

Sundulan Bola Sepak (*Heading*): Potensi Analisis Berbasis Hukum Kekekalan Momentum

Anas Mukhtar¹, Moh. Agung Setiabudi²

¹ Prodi Teknik Mesin Universitas PGRI Banyuwangi, Jl. Ikan Tongkol 01 Banyuwangi 684616

² Program Studi Pendidikan Jasmani Kesehatan dan Rekreasi, Universitas PGRI Banyuwangi, Jl. Ikan Tongkol No. 01 Kertosari – Banyuwangi – Jawa Timur 68416

E-mail: anasmukhtar@unibabwi.ac.id¹, agungsetiabudi.budi@gmail.com²

Abstrak — Sundulan bola sepak (*heading*) merupakan gerakan yang khas di olahraga sepakbola. Keunikan gerakan menggunakan kepala merupakan topik kajian yang menarik. Penyusunan artikel ini bertujuan untuk menunjukkan potensi sundulan bola sepak sebagai suatu kajian analisis berbasis hukum kekekalan momentum. Analisis dilakukan berdasarkan referensi yang terkait dengan deskripsi singkat penelitian-penelitian sejenis yang telah dilakukan. Penerapan hukum kekekalan momentum didasari fenomena fisik tumbukan antara dua benda. Hasil analisis menunjukkan bahwa sundulan bola sepak memiliki potensi untuk dikaji berdasarkan aplikasi hukum kekekalan momentum, baik analisis matematis maupun eksperimental.

Kata Kunci — Sundulan, Sepak Bola, Analisis, Kekekalan Momentum

PENDAHULUAN

Sepak bola adalah olahraga yang unik, di mana olahraga ini memperbolehkan penggunaan kepala yang secara khusus ditujukan mengarahkan bola dalam permainan [1]. Bola dapat diarahkan dengan sengaja dengan kepala dengan aksi yang disebut sundulan (*heading*) [2]. Kepala yang tidak dilindungi dengan sengaja digunakan untuk mengendalikan dan mengumpankan bola [3]. Pemain dapat menyundul bola untuk dioper ke pemain lain, memindahkan bola ke tanah, atau mencetak gol [4]. Sundulan dilakukan untuk mengoper, menembak atau membuang bola [5]. Gol tidak jarang dihasilkan melalui sundulan karena kokohnya pertahanan lawan mengakibatkan sulitnya pemain untuk melakukan tembakan ke arah gawang [6]. Karena kontak antar pemain dan bola maka pemain berisiko cedera kepala, termasuk gegar otak [7].

Sundulan merupakan teknik umum di sepakbola, dapat dilakukan dengan posisi berdiri, melompat atau menjatuhkan diri (*diving*) [5]. Seorang pemain saat melakukan sundulan pada arah sisi (*lateral*), menggerakkan badan ke samping sambil memutar kepala. Sedangkan sundulan ke arah depan dilakukan dengan menggerakkan kepala dan badan ke belakang dan ke depan [8]. Lompatan vertikal dilakukan saat melompat ke arah bola dalam upaya untuk menyundul bola baik untuk serangan atau bertahan dan merupakan tindakan yang menentukan selama pertandingan [9]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selama sundulan dengan melompat terjadi kombinasi lutut, fleksi pinggul awal yang lebih besar, gaya reaksi permukaan tanah

vertikal puncak yang lebih besar, dan momen ekstensi lutut puncak yang lebih besar [10].

Sundulan bola sepak yang benar adalah keterampilan yang sulit untuk dikuasai, terutama ketika ditambahkan komponen gerak lain seperti berlari, melompat, dan melangkah mundur [11]. Sangat penting untuk memahami biomekanika sundulan sepak bola untuk memandu strategi perlindungan pemain dalam mengurangi keparahan dampak. Hal ini bermanfaat untuk pengembangan strategi perlindungan pemain yang bertujuan untuk mengurangi kecepatan gerak bola ketika disundul oleh seorang pemain [12]. Untuk kinematika tubuh bagian atas, pemain yang mahir menggunakan sudut siku yang lebih rendah daripada pemain yang kurang mahir. Sedangkan untuk tubuh bagian bawah yang lebih rendah, pemain yang mahir mengerahkan momen pergelangan kaki yang lebih besar [13].

