

IV KERJA DAN ENERGI

Kompetensi yang ingin dicapai setelah mempelajari bab ini adalah kemampuan memahami, menganalisis dan mengaplikasikan konsep-konsep kerja dan energi pada kehidupan sehari-hari ataupun pada bidang teknologi. Materi fisika yang dipelajari dalam bab ini meliputi kerja oleh gaya konstan, kerja oleh gaya berubah, daya, energi kinetik dan potensial, hukum kekekalan energi mekanik, energi konservatif dan energi disipatif.

Setelah mengikuti perkuliahan kerja dan energi, mahasiswa dapat:

1. menjelaskan pengertian kerja
2. menjelaskan pengertian daya
3. membedakan pengertian energi kinetik dengan energi potensial
4. membedakan pengertian gaya konservatif dan gaya disipatif
5. menjelaskan hukum kekekalan energi mekanik
6. memecahkan soal-soal sederhana tentang kerja dan energi.

4.1 Pendahuluan

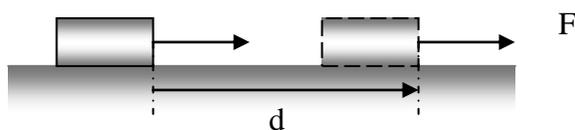
Penggunaan konsep kerja dan energi sangat bermanfaat manakala kita tidak dapat menyelesaikan soal-soal mekanika dengan menggunakan hukum-hukum Newton tentang gerak. Soal-soal mekanika tersebut biasanya berkaitan dengan besar gaya yang berubah-ubah yang tidak dapat diselesaikan dengan metode biasa. Hal penting dalam konsep kerja dan energi berakar dari hukum kekekalan energi: Energi adalah suatu besaran yang kekal, tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan. Akan tetapi energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lain

dan dapat dipindahkan (ditransfer) dari satu benda ke benda lain atau dari satu sistem ke sistem lain. Contoh perubahan bentuk energi adalah energi yang didapatkan dari pembakaran diubah menjadi energi gerak pada mobil. Perubahan bentuk energi ini disebut transformasi energi. Selain itu, energi juga dapat dipindahkan. Perpindahan energi ini disebut transfer energi. Transfer energi dapat dilakukan melalui gaya yang mengakibatkan perubahan posisi benda. Perpindahan energi ini dikenal sebagai kerja mekanik atau kerja. Dalam fisika, energi diartikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja.

4.2. Kerja

Dalam kehidupan sehari-hari anda mungkin setuju tentang pengertian kerja berikut: diperlukan kerja keras untuk mendorong mobil mogok keluar jalan, atau untuk memindahkan satu tumpukan buku dari lantai ke atas rak yang tinggi. Contoh tersebut memang berhubungan dengan pengertian kerja sehari-hari, yaitu aktivitas yang memerlukan kekuatan otot dan dukungan mental.

Dalam fisika, kerja mempunyai definisi yang lebih khas. Dua contoh aktivitas sehari-hari di atas—mendorong mobil dan memindahkan buku—memiliki kesamaan. Dalam tiap kasus, Anda melakukan kerja dengan memberikan *gaya* pada benda tersebut hingga benda *berpindah* tempat. Definisi kerja dalam fisika didasarkan pada dua pengamatan ini, yaitu adanya gaya (F) dan adanya perpindahan (d). Perhatikan sebuah benda yang bergerak karena adanya gaya tarik (F) hingga mengalami perpindahan (d) di sepanjang garis lurus pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Kerja yang dilakukan oleh gaya F

Sementara benda bergerak, gaya F bekerja pada benda dengan arah yang sama dengan perpindahan d , kita definisikan kerja (work), W , yang dilakukan oleh gaya tersebut adalah:

$$W = Fd \text{ (gaya konstan dalam arah perpindahan garis lurus)} \quad (4.1)$$

Kerja yang dikenakan pada benda akan lebih besar jika salah satu dari gaya F atau perpindahan d lebih besar. Satuan kerja dalam sistem SI adalah satuan gaya x satuan perpindahan atau newton x meter (N.m) atau **joule** (dibaca "juwl", disingkat J, untuk menghormati ahli Fisika Inggris: James Prescott Joule). Satuan kerja dalam sistem British masih tetap dinyatakan dalam satuan gaya x satuan perpindahan yaitu pond x feet (lb.ft), dengan $1 \text{ lb.ft} = 1,356 \text{ J}$.

