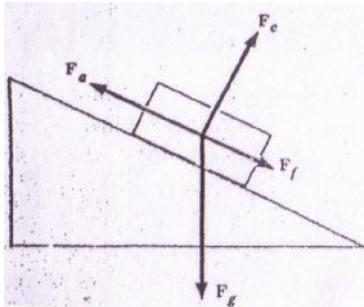


BAB 6. MACHINES (MESIN)

Empat bab sebelumnya telah mempertimbangkan akibat dari gaya yang bekerja pada suatu benda. Pada bab ini perhatian tertuju pada sesuatu yang menggunakan gaya. Khususnya pada alat yang disebut dengan *engines*, yang mampu merubah berbagai macam bentuk energi menjadi kerja. *Engines* sangat penting untuk gerak pada machines dan hewan. Otot hewan merupakan *engines*, dan memiliki fungsi yang sama pada *engine* di mobil.

6.1 Daya dan Efisiensi

Gambar 6.1 menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada balok bergerak. Gaya gravitasi F_g tegak lurus terhadap permukaan horizontal, gaya kontak F_c tegak lurus terhadap bidang miring, dan gaya gesek F_f , serta gaya yang dikerjakan F_a , keduanya sejajar dengan bidang miring. Sesuai dengan Sifat 1 (Bagian 2.1) tiap-tiap gaya tersebut digunakan oleh beberapa objek lain. Gaya-gaya ini seluruhnya berbeda karakter, dan masing-masing sifat kerja pada balok tersebut berbeda.



Gambar 6.1
Gaya yang bekerja pada balok dikarenakan bidang miring

Kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi F_g sama dengan perubahan dari energi potensial gravitasi dari balok itu. Gaya dengan sifat seperti ini disebut dengan konservatif. Jika F_g adalah satu-satunya gaya yang bekerja pada balok, energi mekanik total dari balok (jumlah dari energi potensial dan energi kinetik) akan tetap.

Tidak ada kerja yang dilakukan oleh gaya kontak karena gaya tersebut selalu tegak lurus dengan terhadap permukaan dan dengan begitu tidak ada komponen kerja pada arah gerak dari balok.

Kerja yang dilakukan oleh gaya gesek kinetik selalu negatif. Gaya dengan sifat seperti ini disebut gaya disipatif. Gaya disipatif selalu merubah

energi kinetik menjadi panas, mendisipasikan energi mekanik dari suatu objek. Suatu objek yang hanya memiliki gaya F_g , F_c , dan F_f yang bekerja padanya secepatnya akan diam, karena gaya gesek merubah seluruh energi mekanik objek menjadi panas.

KOMENTAR Gaya gesek kinetik adalah gaya sejajar antara dua permukaan yang bergerak relatif satu dengan yang lain. Gaya gesek statik, adalah gaya parallel antara permukaan stasioner, bukan disipatif. Contohnya, gaya antara roda berputar dan tanah adalah gaya gesek, bukan kinetik, karena roda tidak bergerak relatif terhadap tanah pada titik kontakannya. Pada keadaan seperti ini gaya gesek statik dapat melakukan kerja positif atau negatif.

Hanya gaya yang dikerjakan yang melakukan kerja positif pada objek dan pada saat yang sama meningkatkan energi mekanik. Gaya ini dikerjakan oleh alat yang disebut dengan *engine*, yang merubah energi nonmekanik menjadi kerja. Mekanisme detail yang digunakan *engine* untuk merubah energi non mekanik mejadi kerja bukan menjadi suatu perhatian disini, tetapi sifat umum dari proses tersebut ditandai oleh persamaan

$$E_{input} = W + E_{output} \quad 6.1$$

Ini menyatakan bahwa untuk sejumlah energi E_{input} yang diberikan digunakan oleh *engine*, sejumlah kerja W dihasilkan; perbedaan antara E_{input} dengan kerja W adalah sejumlah energi E_{output} yang dibuang dari sistem, biasanya dalam bentuk panas. Persamaan 6.1 adalah pernyataan dari kekekalan energi, karena kerja dapat selalu dirubah menjadi sejumlah energi yang sama.

Efisiensi e dari *engine* adalah perbandingan dari kerja yang dihasilkan dengan energi yang digunakan.

$$e = \frac{W}{E_{input}} \quad 6.2$$

Terkadang dinyatakan dalam bentuk persentase. Untuk mesin, seperti mesin bensin dan otot hewan, yang beroperasi dengan energi kimia, efisiensinya hanya sekitar 25 persen; atau untuk setiap 100 J energi yang digunakan, hanya 25 J yang diubah menjadi kerja yang berguna. Sisanya 75 J dibuang dalam bentuk panas. Perpindahan panas ini merupakan masalah bagi tiap mesin, baik itu stasiun tenaga listrik maupun bagi seorang atlet.

KOMENTAR stasiun pembangkit listrik membuang begitu banyak kuantitas panas ke lingkungan, membuat masalah polusi panas. Dapat dibayangkan mengapa energi ini tidak di daur ulang. Yaitu, mengapa energi E_{output} tidak dikembalikan lagi ke mesin sebagai masukan energi? Jawabannya adalah bahwa panasnya terlalu rendah untuk diubah menjadi kerja. Sebagai konsekuensi dari hukum kedua Termodinamika, ada batasan yang mendasar untuk efisiensi dari tiap mesin, dimana untuk kebanyakan mesin praktis jarang lebih dari 25 persen atau sekitarnya.

