V MOMENTUM, IMPULS, TUMBUKAN

Setelah mengikuti perkuliahan momentum, impuls dan tumbukan, mahasiswa dapat:

1. menjelaskan hubungan antara impuls dan momentum
2. menjelaskan pengertian gerak pusat massa
3. menjelaskan pengertian momentum linier
4. menjelaskan pengertian momentum sudut
5. membedakan jenis-jenis tumbukan
6. memecahkan soal-soal sederhana tentang impuls dan momentum

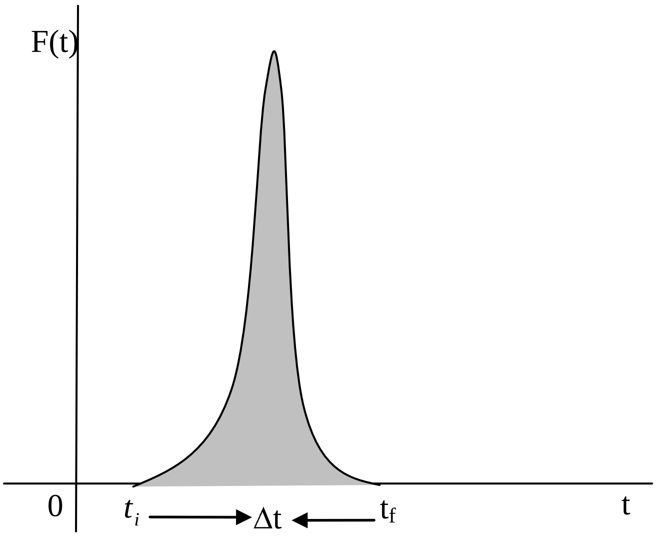
Materi fisika yang dipelajari dalam bab ini meliputi Momentum dan Impuls, Gerak Pusat Massa, Momentum Linier, Momentum Sudut, dan Tumbukan

5.1 Pendahuluan

Banyak hal yang dapat kita analisis pada benda yang sedang bergerak. Misalnya adalah sebuah truk yang bertabrakan dengan mobil sedan. Kita mungkin bertanya, ke arah manakah kedua mobil setelah tabrakan? Mengapa penumpang mobil sedan lebih mungkin terluka parah dibandingkan dengan penumpang truk? Pertanyaan ini tidak dengan mudah dapat dijawab dengan menerapkan hukum kedua Newton, $\Sigma F = ma$, pada kasus tabrakan tersebut. Ternyata, ada gaya-gaya lain yang ikut terlibat dalam kasus tersebut, yaitu gaya interaksi yang bekerja antara truk dan mobil sedan, yang cukup rumit untuk dianalisis. Walaupun demikian, kita ternyata tidak perlu mengetahui apapun tentang gaya-gaya ini. Hanya dengan menerapkan konsep momentum, impuls, dan kekekalan momentum kita dapat menyelesaikan kasus tabrakan itu.

5.2 Momentum Linear

Konsep momentum dan impuls akan timbul jika dua benda bertumbukan. Jika resultan gaya pada benda yang bertumbukan bekerja hanya sebentar, maka kita dapat menggambarkan grafik sebagai berikut:



Gambar 5.1 Perubahan gaya impulsif terhadap waktu

Gambar 5.1 memperlihatkan bahwa gaya bekerja hanya sebentar dalam selang waktu $\Delta t = t_f - t_i$, dengan nilai gaya yang cukup besar. Di luar selang waktu Δt, nilai gaya adalah nol. Gaya ini disebut gaya impuls (denyut). Indeks i dalam t_i menyatakan waktu pada keadaan awal (*initial*) dan indeks f dalam t_f menyatakan waktu pada keadaan akhir (*final*). Pada bagian selanjutnya kita akan mempelajari hubungan antara gaya impuls dengan momentum melalui analisis matematis.

