

ANALISIS LINTASAN BOLA TENDANGAN BEBAS

Imran Rusyana, Yuda Farid, Ahmad Ridwan

*Kelompok Studi Mahasiswa 102 FM Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung,
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132 Indonesia*

Abstrak

Paper ini akan menganalisis secara fisis berbagai bentuk lintasan bola pada tendangan bebas dalam permainan sepak bola. Aspek fisika yang akan dibahas adalah hal-hal yang mempengaruhi lintasan tersebut. Diantaranya adalah gaya gravitasi, prinsip Bernoulli, dan efek magnus.

Kata Kunci: Gerak Parabola, Hukum Bernoulli, Efek Magnus.

1. Pendahuluan

Banyak sekali konsep fisika yang dapat kita pahami dari kehidupan sehari-hari. Sayangnya, banyak orang yang tidak menyadari hal tersebut. Contoh yang paling mudah adalah dalam olahraga. Hampir setiap hari kita berolahraga, namun hanya sedikit orang yang memahami olahraga ditinjau secara fisika. Masyarakat berolahraga sebatas untuk menyehatkan badan saja tanpa memperhatikan sisi lain dari olahraga.

Salah satu jenis olahraga yang paling disukai di dunia adalah sepakbola. Orang-orang menyukai sepakbola karena permainan itu sarat dengan teknik-teknik yang memukau. Yang fantastis, ternyata sepakbola juga erat kaitannya dengan fisika. Meskipun para pemain di lapangan tidak berpikir tentang fisika, namun apa yang mereka lakukan sebenarnya merupakan permainan fisika. Pemain sepakbola profesional yang dilengkapi dengan ilmu fisika tentu akan dapat memperbaiki kemampuannya.

Dari sekian banyak teknik dalam permainan sepakbola, salah satu aspek yang mendapat perhatian khusus adalah eksekusi bola-bola mati, misalnya tendangan pinalti, tendangan sudut, dan tendangan bebas. Wajar bila bola-bola mati itu mendapat perhatian khusus karena biasanya sangat menentukan bagi kemenangan suatu tim. Unikny, tendangan-tendangan itu membutuhkan banyak sekali kelihaihan intuitif dari sang penendang karena adanya kombinasi berbagai konsep fisika dalam satu kali tendangan.

Pada *paper* ini akan difokuskan pembahasan tentang tendangan bebas. Kita tentu masih ingat gol indah Roberto Carlos pada pertandingan Brazil melawan Prancis di Piala Konfederasi tahun 1998. Saat itu Carlos mengambil eksekusi tendangan bebas dari jarak lebih 30 meter di depan gawang. Di depannya, para pemain belakang tim Prancis membentuk pagar pemain. Dengan tenang, Carlos menendang bola dengan ujung bagian luar kaki kirinya. Bola bergerak dengan kecepatan lebih dari 100 km/jam, melambung sekitar 1 meter melewati kepala para pagar betis dan secara tiba-tiba membelok tepat mengenai tiang gawang sehingga bola masuk ke gawang. Kiper Fabien Barthez hanya diam terperangah melihat gawangnya kebobolan. Tepuk tangan pun menggemuruh menyambut gol yang luar biasa itu.

Kita tentu bertanya-tanya mengapa pemain sepakbola seperti Roberto Carlos bisa melakukan tendangan bebas yang luar biasa itu. Untuk memahaminya, perlu dilakukan analisis fisika yang cukup mendalam. Konsep yang terkait diantaranya gerak parabola, garis arus, hukum Bernoulli, dan efek Magnus.