Daya P dari *engine* adalah rata-rata kerja *engine* tersebut dihasilkan. Jadi, jika *engine* menghasilkan sejumlah kerja W dalam waktu t , dayanya adalah

$$P = \frac{W}{t} \quad 6.3$$

Sebagai contoh, daya dari suatu *engine* yang menghasilkan kerja 75 J dalam 3 detik adalah

$$P = \frac{75 \text{ J}}{3 \text{ s}} = 25 \text{ J/s}$$

Satuan dari daya adalah joule per sekon. Atau watt (W)

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

Satu kilowatt sama dengan 10^3 W

Dalam sistem satuan Inggris, satuan kerja adalah kaki-pon dan unit dari daya adalah kaki pon per sekon. Satuan yang lebih umum adalah tenaga kuda (hp), yang sama dengan 550 ft-lb/s. Perubahan antara satuan ini dan satuan mks adalah

$$1 \text{ hp} = 550 \text{ ft-lbs/s} = 746 \text{ W} = 0.746 \text{ kW}$$

dan

$$1 \text{ W} = 0.737 \text{ ft-lbs/s} = 10^{-3} \text{ kW}$$

Sebagai contoh, daya dari mesin mobil adalah 85 hp. Ini setara dengan

$$P = 85 \text{ hp} \times 746 \text{ W/hp} = 63,400 \text{ W} = 63.4 \text{ kW}$$

Besar dari energi yang digunakan oleh mesin lebih besar dari ini, bagaimanapun juga, karena efisiensi harus lebih kecil dari 1. Jika efisiensinya adalah 0.25, persamaan 6.2 menunjukkan bahwa untuk setiap kerja yang dilakukan energi yang dipakainya

$$E_{\text{input}} = \frac{W}{e} = \frac{1 \text{ J}}{0.25} = 4 \text{ J}$$

Jadi besar pemakaian energinya adalah $1/e$ kali daya

$$\text{Besarnya pemakaian energi} = \frac{P}{e} \quad 6.4$$

Ada persamaan lain untuk daya yang dapat diturunkan dari persamaan 6.3 dengan mengingat bahwa kerja adalah gaya kali jarak (Bagian 5.1). Dengan mensubstitusikan pernyataan

$$W = Fd$$

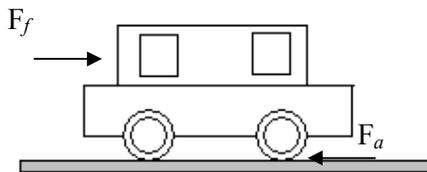
ke dalam persamaan 6.3, kita mendapatkan

$$P = \frac{Fd}{t} = Fv \quad 6.5$$

dimana $v = d/t$ adalah kecepatan objek pada saat melakukan kerja

sebagai contoh, jika sebuah mobil dalam contoh sebelumnya bergerak konstan 27 m/s (sekitar 60 mil/jam), berapa gaya yang bekerja pada mobil tersebut

$$\begin{aligned} F_a &= \frac{P}{v} = \frac{63,400 \text{ W}}{27 \text{ m/s}} \\ &= 2350 \text{ J/m} = 2350 \text{ N} = 528 \text{ pon} \end{aligned}$$



Gambar 6.2
Gaya yang bekerja pada mobil yang bergerak dengan kecepatan konstan

Gaya ini merupakan gaya gesek statik tanah pada roda (Gambar 6.2). Karena gaya tersebut bekerja searah dengan arah gerak dari mobil, gaya ini melakukan kerja positif pada gaya. Tentunya gaya ini dihasilkan oleh mesin mobil. (Bagian 6.3). Gaya total pada

mobil harus nol karena mobil tersebut tidak dipercepat, jadi ada gaya lain F_f sebesar 528 pon yang bekerja berlawanan dengan gerak mobil. Gaya ini adalah gaya gesek (hambatan udara) udara pada mobil. Karena gaya tersebut berlawanan dengan gerak mobil, gaya melakukan kerja negatif pada mobil.

6.2 Pesawat Sederhana

Pesawat sederhana adalah alat yang dapat mengubah besar atau arah dari gaya yang dikerjakan. Kebanyakan mesin kompleks memiliki mesin yang dapat menghasilkan gaya dan rangkaian pesawat sederhana yang dapat merubah gaya tersebut menjadi suatu bentuk yang sesuai dengan tugas yang diperlukan. Pada mobil gaya dari mesin dirubah oleh rangkaian gigi dan roda menjadi gaya yang bekerja pada tanah. Pada tubuh manusia otot adalah mesinnya, dan gaya yang digunakan dirubah oleh pengungkit yang tersusun oleh tulang dan tulang sendi. ke tangan dan kaki.

Dasar pesawat sederhana adalah roda, pengungkit, bidang miring, dan sekrup yang beroperasi dengan cara yang sama. Gaya F_1 digunakan mesin, melakukan kerja W_1 pada mesin, sementara pada waktu yang sama mesin menggunakan gaya R_2 kepada objek luar, melakukan gaya W_2 pada objek. Kekekalan energi mengharuskan bahwa W_2 sama dengan W_1 dikurangi kerja yang berubah menjadi panas oleh gaya gesek di dalam mesin:

$$W_1 = W_2 + E_{\text{output}} \quad 6.6$$

Dimana E_{output} adalah panas disebabkan oleh gesekan.

KOMENTAR huruf yang berbeda digunakan pada gaya ini untuk menekankan bahwa mereka bekerja pada objek yang berbeda. Tulisan di bawah garis yang berbeda digunakan untuk menekankan bahwa gaya ini bukan pasangan aksi reaksi.

