**TUMBUKAN**

 Salah satu penerapan hukum kekekalan momentum adalah pada peristiwa tumbukan dua benda. Tumbukan dibagi menjadi tiga jenis yaitu tumbukan lenting sempurna, tumbukan tidak lenting sama sekali, dan tumbukan lenting sebagian.

1. **Tumbukan Lenting Sempurna**

Seorang pemain biliar memukul bola putih secara perlahan tanpa memberi efek putaran menuju bola merah yang diam. Bola putih kemudian menumbuk bola merah. Sesaat sesudah tumbukan bola putih menjadi diam dan bola merah bergerak dengan kecepatan yang hampir sama dengan kecepatan datangnya bola putih.

Peristiwa tumbukan antara bola putih (1) dan bola merah (2) dapat dilukiskan pada diagram Gambar 1.

tumbukan

diam

diam

Gambar 1. Tumbukan dua bola bilyar

Asalkan gaya luar yang bekerja pada sistem diabaikan, maka kekekalan momentum berlaku pada tumbukan ini. Karena bola merah (bola 2) diam sebelum tumbukan dan bola putih (bola 1) diam sesudah tumbukan, sedangkan massa kedua bola sama, maka kecepatan bola 2 sesudah tumbukan pastilah sama dengan kecepatan bola 1 sebelum tumbukan, yaitu *v*. Dalam kasus tumbukan ini seakan-akan momentum bola 1 dialihkan seluruhnya ke momentum bola 2. Bagaimana energi kinetiknya? Energi kinetik sebelum tumbukan yaitu energi kinetik bola 1, $\frac{1}{2}mv^{2}$, ternyata juga sama dengan energi kinetik sesudah tumbukan, yaitu energi kinetik bola 2, $\frac{1}{2}mv^{2}$. Jadi, dalam kasus tumbukan ini seakan-akan energi kinetik bola 1 juga dialihkan seluruhnya ke energi kinetik bola 2.

Dalam peristiwa tumbukan dua bola biliar seperti ditunjukkan pada Gambar 1, selain momentum sistem tetap, energi kinetik sistem juga tetap. Jenis tumbukan dimana berlaku kekekalan momentum dan kekekalan energi kinetik, kita sebut t*umbukan lenting sempurna*.

Perhatikan dua benda bermassa *m1* dan *m2* yang sedang bergerak saling mendekat dengan kecepatan *v1* dan *v*2 sepanjang suatu garis lurus, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

*v2’*

*v1’*

*v1*

*v2*

Gambar 2. Tumbukan lenting sempurna antara dua bola keras

Keduanya bertumbukan lenting sempurna dan kecepatan masing-masing sesudah tumbukan adalah *v1’* dan *v2’*. Pada tumbukan lenting sempurna berlaku hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi kinetik.

$$p\_{1}+p\_{2}=p\_{1}'+p\_{2}'$$

 $m\_{1}v\_{1}+m\_{2}v\_{2}=m\_{1}v\_{1}'+m\_{2}v\_{2}'$ (1)

dan

$$EK\_{1}+EK\_{2}=EK\_{1}'+EK\_{2}'$$

 $\frac{1}{ 2}m\_{1}v\_{1}^{ 2}+\frac{1}{2}m\_{2}v\_{2}^{ 2}=\frac{1}{2}m\_{1}v\_{1}'^{2}+\frac{1}{2}m\_{2}v\_{2}'^{2}$ (2)

Dari kedua persamaan tersebut, dapat diketahui hubungan antara *v1*, *v2*, *v1’*, dan *v2’* adalah sebagai berikut:

$$m\_{1}(v\_{1}-v\_{1}')=m\_{2}(v\_{2}'-v\_{2})$$

dan

$m\_{1}(v\_{1}^{ 2}-v\_{1}'^{2})=m\_{2}(v\_{2}'^{2}-v\_{2}^{ 2})$ (3)

Dengan mengingat rumus aljabar $a^{2}-b^{2}=\left(a+b\right)(a-b)$ , persamaan (3) dapat ditulis menjadi:

 $m\_{1}\left(v\_{1}-v\_{2}'\right)(v\_{1}+v\_{2}')=m\_{2}\left(v\_{2}'-v\_{2}\right)(v\_{2}'+v\_{2}')$ (4)

Jika persamaan (4) dibagi persamaan (3), diperoleh

$$v\_{1}+v\_{1}'=v\_{2}'+v\_{2}$$

atau

 $v\_{1}-v\_{2}=-(v\_{1}'-v\_{2}')$ (5)

Pada persamaan (5) ini, $v\_{1}-v\_{2}$ menyatakan kecepatan relatif dua benda sebelum tumbukan, sedangkan $v\_{1}'-v\_{2}'$ menyatakan kecepatan relatif dua benda setelah tumbukan. Jadi, untuk tumbukan lenting sempurna sepusat (seluruh gerakannya terletak pada satu garis lurus), kelajuan relatif kedua benda setelah tumbukan sama dengan kelajuan relative sebelum tumbukan, tidak terpengaruh massa benda yang bertumbukan.