Sebuah studi telah dilakukan secara eksperimental untuk mengukur dampak menyundul bola terhadap kepala. Pengukuran menggunakan akselerometer dilakukan untuk percepatan linier dan percepatan sudut kepala [1]. Percepatan puncak tengkorak terjadi hanya setelah bola meninggalkan kepala, sementara akselerasi otak puncak terjadi beberapa milidetik setelah itu [14]. Penggunaan pelindung kepala dapat mengurangi kejadian gegar otak secara signifikan [15]. Bola sepak yang ringan dapat bermanfaat untuk latihan sundulan selama pelatihan karena lebih aman dan membantu membangun kepercayaan pada pemain muda [16]. Penyesuaian parameter bola dapat mengurangi percepatan translasi puncak kumulatif yang tinggi bagi atlet sepak bola agar turun ke kisaran pemuatan rendah yang lebih aman yang ditentukan sebelumnya [17].

Pengetahuan biomekanika sundulan bola dapat membantu tenaga medis professional dalam mendiagnosa, menangani bahkan melakukan Tindakan preventif terhadap cedera kepala dan leher para pemain bola [3]. Aspek keamanan sangat meningkat ketika pemain menyundul bola dengan massa tubuh efektif yang lebih besar. Hal ini dipengaruhi oleh ukuran tubuh, kekuatan, dan teknik pemain [2]. Pemain yang lebih ahli cenderung menunjukkan koordinasi sendi-sendi yang lebih baik dan gaya impuls yang lebih besar. Kedua faktor ini menggambarkan performa sundulan pemain [13].

Kajian sundulan bola sepak dari aspek gerak sangat menarik perhatian peneliti terkait cedera dan pengembangan program pelatihan. Berbagai bentuk riset dilakukan dalam mengembangkan pengetahuan gerak sundulan. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah menganalisis sundulan berdasarkan unsur mekanika. Mekanika adalah bidang ilmu yang mempelajari gerak sehingga dapat diterapkan di gerak sundulan bola sepak. Sedangkan kontak kepala dengan bola merupakan fenomena tumbukan yang berkaitan dengan gaya dan momentum.

Dalam fenomena tumbukan terdapat sebuah hukum yang berlaku yaitu hukum kekekalan momentum. Hukum ini didasari fenomena fisik tumbukan antara dua benda. Dalam hal ini, energi kinetik dan momentum benda memegang peranan penting dalam fenomenanya. Hukum ini menyatakan bahwa momentum sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama. Hukum ini dapat diterapkan dalam analisis sundulan bola sepak. Penulisan artikel ini bertujuan untuk menunjukkan potensi sundulan bola sepak sebagai suatu kajian analisis berbasis hukum kekekalan momentum.

METODE

Analisis dilakukan berdasarkan penelusuran pustaka terkait gerak sundulan bola sepak dan aspek keilmuan yang sesuai. Deskripsi singkat penelitian terdahulu disajikan sebagai bentuk pendahuluan untuk memberikan gambaran awal perkembangan riset. Gambaran tren riset ini dapat menjadi pijakan konsep dasar analisis yang akan dilakukan. Deskripsi singkat ini dilengkapi dengan informasi pendukung berupa temuan dan dokumentasi terkait yang dapat digunakan sebagai acuan awal maupun sebagai bentuk tindak lanjut kajian yang dapat dilakukan.

