

## Analisis Kinetik bagi Segmen Bahagian Pinggiran Atas Badan semasa Melakukan Aktiviti Kehidupan Harian

(Kinetic Analysis of Upper Extremity Segment during Activities of Daily Living)

HASYATUN CHE-NAN<sup>1,2</sup> & AZMIN SHAM RAMBELY<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Jabatan Matematik dan Sains Komputer, Kolej Poly-Tech MARA Bangi, 43000 Kajang, Selangor, Malaysia

<sup>2</sup>Jabatan Sains Matematik, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Diserahkan: 21 Julai 2024/Diterima: 13 September 2024

### ABSTRAK

Pembangunan model biomekanik untuk mendapatkan nilai kilasan dapat membantu mencegah kecederaan daripada berlaku. Kajian ini bertujuan untuk membangunkan model biomekanik bahagian atas badan yang merangkumi lengan atas, lengan bawah dan tangan untuk mendapatkan nilai kilasan sendi bahu, siku dan pergelangan tangan semasa melakukan aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut. Seterusnya, model biomekanik ini disahkan melalui perbezaan antara nilai sudut uji kaji dengan nilai sudut anggaran menggunakan kaedah berangka, Runge-Kutta peringkat kelima. Selain itu, kajian ini dijalankan untuk menganalisis dan membandingkan nilai kilasan semasa melakukan tiga aktiviti kehidupan harian. Kajian ini melibatkan 20 orang subjek normal dalam lingkungan umur 24-56 tahun dengan purata berat badan  $72.9 \pm 16.5$  kg. Aktiviti pergerakan dirakam menggunakan Vicon Nexus 1.8.1 (Oxford Metrics Ltd., Oxford, England) dengan kadar frekuensi 100 Hz. Melalui rakaman ini, data kinematik seperti tempoh masa pergerakan, sudut, halaju dan pecutan sudut sendi diperolehi. Nilai kilasan sendi diramal berdasarkan model anggota bahagian atas badan dengan menggantikan data kinematik ke dalam persamaan dinamik songsang yang diterbitkan menggunakan kaedah Kane. Pengesahan pemodelan menggunakan kaedah Runge-Kutta peringkat kelima Butcher bagi memperoleh semula nilai sudut anggaran menggunakan nilai kilasan yang telah dianggarkan. Peratusan ralat relatif telah dihitung dan didapati ia tidak terlalu besar dengan nilai 0.038% bagi nilai sudut bahu dan 0.019% bagi nilai sudut siku. Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa data sudut uji kaji dan data sudut anggaran adalah sepadan. Seterusnya, nilai kilasan dianalisis menggunakan analisis varian satu hala (ANOVA). Hasil kajian mendapati tidak terdapat perbezaan yang signifikan pada semua parameter kinetik bagi ketiga-tiga aktiviti yang dikaji. Oleh itu, kajian kinetik ini membantu memperoleh pemahaman tentang biomekanik pergerakan menerusi nilai kilasan, yang seterusnya menyumbang kepada kemajuan dalam teknik pemulihan dan reka bentuk ergonomik.

Kata kunci: Analisis kinetik; anggota badan bahagian atas; kilasan; mencapai suis; menyentuh bahu kontra lateral; menyikat rambut

### ABSTRACT

The development of this model aims to obtain torque values that help prevent injuries from occurring. Thus, this study aims to develop a biomechanical model for the upper limb, which includes the upper arm, forearm, and hand, to obtain torque values for the shoulder, elbow, and wrist joints during daily activities touching the contralateral shoulder, reaching for a switch, and combing hair. Subsequently, this biomechanical model is validated by comparing the differences between the experimental angle values and the estimated angle values using the fifth-order Runge-Kutta numerical method. In addition, this study is conducted to analyze and compare the kinetic data values while performing three daily activities. The study included 20 normal subjects in the age range of 24-56 years old, with an average body weight of  $72.9 \pm 16.5$  kg. The activity was recorded using the Vicon Nexus 1.8.1 (Oxford Metrics Ltd., Oxford, England) system with a frequency rate of 100 Hz. Through this recording, kinematics data such as movement time, angles, velocity, and angular acceleration of upper limb joints were obtained. Torque joint values were derived using the Kane's method which was based on the upper extremity model by applying the kinematics data to the inverse dynamic equation. Furthermore, Butcher's fifth-order Runge-Kutta method was used to determine the estimated angle value using the already determined torque. The relative error percentage was calculated and found that it was not too large, with values of 0.038% for the shoulder angle and 0.019% for the elbow angle. Therefore, it was concluded that the experimental angle data and the estimated angle data are consistent. The data were then analyzed using a one-way analysis of variance (ANOVA). The results indicated there is no significant differences in any of the kinetic parameters for all three analyzed activities. Therefore, this kinetic study can help us gain some insights

into the biomechanics of movement using torque value, which later will improve rehabilitation techniques and ergonomic design.

Keywords: Hair combing; kinetic analysis; reaching switch; torque; touching contralateral shoulder; upper extremity

#### PENDAHULUAN

Pergerakan manusia boleh dikelaskan kepada dua kategori iaitu pergerakan bahagian pinggiran bawah badan dan pergerakan bahagian pinggiran atas badan. Aktiviti berjalan ialah pergerakan yang biasa dikaji bagi bahagian pinggiran bawah badan iaitu merangkumi bahagian pinggang hingga ke hujung jari kaki (Fukuchi, Fukuchi & Duarte 2019; Molina-Garcia et al. 2019; Pol et al. 2021). Pada kebiasaannya, tugas harian manusia lebih tertumpu pada bahagian pinggiran atas badan iaitu merangkumi bahagian pinggang ke kepala. Bahagian pinggiran atas badan ini bergerak dalam satu sistem koordinasi. Dari zaman kanak-kanak hingga dewasa, setiap individu melakukan pergerakan asas menggunakan otot bahagian pinggiran atas badan secara khusus terutamanya pergerakan tangan. Pergerakan tangan adalah komponen yang paling penting apabila melaksanakan tugas harian yang berbeza (Reyes-Guzmán et al. 2010). Ini termasuk mandi, berpakaian, mendandan, menyikat rambut, makan dan minum.

Kilasan merupakan konsep asas dalam biomekanik kerana ia secara langsung mempengaruhi pergerakan sendi dan fungsi otot. Pengiraan nilai kilasan dapat menentukan kecekapan dan keberkesanan pergerakan yang terdiri daripada kemahiran motor kasar seperti menyentuh bahu kontra lateral kepada kemahiran motor halus mudah dan juga kompleks seperti mencapai suis dan menyikat rambut. Apabila sistem bahagian pinggiran atas badan yang diselaraskan ini terjejas, komponen lain juga turut terjejas dan seseorang individu sukar untuk menyempurnakan tugas aktiviti kehidupan harian.

Terdapat beberapa penyelidik yang telah melakukan kajian analisis data kinetik bagi aktiviti kehidupan harian dengan menggunakan kaedah Newton-Euler (Karner, Reichenfeller & Gfoehler 2012; Masjedi & Duffell 2013; Murray & Johnson 2004). Namun, kaedah Newton-Euler adalah kaedah yang komprehensif. Ia memerlukan daya, kilasan, pecutan linear, pecutan sudut, daya interaktif dan kekangan seimbang bagi jasad yang dikaji. Oleh itu, kaedah ini menjadi sangat rumit dalam pemodelan sistem jasad yang kompleks (Purushotham 2013).

Chai et al. (2022) dan McGrath, Howard dan Baker (2017) telah membangunkan suatu model biomekanik menggunakan kaedah Lagrange bagi bahagian pinggiran bawah badan manakala Abdalla dan Rambely (2014), Flash dan Hogan (1985), Pennestri et al. (2007) dan Rehbinder dan Martin (2001) telah membangunkan model biomekanik menggunakan kaedah Lagrange bagi bahagian pinggiran atas badan manusia yang terdiri daripada tangan, lengan bawah dan lengan atas. Persamaan Lagrange juga merupakan satu daripada kaedah yang

digunakan untuk menyelesaikan masalah pergerakan badan dengan mengabaikan semua daya interaktif dan kekangan (Cleather, Goodwin & Bull 2011). Namun begitu, kekurangan utama kaedah ini ialah keperluan untuk membezakan fungsi tenaga kinetik dan potensi yang dinyatakan sebagai fungsi kedudukan dan halaju. Oleh itu, ia lebih sesuai diaplikasikan pada anggota badan yang berskala kecil serta persamaan gerakan bagi sistem yang kompleks.

Rambely dan Fazrolrozi (2012) mendapati kaedah Kane merupakan kaedah yang lebih mudah dan berkesan berbanding kaedah Newton-Euler dan Lagrange. Li et al. (2015) pula mendapati bahawa model Kane adalah lebih baik daripada model Lagrange. Model Kane mempunyai kesan pelaksanaan pergerakan yang lebih baik apabila nilai kilasan pada sendi meningkat. Setelah model biomekanik dibangunkan, pengesahan pemodelan perlu dilakukan menerusi nilai sudut yang diperoleh secara uji kaji dengan nilai sudut yang diperoleh melalui persamaan permodelan biomekanik untuk memastikan model biomekanik yang dibangunkan mampu memberi jawapan yang tepat. Pengesahan model biomekanik ini diselesaikan melalui kaedah Runge-Kutta peringkat kelima.

