

Analisis Dimensional Pemodelan Keseimbangan Berjalan di Atas Balok Titian

Gatot Soebiyakto¹, Nurida Finahari², Gatut Rubiono³

^{1,2} Prodi Teknik Mesin Universitas Widyagama Malang, Jl Taman Borobudur Indah 3 Malang 65142

³ Prodi Teknik Mesin Universitas PGRI Banyuwangi, Jl. Ikan Tongkol 22 Banyuwangi 68418

E-mail: soebiyakto@widyagama.ac.id¹, nfinahari@widyagama.ac.id², g.rubiono@unibabwi.ac.id³

Abstrak — Salah satu bentuk keseimbangan fisik seseorang adalah keseimbangan saat berjalan di atas sebuah balok titian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemodelan keseimbangan berjalan di atas balok titian. Analisis dilakukan menggunakan metode Phi Buckingham. Pemodelan matematis dilakukan dengan menyusun sebuah persamaan berdasarkan variabel-variabel yang mempengaruhi keseimbangan. Keseimbangan dalam pemodelan ini ditinjau dari waktu tempuh. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa waktu tempuh tergantung pada akar kuadrat gaya berat tubuh orang yang berjalan dibagi hasil kali luasan kontak telapak kaki dengan panjang langkah.

Kata Kunci — Analisis, Dimensional, Keseimbangan, Berjalan, Balok Titian

PENDAHULUAN

Keseimbangan adalah kemampuan untuk mempertahankan tubuh dalam posisi statis atau dinamis dengan menggunakan aktivitas otot minimal [1,2] sehingga akan membuat manusia mampu untuk beraktivitas secara efektif dan efisien [2]. Keseimbangan adalah sistem yang kompleks, yang melibatkan baik motorik, komponen sensorik, dan kognitif, berinteraksi dengan satu sama lain dan dengan lingkungan [3]. Keseimbangan tubuh ditentukan oleh semua komponen anggota gerak, Dimana tubuh mampu mempertahankan posisi tetap seimbang agar selalu stabil saat bergerak [4]. Batasan stabilitas adalah tempat pada suatu ruang dimana tubuh dapat menjaga posisi tanpa berubah dari dasar penyangga [5].

Keseimbangan tubuh merupakan fungsi yang amat vital bagi manusia seperti halnya panca indera. Pada anak, keseimbangan tubuh membantu untuk dapat melakukan kegiatan sehari-hari, terutama yang berhubungan dengan sistem visual atau penglihatan [6]. Aktivitas berjalan merupakan salah satu bentuk aktivitas yang memerlukan keseimbangan. Perubahan kemampuan menjaga untuk keseimbangan dapat menyebabkan perubahan pola pergerakan dalam melakukan aktivitas sehari-hari seperti aktivitas berjalan [7].

Keseimbangan dinamis menjaga proyeksi vertikal dari pusat massa dalam sebagai pendukung dasar saat berjalan. Tes keseimbangan dinamis digunakan untuk memprediksi risiko jatuh dan kejadian jatuh [8]. Sebuah penelitian telah dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan keseimbangan, kecepatan berjalan dan mengurangi kekawatiran jatuh. Hasil penelitian berpotensi untuk diterapkan dalam

aktivitas rutin kesehatan dan sosial di masyarakat [9]. Hasil penelitian lain menyatakan bahwa latihan 30 menit berjalan mundur di perangkat *treadmill* tiga kali seminggu selama empat minggu dapat meningkatkan keseimbangan, kecepatan berjalan dan kebugaran kardiorpulmoner [10].

Mempertahankan keseimbangan selama berjalan adalah masalah kontrol sensorimotor yang berkelanjutan. Sepanjang gerakan, sistem saraf pusat harus mengumpulkan data sensorik tentang keadaan tubuh dalam ruang. Informasi ini digunakan untuk mendeteksi kemungkinan ancaman terhadap keseimbangan dan penyesuaian pola gerakan untuk memastikan stabilitas. Kegagalan siklus sensorimotor ini dapat menyebabkan konsekuensi yang mengerikan dalam bentuk jatuh, cedera dan kematian [11].