2. Gerak Parabola

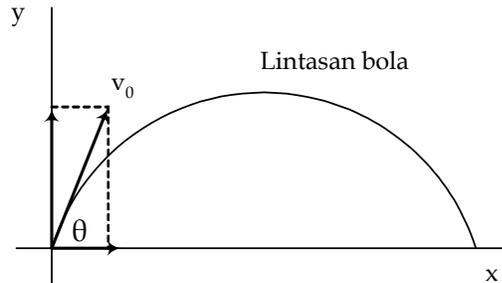
Gerak parabola telah dikenal sejak tingkat SMA atau bahkan SMP. Suatu bola yang ditendang dengan sudut elevasi (θ) tertentu akan mengalami gerak melengkung seperti parabola. Gerak parabola ini terutama disebabkan oleh pengaruh gaya gravitasi bumi. Tanpa adanya gravitasi bumi, bola akan bergerak lurus ke atas. Gaya gravitasi memberikan gaya ke arah bawah sehingga kecepatan vertikalnya semakin berkurang. Ketika mencapai ketinggian maksimum, kecepatan vertikalnya nol. Selanjutnya bola mengalami percepatan sesuai dengan hukum II Newton, $\sum F = ma$. Bentuk lintasan parabola tergantung sudut elevasi dan kecepatan yang diberikan.

Secara matematik, gerak parabola dapat diuraikan pada sumbu-x dan sumbu-y. Pada sumbu-x, benda dianggap mengalami gerak lurus beraturan. Persamaan geraknya dirumuskan

$$x = v_0 \cos \theta \cdot t \quad (1)$$

Pada sumbu-y, benda mengalami gerak lurus berubah beraturan. Persamaan geraknya dirumuskan

$$y = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

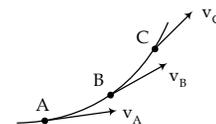


Gambar 1. Gerak Parabola.

Dengan menggabungkan beberapa persamaan, kita bisa mendapatkan sudut untuk tendangan terjauh, yaitu sebesar 45° . Jadi, seorang penendang bebas yang ingin menghasilkan tendangan dengan jarak terjauh, ia harus menendang bola dengan kakinya sehingga bola tersebut mendapat kecepatan awal dengan sudut 45° . Namun perlu diperhatikan bahwa jarak tendangan terjauh bukan berarti tendangan yang paling kuat. Selain itu, dalam hal ini penulis mengabaikan faktor gesekan udara.

3. Garis Alir

Suatu partikel di dalam fluida mengalir akan menempuh lintasan tertentu. Lintasan itu membentuk suatu susunan garis yang disebut garis alir (*flow line*). Ada dua macam aliran fluida, yaitu aliran garis arus (*streamline*) dan aliran turbulen.



Gambar 2. Garis Arus.

Pada aliran tunak, kecepatan v di suatu titik konstan terhadap waktu. Kecepatan v di titik A tidak berubah terhadap waktu sehingga tiap-tiap partikel yang tiba di A akan terus lewat dengan kelajuan dan arah yang sama. Hal ini juga berlaku untuk titik B dan C. Lintasan yang menghubungkan A, B, dan C itulah yang disebut garis arus.

Ketika melebihi suatu kelajuan tertentu, aliran fluida menjadi turbulen. Aliran turbulen ditandai dengan adanya aliran berputar. Ada partikel-partikel yang arah

gerakannya berbeda dan bahkan berlawanan dengan arah gerak keseluruhan fluida. Untuk mengetahui apakah suatu aliran zat cair merupakan aliran garis arus atau turbulen, kita cukup menjatuhkan sedikit tinta atau pewarna ke dalam zat cair itu. Jika tinta menempuh lintasan yang lurus atau melengkung tetapi tidak berputar-putar membentuk pusaran, maka aliran fluida itu berupa garis arus. Akan tetapi, bila tinta kemudian mengalir secara berputar-putar dan akhirnya menyebar, aliran fluida itu termasuk turbulen.

Udara merupakan suatu fluida yang dapat dikelompokkan sebagai fluida mengalir. Dalam *paper* ini, penulis membatasi jenis aliran yang dibahas tanpa adanya turbulen. Untuk aliran turbulen, perlu pembahasan lebih lanjut di luar konteks *paper* ini.

