

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 1-1.** Aine rakentuu atomeista. Atomi koostuu ytimeistä ja elektroniverhosta. Ydin muodostuu protoneista ja neutroneista, elektroniverho elektroneista. Aine voi rakentua myös molekyyleistä tai ioneista. Ionissa atomin elektroniverhosta on poistunut elektroni tai elektroneja tai atomiin on tullut elektroni tai elektroneja.
- 1-2.** a) Tilaa kuvaavat suureet eli tilanmuuttujat ovat lämpötila T , paine p , tilavuus V ja ainemäärä n .
b) Makrotasolla tarkastellaan silmin nähtäviä tai muilla aisteilla havaittavia ilmiöitä.
c) Mikrotasolla tarkastelun kohteena ovat atomit ja molekyylit.
d) Aineen mikrotason malleilla selitetään aineen makrotason ilmiöitä.
- 1-3.** a) Styroksista valmistettu kylmälaukku on (lähes) eristetty termodynaaminen systeemi.
b) Jos jääkaapin ovi on suljettu, jääkaappi on suljettu systeemi.
c) Auto on avoin systeemi.
- 1-4.** a) Tilaa kuvaavat suureet ovat pullossa olevan kaasun paine sekä nesteen ja kaasun tilavuus ja lämpötila.
b) Kun pulloa ravistellaan, paine pullon sisällä kasvaa, samoin lämpötila voi hieman kohota. Pullon tilavuus ei juuri muutu.
- 1-5.** a) Makrotason tarkastelussa heliumin tilaa kuvataan lämpötilan, paineen ja tilavuuden avulla.

b) Heliumipallon makroskooppiset ominaisuudet selitetään mikrotasolla rakennehiukkasten liikkeen avulla. Kaasun paine aiheutuu sen rakenneosasten törmäyksistä. Mitä suurempi rakennehiukkasten nopeus on, sitä suurempi on paine ja sitä enemmän törmäyksiä pallon kuoreen tapahtuu aikayksikössä. Pallon sisällä oleva helium vaatii tietyn tilavuuden tietyssä lämpötilassa ja paineessa.

1-6. Koska lämpötila on suoraan verrannollinen aineen rakenneosasten liikkeeseen, on luontevaa ajatella, että on olemassa alin mahdollinen lämpötila. Siinä rakenneosasten liike olisi kokonaan pysähtynyt. Absoluuttinen nollapiste on lämpötilan teoreettinen alaraja, jota ei voida koskaan saavuttaa.

1-7. Lämpötilan muutos celsiusasteina on $\Delta t = 18\text{ °C} - (-7\text{ °C}) = 25\text{ °C}$ ja kelvineinä $\Delta T = 25\text{ K}$. Lämpötilan muutos kelvineinä ja celsiusasteina on yhtä suuri.

1-8. a) $T = (14,4 + 273,15)\text{ K} \approx 288\text{ K}$.

b) $\Delta t = 14,4\text{ °C} - (-18\text{ °C}) \approx 32\text{ °C}$ ja kelvineinä $\Delta T = 32\text{ K}$.

1-9. Lämpötilat ovat

a) $T = (37 + 273,15)\text{ K} \approx 310\text{ K}$

b) $T = (-18 + 273,15)\text{ K} \approx 255\text{ K}$

c) $t = (90 - 273,15)\text{ °C} \approx -183\text{ °C}$.

1-10. a) Suureyhtälö on $\frac{t}{\text{°C}} = \frac{5}{9} \left(\frac{t}{\text{°F}} - 32 \right)$.

b) Muunnetaan lämpötila $-25\text{ }^{\circ}\text{F}$ celsiusasteiksi:

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{5}{9} \left(\frac{t}{^{\circ}\text{F}} - 32 \right) = \frac{5}{9} (-25 - 32)^{\circ}\text{C} = -31,667^{\circ}\text{C} \approx -32^{\circ}\text{C}.$$

- 1-11.** Esimerkiksi ihmisen kehon lämpötila näyttäisi olevan noin $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lattian lämpötila on hieman alle $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

2-1. Samasta painosta johtuva kosketusvoima aiheuttaa sieneen erisuuruiset painautumat, koska voiman vaikutus jakautuu erikokoisille pinta-aloille.

2-2. Työpöydän kanteen kohdistuva voima F on kartonkiin kohdistuvan painon G suuruinen. Kartongin työpöytään kohdistavan paineen suuruus on

$$p = \frac{F}{A} = \frac{G}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{0,11 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{1,3 \text{ m} \cdot 0,80 \text{ m}} \approx 1,0 \text{ Pa}.$$

2-3. a) Paine on

$$p = \frac{G}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{68 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{0,18 \text{ m} \cdot 0,53 \text{ m}} \approx 7,0 \text{ kPa}.$$

b) Artun kengänpohjan pinta-ala on 210 cm^2 . Näin ollen yhdellä jalalla seisoessaan paine on

$$p = \frac{G}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{68 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{210 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} \approx 32 \text{ kPa}.$$

Ero kohtaan a verrattuna on noin 4,5-kertainen.

2-4. a) Lentokoneen lastiruumassa paineen ja lämpötilan muutokset ovat lennon aikana suuret verrattuna tilanteeseen maanpinnalla. Kosmetiikka, kuten sampoopullot ja hoitoaineet, on hyvä pakata muovipusseihin, koska pullot voivat vuotaa matkan aikana ilmanpaineen vaihtelujen takia (pullon sisällä olevaa ympäristöä korkeampipaineista ilmaa ja nestettä pyrkii ulos pullosta) ja näin liata muita matkatavaroita.

b) Kun ilmanpaine välikorvassa eroaa ympäristön paineesta, ei tärykalvo värähtelee normaalilla tavalla. Tuntuu kuin korvat olisivat "lukossa".

Korkeuden nopea muuttuminen aiheuttaa sen, että välikorvan paine ei ehdi sopeutua ympäristön ilmanpaineeseen ja vallitseva paine-ero aiheuttaa voiman, joka kohdistuu tärykalvoon. Paine-eron syntymistä voi estää haukottelemalla tai nieleskelemällä. Myös purukumin pureskelu auttaa.

