

## Pengembangan Model Benda Jamak 7 Batang untuk Analisis Kinematik dan Kinetik Gerak Berjalan Manusia

Sandro Miharadi<sup>1,\*</sup>, Wahid L. Buana<sup>1</sup>, Tatacipta Dirgantara<sup>1</sup>, Andi Isra Mahyuddin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung, Indonesia.

Email: \*[sandro@ftmd.itb.ac.id](mailto:sandro@ftmd.itb.ac.id)

### Abstrak

Pada penelitian ini dilakukan pengembangan model manusia berupa sistem benda jamak 7 batang untuk menganalisis gerak berjalan manusia. Dalam hal ini, tubuh manusia dimodelkan oleh 1 batang yang mewakili tubuh (kepala, tangan dan badan), 2 batang paha kanan dan kiri, 2 batang betis kanan dan kiri dan 2 batang telapak kaki kanan dan kiri. Model ini merupakan penyempurnaan dari model manusia yang telah dikembangkan sebelumnya yaitu sistem benda jamak 5 batang, tanpa telapak kaki kanan dan kiri. Beberapa parameter kinematik dan kinetik gerak berjalan manusia telah berhasil diukur dalam penelitian ini dengan menggunakan metode *inverse dynamics*. Dimana dalam metode ini, posisi segmen-segmen tubuh terhadap waktu, beserta ukuran panjang dan beratnya digunakan sebagai input perhitungan dalam sistem benda jamak yang dibangun. Posisi segmen terhadap waktu tersebut didapatkan dengan menggunakan *2D motion capture system*, yaitu sistem berbasis optik yang dikembangkan untuk mendapatkan posisi-posisi marker, terhadap waktu, yang dipasang pada bagian tubuh yang mewakili model benda jamak 7 batang saat berjalan normal. Untuk menguji keandalan dari model yang telah dibangun, beberapa parameter gerak berjalan manusia yang telah diukur dibandingkan dengan hasil pengukuran pada literatur lain. Perbandingan menunjukkan bahwa hasil yang didapat secara umum cukup akurat secara kualitatif.

**Kata kunci** : Sistem benda jamak, *inverse dynamics*, *2D motion capture system*, gerak berjalan

### Latar belakang

Pola gerakan berjalan manusia telah lama menjadi topik penelitian dengan aplikasi pada berbagai bidang, seperti bidang olahraga, bidang kedokteran, perancangan produk, dan bidang animasi [1-5]. Sistem pengamat gerak berjalan berbasis optik saat ini merupakan sistem yang paling banyak digunakan dalam studi gerakan berjalan manusia, khususnya digunakan untuk keperluan rehabilitasi medik [5], yaitu untuk memonitor perkembangan pasien selama masa terapi. Dengan sistem ini, beberapa parameter gerak seperti panjang langkah, kecepatan langkah, waktu pijak, siklus melangkah dan sudut antar tungkai kaki dapat dimonitor dan dianalisis untuk mengetahui apakah telah terjadi perkembangan atau sebaliknya pada pasien yang sedang diterapi. Keberadaan parameter gerak berjalan yang bersifat kuantitatif dapat membantu terapis untuk mendiagnosa penyakit dan menentukan protokol pengobatan yang tepat.

Saat ini, telah banyak sistem pengamat gerak 2D dan 3D yang tersedia secara komersial di pasaran, antara lain VICON® and QUALYSIS®. Sistem ini memiliki keakuratan yang cukup tinggi dengan tingkat kesalahan kurang dari 1 mm [6]. Namun sayangnya, sistem tersebut masih sangat

mahal dan mungkin tidak masuk dalam budget kebanyakan rumah sakit khususnya di Indonesia.

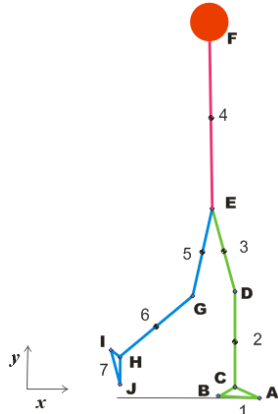
Untuk menjawab tantangan ini, yaitu untuk menyediakan sistem pengamat gerak berjalan berbasis optik yang terjangkau dan memiliki keakuratan yang baik, serangkaian penelitian telah dilakukan di Laboratorium Biomekanika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB.