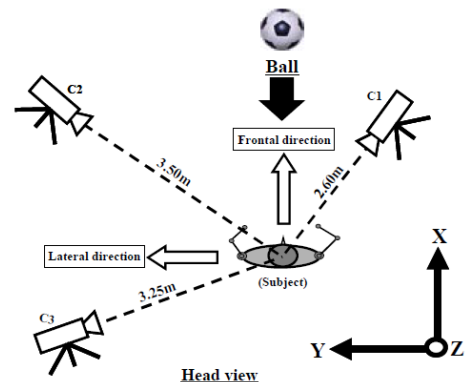
Analisis selanjutnya dilakukan dengan pemodelan fenomena tumbukan yang terjadi saat kepala menyundul sebuah bola. Variabel-variabel terkait ditunjukkan dalam skema dan dideskripsikan secara jelas. Aplikasi hukum kekekalan momentum dilakukan dengan referensi yang sesuai dimana hukum ini diterapkan di topik riset yang lain.

Analisis juga didukung informasi atau data pendukung setiap variabel yang didapat dari referensi terkait. Analisis diakhiri dengan pembahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

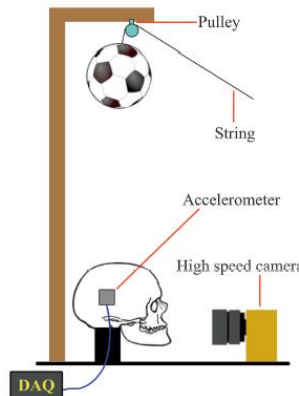
Ringkasan Penelitian Terdahulu

Model matematis dan simulasi komputer untuk tubuh manusia mengindikasikan bahwa gaya yang dilakukan oleh bagian kepala sebanding dengan kecepatan bola dan akar kuadrat kekakuan bola dan massanya [12]. Hasil simulasi sundulan bola speak menunjukkan bahwa model simulasi dapat digunakan dalam menemukan bahan pelindung yang dapat mengurangi percepatan gerak, sehingga meminimalkan kemungkinan menderita jangka panjang trauma otak akibat menyundul bola [1]. Model lain dapat digunakan untuk menyelidiki parameter penting selama sundulan sepak bola yang mempengaruhi perpindahan dan akselerasi otak, sehingga memberikan pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme gerak tersebut [14].

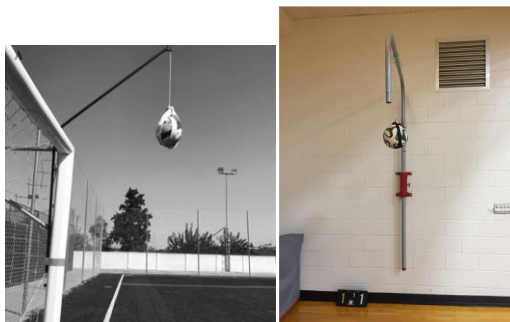


Gambar 1. Skema eksperimen sundulan bola [8]

Kajian secara eksperimental juga dilakukan untuk mempelajari dampak bola terhadap kepala dan kajian biomekanika. Eksperimen dilakukan dengan perangkat buatan maupun menggunakan atlet sepak bola. Bola dapat dijatuhkan ke tengkorak buatan yang dilengkapi sensor gaya atau digantung untuk disundul pemain. Berikut ini skema dan foto-foto contoh-contoh penelitian yang telah dilakukan.



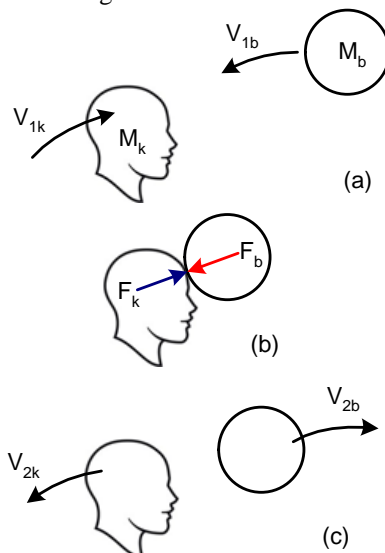
Gambar 2. Skema uji bola jatuh ke model tengkorak [14]



Gambar 3. Bola gantung di lapangan [9] dan di laboratorium [18]

Analisis Sundulan Bola Sepak

Fenomena fisik sundulan bola sepak dapat diskemakan sebagai berikut:



Gambar 4. Skema fenomena sundulan bola

Gambar 3a menunjukkan bola dengan massa M_b bergerak dengan kecepatan V_{1b} . Kepala dengan massa M_k bergerak secara translasi atau angular dengan kecepatan V_{1k} . Pada saat tertentu, terjadi kontak antara kepala dan bola seperti ditunjukkan dalam gambar 3b. Saat kontak terjadi, kepala memberikan gaya kinetik sebesar F_k dan bola memberikan gaya kinetik sebesar F_b . Sundulan bola ini terjadi dengan kondisi dimana massa kepala lebih

besar dibanding massa bola. Ketika dua buah benda mengalami tumbukan, dua benda akan saling mendekat, berinteraksi dengan kuat, dan saling menjauh. Benda-benda saling berinteraksi dengan kuat hanya terjadi saat tumbukan berlangsung [19].

Momentum suatu benda didefinisikan sebagai ukuran kesulitan untuk menghentikan gerak benda. Momentum dinyatakan sebagai hasil kali massa dan kecepatan benda. Jika pada suatu sistem gaya eksternal netto yang bekerja adalah nol maka nilai momentum total dari sistem adalah kekal (tetap konstan sepanjang waktu) sehingga laju perubahan momentum total adalah nol. Hasil ini dikenal sebagai hukum kekekalan momentum. Hukum kekekalan momentum ini berguna ketika membahas peristiwa tumbukan [19]. Menurut hukum kekekalan momentum, nilai momentum (p) sebelum tumbukan sama dengan momentum setelah tumbukan, secara matematis ditulis [20]:

$$\sum \vec{p}^{sebelum} = \sum \vec{p}^{sesudah} \quad (1)$$

Momentum merupakan besaran vektor, sehingga dalam analisis bisa dipisahkan berdasarkan komponen-komponennya [20]. Gaya yang bekerja selama waktu kontak (ΔT), benda pertama memberikan gaya sebesar F_{12} dan benda kedua memberikan gaya sebesar F_{21} . Penerapan hukum Newton III dimana gaya aksi sama dengan gaya reaksi didapat [21, 22]:

$$F_{12} = - F_{21} \quad (2)$$

Aplikasi pada kontak kepala dengan bola akan didapatkan:

$$F_k = - F_b \quad (3)$$

Selama kontak waktu tertentu ΔT maka persamaan (2) menjadi [21, 22]:

$$F_{12} \Delta T = - F_{21} \Delta T$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (4)$$

Penerapan persamaan (4) ke fenomena sundulan bola didapat persamaan:

$$M_k V_{1k} + M_b V_{1b} = M_k V_{2k} + M_b V_{2b} \quad (5)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa ruas kiri secara berurutan terdiri dari variabel massa kepala, kecepatan kepala sebelum tumbukan, massa bola dan kecepatan bola sebelum tumbukan. Ruas kiri persamaan terdiri dari variabel massa kepala, kecepatan kepala sesudah tumbukan dan kecepatan bola sesudah tumbukan. Kecepatan kepala sesudah tumbukan merupakan akibat gaya dampak yang berasal dari energi kinetik bola. Kecepatan bola sesudah tumbukan merupakan akibat gaya kinetik dari gerak sundulan kepala.

Persamaan (5) dapat digunakan dalam sebuah eksperimen. Selain itu, pemodelan matematis juga dapat dilakukan sebagai bentuk simulasi awal dengan menggunakan data-data dari referensi

terkait. Hasil penelitian terkait kepala didapat beberapa data sebagai berikut [23]:

1. Massa kepala dan leher : 6,07 kg
2. Momen inersia massa : 0,02 kg m²
3. Sudut girasi arah sagittal : 30,3°
4. Sudut girasi arah frontal : 31,5°
5. Sudut girasi arah longitudinal : 26,1°

Subyek manusia di suatu penelitian menunjukkan bahwa hasil pengukuran menggunakan instrumen alat ukur jarak jauh yang diposisikan di mulut didapat percepatan linear kepala sebesar 11,9-22,0 g dan percepatan sudut kepala sebesar 1020-2580 rad/dt², untuk kontrol sundulan dengan kecepatan bola sebesar 7,2-8,0 m/dt [12]. Sedangkan data penelitian terkait massa bola adalah 410-450 gr [17]. Kecepatan bola tertinggi dimana seorang pemain mau menyundul bola dipercaya sebesar 23,6 m/dt. Sedangkan sundulan banyak terjadi pada kecepatan yang lebih rendah dari 18,1 m/dt [12].