- 2-5.** a) Silmääläkärin silmänpainemittari ilmoittaa silmässä vallitsevan ylipaineen, eli tässä tapauksessa ylipaine silmässä on 17 mmHg. Lukema on normaali.

b) Paineen yhtälöstä $p = \frac{F}{A}$ silmään kohdistuva voiman suuruus on

$$F = pA = 101,3 \text{ kPa} \cdot 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 22,286 \text{ N} \approx 22 \text{ N}.$$

c) Punnuksen massa olisi

$$m = \frac{G}{g} = \frac{22,286 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} \approx 2,3 \text{ kg}.$$

- 2-6.** a) Pulpetin pintaan kohdistuva voima on kirjaan kohdistuvan painon suuruinen. Näin ollen paine on

$$p = \frac{G}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{0,33 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{0,184 \text{ m} \cdot 0,239 \text{ m}} \approx 74 \text{ Pa}.$$

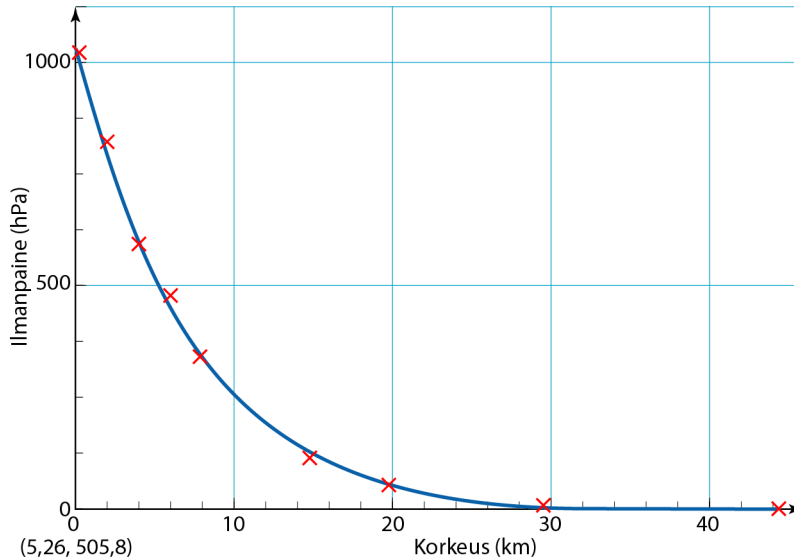
b) Ilmanpaine kohdistaa kirjan kanteen voiman, jonka suuruus on

$$F = pA = 101,3 \text{ kPa} \cdot (0,184 \text{ m} \cdot 0,239 \text{ m}) \approx 4,5 \text{ kN}.$$

(Huomaa, että tämä voima on yhtä suuri kuin noin 450 kg massaiseen kappaleeseen vaikuttava paino.)

c) Pöydällä olevan kirjan takakansi ei ole täysin tiiviisti kiinni pulpetin kannessa, vaan kirjan kannen ja pulpetin kannen välissä on ilmaa, joten kirjan kumpaankin kanteen kohdistuu (likimain) yhtä suuri ilmanpaine. Näin ollen kirjan takakanteen kohdistuu myös (likimain) yhtä suuri voima kuin etukanteen, ja voimat (likimain) kumoavat toistensa vaikutukset.

2-7. a) Ilmanpaine korkeuden funktiona.



b) Ilmanpaine on puolet alkuperäisestä 5,3 km:n korkeudella.

c) Ilmanpaine 10 km:n korkeudella on 260 hPa.

2-8. a) Hydrostaattinen paine vedessä on sitä suurempi mitä syvemmälle sukeltaa. Kun paine välikorvassa eroaa ympäristön paineesta, paine-ero aiheuttaa kivun tunteen.

b) Kuvaajan mukaan kokonaispaine 73 cm:n syvyydellä on 109 kPa. Koska mittauksen aikana ilmanpaine oli 102 kPa, hydrostaattinen paine on $109 \text{ kPa} - 102 \text{ kPa} = 7 \text{ kPa}$.

Kuvaajan mukaan suoran fysikaalinen kulmakerroin on $9,679 \text{ kPa/m}$. Tämän perusteella voi arvioida, että jokaista metriä kohden hydrostaattinen paine lisääntyy noin $9,679 \text{ kPa}$:lla eli 10 metrin syvyydellä hydrostaattinen paine olisi noin $96,79 \text{ kPa} \approx 100 \text{ kPa}$, joka likimain vastaa normaalia ilmanpainetta. Näin ollen vedessä 10 m:n syvyydellä vallitseva hydrostaattinen paine on likimain yhtä suuri kuin normaali ilmanpaine. (Huomaa, että 10 m:n syvyydellä vallitseva kokonaispaine on noin 200 kPa.)

TESTAA, OSAATKO S. 23

1. a b c 2. b 3. a b 4. a b 5. b 6. b c 7. a b c 8. a b 9. a b 10. c 11. a b c 12. a b

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 3-1.** Energian säilymislain mukaan energian kokonaismäärä pysyy muuttumattomana. Energia voi luonnonilmiöissä siirtyä tai muuntua muodosta toiseen. Energia ei lisäännä eikä vähene, eikä sitä voi luoda eikä hävittää.
- 3-2.** Vapaa energia on välittömästi hyödynnettävissä esimerkiksi lämmittämään asuntoja tai tuottamaan sähköä. Esimerkiksi Auringon säteilyenergia lämmittää säteilyn kohdetta ja tuulen ja virtaavan veden energia muuntuu sähköksi generaattoreissa. Sidottu energia pitää vapauttaa ennen kuin se voidaan käyttää hyödyksi. Esimerkiksi puun kemiallinen energia vapautetaan puusta lämmöksi polttamalla. Vapaita energialajeja ovat esimerkiksi maalämpö, tuulen ja virtaavan veden energia, aaltojen energia sekä säteilyenergia. Sidottuja energialajeja ovat esimerkiksi massaansa sisältävä energia ($E = mc^2$), kemiallinen energia, atomiytimen sidosenergia ja kappaleiden ja vesivaraston paikkaan liittyvä potentiaalienergia.
- 3-3.** Sisäenergia on mikrotasolla tarkasteltuna systeemin rakenneosasten etenemiseen, värähtelyyn ja pyörimiseen liittyvää liike-energiaa sekä niiden välisten sidosten potentiaalienergiaa.
- 3-4.** a) Kappaleen potentiaalienergia on kappaleen asemaan (sijaintiin) liittyvää energiaa.
b) Kappaleen liike-energia on kappaleen liikkeeseen liittyvää energiaa.
c) Kappaleen mekaaninen energia on kappaleen ja Maan vuorovaikutukseen liittyvän potentiaalienergian ja kappaleen liike-energian summa.

3-5. Liike-energia on $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Kaavan mukaan liike-energia on verrannollinen nopeuden neliöön.

a) Jos nopeus kolminkertaistuu, liike-energia yhdeksänkertaistuu: $3^2 = 9$.

b) Jos nopeus pienenee puoleen, liike-energia pienenee neljäsosaan:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}.$$

3-6. a) Potentiaalienergia voi olla negatiivinen. Jos kappale sijaitsee valitun nollatason alapuolella, kappaleen potentiaalienergia on negatiivinen. Potentiaalienergia on nolla valitulla nollatasolla.