Untuk memahami konsep momentum dan impuls, kita dapat memulainya dari hukum II Newton. Bayangkanlah sebuah partikel yang bermassa m bergerak dengan percepatan tetap $\vec{a}$. Menurut hukum II Newton, berlaku:

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$$

karena $\vec{a} = d\vec{v}/dt$, maka kita dapat menuliskan hukum Newton menjadi:

$$\Sigma F = m\left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right) = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) \tag{5.1}$$

Dengan menggunakan persamaan (5.1), Hukum II Newton menyatakan bahwa gaya total yang bekerja pada partikel sama dengan laju waktu dari perkalian m dan $\vec{v}$. Perkalian antara m dan $\vec{v}$ ini disebuat sebagai **momentum** atau **momentum linier**, dan diberi simbol $\vec{P}$. Satuan untuk momentum adalah satuan massa dikalikan dengan satuan kecepatan yaitu kg.m/s (SI) atau slugs.ft/s (British). Kita dapat menuliskan definisi momentum sebagai:

$$\vec{P} = m\vec{v} \tag{5.2}$$

Karena $\vec{v}$ (kecepatan) merupakan besaran vektor, maka $\vec{P}$ (momentum) juga merupakan besaran vektor. Dalam menyelesaikan soal-soal tentang momentum, kita harus memperhatikan kaidah vektor yang menyertai operasi momentum. Akan lebih mudah jika menyatakan momentum ke dalam komponen-komponennya:

$$\vec{P}_x = m\vec{v}_x \;;\; \vec{P}_y = m\vec{v}_y \;;\; \vec{P}_z = m\vec{v}_z \tag{5.3}$$

Momentum memiliki besar (m$\vec{v}$) dan arah searah dengan arah kecepatannya. Mobil truk akan memiliki momentum yang lebih besar dari mobil sedan yang bergerak dengan kecepatan sama, karena massa mobil truk lebih besar dibandingkan dengan mobil sedan.

Dengan mensubstitusikan persamaan (5.2) ke persamaan (5.1), didapatkan:

$$\Sigma\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \tag{5.4}$$

yang menyatakan bahwa **gaya total yang bekerja pada partikel adalah sama dengan laju waktu dari perubahan momentumnya**. Persamaan (5.4), yang merupakan bentuk lain dari hukum II Newton, menunjukkan pada kita bahwa perubahan momentum yang sangat cepat akan menyebabkan gaya total yang sangat besar.

Teorema Impuls-Momentum

Untuk melihat hubungan antara impuls dan momentum, marilah kita tinjau kembali persamaan (5.4). Persamaan ini menyatakan bahwa gaya total ($\Sigma\vec{F}$) yang bekerja pada partikel adalah sama dengan laju waktu dari perubahan momentumnya $d\vec{P}/dt$. Jika gaya total yang bekerja partikel adalah tetap maka perubahan momentumnya pun akan tetap. Kita dapat menuliskan persamaan (5.4) sebagai:

$$\Sigma\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{\vec{P}_f - \vec{P}_i}{t_f - t_i} \qquad (5.5)$$

atau $$\Sigma\vec{F}(t_f - t_i) = \vec{P}_f - \vec{P}_i \qquad (5.6a)$$

atau $$I = \vec{P}_f - \vec{P}_i \qquad (5.6b)$$

Ruas kiri dalam persamaan (5.6a), yaitu $\Sigma\vec{F}(t_f - t_i)$ adalah **impuls** ($\vec{I}$), sehingga dari persamaan (5.6), kita mendapatkan sebuah teorema yang baru, yaitu **teorema impuls-momentum** (*impulse-momentum theorem*). Teorema ini menyatakan bahwa:

Perubahan momentum sebuah partikel selama selang waktu tertentu sama dengan impuls dari gaya total yang bekerja pada partikel itu dalam selang waktu tersebut.

Persamaan (5.5) atau persamaan (5.6) berlaku untuk gaya yang besarnya tetap. Jika gaya atau resultan gaya yang bekerja pada benda tidak tetap, kita dapat menuliskan ulang persamaan (5.5) dalam bentuk integral, sebagai berikut:

$$\int_{t_i}^{t_f} \Sigma F dt = \int_{t_i}^{t_f} \frac{d\vec{P}}{dt} dt \text{ atau } \int_{t_i}^{t_f} \Sigma F dt = \int_{P_i}^{P_f} d\vec{P} \qquad (5.7)$$

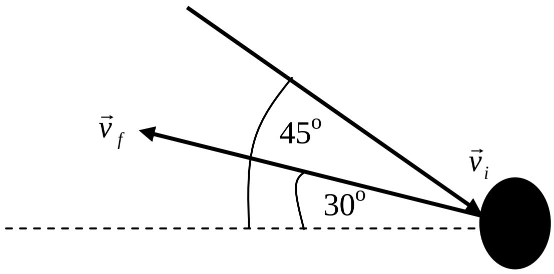
Persamaan (5.7) adalah bentuk umum untuk teorema impuls-momentum, dan berlaku untuk gaya yang tetap maupun tidak tetap. Persamaan (5.6) dapat ditulis ulang sebagai:

$$\vec{I} = \vec{P}_f - \vec{P}_i = \Delta\vec{P} \qquad (5.8)$$

Contoh soal 5.1

Memukul bola tennis dengan raket. Sebuah bola tennis yang memiliki massa 0,1 kg bergerak ke kanan menuju raket pemain tennis dengan laju awal 30 m/s dan membentuk sudut 45^o terhadap garis horizontal. Bola ini kemudian dipukul pemain ke arah yang berlawanan (ke kiri) dengan laju 50 m/s dan membentuk sudut 30^o terhadap horizontal. Jika waktu bola menyentuh raket pada saat dipukul adalah 0,01 s, hitunglah gaya total yang dikenakan raket pada bola tersebut!

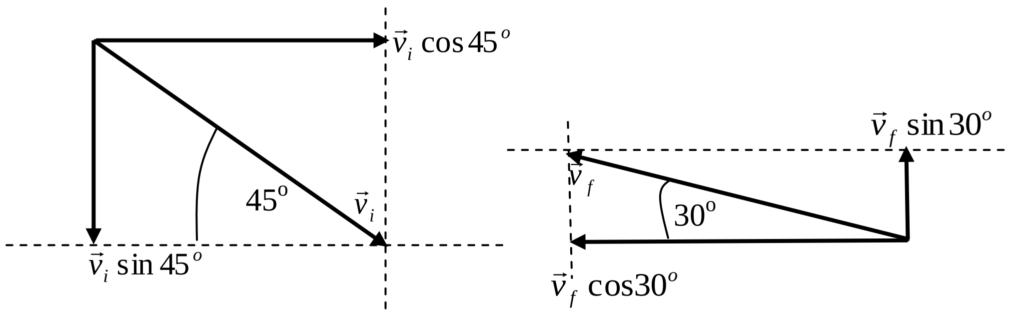
Penyelesaian:



Kita dapat mencari gaya total yang dikenakan raket pada bola melalui persamaan (5.6): $\Sigma\vec{F}(t_f - t_i) = \vec{P}_f - \vec{P}_i$ atau $F = \dfrac{\vec{P}_f - \vec{P}_i}{\Delta t}$

Karena kecepatan awal dan akhir bola sebelum dan sesudah menyentuh raket tidak berada dalam garis yang sama, kita harus cermat memperlakukan momentum dan impuls sebagai besaran vektor.

Komponen x dan y dari kecepatan awal dan akhir bola itu diberikan oleh:



$v_{ix} = v_i \cos 45^o = 30 \cos 45^0 = 21{,}21 m/s$

$v_{iy} = -v_i \sin 45^o = -30 \sin 45^0 = -21{,}21 m/s$

$v_{fx} = -v_f \cos 30^o = -50 \cos 30^0 = 43{,}3$ m/s

$v_{fy} = v_f \sin 30^o = 50 \sin 30^0 = 25 m/s$

Sehingga: $F_x = \dfrac{\vec{P}_{fx} - \vec{P}_{ix}}{\Delta t} = \dfrac{m\vec{v}_{fx} - m\vec{v}_{ix}}{\Delta t}$ = 0,1(43,3-21,21)/0,01= 220,9 N

dan $F_y = \dfrac{\vec{P}_{fy} - \vec{P}_{iy}}{\Delta t} = \dfrac{m\vec{v}_{fy} - m\vec{v}_{iy}}{\Delta t}$ = 0,1(25+21,21)/0,01= 462,1 N

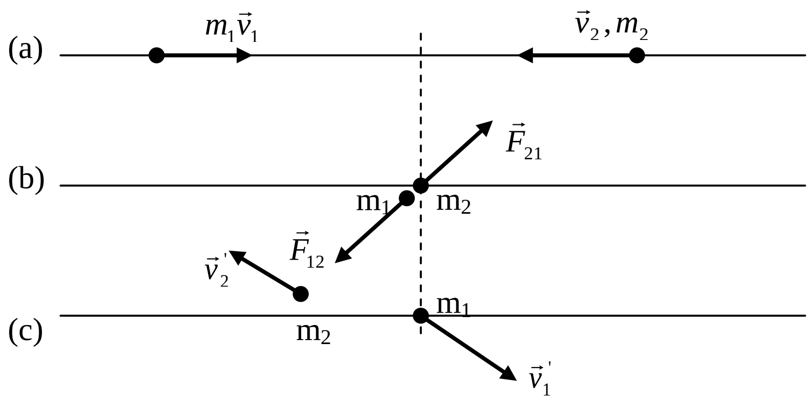
Besar dan arah dari gaya total yang dikenakan raket pada bola adalah:

$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 512{,}18$ N

$\theta = \arctan \dfrac{F_y}{F_x}$ = arctan(462,1/220,9) = 64,45^o

5.3. Prinsip Kekekalan Momentum

Misalnya ada dua buah partikel dengan massa masing-masing m_1 dan m_2 yang bergerak dengan arah berlawanan. Kecepatan kedua partikel ini masing-masing adalah $\vec{v}_1$ dan $\vec{v}_2$, dan pada suatu saat keduanya akan bertumbukan. Perhatikan gambar di bawah 5.3 berikut ini!



Gambar 5.3 (a) Dua partikel saling mendekat
(b) Kedua partikel bertumbukan. Pada saat ini pada m_1 bekerja gaya $\vec{F}_{12}$ karena dorongan $m_{2;}$ dan pada m_2 bekerja gaya reaksinya, yaitu $\vec{F}_{21}$.
(c) Kedua partikel bergerak saling menjauhi setelah tumbukan.

Pada saat kedua partikel bertumbukan, terjadi gaya impuls yang disebabkan oleh masing-masing partikel. Setiap partikel memberikan gaya pada yang lainnya. Partikel ke-1 memberikan gaya sebesar $\vec{F}_{21}$ pada partikel ke-2, dan partikel ke-2 memberikan gaya sebesar $\vec{F}_{12}$ pada partikel ke-1. Dari pasangan gaya aksi-reaksi F_{12} dan F_{21} (hukum ketiga Newton), didapatkan:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \text{ atau } \vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = 0 \qquad (5.12)$$

Dari persamaan (5.3), $\Sigma\vec{F} = \dfrac{d\vec{P}}{dt}$, didapatkan:

$$\frac{d\vec{P}_{12}}{dt} + \frac{d\vec{P}_{21}}{dt} = 0 \text{ atau}$$

$$\frac{d\left(\vec{P}_{12} + d\vec{P}_{21}\right)}{dt} = 0 \tag{5.13}$$

Kita mendefinisikan pembilang pada persamaan (5.13) sebagai **momentum total sistem partikel**, $\vec{P} = \vec{P}_{12} + \vec{P}_{21}$, sehingga persamaan (5.13) meyatakan bahwa laju perubahan dari momentum total adalah nol. Artinya jumlah momentum total $\vec{P} = \vec{P}_{12} + \vec{P}_{21}$ adalah tetap. Persamaan (5.13) diperoleh dari penurunan gaya-gaya interaksi antar partikel, artinya tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem atau jika jumlah gaya luar yang bekerja pada sistem sama dengan nol. Dengan kata lain, "**Jika jumlah gaya luar yang bekerja pada suatu sistem adalah nol, maka mometum total dari sistem partikel tersebut adalah tetap**". Pernyataan ini dikenal dengan **prinsip kekekalan momentum** (*principle of conservation of momentum*).

Jika prinsip kekekalan momentum kita kaitkan dengan peristiwa tumbukan, maka momentum total sistem partikel sebelum dan sesudah tumbukan adalah tetap. Dalam bentuk persamaan matematis, pernyataan di atas dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{P}_{12} + \vec{P}_{21} = \vec{P}_{12}^{'} + \vec{P}_{21}^{'} \tag{5.14}$$

Dengan indeks ' menyatakan momentum sesudah tumbukan.

Momentum total P, didefinisikan sebagai jumlah vektor semua momentum partikel dalam kerangka acuan yang sama, yaitu:

$$\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \ldots + \vec{P}_n \tag{5.15}$$

dengan $\vec{P}_1$ adalah momentum partikel ke-1, $\vec{P}_2$ adalah momentum partikel ke-2, dan $\vec{P}_n$ adalah momentum partikel ke-n.

Contoh soal 5.2

Melempar bola di atas permukaan es. Seorang pemain hoki 75 kg melempar bola secara horizontal dengan laju 20 m/s. Karena pemain hoki berada di atas permukaan es tanpa gesekan, akibat lemparan ini pemain hoki terdorong ke belakang. Berapakah kecepatan dorong yang dialami pemain hoki?

Penyelesaian:

Dalam kasus ini, berlaku hukum kekekalan momentum: momentum total sebelum melempar bola = momentum total setelah melempar bola. Momentum total dalam hal ini adalah momentum yang dimiliki pemain hoki dan bola.