Keseimbangan lateral merupakan faktor penting dalam menjaga tubuh manusia agar tetap tegak selama berjalan. Dua mekanisme penting untuk kontrol keseimbangan adalah strategi melangkah, di mana penempatan kaki diubah ke prediksi arah jatuh untuk memodulasi bagaimana gaya gravitasi bekerja pada tubuh, dan strategi pergelangan kaki lateral, di mana massa tubuh secara aktif dipercepat oleh torsi di pergelangan kaki [12].

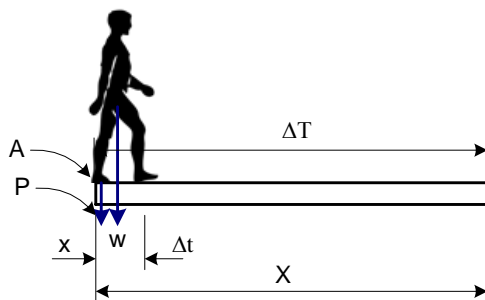
Menjaga keseimbangan saat berjalan di atas balok sempit adalah aktivitas motorik yang menantang. Salah satu faktor penting adalah kemampuan kaki untuk mengerahkan gaya torsi pada permukaan sebatas lebar balok. Kaki berfungsi sebagai bidang kontak antara tubuh dan lingkungan eksternal. Bagaimana sifat mekanik kaki ini mempengaruhi keseimbangan masih banyak dikaji [13]. Sebuah penelitian menyatakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara kondisi arkus normal dan

kondisi arkus *flatfoot* dalam mempertahankan posisi keseimbangan statis [14].

Bentuk kajian yang dapat dilakukan untuk mempelajari fenomena fisik kesimbangan berjalan di atas sebuah balok titian adalah pemodelan matematis. Pemodelan matematis salah satunya dapat dilakukan dengan analisis dimensional. Analisis dimensional ialah suatu metode untuk mengurangi jumlah kerumitan variabel eksperimental yang mempengaruhi gejala fisika, dengan menggunakan semacam teknik peringkasan [15]. Penggunaan teorema Pi Buckingham untuk analisis dimensi akan memudahkan dalam menganalisis dan membuat langkah eksperimen lebih cepat dan terarah [16]. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan hasil analisis dimensional pemodelan keseimbangan berjalan di atas balok.

METODE

Analisis dimensional dilakukan menggunakan metode Pi Buckingham. Fenomena fisik aktivitas berjalan di atas sebuah balok titian dapat dimodelkan dalam bentuk skema di gambar 1 berikut.



Gambar 1. Skema orang berjalan di atas sebuah balok

Salah satu indikator keseimbangan adalah waktu tempuh selama berjalan di atas sebuah balok dengan panjang tertentu. Hal ini berkaitan dengan kecepatan karena kecepatan merupakan hasil bagi jarak terhadap waktu. Pengukuran waktu tempuh dapat dilakukan untuk mendapatkan gambaran keseimbangan berjalan di atas balok. Pemodelan matematis dapat dilakukan dengan menyusun persamaan waktu tempuh ini. Penyusunan persamaan diawali dengan penentuan variabel-variabel yang berpengaruh, yaitu:

1. Manusia, meliputi:
 - a. Gaya berat ($w = m \cdot g$) yaitu gaya karena berat orang akibat pengaruh gravitasi. Gaya ini akan berpengaruh terhadap gaya pijakan luasan telapak kaki.
 - b. Kecepatan ($V = X/\Delta T$) yaitu jarak (panjang balok) dibagi waktu tempuh.
 - c. Panjang langkah (x) dengan waktu tempuh sebesar Δt untuk setiap langkah. Variabel ini

akan menentukan jumlah langkah yaitu sebanyak n langkah.

- d. Luas bidang kontak telapak kaki (A) yaitu luasan telapak kaki yang bersentuhan langsung dengan permukaan balok.
2. Balok tumpuan, meliputi:
 - a. Gaya berat ($W = M \cdot g$) yaitu gaya berat kayu karena faktor gravitasi. Hal ini berkaitan dengan sifat kekakuan kayu.
 - b. Panjang balok (X) yaitu panjang lintasan balok titian.

