

Komparasi *Spline* Kubik *Not-a-Knot* dan *Natural* pada Lompatan En-Nesyri Piala Dunia 2022

Delfia Hidayatul Fitri¹, Said Munzir^{2*}, Muhammad Ikhwan³

^{1,2,3}Universitas Syiah Kuala, Jl. Teuku Nyak Arief No. 441, Kota Banda Aceh, 23111

^{1,2,3}Departemen Matematika, Universitas Syiah Kuala

e-mail: smunzir@usk.ac.id

Diajukan: 9 Juli 2025, Diperbaiki: 29 Agustus 2025, Diterima: 4 September 2025

Abstrak

Gerakan lompatan saat menyundul bola dalam sepak bola memiliki pola yang bervariasi tergantung kondisi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kinematika lompatan fenomenal En-Nesyri pada Piala Dunia 2022. Data diambil melalui teknik digitalisasi dari demonstrasi gerakan, kemudian dianalisis menggunakan interpolasi *spline* kubik dengan dua kondisi batas: *natural* dan *not-a-knot*. Objek penelitian adalah lompatan En-Nesyri yang mencapai 2,78 meter saat menyundul bola dalam pertandingan melawan Portugal. Hasil penelitian menunjukkan kinematika gerakan lompatan, mencakup posisi, kecepatan, dan percepatan. Terdapat perbedaan nilai maksimum antara interpolasi *spline* kubik dengan dua kondisi batas yang dibandingkan, misalnya percepatan sumbu-z kepala mencapai $4020,68 \text{ m/s}^2$ (*not-a-knot*) dan $4496,68 \text{ m/s}^2$ (*natural*). Pada detik 1,5, posisi kepala mencapai ketinggian maksimum. Analisis menunjukkan bahwa *spline* kubik dengan kondisi batas *not-a-knot* lebih sesuai untuk memodelkan lompatan fenomenal yang tidak dimulai dari keadaan diam.

Kata Kunci: kinematika, lompatan fenomenal, *spline* kubik *natural*, *spline* kubik *not-a-knot*

Abstract

The jumping motion when heading the ball in football varies depending on the conditions. This study aims to analyze the phenomenal jump of En-Nesyri at the 2022 World Cup from a kinematic perspective. The data was collected through digitization techniques from a demonstration of the jump and analyzed using cubic spline interpolation with two boundary conditions: *natural* and *not-a-knot*. The object of this study is En-Nesyri's jump, which reached 2.78 meters when heading the ball during the match against Portugal. The results show the kinematics of the jumping motion, including position, velocity, and acceleration. Additionally, differences between cubic spline interpolation with the two boundary conditions were observed. At 1.5 seconds, the head reaches its maximum height. The analysis indicates that the cubic spline with the *not-a-knot* boundary condition is more suitable for modeling phenomenal jump that do not start from a stationary position.

Keywords: kinematics, phenomenal jump, cubic spline *natural*, cubic spline *not-a-knot*

1 Pendahuluan

Lompatan saat menyundul bola berperan penting dalam sepak bola, karena pemain perlu melompat setinggi mungkin untuk menyambut umpan bola dan meningkatkan peluang mencetak gol [1], [2], [3], [4]. Pada Piala Dunia 2022, pemain sepak bola Maroko, Youssef En-Nesyri

melakukan lompatan mencapai 2,78 meter saat menyundul bola melawan Portugal [5]. Analisis kinematika terhadap gerakan ini dapat memberikan wawasan untuk pengembangan teknik melompat. Pola lompatan saat menyundul bola atau tanpa bola menghasilkan karakteristik kinematik dan kinetik berbeda, bergantung pada posisi dan kondisi kepala pemain [6].

Penelitian kinematika telah digunakan untuk menganalisis gerakan manusia, seperti prediksi cedera lutut berdasarkan sudut tibia dan batang tubuh melalui video 2D [7]. Studi lain memanfaatkan perekaman gerak dan pemrosesan grafis untuk mengamati kecepatan gerak [8], [9]. Model interpolasi *spline* kubik menawarkan kurva mulus yang membantu dalam pengamatan pola gerakan [10], [11]. Kondisi batas *spline* berdampak pada hasil interpolasi, kondisi batas *natural* memiliki asumsi tentang nilai turunan di ujung data, sehingga sesuai untuk data di ujung yang dianggap tidak melengkung tajam dan menghasilkan kurva lebih halus di ujung [12]. Kondisi batas *not-a-knot* mengurangi dampak kekakuan di ujung dan tidak memerlukan asumsi khusus tentang nilai turunan. Keterbatasan kondisi batas dalam *spline* adalah pemilihan kondisi batasnya bergantung asumsi perilaku data, mempengaruhi akurasi di ujung interval, dan komputasi lebih kompleks [13]. Oleh karena itu, pemilihan kondisi batas *spline* perlu mempertimbangkan karakteristik fenomena yang dianalisis.

