

KARAKTERISTIK LENDUTAN RAKET TENIS AKIBAT KONTAK DENGAN BOLA

Gatut Rubiono¹, Anas Mukhtar²

^{1,2}Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Banyuwangi

Email: g.rubiono@unibabwi.ac.id

ABSTRACT

The contact between ball and tennis racket is a collision phenomenon. The ball exerts a force on the racket which causes deflection. This study aims to obtain the deflection characteristics of a tennis racket due to ball contact. The research was conducted by experiment with Kinetic brand rackets. The racket is clamps on the grip. The ball used is Nassau brand with 0.058 kg of mass. Free fall is arranged 1, 2 and 3 meters heights, with 3 hitting points on racket string. The deflection measurement uses the pen method at 5 points on racket frame. Five points are arranged sequentially from the grip with 6 cm distance. Data collection was carried out with 3 repetitions to get average value. The deflection was measured using a caliper with 0.01 mm accuracy. The results show that the deflection has a linear characteristic and depends on the momentum of the ball.

Keywords: Ball, Collision, Deflection, Racket, Tennis

ABSTRAK

Kontak antara bola dengan raket tenis adalah fenomena tumbukan benda. Bola memberikan gaya pada raket yang menyebabkan defleksi atau lendutan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik lendutan raket tenis akibat kontak dengan bola. Penelitian dilakukan dengan eksperimen menggunakan raket merk Kinetik. Raket ditumpu jepit di bagian pegangan. Bola yang digunakan adalah merk Nassau dengan massa 0,058 kg. Bola dikondisikan jatuh bebas dengan tinggi jatuh divariasikan sebesar 1, 2 dan 3 meter, dengan 3 titik jatuh di bidang senar raket. Pengukuran lendutan menggunakan metode pena yang diposisikan di 5 titik pengukuran di rangka raket. Lima titik diatur berurutan dari pegangan raket dengan jarak antara 6 cm. Pengambilan data dilakukan dengan 3 kali ulangan untuk mendapatkan nilai rata-rata. Pengukuran defleksi dilakukan menggunakan jangka sorong dengan tingkat ketelitian 0,01 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lendutan memiliki karakteristik yang linier dan tergantung pada momentum bola.

Kata kunci: Bola, Tumbukan, Lendutan, Raket, Tenis

Diterima Redaksi: 28-11-2021 | Selesai Revisi: 17-02-2022 | Diterbitkan Online: 28-02-2022

1. Pendahuluan

Tenis lapangan memiliki sejarah yang panjang sejak aturan pertama ditetapkan pada tahun 1873 [1] dan telah mengalami banyak inovasi dalam bentuk maupun materialnya [2]. Tennis lapangan merupakan salah satu olahraga paling populer di seluruh dunia [3,4] dan banyak digemari oleh kalangan masyarakat menengah ke atas. Permainan tenis lapangan dapat dilakukan dan dinikmati oleh berbagai usia dan jenis kelamin [4]. Sebagai tambahan perbaikan teknik-teknik atlet dilakukan. Demikian pula

pengembangan yang berkelanjutan pada aspek peralatan. Tennis lapangan terutama melibatkan benturan antara bola dan raket [3]. Selaras dengan pengembangan metode latihan, kompetisi tenis modern telah menjadi pertandingan yang menuntut kemampuan komprehensif dengan kecepatan lebih cepat, sudut lebih besar, lebih banyak rotasi dan kekuatan yang lebih tinggi. Seorang pemain tenis profesional dapat melakukan servis dengan kecepatan bola yang luar biasa melalui gerakan lengan seperti bentuk busur [1].

Banyak faktor yang mempengaruhi performa mekanika dan perpindahan tegangan pada ekstremitas atas seorang pemain tenis. Variasi desain rangka, bahan, tegangan senar, kekakuan bola, lokasi benturan, dan teknik pemain adalah beberapa variabel potensial yang dapat menghasilkan peningkatan atau penurunan transfer tegangan yang signifikan dan getaran dari raket ke pemain [5]. Pemain tenis sering merujuk ke suatu titik atau area dalam raket yang disebut titik manis atau *sweet spot*. *Sweet spot* adalah titik dimana ketika bola mengenai titik atau area itu, getaran minimal akan ditransmisikan ke tangan dan lengan pemain. Sebagai konsekuensinya, pemain hampir tidak menyadari bahwa dampak telah terjadi [6].