Variabel-variabel ini selanjutnya digunakan sebagai variabel-variabel yang dianalisis. Dalam analisis dimensional. Variabel-variabel ini dianalisis menggunakan satuan-satuannya. Selain itu, satuan dasar digunakan yaitu massa ($mass = M$), panjang ($length = L$) dan waktu ($time = T$). Tiga satuan dasar ini umumnya dikenal dengan sebutan dimensi MLT. Analisis dengan satuan dasar akan menghasilkan persamaan-persamaan yang simultan. Penyelesaian persamaan-persamaan simultan berdasarkan nilai eksponen-eksponennya akan menghasilkan sebuah persamaan yang menjadi model matematis keseimbangan berjalan di atas balok titian.

Keseimbangan dalam pemodelan ini ditinjau berdasarkan analisis dua dimensi. Keseimbangan dianalisis sesuai arah jalan yaitu arah horisontal sepanjang sumbu X dalam sistem koordinat. Keseimbangan ke arah samping dari orang yang berjalan tidak dianalisis. Selain itu, faktor-faktor lain seperti kondisi fisik orang, psikologi, keahlian, pengalaman dan kondisi lingkungan juga tidak disertakan dalam analisis. Balok titian dianggap sebagai sebuah batang yang relatif kaku sehingga balok dianggap sebuah lintasan yang stabil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Dimensional

Sesuai dengan variabel-variabel telah yang diidentifikasi maka waktu tempuh dipengaruhi variabel-variabel yang dominan yaitu berat tubuh (gaya berat), gaya tekan luas bidang kontak telapak kaki dan panjang langkah. Sehingga analisis dilakukan dengan persamaan:

$$\Delta T = f(w, F, x) \quad (1)$$

Jumlah variabel di persamaan (1) adalah 4 variabel (ΔT , w , F dan x) sehingga jumlah kelompok non dimensional adalah $4 - 3 = 1$ dimana angka 3 adalah jumlah dimensi dasar. Jumlah langkah (n) diwakili oleh panjang langkah (x), luas bidang kontak telapak kaki (A) diwakili oleh gaya berat (F) dan gaya berat balok diwakili oleh panjangnya. Gaya berat telapak kaki dalam hal ini adalah tekanan dikalikan luas bidang kontak ($F = P A$).

Kelompok dimensional dari persamaan (1) disusun dalam bentuk variabel π sebagai berikut:

$$\pi = (\Delta T)(w)^a(F)^b(x)^c \quad (2)$$

Persamaan (2) ditulis dalam bentuk dimensi MLT sesuai dengan satuannya sehingga persamaan (2) menjadi persamaan berikut:

$$\pi = (T) \left(\frac{ML}{T^2}\right)^a (M)^b (L)^c = 0 \quad (3)$$

Selanjutnya dilakukan untuk setiap dimensi nilai-nilai eksponen setiap dimensi sehingga didapatkan persamaan-persamaan:

$$\text{Dimensi M: } a + b = 0 \quad (4)$$

$$\text{Dimensi L: } a + c = 0 \quad (5)$$

$$\text{Dimensi T: } 1 - 2a = 0 \quad (6)$$

Dari persamaan (6) didapat:

$$-2a = -1$$

Sehingga:

$$a = \frac{1}{2}$$

Substitusi nilai a ke persamaan (4) maka didapat:

$$\frac{1}{2} + b = 0 \quad (7)$$

Sehingga didapat $b = -\frac{1}{2}$

Substitusi nilai a ke persamaan (5) didapat:

$$\frac{1}{2} + c = 0 \quad (8)$$

Sehingga didapat $c = -\frac{1}{2}$. Substitusi nilai a, b dan c ke persamaan (2) didapat:

$$\pi = (\Delta T)(w)^{1/2}(F)^{-1/2}(x)^{-1/2} \quad (9)$$

Sehingga didapat:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\sqrt{w}}{\sqrt{F} \sqrt{x}} \\ &= \sqrt{\frac{w}{F x}} \\ &= \sqrt{\frac{m g}{F x}} \end{aligned} \quad (10)$$