Jos pulpetin pinnan taso valitaan potentiaalienergian nollatasoksi, pulpetin tasolla olevan kirjan potentiaalienergia on nolla ja lattialla olevan koululaukun potentiaalienergia on negatiivinen. Fysiikan ilmiöiden kannalta vain potentiaalienergian muutoksella on merkitystä, ja potentiaalienergia voi olla negatiivinenkin.

b) Kappaleen liike-energia ei voi olla negatiivinen, koska massa m on aina positiivinen ja samoin nopeuden neliö v^2 . Liike-energia on nolla, jos kappaleen nopeus on nolla.

Sadan metrin juoksukilpailussa juoksijalla on liike-energiaa. Kun juoksija on pysähtynyt, hänen nopeutensa on nolla. Silloin hänen liike-energiansa on nolla.

3-7. a) Uimahyppääjän potentiaalienergia 10,9 m:n korkeudella potentiaalienergian nollatasosta on

$$E_p = mgh = 77 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10,9 \text{ m} = 8233,533 \text{ J} \approx 8,2 \text{ kJ}.$$

b) Koska vedenpinnan taso on potentiaalienergian nollataso, uimahyppääjän potentiaalienergia vedenpinnan tasolla on nolla.

c) Uimahyppääjän potentiaalienergian muutos on

$$\Delta E_p = \Delta E_{p,\text{loppu}} - \Delta E_{p,\text{alku}} = 0 \text{ J} - 8233,533 \text{ kJ} \approx -8,2 \text{ kJ}.$$

d) Uimahyppääjän liike-energia on

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 77 \text{ kg} \cdot \left(14 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \approx 7,5 \text{ kJ}.$$

3-8. a) Auton liike-energia on

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1300 \text{ kg} \cdot \left(\frac{120 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}\right)^2 \approx 720 \text{ kJ}.$$

b) Liike-energia alussa on

$$E_1 = \frac{1}{2}mv_1^2.$$

Liike-energia lopussa on

$$E_2 = \frac{1}{2}mv_2^2.$$

Liike-energioiden suhde on

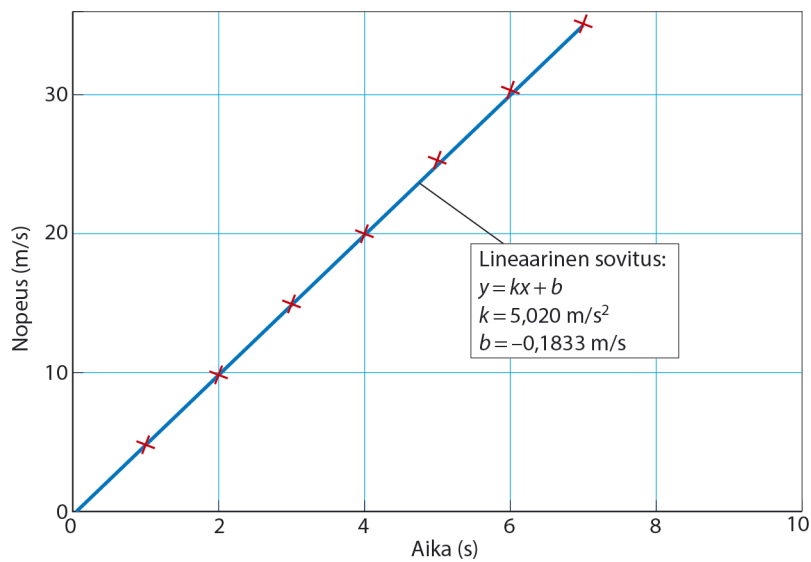
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{1}{2}mv_2^2}{\frac{1}{2}mv_1^2} = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{\left(\frac{40 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}\right)^2}{\left(\frac{50 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}\right)^2} = \left(\frac{40}{50}\right)^2 = 0,64.$$

Näin ollen liike-energia pienenee $1 - 0,64 = 0,36 = 36 \%$.

3-9. Lentokoneen mekaaninen energia on sen potentiaalienergian ja liike-energian summa:

$$\begin{aligned} E_{\text{mek}} &= E_p + E_k = mgh + \frac{1}{2}mv^2 \\ &= 310\,000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10,5 \cdot 10^3 \text{ m} + \frac{1}{2} \cdot 310\,000 \text{ kg} \cdot \left(\frac{980 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}\right)^2 \\ &\approx 43 \text{ GJ}. \end{aligned}$$

3-10. a) Nopeuden kuvaaja.

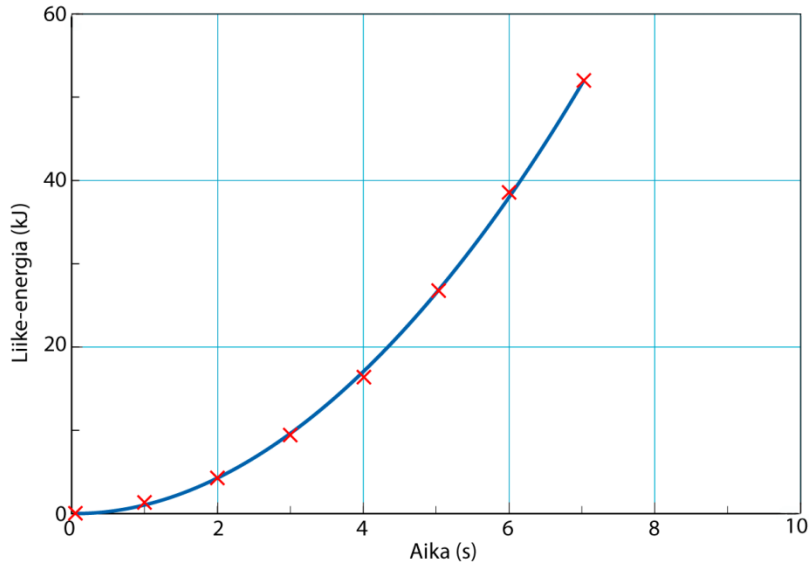


Kiihtyvyys on $5,0 \text{ m/s}^2$.

b) Lasketaan taulukkoon liike-energiat:

$t \text{ (s)}$	$v \text{ (m/s)}$	$E_k \text{ (kJ)}$
1,0	4,8	0,979
2,0	9,7	3,998
3,0	14,8	9,309
4,0	19,7	16,493
5,0	25,1	26,775
6,0	30,2	38,761
7,0	34,8	51,469