Efisiensi dari pesawat sederhana adalah perbandingan dari kerja yang dihasilkan W_2 dengan kerja yang dipakai W_1

$$e = \frac{W_2}{W_1} \quad 6.7$$

persamaan 6.6 menunjukkan bahwa $W_1 > W_2$, jadi e akan selalu kurang dari 1. Akan tetapi, efisiensi dapat dibuat mendekati 1 dengan menggunakan minyak pelumas untuk mengurangi gesekan internal. Untuk memudahkan pembahasan tersebut, kita harus menganggap pesawat sederhana ideal (tanpa gesekan), dimana efisiensinya 1.

Seluruh pesawat sederhana bekerja berdasarkan prinsip yang sama. Gaya F_1 digunakan untuk mesin bergerak melewati jarak d_1 , melakukan kerja $W_1 = F_1d_1$ pada mesin. Pada saat yang sama mesin menggunakan gaya R_2 melewati jarak d_2 , melakukan kerja $W_2 = F_2d_2$ pada objek luar. Jika tidak ada energi yang hilang melalui gesekan, W_1 sama dengan W_2 , jadi

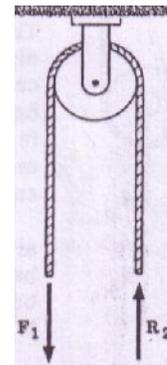
$$F_1d_1 = F_2d_2$$

Atau
$$\frac{R_2}{F_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad 6.8$$

Perbandingan dari besar gaya yang digunakan oleh mesin dengan besar gaya yang digunakan pada mesin disebut dengan keuntungan mekanik M dari mesin. Dari persamaan 6.8 kita lihat bahwa

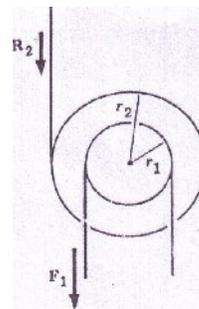
$$M = \frac{R_2}{F_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad 6.9$$

Gambar 6.3 menunjukkan sebuah katrol yang digunakan untuk mengubah gaya ke bawah F_1 menjadi gaya ke atas R_2 . Kerja $W_1 = F_1d_1$ yang dilakukan oleh F_1 untuk menggerakkan tali ke bawah sejauh d_1 sama dengan kerja $W_2 = F_2d_2$ yang dilakukan oleh R_2 untuk bergerak ke atas sejauh d_2 . Karena jarak antara d_1 dan d_2 sama, gaya F_1 dan R_2 pun sama. Keuntungan mekanik dari mesin ini adalah 1.0.



Gambar 6.3
Katrol merubah gaya F_2 menjadi gaya R_2

Gambar 6.4 dan 6.5 menunjukkan susunan roda yang digunakan untuk merubah besar dari gaya yang digunakan. Pada gambar 6.4 gaya F_1 digunakan pada lingkaran dalam dari roda. Gaya R_2 digunakan oleh lingkaran terluar. Gaya F_1 bergerak melalui jarak $d_1 = 2\pi r_1$, sama dengan keliling lingkaran dalam, tiap roda berevolusi. Pada saat yang sama gaya R_2 bergerak melalui jarak $d_2 = 2\pi r_2$, sama dengan keliling terluar roda. Oleh karena itu keuntungan mekanik dari mesin ini

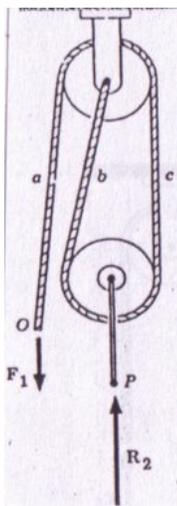


Gambar 6.4
Ketika gaya F_1 dikerjakan pada lingkaran dalam dari roda. Lingkaran luar melakukan gaya F_2 kepada objek luar

$$M = \frac{d_1}{d_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

karena pada kasus ini M kurang dari 1, gaya R_2 lebih kecil dari F_1

Gambar 6.5 menunjukkan balok dan katrol disusun dengan keuntungan mekanik 2. jarak d_1 dimana F_1 bergerak dua kali jarak d_2 dimana R_2 bergerak.



Gambar 6.5

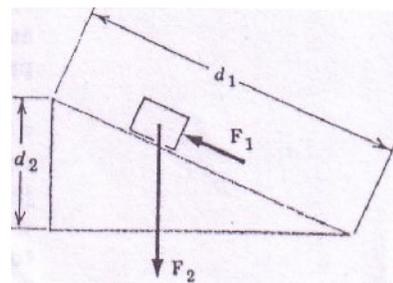
Ketika gaya F_1 dikerjakan pada balok dan pengait, balok dan pengait, melakukan gaya F_2 pada objek luar

Sebagai contoh, jika F_1 bergerak menggerakkan bagian a ke bawah 2 kaki, bagian b dan c masing-masing akan menyusut 1 kaki dan begitu juga R_2 akan bergerak 1 kaki. 50 pon Gaya F_1 digunakan pada titik O hasil dari gaya R_2 100 pon yang sedang digunakan pada titik P .

Bidang miring bukan merupakan mesin dengan sendirinya. Keuntungan mekanik dapat ditetapkan, dengan catatan pada Gambar 6.6 gaya F_1 yang digunakan sejajar dengan bidang miring untuk jarak d_1 meningkatkan gaya F_2 pada jarak vertikal d_2 . akibatnya keuntungan mekanik dari bidang miring adalah d_1/d_2 . Baji yang ditunjukkan pada gambar 6.7 adalah mesin dalam bentuk bidang miring. Dengan menggunakan gaya yang besarnya F_1 pada baji, gaya besarnya $R_2 = (d_1/d_2)F_1$ digunakan oleh baji terhadap objek. Sekrup merupakan mesin dengan bentuk bidang

miring spiral. Dongkrak pada Gambar 6.8 memiliki keuntungan mekanik yang sangat besar karena kenaikan jarak d_2 sekrup hanya sedikit ketika pegangan berpindah dengan jarak yang besar d_1 .