Analisis biomekanik dari aspek kinetik bagi aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut yang perlu difokuskan ialah kilasan. Kilasan terjadi apabila sendi mengalami daya yang memutar segmen bahagian badan. Nilai kilasan ini amat penting untuk otot menjana daya yang diperlukan bagi melakukan pelbagai jenis tindakan seperti mencengkam, menggenggam atau memanipulasi objek. Bloomer, Wang dan Kontson (2020), Hall, Middlebrook dan Dickerson (2011), Hussain dan Azlan (2019), Karner, Reichenfeller dan Gfoehler (2012), Masjedi dan Duffell (2013), Murray dan Johnson (2004), telah mengkaji secara mendalam berkenaan kilasan dalam penyelidikan mereka.

Biomekanik pergerakan tangan boleh difahami dengan lebih baik dengan menggunakan ukuran kilasan dalam kajian pergerakan tangan manusia. Analisis kinetik ini membantu bagi memahami corak pengaktifan otot iaitu otot yang digunakan semasa sesuatu pergerakan dilakukan. Maklumat mengenai pergerakan bahu, siku dan pergelangan tangan yang dikoordinasi bagi menghasilkan jenis pergerakan yang berbeza adalah satu daripada aplikasi praktikal yang penting. Kajian kinetik dapat membantu mendapatkan cerapan mengenai biomekanik pergerakan yang membawa kepada kemajuan dalam prestasi sukan, teknik pemulihan dan reka bentuk ergonomik.

Kajian kinetik oleh Karner et al. (2012) serta Murray dan Johnson (2004) memfokuskan kilasan pada bahagian

pinggiran atas badan ke atas subjek yang sihat. Murray dan Johnson (2004) telah mengkaji aktiviti menyentuh bahagian bahu kontra lateral, menyentuh sisi leher, menyentuh sisi dan belakang kepala, makan menggunakan tangan dan sudu, minum menggunakan gelas, menjawab telefon, menyikat rambut, dan mengangkat bongkah pada ketinggian bahu dan kepala. Karner, Reichenfelser dan Gfoehler (2012) pula telah mengkaji aktiviti menyikat rambut dan minum menggunakan straw dari dalam botol. Murray dan Johnson (2004) menyatakan bahawa kilasan pada siku merupakan komponen paling utama semasa melakukan aktiviti menyentuh bahu kontra lateral. Putaran dalaman pada tangan berkurangan apabila tangan bergerak menghampiri bahu manakala putaran dalaman pada pergelangan tangan tidak berubah. Murray dan Johnson (2004) telah berjaya memperoleh pangkalan data bagi data kinetik iaitu kilasan yang dibangunkan untuk menyokong pembangunan model biomekanik bahagian pinggiran atas badan. Dalam kajian Karner, Reichenfelser dan Gfoehler (2012) pula mendapati kilasan maksimum ditemui pada sendi bahu semasa aktiviti menyikat rambut dan minum menggunakan straw kerana tangan perlu digerakkan menjauhi badan bagi mencapai sikat atau botol. Aktiviti menyikat rambut juga menunjukkan perubahan yang maksimum pada kilasan siku.

Pemilihan aktiviti kehidupan harian adalah berdasarkan kemahiran motor dalam pergerakan tangan. Aktiviti menyentuh bahu kontra lateral merupakan contoh bagi kemahiran motor kasar. Aktiviti mencapai suis pula merupakan contoh bagi kemahiran motor halus yang mudah manakala aktiviti menyikat rambut merupakan contoh bagi kemahiran motor halus yang kompleks. Kajian pergerakan aktiviti kehidupan harian yang dipilih masih belum pernah dibangunkan khasnya di Malaysia.

Tujuan penyelidikan ini dijalankan adalah untuk membangunkan model biomekanik dua matra anggota bahagian pinggiran atas badan yang merangkumi tangan, lengan bawah dan lengan atas menggunakan kaedah Kane bagi menghasilkan nilai kilasan pada setiap sendi yang terlibat bagi aktiviti kehidupan harian yang telah dipilih. Model biomekanik ini disahkan melalui perbezaan antara nilai sudut uji kaji dengan nilai sudut anggaran menggunakan kaedah berangka, Runge-Kutta peringkat

kelima. Kajian ini juga dijalankan untuk menganalisis dan membandingkan pemboleh ubah kinetik bagi kilasan sendi bahu, siku dan pergelangan tangan bagi aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut.

## KAEDAH

### SUBJEK

Subjek yang dipilih terdiri daripada 20 orang subjek normal, lima lelaki dan lima belas perempuan dalam lingkungan umur 24-56 tahun. Purata umur subjek ialah 39.1 tahun ( $SD \pm 10.3$ ). Purata berat badan subjek adalah 72.9 kg ( $SD \pm 16.5$ ). Purata ketinggian subjek ialah 160.7 cm ( $SD \pm 10.2$ ). Panjang lengan kanan adalah antara 52 hingga 69 cm dengan purata 57.9 cm ( $SD \pm 4.8$ ). Setiap subjek mempunyai anggota kanan yang dominan.

Subjek dalam keadaan sihat semasa uji kaji dijalankan dan bebas daripada sebarang kecederaan. Kajian ini telah diluluskan oleh Jawatankuasa Etika Penyelidikan Hospital Universiti Kebangsaan Malaysia (NN-2016-045). Persetujuan bertulis telah diperoleh sebelum uji kaji dan semua subjek dimaklumkan tentang kajian secara bertulis. Demografi khusus subjek yang sihat untuk setiap kumpulan umur ditunjukkan dalam Jadual 1. Terdapat sekurang-kurangnya lima ulangan bagi setiap tugasan.

### PERALATAN

Dengan kadar frekuensi 100 Hz, pergerakan bahu telah direkod menggunakan sistem analisis gerakan Vicon Nexus 1.8.1 (Oxford Metrics Ltd., Oxford, England). Empat belas penanda reflektif diletakkan pada bucu tulang segmen bahagian pinggiran atas badan subjek dan dikesan menggunakan tiga kamera infra merah dengan ketinggian yang berbeza, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Penanda reflektif telah diletakkan pada puncak iliac, akromion, pertengahan humerus, olecranon ulna, tengah ulna, proses styloid radial dan ulna dan sempadan sisi metacarpal pertama, kedua dan kelima (Che-Nan & Rambely 2017).

Lapan penanda reflektif bersaiz 14 mm sfera dan enam penanda reflektif bersaiz 9 mm sfera telah dilekatkan

JADUAL 1. Ciri dan demografi subjek yang dianalisis (n = 20)

Kumpulan Umur	20-29		30-39		40-49		50-59	
	Lelaki	Perempuan	Lelaki	Perempuan	Lelaki	Perempuan	Lelaki	Perempuan
	3	2	0	5	1	4	1	4
Tinggi (m)	1.67 (0.07)		1.64 (0.02)		1.57 (0.04)		1.55 (0.03)	
Berat (kg)	75.2 (9.66)		76.7 (8.0)		60.2 (4.6)		79.4 (4.8)	
Panjang lengan kanan (cm)	59.2 (3.0)		60.7 (2.0)		56.9 (1.7)		54.6 (0.9)	

pada sendi yang telah ditetapkan. Penanda reflektif ini diletakkan pada kulit badan subjek bagi mengurangkan kesan pergerakan kulit serta ralat sewaktu uji kaji dilakukan (Fuller et al. 1997; Nester et al. 2007). Dalam penyelidikan kinematik oleh penyelidik sebelum ini, kedudukan penanda yang sama telah digunakan (Che-Nan & Rambely 2022; Hansen et al. 2018; Huysamen et al. 2018).

Seperti yang digambarkan dalam Rajah 2, tiga kamera telah diletakkan pada tiga kedudukan yang berbeza. Ruang isi padu berukuran  $170 \times 130 \times 100 \text{ cm}^3$  telah digunakan untuk menentu ukur peranti. Bagi memudahkan proses pendigitan, rakaman telah disimpan pada komputer. Prosedur pendigitan telah menggunakan perisian Vicon Nexus 1.8.1. Selepas pendigitan selesai, analisis dijalankan untuk menghasilkan data kinematik. Menggunakan pendekatan Kane, pemodelan dua dimensi bagi tiga rantai kinematik digunakan untuk memperoleh nilai kilasan ini. Daya yang terlibat dalam pergerakan aktiviti harian diambil kira dalam persamaan ini. Daya yang menghubungkan pusat jisim segmen dengan halaju sudut linear dan separa termasuk graviti, daya aktif dan daya inersia. Data kinematik daripada uji kaji digunakan untuk menghitung nilai kilasan bagi setiap sendi. Data ini kemudiannya dimasukkan ke dalam prosedur pemodelan biomekanik.