Momentum adalah besaran vektor, sehingga kita harus mengoperasikannya secara vektor. Ambillah arah lemparan sebagai arah sumbu x positif. Karena bola dilempar secara horizontal, maka bola tidak memiliki arah dalam sumbu y.

Pada awalnya (sebelum bola dilempar), baik pemain hoki maupun bola memiliki momentum = 0, karena kecepatannya masing-masing adalah 0. Setelah lemparan, momentum untuk pemain hoki dan bola masing-masing adalah $m_p v_p^{'}$ dan $m_b v_b^{'}$.

Dengan menerapkan hukum kekekalan momentum, didapatkan:

$$0 = m_p v_p^{'} + m_b v_b^{'}$$

$$v_p^{'} = -\frac{m_b v_b^{'}}{m_p} = -\frac{0,16x20}{75} = -0,043 m/s$$

Tanda negatif pada $v_p^{'}$ menunjukkan bahwa pemain hoki akan terdorong ke arah sumbu x negatif akibat lemparan ini.

5.4 Momentum Sudut

Momentum linier sangat bermanfaat dalam menangani gerak translasi partikel tunggal maupun sistem partikel, sedangkan momentum sudut bermanfaat untuk menangani gerak rotasi. Sebuah partikel yang berotasi terhadap titik acuan O memiliki momentum sudut L, yang didefinisikan sebagai:

$$L = \mathbf{r} \times P \tag{5.16}$$

Momentum sudut adalah besaran vektor dan besarnya diberikan oleh:

$$L = r\, P \sin\theta \tag{5.17}$$

Telah diketahui bahwa untuk sebuah partikel berlaku F = dP/dt (pers. 5. 4), sehingga jika kedua ruas kita lakukan perkalian vektor dengan **r**, diperoleh:

$$rxF = rx\frac{dP}{dt} \quad \text{atau} \quad \tau = \frac{dL}{dt} \tag{5.18}$$

yang menyatakan bahwa: “kecepatan perubahan momentum sudut partikel terhadap waktu sama dengan torka yang bekerja pada partikel tersebut.”

Besaran-besaran rotasi beranalog dengan besaran-besaran linier. Ini berlaku pula dalam momentum. Momentum linier didefinisikan sebagai P = mv, sedangkan momentum sudut didefinisikan sebagai L = I ω, dengan I adalah momen inersia.

Momentum sudut sistem partikel didefinisikan sebagai:

$$L = L_1 + L_2 + \ldots + L_n \tag{5.19}$$

Dan $\tau_{eks} = dL/dt$ (5.20)

yang menyatakan bahwa "**kecepatan perubahan terhadap waktu dari momentum sudut total sistem partikel sama dengan jumlah torka eksternal yang bekerja pada sistem.**"

5.4 Jenis-jenis Tumbukan

Pada umumnya orang memahami tumbukan (tabrakan) adalah sebagai beradunya dua benda yang memiliki kecepatan tertentu, misalnya, tabrakan antara dua mobil (kecelakaaan lalu lintas). Dalam fisika, tumbukan diartikan lebih luas lagi yang merupakan interaksi yang dahsyat (melibatkan gaya-gaya yang besar) antara dua benda dalam waktu yang relatif singkat. Kita dapat melihat banyak peristiwa tumbukan dalam kehidupan nyata, misalnya: bola bilyar yang saling menumbuk di atas meja bilyar, bola bowling yang menghantam pin-pinnya, peluru yang menghantam bandul balistik, bola yang disepak pemain bola, tumbukan antar-meteor di ruang angkasa, dan sebagainya.

Jika gaya-gaya interaksi antara benda yang bertumbukan lebih besar dibandingkan dengan gaya luar, kita dapat mengabaikan gaya luar ini dan mengatakan bahwa sistem benda yang bertumbukan adalah **terisolasi** dari lingkungannya. Dalam keadaan ini berlaku hukum kekekalan momentum, yaitu momentum total sistem sebelum tumbukan sama dengan momentum total sistem sesudah tumbukan. Terdapat beberapa jenis tumbukan, yaitu:

a. Tumbukan elastik sempurna
b. Tumbukan elastik sebagian
c. Tumbukan sama sekali tak elastik