Liike-energian kuvaaja:



c) Kuvaaja ei ole lineaarinen.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 4-1.** a) Palomiehet jarruttavat vauhtiaan puristamalla metallitankoa käsillään. Kitkan tekemä työ ilmenee käsien mikroskooppisten rakenneosasten liikkeen voimistumisena, joten kädet lämpenevät.
- b) Kun auton pyörät lukkiutuvat, kumi liukuu pitkin tien pintaa. Kitkan tekemä työ ilmenee renkaiden mikroskooppisten rakenneosasten liikkeen voimistumisena, joten renkaat kuumenevat. Jos pyörät eivät pyöri, kitka kuumentaa koko ajan samaa kohtaa renkaan pinnasta, joka voi alkaa savuta.
- 4-2.** a) Vasemmanpuoleinen kuva:
Työtä tekevät työntävä voima, kitka ja ilmanvastus. Voiman tekemä työ on vastakkaismerkkinen kitkan ja ilmanvastuksen tekemään työhön nähden.
Oikeanpuoleinen kuva:
Työtä tekevät paino ja ilmanvastus.
- b) Skootterin jarruttaessa työtä tekee renkaan ja maanpinnan välinen kitka.
- 4-3.** a) Työ on $W = Fs = 25 \text{ N} \cdot 150 \text{ m} \approx 3,8 \text{ kJ}$.
- b) Kaisan käsien kosketusvoima, kitka ja ilmanvastus tekevät työtä kelkkaan.
- 4-4.** a) Työ on $W = Gh = mg\Delta h = 5,0 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,95 \text{ m} \approx 47 \text{ J}$.
- b) Koska kahvakuula ei liiku käden kosketusvoiman suunnassa, voiman tekemä työ on nolla.
- c) Käden kosketusvoima ei tee työtä, koska voima on kohtisuorassa siirtymää vastaan.

- 4-5.** Koska liikkeen suunta ja voima ovat vastakkaisuuntaiset, jarruttavan voiman tekemä työ on

$$W = Fs = -46 \text{ N} \cdot 5,2 \text{ m} \approx -240 \text{ J}.$$
- 4-6.** a) Työ on $W = Gh = mg\Delta h = 42 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1,5 \text{ m} \approx 620 \text{ J}.$
 b) Käden kosketusvoiman suunta on vastakkainen liikkeen suunnalle. Työ on $-620 \text{ J}.$
- 4-7.** A4, B3, C2, D7, E5, F6.
- 4-8.** a) Mikään laite ei voi luovuttaa energiaa enempää kuin se vastaanottaa, ei edes samaa määrää. Kaikissa koneissa on liikkuvia osia, joihin liittyvä kitka aiheuttaa koneen osien lämpenemistä, mikä vie osan energiasta. Lisäksi koneissa esiintyy usein ympäristöä korkeampia lämpötiloja, jolloin lämpötilaeron takia energia poistuu koneesta lämpönä.
 b) Jos laitteen hyötysuhde olisi yksi, laite tuottaisi energiaa yhtä paljon kuin se käyttää, joten se voisi käyttää luovuttamansa energian uudelleen. Tällaista laitetta kutsutaan ikiliikkujaksi.
 c) Jos koneen teho kasvaa, työntekoaika lyhenee.
 d) Polttomoottorissa suurin osa polttoaineen kemiallisesta energiasta muuntuu lämmöksi.
 e) Jos lampun hyötysuhde on 60 %, vain 60 % lampun ottamasta energiasta muuntuu valoksi.
- 4-9.** a) Koneen hyötysuhde on

$$\eta = \frac{P_{\text{tuotto}}}{P_{\text{otto}}} = \frac{21 \text{ W}}{54 \text{ W}} \approx 0,39 = 39 \text{ \%}.$$

 b) Koneen ottoteho vastaa 100 % ja tuottoteho on siitä 39 %, joten hukkatehon osuus on $100 \% - 39 \% = 61 \text{ \%}.$

4-10. a) Hyötysuhteen yhtälön $\eta = \frac{P_{\text{tuotto}}}{P_{\text{otto}}}$ mukaan moottorin sähköverkosta

ottama teho on

$$P_{\text{otto}} = \frac{P_{\text{tuotto}}}{\eta} = \frac{850 \text{ W}}{0,91} = 934 \text{ W} \approx 930 \text{ W}.$$

b) Hukkateho on $P_{\text{otto}} - P_{\text{tuotto}} = 934 \text{ W} - 850 \text{ W} = 84 \text{ W}$.

4-11. a) Keho tarvitsee nukkumisen aikana energiaa esimerkiksi verenkierron, hengityksen, ruuansulatuksen ja kehon lämpötilan ylläpitämiseen.

b) Koska $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$, on $1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$.

$$1800 \text{ kcal} = 1800 \cdot 4,1868 \text{ kJ} = 7536,24 \text{ kJ} \approx 7,5 \text{ MJ}.$$

4-12. Sydämen hyötysuhde on

$$\eta = \frac{E_{\text{tuotto}}}{E_{\text{otto}}} = \frac{62 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 1,1 \text{ J}}{350 \text{ kJ}} \approx 0,28.$$

4-13. a) Sydämen toimintaan kuluu energiasta $\frac{350 \cdot 10^3 \text{ J}}{14,0 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot 100 \% = 2,5 \%$.

b) Hyötysuhde tehojen avulla on $\eta = \frac{P_{\text{tuotto}}}{P_{\text{otto}}}$, josta saadaan ottotehoksi

$$P_{\text{otto}} = \frac{P_{\text{tuotto}}}{\eta} = \frac{1,14 \text{ W}}{0,28} = 4,07143 \text{ W} \approx 4,1 \text{ W}.$$

Hukkatehoksi saadaan

$$P_{\text{hukka}} = P_{\text{otto}} - P_{\text{tuotto}} = 4,07143 \text{ W} - 1,14 \text{ W} \approx 2,9 \text{ W}.$$

c) Hukkateho kuluu mm. elimistön sisäisen energian ja äänen tuottamiseen.

4-14. a) Joonaksen keskimääräinen teho koulupäivän aikana on

$$P = 78 \text{ kg} \cdot 3,3 \text{ W/kg} = 257,4 \text{ W}.$$

Hänen koulupäivän aikana tarvitsemansa energia on

$$E = Pt = 257,4 \text{ W} \cdot 5,0 \cdot 3600 \text{ s} \approx 4,6 \text{ MJ}.$$

b) Marian keskimääräinen teho on $P = \frac{E}{t}$ ja ominaisteho (teho

massayksikköä kohti) on

$$\frac{P}{m} = \frac{\frac{E}{t}}{m} = \frac{E}{mt} = \frac{12 \text{ MJ}}{57 \text{ kg} \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} \approx 2,4 \text{ W/kg}.$$