Bersamaan dengan pengembangan sistem pengamat gerak, dikembangkan pula perangkat lunak pengolah data gerak sehingga dapat dilakukan analisis kinematik dan kinetik gerak berjalan manusia dengan memodelkan manusia menjadi model benda jamak 5 batang [7]. Prototipe pertama dari sistem yang dikembangkan telah berhasil menghitung beberapa parameter *spatio-temporal* gerak berjalan, termasuk perhitungan sudut antar batang dan juga gaya-gaya dan momen yang bekerja pada sambungan batang [8].

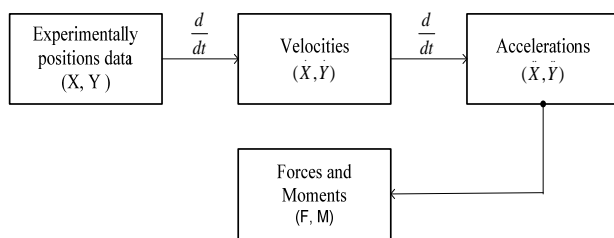
Dalam penelitian ini, dilakukan penyempurnaan model manusia yang telah dikembangkan sebelumnya yaitu sistem benda jamak 5 batang, yaitu sistem benda yang terdiri atas dua buah betis, dua buah paha dan satu badan yang merupakan gabungan dari kepala, lengan dan badan, menjadi model benda jamak 7 batang, yaitu dengan menambahkan model telapak kaki

kanan dan kiri. Dengan penambahan model telapak kaki diharapkan dapat diperoleh parameter *gait* telapak kaki dalam bidang sagital seperti sudut *ankle*, gaya serta momen pada *ankle*, dan juga gaya reaksi tanah. Dengan model ini, gaya reaksi tanah dapat diprediksi dengan menghitung gaya inersia yang bekerja pada segmen-segmen tubuh.

### Model Benda Jamak 7 Batang



Gambar 1. Model 7 batang gerak berjalan



Gambar 2. Metode *Inverse dynamics*

Model benda jamak tujuh batang yang dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 1, dimana model tersebut dibentuk oleh garis-garis yang menghubungkan posisi sendi atau titik-titik tertentu pada kaki. Titik-titik tersebut adalah pangkal jari kelingking kaki (A dan J), tumit (B dan I), *ankle* (C dan H), lutut (D dan G), pinggul (E), dan kepala (H). Dalam sistem pengamat gerak berjalan, untuk mendapatkan posisi titik yang diinginkan, penanda (*marker*) berupa *LED* dipasang pada titik-titik tersebut.

Dalam menganalisis kinematik dan kinetik gerak berjalan manusia, kecepatan dan percepatan sendi serta pusat massa menjadi fokus dalam analisis. Untuk mendapatkan kecepatan dan percepatan sendi maupun pusat massa diperlukan data posisi pergerakan sendi, dimana setelah itu kecepatan dapat dihitung dengan menurunkan fungsi posisi, kemudian percepatan diperoleh dengan menurunkan fungsi kecepatan dengan metode *finite difference*. Pada akhirnya gaya dan momen dapat dihitung dengan informasi percepatan yang telah diperoleh. Metode ini

dinamakan metode *inverse dynamics*, dimana diagram alirnya ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada penelitian ini, posisi titik-titik yang merepresentasikan gerak berjalan diperoleh melalui pengamatan sistem berbasis citra digital yang dikembangkan dalam penelitian sebelumnya [9].

Dalam analisis, beberapa asumsi yang digunakan diantaranya adalah:

- Batang *head*, *arm*, *trunk* (garis EF) diasumsikan selalu vertikal sepanjang gerak berjalan.
- Seluruh massa segmen atau batang terkonsentrasi pada pusat massa. Letak pusat massa tetap terhadap segmen.
- Segmen dianggap sebagai benda kaku yang selama pergerakan tidak mengalami lendutan dan perubahan dimensi.
- Sendi dianggap sebagai engsel yang hanya bergerak dalam arah rotasi bidang.
- Besarnya massa dan momen inersia tetap selama pergerakan.