Sementara roda adalah pesawat sederhana yang paling umum digunakan dalam peralatan mekanik pengungkit adalah pesawat sederhana yang digunakan pada hewan. Gaya F_1 yang digunakan oleh otot pada lengan dalam Gambar 6.9 berpindah sejauh d_1 sementara tangan bergerak sejauh d_2 . karena keuntungan mekanik d_1/d_2 kurang



Gambar 6.6

Gaya F_1 bekerja sejajar pada bidang miring mengangkat beban F_2 yang lebih besar dari F_1

dari 1, gaya F_2 yang digunakan tangan kepada bola kurang dari F_1 . hasil serupa telah diperoleh pada Bagian 3.4 menggunakan torsi dan pada keadaan kesetimbangan.

Torsi pada titik O digunakan oleh gaya yang bekerja pada lengan adalah F_1s_1 dan $-F_2s_2$. Disini F_2 adalah gaya yang digunakan pada tangan oleh bola. (Itu adalah reaksi untuk gaya R_2 yang digunakan oleh tangan pada bola.). Karena lengan mendekati kesetimbangan, jumlah dari torsi tersebut mendekati nol, jadi

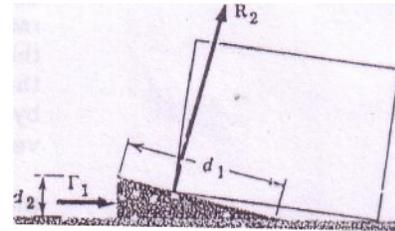
$$F_1s_1 - F_2s_2 = 0$$

atau
$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{s_1}{s_2}$$

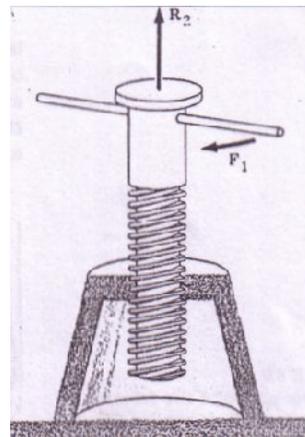
Tetapi besar F_2 sama dengan besar R_2 . oleh karena itu keuntungan mekanik dari pengungkit adalah

$$\frac{R_2}{F_1} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{s_1}{s_2} = \frac{d_1}{d_2}$$

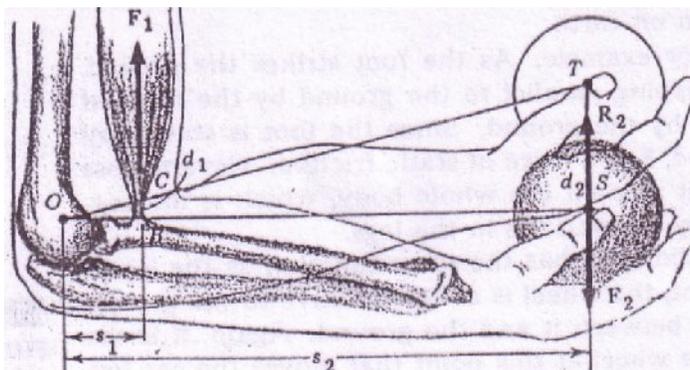
Perbandingan s_1/s_2 sama dengan d_1/d_2 karena segitiga BOC dan SOT sama (Gambar 6.9). jadi keuntungan mekanik dari pengungkit dapat dihitung dengan cara mempertimbangkan jarak yang dilalui gaya atau dengan menggunakan metode torsi yang dibahas pada Bab 3.



Gambar 6.7
Ketika gaya F_2 bekerja pada baji. Permukaan baji melakukan gaya yang besar R_2 pada gaya eksternal



Gambar 6.8
Mur bidang miring yang dibentuk menjadi sebuah spiral

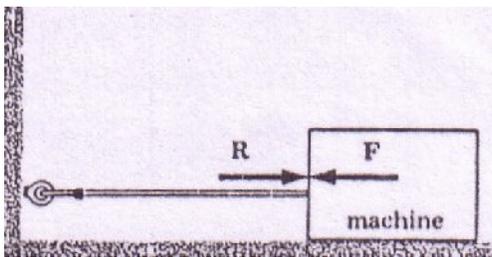


Gambar 6.9
Pengungkit pada bekerja pada lengan bawah. Ketika gaya F_1 bekerja pada tangan dan lengan mengerjakan gaya R_2 pada objek luar.

6.3 Daya Penggerak.

Beberapa mesin, seperti mobil dan pesawat terbang, seperti hewan, mampu bergerak sendiri. Pernyataan *automaton* akan digunakan berkenaan dengan seluruh objek yang bergerak sendiri, baik itu benda hidup atau benda mati. Benda yang bergerak secara otomatis seluruhnya memiliki prinsip yang sama: mereka semua mempunyai bagian yang berfungsi sebagai mesin (*engine*) dan bagian yang berfungsi sebagai Pesawat Sederhana. Selanjutnya, selama bergerak, mesin melakukan kerja pada *automaton* itu sendiri.