Kontak atau benturan antara bola dan raket tenis menyebabkan perpindahan gaya akibat gerak dan berat bola ke raket melalui senar. Gaya ini menjadi lendutan dan getaran raket yang akan ditransmisikan ke lengan pemain. Getaran lokal tidak langsung yang mengenai otot lengan depan menentukan respons otot saraf akut dalam kaitannya dengan tingkat keterampilan atlet [7]. Kontak yang terlalu lama dengan getaran yang ditransmisikan ke tangan dikaitkan dengan peningkatan gejala dan tanda-tanda gangguan pada sistem vaskular, neurologis, dan osteoartikuler tungkai atas. Perubahan kulit dan kuku, baik karena kompresi atau kerusakan saraf pusat atau perifer, juga diketahui dengan baik, dan dilaporkan dalam kondisi destruktif lainnya seperti trauma, penyakit pembuluh darah perifer, fenomena Raynaud, radio terapi, dan *osteoarthritis interphalangeal primer* pada tangan [8].

Dampak berulang dan penggunaan berlebihan ekstremitas atas dalam olahraga raket dapat meningkatkan risiko jaringan kelelahan dan cedera, menyebabkan radang pada tendon dan jaringan lunak di pergelangan tangan, siku, dan bahu [5]. *Epicondylitis lateral* adalah nyeri siku yang paling umum dan terjadi pada individu paruh baya. Dari studi epidemiologi, *epicondylitis* paling sering menimpa individu menengah usia antara 35 sampai 60 tahun. Hal ini terjadi 4 hingga 5 kali lebih sering pada pria daripada wanita dan lebih umum di lengan dominan [9].

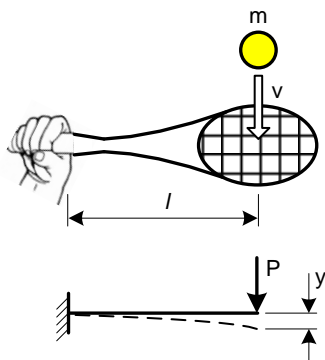
Epicondylitis lateral juga disebut siku tenis (*tennis elbow*) karena berkaitan dengan nyeri siku arah lateral karena tenis lapangan. Meskipun siku tenis merupakan masalah akut bagi banyak pemain di seluruh dunia, tambahan cedera ekstremitas atas, seperti pergelangan tangan dan ketegangan bahu, juga mempengaruhi pemain. Cedera ekstremitas atas dianggap berasal dari transfer dampak besar beban impak secara berulang-ulang, ke pemain melalui kontak dengan raket di bagian yang disebut pegangan tenis [10].

Penelitian perilaku raket tenis dengan bola telah dilakukan antara lain analisis balok fleksibel yang merujuk pada efek ketegangan tali dan kekakuan rangka pada kinerja raket [11]. Penelitian lain adalah analisis mekanis raket dan bola tenis selama tumbukan berdasarkan metode elemen hingga [1], analisis getaran senar [12], pengukuran respon senar raket [13], pemodelan getaran dan penekanan [6], faktor penyebab getaran [14], getaran dan transmisi gelombang kejut ke pergelangan tangan [15], impak, tegangan senar dan getaran raket berbahan komposit nano [16], perilaku dinamik raket dalam beberapa situasi pertandingan [17], pengaruh ketegangan raket terhadap gaya pada siku lengan [18], efek pegangan (*grip*) terhadap perilaku dinamik raket [19], dan getaran raket saat pukulan *forehand* [20].

Banyak olahraga profesional sangat kompetitif di mana jutaan dolar bergantung pada reaksi dalam variasi sepersepuluh detik atau satu sentimeter. Untuk memberikan pemain dengan ketepatan ini, peralatan yang digunakan harus bereaksi sesuai dengan naluri pemain tanpa menyebabkan ketidaknyamanan. Teknologi peredaman getaran memainkan peran utama dalam permasalahan ini [21]. Penelitian peredaman getaran raket tenis antara lain telah dilakukan untuk peredaman di pegangan dan efeknya terhadap perilaku raket [10], faktor desain raket untuk mengurangi tegangan kerja dan memperbaiki peredaman [5], teknologi peredaman getaran [22] dan peredam berbentuk kancing untuk mengurangi gaya impak saat menerima bola servis lurus [23].