4. Hukum Bernoulli

Apa yang terjadi jika suatu fluida mengalir dengan kecepatan yang berbeda-beda? Pada abad ke-18, Daniel Bernoulli menemukan bahwa tekanan pada daerah dengan kecepatan fluida yang rendah akan lebih besar dibandingkan dengan tekanan pada daerah dengan kecepatan fluida yang lebih tinggi. Secara matematik, hukum ini dirumuskan

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = C ; \text{ dengan } C \text{ sebagai konstanta} \quad (3)$$

Kebanyakan tendangan bebas mengikuti hukum Bernoulli ini. Bola akan membelok seperti pisang karena salah satu sisi bola memiliki tekanan yang lebih rendah dibanding sisi lainnya. Tendangan 'pisang' ini mengakibatkan lintasan bola tidak sepenuhnya parabola yang simetris. Permasalahan selanjutnya, faktor apakah yang menyebabkan tekanan di salah satu sisi bola lebih besar dibanding tekanan di sisi lainnya?

5. Efek Magnus Sepakbola

Perbedaan tekanan menimbulkan bola bergerak dalam lintasan 'melengkung' karena ada bagian yang mengalami tekanan yang besar. Tekanan ini rupanya dihasilkan oleh medium, yakni udara, melalui efek aksi reaksi sesuai hukum III Newton. Bola yang berotasi dengan arah tertentu sesuai petunjuk jarum jam (searah

atau berlawanan arah) akan mempercepat atau memperlambat kecepatan udara di sekitar bola tersebut. Peristiwa ini dinamakan efek magnus untuk menghormati peneliti pertama tentang hal itu, Gustav Magnus.

Efek Magnus menurut referensi [1] dirumuskan sebagai

$$\vec{F}_L = C_L \rho D^3 f v \hat{F} \quad (4)$$

dengan

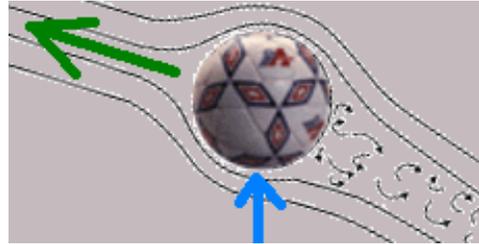
C_L : konstanta,

ρ : massa jenis udara,

D : diameter bola

f : frekuensi putaran bola,

\hat{F} : vektor satuan dari gaya Magnus yang arahnya tegak lurus kecepatan bola dan bergantung pada arah putaran bola.



Gambar 3. Bola dengan efek magnus.

Pada saat menendang bola, misalkan bola dibuat spin ke depan (searah jarum jam dilihat dari samping, ke sumbu- x). Kecepatan aliran udara di bagian atas bola lebih rendah dari pada di bagian bawahnya sehingga tekanan di bagian atas lebih tinggi daripada di bawah bola. Hal ini menyebabkan bola akan melengkung ke bawah. Jadi, bola seolah-olah keluar ke atas namun kemudian ternyata menikung tajam. Lintasan bola berbentuk parabola tetapi setelah mencapai tinggi maksimum lintasan bola menjadi membelok tajam. Hal ini terjadi akibat efek magnus dan peristiwa ini dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\sum F = ma$$

$$F_L - mg\hat{j} = m(a_x\hat{i} + a_y\hat{j})$$

$$C_L \rho D^3 f (-v_x \hat{j} + v_y \hat{i}) - mg\hat{j} = m(a_x \hat{i} + a_y \hat{j}) \quad (5)$$

dari persamaan (5), kita ambil perumusan per komponen (\hat{i} dan \hat{j}).

komponen i

$$C_L \rho D^3 f v_y = m a_x$$

$$C_L \rho D^3 f v_y = m \frac{dv_x}{dt} \quad (6)$$

komponen j

$$-C_L \rho D^3 f v_x - mg = m a_y$$

$$-C_L \rho D^3 f v_x - mg = m \frac{dv_y}{dt} \quad (7)$$

$$C_L \rho D^3 f \frac{dv_y}{dt} = m \frac{d^2 v_x}{dt^2} \quad (8)$$

$$-C_L \rho D^3 f \frac{dv_x}{dt} = m \frac{d^2 v_y}{dt^2} \quad (9)$$

Substitusi persamaan (6) dan (9), diperoleh

$$-C_L \rho D^3 f v_y = \frac{m^2}{C_L \rho D^3 f} \frac{d^2 v_y}{dt^2} \quad (10)$$

sementara substitusi persamaan (7) dan (8) menghasilkan

$$-C_L \rho D^3 f v_x - mg = \frac{m^2}{C_L \rho D^3 f} \frac{d^2 v_x}{dt^2} \quad (11)$$