### Analisis Kinematik

Melalui analisis kinematik beberapa parameter *spatio temporal*, percepatan pusat massa, sudut sendi, serta percepatan sudut segmen dapat diperoleh. Sebelum menghitung percepatan pusat massa, kecepatan dan posisi pusat massa perlu diketahui. Posisi pusat massa ditentukan dari posisi sendi pada segmen tubuh, sedangkan kecepatan didapatkan dari penurunan fungsi posisi, dan percepatan didapatkan dari penurunan kecepatan.

Dalam menentukan posisi pusat massa, segmen tubuh dimodelkan sebagai batang dengan diameter penampang atas lebih besar dari penampang bagian bawah, selain itu konsentrasi massa berupa otot yang mengembang tidak terletak pada bagian tengah betis. Dengan perbedaan ukuran dan konsentrasi masa, asumsi massa terdistribusi merata pada setiap segmen kurang tepat untuk mendapatkan hasil perhitungan yang akurat. Posisi pusat massa segmen pada anggota gerak bawah dapat diprediksi dengan Pers. 1-3 [10].

$$p_{th} = p_{hip} + 0,39(p_{knee} - p_{hip}) \quad (1)$$

$$p_{cl} = p_{knee} + 0,42(p_{ankle} - p_{knee}) \quad (2)$$

$$p_{foot} = p_{heel} + 0,44(p_{toe} - p_{heel}) \quad (3)$$

dimana:

- $p_{th}$  : Posisi pusat massa pada paha
- $p_{cl}$  : Posisi pusat massa pada betis
- $p_{foot}$  : Posisi pusat massa pada telapak kaki
- $p_{hip}$  : Posisi *marker* pinggul

- $p_{knee}$  : Posisi *marker* lutut
- $p_{ankle}$  : Posisi *marker* pada pergelangan kaki
- $p_{heel}$  : Posisi *marker* pada tumit
- $p_{toe}$  : Posisi *marker* pada ujung ibu jari

Karena model gerak berjalan manusia pada penelitian ini tidak menyertakan ibu jari kaki, maka untuk mencari pusat massa pada pada telapak kaki didekati dengan Pers. 4.

$$p_{foot} = p_{heel} + 0,44(p_{met} - p_{heel}) \quad (4)$$

dimana:

$p_{met}$  : Posisi *marker* pada *metatarsal*.

Kecepatan pusat massa masing-masing segmen dapat dihitung melalui Pers. 5-6 berikut.

$$v_{x_i}^k = \frac{x_{(i+1)}^k - x_{(i-1)}^k}{2\Delta t} \quad (5)$$

$$v_{y_i}^k = \frac{y_{(i+1)}^k - y_{(i-1)}^k}{2\Delta t} \quad (6)$$

dimana:

$v_{x_i}^k$  = kecepatan pusat massa segmen  $k$  saat *frame* ke- $i$  pada sumbu- $x$ .

$v_{y_i}^k$  = kecepatan pusat massa segmen  $k$  saat *frame* ke- $i$  pada sumbu- $y$ .

Setelah kecepatan pusat massa diketahui, percepatan pada pusat massa dapat ditentukan dengan metode yang sama. Percepatan pusat massa tiap segmen dapat dihitung menggunakan Pers. 7-8.

$$a_{x(i)}^k = \frac{v_{x(i+1)}^k - v_{x(i-1)}^k}{2\Delta t} \quad (7)$$

$$a_{y(i)}^k = \frac{v_{y(i+1)}^k - v_{y(i-1)}^k}{2\Delta t} \quad (8)$$

dimana:

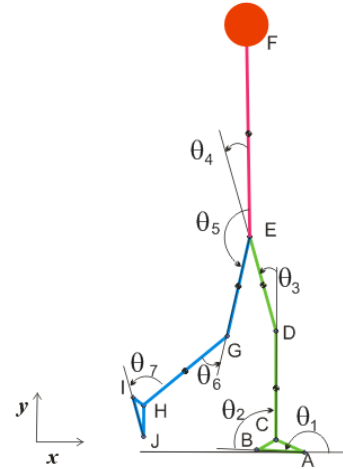
$a_{x(i)}^k$  = Percepatan pusat massa segmen  $k$  saat *frame* ke- $i$  pada sumbu- $x$ .