Data-data ini dapat digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis sundulan bola sepak berbasis hukum kekekalan momentum. Data yang belum tersedia adalah kecepatan kepala dan kecepatan bola sesudah sundulan. Dengan suatu asumsi atau pendekatan yang sesuai terhadap salah satu variabel yang tidak diketahui ini, maka analisis secara matematis dapat dilakukan. Jika kecepatan kepala sesudah tumbukan diasumsikan berdasarkan prosentase berat kepala dibanding berat bola sebagai representasi gaya yang bekerja maka analisis matematis dapat dilakukan untuk mendapatkan kecepatan bola sesudah tumbukan.

Untuk penelitian berbasis eksperimen, berbagai metode pengukuran dan alat ukur dapat diaplikasikan untuk mendapatkan besaran-besaran yang dikehendaki. Besaran seperti massa kepala dan leher tetap dapat menyesuaikan dengan referensi yang ada. Besaran kecepatan dapat diukur menggunakan akselerometer atau alat ukur lainnya. Perekaman gerak dengan kamera dan aplikasi program komputer untuk pengolahan grafis dapat diterapkan untuk mendapatkan kecepatan gerak. Penggunaan kamera untuk pengamatan sundulan bola speak telah dilakukan untuk analisis sundulan [8]. Metode pengamatan dengan kamera ini juga digunakan dalam eksperimen momentum kinematika [19] dan hukum kekekalan momentum [20].

KESIMPULAN

Sundulan bola sepak berpotensi menjadi kajian dalam analisis gerak berbasis hukum kekekalan momentum. Fenomena tumbukan dua benda dapat menjadi dasar kajian ini. Kajian dapat dilakukan secara matematis maupun eksperimental. Kajian matematis memerlukan pendekatan atau asumsi

yang tepat, sedangkan eksperimen membutuhkan pengukuran yang akurat untuk mendapatkan hasil penelitian yang dapat diandalkan.

NOMENCLATURE

F	gaya yang bekerja
N	Newton
m	massa benda
	kg
M	massa benda
	kg
P	momentum
	kg m dt ⁻¹
T	waktu
	dt
v	kecepatan benda
	m dt ⁻¹
V	kecepatan benda
	m dt ⁻¹

Greek letters

Δ	delta
Σ	sigma

Subscripts

1	sebelum tumbukan
2	sesudah tumbukan
k	kepala
b	bola

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. A. Hassan, Z. Taha, Finite Element Analysis of Soccer Heading, *Procedia Engineering* vol. 112: pp. 46–51, 2015
- [2] C. F. Babbs, Biomechanics of heading a soccer ball: implications for player safety, *The Scientific World* vol. 1: pp. 281–322, 2001
- [3] A. Al-Kashmiri and J. S. Delaney, Head and neck injuries in football (soccer), *Trauma* vol. 8: pp. 189-195, 2006
- [4] A. C. Rodrigues, R. P. Lasmar and P. Caramelli, Effects of soccer heading on brain structure and function, *Function. Front. Neurol.* vol. 7 no. 38: pp. 1-11, Maret 2016
- [5] F. Gu, Biomechanics analysis of side header in soccer players, 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC 2016): pp. 1305-1308, 2016
- [6] R. R. Setiawan, Model latihan heading sepakbola berbasis sirkuit pada sekolah sepakbola usia 14-17 tahun, *Media Ilmu Keolahragaan Indonesia* vol. 9 no. 1: pp. 10-12, Juli 2019
- [7] T. G. Oliveira, C. Ifrah, R. Fleysheer, M. Stockman, M. L. Lipton, Soccer heading and concussion are not associated with reduced brain volume or cortical thickness, *PlosOne* vol. 15 no. 8: pp. 1-8, Agustus 2010
- [8] S. Sunami, and T. Maruyama, Motion and EMG analysis of soccer-ball heading for lateral direction, *Football Science* vol. 7: pp. 7-17, 2008
- [9] A. Filter, J. O. Jabalera, A. Molina-Molina, L. Suárez-Arrones, J. Robles- Rodríguez, T. Dos'Santos, I. Loturco, B. Requena and A. Santalla, Effect of ball inclusion on jump performance in soccer players: a biomechanical approach, *Science and Medicine in Football*: pp. 1-8, April 2021