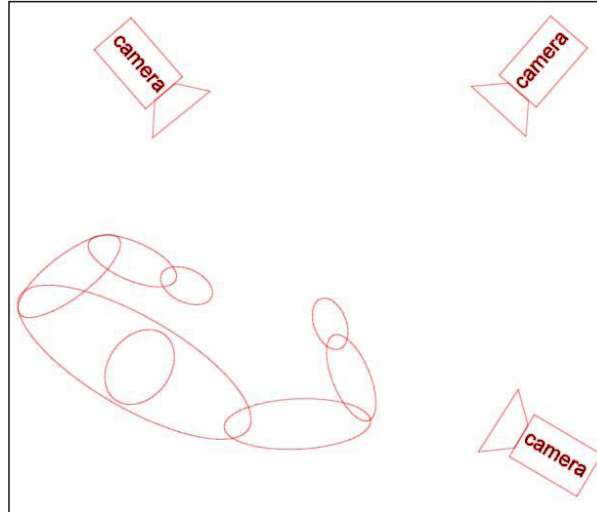
#### PROSEDUR

Semasa subjek melakukan pergerakan, tiada gangguan dikesan pada pergerakan fizikal semula jadi badan ketika subjek melaksanakan aktiviti harian yang dipilih, iaitu menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut. Ketiga-tiga aktiviti dilakukan dalam keadaan duduk bagi mengasingkan pergerakan anggota bahagian pinggiran atas badan dan anggota bahagian pinggiran bawah badan (Murray & Johnson 2004). Sebelum uji kaji bermula, subjek dikehendaki duduk pada kedudukan asal di atas kerusi dengan kaki di atas lantai dan dalam keadaan badan bersandar pada kerusi tanpa pergerakan sepanjang uji kaji. Kedudukan asal ditakrifkan sebagai lengan dan tapak tangan diletakkan pada peha ipsilateral (Mesquita et al. 2020). Subjek juga diminta duduk dalam posisi yang selesa dengan tangan dan siku yang dominan serta segmen lengan selari dengan tanah. Penanda diletakkan pada lutut bagi tujuan rujukan untuk melihat pergerakan badan subjek semasa melakukan aktiviti. Semua subjek dikehendaki melakukan aktiviti kehidupan harian menggunakan tangan dominan mereka.

Bagi setiap aktiviti, pergerakan dimulakan dengan subjek duduk pada kedudukan asal. Tugasan bermula apabila subjek mengangkat tangan. Tugasan berakhir



RAJAH 1. Kedudukan penanda pada badan subjek



RAJAH 2. Kedudukan kamera semasa uji kaji

apabila tangan subjek kembali ke kedudukan asal. Rajah 3 menunjukkan aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, aktiviti mencapai suis dan aktiviti menyikat rambut yang dijalankan. Bagi aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, aktiviti ini mewakili aktiviti mandi dan menggosok bahagian badan serta memakai kemeja bagi subjek kurang upaya. Bagi aktiviti mencapai suis, aktiviti ini mewakili aktiviti menekan suis untuk meminta pertolongan bagi subjek kurang upaya. Selain daripada itu, aktiviti ini juga menyerupai aktiviti menekan papan kekunci. Seterusnya, aktiviti menyikat rambut mewakili aktiviti makan menggunakan sudu atau minum menggunakan gelas.

PEMODELAN BAHAGIAN PINGGIRAN ATAS BADAN  
MENGUNAKAN KAEDAH KANE

Bentuk matriks-vektor boleh digunakan bagi menyatakan persamaan dinamik gerakan (Ren, Jones & Howard 2005),

$$M\ddot{Q} = \ddot{T} + \ddot{G} \quad (1)$$

Daripada persamaan dinamik gerakan, hanya nilai kilasan yang tidak diketahui dan nilai ini diperoleh menggunakan kaedah dinamik songsang. Oleh itu, persamaan (1) diperoleh seperti berikut,

$$\ddot{T} = M\ddot{Q} - \ddot{G} \quad (2)$$

Oleh itu, rumus bagi kilasan pertama diperoleh seperti berikut:

$$T_1 = \ddot{q}_1(I_{A'} + \rho_A^2 m_A + l_A^2 m_B + \rho_B^2 m_B + l_A^2 m_C + l_B^2 m_C + \rho_C^2 m_C + I_{B'} + I_{C'}) + \ddot{q}_2(\rho_B^2 m_B + l_B^2 m_C + \rho_C^2 m_C + I_{B'} + I_{C'}) + \ddot{q}_3(\rho_C^2 m_C + I_{C'}) + m_A g \rho_A \cos(q_1) + m_B g l_A \cos(q_1) - m_B g \rho_B [\sin(q_1) \sin(q_2) + \cos(q_1) \cos(q_2)] + m_C g l_A \cos(q_1) - m_C g l_B [\sin(q_1) \sin(q_2) + \cos(q_1) \cos(q_2)] + m_C g \rho_C \begin{bmatrix} \sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) - \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) \\ -\sin(q_1) \sin(q_2) \cos(q_3) - \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) \end{bmatrix}$$

Manakala rumus bagi kilasan kedua diperoleh seperti berikut:

$$T_2 = \ddot{q}_1(\rho_B^2 m_B + l_B^2 m_C + \rho_C^2 m_C + I_{B'} + I_{C'}) + \ddot{q}_2(\rho_B^2 m_B + l_B^2 m_C + \rho_C^2 m_C + I_{B'} + I_{C'}) + \ddot{q}_3(\rho_C^2 m_C + I_{C'}) - m_B g \rho_B [\sin(q_1) \sin(q_2) + \cos(q_1) \cos(q_2)] - m_C g l_B [\sin(q_1) \sin(q_2) + \cos(q_1) \cos(q_2)] - m_C g \rho_C \begin{bmatrix} \sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) - \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) \\ -\sin(q_1) \sin(q_2) \cos(q_3) - \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) \end{bmatrix}$$

Rumus kilasan ketiga pula adalah seperti berikut:

$$T_3 = \ddot{q}_1(\rho_C^2 m_C + I_{C'}) + \ddot{q}_2(\rho_C^2 m_C + I_{C'}) + \ddot{q}_3(\rho_C^2 m_C + I_{C'}) + m_C g \rho_C \begin{bmatrix} \sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) - \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) \\ -\sin(q_1) \sin(q_2) \cos(q_3) - \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) \end{bmatrix}$$

Persamaan dinamik songsang peringkat kedua diturunkan kepada sistem peringkat pertama untuk





(a)



(b)



(c)

RAJAH 3. a) Aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, b) aktiviti mencapai suis dan c) aktiviti menyikat rambut

mengintegrasikan dinamik songsang menggunakan pendekatan berangka. Enam pemboleh ubah yang diperkenalkan sebagai sudut bahu, halaju sudut bahu, sudut siku, halaju sudut siku, sudut pergelangan tangan dan halaju sudut pergelangan tangan yang digabungkan sebagai input dalam persamaan dinamik songsang peringkat kedua menggunakan pendekatan kaedah keadaan ruang (Lee & Lin 1992).

$$\dot{y}_1 = y_2,$$

$$\dot{y}_2 = \frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2},$$

$$\dot{y}_3 = y_4,$$

$$\dot{y}_4 = \left( \frac{X_2 - X_3}{Y_2 - Y_3} \right) - \left( \frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2} \right),$$

$$\dot{y}_5 = y_6,$$

$$\dot{y}_6 = \frac{X_3}{Y_3} - \left( \frac{X_2 - X_3}{Y_2 - Y_3} \right)$$

dengan,

$$X_1 = T_1 - Y_4 \cos(q_1) + Y_5 [\sin(q_1) \sin(q_2) + \cos(q_1) \cos(q_2)] \\ - Y_6 \left[ \begin{array}{l} \sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) - \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) \\ - \sin(q_1) \sin(q_2) \cos(q_3) - \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) \end{array} \right],$$

$$X_2 = T_2 + Y_5 [\sin(q_1) \sin(q_2) + \cos(q_1) \cos(q_2)] \\ + Y_6 \left[ \begin{array}{l} \sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) - \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) \\ - \sin(q_1) \sin(q_2) \cos(q_3) - \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) \end{array} \right],$$

$$X_3 = T_3 - Y_6 \left[ \begin{array}{l} \sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) - \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) \\ - \sin(q_1) \sin(q_2) \cos(q_3) - \cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) \end{array} \right],$$

$$Y_1 = I_{A^*} + I_{B^*} + I_{C^*} + m_A \rho_A^2 + m_B l_A^2 + m_B \rho_B^2 \\ + m_C l_A^2 + m_C l_B^2 + m_C \rho_C^2,$$

$$Y_2 = I_{B^*} + I_{C^*} + m_B \rho_B^2 + m_C l_B^2 + m_C \rho_C^2,$$

$$Y_3 = I_{C^*} + m_C \rho_C^2,$$

$$Y_4 = m_A g \rho_A + m_B g l_A + m_C g l_A,$$

$$Y_5 = -(m_B g \rho_B + m_C g l_B),$$

$$Y_6 = m_C g \rho_C.$$

#### PENGESAHAN PEMODELAN MENGGUNAKAN KAEDAH RUNGE-KUTTA PERINGKAT KELIMA

Kaedah berangka yang dikenali sebagai Kaedah Runge-Kutta peringkat kelima digunakan untuk menyelesaikan empat persamaan peringkat pertama yang diperoleh daripada sistem peringkat kedua. Semasa pergerakan menyentuh bahu kontra lateral, persamaan ini menghasilkan nilai anggaran bagi sudut bahu dan siku. Pengembangan kaedah Runge-Kutta peringkat kelima Butcher bagi enam persamaan pembezaan peringkat pertama boleh ditulis seperti berikut (Hossain et al. 2017):