4.2.1 Kerja oleh Gaya yang Konstan

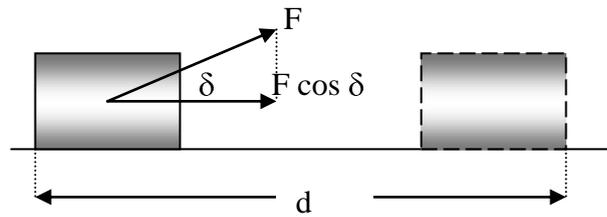
Kerja yang kita definisikan di atas ($W = Fd$), sebetulnya hanya berlaku untuk gaya yang bekerja pada benda dengan arah yang sama dengan perpindahan. Rumus umum untuk kerja, sebetulnya didefinisikan sebagai:

$$W = \vec{F} \bullet \vec{d} \quad (4.2)$$

Meskipun gaya dan perpindahan dua-duanya merupakan besaran vektor, tetapi usaha yang merupakan perkalian titik antara gaya dan perpindahan adalah besaran skalar (ingatlah pelajaran vektor pada bab I). Jika gaya itu tidak searah dengan perpindahan, maka perhitungannya menjadi (lihat gambar 4.2):

$$W = (F \cos \delta) d \quad (4.3)$$

dengan δ adalah sudut antara F dan d .



Gambar 4.2 Kerja yang dilakukan oleh gaya F yang tidak searah dengan gerak benda

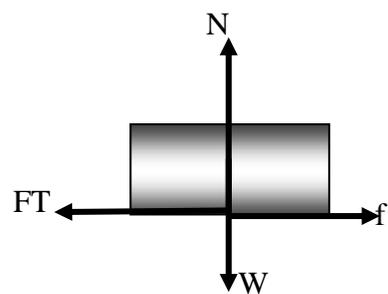
Jika pada benda itu bekerja lebih dari satu gaya, maka kerja totalnya adalah jumlah kerja yang dilakukan oleh masing-masing gaya.

Contoh 4.1:

Seekor kuda menarik andong bermuatan tiga orang penumpang sejauh 20 m di atas tanah datar (lihat gambar 4.3). Berat total andong dan penumpang adalah 14.700 N. Kuda tersebut memberikan gaya sebesar 5000 N dengan sudut 0° di atas garis tanah (garis horizontal). Terdapat gaya gesekan antara tanah dengan kereta luncur sebesar 3500 N.



(a)



(b)

- Gambar 4.3. (a) Seekor kuda menarik andong bermuatan tiga orang penumpang (meorjay.fotopges.com), (b) diagram benda bebas untuk kuda dan bebannya
- Carilah besarnya kerja yang dilakukan oleh masing-masing gaya pada kereta luncur (gaya traktor, gaya gesek, gaya berat, gaya normal),
 - Carilah besarnya kerja total oleh semua gaya tersebut!

Penyelesaian:

(a) Dengan menggunakan persamaan (4.3), mari kita selesaikan besarnya kerja yang dilakukan oleh masing-masing gaya:

* Kerja yang dilakukan oleh gaya berat, W_w :

$$W_w = (W \cos \delta) d = 14.700 \cos 90^\circ (20) = 0$$

perhatikan bahwa kerja yang dilakukan oleh gaya berat W adalah nol, sebab sudut antara gaya berat dengan perpindahan adalah 90° , dengan $\cos 90^\circ = 0$.