Benturan bola dengan raket tenis merupakan fenomena mekanika tumbukan benda dimana sebuah bola dengan massa m bergerak dengan

kecepatan v mengenai bagian raket sejarak l dari pegangan (*grip*). Bola akan memberikan gaya tekan dalam bentuk impak terhadap senar raket yang akan ditransmisikan ke rangka. Transmisi gaya ini akan menyebabkan perubahan posisi raket sebagai akibat gaya dalam bentuk tekanan. Perubahan posisi ini merupakan fenomena lendutan dimana pada titik gaya yang bekerja mengalami lendutan sebesar y . Pemodelan fenomena ini dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini:

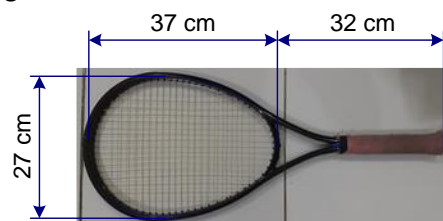


Gambar 1. Pemodelan tumbukan bola dan raket tenis

Kecepatan bola tenis tertinggi saat servis sebesar 263 km/jam atau 163,4 mph [24]. Ketika bola dengan kecepatan tertentu mengenai raket maka raket akan menerima beban impak. Beban ini akan mengakibatkan getaran yang diindikasikan dengan terjadinya lendutan atau defleksi raket. Karakteristik lendutan suatu bahan atau peralatan merupakan bagian penting dari aspek desain. Analisis defleksi sangat penting dilakukan pada material guna untuk mengetahui kelenturan benda uji ketika mengalami suatu pembebanan, karena defleksi/kelenturan merupakan salah satu faktor penting dalam suatu perancangan [25]. Defleksi yang terjadi pada elemen-elemen yang mengalami pembebanan harus pada suatu batas yang diijinkan, karena jika melewati batas maka akan terjadi kerusakan pada elemen-elemen tersebut ataupun pada elemen-elemen lainnya [26]. Karakteristik ini menjadi acuan bagi pemilihan bahan dan proses pembuatan suatu peralatan. Untuk itu diperlukan studi karakteristik lendutan raket tenis akibat kontak dengan bola.

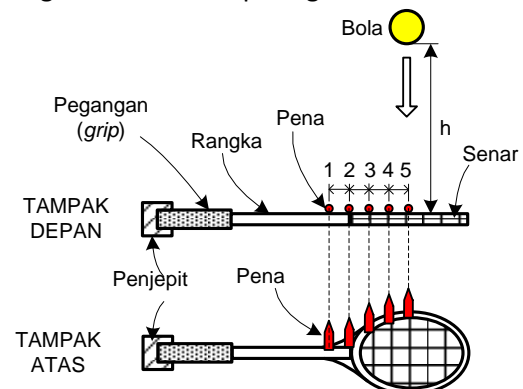
2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimen. Raket yang digunakan menyesuaikan dengan regulasi *International Table Tennis Federation* (ITTF) dimana bingkai raket harus tidak melebihi 73,7 cm (29,0 inci) panjang keseluruhan, termasuk gagang. Kerangka raket tidak boleh melebihi lebar keseluruhan 31,7 cm (12,5 inci). Permukaan memukul harus tidak melebihi 39,4 cm (15,5 inci) untuk panjang keseluruhan, dan lebar keseluruhan 29,2 cm (11,5 inci) [27]. Raket yang digunakan merk Kinetik dengan dimensi sebagai berikut:

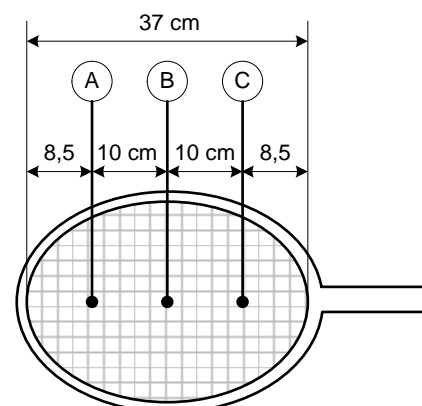


Gambar 2. Foto dan dimensi raket

Eksperimen dilakukan dengan skema pengambilan data seperti gambar 3 berikut.



