



Prosiding

SEMINAR NASIONAL *BASIC SCIENCE VI*

*Sains Membangun Karakter dan Berpikir Kritis
Untuk Kesejahteraan Masyarakat*

Ambon, 07 Mei 2014

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PATTIMURA
AMBON**

Hak cipta dilindungi Undang-Undang

Cetakan I, Agustus 2014

Diterbitkan oleh: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pattimura

ISBN: 978-602-97552-1-2

Deskripsi halaman sampul : Gambar yang ada pada cover adalah kumpulan benda-benda langit dengan berbagai fenomena

PEMODELAN GERAKAN LENGAN DUA-TIGA SEGMENT MELALUI METODE LAGRANGE DAN METODE KANE SERTA SIMULASI UNTUK ANALISA PUKULAN SMASH PADA PERMAINAN TENIS LAPANGAN

V. Galih Vidia Putra¹, Yusril Yusuf²

¹Lab. Fisika, Jurusan Teknik Tekstil, Sekolah Tinggi Teknologi Tekstil, Bandung

²Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

e-mail: galih_vidia@yahoo.com, Yusril@ugm.ac.id

ABSTRAK

Pemodelan biomekanik gerakan dua dan tiga lengan untuk menganalisa bentuk pergerakan *smash* pada permainan tenis lapangan telah dirancang dengan menggunakan metode Lagrange dan metode Kane serta analisa komputasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperlihatkan teknik pukulan *smash* yang efektif dan memiliki power yang besar untuk sistem gerakan tangan dalam dua dimensi baik secara biodinamik dan biostatik pada keadaan *flexion-extension* dan *outward-inward*. Dalam melakukan analisa gerakan pukulan *smash* dipilih dengan menganalisa slide gambar pukulan *smash* oleh pemain tennis professional. Hasil dari penelitian ini, yaitu : 1) Besar torka petenis hanya bergantung pada besar gaya-gaya yang ditimbulkan oleh otot bicep dan *brachioradialis* serta besar sudut lengan atas dan bawah; 2) sudut lengan atas (bahu- siku) mengambil peranan penting dalam menghasilkan torka yang besar dengan torka maksimal tangan berada pada posisi 1/2-1/3 dari RoM (*Range of Movement*) pada gerak *outward-inward*; 3) Pada pemodelan gerak *flexion* besar torka lengan atas akan maksimal saat posisinya berada pada 1/2-1/3 dari indeks RoM; 4) Selisih torka pada lengan atas dan lengan bawah sangat bergantung pada sudut apit lengan atas (untuk gerakan *flexion*) Saat sudut apit berada pada 1/2 posisi dari *Range of Movement* menghasilkan besar selisih torka yang maksimal.

Kata kunci: Biomekanik, *Smash*, Metode Lagrange, Metode Kane, Range of Movement

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dalam bidang olahraga di setiap negara saat ini sangat diperlukan dan telah berkembang pesat, karena dapat menunjang prestasi pelaku olahraga dalam kejuaraan-kejuaraan internasional, Sebagai contoh pada bidang olahraga tenis lapangan. Tennis lapangan adalah salah satu olahraga favorit dan populer di dunia dan merupakan salah satu olahraga yang telah lama masuk dalam even-even internasional dan nasional seperti Olimpiade, SEA-Games, Kejuaraan Super-Series, Pekan Olah Raga (PON) dan sebagainya.

Tennis lapangan adalah salah satu olahraga yang menggunakan raket sebagai media pemukul bola dan merupakan olahraga yang membutuhkan kemampuan gerak tangan yang kuat dan terlatih dalam setiap pukulannya. Pukulan keras dan menukik tajam yang dilakukan oleh seorang pemain tennis lapangan dengan tujuan untuk mendapatkan suatu point disebut *smash*. Penganalisaan gerakan ayunan tangan saat melakukan *smash* berguna sebagai modal dasar untuk mengetahui teknik yang terbaik agar menghasilkan pukulan yang kuat saat melakukan *smash*.

Secara umum biomekanika dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu: *General biomechanics* dan *Occupational biomechanics*. *General biomechanics* adalah bagian dari biomekanika yang berbicara mengenai konsep-konsep dasar yang mempengaruhi tubuh organik manusia baik dalam keadaan diam ataupun dalam keadaan bergerak. *General biomechanics* dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu: Biostatik dan Biodinamik. Biostatik adalah bagian dari biomekanika secara umum yang hanya mempelajari tubuh pada posisi diam, sedangkan biodinamik adalah bagian dari biomekanika secara umum yang berkaitan dengan gambaran gerakan-gerakan tubuh tanpa mempertimbangkan gaya yang terjadi dan gerakan yang disebabkan gaya yang bekerja dalam tubuh (Nurmianto)^[1]. Sedangkan *Occupational biomechanics* adalah bagian dari biomekanika terapan yang mempelajari interaksi fisik antara pekerja dengan mesin, material dan peralatan dengan tujuan untuk meminimalkan kelelahan pada sistem kerangka otot agar produktifitas kerja dapat meningkat.