Untuk melihat bagaimana mesin dapat bekerja sendiri, perhatikan mesin pada Gambar 6.10, dimana terdiri dari mesin yang dapat memindahkan gaya R melalui jarak, yaitu melakukan kerja. Jika gaya R digunakan oleh tali pada objek yang tidak bergerak, mesin dapat menarik dirinya sendiri sepanjang tali. Dalam kasus ini gaya pada mesin adalah reaksi $F = -R$ dari tali terhadap mesin. Selanjutnya itu merupakan reaksi F yang melakukan kerja pada kasus ini, Karena itu adalah F yang bekerja pada objek yang bergerak (mesin). Gaya R yang digunakan mesin tidak melakukan kerja, karena bekerja pada objek yang tidak bergerak.



Gambar 6.10

Daya penggerak. Mesin menarik sendiri dengan cara mengerjakan gaya pada R pada objek yang tidak bergerak. Gaya F melakukan kerja pada mesin

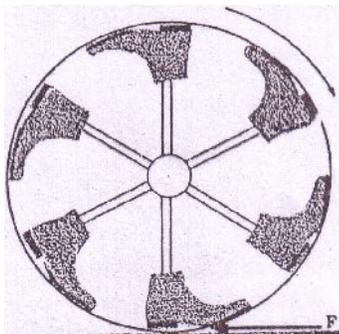
Jadi, dalam mesin, baik gaya R digunakan oleh mesin pada objek luar atau reaksi F yang digunakan pada mesin oleh objek luar keduanya melakukan kerja W . Pada *automaton* gaya reaksi melakukan kerja pada dirinya sendiri. Kerjanya dihasilkan oleh mesin *automaton*. Tentunya, hanya laba-laba serta ulat bulu menggunakan teknik menarik tali. Kebanyakan hewan bergerak dengan cara menggunakan gaya secara langsung pada objek yang tidak bergerak relatif, seperti tanah.

Untuk bergerak sejajar dengan tanah gaya R harus digunakan sejajar dengan tanah. Ini berarti bahwa R adalah gaya gesek dan bahwa F adalah gaya dari gesekan yang digunakan oleh terhadap *automaton*. Gesekan, yang biasanya dianggap menentang gerakan, adalah gaya yang sangat diperlukan untuk daya penggerak di bumi.

Perhatikan berjalan, sebagai contoh. Pada saat kaki menyentuh tanah, kaki mencegah terpeleset pada tanah oleh gaya gesek yang digunakan kaki oleh tanah, F adalah gaya gesek statik. Meskipun begitu F melakukan kerja, karena gaya tersebut bekerja pada seluruh tubuh., yang bergerak. Kerja ini disampaikan oleh otot di kaki.

Roda pada mobil memiliki fungsi yang sama seperti kaki hewan. Seperti kakai, roda berada pada keadaan diam relatif terhadap tanah pada titik kontak antara roda dengan tanah. Sekali lagi, gaya gesek F pada roda di titik tersebut yang membuat mobil tersebut maju. Ketika gaya gesek ini dihilangkan, seperti ketika roda berada di atas es, roda berputar relatif terhadap tanah dan tidak ada gerakan maju yang mungkin terjadi.

Roda seperti rangkaian kaki yang seluruhnya bergerak dengan arah yang sama (Gambar 6.11). salah satu keuntungan terbesar dari roda adalah roda menghilangkan gerakan mundur dan maju yang ada pada kaki yang bergerak. Bagaimanapun juga, keuntungan dari roda dapat dicapai hanya pada permukaan yang halus. Untuk bergerak di atas daerah yang kasar tidak ada yang dapat mengalahkan sepasang kaki yang baik.



Gambar 1.11
Roda seperti rangkain kakai yang bergerak dengan arah yang sama

Singkatnya: setiap objek yang mampu bergerak sendiri terdiri dari mesin dan rangkaian pesawat sederhana yang merubah gaya yang digunakan oleh mesin menjadi gaya yang digunakan oleh *automaton* pada objek yang tidak bergerak. Reaksi dari gaya ini mendorong *automaton* maju, dan melaukan kerja padanya.. dengan cara ini kerja dihasilkan oleh mesin digunakan oleh *automaton* itu sendiri.

Energi dari hewan didapat dari makanan dikeluarkan dalam bentuk kerja dan panas. Hewan yang berat badannya sedang meningkat atau turun harus mengeluarkan energi dengan nilai yang sama dengan energi yang tersedia. Sebenarnya, walaupun energi pada awalnya berubah menjadi kerja dengan cepat dapat berubah menjadi panas. Sebagai contoh, jantung manusia melakukan kerja dengan cara mengkerut dan memompa darah ke dalam aorta dengan nilai sekitar 1 W (Bagian 7.3). Pada awalnya kerja ini dirubah menjadi energi mekanik darah. Tetapi setelah darah mengalir melalui sistem peredaran darah, energi tersebut secara berangsur-angsur dirubah menjadi panas oleh gaya gesek yang digunakan pada darah oleh dinding pembuluh darah.