Gambar 3. Skema pengambilan data



Gambar 4. Skema 3 titik jatuh bola

Raket tenis dijepit di bagian ujung pegangan. Ketegangan senar raket dikondisikan sebesar 60 lbs. Bola yang digunakan merk Nassau dengan berat 58 gram (0,058 kg). Bola dijatuhkan dari ketinggian 1, 2 dan 3 meter, dengan titik jatuh di 3 titik sesuai gambar 4 dengan titik B adalah titik perpotongan sumbu senar raket. Tinggi jatuh ini divariasikan untuk mendapatkan variasi kecepatan bola. Bola tenis yang dijatuhkan tanpa kecepatan awal adalah fenomena gerak jatuh bebas dimana kecepatan dihitung dengan persamaan [28]:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

Dimana:

g = konstanta gravitasi (9,81 m/dt²)

h = tinggi jatuh (m)

Momentum sebuah benda merupakan hasil kali massa benda dan kecepatannya. Momentum merupakan besaran energi yang dihitung menggunakan persamaan [29]:

$$P = m \cdot v \quad (2)$$

Dimana:

m = massa benda (kg)

P = momentum (kg m/dt = N dt)

v = kecepatan benda (m/dt)

Lima buah pena diposisikan di bagian-bagian raket yang akan mencatat pergeseran lendutan di selembar kertas. Kelima titik ini secara berurutan dari pegangan raket adalah titik pengukuran 1, 2, 3, 4 dan 5. Jarak antar pena dikondisikan sebesar 6 cm. Lendutan berupa pergeseran rangka raket ini diukur menggunakan jangka sorong yang memiliki ketelitian 0,01 mm. Pengambilan data dilakukan dengan tiga kali ulangan untuk mendapatkan nilai rata-rata dan ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan momentum dan lendutan.

3. Hasil dan Pembahasan

Momentum Bola

Bola dengan massa 0,058 kg yang dijatuhkan dari 1 meter akan memiliki kecepatan sesuai persamaan (1) sebagai berikut:

$$v = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1} \\ = 4,43 \text{ m/dt}$$

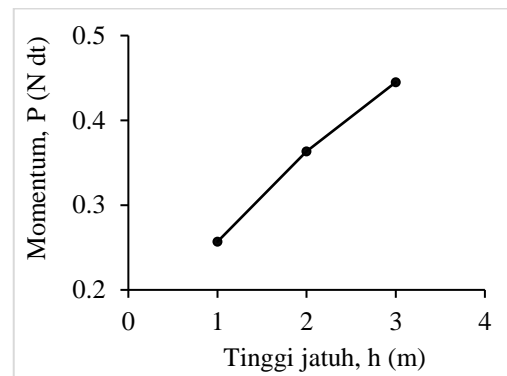
Momentum bola sesuai persamaan (2):

$$P = 0,058 \cdot 4,43 \\ = 0,26 \text{ kg m/dt} = 0,26 \text{ N dt}$$

Dengan cara yang sama didapat hasil perhitungan sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Perhitungan Momentum Bola

h (m)	g (m/dt ²)	v (m/dt)	m _{bola} (kg)	P (N dt)
1	9.81	4.43	0.058	0.26
2	9.81	6.26	0.058	0.36
3	9.81	7.67	0.058	0.44



Gambar 5. Grafik momentum bola

Grafik pada gambar 1 menunjukkan bahwa semakin besar tinggi jatuh maka momentum bola juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan (2) dimana momentum merupakan fungsi kecepatan. Sedangkan kecepatan berdasarkan persamaan (1) merupakan fungsi tinggi jatuh. Hubungan antara momentum dan kecepatan adalah linier sesuai orde persamaannya. Besaran massa bola dan konstanta gravitasi adalah tetap atau tidak berubah sehingga perubahan tinggi jatuh akan merubah besaran momentumnya. Hasil ini menunjukkan kesesuaian hasil pengolahan data dengan fenomena fisik yang terjadi dalam penelitian ini.