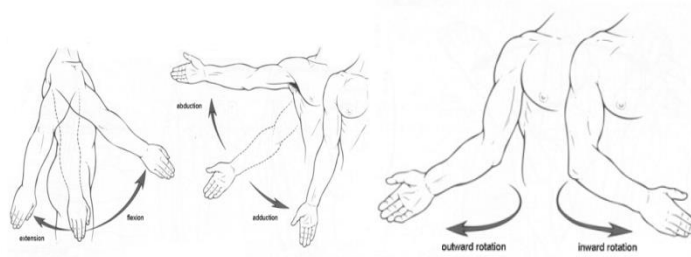
Analisa gerakan pada tangan manusia secara *General biomechanics* umumnya dapat digunakan dengan banyak metode, baik dengan menggunakan berbagai metode mekanika Newton, metode Kane ataupun metode Lagrange dan Hamilton (Fazrolrozi). F.H.M Ariff menyatakan bahwa umumnya dalam menganalisa pergerakan lengan manusia dapat digunakan dua metode, yaitu metode Lagrange dan metode Kane, yang mana kedua metode tersebut memiliki bentuk persamaan gerak yang cukup untuk menggambarkan pergerakan biodinamik dari sistem (F.H.M Ariff, dkk)^[3,4] Pada paper ini akan dipilih metode Lagrange dalam menganalisa bentuk pergerakan biostatik dan biodinamik dan dengan sedikit analisa menggunakan metode Kane dari sistem mekanis pada gerakan tangan yang meliputi gerakan dari bahu hingga siku (*shoulder-elbow*) dan dari siku hingga pergelangan tangan (*elbow-wrist*) dalam dua dimensi pada gerakan tangan vertical dan horizontal untuk mendapatkan informasi gerakan ayunan tangan saat melakukan *standing smash*.

PEMODELAN GERAKAN TANGAN

Fisiologi dan Pergerakan Lengan

Biomekanik banyak melibatkan bagian-bagian tubuh yang berkolaborasi untuk menghasilkan gerak yang akan dilakukan oleh organ tubuh yakni kolaborasi antara Tulang (*bone*), Jaringan penghubung (*Connective Tissue*) dan otot (*muscle*). Dalam biomekanika terdapat penamaan khusus yang sering digunakan untuk menjelaskan gerakan rotasi pada sumbu koordinat x-y-z. Penamaan ini digunakan untuk pergerakan dari *humerus*, *radius* hingga *grabbing hand* seperti pada Gambar-2.1. Pergerakan lengan ke arah depan disebut *flexion* sedangkan pada arah sebaliknya disebut *extension*. Pergerakan lengan ke arah atas dan bawah

disebut *abduction* dan sebaliknya *adduction*. Lengan juga dapat berotasi ke arah luar *outward* (*external/lateral*) atau inward (*internal/medial*). (Marie lund)^[5]



Gambar-2.1 Pergerakan tangan pada berbagai sumbu-sumbu koordinat (Marie lund, 2005)

Lengan memiliki batasan gerak yang sering disebut sebagai *Range of Movement* (RoM), batasan gerakan pada lengan/ RoM memiliki nilai yang berbeda-beda satu dengan yang lainnya. Untuk gerakan ayunan tangan pada keadaan, *flexion* memiliki batasan gerakan sebesar 180° , *extension* 45° - 50° , *abduction* 180° , *adduction* 40° , *inward* 90° dan *outward* 90° dengan pemilihan titik posisi awal lengan ditunjukkan dengan tanda panah seperti pada Gambar-3.8. (Marie lund)^[5].

Metode Lagrange

Model dinamik persamaan gerak pada sebuah ayunan lengan manusia dapat dikonstruksi menggunakan persamaan Lagrange sebagai berikut (J.P. Gauthier, dkk.)^[6]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL(q_i, \dot{q}_i)}{d\dot{q}_i} \right) = \frac{dL(q_i, \dot{q}_i)}{dq_i} + \tau_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.1)$$

Dengan q_i adalah sudut-sudut pada sendi yang menghubungkan persegmen lengan, \dot{q}_i adalah besar kecepatan sudut dan τ_i adalah torka pada lengan dan L didefinisikan sebagai berikut:

$$L(q_i, \dot{q}_i) = T(q_i, \dot{q}_i) - V(q_i) \quad (2.2)$$

dengan T and V adalah energi kinetik total dan energi potensial sistem yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T(q_i, \dot{q}_i) = \sum_{i=1}^n T_i(q_i, \dot{q}_i) \text{ dan } V(q_i) = \sum_{i=1}^n V_i(q_i) \quad (2.3)$$