Laki-laki 70 kg (154 pon) secara normal menghabiskan 2500 kkal setiap harinya, jumlah sebenarnya tergantung pada aktivitas fisiknya, yaitu, berapa banyak dia melakukan kerja. Karena 1 kkal sama dengan 4185 J, dia menghabiskan energi tiap harinya adalah

$$2500 \text{ kkal} \times 4185 \text{ J/kkal} = 1.05 \times 10^7 \text{ J}$$

Ini adalah nilai energi yang dikeluarkan atau nilai metabolic dari 121 W. Nilai metabolic biasanya sekitar 75 W pada saat tidur tapi pada saat berjalan perlahan nilai metabolic sekitar 230 W. Nilai metabolic yang digunakan seseorang dalam suatu aktivitas khusus diukur dengan cara mengumpulkan seluruh udara yang dihembuskan kira-kira sekitar 5 menit. Kandungan oksigen dari udara yang sudah kadaluwarsa ini kemudian dianalisis untuk menentukan jumlah dari oksigen yang dikonsumsi permenit. Oksigen yang dikonsumsi bereaksi dengan karbohidrat, lemak dan protein dalam tubuh, rata-rata mengeluarkan sekitar 4.8 kkal = 2.0×10^4 J energi untuk tiap liter oksigen yang dikonsumsi. Andaikan, sebagai contoh,

pria mengkonsumsi 1.45 l oksigen per menit selama mengendarai sepeda cepat. Nilai metabolicnya adalah

$$(1.45 \text{ l/menit})(2.0 \times 10^4 \text{ J/l}) = 2.90 \times 10^4 \\ = 483 \text{ J/s} = 483 \text{ W}$$

KOMENTAR Energi untuk kontraksi otot, datang dari perubahan adenosine triphosphate (ATP) menjadi adenosine diphosphate (ADP) dan (AMP). Oksidasi dari karbohidrat, lemak dan protein memberikan energi untuk merubah kembali ADP dan AMP menjadi ATP. Jadi, walaupun makanan adalah sumber energi pokok. ATP dengan segera menjadi sumber energi untuk aktivitas motorik.

Sangat menarik untuk mencoba menghitung energi yang dikonsumsi dalam aktivitas tertentu, seperti berlari. Pada Bagian 5.2 telah ditunjukkan bahwa kerja yang paling besar dilakukan pada saat berlari adalah percepatan dan perlambatan dari kaki pada tiap langkah. Ketika kaki diangkat dari tanah, membuat kaki dari keadaan diam bergerak dengan kecepatan v dimana hampir mendekati kecepatan tubuh. Dalam prosesnya, otot dari kaki melakukan kerja sama dengan perubahan energi kinetik dari kaki, yaitu sama dengan $\frac{1}{2} mv^2$, dimana m adalah massa kaki. Kemudian ketika kaki kembali ke keadaan diam, otot yang berlawanan juga melakukan sejumlah kerja yang sama dengan $\frac{1}{2} mv^2$.

Perhatikan seorang pria yang berlari dengan kecepatan 3 m/s (kira-kira 9 mil/menit). Masing-masing kaki memiliki massa 10 kg, jadi kerja yang dilakukan kaki tiap langkahnya adalah

$$W = mv^2 = 10 \text{ kg} \times (3 \text{ m/s})^2 = 90 \text{ J}$$

Andaikan panjang langkahnya—jarak antara dua langkah kaki berturut-turut pada kaki yang sama—adalah 2 m. Kemudian, pria tersebut mengambil 1.5 langkah per detik tiap kakinya, jadi tenaga yang dipakai untuk kedua kakinya adalah

$$P = 2(90 \text{ J/langkah} \times 1.5 \text{ langkah/detik}) = 270 \text{ W}$$

Karena efisiensi otot hanya sekitar 0.25, nilai energi yang dikeluarkan adalah

$$\frac{P}{e} = \frac{270 \text{ W}}{0.25} = 1080 \text{ W}$$

ini hampir mendekati nilai yang terukur 1000 W

Sebenarnya perkiraan kita bagaimanapun juga harus keluar nilai yang lebih rendah dari nilai yang terukur karena perkiraan kita tidak memasukkan energi yang dikonsumsi seluruh fungsi tubuh yang lain kedalam perhitungan, seperti bernafas dan memompa darah. Meskipun begitu, perhitungan ini menunjukkan bahwa energi yang ikut serta dalam aktivitas motorik dapat dipahami dalam istilah prinsip dasar fisika.

6.4 Hukum skala melibatkan daya

Nilai metabolic seseorang bergantung terhadap ukuran dan aktifitas fisiknya. Untuk tujuan medis sangat dibutuhkan adanya nilai metabolic yang terukur. Untuk mengatur akibat dari aktivitas fisik nilai metabolic diukur dibawah kondisi standar yang disebut kondisi dasar (*basal condition*), dimana seseorang sadar tapi sebaliknya dalam keadaan sepenuhnya istirahat. Didapatkan bahwa pada keadaan seperti ini nilai metabolic normal sebanding dengan total luas permukaan dari tubuh seseorang.

Sebagai contoh, sementara pada keadaan sepenuhnya istirahat seseorang mengkonsumsi 15 l oksigen per jam, jadi nilai metabolic adalah

$$(15 \text{ l/jam})(2.0 \times 10^4 \text{ J/l}) = 3.0 \times 10^5 \text{ J/jam} \\ = 83.3 \text{ W}$$

Jika luas permukaan tubuhnya adalah 1.7 m^2 , nilai metabolic dasarnya (BMR) adalah

$$\text{BMR} = \frac{83.3 \text{ W}}{1.7 \text{ m}^2} = 49 \text{ W/m}^2$$

Perbandingan BMR dengan luas tubuhnya adalah hukum skala. Yang menemukan bahwa nilai metabolic maksimum hewan yang mirip juga sebanding dengan luas permukaan total hewan tersebut, jadi nilai metabolicnya diberi skala L^2 . Jadi hewan L kali lebih besar dari hewan lain dapat menghabiskan energi L^2 kali lebih banyak. Akibatnya daya yang lebih besar didapat oleh binatang yang besar adalah L^2 kali daripada hewan yang lebih kecil karena daya adalah perkalian (efisiensi e) dari nilai metabolic. Ini merupakan hasil yang tidak diharapkan. Pada

Bagian 5.2 didapat bahwa kerja yang dilakukan oleh otot diberi skala sebagai L^3 . Kenapa skala daya L^2 .