$$y_{1_{n+1}} = y_{1_n} + \frac{h}{90} [7k_1 + 32k_3 + 12k_4 + 32k_5 + 7k_6],$$

$$y_{2_{n+1}} = y_{2_n} + \frac{h}{90} [7j_1 + 32j_3 + 12j_4 + 32j_5 + 7j_6],$$

$$y_{3_{n+1}} = y_{3_n} + \frac{h}{90} [7l_1 + 32l_3 + 12l_4 + 32l_5 + 7l_6],$$

$$y_{4_{n+1}} = y_{4_n} + \frac{h}{90} [7o_1 + 32o_3 + 12o_4 + 32o_5 + 7o_6],$$

$$y_{5_{n+1}} = y_{5_n} + \frac{h}{90} [7p_1 + 32p_3 + 12p_4 + 32p_5 + 7p_6],$$

$$y_{6_{n+1}} = y_{6_n} + \frac{h}{90} [7w_1 + 32w_3 + 12w_4 + 32w_5 + 7w_6],$$

dengan

$$k_1 = P(x_n, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6),$$

$$j_1 = Q(x_n, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6),$$

$$l_1 = R(x_n, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6),$$

$$o_1 = S(x_n, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6),$$

$$p_1 = U(x_n, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6),$$

$$w_1 = V(x_n, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6),$$

$$k_2 = P\left(x_n + \frac{h}{4}, y_1 + \frac{k_1 h}{4}, y_2 + \frac{j_1 h}{4}, y_3 + \frac{l_1 h}{4}, y_4 + \frac{o_1 h}{4}, y_5 + \frac{p_1 h}{4}, y_6 + \frac{w_1 h}{4}\right),$$





$$j_6 = Q \left( \begin{array}{l} x_1 + h, y_1 - \frac{3}{7}k_1h + \frac{2}{7}k_2h + \frac{12}{7}k_3h - \frac{12}{7}k_4h + \frac{8}{7}k_5h, y_2 - \frac{3}{7}j_1h \\ + \frac{2}{7}j_2h + \frac{12}{7}j_3h - \frac{12}{7}j_4h + \frac{8}{7}j_5h, y_3 - \frac{3}{7}l_1h + \frac{2}{7}l_2h + \frac{12}{7}l_3h \\ - \frac{12}{7}l_4h + \frac{8}{7}l_5h, y_4 - \frac{3}{7}o_1h + \frac{2}{7}o_2h + \frac{12}{7}o_3h - \frac{12}{7}o_4h + \frac{8}{7}o_5h, \\ y_5 - \frac{3}{7}p_1h + \frac{2}{7}p_2h + \frac{12}{7}p_3h - \frac{12}{7}p_4h + \frac{8}{7}p_5h, y_6 - \frac{3}{7}w_1h \\ + \frac{2}{7}w_2h + \frac{12}{7}w_3h - \frac{12}{7}w_4h + \frac{8}{7}w_5h \end{array} \right),$$

$$l_6 = R \left( \begin{array}{l} x_1 + h, y_1 - \frac{3}{7}k_1h + \frac{2}{7}k_2h + \frac{12}{7}k_3h - \frac{12}{7}k_4h + \frac{8}{7}k_5h, y_2 - \frac{3}{7}j_1h \\ + \frac{2}{7}j_2h + \frac{12}{7}j_3h - \frac{12}{7}j_4h + \frac{8}{7}j_5h, y_3 - \frac{3}{7}l_1h + \frac{2}{7}l_2h + \frac{12}{7}l_3h \\ - \frac{12}{7}l_4h + \frac{8}{7}l_5h, y_4 - \frac{3}{7}o_1h + \frac{2}{7}o_2h + \frac{12}{7}o_3h - \frac{12}{7}o_4h + \frac{8}{7}o_5h, \\ y_5 - \frac{3}{7}p_1h + \frac{2}{7}p_2h + \frac{12}{7}p_3h - \frac{12}{7}p_4h + \frac{8}{7}p_5h, y_6 - \frac{3}{7}w_1h \\ + \frac{2}{7}w_2h + \frac{12}{7}w_3h - \frac{12}{7}w_4h + \frac{8}{7}w_5h \end{array} \right),$$

$$o_6 = S \left( \begin{array}{l} x_1 + h, y_1 - \frac{3}{7}k_1h + \frac{2}{7}k_2h + \frac{12}{7}k_3h - \frac{12}{7}k_4h + \frac{8}{7}k_5h, y_2 - \frac{3}{7}j_1h \\ + \frac{2}{7}j_2h + \frac{12}{7}j_3h - \frac{12}{7}j_4h + \frac{8}{7}j_5h, y_3 - \frac{3}{7}l_1h + \frac{2}{7}l_2h + \frac{12}{7}l_3h \\ - \frac{12}{7}l_4h + \frac{8}{7}l_5h, y_4 - \frac{3}{7}o_1h + \frac{2}{7}o_2h + \frac{12}{7}o_3h - \frac{12}{7}o_4h + \frac{8}{7}o_5h, \\ y_5 - \frac{3}{7}p_1h + \frac{2}{7}p_2h + \frac{12}{7}p_3h - \frac{12}{7}p_4h + \frac{8}{7}p_5h, y_6 - \frac{3}{7}w_1h \\ + \frac{2}{7}w_2h + \frac{12}{7}w_3h - \frac{12}{7}w_4h + \frac{8}{7}w_5h \end{array} \right),$$

$$p_6 = U \left( \begin{array}{l} x_1 + h, y_1 - \frac{3}{7}k_1h + \frac{2}{7}k_2h + \frac{12}{7}k_3h - \frac{12}{7}k_4h + \frac{8}{7}k_5h, y_2 - \frac{3}{7}j_1h \\ + \frac{2}{7}j_2h + \frac{12}{7}j_3h - \frac{12}{7}j_4h + \frac{8}{7}j_5h, y_3 - \frac{3}{7}l_1h + \frac{2}{7}l_2h + \frac{12}{7}l_3h \\ - \frac{12}{7}l_4h + \frac{8}{7}l_5h, y_4 - \frac{3}{7}o_1h + \frac{2}{7}o_2h + \frac{12}{7}o_3h - \frac{12}{7}o_4h + \frac{8}{7}o_5h, \\ y_5 - \frac{3}{7}p_1h + \frac{2}{7}p_2h + \frac{12}{7}p_3h - \frac{12}{7}p_4h + \frac{8}{7}p_5h, y_6 - \frac{3}{7}w_1h \\ + \frac{2}{7}w_2h + \frac{12}{7}w_3h - \frac{12}{7}w_4h + \frac{8}{7}w_5h \end{array} \right),$$

$$w_6 = V \left( \begin{array}{l} x_1 + h, y_1 - \frac{3}{7}k_1h + \frac{2}{7}k_2h + \frac{12}{7}k_3h - \frac{12}{7}k_4h + \frac{8}{7}k_5h, y_2 - \frac{3}{7}j_1h \\ + \frac{2}{7}j_2h + \frac{12}{7}j_3h - \frac{12}{7}j_4h + \frac{8}{7}j_5h, y_3 - \frac{3}{7}l_1h + \frac{2}{7}l_2h + \frac{12}{7}l_3h \\ - \frac{12}{7}l_4h + \frac{8}{7}l_5h, y_4 - \frac{3}{7}o_1h + \frac{2}{7}o_2h + \frac{12}{7}o_3h - \frac{12}{7}o_4h + \frac{8}{7}o_5h, \\ y_5 - \frac{3}{7}p_1h + \frac{2}{7}p_2h + \frac{12}{7}p_3h - \frac{12}{7}p_4h + \frac{8}{7}p_5h, y_6 - \frac{3}{7}w_1h \\ + \frac{2}{7}w_2h + \frac{12}{7}w_3h - \frac{12}{7}w_4h + \frac{8}{7}w_5h \end{array} \right).$$

## KEPUTUSAN

### PENGESAHAN PEMODELAN BIOMEKANIK

Persamaan dinamik songsang digunakan bagi membantu memperoleh data kinematik pada sudut anggaran semasa pergerakan aktiviti menyentuh bahu kontra lateral. Setiap

gerakan dijana pada 50 kerangka bagi mengkaji kesan menggunakan pendekatan dinamik songsang.

Pemodelan biomekanik bahagian pinggir atas badan telah dikemas kini dengan data kinematik yang diperoleh semasa uji kaji. Bagi menunjukkan bahawa pemodelan biomekanik yang dibangunkan boleh dipercayai dan praktikal, peratusan ralat relatif telah dihitung. Nilai anggaran sudut bahu dan siku dihasilkan menggunakan simulasi komputer menggunakan MATLAB dengan saiz langkah 0.02 menggunakan kaedah Runge-Kutta. Dengan variasi percubaan yang minimum, kaedah dinamik songsang telah membantu mengenal pasti kilasan bagi uji kaji dengan tepat. Jadual 2 dan 3 memaparkan nilai sudut uji kaji dan nilai sudut anggaran bagi bahu dan siku pada sepuluh kerangka semasa pergerakan subjek menyentuh bahu kontra lateral. Purata peratusan ralat relatif bagi sudut bahu adalah 0.038% dengan nilai minimum 0.007% dan nilai maksimum 0.061%. Manakala purata peratusan ralat relatif bagi sudut siku adalah 0.019% dengan nilai minimum 0.002% dan nilai maksimum 0.035%. Sudut uji kaji dan sudut anggaran menunjukkan perubahan dalam ketidaktepatan relatif, walaupun ia tidak begitu ketara. Proses pengesahan menggunakan kaedah Runge-Kutta turut diaplikasikan oleh Che-Nan et al. (2018) bagi aktiviti menggalas beg sekolah kanak-kanak yang berusia sembilan tahun. Che-Nan et al. (2018) menggunakan kaedah Runge-Kutta peringkat keempat kerana terdapat empat pemboleh ubah yang tidak diketahui dalam kajian mereka. Dalam kajian ini, enam pemboleh ubah yang tidak diketahui, maka kaedah Runge-Kutta peringkat kelima telah digunakan.