5.4.1 Tumbukan Lenting/Elastik Sempurna

Tumbukan disebut elastik sempurna jika dalam tumbukan tersebut jumlah energi mekanik sistem tidak bertambah atau berkurang. Tumbukan antara dua buah kelereng atau dua buah bola bilyar adalah contoh tumbukan yang hampir elastik sempurna. Jika dua bola bilyar bertumbukan, bola akan berdeformasi (berubah bentuk karena tergencet) dan setiap deformasi akan dengan cepat kembali ke bentuk awalnya. Sebagain energi kinetiknya berubah sesaat menjadi energi potensial elastik, tetapi kemudian berubah kembali menjadi energi kinetik sehingga bola bilyar kemudian terpental satu sama lain. Keadaan ini menunjukkan bahwa gaya interaksi antara bola hampir benar-benar kekal dan tumbukannya elastik. Tumbukan elastik sempurna terjadi jika gaya-gaya yang berinteraksi selama tumbukan adalah gaya konservatif.

Jika tumbukan ini adalah elastik sempurna, maka pada tumbukan ini berlaku hukum kekekalan energi kinetik:

$$1/2 m_A \vec{v}_A^2 + 1/2 m_B \vec{v}_B^2 = 1/2 m_A \vec{v}_A^{'2} + 1/2 m_B \vec{v}_B^{'2} \tag{5.31}$$

dan hukum kekekalan momentum:

$$m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B = m_A \vec{v}_A^{'} + m_B \vec{v}_B^{'} \tag{5.32}$$

Penyelesaian yang umum dari persamaan (5.31) dan (5.32) memang agak sedikit rumit, tetapi marilah kita analisis sebagai berikut: Persamaan (5.31) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$m_A \left(\vec{v}_A^2 - \vec{v}_A^{'2}\right) = -m_B \left(\vec{v}_B^2 - \vec{v}_B^{'2}\right) \tag{5.33a}$$

atau $$m_A \left(\vec{v}_A - \vec{v}_A^{'}\right)\left(\vec{v}_A + \vec{v}_A^{'}\right) = -m_B \left(\vec{v}_B - \vec{v}_B^{'}\right)\left(\vec{v}_B + \vec{v}_B^{'}\right) \tag{5.33b}$$

dan persamaan (5.32) dapat ditulis ulang sebagai:

$$m_A \left(\vec{v}_A - \vec{v}_A^{'}\right) = -m_B \left(\vec{v}_B - \vec{v}_B^{'}\right) \tag{5.34}$$

Bagilah persamaan (5.33b) dengan persamaan (5.34), maka akan didapatkan:

$$(\vec{v}_A + \vec{v}_A^{\,'}) = (\vec{v}_B + \vec{v}_B^{\,'}) \qquad (5.35a)$$

atau $\vec{v}_A - \vec{v}_B = -(\vec{v}_A^{\,'} - \vec{v}_B^{\,'})$ (5.35b)

atau: $-\dfrac{\vec{v}_A^{\,'} - \vec{v}_B^{\,'}}{\vec{v}_A - \vec{v}_B} = 1$ (5.35c)

besar kecepatan relatif sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama tetapi arahnya berlawanan. Arah yang berlawanan ini ditunjukkan dengan tanda negatif pada persamaan (5.35c).

Kita menamakan perbandingan antara kecepatan relatif antara bola A dan bola B sesudah tumbukan dengan kecepatan relatif antara bola A dan bola B sebelum tumbukan sebagai *koefisien restitusi (pulih)* = e, dan kita tuliskan sebagai:

$$e = -\frac{\vec{v}_A^{\,'} - \vec{v}_B^{\,'}}{\vec{v}_A - \vec{v}_B} \qquad (5.36)$$

Kita melihat bahwa koefisien restitusi untuk tumbukan elastik sempurna memiliki harga 1, dan kita akan melihat pada bagian selanjutnya bahwa koefisien restitusi secara umum memiliki harga $0 \le e \le 1$.

5.6.2. Tumbukan elastik sebagian

Jika benda-benda yang bertumbukan adalah tumbukan elastik sebagian, maka menurut definisinya terdapat perubahan pada harga energi kinetiknya. Harga energi kinetik akhir sesudah tumbukan dapat berharga lebih kecil daripada harga kinetik awal sebelum tumbukan. Kehilangan energi kinetik ini diubah menjadi energi panas atau energi potensial deformasi (perubahan bentuk) dalam tumbukan. Contoh untuk kasus ini adalah pada tumbukan antara dua mobil. Tumbukan ini biasanya cenderung tidak elastik sehingga struktur mobil menyerap sebanyak mungkin energi yang dilepaskan dalam tumbukan. Penyerapan energi ini telah menyebabkan perubahan bentuk yang permanen pada mobil.