Dengan $T_i(q_i, \dot{q}_i)$ dan $V_i(q_i)$ adalah energi kinetik dan energi potensial sistem pada setiap sambungan sendi. Untuk menerapkan persamaan Lagrange dalam pergerakan lengan manusia atau robot, perhitungan mengenai besar energi potensial sistem dan energi kinetik pada setiap sambungan sendinya harus diketahui sebagai suatu fungsi dari sudut θ dan kecepatan sudutnya $\dot{\theta}$, sehingga energi kinetik dan potensial pada sendi-sendinya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T(\theta, \dot{\theta}) = \sum_i \frac{1}{2} (V_i^b)^T M_i V_i^b = \sum_i \frac{1}{2} [\dot{\theta}_i^T J_i^T M_i J_i \dot{\theta}_i] = \frac{1}{2} [\dot{\theta}^T \mathcal{M}(\theta) \dot{\theta}]$$

Dengan M_i adalah *generalized inertia matrix* pada sambungan ke- i dan $\mathcal{M}(\theta)$ adalah *manipulator inertia matrix* dengan J adalah *body Jacobian*.

Besar energi potensial pada sistem dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V(\theta) = \sum_i^n m_i g h_i(\theta)$$

dengan :

m_i adalah massa pada sambungan ke- i ;

g adalah konstantan percepatan gravitasi;

$h_i(\theta)$ adalah tinggi dari pusat massa pada terhadap sambungan ke- i (tinggi ini adalah komponen posisi pada pusat massa yang arahnya berlawanan dengan gravitasi).

Maka besar lagrangian adalah (J.P. Gauthier, dkk.) [7]:

$$L = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta) = \frac{1}{2} [\dot{\theta}^T \mathcal{M}(\theta) \dot{\theta}] - \sum_i^n m_i g h_i(\theta) = \frac{1}{2} [\mathcal{M}_{ij}(\theta) \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j] - V(\theta) \quad (2.4)$$

$$L(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n M_{ij}(\theta) \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j - V(\theta) \quad (2.5)$$

dan persamaan Lagrange-nya adalah

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL(\theta_i, \dot{\theta}_i)}{d\dot{\theta}_i} \right) = \frac{dL(\theta_i, \dot{\theta}_i)}{d\theta_i} + \tau_i \quad (2.6)$$

Metode Kane

Dengan menggunakan prinsip d'Alembert's untuk kesetimbangan gaya-gaya pada segmen ke- k , maka akan didapatkan persamaan

$$\mathbf{F}_k + \mathbf{F}_k^* + \mathbf{F}_k^c = \mathbf{0} \quad (2.7)$$

Yang mana $\mathbf{F}_k^* = -\mathbf{m}_k \mathbf{a}_k$, adalah gaya inersia pada segmen ke- k .

Konsep dari virtual work dapat dideskripsikan untuk sebanyak N partikel dengan $3N$ derajat kebebasan. Sistem konfigurasi dapat dituliskan menjadi q_r ($r = 1, 2, \dots, 3N$) dan koordinat umumnya dengan gaya-gaya F_1, F_2, \dots, F_{3N} yang bekerja pada partikel. *Virtual work* dapat didefinisikan sebagai:

$$\delta W = \sum \mathbf{F}_i \delta \mathbf{r}_i \quad (2.8)$$

dimana \mathbf{F}_i adalah gaya resultan yang bekerja pada partikel ke- i dan r_i posisi partikel dari kerangka acuan inersia. δr_i adalah *virtual displacement*.

Maka jika komponen gaya-gaya tersebut disubstitusikan ke komponen *virtual work*, persamaannya akan berbentuk

$$\delta W = \sum (\mathbf{F}_k + \mathbf{F}_k^* + \mathbf{F}_k^c) \delta \mathbf{r}_k = 0 \quad (2.9)$$

Jika gaya-gaya konstrainnya diabaikan

$$\delta W = \sum (F_k + F_k^*) \frac{\partial r_k}{\partial q_k} \delta q_k = 0 \quad (2.10)$$

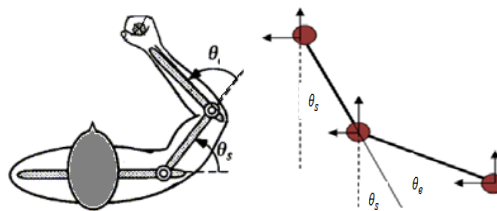
Sejak pergeseran semu (*virtual displacement*) δq_k adalah sembarang maka persamaannya dapat dituliskan menjadi (F.H.M Ariff, dkk)^[7]:

$$f_k + f_k^* = 0$$

$$\begin{aligned} \delta W &= \sum (F_k + F_k^*) \frac{\partial r_k}{\partial q_k} \delta q_k \\ &= \sum (F_k + F_k^*) \frac{\partial r_k}{\partial q_k} \delta q_k = \sum (f_k + f_k^*) = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Model Standar Gerakan *Outward-Inward* 2 Lengan