### ANALISIS KINETIK BAGI AKTIVITI KEHIDUPAN HARIAN

Kilasan terjadi apabila daya dikenakan pada sendi menyebabkan segmen bahagian badan berputar. Kilasan ini dinyatakan dalam unit Newton-meter (Nm). Ukuran kilasan digunakan untuk mengkaji daya yang dihasilkan oleh otot dan tendon pada sendi bahu, siku dan pergelangan tangan semasa melakukan pelbagai jenis pergerakan seperti menggenggam atau memanipulasi objek.

Penanda reflektif yang dilekatkan pada sendi bahagian badan yang terlibat digunakan bagi mengukur kilasan pada sendi bahu, siku dan pergelangan tangan. Daya yang terlibat seperti daya graviti, daya aktif teritlak dan daya inersia teritlak yang menghubungkan antara halaju linear separa dan halaju sudut separa dengan pusat jisim segmen yang terlibat. Nilai kilasan bagi ketiga-tiga sendi tersebut diperoleh dengan menggunakan data kinematik daripada uji kaji yang dimasukkan ke dalam rumus pemodelan biomekanik yang telah dibangunkan.

Nilai kilasan boleh menjadi putaran positif atau negatif untuk setiap segmen badan. Gambaran pergerakan fleksi ke hadapan, ekstensi, abduksi dan adduksi pada satah lateral bagi sendi bahu dan pergerakan fleksi dan ekstensi bagi sendi siku dan pergelangan tangan boleh dirujuk pada Rajah 4. Jadual 4 menunjukkan nilai purata dan sisihan

JADUAL 2. Anggaran peratusan ralat relatif antara nilai sudut uji kaji dan nilai sudut anggaran pada sendi bahu semasa aktiviti menyentuh bahu kontra lateral

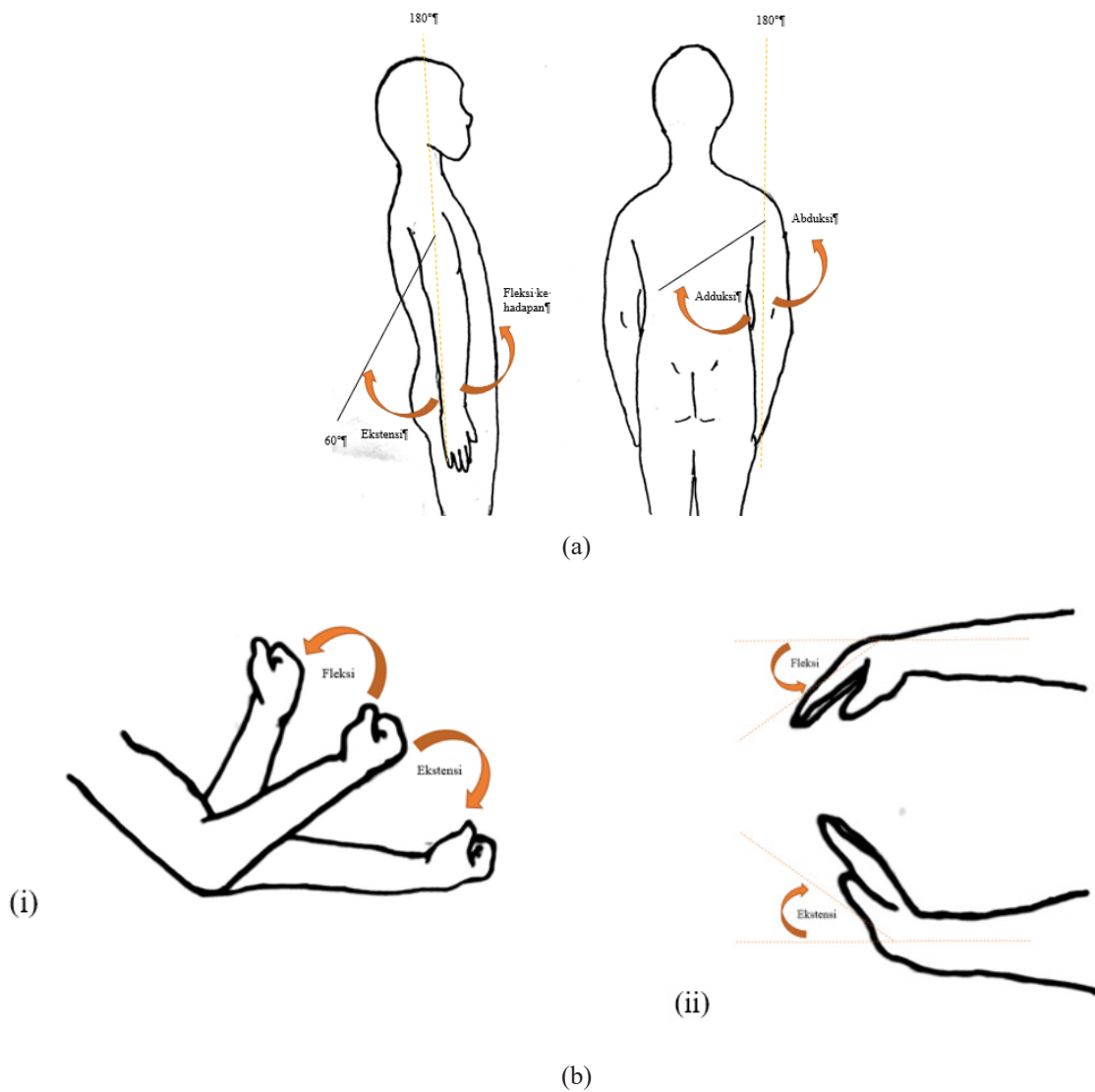
Kerangka	Nilai sudut anggaran (darjah) (r)	Nilai sudut uji kaji (darjah) (s)	Peratus ralat relatif
1	26.2019315	26.2	0.007372137
2	26.3127747	26.3	0.048573004
3	26.3023303	26.3	0.008860456
4	26.6069018	26.6	0.025946617
5	26.6069695	26.6	0.026201128
6	26.7143628	26.7	0.053793258
7	26.8112142	26.8	0.04184403
8	27.1156513	27.1	0.057753875
9	27.312573	27.3	0.046054945
10	27.6169246	27.6	0.061321014

JADUAL 3. Anggaran peratusan ralat relatif antara nilai sudut uji kaji dan nilai sudut anggaran pada sendi siku semasa aktiviti menyentuh bahu kontra lateral

Kerangka	Nilai sudut anggaran (darjah) (r)	Nilai sudut uji kaji (darjah) (s)	Peratus ralat relatif $\epsilon_r = \left  \frac{r-s}{s} \right  \times 100\%$
1	116.6974648	116.7	0.002172408
2	116.6932363	116.7	0.005795801
3	116.5926534	116.6	0.006300686
4	116.385999	116.4	0.012028351
5	116.1809458	116.2	0.016397762
6	115.8747131	115.9	0.02181786
7	115.4652799	115.5	0.030060693
8	114.9639683	115	0.031331913
9	114.2604995	114.3	0.034558618
10	113.5617512	113.6	0.033669718

JADUAL 4. Purata dan sisihan piawai bagi kilasan pada sendi bahu, siku dan pergelangan tangan fasa mencapai dan fasa kembali semasa aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut

Pembolehubah/ Kilasan (Nm)	Menyentuh bahu kontra lateral		Menyikat rambut		Menyentuh bahu kontra lateral	
	Mencapai suis		Mencapai suis		Mencapai suis	
	Fasa mencapai		Fasa kembali		Fasa kembali	
Purata $\pm$ sisihan piawai						
Bahu	9.56 $\pm$ 3.61	11.17 $\pm$ 3.41	7.79 $\pm$ 2.39	11.05 $\pm$ 2.62	11.78 $\pm$ 1.83	7.43 $\pm$ 3.24
Siku	-2.90 $\pm$ 0.35	-2.42 $\pm$ 1.21	-2.46 $\pm$ 0.98	-2.82 $\pm$ 0.38	-2.36 $\pm$ 1.25	-1.69 $\pm$ 1.33
Pergelangan Tangan	-0.38 $\pm$ 0.09	0.22 $\pm$ 0.21	-0.29 $\pm$ 1.01	-0.37 $\pm$ 0.13	0.26 $\pm$ 0.15	-0.23 $\pm$ 1.02



RAJAH 4. a) Pergerakan fleksi ke hadapan, ekstensi, abduksi dan adduksi pada sendi bahu dan b) Pergerakan fleksi dan ekstensi pada sendi (i) siku dan (ii) pergelangan tangan