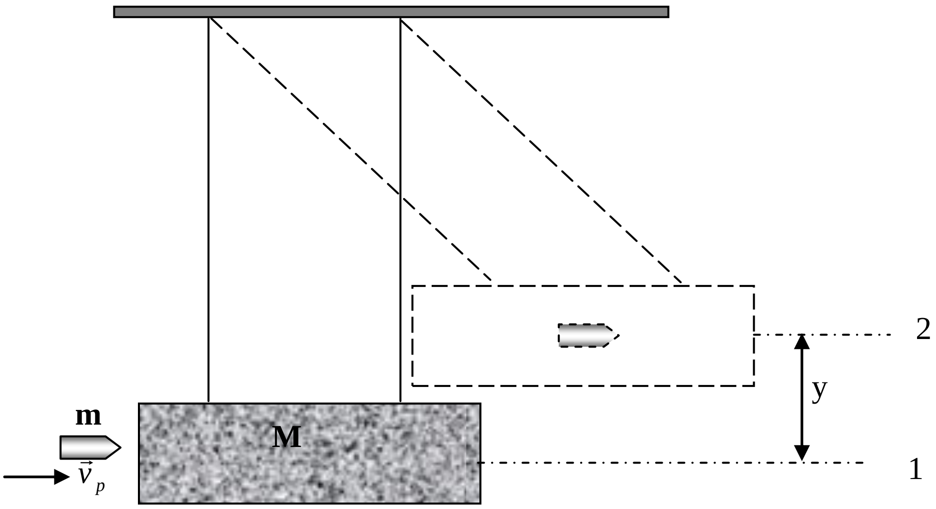
Sebagai akibat dari adanya kehilangan energi pada tumbukan elastik sebagian, maka hukum kekekalan energi kinetik pada tumbukan ini tidak berlaku. Walaupun demikian, dikarena gaya-gaya yang berinteraksi selama tumbukan masih jauh lebih besar daripada gaya luar, maka pada tumbukan ini masih tetap berlaku hukum kekekalan momentum. Harga koefisien restitusi tumbukan elastik sebagian berada pada harga $0<e<1$.

5.6.3 Tumbukan sama sekali tak elastik

Jika dua buah benda bertumbukan dan setelah tumbukan kedua benda bergabung menjadi satu, maka tumbukannya disebut sama sekali tak elastik. Pada tumbukan sama sekali tak elastik terdapat kehilangan energi. Energi yang hilang ini berubah menjadi energi panas, bunyi, dan energi potensial deformasi. Walaupun demikian, sama seperti pada tumbukan elastik sebagian, prinsip kekekalan momentum momentum masih tetap berlaku. Harga koefisien restitusi pada tumbukan sama sekali tak elastik adalah 0 (e = 0), sebab $\vec{v}_A^{\,'} = \vec{v}_B^{\,'}$ (setelah tumbukan, kedua benda bergerak dengan kecepatan yang sama. Buktikan!).

Contoh soal 5.7

Bandul Balistik. Bandul balistik adalah sebuah sistem yang terdiri atas sebuah kayu besar bermassa M yang tergantung pada dua buah tali, digunakan untuk mengukur laju peluru. Peluru bermassa m ditembakkan dari sebuah senapan dengan laju $\vec{v}_p$ secara horizontal dan tertanam di dalam bandul. Akibat tembakan peluru ini, balok berayun sampai ketinggian maksimum y.



Gambar 5.11 Bandul balistik, digunakan untuk mengukur laju peluru

Jika waktu tumbukan (waktu yang dibutuhkan peluru sampai menjadi diam tertanam dalam balok) jauh lebih kecil dibandingkan dengan waktu ayun balok sampai mencapai kedudukan tertinggi, maka selama tumbukan dapat dianggap tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada sistem bandul-peluru. Keadaan ini memenuhi hukum kekekalan momentum, dan andaikan kecepatan akhir peluru+bandul setelah tumbukan adalah $\vec{V}$, maka:

$$m\vec{v}_p + M(0) = (m+M)\vec{V}$$

atau $\vec{v}_p = \dfrac{(m+M)}{m}\vec{V}$ (a)