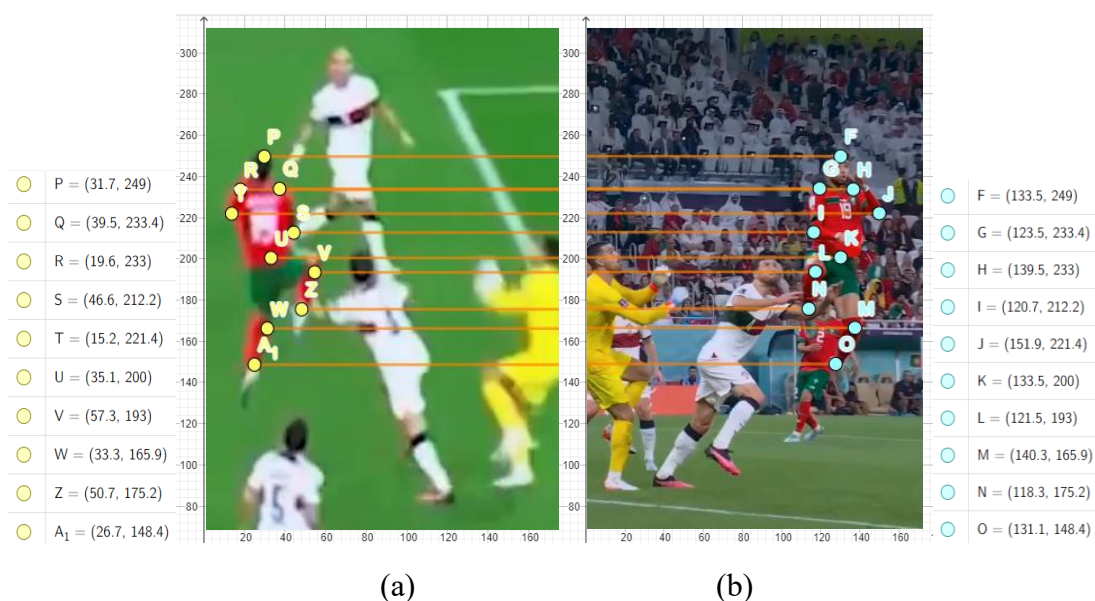
Dengan mempertimbangkan kelebihan dan keterbatasan masing-masing kondisi batas, penelitian ini membandingkan kondisi batas *spline natural* dan *not-a-knot* untuk memperoleh pendekatan yang paling sesuai dalam memodelkan gerakan lompatan En-Nesyri. Penelitian ini menganalisis lompatan fenomenal En-Nesyri menggunakan interpolasi *spline* kubik terhadap data posisi dari waktu ke waktu. Hasil interpolasi divisualisasikan dalam bentuk kurva posisi, kecepatan, dan percepatan segmen tubuh. Kurva dianalisis untuk mengidentifikasi pola lompatan dan membandingkan hasil interpolasi *spline* kubik dengan dua kondisi batas: *natural* dan *not-a-knot*. Belum ada penelitian yang melakukan komparasi *spline not-a-knot* dengan *spline natural*. Penelitian ini berfokus pada pola lompatan tanpa mempertimbangkan faktor eksternal. Tujuan kajian ini adalah menyajikan grafik dan menganalisis pola lompatan En-Nesyri menggunakan interpolasi *spline* kubik. Hasil aproksimasi dibandingkan untuk menentukan pendekatan interpolasi *spline* dengan kondisi batas yang paling sesuai. Sehingga, diharapkan dapat memberikan wawasan dalam pengembangan teknik melompat untuk menyundul bola.

2 Metode Penelitian

Objek penelitian ini adalah lompatan fenomenal yang mencapai 278 cm oleh En-Nesyri pada Piala Dunia 2022. Data diperoleh melalui video YouTube lompatan fenomenal arah depan dan

sampling. Video yang berlangsung selama 3 detik ini diubah menjadi beberapa *frame* menggunakan aplikasi *video to photo*, sehingga diperoleh 31 *frames* per 0,1 detik. Tiap *frame* diberikan titik pada segmen tubuh, kemudian dihitung posisinya pada koordinat kartesius 3D dengan aplikasi *geogebra*, ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 1.

Umumnya, untuk memperoleh hasil yang lebih akurat akan digunakan alat pendeteksi gerakan tubuh manusia berupa lampu sinar yang diletakkan pada beberapa segmen tubuh [10], [14]. Penelitian ini memanfaatkan alat sederhana untuk penerapan interpolasi *spline* kubik. Gambar 1(a) merepresentasikan bidang- xz , dimana sumbu tegak sebagai sumbu- z dan sumbu datar sebagai sumbu- x dan Gambar 1(b) merepresentasikan bidang- yz dengan sumbu tegak sebagai sumbu- z dan sumbu datar sebagai sumbu- y . Posisi segmen tubuh pada koordinat kartesius sumbu x, y, z digunakan untuk mengonstruksi persamaan interpolasi *spline* kubik pola gerakan lompatan fenomenal En-Nesyri berupa posisi, kecepatan, dan percepatan segmen tubuh. Persamaan kecepatan (v_x, v_y, v_z) dan percepatan (a_x, a_y, a_z) secara berurutan merupakan hasil dari turunan pertama dan turunan kedua dari persamaan *spline* posisi.



Gambar 1. Penentuan koordinat (a) arah samping, (b) arah depan.

Proses penentuan koordinat dimulai dari ketinggian kepala pada posisi tertinggi yaitu sesuai dengan ketinggian yang dicapai En-Nesyri 278 cm, kemudian kooordinat untuk detik lainnya ditentukan dengan mengacu kepada ketinggian yang dicapai En-Nesyri. Titik pengambilan koordinat difokuskan pada bagian tengah dari segmen tubuh, hanya kaki yang dipusatkan pada bagian mata kaki. Data hasil digitalisasi diaproksimasi lintasannya dengan fungsi *spline* kubik yaitu fungsi yang menghampiri titik-titik data secara sepotong-sepotong [11]. *Spline* kubik menghasilkan kurva polinomial orde tiga untuk tiap interval antar titik data sebagaimana pada

Persamaan (1) untuk n titik data terdapat $n - 1$ interval dan $4(n - 1)$ koefisien yang tidak diketahui.