Alasan pertama adalah walaupun kerja yang dilakukan oleh otot diberi skala sebagai L^3 , kecepatan v dimana tungkai bergerak bebas dari L (Bagian 5.2). Waktu yang dibutuhkan untuk bergerak sejauh d adalah d/v , dan oleh sebab itu skala waktu adalah L . Daya yang dicapai diberi skala sebagai kerja dibagi waktu, atau sebagai L^2 . Alasan yang lain adalah bahwa seluruh energi yang digunakan oleh tubuh akhirnya dirubah menjadi panas, yang harus dibuang dari tubuh. Karena panas tersebut harus keluar melalui permukaan tubuh, nilai maksimum kehilangan panas diberi skala L^2 . Nilai metabolic maksimum tidak boleh lebih besar dari nilai maksimum yang hilang, jadi nilai metabolic maksimum diberi skala L^2

Ada beberapa akibat dari hukum skala ini.

Kecepatan jantung

Karena oksigen dibutuhkan untuk metabolisme dikirim oleh darah, nilai metabolic sebanding dengan volume darah yang dipompa oleh jantung persekon. Ini sebanding dengan volume V jantung dikali kecepatan jantung r (jumlah detak jantung perdetik).

Kemudian kita dapatkan

$$P \propto Vr$$

Jadi r diberi skala P/V . Karena P diberi skala L^2 dan V diberi skala L^3 , r diberi skala $L^2/L^3 = L^{-1}$. Jadi jantung yang dimiliki oleh hewan besar berdetak lebih lambat daripada jantung hewan kecil. Sebagai contoh, faktor skala L dari manusia relatif terhadap monyet adalah sekitar 2.5. Untuk itu jantung manusia harus sekitar $1/2.5 = 0.4$ kali jantung monyet. Ini mendekati harga yang diukur 0.5. Terjadi ketidaksesuaian, karena hukum skala benar hanya untuk hewan yang segala hal kecuali ukuran.

Durasi menyelam

Total energi yang dikeluarkan oleh mamalia laut selama menyelam di bawah air sama dengan nilai metaboliknya kali lamanya t penyelaman. Energinya sebanding dengan jumlah oksigen yang disimpan di dalam paru-paru dan darai dari mamalia tersebut pada sama mulai melakukan penyelaman.

Volume oksigen yang disimpan \propto energi yang dikeluarkan = nilai metabolic $\times t$
Karena volume oksigen diberi skala L^3 dan nilai metabolic diberi skala L^2 , durasi (waktu) L . Seekor mamalia yang besar akan dapat diam dibawah air lebih lama dibandingkan mamalia yang lebih kecil.

Melayang-layang

Beberapa burung kecil, seperti burung kolibri, dapat tetap berada di udara dengan cara mengepakkan sayapnya dengan cepat sehingga cukup untuk menghasilkan gaya ke bawah pada udara sama besarnya dengan berat mereka mg . Reaksi pada gaya ke bawah ini pada udara adalah gaya ke atas dengan besar mg pada burung., dimana menjaga keseimbangan burung. Daya yang dibutuhkan menahan gaya tersebut adalah mgv , dimana v adalah kecepatan sayap burung ketika bergerak. Harga maksimum dari v tidak bergantung pada ukuran (Bagian 5.2), jadi daya yang dibutuhkan diberi skala L^3 . Karena daya maksimum yang tersedia diberi skala L . Karenanya perbandingan meningkat dengan meningkatnya ukuran, hanya burung kecil yang rasionya kurang dari 1, dapat melayang. Alasan yang serupa menunjukkan bahwa ada suatu ukuran maksimum untuk dapat terbang secara horizontal. Burung paling berat yang dapat terbang, burung puyuh di Eropa dan Australi, beratnya hanya 32 pon.

Mendayung

Contoh yang sedikit berbeda dari penskalaan, kita harus memperhatikan bagaimana kecepatan dari adu kecepatan perahu bergantung pada jumlah pendayung. Anggap n sebagai jumlah pendayung, dan P daya dari tiap pendayung, jadi total daya yang tersedia adalah nP . Daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kapal dengan kecepatan v sama dengan $F_f v$, dimana F_f adalah gaya

gesek pada perahu oleh air. Gaya ini dengan eksperimen ditemukan sebanding dengan luas dari kapal yang terendam di dalam air dikali v^2 , untuk itu F_f diberi skala L^2v^2 , dimana L adalah faktor skala dari perahudan daya yang dibutuhkan diberi skala L^2v^3 . Samakan daya yang tersedia dengan daya yang dibutuhkan, kita dapatkan.

$$nP \propto L^3v^3$$

atau

$$v^3 \propto n/L^2$$

Faktor P harus dibuang, karena pendayung ukurannya berbeda. Perahu dianggap menerima daya yang sama. Volume perahu diberi skala L^3 dan sebanding dengan jumlah pendayung, jadi

$$L^3 \propto n$$

Jika tiap sisi dari bagian tersebut dinaikkan menjadi $2/3$ daya, maka itu menjadi

$$L^2 \propto n^{2/3}$$

Substitusikan persamaan di atas dengan persamaan 6.10, kita dapatkan

$$V^3 \propto \frac{n}{n^{2/3}} = n^{1/3}$$

Dimana setelah mengambil akar kubus dari kedua sisi, menjadi

$$V^3 \propto (n^{1/3})^{1/3} = n^{1/9}$$

Ini berarti kecepatan perahu meningkat akar sembilan dari jumlah pendayung.