Misalkan

$$v_y(t) = -A \sin(\omega t) + v_0 \sin(\theta) \cos(\omega t) \quad (12)$$

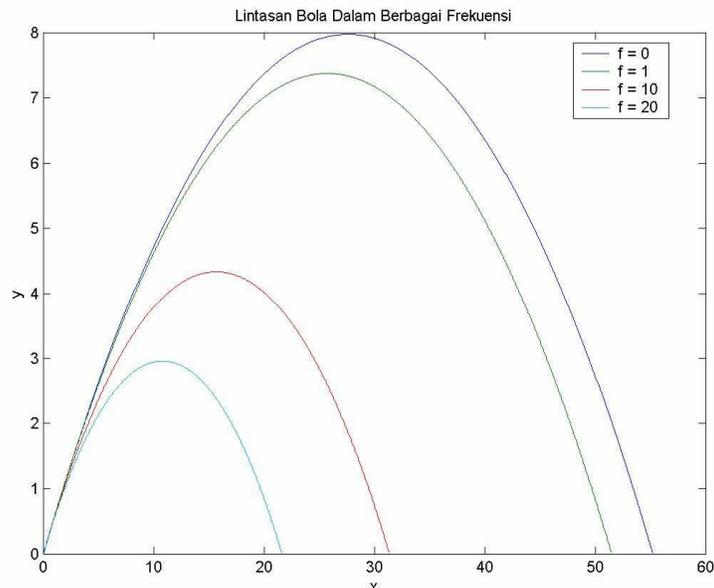
$$v_x(t) = -\frac{g}{\omega} + A \cos(\omega t) + v_0 \sin(\theta) \sin(\omega t) \quad (13)$$

Dengan $\omega = \frac{C_L \rho D^3 f}{m}$ dan $A = \frac{(g + v_0 \cos(\theta) \omega)}{\omega}$, maka

$$y = \frac{A}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{v_0 \sin(\theta)}{\omega} \sin(\omega t) - \frac{A}{\omega} \quad (14)$$

$$x = \frac{-g}{\omega} t + \frac{A}{\omega} \sin(\omega t) - \frac{v_0 \sin(\theta)}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{v_0 \sin(\theta)}{\omega} \quad (15)$$

Dari persamaan-persamaan tersebut kemudian dapat dibuat grafik sebagai berikut



Gambar 4. Lintasan bola dengan spin ke depan.

Peristiwa sebaliknya akan terjadi jika bola dibuat spin ke belakang (berlawanan jarum jam). Kecepatan aliran udara di bagian atas bola lebih cepat dari pada bagian bawahnya sehingga tekanan di bagian atas bola lebih rendah daripada bagian bawahnya dan menyebabkan bola akan terangkat sedikit. Hal ini rupanya dipengaruhi juga oleh efek magnus dan dapat dirumuskan

$$\begin{aligned}\sum F &= ma \\ F_L - mg\hat{j} &= m(a_x\hat{i} + a_y\hat{j}) \\ C_L\rho D^3 f(v_x\hat{j} - v_y\hat{i}) - mg\hat{j} &= m(a_x\hat{i} + a_y\hat{j})\end{aligned}\quad (16)$$

dari persamaan (12), kita ambil perumusan per komponen (\hat{i} dan \hat{j}).