4-15. a) Urheilijan ominaisteho urheilusuorituksen aikana on

$$\frac{P}{m} = \frac{72 \frac{\text{ml}}{\text{min} \cdot \text{kg}}}{1 \text{ l}} \cdot 21 \text{ kJ} = \frac{72 \frac{\text{ml}}{60 \text{ s} \cdot \text{kg}}}{1000 \text{ ml}} \cdot 21 \cdot 10^3 \text{ J} = 25,2 \text{ W/kg} \approx 25 \text{ W/kg}.$$

b) Urheilusuorituksessa käytetty energia yhden minuutin aikana on

$$E = 25,2 \text{ W/kg} \cdot 60 \text{ s} \cdot 84 \text{ kg} \approx 130 \text{ kJ}.$$

4-16. Oletetaan, että vuorokautinen energiankulutus on 12 MJ. Tällöin kahdessa tunnissa energian kulutus on 1 MJ. Tästä määrästä aivojen osuus on $0,20 \cdot 1 \text{ MJ} = 200 \text{ kJ}$.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 5-1.** a) Ei, luonnossa ei näytä näin tapahtuvan. Energia siirtyy itsestään aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan.
- b) Naula tuntuu polttavalta, koska metalli on hyvä lämmönjohde ja energiaa johtuu metallinaulasta ihoon. Puu taas on melko hyvä lämmöneriste. Kun iho jäähdyttää puun pinnan, energiaa siirtyy vain hitaasti puun sisältä jäähtyneeseen pintaan. Iho ei kuumene liikaa.
- 5-2.** Kyse on
- a) lämmön johtumisesta ja säteilystä,
- b) lämmön säteilystä,
- c) lämmön kulkeutumisesta.
- 5-3.** Ihminen aistii lämmön siirtymisen ihollaan. Kylpyhuoneen laattalattia voi tuntua paljaissa jaloissa kylmältä, koska jalkapohjasta johtuu lämpöä laattalattiaan. Vastaavasti samassa lämpötilassa oleva puulattia tuntuu lämpimältä, koska puu ei johda lämpöä läheskään yhtä hyvin kuin keraaminen laatta.
- 5-4.** Alussa veden lämpötila on korkeampi kuin jään. Veden molekyylit liikkuvat melko vapaasti toistensa lomitse. Jäässä molekyylit värähtelevät. Veden ja jään molekyylien väliset törmäykset veden ja jään rajapinnassa saavat jään molekyylien värähtelyn voimistumaan, kunnes jään molekyylien väliset sidokset rikkoutuvat ja jää alkaa sulaa. Jään lämmitessä sen sisäenergia kasvaa. Samalla jäätä ympäröivän veden molekyylien lämpöliike heikkenee, jolloin vesi jäähtyy ja sen sisäenergia pienenee. Lopulta jääpala sulaa kokonaan ja lämpötilaerot veden sisällä tasoittuvat.

5-5. Jos kuumaa metallia kosketetaan kädellä, metallista johtuu lämpöä käteen nopeasti, joten metalli tuntuu kosketettaessa polttavan kuumalta. Jos metallin kanssa samassa lämpötilassa olevaa puuta kosketetaan kädellä, energiaa siirtyy käteen hitaasti. Kädensija on puuta, koska metalli tuntuu kuumassa saunassa polttavan kuumalta, mutta puu ei.

5-6. a) Keraamiset astiat kuumenevat uunissa nopeasti, koska ne vastaanottavat tehokkaasti uunin sähkövastusten ja sisäpinnan lähettämää lämpösäteilyä. Kuumat keraamiset astiat lähettävät tehokkaasti lämpösäteilyä myös astian sisälle, ja astiassa oleva ruoka kypsyy sekä lämmön johtumisen että lämpösäteilyn vaikutuksesta. Keraamiset astiat varaavat hyvin energiaa, joten uunista pois ottamisen jälkeen ruoka pysyy niissä lämpimänä ja jopa jatkaa kypsymistään hetken aikaa.

Kiiltävä teräs heijastaa sähkömagneettista säteilyä, joten se ottaa vastaan huonosti lämpöä säteilynä. Lisäksi kattilan kiiltävä sisäpinta lähettää vain vähän lämpösäteilyä astian sisään. Ruoka lämpenee ja kypsyy hitaasti kiiltävässä teräsastiassa.

b) Kupari ja alumiini ovat hyviä lämmönjohteita. Energia siirtyy johtumalla tehokkaasti sähkölevystä kattilaan hyvän lämmönjohteen läpi. Kiiltäväpintaiset kattilat ovat hyviä, koska kiiltävä pinta säteilee vähemmän lämpösäteilyä ympäristöön kuin mattapintainen tai eristepintainen kattila, eli kiiltäväpintaiset metallikattilat säästävät energiaa muihin kattiloihin verrattuna.

c) Kuuman puuron voi kaataa toiselle, viileämmälle lautaselle. Silloin kuumasta puurosta johtuu lämpöä viileään lautaseen ja puuro jäähtyy. Myös puuroon puhaltaminen nopeuttaa puuron jäähtymistä.

d) Pannulappuja käytetään siksi, että lämpö ei johtuisi astiasta suoraan käden iholle. Pannulappu toimii lämmön eristeenä. Pannulapun tulee olla monikerroksinen, paksu, jotta se eristää hyvin lämpöä.

e) Pääasiassa säteilylämpöä ruuanvalmistuksessa hyödyntäviä laitteita ovat esimerkiksi erilaiset sähkö- ja hiiligrillit grillauksessa sekä tulen käyttö loimutuksessa. Loimutettaessa esimerkiksi siika tai lohi asetetaan tulen viereen sopivalle etäisyydelle. Lämmin ilma nousee ylös, mutta säteilyn energia kuumentaa kalan ja kypsyttää sen.

5-7. Huokoiset vaatteet kuten untuva- ja villavaatteet tuntuvat lämpimiltä, koska niiden sisältämä ilma toimii lämmöneristeenä ja estää kehon lämmön johtumisen ihosta kylmään ulkoilmaan. Villasukkien sisältämä ilma estää lämmön johtumisen jalasta kylmään lattiaan.

5-8. a) Rasva on hyvä lämmöneriste, joten rasvakerros hidastaa lämmön siirtymistä hylkeen elimistöstä esimerkiksi kylmään veteen.

b) Höyheniä pöyhittäessä niiden väliin jää ilmaa, jolloin höyhenpeite estää paremmin lämmön siirtymisen pois linnun elimistöstä.

c) Kun eläimellä on pitkäkarvainen turkki, karvojen väliin jää ilmaa. Ilmakerros toimii eristeenä. Joillakin eläimillä, esimerkiksi poroilla, karvat ovat onttoja.