Sebagai contoh, pada Olimpiade 1968 perahu dengan delapan orang menang lomba 2000-m dengan besar kecepatan 5.65 m/s, sedangkan perahu dengan dua orang menang dengan kecepatan 4.82 m/s. Perbandingan kecepatan ini $5.65/4.82 = 1.17$, dan menurut persamaan 6.11, harus sama dengan akar sembilan dari jumlah pendayung di kedua perahu. Akar sembilan dari $8/2 = 4$ adalah 1.167, dimana ini sesuai.

Basal Metabolic Rate

Basal metabolic rate, atau BMR, adalah kandungan kalori yang dibutuhkan untuk menopang kehidupan manusia. Dapat dilihat dalam sejumlah energi (dalam kalori) yang digunakan oleh tubuh.

BMR bertanggung jawab untuk membakar 70 % kalori tapi ini bergantung. Kalori dibakar oleh proses jasmani seperti respirasi, pemompaan darah, dan pengaturan suhu tubuh.

BMR merupakan factor terbesar dalam menentukan keseluruhan metabolic rate dan berapa banyak kalori yang ingin dipertahankan, menaikkan dan menurunkan berat badan. BMR ditentukan oleh kombinasi genetic dan factor lingkungan seperti

- Genetik. Seseorang dilahirkan dengan metabolisme yang cepat dan lambat
- Jenis kelamin. Laki-laki memiliki berat otot yang lebih besar dan persentase lemak tubuh yang sedikit. Ini berarti laki-laki memiliki basal metabolic rate yang lebih tinggi dari wanita.
- Umur. BMR berkurang terhadap umur. Setelah 20 tahun BMR turun sekitar 20% perdekade
- Berat badan. Semakin besar berat badan semakin besar BMR. Contoh, metabolic rate wanita gendut 25% lebih tinggi daripada wanita kurus.
- Luas permukaan tubuh. Orang tinggi yang kurus BMR lebih tinggi dibandingkan dengan orang pendek dengan berat badan yang sama.
- Diet. Penderita kelaparan atau penurrunan kalori secara tiba-tiba dapat mengurangi BMR sebanyak 30%
- Temperatur tubuh. Setiap 0.5% kenaikan suhu tubuh maka BMR naik sekitar 7%
- Kelenjar. Jika produksi kelenjar tiroksin terlalu banyak maka BMR akan menjadi dua kali lipat. Jika produksi kelenjar tiroksin terlalu sedikit BMR akan menyusut 30%-40%

Pengukuran Basal Metabolic Rate

- **The Harris-Benedict formula (BMR based on total body weight)**

Pria: $BMR = 66 + (13.7 \times \text{Berat badan dalam kg}) + (5 \times \text{Tinggi badan dalam cm}) - (6.8 \times \text{Umur dalam tahun})$

Women: $BMR = 655 + (9.6 \times \text{Berat badan dalam kg}) + (1.8 \times \text{Tinggi badan dalam cm}) - (4.7 \times \text{Umur dalam tahun})$

Contoh

Wanita, 30 tahun, tinggi 5' 6 " (167.6 cm), berat badan 120 pon. (54.5 kg)

$BMR = 655 + 523 + 302 - 141 = 1339$ kalori/hari

- **Katch-McArdle formula (BMR based on lean body weight)**

BMR (pria dan wanita) = $370 + (21.6 \times \text{massa dalam kg})$

Example:

Wanita, berat badan 120 pon. (54.5 kg), persentase tubuh 20% (24 pon. lemak, 96 pon. lean)

lean mass adalah 96 pon. (43.6 kg)

$BMR = 370 + (21.6 \times 43.6) = 1312$ kalori

6.5 Arus balik dan alat-alat kontrol.

Empat bagian sebelumnya telah menampilkan beberapa prinsip fisika pada mesin dan telah mencoba menunjukkan kemiripan hewan dengan mesin mekanik. Tidak ada satupun keraguan bahwa untuk mempelajari daya dan energi yang dibutuhkan oleh hewan sangat berguna untuk menganggap hewan sebagai mesin. Bagaimanapun juga, banyak orang menolak keras gagasan bahwa hewan adalah mesin. Bagaimanapun juga, kata mereka, mesin tidak memiliki kemauan sendiri dan hewan memiliki karakteristik yang penuh arti.

Pelajaran mengenai kemampuan seperti hewan dari suatu mesin disebut *cybernetic*. Ini merupakan bidang interdisipliner yang melibatkan teknik, matematika, biologi, dan psikologi. Masalah *cybernetic* dari perilaku hewan (dan bahkan kemampuan berpikir manusia) didekati dengan sudut pandang teknik. Ahli cybernetic mencoba untuk memahami bagaimana hewan melakukan suatu fungsi

tertentu dengan cara membuat sebuah mesin yang dapat melakukan fungsi yang sama.

Ahli *cybernetic* telah menemukan bahwa salah satu perbedaan penting antara hewan dan mesin adalah hewan diatur oleh rangkaian arus balik negatif. Arus balik negatif merupakan konsep teknik yang menunjukkan susunan informasi dari dunia luar pertama kali dirasakan dan kemudian menggunakannya untuk mengatur operasi dari mesin. Otomatisasi dihasilkan dari pengenalan arus balik negatif ke dalam industri.

Arus balik negatif sangat diperlukan untuk sistem yang mampu mengatur diri sendiri. Beberapa bentuk arus balik negatif ikut serta dalam mengatur banyak fungsi dalam tubuh hewan, seperti mengatur interaksi antar hewan dalam kehidupan sosial.