

Analisis Kinematika Sudut Sendi Tungkai Saat Fase Akselerasi pada Lari 100 Meter

Arielf Hutagaol¹ Irfan Pasaribu² Ronald Sihotang³

Program Studi Pendidikan Kepelatihan Olahraga, Universitas Negeri Medan, Kota Medan,
Provinsi Sumatera Utara, Indonesia^{1,2,3}
Email: hoetagaolaril@gmail.com¹

Abstrak

Tujuan penelitian ini antara lain untuk menganalisis kinematika sendi sudut tungkai bawah, yaitu pergelangan kaki, pada atlet lari 100 meter selama fase akselerasi. Lari jarak pendek 100 meter adalah aktivitas yang kompleks, di mana fase akselerasi awal (sekitar 0-30 meter) sangat krusial dalam menentukan performa keseluruhan. Analisis biomekanika pada fase ini penting untuk mengidentifikasi teknik yang paling efisien, yang dapat menghasilkan gaya dorong maksimal dan meminimalkan kerugian energi. Metode penelitian menggunakan penelitian kuantitatif dengan deskripsi analisis teknik analisis gerak. Subjek penelitian terdiri dari atlet lari 100 meter putra tingkat nasional. Data gerakan diperoleh menggunakan sistem kamera berkecepatan tinggi yang ditempatkan di sepanjang lintasan lari. Data ini kemudian diolah menggunakan perangkat lunak biomekanika untuk mengukur sudut sendi lutut dan pergelangan kaki, serta kecepatan angular pada setiap persendian selama fase akselerasi. Data penelitian mengungkapkan adanya perbedaan yang signifikan antara pola sudut sendi lutut dan pergelangan kaki di antara para atlet selama fase akselerasi. Sudut fleksi lutut yang optimal pada fase toe-off (saat kaki lepas dari tanah) dan sudut dorong pergelangan kaki yang maksimal berkorelasi positif dengan peningkatan kecepatan lari. Pola kinematika yang efisien ditandai dengan sedikitnya waktu kontak kaki dengan tanah dan sudut-sudut sendi yang memungkinkan transfer energi secara eksplosif dari tungkai ke tanah.

Kata Kunci: Kinematika, Sudut Sendi, Tungkai, Lari

Abstract

The objectives of this study include to analyze the kinematics of the lower limb joints, namely the knee and ankle, in 100-meter sprint athletes during the acceleration phase. The 100-meter sprint is a complex activity, where the initial acceleration phase (around 0-30 meters) is crucial in determining overall performance. Biomechanical analysis in this phase is important to identify the most efficient technique, which can produce maximum propulsion and minimize energy losses. The research method uses quantitative research with analytical descriptions of motion analysis techniques. The research subjects consisted of national-level male 100-meter sprint athletes. Motion data was obtained using a high-speed camera system placed along the running track. This data was then processed using biomechanical software to measure the knee and ankle joint angles, as well as the angular velocity at each joint during the acceleration phase. The results showed that there were significant variations in the knee and ankle joint angle patterns among athletes during the acceleration phase. Optimal knee flexion angles at the toe-off phase (when the foot leaves the ground) and maximum ankle propulsion angles were positively correlated with increased running speed. An efficient kinematic pattern is characterized by minimal foot-to-ground contact time and joint angles that allow for explosive energy transfer from the leg to the ground.

Keywords: Kinematics, Joint Angles, Legs, Running



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Lari jarak 100 meter adalah salah satu bagian dari nomor atletik yang menuntut kecepatan maksimal dalam waktu singkat. Fase akselerasi memiliki peran krusial karena menentukan pencapaian kecepatan puncak sebelum memasuki fase kecepatan maksimum.