$$s_i(t) = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3 \quad (1)$$

dimana $s_i(t)$ sebagai fungsi *spline* kubik dengan indeks bilangan bulat i dan bergantung terhadap waktu t . Turunan pertama, kedua, dan ketiga dari Persamaan (1) secara berurutan terlihat pada Persamaan (2), (3), (4)

$$s'_i(t) = b_i + 2c_i(t - t_i) + 3d_i(t - t_i)^2, \quad (2)$$

$$s''_i(t) = 2c_i + 6d_i(t - t_i), \quad (3)$$

$$s'''_i(t) = 6d_i. \quad (4)$$

Interpolasi *spline* kubik harus memenuhi beberapa kondisi. Pertama, fungsi *spline* harus melewati semua titik data atau konstanta di tiap kubik harus sama dengan nilai variabel terikat pada awal interval dengan $a_i = f_i$. Kedua, nilai tiap fungsi kubik yang berdekatan harus sama pada simpulnya (*knots*). Ketiga, fungsi yang melewati titik-titik data dan turunan pertama pada titik-titik tersebut adalah sama atau memenuhi kekontinuan turunan pertama.

Nilai koefisien b_i dan d_i ditentukan dengan membentuk persamaan menjadi kriteria c_i . Koefisien c_i sebanyak $n - 1$ diselesaikan dengan matriks tridiagonal dengan dua kondisi akhir yang harus dipenuhi. Pada bahasan ini dikerjakan dengan *spline* syarat batas *natural* dan *not-a-knot*. Keempat, kondisi batas *natural* mengharuskan turunan kedua simpul pertama dan simpul terakhir sama dengan nol dimana nilai $c_1 = 0$ dan $c_n = 0$. Sedangkan, kondisi batas *not-a-knot* memaksakan kontinuitas turunan ketiga pada simpul kedua dan simpul berikutnya [12]. Persamaan pertama (1) dan persamaan terakhir ($n - 1$) yang digunakan terlihat pada Persamaan (5)

$$\begin{aligned} h_2c_1 - (h_1 + h_2)c_2 + h_1c_3 &= 0 \\ h_{n-1}c_{n-2} - (h_{n-2} + h_{n-1})c_{n-1} + h_{n-2}c_n &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Sehingga, bentuk matriks *spline not-a-knot* menjadi sebagaimana Persamaan (6) berikut

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{n-1} \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_2 & -(h_1 + h_2) & h_1 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & h_{n-2} & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & h_{n-1} & -(h_{n-2} + h_{n-1}) & h_{n-2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 3(f[t_3, t_2] - f[t_2, t_1]) \\ \vdots \\ 3(f[t_n, t_{n-1}] - f[t_{n-1}, t_{n-2}]) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Bentuk matriks *spline natural* sedikit berbeda matriks inversnya, pada entri (1,1) dan (n, n) yang diisi dengan nilai 1 dan entri pada baris yang sama 0. Penurunan formula *spline* terdapat pada [12].

3 Hasil dan Pembahasan

Nilai maksimum hasil *spline* kubik dengan kondisi batas *not-a-knot* dan *natural* untuk pola gerakan lompatan fenomenal En-Nesyri dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai maksimum hasil *spline* kubik dengan kondisi akhir *not-a-knot* dan *natural*

			Kepala	Bahu kanan	Bahu kiri	Siku kanan	Siku kiri	Lutut kanan	Lutut kiri	Kaki kanan	Kaki kiri
<i>Not-a-knot</i>	<i>v</i>	<i>x</i>	103,64	98,80	112,85	109,70	88,91	109,93	130,85	291,24	97,80
		<i>y</i>	292,52	304,27	290,83	303,26	307,16	295,04	290,90	295,89	300,92
		<i>z</i>	136,88	142,10	135,85	187,30	194,10	213,18	162,58	152,67	146,71
	<i>a</i>	<i>x</i>	2235,73	2568,26	3480,18	2843,39	3397,93	2895,74	2819,58	10897,01	4150,84
		<i>y</i>	10937,95	10580,50	11320,75	11438,29	11957,04	10993,94	11691,83	11216,24	10614,31
		<i>z</i>	4020,68	4088,59	3659,78	4899,90	4942,18	4969,92	4590,04	4309,49	5810,92
<i>Natural</i>	<i>v</i>	<i>x</i>	103,64	98,80	112,85	108,93	88,91	109,93	130,85	291,24	114,27
		<i>y</i>	292,52	304,27	290,83	303,26	307,16	295,04	290,90	295,89	294,64
		<i>z</i>	139,05	144,41	137,85	164,79	150,69	127,61	129,59	144,06	195,85
	<i>a</i>	<i>x</i>	2244,51	2568,26	3478,80	2837,56	3397,93	2895,74	2819,58	10897,01	4184,17
		<i>y</i>	10937,95	10580,50	11320,75	11438,29	11957,04	10993,94	11691,83	11216,24	10614,31
		<i>z</i>	4496,68	4386,80	4120,89	5292,99	5347,60	5408,62	4936,10	4607,80	6211,25

Berdasarkan Tabel 1, nilai *spline not-a-knot* cenderung lebih besar dibandingkan *spline natural*. Nilai v_x kedua *spline* bernilai sama, hanya kaki kiri yang berbeda, *not-a-knot* 117,86 *cm/s* sedangkan *natural* 114,27 *cm/s*. Kecepatan maksimum kepala ditinjau dari sumbu-*x* dengan *spline not-a-knot* dan *natural* sama, yaitu 103,64 *cm/s*. Namun, pada kaki kiri terdapat perbedaan yang cukup signifikan, *spline not-a-knot* mencapai 117,86 *cm/s*, sedangkan *spline natural* sebesar 114,27 *cm/s*, sehingga terdapat selisih 3,59 *cm/s* atau sekitar 3,14%. Nilai percepatan *spline natural* cenderung lebih kecil daripada nilai percepatan *spline not a knot*.