Lendutan Raket

Pengambilan data dengan tiga kali ulangan diolah untuk mendapatkan nilai rata-rata lendutan. Hasil perhitungan ditampilkan dalam tabel 2, 3 dan 4. Lendutan yang terjadi mengarah ke bawah karena gaya dalam bentuk tumbukan adalah gerak jatuh bebas arah vertikal karena faktor gravitasi dan massa bola. Arah ke bawah dalam sistem koordinat yang umumnya dinotasikan sebagai sumbu y atau sumbu ordinat memiliki nilai negatip (-). Maka data lendutan seperti ini dituliskan dalam besaran negatip.

Tabel 2. Lendutan Rata-rata (mm) dengan Titik Jatuh A

P (N dt)	A1	A2	A3	A4	A5
0.26	-1.23	-1.35	-1.36	-1.50	-1.54
0.36	-1.28	-1.44	-1.54	-1.64	-1.86
0.44	-1.49	-1.59	-1.78	-1.89	-2.06

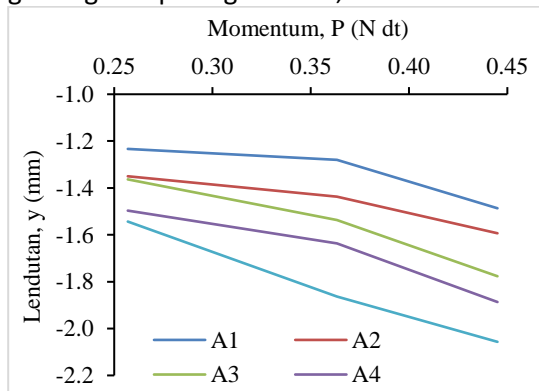
Tabel 3. Lendutan Rata-rata (mm) dengan Titik Jatuh B

P (N dt)	B1	B2	B3	B4	B5
0.26	-1.03	-1.12	-1.22	-1.30	-1.41
0.36	-1.18	-1.27	-1.39	-1.41	-1.54
0.44	-1.31	-1.44	-1.51	-1.63	-1.80

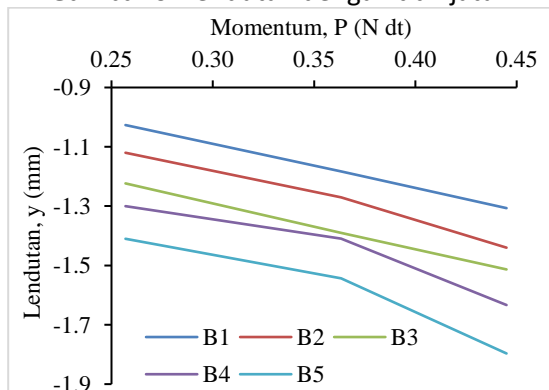
Tabel 4. Lendutan Rata-rata (mm) dengan Titik Jatuh C

P (N dt)	C1	C2	C3	C4	C5
0.26	-0.86	-1.02	-1.07	-1.16	-1.29
0.36	-1.09	-1.23	-1.28	-1.33	-1.49
0.44	-1.21	-1.32	-1.43	-1.54	-1.66

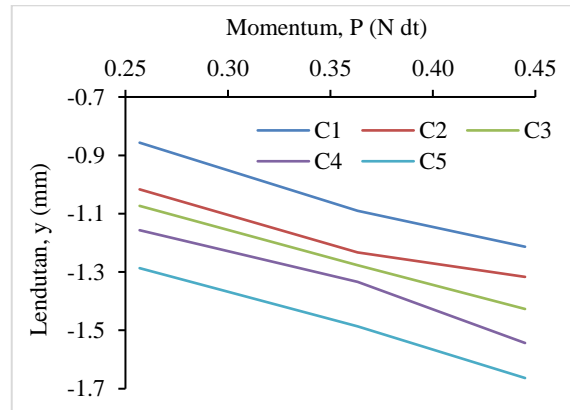
Notasi huruf A, B dan C di tabel 2, 3 dan 4 menunjukkan titik jatuh bola di senar raket sesuai skema di gambar 4. Sedangkan angka 1 sampai 5 menunjukkan titik pengukuran lendutan sesuai skema di gambar 3. Data di tabel II, III dan IV ditampilkan dalam bentuk grafik-grafik pada gambar 6, 7 dan 8 berikut ini.