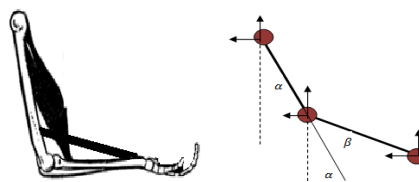
Pada pemodelan gerakan tangan ini dianggap bahwa massa lengan adalah m_1 dan m_2 dan panjang tiap lengan adalah l_1 (bahu-siku) dan l_2 (siku-pergelangan tangan) dan besar gaya pada otot bisep dan brachioradialis adalah F_1 dan F_2 , serta g mewakili besar percepatan gravitasi dan besaran $\theta_s, \dot{\theta}_s, \ddot{\theta}_s$ dan τ_s mewakili sudut, kecepatan sudut, percepatan sudut dan besar torka yang diberikan pada daerah bahu hingga siku. $\theta_e, \dot{\theta}_e, \ddot{\theta}_e$ dan τ_e mewakili sudut, kecepatan sudut, percepatan sudut dan besar torka yang diberikan pada daerah siku hingga pergelangan tangan seperti pada Gambar-2.2 (E. Pennestrì, dkk)^[8]



Gambar.2.2 Pemodelan tangan gerakan outward-inward

Model Pergerakan Tangan *Flexion-Extension* 2 Lengan

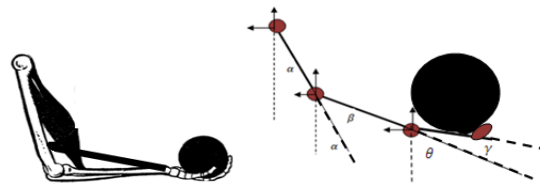
Pada pemodelan gerakan tangan ini dianggap bahwa massa lengan adalah m_1 dan m_2 dan panjang tiap lengan adalah l_1 (bahu-siku) dan l_2 (siku-pergelangan tangan) dan besar gaya pada otot bisep dan brachioradialis adalah F_1 dan F_2 , serta g mewakili besar percepatan gravitasi dan besaran $\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ dan τ_α mewakili sudut, kecepatan sudut, percepatan sudut dan besar torka yang diberikan pada daerah bahu hingga siku. $\beta, \dot{\beta}, \ddot{\beta}$ dan τ_β mewakili sudut, kecepatan sudut, percepatan sudut dan besar torka yang diberikan pada daerah siku hingga pergelangan tangan seperti pada Gambar-2.3



Gambar-2.3 Model gerak tangan flexion-extension

Model Pergerakan Flexion-Extension 3 Lengan dengan Beban

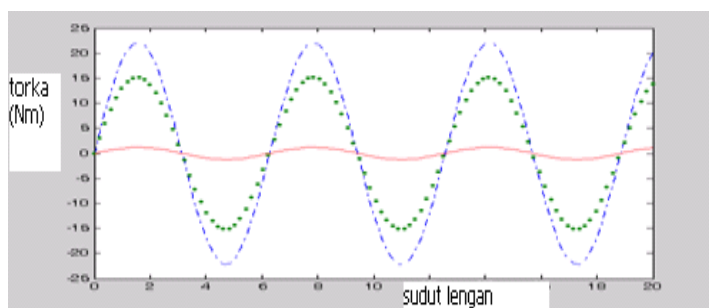
Pada pemodelan gerakan tangan ini dianggap bahwa massa lengan adalah m_1, m_2 dan m_3 , M dengan anggapan bahwa massa beban M sangat ringan dibandingkan tangan (*grabbing hand*) dan panjang tiap lengan adalah l_1 (bahu – siku), l_2 (siku-pergelangan tangan) dan l_3 (pergelangan tangan-jari) dan besar gaya pada otot bicep dan brachioradialis adalah F_1 dan F_2 , serta g mewakili besar percepatan gravitasi dan besaran $\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ dan τ_α mewakili sudut, kecepatan sudut, percepatan sudut dan besar torka yang diberikan pada daerah bahu hingga siku. $\beta, \dot{\beta}, \ddot{\beta}$ dan τ_β mewakili sudut, kecepatan sudut, percepatan sudut dan besar torka yang diberikan pada daerah siku hingga pergelangan tangan serta $\gamma, \dot{\gamma}, \ddot{\gamma}$ dan τ_γ mewakili sudut, kecepatan sudut, percepatan sudut dan besar torka yang diberikan pada daerah pergelangan tangan hingga jari tangan, seperti pada Gambar-2.4. (Rejane, dkk)^[9]