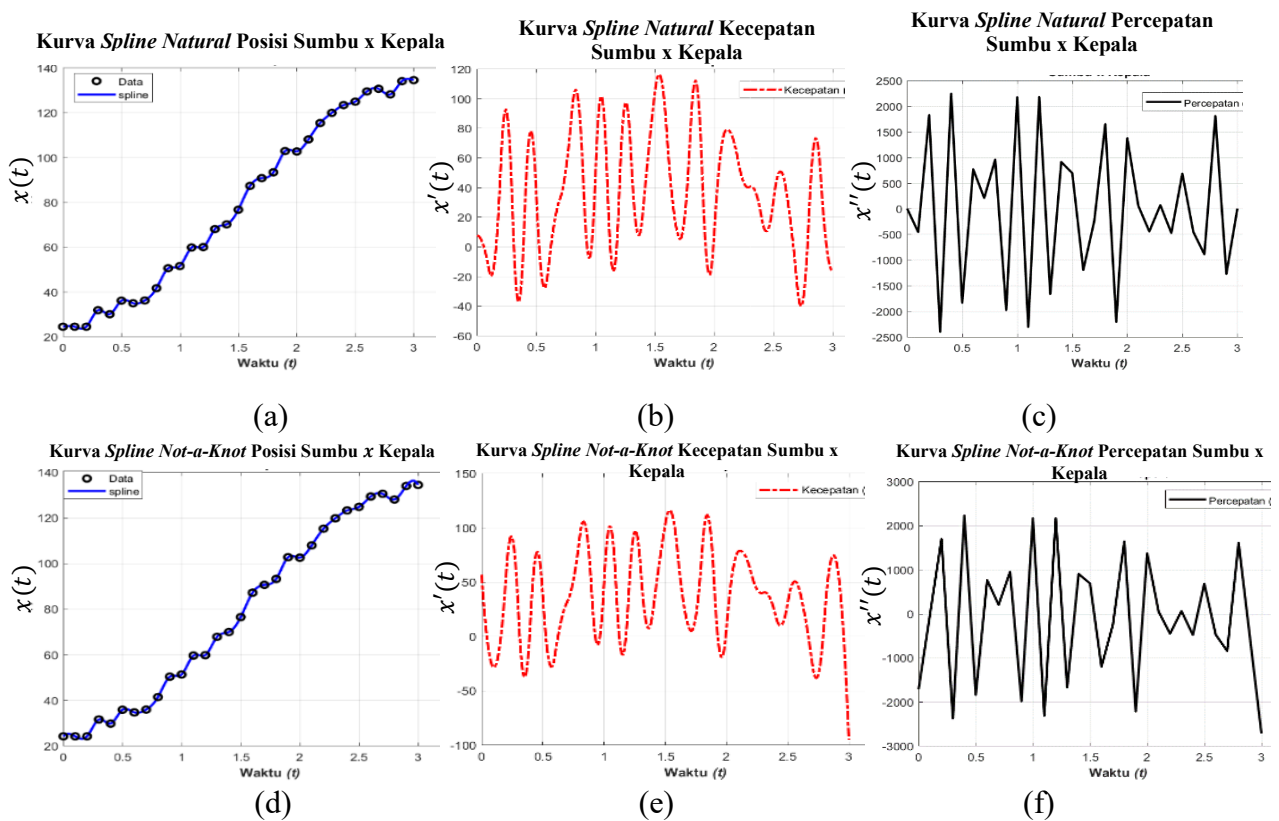
Untuk percepatan, *spline not-a-knot* juga cenderung menghasilkan nilai yang lebih besar. Sebagai contoh, percepatan maksimum lutut kiri pada *spline not-a-knot* mencapai 11690,71 *cm/s²*, sedangkan *spline natural* sebesar 10973,95 *cm/s²*, dengan selisih 716,76 *cm/s²* untuk *spline not-a-knot* dan 10993,04 *cm/s²* untuk *spline natural*, dengan selisih 5,71%. Secara keseluruhan, rata-rata percepatan *spline not-a-knot* lebih tinggi sekitar 5-7% dibanding *spline natural* pada sendi-sendi utama (lutut dan kaki), sementara perbedaan posisi relative kecil (<1%). Hal ini menunjukkan bahwa *spline not-a-knot* lebih sensitif terhadap gerakan eksplosif, khususnya pada fase tolakan dan kontak dengan bola. Sebaliknya, *spline natural* memberikan kurva yang lebih mulus pada interval awal dan akhir, dengan percepatan mendekati nol sehingga lebih merepresentasikan kontinuitas gerakan.

Estimasi percepatan yang lebih tinggi pada *spline not-a-knot*, khususnya pada lutut dan kaki, mengindikasikan adanya representasi gerakan yang lebih eksplosif, berkaitan erat dengan daya letak otot saat melakukan tolakan lompatan. Sebaliknya, *spline natural* memberikan hasil lebih halus pada interval awal dan akhir, yang merepresentasikan kesinambungan gerakan tubuh secara

keseluruhan. Dengan demikian, pemilihan kondisi batas pada *spline* tidak hanya memengaruhi hasil numerik, tetapi juga dapat mengubah interpretasi analisis kinematika.