Pemeriksaan validitas persamaan (10) dilakukan dengan substitusi sistem satuan ke setiap variabel di persamaan (10) sehingga didapat:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \sqrt{\frac{(kg) (m/dt^2)}{(kg) (m)}} \\ dt &= \sqrt{dt^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Dari persamaan (11) didapat $dt = dt$, dimana satuan di ruas kiri persamaan sama dengan satuan di ruas kanan sehingga berdasarkan pemeriksaan ini maka analisis yang dilakukan telah sesuai.

Pembahasan

Hasil analisis persamaan (10) menunjukkan bahwa waktu tempuh orang berjalan di atas sebuah balok titian tergantung pada nilai akar kudrat gaya berat orang dibagi hasil kali gaya tekan akibat luas bidang kontak telapak kaki dan panjang langkahnya. Secara ringkas, waktu tempuh ini dipengaruhi oleh:

1. Massa orang.
2. Luas telapak kaki.
3. Panjang langkah.

Persamaan (10) menunjukkan bahwa waktu tempuh berbanding lurus dengan massa tubuh tetapi berbanding terbalik terhadap gaya kontak telapak kaki dan panjang langkah. Untuk mendapatkan waktu tempuh terpendek sebagai representasi keseimbangan yang baik maka sesuai persamaan (10) nilai pembilang harus sekecil-kecilnya dan nilai penyebut harus sebesar-besarnya. Waktu terpendek dapat dihasilkan dengan:

1. Massa orang sekecil-kecilnya. Gaya berat merupakan hasil kali massa dengan konstanta gravitasi bumi yang besarnya tetap. Massa yang lebih kecil akan menghasilkan nilai akar kuadrat di bagian pembilang menjadi kecil juga.
2. Luas telapak kaki yang sebesar-besarnya dimana terdapat jenis telapak kaki yang memiliki luasan yang berbeda yang berpengaruh terhadap keseimbangan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian referensi [13] dimana kaki berfungsi sebagai bidang kontak, dan referensi [14] yang menyatakan adanya perbedaan jenis kaki terhadap keseimbangan. Luas telapak kaki yang lebih besar akan menghasilkan gaya tekan yang lebih besar pula sehingga nilai penyebut dalam persamaan (10) akan menjadi lebih besar juga.
3. Panjang langkah dimana diperlukan panjang langkah yang sebesar-besarnya. Panjang langkah yang besar tentu saja akan mempercepat waktu tempuh karena semakin panjang langkah maka jumlah langkah dan waktu tempuh akan semakin kecil. Panjang langkah yang semakin besar akan menghasilkan nilai bagian penyebut di persamaan (10) yang besar pula.

Gaya tekan luasan telapak kaki merupakan hasil kali tekanan dan luas telapak. Tekanan diakibatkan berat tubuh. Tetapi dalam hal ini, berat tubuh yang memberikan tekanan di bagian telapak kaki bukan berat secara keseluruhan. Hal ini berhubungan dengan pusat berat tubuh (*center of gravity*). Hanya sebagian berat yang memberikan gaya tekan karena saat satu telapak kaki menjejak sebuah permukaan maka terjadi konsentrasi berat di satu sisi tubuh. Konsentrasi berat ini akan menggeser pusat massa sehingga akan berpengaruh terhadap gaya tekan. Selain itu, terdapat dua luas telapak kaki yang memungkinkan terjadinya perbedaan tekanan. Pengukuran dengan perangkat ukur yang sesuai sangat direkomendasikan.