Gambar-2.4 Pergerakan Flexion-Extension 3 Lengan dengan Beban

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan metode Lagrange, akan didapatkan persamaan gerakan ayunan tangan pada berbagai macam pergerakan, secara umum hubungan ketergantungan torka pada berbagai sudut apit pada lengan atas, bawah dan telapak tangan dapat dilihat pada Gambar-3.1 di bawah



Gambar-3.1. Besar torka pada masing-masing segmen terhadap sudut: titik-garis, titik-titik dan garis lurus adalah sudut-sudut lengan atas, bawah dan telapak tangan (α, β, γ)

Pada analisa biodinamik akan didapatkan persamaan gerakan yaitu:

Persamaan gerak pada keadaan *outward-inward* yaitu $M(\theta)\ddot{\theta} + F\dot{\theta} + G(\theta) + E(\theta, \dot{\theta}) = \tau$ (Eppinger; M. Murray)^[10,11]

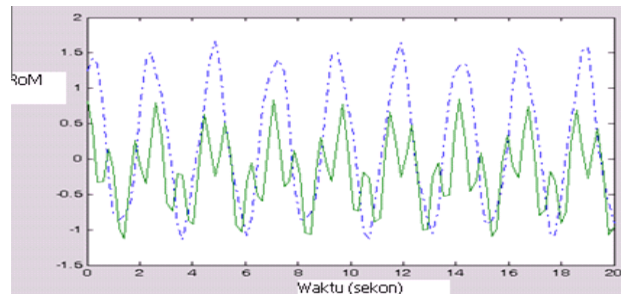
$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} (I_1 + I_2 + (m_1)L_1^2 + m_2l_1^2 + \frac{m_2l_2^2}{4} + m_2l_1l_2\cos\theta_e & I_2 + \frac{m_2l_2^2}{4} + \frac{m_2l_1l_2}{2}\cos\theta_e \\ I_2 + \frac{m_2l_2^2}{4} + \frac{m_2l_1l_2\cos\theta_e}{2} & I_2 + \frac{m_2l_2^2}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_s \\ \ddot{\theta}_e \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} -m_2l_1l_2\dot{\theta}_e\sin\theta_e & -\frac{m_2l_1l_2}{2}\sin\theta_e\dot{\theta}_e \\ \frac{m_2l_1l_2}{2}\dot{\theta}_s\sin\theta_e & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_e \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} F_2(l_1\cos\theta_s + l_2\cos(\theta_s + \theta_e)) + F_1(l_1\cos\theta_s) - F_2(l_1\sin\theta_s + l_2\sin(\theta_s + \theta_e)) - F_1(l_1\sin\theta_s) \\ F_2l_2\cos(\theta_s + \theta_e) - F_2l_2\sin(\theta_s + \theta_e) \end{pmatrix} \\
& = \begin{pmatrix} \tau_{\theta_s} \\ \tau_{\theta_e} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Bentuk Persamaan gerak pada keadaan *flexion-extension* dua lengan secara umum adalah

$$M(\theta)\ddot{\theta} + F\dot{\theta} + G(\theta) + E(\theta, \dot{\theta}) = \tau,$$

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} (I_1 + I_2 + (m_1)\frac{l_1^2}{4} + m_2l_1^2 + \frac{m_2l_2^2}{4} + m_2l_1l_2\cos\beta & I_2 + \frac{m_2l_2^2}{4} + \frac{m_2l_1l_2}{2}\cos\beta \\ I_2 + \frac{m_2l_2^2}{4} + \frac{m_2l_1l_2\cos\beta}{2} & I_2 + \frac{m_2l_2^2}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} -m_2l_1l_2\dot{\beta}\sin\beta & -\frac{m_2l_1l_2}{2}\sin\beta\dot{\beta} \\ \frac{m_2l_1l_2}{2}\dot{\alpha}\sin\beta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{l_1}{2}\sin\alpha & \frac{l_2}{2}\sin(\alpha + \beta) + \sin\alpha l_1 \\ 0 & \frac{l_2}{2}\sin(\alpha + \beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1g \\ m_2g \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} F_2(l_1\cos\alpha + l_2\cos(\alpha + \beta)) + F_1(l_1\cos\alpha) - F_2(l_1\sin\alpha + l_2\sin(\alpha + \beta)) - F_1(l_1\sin\alpha) \\ F_2l_2\cos(\alpha + \beta) - F_2l_2\sin(\alpha + \beta) \end{pmatrix} \\
& = \begin{pmatrix} \tau_\alpha \\ \tau_\beta \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Hasil grafik hubungan sudut α dan β dapat diperlihatkan pada Gambar-3.2