3.1 Hasil Kurva *Spline* Kubik *Natural* dan *Not-a-Knot*

Ketinggian yang dicapai oleh atlet En-Nesyri diperhitungkan mulai dari atas permukaan tanah hingga kepala. Sehingga, pada bahasan ini akan ditampilkan kurva pola gerakan kepala atlet saja, Gambar 2 menampilkan kurva pola gerakan, baik posisi, kecepatan, maupun percepatan yang dialami kepala atlet ditinjau melalui sumbu x dengan *spline natural* dan *spline not-a-knot*. Sumbu datar sebagai waktu (satuan detik (s)) dan sumbu tegak sebagai besaran posisi (satuan *centimeter* (cm)), besaran kecepatan (satuan (cm/s)), dan besaran percepatan (satuan (cm/s^2)).



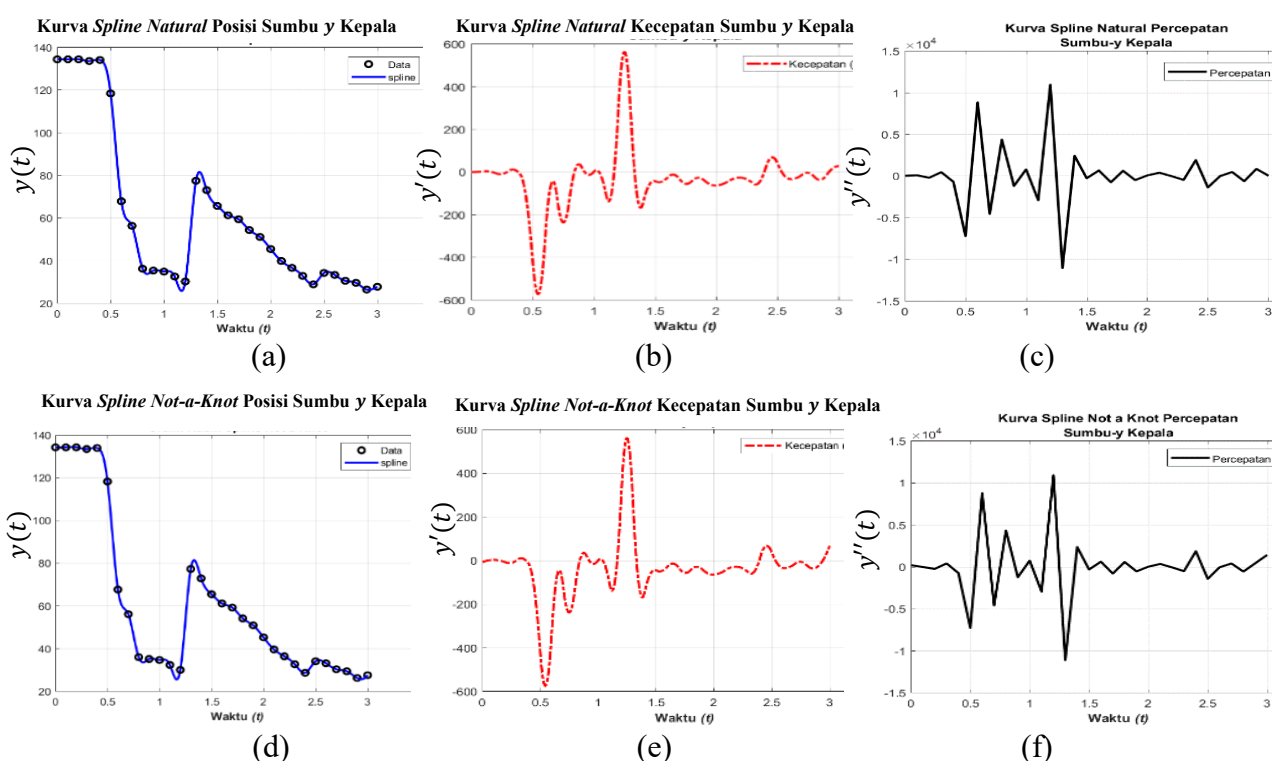
Gambar 2. Kurva pola gerakan kepala ditinjau dari sumbu x *spline natural* (a) x , (b) v_x , (c) a_x dan *not a knot* (d) x , (e) v_x , (f) a_x . Kurva memperlihatkan bahwa *spline natural* menghasilkan percepatan yang bernilai nol di awal dan akhir, sedangkan *spline not-a-knot* tetap memprediksi percepatan pada kedua interval tersebut, sehingga lebih merepresentasikan kondisi gerakan yang tidak dimulai dari diam.

Kurva posisi Gambar 2(a) dan 2(d) menampilkan aproksimasi pergerakan kepala, jika nilai posisi saat detik tertentu lebih besar daripada nilai saat detik sebelumnya, menandakan kepala bergerak ke kanan. Sebaliknya, apabila nilai posisi saat detik tertentu lebih kecil daripada nilai saat detik sebelumnya, menandakan kepala bergerak ke kiri. Terlihat jelas pada kurva posisi Gambar

2(a) dan 2(d) kepala konsisten bergerak ke kanan, terkadang sedikit menuju ke kiri mengikuti tubuh atlet yang bersiap menyundul bola.

Kurva kecepatan Gambar 2(b) dan 2(e) merepresentasikan besarnya perubahan posisi kepala mengalami peningkatan dan penurunan dengan besar nilai sebagaimana yang ditampilkan. Nilai positif menandakan kepala bergerak ke kanan dan nilai negatif menandakan kepala berubah posisinya ke arah yang berlawanan atau ke kiri. Gambar 2(e) detik 2,5-3 kecepatan kepala bernilai negatif, artinya kepala melambat dan menuju ke kiri, kemudian ke kanan, diketahui dari kurva yang bernilai positif.