5-9. Kuuman hiilen lyhytaikainen kosketus ilman palovammoja on mahdollista, koska lämpö ei johdu nopeasti ihmisen ihoon. Juuri hehkunsa aloittaneet hiilet polttavat kuitenkin hiilillä kävelijän jalkapohjat varmasti. Kun hiilet ovat hehkuneet niin kauan, että pinnalla on ohut (harmaa) lämpöä eristävä tuhkerkerros, kävely on mahdollista, joskin jalkapohjat varmasti lämpenevät. Mutta kun kävelee reippaasti, voi selvittää jalkapohjien ihon punertumisella.

5-10. a) Energia siirtyy patterista ympäristöön johtumalla, kuljettumalla ja säteilemällä. Patterissa kiertävästä lämpimästä vedestä energia siirtyy lämpönä johtumalla patterin metallikuoreen ja edelleen ulkopintaan.

Kuumasta patterista lämpö siirtyy johtumalla ilman ja patterin rajapinnan lähellä olevaan ilmaan. Lämmennyt kevyt ilma saa huoneessa aikaan ilmavirtauksia, joiden mukana lämpö siirtyy muualle huoneeseen. Tällöin kyse on lämmön kuljettumisesta.

Kuuman patterin pinnan lämpötila on korkeampi kuin huoneen lämpötila, joten patterin pinnasta poistuu lämpösäteilynä enemmän energiaa kuin pinta ottaa sitä vastaan ympäristöstä. Patterin pinnan säteily lämmittää niitä pintoja, joihin säteily osuu. Ilma ottaa lämpösäteilyä vastaan huonosti.

b) Patterissa kiertävän kuuman veden molekyylit törmäilevät patterin kuoren sisäpintaan, jolloin alemmassa lämpötilassa olevan patterin kuoren metallihilan rakenneosasten ja metallin vapaiden elektronien satunnainen lämpöliike voimistuu ja patterin lämpötila kohoaa. Lämpöpatterin kuori on lämmönjohde, joten rakenneosasten liikkeen voimistuminen saavuttaa nopeasti patterin pinnan. Rakenneosasten voimistunut liike patterin pinnassa saa pinnan kanssa vuorovaikutuksessa olevat ilman molekyylit liikkumaan nopeammin.

5-11. Väite pitää paikkansa. Lämpö johtuu ja säteilee liedessä olevasta levystä kattilaan (lämpölaajenemisen takia pohjan muoto muuttuu ja kosketuspinta-ala voi olla lämpenemisen eri vaiheissa hyvin pieni, jolloin säteilyn merkitys kasvaa). Kattilan lämmin reuna ja vesi säteilevät lämpöä. Vesihöyryn ja ilman mukana lämpöä kulkeutuu muualle ympäristöön (keittiöön).

5-12. Sauvan yläpään lämpötilaan vaikuttavat mm.

- sauvan lämmönjohtavuus, joka riippuu sauvan materiaalista
- astian nestepinnan yläpuolella olevan sauvan osan pituus
- sauvan paksuus, sillä ohuesta sauvasta lämpö poistuu helposti
- ilmavirtaukset sauvan lähellä

- ilmanpaine, koska korkeammassa paineessa vesi kiehuu korkeammassa lämpötilassa; paineella on myös vaikutusta ilman tiheyteen ja kykyyn siirtää lämpöä
- sauvan pinta, koska pinnan laatu vaikuttaa sauvan kykyyn luovuttaa säteilemällä energiaa
- sauvaan ympäristöstä saapuva lämpösäteily.

5-13. Pakkaslumen lämmöneristyskyky on hyvä sen sisältämän ilman takia. Lumen luominen talon seinustalle estää vesijohtoputkien ja talon alapohjan jäätymisen.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 6-1.** a) Väite on väärin. Sisäenergia voi muuttua kahden eri prosessin – työn ja lämmön – seurauksena.
- b) Väite on tosi. Veden lämpötilaa voi nostaa sekoittamalla vettä esimerkiksi sähkövatkaimella.
- c) Väite on tosi. Jos vesi jäätyy, veden sisäenergia pienenee ja jäätyvä vesi voi tehdä työtä: kivi halkeaa.
- d) Väite on väärä. Hankaamisen seurauksena käsien lämpötila nousee.
- 6-2.** a) Ilman sisäenergia kasvaa, koska ilmaan tehdään työtä.
- b) Ilman sisäenergia pienenee. Tarkalla mittarilla voi todeta lämpötilan alentumisen. Ilma tekee työtä laajetessaan.
- 6-3.** a) Sähkövatkaimessa energiaa muunnetaan sähköön avulla mekaaniseksi energiaksi. Tehty työ varastoituu taikinan sisäenergiaksi. Sisäenergian muutos $\Delta U > 0$.
- b) Vappuilmapalloja täytettäessä kaasu purkautuu kaasusäiliöstä ja laajenee. Tällöin kaasu tekee työtä ja jäähtyy. Työn tekemiseen tarvittava energia saadaan systeemin sisäenergiasta. Sisäenergian muutos $\Delta U < 0$.
- 6-4.** Energian säilymislaki sallisi sen, että liuennut muste muodostaisi itsestään uuden pisaran, mutta lämpöopin II pääsäännön mukaan mustepisara ei voi muodostua uudelleen.
- 6-5.** a) Tasapainotilaan pyrkiminen näkyy esimerkiksi siinä, että lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan.

- b) Tarkastellaan esimerkiksi savupiipusta tulevaa savua. Sen ja ympäristön lämpötilaero pyrkii tasoittumaan. Lisäksi savu hajaantuu ja leviää ympäristöön. Savun aineosien pitoisuus kuutiometrissä ilmaa pienenee. Samalla saasteiden puhdistus pois luonnosta käy vaikeaksi.
- c) Kaikki luonnon prosessit vähentävät systeemin kykyä tehdä työtä. Tästä käytetään nimitystä energian huononeminen. (Energia ei tee työtä, vaan energia muuntuu työtä tehtäessä muodosta toiseen.)

6-6. Kuuma puuro jäähtyy ja viileä maito lämpenee. Lopulta puuron lämpötila on yhtä suuri joka kohdassa. Lämpöopin toisen pääsäännön vastainen tapahtuma olisi esimerkiksi se, että kuuma puuro kuumenisi entisestään ja viileä maito kylmenisi. Tällainen tapahtuma olisi energian säilymislain mukaan mahdollinen.

6-7. Prosessi on isobaarinen, joten paine pysyy vakiona. Kaasu tekee laajetessaan työn

$$p\Delta V = 4,0 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot (2,0 \text{ m}^3 - 0,5 \text{ m}^3) = 6,0 \cdot 10^5 \text{ J} = 0,60 \text{ MJ}.$$

6-8. Prosessi on isobaarinen. Kaasun tilavuuden kasvu on

$$\Delta V = \frac{1,2 \text{ kJ}}{p} = \frac{1,2 \text{ kJ}}{2,0 \text{ bar}} = \frac{1200 \text{ Nm}}{2,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2} = 0,0060 \text{ m}^3 = 6,0 \text{ dm}^3.$$

6-9. Työ on

$$p\Delta V = 1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 3,5 \text{ m}^3 \approx 350 \text{ kJ}.$$

TEHTÄVIEN RATKAISUT

7-1. T_1 on lämpösäiliön ja T_2 kylmäsäiliön lämpötila, Q_1 koneen ottama energia ja Q_2 koneen kylmäsäiliöön luovuttama energia. W on koneen tekemä työ.