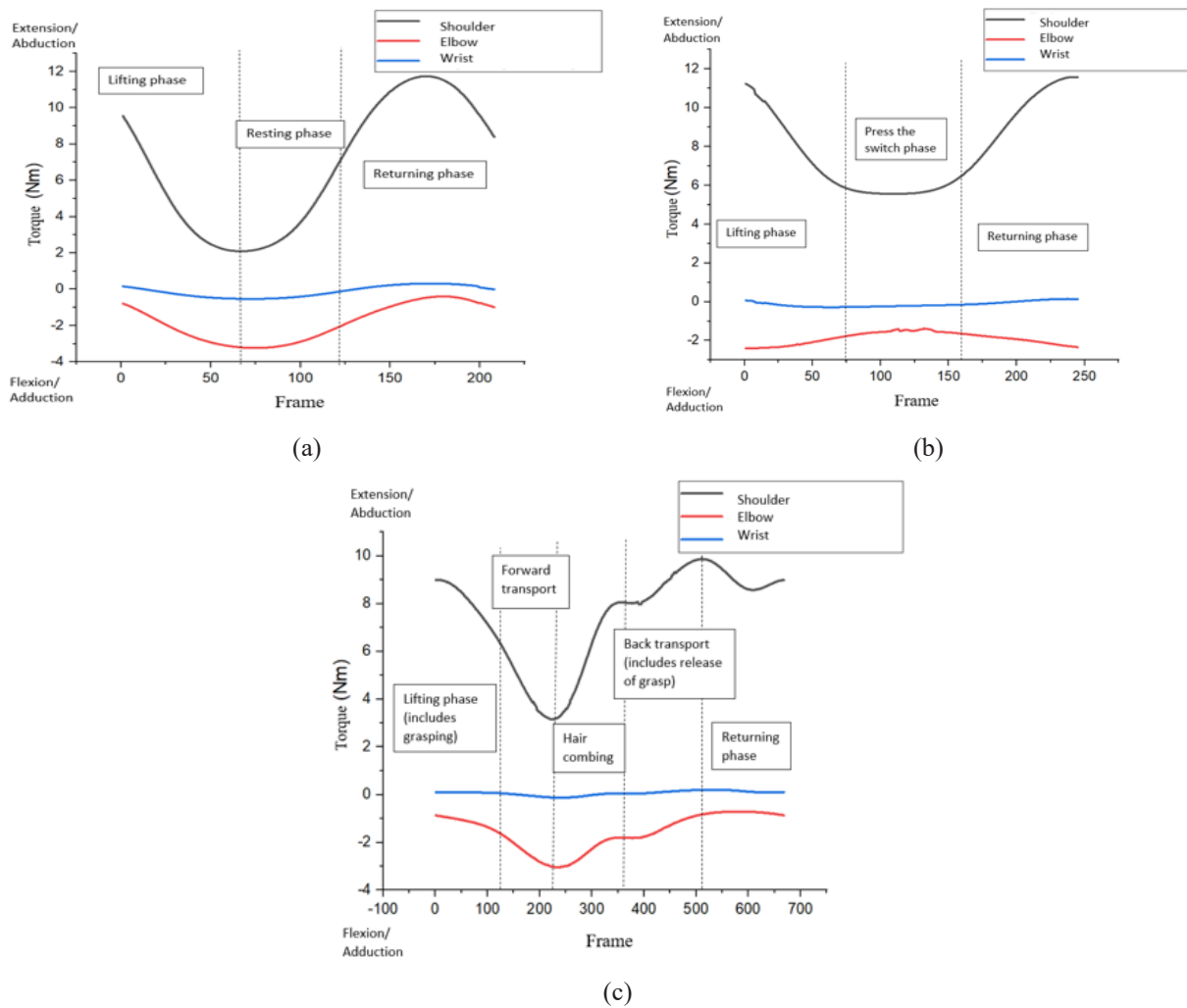
piawai bagi kilasan pada segmen sendi bahu, siku dan pergelangan tangan semasa melakukan aktiviti kehidupan seharian iaitu menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut. Nilai kilasan ini disahkan oleh Murray dan Johnson (2004) yang mendapati julat kilasan bagi pergerakan fleksi pada bahu adalah antara 5 Nm hingga 15 Nm serta Karner, Reichenfelser dan Gfoehler (2012) yang mendapati julat kilasan bagi pergerakan fleksi pada bahu adalah antara 2 Nm hingga 12 Nm semasa melakukan aktiviti yang melibatkan bahagian pinggir atas badan.

Data hanya tertumpu pada nilai kilasan semasa fasa mencapai dan fasa kembali ke kedudukan asal. Perbandingan nilai menggunakan ujian-t menunjukkan bahawa nilai  $p$  pada bahu, siku dan lengan adalah lebih

daripada 0.05 ( $p \geq 0.05$ ) dan dapat disimpulkan bahawa nilai kilasan pada setiap sendi semasa menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut tidak mempunyai perbezaan yang ketara.

Rajah 5 menunjukkan graf yang menggambarkan nilai kilasan bagi sendi bahu, siku dan pergelangan tangan semasa aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut. Berdasarkan graf, data dikumpul dari awal apabila subjek mula mencapai sama ada pada satah lateral atau satah sagittal sehingga subjek kembali ke kedudukan normal. Berdasarkan pemerhatian, graf (a-c) menunjukkan bahawa nilai kilasan antara aktiviti yang berbeza tidak menunjukkan perbezaan yang signifikan.

Walaupun graf kilasan sendi bagi bahu, siku dan pergelangan tangan mempunyai bentuk yang hampir sama,



RAJAH 5. Graf kilasan bagi bahu, siku dan pergelangan tangan bagi aktiviti (a) menyentuh bahu kontra lateral, (b) mencapai suis dan (c) menyikat rambut

tetapi nilai kilasan sendi untuk bahu adalah lebih besar berbanding nilai kilasan sendi bagi siku. Nilai kilasan bagi pergelangan tangan pula adalah yang paling minimum. Ini disebabkan sendi bahu berfungsi sebagai titik tumpuan, lengan pula berfungsi sebagai sistem tuas. Jarak dari bahu ke hujung jari tangan iaitu titik daya dikenakan semasa sesuatu pergerakan adalah lebih panjang daripada jarak dari siku dan pergelangan tangan ke titik tersebut. Lengan tuil yang lebih panjang pada bahu menghasilkan kilasan yang maksimum.

AKTIVITI MENYENTUH BAHU KONTRA LATERAL

Semasa aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, kilasan bahu melakukan adduksi sepanjang kitaran semasa fasa mencapai pada satah lateral dan mempunyai purata nilai kilasan maksimum 9.56 Nm. Seterusnya kilasan bahu

mencapai puncak minimum pada nilai 3.44 Nm semasa fasa pegun iaitu pada kerangka ke 70 sebelum melakukan ekstensi untuk memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Semasa memasuki fasa kembali ke kedudukan asal, kilasan bahu melakukan ekstensi sehingga mencapai puncak maksimum iaitu pada nilai 11.05 Nm pada kerangka ke 170 sebelum lengan berhenti pada kerangka ke 210.

Kilasan siku melakukan fleksi sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah lateral dan mempunyai purata nilai kilasan -2.9 Nm. Seperti kilasan bahu, kilasan siku juga mencapai puncak minimum semasa fasa pegun sebelum melakukan ekstensi untuk memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Semasa memasuki fasa kembali ke kedudukan asal, kilasan siku melakukan ekstensi sehingga mencapai puncak maksimum iaitu pada nilai -0.69 Nm pada kerangka ke 180 sebelum lengan berhenti pada kerangka ke 210.

Kilasan sendi pergelangan tangan melakukan fleksi sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah lateral dan purata nilai kilasan pergelangan tangan adalah  $-0.38$  Nm. Seperti kilasan bahu dan siku, kilasan bagi pergelangan tangan juga mencapai puncak minimum semasa fasa pegun sebelum melakukan ekstensi untuk memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Namun, nilai kilasan bagi pergelangan tangan ini tidak begitu besar disebabkan oleh jarak dari pergelangan tangan yang hampir dengan hujung jari. Semasa memasuki fasa kembali ke kedudukan asal, kilasan pergelangan tangan melakukan ekstensi sehingga mencapai puncak maksimum iaitu pada nilai  $-0.37$  Nm pada kerangka ke 175 sebelum lengan berhenti pada kerangka ke 210.

#### AKTIVITI MENCAPAI SUIS

Semasa aktiviti mencapai suis, kilasan bahu melakukan fleksi ke hadapan sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah sagital dan mempunyai purata nilai kilasan maksimum  $11.04$  Nm. Seterusnya kilasan bahu mencapai puncak minimum semasa fasa menekan suis sebelum melakukan ekstensi untuk memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Semasa memasuki fasa kembali ke kedudukan asal, kilasan bahu melakukan ekstensi sehingga mencapai puncak maksimum iaitu pada nilai  $11.67$  Nm.

Kilasan siku melakukan ekstensi sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah sagital dan mempunyai purata nilai kilasan  $-2.39$  Nm. Seperti kilasan bahu, kilasan siku juga mencapai puncak semasa fasa menekan suis sebelum memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Semasa memasuki fasa kembali ke kedudukan asal, kilasan siku melakukan fleksi sehingga mencapai nilai  $-2.32$  Nm.

Kilasan pergelangan tangan melakukan fleksi sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah sagital dan purata nilai kilasan pergelangan tangan adalah  $2.9$  Nm. Kilasan pergelangan tangan semasa memasuki fasa kembali ke kedudukan asal bergerak secara ekstensi dan mempunyai purata nilai kilasan  $-3.3$  Nm. Namun, nilai kilasan bagi pergelangan tangan ini tidak begitu besar disebabkan oleh jarak dari pergelangan tangan yang hampir dengan hujung jari. Semasa fasa menekan suis, pergerakan sudut jari tidak terlibat kerana aktiviti ini hanya memerlukan pergerakan menekan dengan hujung jari tanpa perubahan ketara pada sudut jari.

#### AKTIVITI MENYIKAT RAMBUT

Bagi aktiviti menyikat rambut, pergerakan tidak melibatkan sudut putaran pada paksi sagital kerana pergerakan bahu, siku dan pergelangan tangan lebih tertumpu kepada pergerakan fleksi dan ekstensi pada sendi siku dan pergelangan tangan serta pergerakan fleksi ke hadapan, ekstensi, abduksi dan adduksi pada sendi bahu. Pergerakan sudut jari juga tidak terlibat kerana kajian ini memfokuskan kepada tindakan melepaskan dan menggenggam sikat yang

memerlukan pergerakan semasa genggam tangan bukan pergerakan sudut jari secara individu.