Gambar 6. Lendutan dengan titik jatuh A



Gambar 7. Lendutan dengan titik jatuh B



Gambar 8. Lendutan dengan titik jatuh C

Grafik di gambar 6, 7 dan 8 menunjukkan pola lendutan yang sama untuk setiap variasi titik jatuh. Semakin besar momentum bola maka lendutan juga semakin besar. Titik jatuh A, B dan C secara berurutan menunjukkan jarak terjauh dari titik tumpuan di pegangan raket. Semakin jauh jarak titik jatuh bola terhadap tumpuan, lendutan cenderung semakin besar. Lendutan raket dengan titik jatuh bola di A lebih besar dibanding lendutan dengan titik jatuh di B dan selanjutnya di C.

Grafik-grafik tersebut juga menunjukkan bahwa lendutan di titik-titik pengukuran juga menunjukkan pola yang sama. Titik 1 sampai titik 5 menunjukkan jarak yang semakin jauh dengan titik tumpuan raket. Semakin jauh titik pengukuran dari titik tumpuan, lendutan juga semakin besar. Lendutan rata-rata di titik 5 lebih besar dibanding lendutan di titik 4, titik 4 lebih besar daripada titik 3 dan seterusnya.

PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa semakin besar momentum bola maka lendutan juga semakin besar. Momentum merupakan gaya yang bekerja sebagai fungsi massa bola dan kecepatannya. Kecepatan dipengaruhi tinggi jatuh. Momentum yang semakin besar memberikan gaya tumbukan yang lebih besar. Tumbukan mengakibatkan perpindahan pada rangka raket yang dikenai gaya sehingga lendutan yang dihasilkan juga semakin besar pula.

Selain itu, semakin jauh jarak titik jatuh bola terhadap tumpuan, lendutan cenderung semakin besar. Titik jatuh bola merupakan titik dimana gaya berat jatuh bola bekerja, sesuai

pemodelan tumbukan di gambar 1. Gaya yang bekerja adalah gaya momen yang dihasilkan dari momentum bola. Gaya ini bekerja di ujung bebas yang seolah akan memutar rangka raket dengan tumpuan sebagai pusat putarnya. Momen merupakan hasil kali gaya dengan jarak terhadap arah tegak lurus gaya yang bekerja ke titik tumpuan atau panjang lengan. Semakin besar jarak ke tumpuan maka momen juga akan semakin besar. Besarnya gaya ini mengakibatkan perpindahan rangka raket juga semakin besar.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa semakin jauh jarak titik pengukuran terhadap tumpuan, lendutan juga semakin besar. Tumpuan jepit merupakan tumpuan dimana tidak terjadi defleksi atau lendutan. Semakin jauh jarak titik pengukuran maka titik tersebut merupakan titik yang relatif bebas, dapat terjadi perpindahan jika ada gaya yang mengenainya. Titik yang dekat dengan tumpuan memiliki tahanan yang lebih besar terhadap gaya yang bekerja.

Jika menganggap raket adalah sebuah batang sesuai pemodelan, titik yang terjauh dari tumpuan merupakan bagian ujung yang bebas. Titik ujung ini mendapatkan beban gaya atau tekanan maksimal. Titik-titik yang lain juga mengalami perpindahan dimana besar perpindahan tergantung pada posisi atau jarak terhadap tumpuan. Besar perpindahan atau lendutan ini berkurang secara gradual seiring semakin dekatnya jarak ke tumpuan. Pola besaran perpindahan ini semakin mengecil dan menjadi nol di titik tumpuan.

Garis-garis grafik di gambar 6, 7 dan 8 menunjukkan pola atau bentuk lendutan yang terjadi. Pada saat raket tidak mendapatkan beban tumbukan bola maka raket dianggap sebagai batang datar sehingga jika ditampilkan dalam bentuk garis di grafik akan menjadi sebuah garis horisontal yang sejajar dengan sumbu X. Tumbukan bola menyebabkan perpindahan di titik-titik pengukuran lendutan sehingga garis horisontal berubah seperti terlihat di grafik-grafik tersebut. Hal ini juga sesuai dengan pola lendutan sesuai pemodelan tumbukan yang ada di gambar 1.