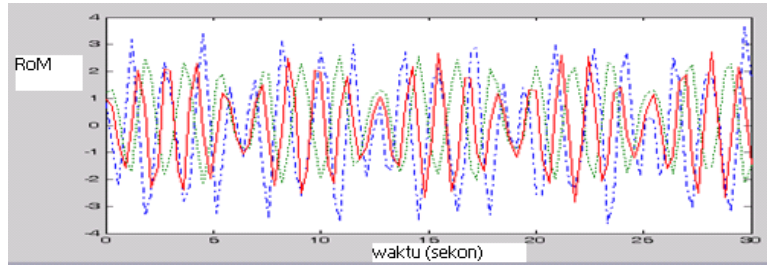
Gambar-3.2 a) Garis putus-putus menunjukkan besar sudut lengan atas, b) Garis lurus menunjukkan besar sudut lengan bawah pada waktu tertentu

Ketergantungan pergelangan tangan dalam proses untuk menciptakan pukulan *smash* yang baik dapat dilihat dari hubungan-hubungan pada torka-torkanya. Secara umum persamaan gerak untuk model gerakan 3-link dapat dirumuskan secara sederhana menjadi:

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} \{I_1 + I_2 + I_3 + m_1(L_1)^2 + m_2[(l_1)^2 + (L_2)^2] + m_3[l_1^2 + l_2^2 + L_3^2]\} & I_2 + I_3 + m_2(L_2)^2 + m_3[l_2^2 + L_3^2] & I_3 + m_3(L_3)^2 \\ [I_2 + I_3 + m_2(L_2)^2 + m_3l_2^2 + m_3L_3^2] & [I_2 + I_3 + m_2(L_2)^2 + m_3l_2^2 + m_3L_3^2] & [I_3 + m_3(L_3)^2] \\ [I_3 + m_3(L_3)^2] & [I_3 + m_3(L_3)^2] & [I_3 + m_3(L_3)^2] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{\gamma} \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} L_1\sin\alpha & l_1\sin\alpha + L_2\sin(\alpha + \beta) & l_1\sin\alpha + l_2\sin(\alpha + \beta) + L_3\sin(\alpha + \beta + \gamma) \\ 0 & L_2\sin(\alpha + \beta) & l_2\sin(\alpha + \beta) + L_3\sin(\alpha + \beta + \gamma) \\ 0 & 0 & L_3\sin(\alpha + \beta + \gamma) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1g \\ m_2g \\ m_3g \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

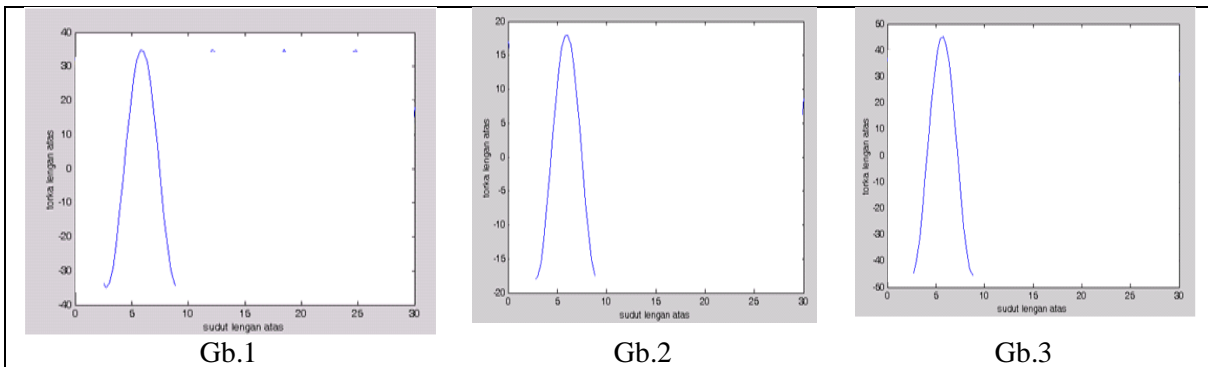
$$+ \begin{pmatrix} -F_1(l_1 \sin \alpha) + F_2(l_1 \cos \alpha + l_2 \cos(\alpha + \beta)) + F_1(l_1 \cos \alpha) - F_2(l_1 \sin \alpha + l_2 \sin(\alpha + \beta)) \\ F_2 l_2 \cos(\alpha + \beta) - F_2 l_2 \sin(\alpha + \beta) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_\alpha \\ \tau_\beta \\ \tau_\gamma \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Hasil grafik hubungan sudut α, β dan γ dapat diperlihatkan pada Gambar-3.3