Kecepatan peluru dapat dihitung jika m, M dan $\vec{V}$ telah diketahui. Pengukuran mengenai $\vec{V}$ dapat dilakukan dengan menghitung y. Setelah tumbukan, bandul dan peluru berayun sampai ketinggian y, dan energi yang digunakan untuk mengayunkannya diperoleh dari energi kinetik sistem setelah tumbukan. Setelah mencapai ketinggian maksimum, energi kinetik ini diubah seluruhnya menjadi energi potensial gravitasi. Kita mengetahui bahwa hukum kekekalan energi mekanik berlaku untuk keadaan ini, karena gaya-gaya yang bekerja pada sistem adalah gaya-gaya konservatif. Gunakan indeks 1 untuk keadaan sebelum berayun, dan indeks 2 untuk ketinggian maksimum, maka:

$$E_{M1} = E_{M2}$$

$$1/2(m+M)\vec{v}_1^2 + (m+M)gh_1 = 1/2(m+M)\vec{v}_2^2 + (m+M)gh_2$$

$$1/2(m+M)\vec{V}^2 = (m+M)gy$$

Atau $V = \sqrt{2gy}$ = 0,07 m/s (b)

Dari persamaan (a) dan (b) kita peroleh:

$$\vec{v}_p = \frac{(m+M)}{m}\sqrt{2gy} \qquad \text{(c)}$$

Persamaan (c) menunjukkan bahwa kecepatan peluru dapat dihitung dengan mengukur ketinggian maksimum y dan mengetahui besar m dan M. Sebagai contoh, jika m dan M serta y masing-masing berturut-turut adalah 5 g, 2 kg, dan 5 cm, maka kecepatan peluru adalah 277,9 m/s

Karena peluru dan bandul bergerak bersama setelah tumbukan, dapat dipastikan bahwa jumlah energi kinetik sistem sebelum dan sesudah tumbukan adalah tidak kekal. Besarnya pengurangan energi kinetik ini dapat dihitung dengan:

Ek sebelum tumbukan – Ek sesudah tumbukan

= $Ek_{(peluru)} - Ek_{(peluru + balok)}$

= ½ m v_p^2 – ½ (m+M)V^2

= ½ (5 X 10^{-3}) $(277,9)^2$+ ½ (5x10^{-3} + 2) $(0,07)^2$

= 193 - 0,0049 = 192,9951 J

Besarnya pengurangan energi kinetik ini berubah menjadi energi panas.

Latihan soal:

5.1 Bandingkanlah kerusakan sebuah mobil (dan penumpangnya) dalam keadaan berikut: (a) mobil itu bertabrakan ”hidung lawan hidung” secara tak elastik sempurna dengan sebuah mobil serupa yang sedang bergerak dengan kecepatan yang sama dalam arah berlawanan, dan (b) mobil itu menabrak dengan “hidungnya” secara tak-elastik sempurna tebing batu vertikal, (c) yang mana lebih jelek (bagi penumpang kendaraan ringan), tabrakan ”hidung lawan hidung” dengan sebuah truk yang sedang berjalan dengan arah berlawanan dengan momentum yang sama besar, atau tabrakan ”hidung lawan hidung” dengan sebuah truk yang energi kinetiknya sama besar?

5.2 Seorang laki-laki yang massanya 75 kg berdiri di atas lantai licin melemparkan bola yang massa 0,015 kg dengan kecepatan 15 ms^{-1} dengan arah mendatar. Hitunglah kecepatan laki-laki tersebut sesaat setelah melempar bola!

5.3 Sebuah pesawat jet bergerak dengan laju 180 m/s. Tiap detik mesin mengisap 68 m^3 udara dengan massa 70 kg. Udara ini digunakan untuk membakar 2,9 kg bahan bakar tiap detik. Tenaga yang dihasilkan digunakan untuk menekan hasil pembakaran dan menyemburkannya melalui bagian belakang pesawat dengan laju 490 m/s relatif terhadap pesawat. Tentukanlah (a) gaya dorong mesin jet tersebut, dan (b) daya yang dikeluarkan mesin jet!

5.4 Peluru 15 gr ditembakkan ke dalam ayunan balistik 1,5 kg dan mengeram. Pada saat ayunan mencapai tinggi maksimum, kawat membuat sudut 60^o terhadap vertikal. Panjang kawat 2 m, hitunglah:

(a) kecepatan awal peluru

(b) energi yang hilang dalam tumbukan ini!

5.5 Sebuah meriam dengan massa 3000 kg diam di atas bidang datar yang licin seperti ditunjukkan pada gambar. Meriam itu dimuati dengan peluru bermassa 60 kg dan ditembakkan dengan arah mendatar. Jika meriam terpental ke kanan dengan kecepatan 1,9 m/s, berapa kecepatan peluru itu sesaat setelah meninggalkan meriam?