Lendutan raket yang terjadi menunjukkan pola hubungan secara linier. Lendutan dalam

penelitian ini tergantung pada tinggi jatuh bola, titik jatuh dan titik pengukuran. Secara umum, karakteristik lendutan raket akibat tumbukan dengan bola merupakan fungsi jarak terhadap titik tumpuan yaitu pegangan raket. Semakin jauh jarak ke titik tumpuan maka lendutan akan cenderung semakin besar pula.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar jarak titik jatuh dan titik pengukuran maka lendutan cenderung semakin besar. Lendutan raket merupakan fungsi linier jarak terhadap titik tumpuan. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan memberikan kecepatan awal gerak atau sudut jatuh bola.

Daftar Pustaka

- [1] Jiude L. 2014. Mechanical Analysis of Tennis Racket and Ball During Impact Based on Finite Element Method, *BTAJ* 10(24), 15431-15434
- [2] Allen T., Grant R., Sullivan M., Taraborrelli L., Choppin S. Spurr J., and Haake, S. 2018. Recommendations for Measuring Tennis Racket Parameters, *Proceedings* 2(263), doi:10.3390/proceedings2060263
- [3] Hsu Y-C., and Cheng K. B. 2016. Effect of Attaching String Dampers on Vibration Characteristics of a Tennis Racket, *Proceeding of 34th International Conference on Biomechanics in Sport*, Tsukuba Japan, pp. 407-410
- [4] Arifin Z., Soegiyanto, dan Nugroho P. 2012. Pengaruh Variasi Latihan Forehand Drive Terhadap Kemampuan Melakukan Forehand Drive Tenis Lapangan Bagi Petenis Pemula, *Journal of Sport Sciences and Fitness* 1(2), pp 32-40
- [5] Ferrara L., and Cohen A. 2013. A Mechanical Study on Tennis Racquets to Investigate Design Factors that Contribute to Reduced Stress and Improved Vibrational Dampening, *Procedia Engineering* vol. 60, pp. 397-402. doi: 10.1016/j.proeng.2013.07.015
- [6] Buechler M. A., Espino L. A., Thompson G. A., and Shinn R. 2015. Vibration Modeling and Suppression in Tennis Racquets, <https://www.researchgate.net/publication/268253872>
- [7] Padulo J., Di Giminiani R., Dellolacono A., Zagatto, A. M., Migliaccio, G. M., Gargantov, Z. and Ardigo L. P. 2016. Lower Arm Muscle