Pada Gambar 2(c) di titik awal dan akhir kurva menuju angka nol. Hal ini mengindikasikan bahwa ada anggapan yang digunakan dengan pendekatan pola gerakan menggunakan *spline natural* tidak ada perubahan kecepatan di awal dan di akhir atau percepatannya tidak diaproksimasikan untuk pangkal dan ujung data. Sedangkan, Gambar 2(f) nilai percepatan kepala diaproksimasikan di awal dan akhir.



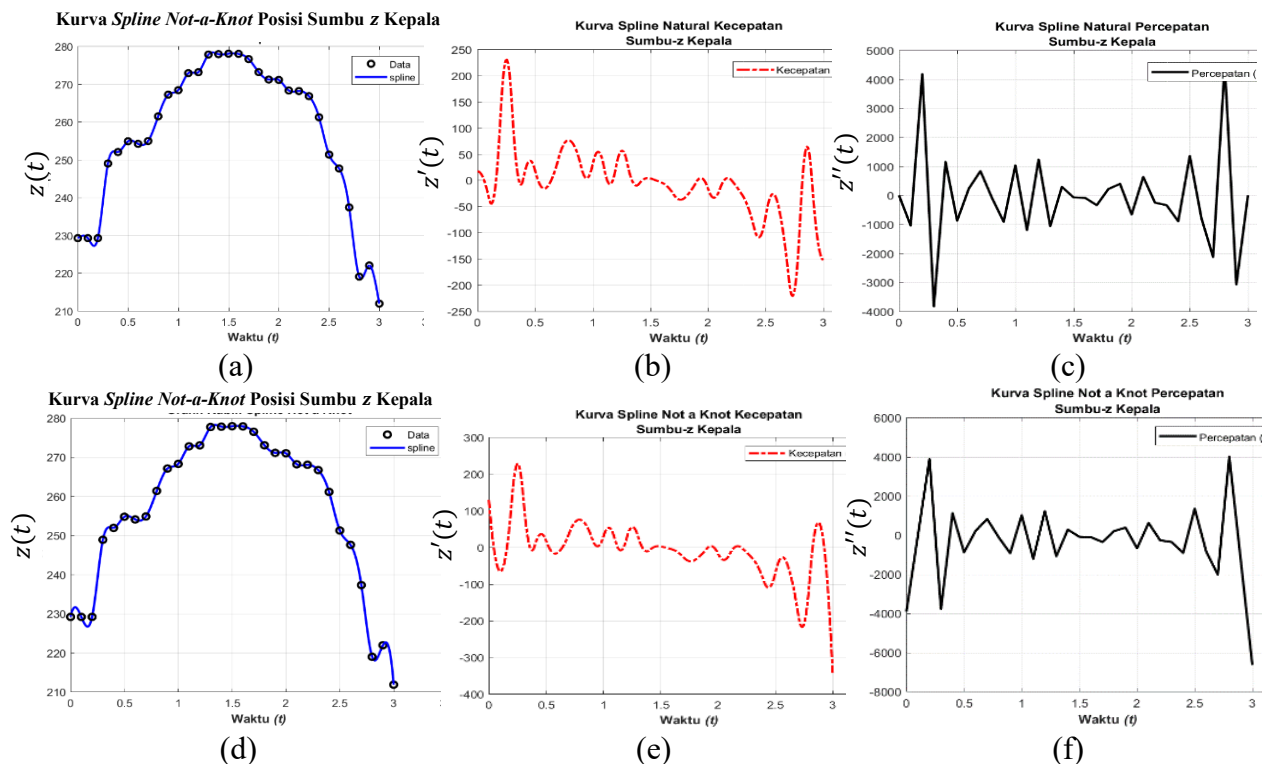
Gambar 3. Kurva pola gerakan kepala ditinjau dari sumbu y *spline natural* (a) y , (b) v_y , (c) a_y dan *not a knot* (d) y , (e) v_y , (f) a_y . Pola kurva menunjukkan adanya perpindahan signifikan kepala ke depan dan belakang menjelang tolakan dan saat menyundul bola. Perbedaan *spline* terlihat di interval awal dan akhir, di mana *not-a-knot* memberikan estimasi percepatan lebih tinggi dibandingkan *natural*.

Posisi kepala ditinjau dari sumbu y (Gambar 3(a) dan 3(d)) menunjukkan pergerakan kepala, jika nilai posisi saat detik tertentu lebih besar daripada nilai saat detik sebelumnya, menandakan

kepala bergerak ke depan. Sebaliknya, apabila nilai posisi saat detik tertentu lebih kecil daripada nilai saat detik sebelumnya, menandakan kepala bergerak ke belakang.

Pada Gambar 3(b) dan 3(d) kepala atlet mulai detik 0,5 terjadi perpindahan drastis, dari awalnya maju kemudian mundur ke belakang, kondisi ketika bersiap untuk menyundul bola. Pada detik 1,4 barulah kepala atlet maju dan mengenai bola. Saat detik 0,3 kepala mundur dan detik 1,1 kepala maju ke depan.

Kurva kecepatan Gambar 3(e) detik 1,2 kurva naik, artinya kecepatan kepala meningkat kemudian kembali menurun. Detik 2-3 kepala awalnya mengarah ke depan diketahui dengan nilai positif yang besar nilai kecepatannya sesuai dengan yang ditampilkan. Nilai kecepatan yang mendekati nol, mengartikan perubahan posisi kepala tidak terlalu berbeda posisi saat detik sebelumnya dengan detik setelahnya.



Gambar 4. Kurva pola gerakan kepala ditinjau dari sumbu z *spline natural* (a) z , (b) v_z , (c) a_z dan *not a knot* (d) z , (e) v_z , (f) a_z . Kurva memperlihatkan bahwa kepala mencapai ketinggian maksimum sekitar detik ke-1,5 sebelum turun kembali setelah menyundul bola. Pada *spline natural*, percepatan di awal dan akhir cenderung nol, sedangkan *spline not-a-knot* memberikan nilai percepatan di kedua ujung interval, menegaskan eksplosif gerakan vertikal.