7-2. Lämpötilaväli $25\text{ °C} - 540\text{ °C}$ on kelvineinä $298,15\text{ K} - 813,15\text{ K}$. Hyötysuhteen teoreettinen yläraja on

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{813,15\text{ K} - 298,15\text{ K}}{813,15\text{ K}} \approx 0,63 = 63\text{ \%}.$$

7-3. Turpeen lämpöarvo on $H = 11\text{ MJ/kg}$. Yhtälöstä $Pt = \eta Q$ lämpövoimalaitoksen tehoksi saadaan

$$P = \frac{\eta Q}{t} = \frac{\eta H m}{t} = \frac{0,43 \cdot 11\text{ MJ/kg} \cdot 35000\text{ kg}}{24 \cdot 3600\text{ s}} \approx 1,9\text{ MW}.$$

7-4. Lämmönsiirtokone siirtää energiaa lämpönä kylmemmästä säiliöstä lämpimämpään ja käyttää tähän siirtoon mekaanista energiaa. Prosessi jäähdyttää kylmäsäiliötä ja lämmittää lämpösäiliötä. Lämmönsiirtokone tarvitsee toimiakseen ulkopuolista energiaa. Koneen tekemä työ on $W = Q_1 - Q_2$.

7-5. a) Jääkaapin lämpösäiliö on huone (keittiö) ja kylmäsäiliö jääkaapin sisus.

b) Olomuodonmuutoksia tapahtuu, kun

- nestemäinen kylmäaine höyrystyy jääkaapin sisällä höyrystimessä ja
- kompressorin puristaa höyryn korkeaan paineeseen ja kuuma höyry tiivistyy lauhduttimessa.

c) Kylmäaineeseen sitoutuu energiaa höyrystymisessä.
Kaasumaisesta kylmäaineesta vapautuu energiaa, kun kuuma höyry tiivistyy lauhduttimessa nesteeksi.

7-6. Q_1 ja Q_2 ovat koneen ja lämpösäiliöiden välillä siirtyviä energioita.
Lämpösäiliöiden lämpötilat ovat T_1 ja T_2 ($T_1 > T_2$).

a) Kaavio 1 esittää lämpövoimakonetta.

Kone ottaa korkeammasta lämpötilasta energian Q_1 ja tekee työn $W = Q_1 - Q_2$. Kone luovuttaa alempaan lämpötilaan T_2 energian Q_2 .

b) Kaavio 3 esittää lämpöpumppua. Lämpöpumppu on jäähdytyskone. Kone siirtää ulkoisen työn W avulla energiaa alemmasta lämpötilasta T_2 korkeampaan lämpötilaan T_1 . Kone siirtää energian Q_1 kuumasäiliöön: $Q_1 = Q_2 + W$.

c) Kaavio 3 esittää jääkaappia. Jääkaappi on jäähdytyskone.

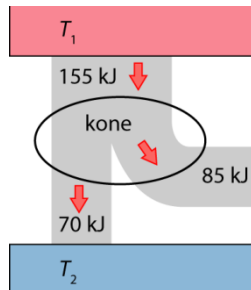
Kone siirtää ulkoisen työn avulla alemmasta lämpötilasta energian Q_2 ja luovuttaa korkeampaan lämpötilaan jääkaapin ulkopuolelle energian $Q_1 = Q_2 + W$.

d) Kaavio 4 on lämpöopin 2. pääsäännön vastainen. Lämpö siirtyy itsestään korkeammasta lämpötilasta matalampaan, ei kylmästä lämpösäiliöön ilman koneen tekemää työtä.

7-7. Kiertoprosessi vaiheittain:

- Ensimmäisessä vaiheessa kaasun paine kasvaa, kun tilavuus pienenee. Systeemiin tehdään työtä. Lämpötila on vakio.
- Toisessa vaiheessa kaasun tilavuus ei muutu, mutta paine kasvaa. Tällöin kaasuun tuodaan lämpöä.
- Kolmannessa vaiheessa kaasun tilavuus kasvaa ja paine pienenee. Kaasu tekee työtä. Lämpötila on vakio.
- Neljännessä vaiheessa kaasun tilavuus ei muutu, mutta paine pienenee. Kaasu luovuttaa lämpöä ympäristöön.

7-8. Lämpövoimakoneen energiavirtojen kaavio:



7-9. a) Ilmalämpöpumpun maksimaalinen suorituskyky

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{293,15\text{K}}{293,15\text{K} - 275,15\text{K}} = 16,2861 \approx 16.$$

b) Todellinen suorituskyky on $0,20 \cdot 16,2861 \approx 3,3$. Tämä tarkoittaa sitä, että huoneen lämmittämiseen saatu energia on 3,3-kertainen sähköverkosta otettuun energiaan verrattuna.

TESTAA, OSAATKO S. 67

1. a b c 2. b 3. a b 4. a b c 5. a c 6. c 7. a b c 8. a c 9. a 10. b 11. a b 12. b c

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 8-1.** Eiffelin torni on monimutkainen teräsrakennelma. Mallinnetaan sitä 324 m pitkällä terästangolla. Teräksen pituuden lämpötilakerroin on $\alpha_{\text{teräs}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Lämpötilan vaihtelu on $\Delta T = (25 - 2) \text{ K} = 23 \text{ K}$. Ei ole tiedossa, missä lämpötilassa ilmoitettu tornin korkeus on mitattu, mutta tekemättä lopputuloksen kannalta merkittävää virhettä voimme olettaa, että se on tornin korkeus lämpötilassa $+2 \text{ °C}$. Eiffel-tornin pituuden vaihteluksi voimme siis arvioida
- $$\Delta l = \alpha_{\text{teräs}} l_0 \Delta T = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K} \cdot 324 \text{ m} \cdot 23 \text{ K} = 0,089424 \text{ m} \approx 9 \text{ cm}.$$
- 8-2.** Oikea vaihtoehto on c.
- 8-3.** Raudan pituuden lämpötilakerroin on $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ja messingin $19 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Koska messingillä on suurempi pituuden lämpötilakerroin kuin raudalla, rautarengas irtoaa, kun osa jäähdytetään. Jäähdytettäessä messinki supistuu enemmän kuin rauta.
- 8-4.** a) Kaksoismetallimitarissa on kaksoismetalliliuska, joka taipuu lämmön vaihdellessa, koska metalleilla on eri lämpötilakerroin. Taipuminen on suoraan verrannollinen lämpötilan muutokseen.
- b) Kuparin pituuden lämpötilakerroin on $17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ja teräksen $11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Koska kuparin lämpötilakerroin on suurempi kuin teräksen, kuparinen suikale eli ruskea suikale laajenee enemmän kuin teräksinen eli harmaa suikale. Kaksoismetalliliuskan päät kaareutuvat alaspäin.
- 8-5.** Videon tietojen perusteella $t_1 = 21,4 \text{ °C}$, $t_2 = 100,6 \text{ °C}$, $l_0 = 0,500 \text{ m}$, $\Delta l = 0,44 \text{ mm}$.