* Kerja yang dilakukan oleh gaya normal, W_N :

$$W_N = (N \cos \delta) d = 14.700 \cos 90^\circ (20) = 0$$

perhatikan pula bahwa kerja yang dilakukan oleh gaya normal N adalah nol, sebab sudut antara gaya normal dengan perpindahan adalah 90° , dengan $\cos 90^\circ = 0$.

* Kerja yang dilakukan oleh gaya gesek, W_f :

$$W_f = (f \cos \delta) d = 3500 \cos 180^\circ (20) = -70.000 N.m$$

Sudut antara gaya gesek dan perpindahan, dalam hal ini besarnya adalah 180° , sehingga $\cos 180^\circ = -1$, dan akhirnya menghasilkan kerja negatif.

* Kerja yang dilakukan oleh gaya tarik, W_{FT} :

$$W_{FT} = (F \cos \delta) d = 5000 \cos 0^\circ (20) = 80.000 N.m$$

Sudut antara gaya tarik dan perpindahan, dalam hal ini besarnya adalah 0° , sehingga $\cos 0^\circ = 1$, dan akhirnya menghasilkan kerja positif.

(b). Kerja total yang dilakukan oleh seluruh gaya pada benda merupakan penjumlahan skalar dari kerja masing-masing gaya (ingatlah bahwa kerja merupakan besaran skalar), yaitu:

$$\begin{aligned} W_{\text{tot}} &= W_w + W_N + W_f + W_{FT} = 0 + 0 + (-70.000) + (80.000) = 10.000 \text{ Nm} \\ &= 10 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Jawab

Cara yang lain untuk menjawab kerja total yang dilakukan oleh seluruh gaya adalah dengan menjumlahkan gaya-gaya tersebut terlebih dahulu. Ingatlah bahwa

gaya adalah besaran vektor, sehingga penjumlahan gaya harus dilakukan secara vektor. Penjumlahan vektor paling mudah dicari dengan menggunakan komponen-komponennya. Dari gambar 4.4b, didapatkan:

$$\Sigma F_x = F_T \cos \phi + (-f) = (5000) \cos 36,9^\circ + (-3500) = 500 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = F_T \sin \phi + N + W = (5000) \sin 36,9^\circ + N + 14700$$

Dalam persamaan kedua, besar gaya normal dapat dicari dari hukum I Newton ($\Sigma F_y = 0$), sebab dalam arah sumbu y, tidak ada pergerakan benda (ingatlah pelajaran pada bab III). Namun demikian, persamaan kedua ini tidaklah kita perlukan, karena sesungguhnya tidak ada perpindahan dalam arah y. Dengan demikian, kerja total adalah kerja yang dilakukan oleh komponen gaya total dalam sumbu x, atau:

$$W_{tot} = \Sigma F_x d = (500 \text{ N})(20 \text{ m}) = 10000 \text{ N.m}$$

Ini adalah hasil yang sama seperti kita mencari kerja total pada langkah pertama.

4.2.2 Kerja oleh Gaya yang Berubah

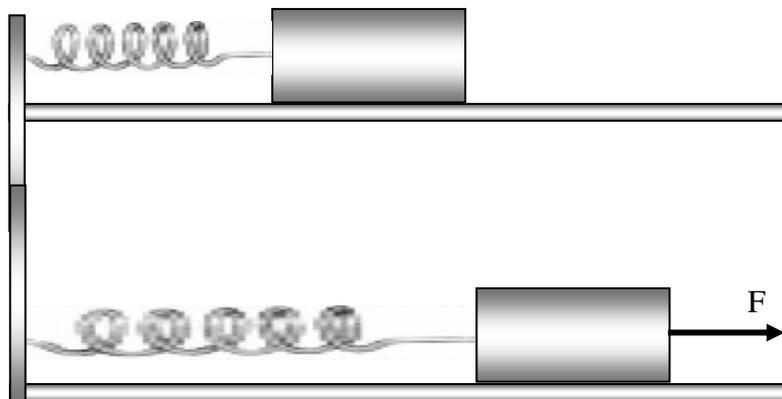
Adakalanya gaya yang bekerja pada sebuah benda tidak memiliki harga yang konstan, contohnya adalah gaya pegas (lihat gambar 4.4). Gaya yang dilakukan oleh pegas berubah besarnya sesuai dengan rumus:

$$F_{(x)} = k \Delta x \tag{4.4}$$

dengan k = konstanta pegas

Δx = pertambahan panjang pegas

Persamaan (4.4) adalah bentuk matematis dari hukum Hooke yang akan dipelajari lebih mendalam pada bab Elastisitas. Semakin besar Δx semakin besar gaya (F) tersebut. Karena besar gaya berubah terhadap tempat (perpindahan), maka kerja yang dilakukan pada benda dalam perpindahan Δx_i adalah:



Gambar 4.4 Gaya yang dilakukan oleh pegas pada balok

$$\Delta W_i = F_{(x_i)} \Delta x_i \quad (4.5)$$

Oleh karena itu, kerja yang dilakukan oleh gaya pegas pada benda untuk pindah dari x_1 ke x_2 adalah jumlah kerja yang dilakukan dalam setiap interval:

$$W_{(x_1 \rightarrow x_2)} = F_{(x_i)} \Delta x_i \quad (4.6)$$

Jika Δx_i dibuat mendekati nol, maka:

$$W_{(x_1 \rightarrow x_2)} = F_{(x_i)} \Delta x_i \quad (4.7)$$

Jumlah yang kontinu, dapat dituliskan sebagai integral, sehingga:

$$W_{|x_1 \rightarrow x_2|} = \int_{x_1}^{x_2} F_{(x)} dx \quad (4.8)$$

Pada pegas, kerja yang dilakukan untuk menarik pegas itu adalah:

$$W_{12} = \frac{1}{2} k x_2^2 - \frac{1}{2} k x_1^2 \quad (4.9)$$

4.3 Jenis-Jenis Energi

Energi merupakan salah satu konsep yang sangat penting dalam sains dan teknologi. Akan tetapi energi secara umum tidak dapat didefinisikan, karena energi banyak sekali jenisnya. Namun demikian, setiap jenis energi yang akan kita pelajari dapat didefinisikan secara sederhana. Diantara jenis-jenis energi yang dapat dicontohkan adalah: energi listrik, energi kimia, energi cahaya, energi panas, energi matahari, energi angin, dan energi mekanik. Energi mekanik terbagi menjadi dua, yaitu energi kinetik (energi yang dimiliki benda karena geraknya) dan energi potensial (energi yang dimiliki benda karena kedudukannya). Secara umum dapat didefinisikan bahwa energi mekanik adalah energi yang dimiliki benda untuk melakukan gerak atau untuk mengubah kedudukannya dari posisi tertentu.

4.3.1 Energi Kinetik

Untuk lebih memahami pengertian energi kinetik, marilah kita analisis gerakan sebuah mobil yang mula-mula memiliki kelajuan awal v_0 . Untuk mempercepat mobil itu sampai kelajuannya menjadi v_1 , maka mesin mobil itu harus memberikan gaya konstan sebesar F dan mobil bergerak sejauh d . Dengan demikian, kerja yang dilakukan oleh gaya mobil itu adalah:

$W = F \cdot d$ Menurut hukum Newton II, gaya yang dilakukan untuk mengubah kelajuan itu sama dengan massa dikalikan percepatannya, atau $F = ma$, sehingga:

$$W = F \cdot d = ma \cdot d = m \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2d} \cdot d \text{ atau:}$$

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \tag{4.13}$$

dengan $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2d}$ (ingat pelajaran tentang kinematika partikel!)

Persamaan (4.12) menyatakan bahwa kerja total yang dilakukan sama dengan perubahan energi kinetik benda, dan ini merupakan teorema kerja – tenaga.