**Contoh Soal:**

Sebuah bola yang massanya 4 kg bergerak ke kanan dengan kecepatan 6 ms-1 mengalami tumbukan lenting sempurna sepusat dengan bola yang massanya 2 kg yang bergerak ke kanan dengan kecepatan 3 ms-1. Tentukan kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan!

*v2*

*v1*

*Diketahui:*

Massa bola 1 : *m1* = 4 kg

Massa bola 2 : *m2* = 2 kg

Kecepatan bola 1 sebelum tumbukan : *v1* = 6 ms-1

Kecepatan bola 2 sebelum tumbukan : *v2* = 3 ms-1

*Ditanya:*

Kecepatan setelah tumbukan : *v1’* dan *v2’* ?

*Jawab:*

Dalam semua tumbukan, berlaku hukum kekekalan momentum sehingga diperoleh

$$m\_{1}v\_{1}+m\_{2}v\_{2}=m\_{1}v\_{1}'+m\_{2}v\_{2}'$$

$$\left(4 kg\right)\left(6 ms^{-1}\right)+\left(2 kg\right)\left(3 ms^{-1}\right)=\left(4 kg\right)v\_{1}^{ '}+\left(2 kg\right)v\_{2}'$$

$$\left(30 kg ms^{-1}\right)=\left(4 kg\right)v\_{1}^{ '}+\left(2 kg\right)v\_{2}'$$

$30 ms^{-1}=4v\_{1}^{ '}+2v\_{2}^{ '}$ (1)

Dalam tumbukan elastik sempurna berlaku:

$$v\_{1}-v\_{2}=-(v\_{1}^{ '}-v\_{2}^{ '})$$

$$6 ms^{-1}-3 ms^{-1}=v\_{1}^{ '}+v\_{2}^{ '}$$

$v\_{2}^{ '}=v\_{1}^{ '}+3ms^{-1}$ (2)

Persamaan (2) disubstitusikan ke persamaan (1):

$$30 ms^{-1}=4v\_{1}^{ '}+2 (v\_{1}^{ '}+3ms^{-1})$$

$$30 ms^{-1}=4v\_{1}^{ '}+2v\_{1}^{ '}+6 ms^{-1}$$

$$30 ms^{-1}=6v\_{1}^{ '}+6 ms^{-1}$$

$$v\_{1}^{ '}=\frac{30 ms^{-1}-6 ms^{-1}}{6} =4 ms^{-1}$$

Substitusi *v1’* = 4 ms-1 ke persamaan (2) sehingga diperoleh:

$$v\_{2}^{ '}=4 ms^{-1}+3ms^{-1}$$

$$v\_{2}^{ '}=7 ms^{-1}$$

Jadi, kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan adalah *v1’* = 4 ms-1 dan *v2’* = 7 ms-1.

1. **Tumbukan Tidak Lenting Sama Sekali**

Segumpal plastisin dilemparkan dalam arah mendatar menuju ke sebuah bola bilyar yang diam di atas lantai licin. Plastisin tersebut menumbuk sentral bola dan sesaat setelah tumbukan, plastisin menempel pada bola bilyar dan keduanya kemudian bergerak bersama dengan kecepatan sama. Ini adalah contoh tumbukan tidak lenting sama sekali. *Jadi, untuk tumbukan tidak lenting sama sekali, sesaat setelah tumbukan kedua benda bersatu dan bergerak bersama dengan kecepatan yang sama*. Contoh lain dari tumbukan tidak lenting sama sekali adalah pada ayunan balistik di mana peluru tertanam dalam sebuah balok, dan keduanya kemudian mengalami suatu gerak ayunan.