- Activation During Indirect-Localized Vibration: the Influence of Skill Levels when Applying Different Acceleration Loads, *Frontiers in Physiology* 7(242), pp. 1-8. doi: 10.3389/fphys.2016.00242
- [8] Ilhanli I., Cengiz K., Durmaz Y., Arslan E., and Celik C. 2016. Hand Arm Vibration Syndrome: a Brief Case-based Review of the Literature, *Journal of Science* 6(1), pp. 5-10
- [9] Cohen M. S., and Romeo A. A. 2001. Lateral Epicondylitis: Open and Arthroscopic Treatment, *Journal of the American Society for Surgery of the Hand* 1(3), pp. 172-176 doi:10.1053/jssh.2001.26179
- [10] Savage N. J. 2006. Vibration Absorption in the Tennis Grip and the Effects on Racquet Dynamics, *a Dissertation, Doctor of Philosophy, School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering*, RMIT University
- [11] Cross R. 2000. Flexible Beam Analysis of the Effects of String Tension and Frame Stiffness on Racket Performance, *Sports Engineering* vol. 3, pp. 111-122. Blackwell Science Ltd
- [12] Blackburne J. 2014. Vibrations Analysis on Tennis Racket String, *The Journal of Undergraduate Research* 12(9), pp. 99-113. <http://openprairie.sdstate.edu/jur/vol12/iss1/9>
- [13] Valentine R. 2018. Tennis String-bed Response Measurement, *Proceeding of TMCE 2018*, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 7-11 May 2018: pp. 615-624
- [14] Cross R. 2015. Factors Affecting the Vibration of Tennis Racquets, *Sports Engineering*, September 2015, pp. 1-24, doi: 10.1007/s12283-015-0173-7
- [15] Rogowski I., Creveaux T., Triquigneaux S., Macé P., Gauthier F., and Sevrez S. 2015. Tennis Racket Vibrations and Shock Transmission to the Wrist During Forehand Drive, *PLoS One* 10(7), e0132925. doi:10.1371/journal.pone.0132925
- [16] Chidambaram P. K., and Ramakrishnan R. 2014 Impact, String Tension and Vibration Analysis of Nanocomposite Based Tennis Racket Frame, *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*, 2(2B), pp. 206-211
- [17] Banwell G. H., Roberts J. R., Halkon B. J., and Rothberg S. J. 2014. Understanding the Dynamic Behaviour of a Tennis Racket Under Play Conditions, *Exp Mech* vol. 54, pp. 527-537. <http://dx.doi.org/10.1007/s11340-013-9803-9>
- [18] Mohandhas B. R., Makaram N., Drew T. S., Wang W., Arnold G. P., and Abboud R. J. 2016. Racquet String Tension Directly Affects Force Experienced at the Elbow: Implications for the Development of Lateral Epicondylitis in Tennis Players, *Shoulder & Elbow* 8(3), pp. 184-191. DOI: 10.1177/1758573216640201
- [19] Chadeaux D., Rao G., Le Carrou J. L., Berton, E. and Vigouroux L. 2016. The Effects of Player Grip on the Dynamic Behaviour of a Tennis Racket, *Journal of Sports Sciences* (2016), pp. 1-10 doi: 10.1080/02640414.2016.1213411
- [20] Blache Y., Hautier C., Lefebvre F., Djordjevic A., Creveaux T., and Rogowski I. 2017. Analysis of the Tennis Racket Vibrations During Forehand Drives: Selection of the Mother Wavelet, *Journal of Biomechanics* (2017), pp. 7-25 doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.07.006>
- [21] Suhas N., and Srikrishna Y. B., 2016, A Study on Methods of Damping in Sports Equipments, *International Journal of Mechanical and Industrial Technology* 4(2), pp. 13-22, 2016
- [22] Yeh I. L., Elangovan N., Feczer R., Khosravani S., Mahnan A., and Konczak J. 2019. Vibration-Damping Technology in Tennis Racquets: Effects on Vibration Transfer to the Arm, Muscle Fatigue and Tennis Performance, *Sports Medicine and Health Science* vol. 1, pp. 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.smhs.2019.09.001>
- [23] Porramatikul M., Anekjumnongporn T., Meeopartmongkon T., Lorpipatana B., Chaiwatcharaporn C., and Yimlamai T. 2020. Button Damper Reduces the Impact Force During Tennis Flat Serve, *Journal of Physical Education and Sport* 20(3), pp. 1561-1568. DOI:10.7752/jpes.2020.03214
- [24] Guinness World Records. 2021. Fastest Serve of a Tennis Ball (Male), <http://www.guinness-worldrecords.com>, diakses tanggal 9 Agustus 2021
- [25] Basori, Syafrizal, dan Suharwanto. 2015. Analisis Defleksi Batang Lentur Menggunakan Tumpuan Jepit dan Rol pada Material Aluminium 6063 Profil U Dengan Beban Terdistribusi, *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ Edisi 1*, pp. 50-58. <https://doi.org/10.21009/JKEM.2.1.8>
- [26] Mustopa dan Naharuddin. 2005. Analisis Teoritis dan Eksperimental Lentutan Batang pada Balok Segi Empat dengan Variasi Tumpuan, *Majalah Mektek VII(3)*, pp. 158-166
- [27] International Tennis Federation. 2021. History, <http://www.itftennis.com>, diakses tanggal 9 Agustus 2021
- [28] Sardjito N. Y. 2020. Gerak Vertikal Benda Berukuran Berbeda yang Jatuh Tanpa Kecepatan Awal dan Bergesekan dengan Udara,

Prosiding *The 11th Industrial Research Workshop and National Seminar*, Bandung, 26-27 Agustus 2020, pp. 710-714, 2020

[29] Anjani R., Ariandini S., Rizkianty N., Fuadi S., dan Pandu M. 2021. Menentukan Momentum dan

Koefisien Restitusi Benda Tumbukan Menggunakan Tracker Video Analyse, *Journal of Teaching and Learning Physics* 3(2), pp. 21-25. doi:<https://doi.org/10.15575/jotalp.v3i2.6554>