$a_{y(i)}^k$  = Percepatan pusat massa segmen  $k$  saat *frame* ke- $i$  pada sumbu- $y$ .

Di dalam sistem benda jamak pengertian sudut dibagi menjadi dua jenis yaitu sudut relatif dan sudut absolut. Sudut relatif merupakan sudut yang dibentuk dari dua orientasi segmen yang tersambung pada satu sendi. Sudut absolut merupakan orientasi segmen terhadap kerangka acuan utama. Berdasarkan konvensi yang digunakan, semua sudut diukur dalam arah berlawanan jarum jam.

Gambar 3 merupakan sudut relatif yang digunakan dalam analisis sistem benda jamak. Pada bidang biomekanik, sudut relatif model juga

disebut sudut sendi.  $\theta_1$  adalah *foot angle*,  $\theta_2$  dan  $\theta_7$  adalah *ankle angle*,  $\theta_3$  dan  $\theta_6$  adalah *knee angle*, dan  $\theta_4$  dan  $\theta_5$  adalah *hip angle*.



Gambar 3. Sudut relatif sistem benda jamak

Sudut relatif pada Gambar 3 dapat dihitung nilainya dengan menggunakan Pers. 9-15 berikut:

$$\theta_1 = 180^\circ - \arctan \frac{B_y - A_y}{A_x - B_x} \times 180^\circ / \pi \quad (9)$$

$$\theta_2 = \left( 180^\circ - \arctan \frac{D_y - C_y}{C_x - D_x} \times 180^\circ / \pi \right) - \theta_1 \quad (10)$$

$$\theta_3 = \left( 180^\circ - \arctan \frac{D_y - E_y}{E_x - D_x} \times 180^\circ / \pi \right) - \theta_2 \quad (11)$$

$$\theta_4 = \left( 180^\circ - \arctan \frac{F_y - E_y}{F_x - E_x} \times 180^\circ / \pi \right) - \theta_3 \quad (12)$$

$$\theta_5 = 180^\circ - \arctan \frac{E_x - G_x}{E_y - G_y} \times 180^\circ / \pi \quad (13)$$

$$\theta_6 = \left( \arctan \frac{G_x - H_x}{G_y - H_y} - \arctan \frac{E_x - G_x}{E_y - G_y} \right) \times 180^\circ / \pi \quad (14)$$

$$\theta_7 = \left( \arctan \frac{I_x - J_x}{I_y - J_y} - \arctan \frac{G_x - H_x}{G_y - H_y} \right) \times 180^\circ / \pi \quad (15)$$

dimana:

$A_x, A_y$ : Koordinat *metatarsal* kaki kiri.

$B_x, B_y$ : Koordinat tumit kaki kiri.

$C_x, C_y$ : Koordinat pergelangan kaki kiri.

$D_x, D_y$ : Koordinat lutut kaki kiri.

$E_x, E_y$ : Koordinat pinggul.

$F_x, F_y$ : Koordinat kepala.

$G_x, G_y$ : Koordinat lutut kaki kanan.

$H_x, H_y$ : Koordinat pergelangan kaki kanan.

$I_x, I_y$ : Koordinat tumit kaki kanan.

$J_x, J_y$ : Koordinat *metatarsal* kaki

Karena nilai  $E_x$  dan  $F_x$  selalu sama dan batang  $EF$  selalu tegak lurus, maka Pers.12 dapat disederhanakan menjadi:

$$\theta_4 = 90^\circ - \theta_3 \quad (16)$$

Adapun sudut absolut tiap segmen dapat dihitung melalui Pers. 17-23 sebagai berikut.

$$\theta_{left\ foot} = \theta_1 \quad (17)$$

$$\theta_{left\ leg} = \theta_2 + \theta_1 \quad (18)$$

$$\theta_{left\ thigh} = \theta_3 + \theta_2 + \theta_1 \quad (19)$$

$$\theta_{trunk} = \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1 \quad (20)$$

$$\theta_{right\ thigh} = \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1 \quad (21)$$

$$\theta_{right\ leg} = \theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1 \quad (22)$$

$$\theta_{right\ foot} = \theta_7 + \theta_6 + \theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1 \quad (23)$$

dimana :

$\theta_{left\ foot}$  = Foot angle kaki kiri.