Karena pada tumbukan tak lenting sama sekali kedua benda bersatu sesudah tumbukan, maka berlaku hubungan kecepatan sesudah tumbukan yaitu:

$v\_{1}'=v\_{2}'=v'$ (6)

Persamaan (6) dimasukkan dalam persamaan hukum kekekalan momentum:

$$m\_{1}v\_{1}+m\_{2}v\_{2}=m\_{1}v\_{1}'+m\_{2}v\_{2}'$$

sehingga persamaannya menjadi:

$$m\_{1}v\_{1}+m\_{2}v\_{2}=(m\_{1}+m\_{2})v'$$

Apabila benda bermassa *m1* mula-mula bergerak dengan kecepatan *v1* dan benda bermassa *m2* mula-mula diam, maka persamaannya menjadi:

$$m\_{1}v\_{1}+m\_{2}.0=(m\_{1}+m\_{2})v'$$

atau

$$v'=\frac{m\_{1}}{m\_{1}+m\_{2}}v\_{1}$$

Jadi, dengan mengetahui massa dan kecepatan mula-mula, dapat dihitung kecepatan benda setelah tumbukan.

 **Contoh soal:**

1. Sebuah plastisin bermassa 0,1 kg terletak pada bidang datar licin, terkena bola yang massanya 0,4 kg dengan kecepatan 20 m/s. Kemudian plastisin menempel pada bola dan ikut bergerak bersama bola. Maka kecepatan bola sekarang adalah....

diam

*v1*

*v’*

Diketahui: massa plastisin (m1) = 0,1 kg

 massa bola (m2) = 0,4 kg

 kecepatan awal plastisin (v1) = 0 m/s

 kecepatan awal bola (v2) = 20 m/s

Ditanyakan : v’

Jawab:

Tumbukan tidak lenting sama sekali. Maka v1’ = v2’ = v’

$$m\_{1}v\_{1}+m\_{2}v\_{2}=m\_{1}v\_{1}^{'}+m\_{2}v\_{2}^{'}$$

$$m\_{1}v\_{1}+m\_{1}v\_{2}=\left(m\_{1}+m\_{2}\right)v^{'}$$

 0,1 kg . 0 m/s + 0,4 kg . 20 m/s = ( 0,1 kg + 0,4 kg) *v’*

 0 + 8 = 0,5 *v’*

$$v^{'}=\frac{8}{0,5}=16 m/s$$

1. Sebuah peluru dengan massa 5 gram ditembakkan ke balok yang besar massanya 1 kg yang digantung seperti pendulum balistik. Sebagai akibat dari tumbukan tersebut, sistem pendulum dan peluru terayun ke atas sampai ketinggian maksimum 10 cm. Jika g = 9,8 m/s kecepatan awal peluru adalah....

m2

m1

1. (b)

Setelah tumbukan peluru menyatu dengan balok (tumbukan tidak lenting sama sekali), maka berlaku:

m1v­1 = (m1 + m2) v’ ..............................(1)

hukum kekekalan energi mekanik:

$$Ek\_{1}+Ep\_{1}=Ek\_{2}+Ep\_{2}$$

$$\frac{1}{2}\left(m\_{1}+m\_{2}\right)v^{'2}+0=0+\left(m\_{1}+m\_{2}\right)gh$$

$$v^{'2}=\frac{2\left(m\_{1}+m\_{2}\right)gh}{(m\_{1}+m\_{2})}$$

$$v^{'2}=2gh$$

$ v^{'}=\sqrt{2gh}$.............................(2)

Subtitusi persamaan (2) ke persamaan (1) didapatkan kecepatan awal peluru:

$$v=\frac{m\_{1}+m\_{2}}{m\_{1}}\sqrt{2gh}$$

$$v=\frac{5.10^{-3}+1}{5.10^{-3}}\sqrt{2.9,8.0,1}$$

$$v=201.1,4=281,4 m/s$$

1. **Tumbukan Lenting Sebagian**

Pada umumnya dua buah benda yang bertumbukan, sebagian besar mengalami tumbukan lenting sebagian. Sebagai contoh, bola tenis atau bola kasti yang dilepas dari ketinggian *h*1 di atas lantai akan terpental setinggi *h*2, dimana *h*2 selalu lebih kecil dari *h*1.

Pada pembahasan tumbukan lenting sempurna, pada persamaan 5 diperoleh

$$∆v^{'}=-∆v$$

 atau

$$\frac{-∆v^{'}}{∆v}=1$$

Rasio $\frac{-∆v^{'}}{∆v}$ inilah yang didefinisikan sebagai koefisien restitusi.

