0$.

Analisis di atas membuktikan adanya gerak osilasi titik berat tubuh, seperti halnya bandul, dengan *ankle* yang bertindak sebagai poros. Kenyataan ini diperkuat oleh penelitian yang dilakukan oleh Casadio et.al⁽⁸⁾, mengenai adanya osilasi dari titik pusat tekanan (*centre of pressure*) dari tubuh terhadap lantai tempat pijakan. Penelitian tersebut memperoleh hasil mengenai simpangan titik pusat tekanan pada arah depan belakang terhadap waktu sebagai berikut :



Gambar 4 : Simpangan Titik Pusat Tekanan terhadap waktu (arah depan-belakang)

(Sumber : Casadio et. al⁽⁸⁾)

Dari grafik di atas terlihat bahwa titik pusat tekanan juga berosilasi dan memiliki frekuensi yang hampir mirip dengan frekuensi osilasi titik berat sebagai bandul terbalik

KESIMPULAN

Dalam keadaan berdiri tenang, tubuh manusia dapat dimodelkan sebagai bandul terbalik dengan *ankle* sebagai poros, yang berosilasi dengan frekuensi alamiah yang nilainya bergantung pada struktur tubuh (tinggi badan, berat, komposisi setiap anggota badan, serta posisi *ankle*). Osilasinya bukan merupakan gerak harmonik sederhana bebas, karena masih ditentukan oleh elastisitas serta kinerja otot tungkai yang berfungsi sebagai pegas penahan. Keadaan kestabilan keseimbangan tubuh sangat ditentukan oleh parameter-parameter osilasi bandul ini.

Karena gerakannya bukan osilasi bebas, maka untuk model bandul terbalik ini masih harus dilakukan analisis lebih lanjut, terutama untuk komponen gaya pengontrol (yakni gaya pegas dari otot tendon *achilles*) yang akan mengubah gerak osilasi bebas menjadi osilasi paksa. Selain itu juga masih harus diteliti parameter osilasi untuk berbagai kondisi tubuh (usia, keadaan kesadaran, tingkat kebugaran).

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. Melalui kontrak No. 50/NO9.R9/KU/2007
Tanggal 19 Februari 2007

DAFTAR PUSTAKA

- (1) Winter D.A., (2005), *Biomechanics and motor control of human movement*, John Wiley, 2nd ed.
- (2) Borg F.G., (2005), An inverted pendulum with a springy control model, *arXiv:physics/0512122v1*, 14 Dec 2005
- (3) Morasso PG, Schieppatti, (2000), *Biological Cybernetics* 82-2000, pp 1622-1626
- (4) Winter D.A. et al., (2001), *Journal of Neurophysiology* 85, 2001, pp 2630-2633
- (5) Gatev P. et al., (2001), *Journal of Physiology* 532-2001, pp.879-891
- (6) Griffith I.W. et al. (2005), Measuring the moment of inertia by a rotating platform method, *Am.J.Phys* 73(1), 2005, pp. 85-92
- (7) S.A. Gard et al.(2004), Comparison of kinematics and kinetic methods for computing the vertical motion of the body center of mass during walking, *Human Movement Science* 22, pp. 597-610
- (8) Casadio M, Morasso PG, Sanguinetti V., (2005), Direct measurement of ankle stiffness during quiet standing, *Gait & Posture* 21 (2005), pp 410-424