$\theta_{left\ leg}$  = Leg angle kaki kiri.

$\theta_{left\ thigh}$  = Thigh angle kaki kiri.

$\theta_{trunk}$  = Trunk angle.

$\theta_{right\ thigh}$  = Thigh angle kaki kanan.

$\theta_{right\ leg}$  = Leg angle kaki kanan.

$\theta_{right\ foot}$  = Foot angle kaki kanan.

Selanjutnya, dengan menggunakan metode *finite difference* kecepatan sudut masing-masing segmen tubuh dapat dihitung melalui Pers. 24 berikut.

$$\omega_i^k = \frac{\theta_{(i+1)}^k - \theta_{(i-1)}^k}{2\Delta t} \quad (24)$$

dimana:

$\theta_i^k$  = Posisi sudut segmen  $k$  pada saat ke- $i$ .

$\omega_i^k$  = Kecepatan sudut segmen  $k$  pada saat ke- $i$ .

Dengan metode yang sama, percepatan sudut batang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\alpha_i^k = \frac{\omega_{(i+1)}^k - \omega_{(i-1)}^k}{2\Delta t} \quad (25)$$

dimana:

$\omega_i^k$  = Kecepatan sudut segmen  $k$  pada saat ke- $i$ .

$\alpha_i^k$  = Percepatan sudut segmen  $k$  pada saat ke- $i$ .

### Analisis Kinetik

Analisis kinetik bertujuan untuk mendapatkan gaya reaksi tanah maupun gaya dan momen yang bekerja pada sendi. Dalam analisis kinetik diperlukan beberapa data diantaranya percepatan pusat massa dan percepatan sudut segmen yang telah dihitung pada analisis kinematik. Selain itu, inersia dan posisi titik pusat gaya reaksi tanah (*center of pressure*) juga diperlukan masing-masing untuk menghitung besarnya gaya inersia segmen dan letak titik pusat gaya reaksi tanah. Setelah gaya reaksi tanah diketahui gaya dan momen yang bekerja pada sendi dapat ditentukan.

Pada model tujuh batang gerak berjalan manusia, massa tiap segmen tidak dapat diukur secara langsung seperti mengukur lengan atau kaki robot. Besarnya massa tiap segmen diperoleh

data *antropometri* manusia. Data *antropometri* tersebut didapatkan dari pengukuran cadaver. Tabel 1 merupakan cuplikan data perbandingan massa segmen tubuh dengan massa total tubuh [3].

Tabel 1. Asumsi massa segmen tubuh [3]

Segmen	Massa tiap segmen/ massa total
Telapak kaki ( <i>foot</i> )	0,0145 M
Betis ( <i>Calf</i> )	0,0465 M
Paha ( <i>Thigh</i> )	0,100 M
Badan ( <i>HAT</i> )	0,678 M

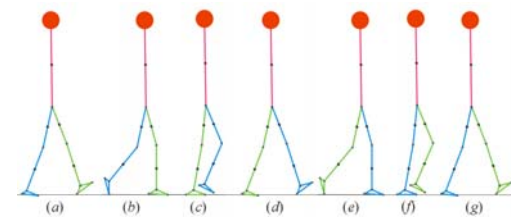
\*M= Massa total tubuh

Segmen tubuh pada telapak kaki, betis, paha, serta badan dianggap sebagai silinder. Nilai inersia segmen tubuh dalam pergerakan *flexion* dan *extention* dapat dihitung melalui persamaan berikut [10].

$$I_{flx/ext} = \frac{1}{12} M[(L)^2 + 0,076(d)^2] \quad (26)$$

dimana  $M$ ,  $L$  dan  $d$  masing-masing adalah massa, panjang dan diameter segmen. Setelah karakteristik dinamik segmen berupa massa, inersia, dan letak titik pusat massa diketahui, analisis dinamik model dapat dilakukan.

### Hasil dan Analisis



Gambar 4. Fase berjalan model 7 batang

Simulasi gerak berjalan model benda jamak 7 batang yang dikembangkan dari informasi posisi titik-titik hasil pengamatan oleh sistem pengamat gerak berbasis citra digital [9] ditampilkan pada Gambar 4. Selanjutnya, parameter-parameter spatio temporal subjek berjalan dapat dihitung, dan hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter *spatio temporal* subjek.