Kerja yang dilakukan oleh gaya pada benda memindahkan energi dari pelaku gaya kepada benda, sebagai akibatnya terjadi perubahan pada besaran $\frac{1}{2} mv^2$. Perubahan ini haruslah merupakan pertambahan atau pengurangan energi, karena kerja adalah perpindahan energi. Jelas bahwa besaran $\frac{1}{2} mv^2$ adalah salah satu bentuk energi, yaitu bentuk energi yang berhubungan dengan gerak, sehingga besaran $\frac{1}{2} mv^2$ disebut juga sebagai energi gerak atau energi kinetik. Kinetik berasal dari bahasa Yunani: *kinetikos*, yang artinya ”gerak”.

4.3.2 Energi Potensial

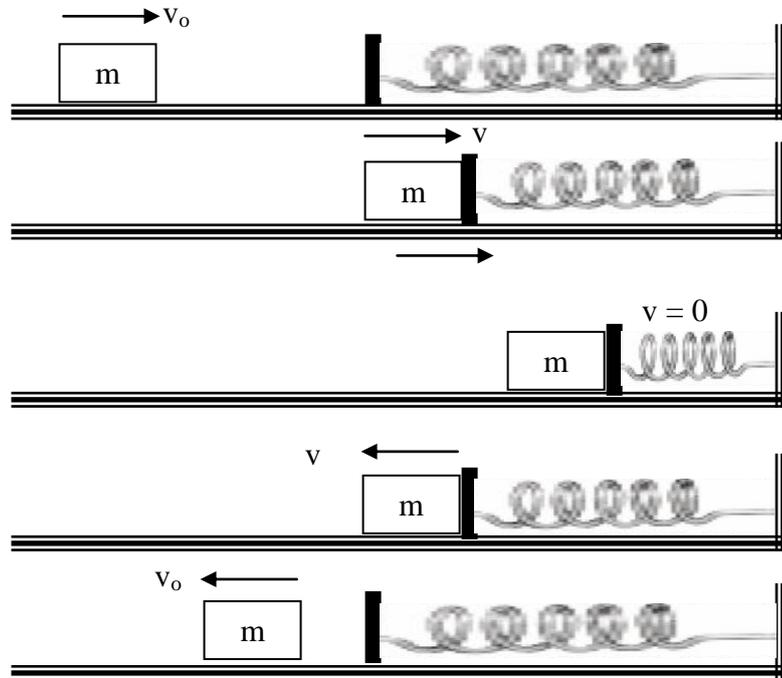
Energi Potensial Pegas

Gambar 4.6 menunjukkan sebuah balok bermassa m yang meluncur di atas bidang tanpa gesekan menuju sebuah pegas. Marilah kita pandang kejadian tersebut dari sudut pandang transfer energi dan transformasi energi. Sebelum menumbuk pegas, balok mempunyai energi kinetik $\frac{1}{2}mv^2$. Setelah menumbuk pegas, kecepatan balok berkurang dan akhirnya berhenti. Hal ini berarti balok kehilangan energi dengan berkurangnya energi kinetik, dan pada waktu balok berhenti, energi kinetiknya sudah habis terpakai. Pada waktu menekan pegas, balok melakukan gaya sebesar $F = k(x - x_0)$, dan pergeseran pada ujung pegas. Banyaknya energi yang diambil dari balok dan diberikan pada pegas adalah:

$$W = \frac{1}{2} k (x - x_0)^2 \quad (4.14)$$

Oleh karena itu haruslah:

$$\frac{1}{2} mv^2 = W = \frac{1}{2} k (x - x_0)^2 \quad (4.15)$$

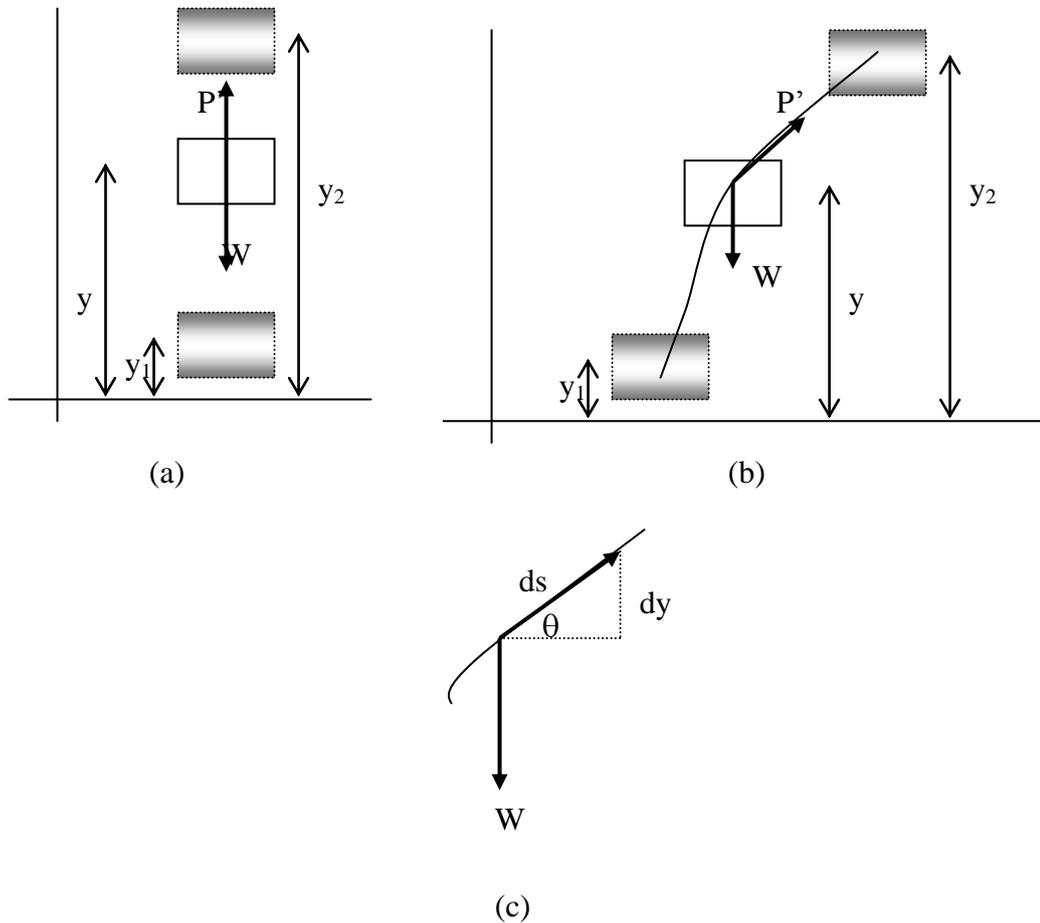


Gambar 4.6. Energi potensial pegas

Pada waktu balok berhenti, balok memindahkan energi pada pegas. Energi yang diterima dari balok disimpan oleh pegas dalam keadaan tertekan. Energi semacam ini disebut energi potensial pegas, dan besarnya $W = \frac{1}{2} k (x - x_0)^2$.

Energi Potensial Gravitasi

Perhatikan gambar 4.7! Misalnya kita membawa benda bermassa m dari y_1 ke y_2 . Gaya berat benda ini selalu berarah ke bawah. Dengan demikian, besar gaya gravitasi dekat permukaan bumi adalah konstan, dapat ditunjukkan bahwa kerja yang diperlukan untuk melawan gaya berat benda ini untuk membawa benda dari y_1 ke y_2 lewat tangga 1 adalah: $W_1 = F \Delta y = -mg (y_2 - y_1)$, dan kerja lewat tangga 2 adalah : $W_2 = -mg (y_2 - y_1)$ juga. Tanda negatif menyatakan bahwa arah gaya berlawanan dengan arah perpindahan. Besar energi yang diberikan pada benda untuk melawan gaya gravitasi yang besarnya $mg(y_2 - y_1)$ disebut energi potensial gravitasi.