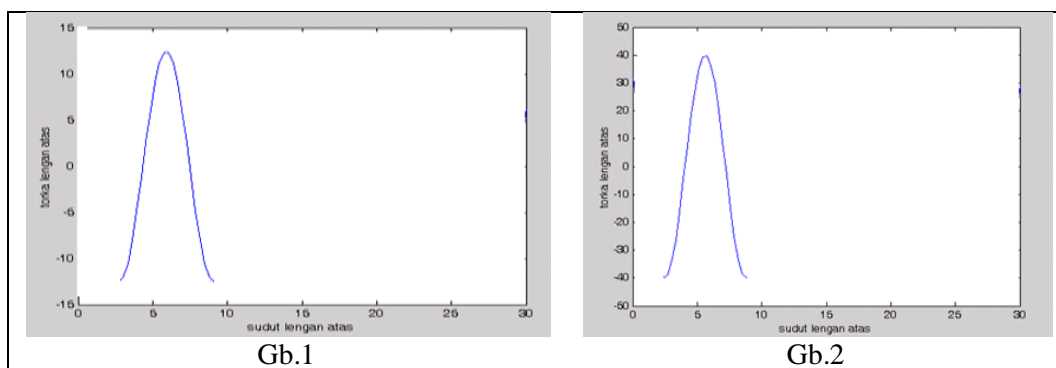


Gambar-3.3. Grafik persamaan gerak 3-link: garis-titik, titik-titik dan lurus adalah sudut-sudut α, β, γ pada waktu tertentu

penyederhanaan persamaan di atas dilakukan dengan mengeliminasi gaya-gaya yang tidak berkontribusi secara langsung pada gerakan ayunan tangan (*noncontributing forces*). Dari hasil analisa gerakan biostatic didapatkan hubungan sudut apit dengan besar torka, seperti pada Gambar-3.4 dan Gambar-3.5 serta Tabel 3.1:



Gambar-3.4 Torka lengan pada gerakan Outward-inward analisa biostatis atas terhadap berbagai sudut apit dan torka gaya otot



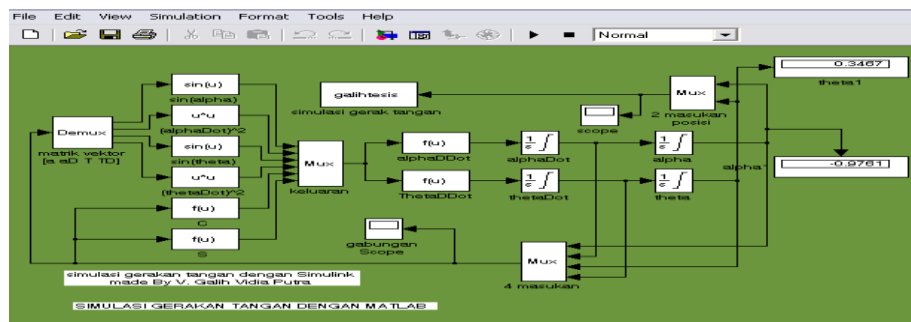
Gambar-3.5 Torka lengan pada gerakan flexion-extension analisa biostatis atas terhadap berbagai sudut apit dan torka gaya otot

Tabel-3.1

Tabel analisa gerakan biostatic terhadap besar torka lengan atas pada berbagai sudut apit dan gaya-gaya otot pada lengan atas dan lengan bawah

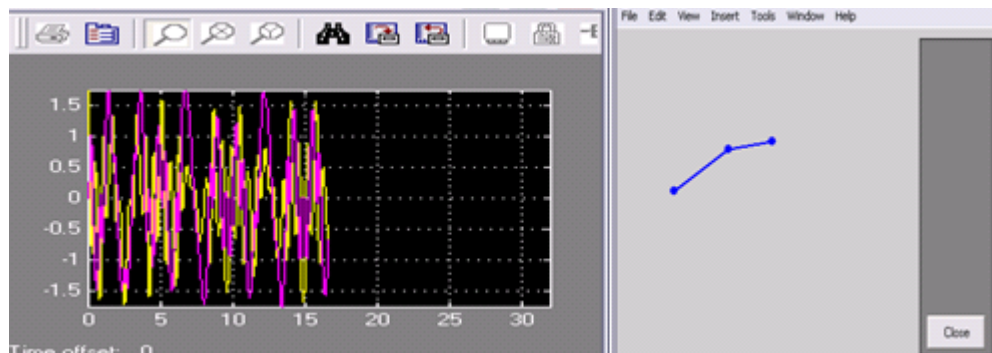
Jenis pergerakan	Gaya lengan atas	Gaya lengan bawah	Sudut lengan bawah	Torka lengan atas	Puncak torka maksimum
Outward-inward	10 N (Gb.1 pada gambar-3.4)	10 N	5°	35 Nm	$\left(\frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2}\right) RoM$
	10 N (Gb.2 pada gambar-3.4)	10 N	10°	18 Nm	$\left(\frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2}\right) RoM$
	30 N (Gb.3 pada gambar-3.4)	10 N	10°	45 Nm	$\left(\frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2}\right) RoM$
Flexion-extension	10 N(Gb.1 pada gambar-3.5)	10 N	10°	13 Nm	$\left(\frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2}\right) RoM$
	30 N(Gb.2 pada gambar-3.5)	10 N	10°	40 Nm	$\left(\frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2}\right) RoM$