Semasa aktiviti menyikat rambut, kilasan bahu melakukan abduksi sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah sagital termasuk menggenggam sikat dan mempunyai purata nilai kilasan  $6.65$  Nm. Nilai kilasan bahu berkurang daripada fasa mencapai pada satah sagital termasuk menggenggam sikat sehingga memasuki fasa mengangkat sikat menuju ke arah rambut dan mempunyai purata nilai kilasan  $4.86$  Nm. Seterusnya kilasan bahu mencapai puncak minimum pada nilai  $2$  Nm semasa fasa mengangkat sikat menuju ke arah rambut iaitu pada kerangka ke 190 sebelum melakukan adduksi untuk memasuki fasa menyikat rambut. Kilasan bahu berkurang semasa menghampiri fasa menyikat rambut. Kilasan bahu bertambah daripada fasa menyikat rambut ke fasa mengembalikan sikat ke atas meja sehingga mencapai nilai puncak maksimum pada nilai  $9$  Nm semasa fasa mengembalikan sikat ke atas meja iaitu pada kerangka ke 400 sebelum melakukan abduksi untuk memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Kilasan bahu berkurang daripada fasa mengembalikan sikat ke atas meja memasuki fasa kembali ke kedudukan asal.

Kilasan siku melakukan ekstensi sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah sagital termasuk menggenggam sikat dan mencapai nilai puncak pada kerangka ke 75 dengan purata nilai kilasan siku adalah  $-5.9$  Nm. Kilasan siku bertambah daripada fasa mencapai memasuki fasa menyikat rambut dan bergerak secara fleksi. Kilasan siku berkurang semasa memasuki fasa mengembalikan sikat ke atas meja dan bergerak secara ekstensi. Kilasan siku berkurang daripada fasa mengembalikan sikat ke atas meja memasuki fasa kembali ke kedudukan asal dan bergerak secara fleksi. Puncak maksimum adalah pada kerangka ke 400 dengan purata nilai kilasan siku adalah  $2.3$  Nm.

Kilasan pergelangan tangan melakukan fleksi sepanjang kitaran fasa mencapai pada satah sagital termasuk menggenggam sikat sehingga fasa mengangkat sikat menuju ke arah rambut dan purata nilai kilasan pergelangan tangan masing-masing adalah  $-0.29$  Nm dan  $-0.19$  Nm. Kilasan pergelangan tangan semasa memasuki fasa mengembalikan sikat ke atas meja dan fasa kembali ke kedudukan asal bergerak secara ekstensi dan mempunyai purata nilai kilasan pergelangan tangan masing-masing adalah  $-0.29$  Nm dan  $-0.23$  Nm. Nilai kilasan bagi pergelangan tangan ini tidak begitu besar disebabkan oleh jarak dari pergelangan tangan yang hampir dengan hujung jari.

#### PERBINCANGAN

Bagi aktiviti menyentuh bahu kontra lateral, semasa fasa mencapai pada satah lateral sendi bahu dalam keadaan adduksi iaitu otot menghasilkan daya kilasan yang menarik segmen lengan ke arah tengah badan. Sendi siku dan pergelangan tangan pula dalam keadaan fleksi bagi membolehkan lengan diangkat ke atas bahu kontra lateral.



Semasa proses ini, kilasan menurun iaitu putaran mengikut arah jam dan dalam proses menentang daya graviti. Kilasan pada awal fasa pegun semakin meningkat sehingga memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Semasa fasa kembali ke kedudukan asal, kilasan meningkat iaitu putaran melawan arah jam.

Bagi aktiviti mencapai suis, semasa fasa mencapai pada satah sagital sendi bahu dalam keadaan fleksi ke hadapan. Sendi siku pula dalam keadaan ekstensi manakala sendi pergelangan tangan dalam keadaan fleksi bagi membolehkan lengan diangkat ke hadapan dalam satah sagital. Semasa proses ini, kilasan bahu menurun iaitu putaran mengikut arah jam dan kilasan siku meningkat iaitu putaran melawan arah jam. Kilasan pada fasa menekan suis hampir mendatar dan bagi kilasan bahu semakin meningkat sehingga memasuki fasa kembali ke kedudukan asal. Nilai kilasan siku semakin menurun sehingga memasuki fasa kembali ke kedudukan asal.

Bagi aktiviti menyikat rambut, semasa fasa mencapai pada satah sagital termasuk menggenggam sikat, sendi bahu dalam keadaan fleksi ke hadapan manakala semasa fasa mengangkat sikat menuju ke arah rambut, sendi bahu dalam keadaan abduksi. Sendi siku pula dalam keadaan ekstensi manakala sendi pergelangan tangan dalam keadaan fleksi semasa fasa mencapai pada satah sagital termasuk menggenggam sikat bagi membolehkan lengan diangkat ke hadapan dalam satah sagital. Semasa fasa mencapai pada satah sagital ini, kilasan bahu dan siku menurun iaitu putaran mengikut arah jam. Semasa fasa kembali ke kedudukan asal, sendi bahu dalam keadaan ekstensi. Sendi siku berada dalam keadaan fleksi manakala sendi pergelangan tangan berada dalam keadaan ekstensi semasa fasa kembali ke kedudukan asal.

Kilasan pada sendi terjadi bagi menstabilkan segmen bahagian badan yang terlibat semasa pergerakan aktiviti dilakukan (Henley 2002). Selain itu, nilai kilasan yang maksimum menunjukkan perilaku subjek yang melakukan pergerakan dengan pantas bagi mengekalkan kestabilan (DeVita & Hortobagyi 2000). Kilasan maksimum terjadi semasa fasa mencapai pada satah lateral dan sagital dan semasa fasa kembali ke kedudukan asal sejurus sebelum lengan dan tapak tangan diletakkan pada peha ipsilateral iaitu sebelum lengan berhenti. Ini menunjukkan perilaku subjek yang melakukan gerakan pantas bagi mengekalkan kestabilan untuk mencapai posisi pegun di bahu kontra lateral dan sebelum lengan berhenti bergerak.

Nilai maksimum ini diperlukan untuk mendapatkan tenaga bagi mengayunkan bahagian bahu dan siku semasa tangan diturunkan untuk kembali ke kedudukan asal. Sendi bahu mempunyai pelbagai gerakan yang menyebabkan kilasan terjadi pada pelbagai arah dan sudut berbanding julat gerakan yang terhad pada siku dan pergelangan tangan. Kilasan yang maksimum pada sendi bahu menyebabkan sendi bahu lebih terdedah kepada kecederaan dan penggunaan yang berlebihan. Penggunaan teknik yang betul amat penting apabila melakukan aktiviti

yang melibatkan mengangkat atau memutar objek bagi menjaga sendi bahu.

Kajian mengenai kilasan kurang mendapat perhatian disebabkan oleh cabaran dan kerumitan yang menjadikannya kurang diterokai. Pengukuran yang rumit dan sangat kompleks untuk mendapatkan nilai kilasan semasa melakukan aktiviti pergerakan merupakan antara faktor utama. Kajian berkenaan kilasan juga memerlukan pemodelan biomekanik lanjutan untuk mendapatkan nilai kilasan dengan menggunakan dinamik songsang, iaitu satu proses yang menganggarkan daya dan kilasan pada sendi berdasarkan data pergerakan dan daya luaran. Bagi pembangunan pemodelan biomekanik ini, banyak faktor yang perlu diambil kira termasuk jisim segmen badan, sudut sendi dan pengagihan daya yang merentasi badan. Dalam mendalami nilai kilasan yang melibatkan mekanik pergerakan, cabaran teknikal amat ketara termasuk pembangunan pemodelan biomekanik lanjutan serta penggunaan peralatan yang mahal. Selain itu, kebanyakan penyelidik mengutamakan kajian berasaskan prestasi seperti kelajuan, kecekapan dan risiko kecederaan yang memfokuskan kepada julat pergerakan, halaju puncak dan koordinasi antara sendi. Pemboleh ubah kinematik lebih mudah diukur, biasanya menggunakan peralatan asas seperti sistem tangkapan gerakan atau analisis video untuk memahami pergerakan segmen badan manusia. Dalam terapi fizikal, sains sukan dan ergonomik, analisis kinematik mendapat lebih keutamaan kerana memberi cerapan yang berguna dengan tahap kerumitan teknikal yang lebih rendah. Penyelidik cenderung untuk mengutamakan analisis yang lebih mudah seperti kekuatan, ketahanan atau penyelarasan. Tambahan pula, analisis kinematik lebih mudah memberikan cerapan yang mencukupi untuk pelbagai aplikasi praktikal dalam tetapan klinikal dan prestasi sukan. Walau bagaimanapun, kajian berkenaan kilasan tetap penting dalam penyelidikan biomekanik lanjutan, terutamanya dalam memahami mekanisme kecederaan, mengoptimalkan pergerakan dan mereka bentuk peranti bantuan.

#### KESIMPULAN

Kajian ini telah memperkenalkan model biomekanik bagi pergerakan aktiviti kehidupan harian dengan menggunakan dinamik pergerakan. Analisis Runge-Kutta peringkat kelima telah digunakan untuk mengesahkan jadual pengumpulan data melalui pendekatan berangka. Bagi mencari peratusan ketidaktepatan ralat relatif, sudut uji kaji pada sendi bahu dan siku daripada aktiviti menyentuh bahu kontra lateral telah dipilih. Melalui pengiraan peratusan ralat relatif, didapati bahawa pemodelan biomekanik yang dihasilkan adalah sesuai dan boleh dipercayai untuk digunakan dalam penyelidikan ini kerana peratusan ralat relatif adalah agak rendah.