Gambar 4.7 Energi potensial gravitasi pada benda

4.4 Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Andaikan P' dalam gambar 4.6 adalah resultan semua gaya yang bekerja pada benda, dan andaikan W' adalah kerja yang dilakukan oleh gaya-gaya ini (P'), kemudian menurut teorema kerja – tenaga, yaitu bahwa kerja sama dengan perubahan energi kinetik, maka:

$$W' + W_{\text{grav}} = \Delta K$$

$$W' + (-mg(y_2 - y_1)) = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

$$W' = (\frac{1}{2} m v_2^2 + m g y_2) - (\frac{1}{2} m v_1^2 + m g y_1) \tag{4.19}$$

Jumlah energi kinetik dan energi potensial benda itu (pada ruas kanan) disebut energi mekanik. Jadi kerja semua gaya yang bekerja pada benda, kecuali kerja gravitasi, sama dengan perubahan jumlah energi mekanik. Dalam hal khusus, dimana pada benda hanya bekerja gaya gravitasi, maka kerja W' adalah nol, dan persamaan (4.19) menjadi:

$$(1/2 mv_2^2 + mgy_2) = (1/2 mv_1^2 + mgy_1) \quad (4.20)$$

$$EM_1 = EM_2 \quad (4.21)$$

Dalam hal ini, energi mekanik adalah konstan atau kekal.

4.5 Gaya Konservatif dan Gaya Disipatif

4.5.1 Gaya Konservatif

Kerja gaya gravitasi tidak bergantung pada lintasannya, tetapi harganya sama dengan keadaan akhir dan keadaan awal benda menurut suatu fungsi. Jika hanya gaya gravitasi yang bekerja pada benda itu, maka jumlah energi mekaniknya adalah konstan/kekal. Oleh karena itu gaya gravitasi disebut gaya konservatif (kekal). Jika benda sedang naik, kerja gaya gravitasi bertambah dengan berkurangnya energi kinetik. Jika benda sedang turun, kerja gaya gravitasi memberikan tambahan kepada energi kinetik, atau dengan kata lain kerja ini timbul kembali sepenuhnya.

Kerja gaya pegas tidak bergantung pada lintasannya dan harganya sama dengan keadaan akhir dan keadaan awal suatu fungsi. Jika hanya gaya pegas yang bekerja pada benda, maka jumlah energi kinetik dan energi potensial pegas adalah kekal. Oleh karena itu, gaya pegas juga merupakan gaya konservatif. Jadi jika benda bergerak hingga menambah panjang pegas, pengurangan kerja yang dilakukan oleh gaya potensial pegas akan ditambah oleh pertambahan energi kinetik.

Sedangkan jika regangan pegas berkurang, kerja yang dilakukan oleh gaya potensial pegas akan menambah energi kinetik, sehingga kerja ini juga timbul kembali sepenuhnya.

Kerja gaya konservatif mempunyai sifat-sifat:

- tidak bergantung pada lintasan;
- harganya sama dengan selisih antara harga akhir dengan harga awal suatu fungsi;
- dapat timbul kembali sepenuhnya.

4.5.2 Gaya Disipatif

Gaya konservatif berbeda dengan gaya gesekan. Gaya gesekan dipengaruhi oleh lintasan; makin panjang lintasan makin besar gaya gesekan. Apabila sebuah benda diluncurkan di atas permukaan kasar, gaya gesekan tidak akan mengembalikan kerja kepada harga awalnya. Harus ada kerja lagi untuk mengembalikan benda pada posisinya semula. Dengan kata lain, kerja gaya gesekan tidak dapat timbul kembali sepenuhnya. Jika hanya gaya gesekan yang bekerja, energi mekanik total tidak kekal. Oleh karena itu, gaya gesekan disebut gaya nonkonservatif atau gaya disipatif.