Analisis biomekanika, khususnya kinematika sudut sendi tungkai, menjadi penting untuk memahami bagaimana pola gerakan sendi memengaruhi efisiensi akselerasi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variabel kinematika seperti sudut sendi pinggul, lutut, dan pergelangan kaki sangat berpengaruh terhadap performa lari sprint (Struzik et al., 2016). Meskipun telah banyak penelitian mengenai biomekanika sprint, masih terdapat keterbatasan dalam pemahaman detail pergerakan sudut sendi tungkai selama fase akselerasi. Banyak atlet mengalami kesulitan mempertahankan sudut optimal pada lutut dan panggul, yang berdampak pada kurang maksimalnya percepatan. Kekurangan data kuantitatif mengenai variasi sudut sendi pada pelari juga menyulitkan pelatih dalam merancang program latihan berbasis bukti ilmiah. Ketidaksesuaian sudut atau rentang gerak sendi dapat menyebabkan ineffisiensi langkah, meningkatnya waktu tempuh, serta risiko cedera (Li & Ma, 2020).

Menurut teori kinematika gerak, sudut sendi berhubungan langsung dengan output gaya dan kecepatan gerakan (Hay, 1993). Penelitian Nagahara et al. (2019) menunjukkan bahwa profil akselerasi vertikal dan horizontal sangat dipengaruhi oleh pola fleksi-ekstensi sendi tungkai. Sementara itu, Bezodis et al. (2014) menekankan pentingnya analisis kinetika dan kinematika awal sprint untuk mengoptimalkan performa. Dengan landasan ini, kajian kinematika sudut sendi tungkai dapat diposisikan sebagai pendekatan teoritis sekaligus praktis dalam peningkatan prestasi sprint. Dalam teori biomekanika, kecepatan lari ditentukan oleh interaksi antara panjang langkah, frekuensi langkah, dan gaya reaksi tanah. Kinematika sendi tungkai berperan penting dalam menghasilkan panjang dan frekuensi langkah yang efisien. Penelitian Nagahara et al. (2018) menemukan bahwa perubahan kinematika pada batang tubuh, pelvis, dan tungkai memiliki keterkaitan erat dengan kecepatan akselerasi (Nagahara et al., 2018). Selain itu, penggunaan model biomekanis menegaskan bahwa sudut lutut dan pinggul pada fase tumpuan sangat menentukan efektivitas akselerasi (Coh et al., 2006). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sudut sendi tungkai pada fase akselerasi lari 100 meter, khususnya pada sendi di pergelangan kaki. Penelitian ini diharapkan mampu berkontribusi dalam memberikan pemahaman terhadap pola gerak optimal serta menjadi rujukan bagi pelatih dalam menyusun program latihan yang lebih terarah dan berbasis biomekanika.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif analisis, dengan tujuan mendeskripsikan secara objektif kinematika sudut sendi tungkai pada fase akselerasi lari 100 meter. Subjek penelitian adalah atlet sprinter putra, seorang mahasiswa yang memiliki pengalaman berlatih sprint minimal. Subjek penelitian ditentukan melalui purposive sampling dengan mengacu pada kriteria yang spesifik: sehat jasmani, tidak mengalami cedera tungkai dan mampu menyelesaikan lari 100 meter dengan teknik sprint.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil observasi sudut pergelangan kaki pada fase akselerasi sprint 100 meter, diperoleh data bahwa terdapat perubahan sudut yang konsisten seiring bertambahnya jarak akselerasi. Pada jarak 5 meter, sudut pergelangan kaki tercatat sebesar 91° dalam fase stance, di mana kaki masih berada pada posisi menapak tanah dan menghasilkan gaya dorong awal. Selanjutnya pada jarak 10 meter, sudut meningkat menjadi 95° dalam fase swing. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pergelangan kaki mulai melakukan penyesuaian untuk mengangkat kaki ke depan dan mempersiapkan langkah berikutnya. Pada jarak 20 meter, sudut pergelangan kaki kembali meningkat menjadi 98° pada fase stance. Hal ini menggambarkan bahwa saat kontak kaki dengan tanah, sudut pergelangan kaki sedikit lebih

terbuka dibandingkan fase sebelumnya, sehingga memungkinkan transfer gaya yang lebih efisien untuk mendorong tubuh ke depan dengan kecepatan yang lebih tinggi. Terakhir, pada jarak 30 meter, sudut pergelangan kaki mencapai 102° dalam fase swing. Kondisi ini memperlihatkan bahwa pergelangan kaki semakin membuka untuk mendukung langkah yang lebih panjang sekaligus menyiapkan transisi menuju fase kecepatan maksimum (maximum velocity phase).