Cycle time	1,08 s
Cadence	111,11 step/min
Stride length	1,27 m
Speed	1,18 m/s

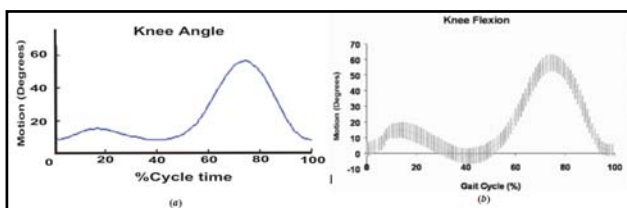
Tabel 3. Parameter *spatio temporal* literatur

Variables	Mahyuddin et al., 2012				Whittle, 2007	
	Male		Female		Male	Female
	Mean	SD	Mean	SD		
Walking Speed (m/s)	1,09	0,11	1,02	0,12	1,10-1,82	0,94-1,66
Stride length (m)	1,20	0,08	1,11	0,10	1,25-1,85	1,06-1,58
Cadence (step/min)	109,29	7,84	110,36	9,78	91-135	98-138
Cycle Time (s)	1,10	0,13	1,10	1,14	0,89-1,32	0,87-1,22

Parameter *spatio temporal* manusia dipengaruhi diantaranya oleh postur tubuh serta budaya pada suatu negara. Orang yang memiliki postur tubuh yang besar akan memiliki panjang langkah yang lebih besar. Selain itu negara dengan rumpun dan budaya yang berbeda memiliki siklus *gait* yang berbeda, seperti siklus *gait* penduduk Korea berbeda dengan siklus *gait* orang Eropa [11]. Pada Tabel 3 ditunjukkan parameter *spatio temporal* berjalan normal dalam usia 18 - 49 tahun orang Indonesia dan Eropa. Pada penelitian Mahyuddin [12] subjek yang diamati adalah orang Indonesia, sedangkan pada penelitian Whittle [1] subjek yang diamati adalah orang Eropa.

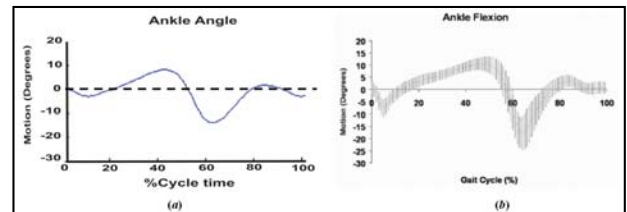
Dengan membandingkan parameter *spatio temporal* berupa *speed*, *cycle time*, *cadence* dan *stride length* antara subjek dengan literatur pada Tabel 3, diketahui bahwa semua hasil perhitungan *spatio temporal* subjek masuk dalam rentang manusia berjalan normal. Hasil perbandingan tersebut menunjukkan bahwa model cukup handal untuk menghitung parameter *spatio temporal* subjek.

Gambar 5 (a) menunjukkan grafik sudut lutut subjek selama satu siklus yang dihitung dengan Pers. 14. Nilai minimum dan maksimum sudut lutut hasil penelitian adalah 5° dan 60°. Gambar 5 (b) merupakan pita grafik sudut lutut manusia berjalan normal dari literatur [13]. Batas nilai minimum pada pita sudut lutut adalah 5° hingga -10°, sedangkan batas maksimumnya adalah 50° hingga 65°. Dengan membandingkan gambar 5 (a) dan (b) nilai minimum dan maksimum sudut lutut hasil perhitungan berada dalam pita sudut lutut dari literatur. Kesamaan pola dari kedua grafik menunjukkan bahwa sudut lutut subjek hasil perhitungan sesuai dengan literatur.

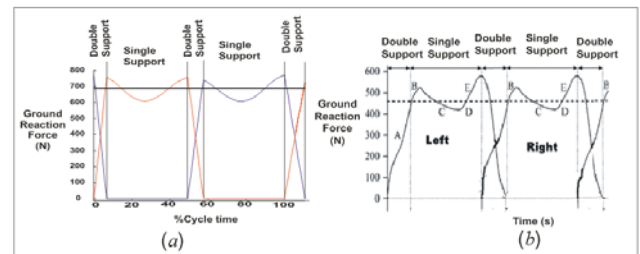


Gambar 5. a) Sudut lutut hasil perhitungan. (b) Pita sudut lutut manusia normal [13].