Kurva percepatan menandakan besarnya perubahan kecepatan meningkat atau melambat tiap satuan waktu. Dapat diketahui melalui Gambar 4(a) dan 4(d) posisi kepala berada pada posisi maksimum ketika detik 1,5. Posisi kepala ditinjau dari sumbu z pada Gambar 4(a) dan 4(d)

menunjukkan jika nilai posisi saat detik tertentu lebih besar daripada nilai saat detik sebelumnya, menandakan kepala bergerak ke atas. Sebaliknya, apabila nilai posisi saat detik tertentu lebih kecil daripada nilai saat detik sebelumnya, kepala bergerak ke bawah.

Pada Gambar 4(a) dan 4(d) detik 1-2 kepala naik ke atas dan turun pada detik selanjutnya, kondisi ketika atlet berusaha agar kepalanya mencapai ketinggian yang sama dengan bola. Detik 1,7-2,0 kepala atlet tidak mengalami perpindahan posisi yang besar, atlet telah mencapai ketinggian bola dan mulai terjadi penurunan beberapa detik setelah menyundul bola, hingga akhirnya pada detik 2,2 benar-benar terjadi penurunan posisi kepala. Pada detik 3 posisi kepala tidak lagi sama dengan posisi awalnya. Kepala atlet tidak besar perubahan posisinya pada detik 1,2-1,5 sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4(a) dan 4(d) tersebut.

Pada Gambar 4(e) terjadi perubahan yang jelas terlihat pada detik 0-0,2 dan 2,9-3 dikarenakan fungsi didekati dengan *not-a-knot*. Pada detik 1,2-1,5 perubahan kecepatan mendekati nilai nol artinya posisi kepala pada detik tersebut tidak besar perpindahannya.

Kurva Gambar 4(a) dan 4(d) menampilkan posisi kepala, lintasannya mengikuti titik data dengan mulus. Terlihat jelas perbedaan *spline natural* dan *not-a-knot* bila diperhatikan di interval waktu pertama dan terakhir pada kurva kecepatan dan percepatannya. Pada kurva kecepatan kepala Gambar 4(b) *spline natural* pada interval waktu awal, detik 0-0,1 kurva menuju nol dan akhir detik 2,8-3 kurva menurun. Sedangkan, kurva *not-a-knot* pada Gambar 3(e) kurva detik 0-0,1 dan 2,9-3,0 melebar di pangkal dan ujung. Tidak ada perubahan kecepatan (percepatan (a_z)) yang terlihat di awal dan di akhir kurva percepatan *spline natural* Gambar 3(c). Sedangkan, *spline not-a-knot* pada interval waktu awal dan akhir besaran percepatannya juga diprediksi, sehingga tidak nol pada Gambar 4(f).

3.2 Perbandingan Kurva *Spline Natural* dan *Spline Not-a-Knot*

Nilai kecepatan dan percepatan positif menandakan segmen tubuh mengalami perubahan posisi dan perubahan kecepatan ke kanan, depan, dan atas. Sedangkan, besaran negatif menggambarkan bahwa segmen tubuh mengalami perubahan posisi dan perubahan kecepatan berlawanan arah atau ke kiri, belakang, dan bawah bergantung dari sumbu yang ditinjau. Nilai kecepatan dan percepatan yang mendekati nol mengartikan kecepatan saat itu adalah tetap atau kepala tidak mengalami perubahan kecepatan. Interpretasi ini berlaku untuk semua kurva pola gerakan segmen tubuh baik kurva kubik *spline not a knot* maupun *spline natural* sesuai sumbu yang ditinjau.

Perbedaan *spline* kubik kondisi batas *natural* dan *not-a-knot* terlihat pada interval waktu pertama dan terakhir, hampir tidak menunjukkan perbedaan pada interval waktu yang lain. Perbedaan terjadi karena syarat batas (kondisi awal dan akhir) persamaan fungsi *spline* yang

dipilih berbeda. *Spline natural* mensyaratkan turunan kedua sama dengan nol di titik-titik ujung interval data atau turunan kedua fungsi *spline* pertama dan terakhir dianggap kontinu. Sedangkan *spline not-a-knot* mensyaratkan turunan ketiga fungsi *spline* pertama sama dengan turunan ketiga fungsi *spline* kedua saat nilai t_2 . Kondisi *not-a-knot* juga menerapkan turunan ketiga fungsi *spline* sebelum terakhir adalah sama dengan turunan ketiga fungsi *spline* terakhir saat t_n .

Kurva *spline not-a-knot* menunjukkan adanya kecenderungan pada titik ujung data. Pada detik awal dan akhir, kurva condong ke bawah atau ke atas. Bila dibandingkan dengan kurva *spline natural*, kurva *not-a-knot* memberikan pendekatan pola gerakan yang lebih umum, karena kondisi batas bawah dan batas atas dari suatu gerakan tetap didekati dengan mencari koefisien yang tidak diketahuinya. Perhitungan batas awal tentu sedikit memberikan pergeseran pada beberapa titik data di tampilan kurva, hal inilah yang menyebabkan kurva *spline not-a-knot* banyak lebih melebar hasilnya untuk interval waktu pertama dan interval waktu terakhir. Kecepatan dan percepatan segmen tubuh saat awal dapat diketahui bila diprediksi menggunakan kondisi batas *not-a-knot*.