- [10] E. A. Larson, A comprehensive prospective analysis of soccer heading among male and female collegiate soccer athletes, Thesis, Master of Science in Kinesiology, Department of Kinesiology and Recreation, the Faculty of Humboldt State University, Mei 2011
- [11] A. B. Alfayyadh, The effects of heading motion and gender on lower extremity biomechanics in soccer players, Thesis, Master of Science Degree, the University of Tennessee, Knoxville, Mei 2018
- [12] G. J. Tierney, J. Power, and C. Simms, Force experienced by the head during heading is influenced more by speed than the mechanical properties of the football, *Scand J Med Sci Sports*. vol. 31: pp. 124–131, 2021
- [13] L. C. Hernandez B. and Y. Chen-Hua, A biomechanical analysis for proficient and less-proficient subjects for soccer heading, 34th International Conference on Biomechanics in Sport, Tsukuba, Japan: pp. 644-647, Juli 2016
- [14] Z. Taha, M. H. A. Hassan, and I. Hasanuddin, Analytical modelling of soccer heading, *Sadhana* vol. 40, part 5: pp. 1567-1578, Agustus 2015
- [15] J. N. Press, Biomechanics of head impacts in soccer, Thesis, Master of Science in Biomedical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, April 2016
- [16] V. E. Wahlquist and T. W. Kaminski, Analysis of head impact biomechanics in youth female soccer players following the get ahead safely in soccer™ heading intervention, *Sensors* vol. 21 no. 3859: pp. 1-9, Juni 2021
- [17] J. Auger, J. Markel, D. D. Pecoski, N. Leiva-Molano, T. M. Talavage, L. Leverenz, F. Shen, and E. A. Nauman, Factors affecting peak impact force during soccer headers and implications for the mitigation of head injuries, *PlosOne* vol. 15 no. 10: pp. 1-15, Oktober 2020
- [18] S. Han, The effects of fatigue on biomechanics of heading performance in soccer, Thesis, Master of Science in Athletic Training, Graduate School of Bridgewater State University, Mei 2018
- [19] S. Utari, dan E. C. Prima, Analisis hukum kekekalan momentum model tumbukan kelereng dengan gantungan ganda menggunakan analisis video tracker, *Jurnal Pendidikan Fisika dan Keilmuan (JPFK)* vol. 5 no. 2: pp. 83-92, September 2019
- [20] K. Wantoro, D. N. Sudjito, and F. S. Rondonuwu, Pemanfaatan kamera smartphone dan eyetracking analysis pada percobaan kinematika di atas landasan udara dua dimensi, *Unnes Physics Education Journal* vol. 5 no. 1: pp. 49-55, April 2016
- [21] P. C. H. Sinaga, Verification of the linear momentum conservation law using linear air track, *Magister Scientiae* edisi 26: pp. 155-169, Oktober 2009
- [22] F. B. Kneubil, The inertia of mass and the newtonian force, *Revista Brasileira de Ensino de Fisica* vol. 43: pp. 1-3, 2021
- [23] R. H. Krishnan, V. Devanandh, A. K. Brahma, and S. Pugazhenth, Estimation of mass moment of inertia of human body, when bending forward, for the design of a self-transfer robotic facility, *Journal of Engineering Science and Technology* vol. 11 no. 2: pp. 166-176, Februari 2016