Hasil analisis ini dapat menjadi persamaan umum waktu tempuh orang berjalan di atas balok titian. Hasil pemeriksaan validitas berdasarkan sistem satuan menunjukkan kesesuaian. Kesesuaian ini merupakan bukti pendukung yang menunjukkan bahwa analisis telah dilakukan secara tepat. Hasil analisis dapat dijadikan acuan untuk keseimbangan

orang berjalan di atas balok titian. Tetapi, analisis ini masih didasarkan pada kondisi yang dapat dianggap ideal. Faktor personal seperti kondisi fisik dan psikologis tidak diperhitungkan. Kebugaran, pelatihan, kebiasaan dan faktor fisik lainnya dapat mempengaruhi keseimbangan berjalan. Faktor psikologis seperti gugup, khawatir jatuh dan lain-lain juga berpengaruh. Faktor lingkungan seperti cuaca, temperatur, angin dan lain-lain juga dapat mempengaruhi keseimbangan orang berjalan di atas balok titian.

Faktor lain yang juga sangat berpengaruh adalah balok titian yang digunakan. Lebar balok yang menjadi pijakan kaki akan menentukan luasan bidang kontak telapak kaki. Panjang balok dan kekakuan balok akan menyebabkan balok lentur atau tidak. Hal ini berpengaruh terhadap faktor lendutan balok akibat beban orang dan massa balok sendiri akan mempengaruhi kestabilan. Analisis keseimbangan akan berbeda jika lintasan titian menggunakan tali seperti dalam *slagline*. Faktor kelenturan tali akan mengakibatkan perpindahan lintasan yang akan mempengaruhi arah gaya-gaya yang bekerja dan mempengaruhi keseimbangan. Analisis lebih lanjut akan dibutuhkan untuk kondisi ini.

Analisis pemodelan juga dapat disimulasikan menggunakan data-data yang sesuai. Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi antara panjang telapak kaki dengan berat tubuh dan luas telapak kaki dengan berat tubuh [17]. Karakteristik fisik berdasarkan hasil penelitian ini dapat diprediksikan. Tetapi dalam hal ini, panjang langkah dan gaya tekan telapak kaki memerlukan pengukuran atau asumsi yang tepat. Secara umum, berdasarkan persamaan (10) maka akan didapatkan hubungan secara hiperbolik karena nilai eksponensial persamaan tersebut. Analisis lebih lanjut dapat dilakukan.

KESIMPULAN

Analisis dimensional pada keseimbangan orang berjalan di atas balok titian menunjukkan bahwa waktu tempuh sepanjang balok adalah akar kuadrat berat orang dikalikan konstanta gravitasi dibagi hasil kali gaya tekan luasan telapak kaki dan panjang langkah. Pemodelan lanjutan dengan menyertakan variabel lain seperti kondisi lingkungan dapat dilakukan. Persamaan hasil pemodelan dapat menjadi acuan untuk eksperimen keseimbangan.

NOMENCLATURE

A	luas telapak kaki m^2
F	gaya tekan telapak kaki kg
g	konstanta gravitasi

	m/dt^2
m	massa orang kg
M	massa balok kg
P	tekanan telapak kaki kg/m^2
t	waktu per langkah dt
T	waktu tempuh dt
x	panjang langkah m
X	panjang balok m
w	gaya berat orang $kg m/dt^2$
W	gaya berat balok $kg m/dt^2$