komponen i

$$\begin{aligned}-C_L\rho D^3 f v_y &= m a_x \\ -C_L\rho D^3 f v_y &= m \frac{dv_x}{dt}\end{aligned}\quad (17)$$

$$-C_L\rho D^3 f \frac{dv_y}{dt} = m \frac{d^2 v_x}{dt^2}\quad (19)$$

komponen j

$$\begin{aligned}C_L\rho D^3 f v_x - mg &= m a_y \\ C_L\rho D^3 f v_x - mg &= m \frac{dv_y}{dt}\end{aligned}\quad (18)$$

$$C_L\rho D^3 f \frac{dv_x}{dt} = m \frac{d^2 v_y}{dt^2}\quad (20)$$

Substitusi persamaan (17) dan (20), diperoleh

$$-C_L\rho D^3 f v_y = \frac{m^2}{C_L\rho D^3 f} \frac{d^2 v_y}{dt^2}\quad (21)$$

sementara substitusi persamaan (18) dan (19) menghasilkan

$$C_L\rho D^3 f v_x - mg = \frac{m^2}{C_L\rho D^3 f} \frac{d^2 v_y}{dt^2}\quad (22)$$

Misalkan

$$v_y = A \sin(\omega t) + v_0 \sin(\theta) \cos(\omega t)\quad (23)$$

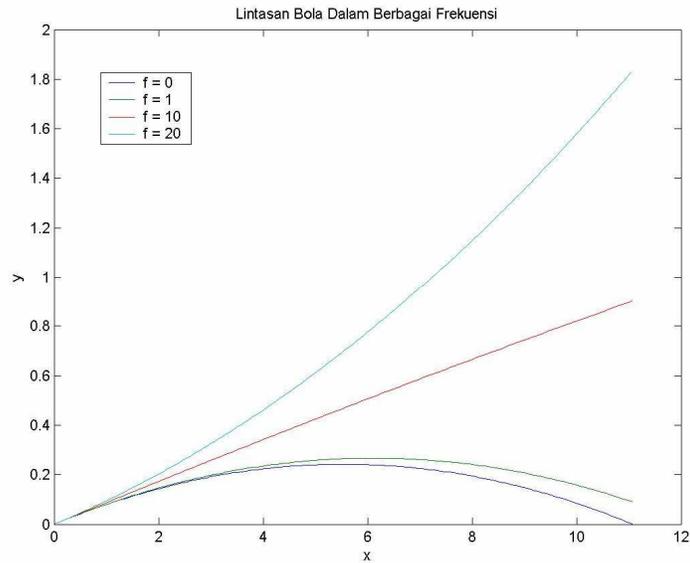
$$v_x = \frac{g}{\omega} + A \cos(\omega t) - v_0 \sin(\theta) \sin(\omega t)\quad (24)$$

Dengan $\omega = \frac{C_L\rho D^3 f}{m}$ dan $A = \frac{(g + v_0 \cos(\theta)\omega)}{\omega}$, maka

$$y = -\frac{A}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{v_0 \sin(\theta)}{\omega} \sin(\omega t) + \frac{A}{\omega}\quad (25)$$

$$x = \frac{g}{\omega} t + \frac{A}{\omega} \sin(\omega t) + \frac{v_0 \sin(\theta)}{\omega} \cos(\omega t) - \frac{v_0 \sin(\theta)}{\omega} \quad (26)$$

Akhirnya, dari persamaan – persamaan tersebut dapat dibuat grafik sebagai berikut



Gambar 5. Lintasan bola dengan spin ke belakang.

Bagaimana jika spin bola dibuat menyamping? Atau dengan kata lain, arah spinnya tegak lurus arah kecepatan bola? Tentunya lintasan bola akan membelok ke arah samping. Peristiwa ini bisa kita lihat pada kebanyakan tendangan bebas yang dilakukan oleh pemain sepakbola profesional. Sayangnya, formulasi matematik untuk kasus ini sangatlah rumit sehingga tidak dibahas di sini ^^ (bilang aja gak bisa! He...he...) Meski demikian, perumusannya tetap serupa dengan perumusan kasus spin ke depan atau spin ke belakang.

Referensi

- [1] Wheelan P M and Hodgson M J, 1978, *Essential Physics* (London : John Murray)
- [2] Carini J P, 1999, <http://carini.physics.indiana.edu/E105/spinning-balls.html>
- [3] Asai T, Akatsuka T, 1998, "The Physics of Footbal" *Phys. World* **11** (6) 25 – 7
- [4] Reilly T (ed), 1996, *Science and Soccer* (London: E & FN Spon)