4 Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan model kurva *spline* kubik yang diperoleh, *spline not a knot* lebih sesuai digunakan apabila ingin diprediksi percepatan segmen tubuh saat gerakan dimulai bukan dari diam. Data gerakan lompatan fenomenal En-Nesyri pada penelitian ini dimulai dari posisi kaki sudah tidak lagi menyentuh tanah. Posisi kepala diketahui berada pada ketinggian maksimum pada detik 1,5. Hasil analisis memperlihatkan adanya perbedaan nilai maksimum antara interpolasi *spline* kubik dengan kondisi batas *natural* dan *not-a-knot*. Secara umum, *spline not-a-knot* cenderung menghasilkan nilai percepatan lebih tinggi pada segmen tubuh utama dengan selisih rata-rata sekitar 5-7% dan kecepatan kaki kiri lebih besar 3,14% dibanding *spline natural*, sedangkan pada beberapa titik, seperti percepatan sumbu- z kepala, nilai maksimum yang diperoleh adalah $4020,68 \text{ m/s}^2$ untuk *not-a-knot* dan $4496,68 \text{ m/s}^2$ untuk *natural*. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan kondisi batas berpengaruh terhadap interpretasi gerakan, khususnya fase eksplosif. Metode *spline* kubik dengan kondisi batas *natural* dan *not a knot* berpengaruh kepada visualisasi kurva untuk interval waktu pertama dan interval waktu akhir dalam pola gerakan. Hasil pendekatan model dengan menggunakan metode kubik *spline natural* tidak memprediksi kecepatan dan percepatan gerakan pada interval batas awal dan batas akhir.

Penelitian ini dapat dikembangkan agar diperoleh hasil dengan tujuan yang diinginkan dengan mengkaji pola gerakan lainnya yang dapat menghasilkan lompatan seperti yang diinginkan. Kinematika studi ini dapat dimanfaatkan serta digunakan sebagai rujukan untuk

penelitian biomekanika olahraga sepak bola dengan metode yang sama. Penelitian ini terbatas pada data kinematik lompatan fenomenal yang berhasil dilakukan En-Nesyri pada Piala Dunia 2022 dengan ketinggian mencapai 2,78 meter dari atas tanah hingga kepala, kajian lanjutan seperti data kinetik belum dilakukan. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan mengkaji kinetika lompatan fenomenal ini.

5 Daftar Pustaka

- [1] S. N. Fajrin, Agustiyawan, Purnamadyawati, and D. S. Mahayati, "Literature Review : Hubungan Koordinasi Terhadap Keterampilan Menggiring Bola Pada Pemain Sepak Bola," *Indonesian Journal of Physiotherapy*, vol. 1, no. 1, pp. 6–12, 2021, doi: <https://doi.org/10.52019/ijpt.v1i1.2605>.
- [2] R. S. Agustina, *Buku Jago Sepak Bola*, 1st ed. Tangerang Selatan: Cemerlang, 2020.
- [3] T. Zheng *et al.*, "Effects of plyometric training on jump, sprint, and change of direction performance in adolescent soccer player: A systematic review with meta-analysis," *PLoS ONE*, vol. 20, no. 4 April, pp. 1–20, 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0319548.
- [4] F. Gu, "Biomechanics Analysis of Side Header in Soccer Players," 2016, pp. 1305–1308.
- [5] G. Pisa, "En-Believable Youssef En-Nesyri Jumped 9 ft 1 inch For Morocco's World Cup Winner vs Portugal. Higher Than Ronaldo for Juventus in 2019.," *The Sun UK Edition*. [Online]. Available: <https://www.thesun.co.uk/sport/20731042/en-nesyri-header-morocco-world-cup-ronaldo-portugal/>
- [6] R. Reina, J. L. L. Elvira, M. Valverde, A. Roldán, and J. Yanci, "Kinematic and kinetic analyses of the vertical jump with and without header as performed by para-footballers with cerebral palsy," *Sports*, vol. 7, no. 9, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/sports7090209>.
- [7] R. K. Straub, A. Horgan, and C. M. Powers, "Clinical estimation of the use of the hip and knee extensors during athletic movements using 2D video," *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 37, no. 5, pp. 458–462, 2021, doi: <https://doi.org/10.1123/jab.2021-0055>.
- [8] A. Paoli, A. Bianco, A. Palma, and G. Marcolin, "Training the vertical jump to head the ball in soccer," *Strength and Conditioning Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 80–85, 2012.
- [9] A. Mukhtar and M. A. Setiabudi, "Sundulan Bola Sepak (Heading): Potensi Analisis Berbasis Hukum Kekekalan Momentum," *Ejournal.Unibabwi.Ac.Id*, pp. 1–5, 2021.
- [10] P. M. McGinnis, *Biomechanics of Sport and Exercise*, 3rd ed. United States of America, 2013.

- [11] E. Syafwan, M. Syafwan, and T. Shandy, "Pengembangan Metode Interpolasi Splin Kubik Terapit dan Aplikasinya pada Masalah Pelacakan Trajektori Objek," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIIK)*, vol. 9, no. 5, pp. 943-950, 2022.
- [12] S. C. Chapra, *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientist*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [13] J. I. Arnes, A. Hapfelmeier, A. Horsch, and T. Braaten, "Greedy Knot Selection Algorithm for Restricted Cubic Spline Regression," *Frontiers in Epidemiology*, vol. 3, pp. 1-14, 2023.
- [14] P. Barzyk, P. Zimmermann, M. Stein, D. Keim, and M. Gruber, "AI-smartphone markerless motion capturing of hip, knee, and ankle joint kinematics during countermovement jumps," *European Journal of Sport Science*, pp. 1452–1462, 2024.