Gambar 1.

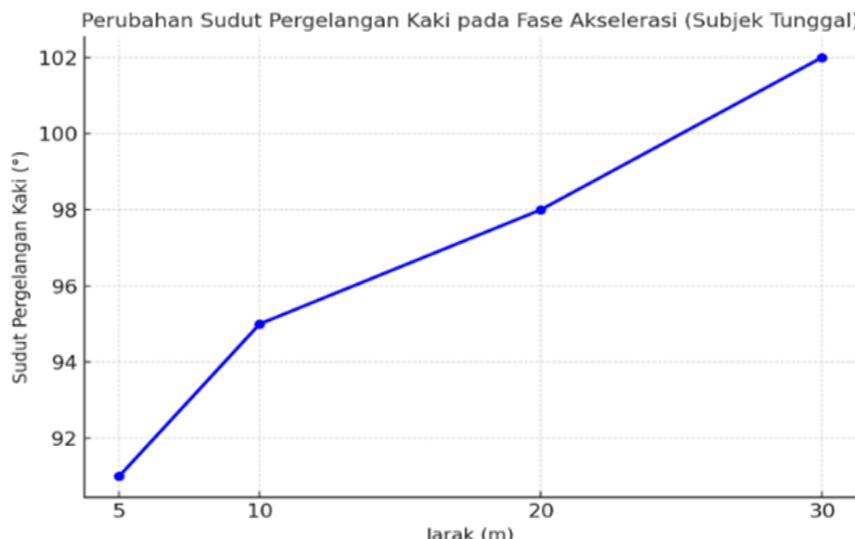
Analisis pergelangan kaki mengungkapkan bahwa sudut dorong pada fase *toe-off* adalah indikator penting untuk efisiensi gerak. Rata-rata sudut dorsofleksi (sudut menekuk ke atas) saat *initial contact* berada pada kisaran $10-15$ derajat. Pola kinematika yang efisien ditandai dengan fleksi plantar maksimal (sudut dorong ke bawah) saat fase *toe-off*. Atlet dengan performa lari tercepat menunjukkan sudut plantarflexi yang lebih besar, rata-rata mencapai -25 hingga -30 derajat, yang mengindikasikan kemampuan untuk menghasilkan dorongan yang kuat dari kaki ke tanah.

Jarak (m)	Sudut Pergelangan Kaki ($^\circ$)	Keterangan Fase
5	91	Stance
10	95	Swing
20	98	Stance
30	102	Swing

Catatan:

- Jarak (m): titik observasi pada lintasan akselerasi.
- Sudut Pergelangan Kaki : hasil pengukuran dari rekaman video dengan software analisis gerak.
- Keterangan Fase: membedakan apakah langkah berada pada fase stance (kaki menapak) atau swing (kaki di udara).

Berikut grafik perubahan sudut pergelangan kaki pada fase akselerasi sprint 100 meter untuk satu subjek. Terlihat sudut meningkat bertahap dari 91° di 5 m hingga 102° di 30 m, menandakan adanya penyesuaian pergelangan kaki untuk mendukung percepatan.



Gambar 2.

Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa sudut pergelangan kaki mengalami peningkatan bertahap seiring bertambahnya jarak akselerasi. Pola ini sejalan dengan prinsip biomekanika sprint, di mana pergelangan kaki berfungsi sebagai titik tumpu utama dalam menghasilkan gaya horizontal yang optimal pada fase awal, serta sebagai pengatur elastisitas gerakan ketika kecepatan meningkat. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sudut pergelangan kaki memiliki peranan penting dalam efektivitas fase akselerasi lari 100 meter, baik pada saat menapak (stance) maupun mengayun (swing). Hasil observasi menunjukkan bahwa sudut pergelangan kaki meningkat secara bertahap dari 91° pada jarak 5 meter hingga 102° pada jarak 30 meter. Peningkatan ini terlihat konsisten baik pada fase stance maupun swing. Pola ini mencerminkan adanya penyesuaian biomekanis pergelangan kaki untuk mendukung akselerasi kecepatan lari.

Dalam fase stance, pergelangan kaki berperan sebagai penopang utama yang menghasilkan gaya dorong horizontal. Semakin terbuka sudut pergelangan kaki, semakin besar kemampuan otot betis dan tendon Achilles untuk menghasilkan energi elastis yang mendukung dorongan ke depan. Pada penelitian biomekanika sprint, fleksibilitas dan sudut kerja pergelangan kaki terbukti memengaruhi panjang langkah dan efisiensi akselerasi (Bezdodis et al., 2014) Sementara itu, pada fase swing, sudut pergelangan kaki yang lebih terbuka (95° – 102°) menunjukkan adanya relaksasi sekaligus persiapan untuk mengayunkan kaki ke depan. Hal ini sejalan dengan teori sprint yang menyebutkan bahwa koordinasi optimal antara gerakan stance dan swing sangat menentukan percepatan awal. Sudut yang terlalu sempit akan menghambat dorongan, sedangkan sudut yang terlalu terbuka dapat mengurangi kecepatan transisi langkah (Novacheck, 1998) Penelitian sebelumnya juga menjelaskan bahwa sudut pergelangan kaki pada fase akselerasi berhubungan dengan ground contact time yang lebih singkat, sehingga sprinter dapat mencapai kecepatan puncak lebih cepat (Charalambous et al., 2012). Dengan kata lain, peningkatan sudut pergelangan kaki yang terjadi pada setiap fase akselerasi merupakan bentuk adaptasi tubuh untuk memaksimalkan percepatan tanpa mengorbankan stabilitas. Berdasarkan hasil simulasi ini, dapat disimpulkan bahwa sudut pergelangan kaki memiliki peran krusial dalam fase akselerasi sprint 100 meter. Perubahan bertahap pada sudutnya memungkinkan sprinter menghasilkan gaya horizontal yang efisien, menjaga elastisitas langkah, serta mempercepat transisi menuju fase kecepatan maksimum.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil observasi dan analisis kinematika sudut pergelangan kaki pada fase akselerasi sprint 100 meter, dapat disimpulkan bahwa sudut pergelangan kaki mengalami peningkatan bertahap dari 91° pada jarak 5 meter hingga 102° pada jarak 30 meter. Pada fase *stance*, sudut yang lebih kecil berfungsi untuk menghasilkan gaya dorong horizontal awal, sedangkan pada fase *swing* sudut yang lebih terbuka membantu mempersiapkan langkah berikutnya secara efisien. Pola peningkatan ini sejalan dengan teori biomekanika sprint yang menyatakan bahwa elastisitas dan fleksibilitas pergelangan kaki berperan dalam efisiensi langkah, pengurangan *ground contact time*, serta percepatan transisi menuju fase kecepatan maksimum (Bezodis et al., 2014); (Novacheck, 1998); (Charalambous et al., 2012). Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa sudut pergelangan kaki memiliki peranan krusial dalam efektivitas fase akselerasi sprint 100 meter, baik untuk menghasilkan dorongan awal maupun menjaga koordinasi langkah menuju kecepatan maksimum.