GREEK LETTER

Δ	delta, beda
π	kelompok dimensi

Subscripts

a	konstanta eksponensial
b	konstanta eksponensial
c	konstanta eksponensial

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I A. A. Suadnyana, I A. P. Paramurthi, dan I M. D. Prianthara, Perbedaan efektivitas latihan balance strategy dan latihan jalan tandem dalam meningkatkan keseimbangan dinamis lansia, *Bali Health Journal* vol. 3 no. 2: pp. S36-S47, Desember 2019
- [2] Wedi S, A. Agus, dan Bafirman, Pengaruh latihan berjalan di atas balok kayu terhadap keseimbangan dinamis, *Journal of Sport Education* vol. 2 no. 1: pp. 34-39, 2019
- [3] O. P. Norvang, T. Askim, T. Egerton, A. E. Dahl, and P. Thingstad, Associations between changes in gait parameters, balance, and walking capacity during the first 3 months after stroke: a prospective observational study, *Physiotherapy Theory and Practice*: pp. 1-9, Juni 2020
- [4] V. Thulhusna, dan Damri, Meningkatkan keseimbangan tubuh melalui papan titian pada siswa tunagrahita ringan, Ranah Research, *Journal of Multidisciplinary Research and Development* vol. 2 no. 4: pp. 26-33, Agustus 2020
- [5] Q. Nisa, dan J. Maratis, Hubungan keseimbangan postural dengan kemampuan berjalan pada pasien stroke hemiparesis, *Jurnal Fisioterapi* vol. 19 no. 2: pp. 83-89, Oktober 2019
- [6] W. C. Pratiwi, dan M. Munawar, Peningkatan keseimbangan tubuh melalui berjalan di atas versa disc pada anak kelompok B PAUD Taman Belia Candi Semarang, *Jurnal Penelitian Paudia* vol. 3 no. 2: pp. 40-62, Oktober 2014
- [7] I G. A. Sena, I. Pramita, dan I G. A. S. A. Putra, *Kecepatan berjalan sebagai tanda keseimbangan dengan pelatihan keseimbangan yang efektif pada lanjut usia*, Prosiding Sintesa, Universitas Dhyana Pura, Bali: pp. 307-313, Agustus 2019
- [8] T. Hortobágyi, A. Uematsu, L. Sanders, R. Kliegl, J. Tollár, R. Moraes, and U. Granacher, Beam walking to

- assess dynamic balance in health and disease: a protocol for the “beam” multicenter observational study, *Gerontology* vol. 65: pp. 332-339, Oktober 2018
- [9] P. Y. Yeung, W. Chan, and Jean Woo, A community-based Falls Management Exercise Programme (FaME) improves balance, walking speed and reduced fear of falling, *Primary Health Care Research & Development* vol. 16: pp. 138-146, 2015
- [10] K-W. Chang, C-M. Lin, C-W. Yen, C-C. Yang, T. Tanaka, and L-Y. Guo, The effect of walking backward on a treadmill on balance, speed of walking and cardiopulmonary fitness for patients with chronic stroke: a pilot study, *Int. J. Environ. Res. Public Health* vol. 18 no. 2376: pp. 1-10, Maret 2021
- [11] H. Reimann, R. Ramadan, T. Fettrow, J. F. Hafer, H. Geyer, and J. J. Jeka, Interactions between different age-related factors affecting balance control in walking, *Front. Sports Act. Living* vol. 2 artikel 94: pp. 1-19, Juli 2020
- [12] H. Reimann, T. D. Fettrow, E. D. Thompson, P. Agada, B. J. McFadyen, and J. J. Jeka, Complementary mechanisms for upright balance during walking, *Plos One* vol. 12 no. 2: pp. 1-16, Februari 2017
- [13] M. E. Huber, E. Chiovetto, M. Giese, and D. Sternad, Rigid soles improve balance in beam walking, but improvements do not persist with bare feet, *Scientific Reports* vol. 10 no. 7629: pp. 1-17, 2020
- [14] M. Syafi'i, S. S. Pudjiastuti, dan P. Prihantiko K, Beda pengaruh arkus kaki terhadap keseimbangan statis anak usia 9-12 tahun di SD Negeri Mojolegi, Teras, Boyolali, *Jurnal Kesehatan* vol. VII no. 3: pp. 351-354, November 2016
- [15] R. Hariyanto, Pemanfaatan metode analisa dimensional untuk menentukan model terbaik kincir angin savonius dengan variasi jumlah sudu, *Transmisi* vol. 3 edisi 1: pp. 289-298, 2007
- [16] I. E. Cahyani, dan A. Wibowo, Penggunaan teorema Pi Buckingham pada penyelidikan *lost head* untuk pipa mendatar dengan aliran tak kompresibel turbulen, *Engineering* vol. 3 no. 2: pp. 1-5, 2011
- [17] A. P. Valiandi, dan D. B. Wibowo, Estimasi berat dan tinggi badan orang Jawa dari pengukuran telapak kaki menggunakan digital foot scanner, *Jurnal Teknik Mesin S-1* vol. 5 no. 1: pp. 42-49, Januari 2017