Selanjutnya pada Gambar 6 dibandingkan grafik sudut *ankle* selama siklus berjalan antara hasil perhitungan dengan literatur [13]. Dari gambar tersebut kembali terlihat bahwa model tujuh batang yang dikembangkan dapat menghitung besarnya sudut *ankle* pada gerak berjalan manusia normal dengan cukup akurat.



Gambar 6. a) Sudut *ankle* hasil perhitungan. (b) Pita sudut *ankle* manusia normal [13].



Gambar 7. Gaya reaksi tanah dalam sumbu-y (a) hasil perhitungan, (b) literatur [14].

Parameter kinetik yang selanjutnya dihitung dan dibandingkan hasilnya dengan literatur adalah gaya reaksi tanah, khususnya dalam arah vertikal (sumbu-y). Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 7. Pada literatur, gaya reaksi tanah diukur dengan menggunakan force platform. Dari perbandingan tersebut dapat dilihat bahwa gaya reaksi tanah hasil perhitungan model 7 batang memiliki pola yang sangat mirip dengan literatur.



## Kesimpulan

Dalam penelitian ini telah berhasil dikembangkan model benda jamak 7 batang untuk analisis kinematik dan kinetik gerak berjalan manusia. Dengan menggunakan input berupa posisi-posisi sendi ketika berjalan, beserta ukuran dan berat masing-masing segmen tubuh, sistem benda jamak yang dibangun mampu mengukur dan menghitung beberapa parameter kinematik dan kinetik gerak berjalan manusia dengan cukup akurat.

## Referensi

- [1] M. W. Whittle, *Gait Analysis: an Introduction*, 4th Edition, Elsevier, 2007
- [2] R. L. Huston, *Principle of Biomechanics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2009.
- [3] David. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4th Edition, John Wiley and Son Inc., New Jersey, 2009.
- [4] J. Perry, *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*, Slack Inc., Thorofare, NJ, 1992.
- [5] V. Medved, *Measurement of Human Locomotion*, CRC Press, New York, 2001.
- [6] J.G. Richards, The measurement of human motion: a comparison of commercially available systems, *Human Movement Science*, 18 (1999) 589–602.
- [7] U. M. Purba, S. Mihradi, T. Dirgantara, A. I. Mahyuddin, An Inverse Dynamics of Human Walking Based on Experimental Motion Analysis, *Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Bali, Indonesia, 9-10 Feb. 2010.
- [8] A. I. Mahyuddin, S. Mihradi, T. Dirgantara, P. N. Maulido, Gait Parameters Determination by 2D Optical Motion Analyzer System, *Applied Mechanics and Materials*, 83 (2011) 123-129.
- [9] S. Mihradi, R. Kurniasari, T. Dirgantara, A. I. Mahyuddin, Pengembangan Sistem Optik Pengamat Gerak Berjalan 2D dari Dua Sisi Bidang *Sagittal*, *Prosiding SNTTM XI*, Yogyakarta, Indonesia, 16-17 Oktober 2012.
- [10] Vaughan, C. L. Davis, B. L. dan O'Connor, J. C. *Dynamics of Human Gait*, Edisi 2. Cape Town: Kiboho, 1999.
- [11] T. Ryu, H. S. Choi, H. Choi, M. K. Chung, A comparison of gait characteristics between Korean and Western people for establishing Korean gait

reference data, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36 (2006) 1023 – 1030.

- [12] A. I. Mahyuddin, S. Mihradi, T. Dirgantara, M. Moeliono, T. Prabowo, Development of Indonesian Gait Database using 2D Optical Motion Analyzer System, *ASEAN Engineering Journal*, 2 (2012) 62-72.
- [13] Rose, Jessica dan Gamble, James G. *Human Walking*, Edisi 3. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- [14] Hamill, J. Knutzen, K.M., *Biomechanical Basis of Human Movement*, Edisi 3. Massachusetts: Lippincott Williams & Wilkins, 2009.