4.6 Kekekalan Energi

Gaya gravitasi dan gaya pegas bersifat konservatif, artinya kerja yang dilakukan untuk melawan gaya ini memindahkan energi dari pelaku gaya menjadi energi simpanan, yaitu energi potensial. Jika benda bergerak melawan gaya ini, energi kinetiknya akan diubah menjadi energi potensial yang seluruhnya dapat diubah menjadi energi kinetik kembali. Jadi kerja melawan gaya ini tidaklah membuang energi.

Energi mekanik total akan bersifat kekal jika semua gaya yang bekerja pada benda bersifat konservatif. Jika pada benda terdapat gaya yang bersifat disipatif, maka energi mekanik benda tidaklah kekal, tetapi energi total benda tetaplah kekal. Energi mekanik benda di tempat 1 (sebelum berpindah/bergerak) harus sama energi mekanik benda di tempat 2 (setelah bergerak/berpindah) ditambah dengan energi yang diterima benda atau dikurangi dengan energi yang ditransfer ke luar, atau:

$$EM_1 = EM_2 + W$$

atau $W = EM_2 - EM_1$ (4.22)

Dengan $W =$ kerja oleh gaya disipatif dalam perjalanan dari 1 ke 2. Hubungan antara kerja dan energi dalam persamaan (4.22) dinamakan teorema kerja – energi. Hubungan ini berlaku umum, artinya berlaku untuk gaya-gaya konservatif maupun nonkonservatif (disipatif). Pada benda yang sedang bergerak dan gaya-gayanya konservatif, maka teorema kerja-energi memenuhi persamaan:

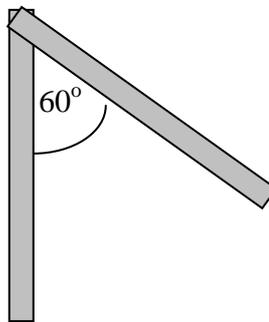
$$W = Ek_2 - Ek_1$$
 (4.23)

Persamaan (4.23) akan berlaku demikian untuk benda yang bergerak dengan energi potensial untuk keadaan ini sama dengan nol.

Latihan soal:

4.1 (a) Hitung energi kinetik sebuah mobil 1800 lb yang berjalan dengan kecepatan 30 mil/jam (b) Berapa kali besar energi kinetik, jika kecepatan diduakalikan?

4.2 Sebuah batang meteran yang massanya 300 gr, diengselkan pada salah satu ujungnya, seperti pada gambar, lalu diputar melalui sudut 60° . Berapa kenaikan energi potensialnya?



4.3 Sebuah batang meteran diberi poros pada sumbu horizontalnya melalui pusatnya. Pada salah satu ujung batang ini diikatkan sebuah benda bermassa 2 kg dan pada ujung batang lainnya diikatkan sebuah benda bermassa 1 kg. Massa batang ini dapat diabaikan. Sistem (terdiri dari batang dan 2 benda) dilepaskan dari keadaan diam sedang tongkat itu horizontal. Berapa kecepatan tiap benda ketika batang meteran itu memutar melewati posisi vertikal?

4.4 Seberapa cepat seorang pengendara sepeda harus mendaki bukit dengan kemiringan 60° untuk mempertahankan keluaran daya 0,25 hp? Anggap gesekan antara ban sepeda dengan jalan adalah 7 N dan berat total pengendara dengan sepedanya 700 N.

4.5 Perancang mobil telah membuat "bemper 8 km/h" yang dirancang untuk secara elastik menekan dan kemmbali lagi tanpa kerusakan fisik pada laju di bawah 8 km/h ketika mobil bertabrakan. Jika bahan bumper itu berubah secara permanen setelah tertekan 1,5 cm tetapi tetap berkelakuan seperti pegas sampai titik itu, berapa seharusnya konstanta pegas dari bahan bumper itu, dengan menganggap massa mobil 1400 kg?