Dari pemodelan di atas pada keadaan outward-inward dan *flexion-extension*, besar torka lengan atas begitu signifikan bergantung pada besar gaya-gaya yang ditimbulkan oleh otot bisep dan brachioradialis dan juga adanya ketergantungan pada besar sudut apit lengan bawah. Untuk menghasilkan besar torka pada lengan atas yang besar maka penentuan letak posisi sudut apit lengan bawah sangatlah penting. Bentuk pergerakan lengan 2 link dapat dimodelkan secara sederhana melalui MATLAB dengan menggunakan fasilitas simulink yang telah disediakan oleh MATLAB (Giles D. Wood)^[12]. Hasil pemrograman dan bentuk skema Simulink pada MATLAB adalah sebagai berikut



Gambar-3.6 Pemodelan gerakan standing smash

dengan mengklik *start simulation* pada toolbar, maka hasil simulasi dapat diperlihatkan secara langsung seperti pada Gambar-3.7



Gambar-3.7 Hasil simulasi Simulink

KESIMPULAN

Bertitik tolak dari dasar teori, perhitungan model pergerakan tangan dan pembahasan temuan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Besar torka hanya bergantung pada besar gaya-gaya yang ditimbulkan oleh otot bisept dan brachioradialis serta besar sudut lengan atas dan bawah.
2. Sudut lengan atas (bahu-siku) mengambil peranan penting dalam menghasilkan torka yang besar dan torka maksimal tangan berada pada posisi 1/2-1/3 dari RoM (Range of Movement) pada gerak *outward-inward* serta gerak *flexion*.
3. Smash maksimum terjadi saat sudut 1 / 2- 1/3 RoM, pada saat tersebut bola akan meninggalkan raket dengan kecepatan maksimal.
4. Selisih torka pada lengan atas dan lengan bawah sangat bergantung pada sudut apit lengan atas (untuk gerakan *flexion*). Saat sudut apit berada pada 1/2 posisi dari *Range of Movement* menghasilkan besar selisih torka yang maksimal.
5. MATLAB dapat digunakan untuk menganalisa gerakan tangan sekaligus membuat simulasi pergerakan tangan dengan cukup baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nurmianto, 1996, PENGUKURAN KERJA FISIK MANUSIA DENGAN PENDEKATAN BIOMEKANIKA, Laboratorium APK & Ergonomi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- [2] Fazrolrozi, 2009, A Model for Two-Link Kinematic Chain of Lower Limb Using Kane's Method from a jumping Smash Activity, European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.4 (2009), pp.500-509.
- [3] Ariff, F.H.M dkk. 2009, Modeling of An Arm Via Kane's Method: An Inverse Dynamic Approach, European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.33 No.2 (2009), pp.358-364.
- [4] Ariff, F.H.M dkk. 2008, AN OVERVIEW OF KANE'S METHOD, Faculty of Engineering Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 Bangi, Selangor
- [5] Lund, M. 2005, Biomechanical study of cross-country skiing, Sweden University, Department of Engineering, Physics and Mathematics
- [6] Gauthier, J.-P. and I. Kupka, 2001., *Deterministic Observation Theory and Applications*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK
- [7] Gauthier, J.P. dkk., 2010, " A Biomechanical Inactivation Principle" Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics, 2010, Vol. 268, pp. 93–116.
- [8] Pennestri, E. dkk, 2006, Virtual musculo-skeletal model for the iomechanical analysis of the upper limb, Journal of Biomechanics 40 1350–1361.
- [9] Rejane, dkk., 2010, BIOMECHANICAL MODEL AND CONTROL OF HUMAN POSTURAL SYSTEM AND SIMULATION BASED ON STATE-DEPENDENT RICCATI EQUATION, *Mecánica Computacional* Vol XXIX, págs. 6605-6618.
- [10] Eppinger, 1988, Modelling and Experimental Evaluation of asymmetric Pantograph Dynamic, University of Pittsburgh School of Engineering, journal of Dynamic systems, measurement and control, vol.110, 168-174.

- [11] Murray, M. 1994, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, California Institute of Technology, (<http://www.cds.caltech.edu/~murray/mlswiki>).
- [12] Giles Wood, 2003, Simulating Mechanical Systems in Simulink with SimMechanics, The MathWorks, 3 Apple Hill Drive, Natick, MA, USA (www.mathworks.com).