Koefisien restitusi (diberi lambang *e*) adalah negatif perbandingan antara kecepatan relatif sesaat sesudah tumbukan dengan kecepatan relatif sesaat sebelum tumbukan.

$$e=\frac{-∆v^{'}}{∆v}=\frac{-(v\_{2}'-v\_{1}')}{v\_{2}-v\_{1}}$$

Nilai koefisien restitusi adalah terbatas, yaitu antara nol dan satu (0 $\leq $ *e* $\leq $ 1).

Untuk tumbukan lenting sempurna:

$$e=\frac{-∆v^{'}}{∆v}=1$$

Untuk tumbukan tak lenting sama sekali:

$$e=\frac{-∆v^{'}}{∆v}=\frac{-\left(v\_{2}'-v\_{1}'\right)}{v\_{2}-v\_{1}}=0 $$

sebab $v\_{2}'=v\_{1}'$

Seperti telah disebutkan bahwa sebagian besar tumbukan adalah tumbukan lenting sebagian, yaitu tumbukan yang berada di antara dua keadaan ekstrem tumbukan lenting sempurna dan tumbukan tak lenting sama sekali. Jelaslah bahwa pada tumbukan lenting sebagian, koefisien restitusi adalah 0 < *e* < 1, misalnya *e* = $\frac{1}{2}$, *e* = $\frac{1}{3}$, dan *e* = 0,6.

**Contoh soal:**

Bola A (2 kg) bergerak dengan kecepatan 4 m/s. Sedangkan bola B (3 kg) bergerak di depan bola A dengan kecepatan 2 m/s searah. Setelah tumbukan kecepatan bola B menjadi 3 m/s. Tentukan:

1. kecepatan bola A setelah tumbukan,
2. koefisien restitusi!

Penyelesaian:

mA = 2 kg

*v*A = 4 m/s

mB = 3 kg

*v*B = 2 m/s

*v*B’ = 3 m/s

1. Pada setiap tumbukan berlaku hukum kekekalan momentum sehingga diperoleh:

mA *v*A + mB *v*B = mA *v*A’ + mB *v*B’

 2 . 4 + 3 . 2 = 2 . *v*A’ + 3 . 3

 14 = 2 *v*A’ + 9

*v*A’ = $\frac{5}{2}$ = 2,5 m/s

1. Koefisien restitusinya sebesar:

$$e=-\frac{v\_{B}’-v\_{A}'}{v\_{B}-v\_{A}}$$

$$ =-\frac{3-2,5}{2-4}=-\frac{0,5}{(-2)}=0,25$$

1. **Peluncuran Roket**

Salah satu penerapan Hukum III Newton dan hukum kekekalan momentum adalah dorongan roket. Sebuah roket mendapatkan dorongan dengan membakar bahan bakar dan membuang gas yang terbentuk lewat belakang. Roket mengerjakan gaya pada gas buang dan berdasarkan Hukum III Newton, gas mengerjakan gaya yang sama tetapi berlawanan arah pada roket sehingga mendorong roket ke depan.

Gambar 3. Peluncuran roket

Mula-mula sistem roket diam sehingga momentumnya nol. Sesudah gas menyembur keluar dari ekor roket, momentum sistem tetap, atau dengan kata lain momentum sistem sebelum dan sesudah gas keluar sama.

Momentum awal sistem = Momentum akhir sistem

$$0=m\_{1}v\_{1}+m\_{2}v\_{2}$$

$$m\_{1}v\_{1}=- m\_{2}v\_{2}$$

 Berdasarkan kekekalan momentum, kelajuan akhir yang dapat dicapai sebuah roket bergantung pada banyaknya bahan bakar yang dapat dibawa oleh roket dan kelancaran pancaran gas. Saat ini, untuk meluncurkan pesawat antariksa, digunakan roket-roket bertahap banyak, yaitu beberapa roket yang digabung bersama. Begitu bahan bakar tahap pertama telah dibakar habis, roket ini dilepaskan. Karena massa pesawat antariksa telah bergerak cepat, dan massa pesawat total beserta roket yang tersisa lebih ringan, maka pada tahap kedua ini dapat dicapai kelajuan akhir yang jauh lebih cepat. Demikian seterusnya sampai seluruh roket telah terbakar. Penggunaan roket bertahap banyak ini tergantung pada kelajuan akhir yang dibutuhkan untuk suatu misi tertentu.