Kajian ini turut membandingkan nilai kilasan pada bahu, siku dan pergelangan tangan bagi tiga aktiviti

kehidupan harian yang dipilih, iaitu menyentuh bahu kontra lateral, mencapai suis dan menyikat rambut dalam kalangan subjek normal. Nilai kilasan yang diperoleh menunjukkan bahawa bahu, siku dan pergelangan tangan berfungsi secara mekanik dalam ketiga-tiga aktiviti kehidupan harian yang dipilih. Sebagai contoh, aktiviti menyentuh bahu kontra lateral menghasilkan kilasan yang lebih besar pada bahu berbanding semasa aktiviti menyikat rambut kerana sudut pergerakan yang lebih luas diperlukan. Secara keseluruhannya, nilai kilasan yang diperoleh memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang beban mekanikal yang dikenakan pada sendi-sendi semasa melakukan aktiviti kehidupan harian. Ini boleh mempengaruhi reka bentuk intervensi atau alat bantuan untuk meningkatkan fungsi fizikal dalam populasi normal.

Pemilihan subjek yang berbeza dari segi umur dan jantina dilakukan bagi mendapatkan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai variasi pergerakan dalam ketiga-tiga aktiviti. Perbezaan ini penting kerana faktor umur dan jantina boleh mempengaruhi kefleksibelan, kekuatan otot serta corak pergerakan. Namun, analisis menunjukkan bahawa tiada perbezaan yang signifikan dalam ketiga-tiga aktiviti yang dipilih, menjadikan faktor umur dan jantina tidak memberi kesan yang signifikan terhadap pergerakan dalam konteks kajian ini.

#### PENGHARGAAN

Kami ingin merakamkan penghargaan kepada semua kakitangan Kolej Poly-Tech MARA Bangi, Jabatan Sains Matematik, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia dan khususnya kepada semua subjek yang sudi menyertai kajian ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Reza Firdaus Mohd Zarin, Nurosielawati Mazlan dan Nor Atikah Abd Ghani atas sokongan dan bantuan sepanjang kajian ini dijalankan. Penyelidik berterima kasih kepada UKM atas geran dengan kod GUP-2017-112.

#### RUJUKAN

- Abdalla, F.S. & Rambely, A.S. 2014. Predicting the safe load on backpacker's arm using Lagrange multipliers method. *AIP Conference Proceedings* 1614(1): 948-954.
- Bloomer, C., Wang, S. & Kontson, K. 2020. Kinematic analysis of motor learning in upper limb body-powered bypass prosthesis training. *PLoS ONE* 15(1): e0226563.
- Chai, T., Li, A., Zhang, S., Li, Z. & Wang, Y. 2022. Lagrange motion analysis and view embeddings for improved gait recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. hlm. 20217-20226.
- Che-Nan, H. & Rambely, A.S. 2022. Kinematic analysis of daily activity of touching lateral shoulder for normal subjects. *Applied Sciences* 12(4): 2069.
- Che-Nan, H. & Rambely, A.S. 2017. Peak velocity of elbow joint during touching contra lateral shoulder activity for normal subject. *The 4<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Sciences*. hlm. 1-6.
- Che-Nan, H., Rambely, A.S., Ghani, N.A.B. & Abidin, S.B.Z. 2018. Optimization of lower extremity segment during backpack carriage. *Far East Journal of Mathematical Sciences* 106(2): 563-575.
- Cleather, D.J., Goodwin, J.E. & Bull, A.M.J. 2011. An optimization approach to inverse dynamics provides insight as to the function of the biarticular muscles during vertical jumping. *Annals of Biomedical Engineering* 39(1): 147-160.
- DeVita, P. & Hortobagyi, T. 2000. Age causes a redistribution of joint torques and powers during gait. *Journal of Applied Physiology* 88(5): 1804-1811.
- Flash, T. & Hogan, N. 1985. The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience* 5(7): 1688-1703.
- Fukuchi, C.A., Fukuchi, R.K. & Duarte, M. 2019. Effects of walking speed on gait biomechanics in healthy participants: A systematic review and meta-analysis. *Systematic Reviews* 8(1): 153.
- Fuller, J., Liu, L.J., Murphy, M.C. & Mann, R.W. 1997. A comparison of lower-extremity skeletal kinematics measured using skin- and pin-mounted markers. *Human Movement Science* 16(2-3): 219-242.
- Hall, L.C., Middlebrook, E.E. & Dickerson, C.R. 2011. Analysis of the influence of rotator cuff impingements on upper limb kinematics in an elderly population during activities of daily living. *Clinical Biomechanics* 26(6): 579-584.
- Hansen, C., Gosselin, F., Mansour, K.B., Devos, P. & Marin, F. 2018. Design-validation of a hand exoskeleton using musculoskeletal modeling. *Applied Ergonomics* 68: 283-288.
- Henley, J.D. 2002. A kinematic and kinetic analysis of postural perturbation. Tesis Dr. Fal, The Pennsylvania State University.
- Hossain, M.B., Hossain, M.J., Miah, M.M. & Alam, M.S. 2017. A comparative study on fourth order and Butcher's fifth order Runge-Kutta methods with third order initial value problem (IVP). *Applied and Computational Mathematics* 6(6): 243-253.
- Hussain, Z. & Azlan, N.Z. 2019. 3-D dynamic modeling and validation of human arm for torque determination during eating activity using Kane's method. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering* 44: 661-694.
- Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K.S., Graf, E. & O'Sullivan, L.W. 2018. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics* 70: 148-155.
- Karner, J., Reichenfelser, W. & Gfoehler, M. 2012. Kinematic and kinetic analysis of human motion as

- design input for an upper extremity bracing system. *Proceedings of the IASTED International Conference Biomedical Engineering*. hlm. 376-383.
- Lee, T.S. & Lin, Y.J. 1992. An investigation of numerical computations for inverse dynamics of robotic systems. *Proceedings IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. hlm. 1476-1480.
- Li, X., Sun, H., Liao, L. & Song, J. 2015. Simulation and comparison research of Lagrange and Kane dynamics modeling for the 4-dof modular industrial robot. *5<sup>th</sup> International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*. hlm. 251-254.
- Masjedi, M. & Duffell, L.D. 2013. Dynamic analysis of the upper limb during activities of daily living: Comparison of methodologies. *Journal of Engineering in Medicine* 227(12): 1275-1283.
- McGrath, M., Howard, D. & Baker, R. 2017. A Lagrange-based generalised formulation for the equations of motion of simple walking models. *Journal of Biomechanics* 55: 139-143.
- Mesquita, I.A., Fonseca, P.F.P., Borgonovo-Santos, M., Ribeiro, E., Pinheiro, A.R.V., Correia, M.V. & Silva, C. 2020. Comparison of upper limb kinematics in two activities of daily living with different handling requirements. *Human Movement Science*, 72: 102632.
- Molina-Garcia, P., Migueles, J.H., Cadenas-Sanchez, C., Esteban-Cornejo, I., Mora-Gonzalez, J., Rodriguez-Ayllon, M., Plaza-Florido, A., Vanrenterghem, J. & Ortega, F.B. 2019. A systematic review on biomechanical characteristics of walking in children and adolescents with overweight/obesity: Possible implications for the development of musculoskeletal disorders. *Obesity Reviews* 20(7): 1033-1044.
- Murray, I.A. & Johnson, G.R. 2004. A study of the external forces and moments at the shoulder and elbow while performing every day tasks. *Clinical Biomechanics* 19(6): 586-594.
- Nester, C., Jones, R.K., Liu, A., Howard, D., Lundberg, A., Arndt, A., Lundgren, P., Stacoff, A. & Wolf, P. 2007. Foot kinematics during walking measured using bone and surface mounted markers. *Journal of Biomechanics* 40(15): 3412-3423.
- Pennestri, E., Stefanelli, R., Valentini, P.P. & Vita, L. 2007. Virtual musculo-skeletal model for the biomechanical analysis of the upper limb. *Journal of Biomechanics* 40(6): 1350-1361.
- Pol, F., Baharlouei, H., Taheri, A., Menz, H.B. & Forghany, S. 2021. Foot and ankle biomechanics during walking in older adults: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Gait and Posture* 89: 14-24.
- Purushotham, A. 2013. Kane's method for robotic arm dynamics: A novel approach. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 6: 7-13.
- Rambely, A.S. & Fazrolrozi. 2012. A six-link kinematic chain model of human body using Kane's method. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. hlm. 59-67.
- Rehbinder, H. & Martin, C. 2001. A control theoretic model of the forearm. *Journal of Biomechanics* 34(6): 741-748.
- Ren, L., Jones, R.K. & Howard, D. 2005. Dynamic analysis of load carriage biomechanics during level walking. *Journal of Biomechanics* 38(4): 853-863.
- Reyes-Guzmán, A.D.L., Gil-Agudo, A., Penasco-Martin, B., Solis-Mozos, M., Ama-Espinosa, A.D. & Perez-Rizo, E. 2010. Kinematic analysis of the daily activity of drinking from a glass in a population with cervical spinal cord injury. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 7(41): 1-12.

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: asr@ukm.edu.my