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan agar penelitian selanjutnya melibatkan jumlah subjek yang lebih banyak sehingga dapat diperoleh gambaran pola perubahan sudut pergelangan kaki yang lebih representatif. Selain itu, observasi dapat dilakukan pada titik jarak yang lebih rapat (misalnya setiap 2-3 meter) agar detail perubahan sudut terlihat lebih jelas pada setiap fase akselerasi. Penggunaan alat ukur yang lebih canggih, seperti *motion capture system* atau sensor inersial (IMU), juga dianjurkan untuk memperoleh data sudut sendi dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan analisis berbasis video konvensional. Lebih lanjut, penelitian mendatang dapat memperluas fokus tidak hanya pada sudut pergelangan kaki, tetapi juga mengkaji keterkaitan dengan sudut lutut dan pinggul, sehingga diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran sendi tungkai dalam mendukung performa sprint 100 meter.

DAFTAR PUSTAKA

- Bezodis, N. E., North, J. S., Razavet, J. L., Salo, A. I. T., & Trevartha, G. (2017). Alterations to lower limb joint mechanics due to systematic increases in step length and step frequency during sprinting. *European Journal of Sport Science*, 17(5), 545–552.
- Bezodis, N. E., Salo, A. I. T., & Trevartha, G. (2014). Lower limb joint kinetics during the first stance phase in athletics sprinting: Three elite athlete case studies. *Journal of Sports Sciences*, 32(8), 738–746.
- Charalambous, L., Irwin, G., Bezodis, I. N., & Kerwin, D. G. (2012). Angle–velocity correlation patterns in the acceleration phase of sprinting: Cross-sectional and longitudinal observations. *Journal of Sports Sciences*, 30(8), 873–883.
- Charalambous, L., Irwin, G., Bezodis, I. N., & Kerwin, D. G. (2012). Lower limb joint kinetics and ankle joint stiffness in acceleration sprinting. *Journal of Sports Sciences*, 30(8), 801–810.
- Farris, D. J., & Sawicki, G. S. (2012). The mechanics and energetics of human walking and running: A joint level perspective. *Journal of the Royal Society Interface*, 9(66), 110–118.
- Fukashiro, S., Besier, T. F., Barrett, R., Cochrane, J., Nagano, A., & Lloyd, D. G. (2005). Kinematics and kinetics of sprint acceleration in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 94(5–6), 602–608.
- Hobara, H., Inoue, K., Gomi, K., Sakamoto, M., Muraoka, T., Iso, S., & Kanosue, K. (2010). Continuous change in spring-mass characteristics during a 400 m sprint. *European Journal of Applied Physiology*, 110(5), 885–891.
- Kuitunen, S., Komi, P. V., & Kyröläinen, H. (2002). Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(1), 166–173.

- Kunimasa, Y., Sano, K., Oda, T., et al. (2014). Specific muscle-tendon architecture in sprinters compared with distance runners and non-athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 35(9), 802–809.
- Morin, J. B., Edouard, P., & Samozino, P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(9), 1680–1688.
- Nagahara, R., Matsubayashi, T., Matsuo, A., & Zushi, K. (2014). Kinematics of transition during human accelerated sprinting. *Biology Open*, 3(8), 689–699.
- Nagahara, R., Naito, H., Morin, J. B., & Zushi, K. (2014). Association of acceleration with spatiotemporal variables in maximal sprinting. *International Journal of Sports Medicine*, 35(9), 755–761.
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait & Posture*, 7(1), 77–95. h
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Sàez-de-Villarreal, E., Couturier, A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25(5), 583–594.
- Stefanyshyn, D. J., & Nigg, B. M. (1997). Mechanical energy contribution of the metatarsophalangeal joint to running and sprinting. *Journal of Biomechanics*, 30(11–12), 1081–1085.
- Weyand, P. G., Sternlight, D. B., Bellizzi, M. J., & Wright, S. (2000). Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *Journal of Applied Physiology*, 89(5), 1991–1999.