Pituuden lämpölaajenemisen yhtälöstä $\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$ voidaan ratkaista lämpötilakerroin:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} = \frac{0,44 \text{ mm}}{500 \text{ mm} \cdot (100,6 - 21,4) \text{ K}} \approx 1,1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{K}} \approx 11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}.$$

Taulukkokirjan mukaan raudan lämpötilakerroin on $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Metalliputki on todennäköisesti rautaa.

- 8-6.** a) $t_1 = -12,0 \text{ °C}$, $t_2 = +78,0 \text{ °C}$, $l_0 = 912 \text{ mm}$, $\alpha_{\text{kupari}} = 16,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$.

Vaihtoehto 1:

Sijoitetaan suureiden arvot pituuden lämpölaajenemisen yhtälöön:

$$\begin{aligned} l &= l_0 (1 + \alpha_{\text{kupari}} \Delta T) \\ &= 912 \text{ mm} \cdot \left(1 + 16,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot (78,0 - (-12,0) \text{ K}) \right) \\ &= 913,38 \text{ mm} \\ &\approx 913 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Vaihtoehto 2:

Akselin pituuden lämpölaajeneminen saadaan yhtälöstä $\Delta l = \alpha_{\text{kupari}} l_0 \Delta T$.

Lämpötilan muutos on celsiusasteina $78,0 \text{ °C} - (-12,0 \text{ °C}) = 90 \text{ °C}$ ja kelvineinä $\Delta T = 90 \text{ K}$. Pituuden muutokseksi saadaan

$$\Delta l = \alpha_{\text{kupari}} l_0 \Delta T = 16,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 0,912 \text{ m} \cdot 90 \text{ K} \approx 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,38 \text{ mm}.$$

Akselin pituus lämpötilassa $+78,0 \text{ °C}$ on silloin

$$l = l_0 + \Delta l = 912 \text{ mm} + 1,38 \text{ mm} \approx 913 \text{ mm}.$$

b) Rautatiekiskon pituuden muutos saadaan yhtälöstä $\Delta l = \alpha_{\text{teräs}} l_0 \Delta T$.

Lämpötilan muutos on $-25,0 \text{ °C} - (+18,0 \text{ °C}) = -43,0 \text{ °C}$ ja kelvineinä $\Delta T = -43,0 \text{ K}$. Pituuden muutokseksi saadaan

$$\Delta l = \alpha_{\text{teräs}} l_0 \Delta T = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 20 \text{ m} \cdot (-43 \text{ K}) \approx -0,01 \text{ m} = -1 \text{ cm}.$$

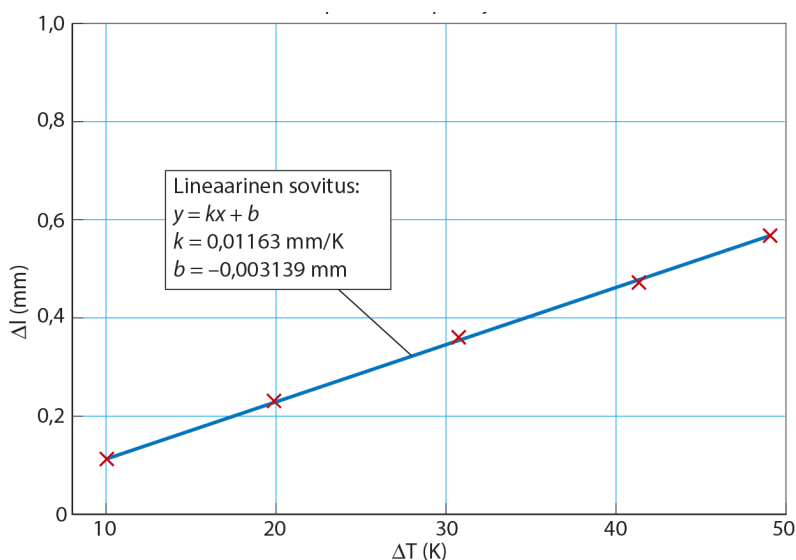
Kiskon pituus $-25,0 \text{ °C}$:n lämpötilassa on

$$l = l_0 + \Delta l = 2000 \text{ cm} + (-1 \text{ cm}) = 1999 \text{ cm}.$$

8-7. Täydennetään taulukko lisäämällä siihen kutakin mittauspistettä vastaava lämpötilan muutos $\Delta T(\text{K}) = \Delta t(^{\circ}\text{C}) = (t(^{\circ}\text{C}) - 8,2)$:

$t(^{\circ}\text{C})$	18,2	28,0	39,0	49,5	57,3
$\Delta T(\text{K})$	10,0	19,8	30,8	41,3	49,1
$\Delta l(\text{mm})$	0,11	0,23	0,36	0,47	0,57

Luetaan taulukon ΔT - ja Δl -arvot mittausohjelmaan, joka tekee niistä graafisen esityksen. Tehdään ohjelman avulla mittauspisteisiin lineaarinen sovitus.



Mittausohjelma antaa suoran yhtälöksi

$$\Delta l = 0,01163 \frac{\text{mm}}{\text{K}} \cdot \Delta T - 0,003139 \text{ mm},$$

jonka mukaan kulmakerroin on $\alpha l_0 = 0,01163 \frac{\text{mm}}{\text{K}}$. Tästä saadaan

kyseisen metallin pituuden lämpötilakertoimeksi

$$\alpha = \frac{0,01163 \frac{\text{mm}}{\text{K}}}{l_0} = \frac{0,01163 \frac{\text{mm}}{\text{K}}}{982 \text{ mm}} \approx 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}.$$

Taulukkokirjan mukaan raudan lämpötilakerroin on $11,7 \cdot 10^{-6} (1/\text{K})$, joten metallitanko on rautaa.

- 8-8.** Akselin halkaisija kasvaa lämpötilan kasvaessa, joten halkaisijan pituuden kasvu on

$$\Delta l = \alpha l \Delta T = 21 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} \cdot 65,00 \text{ mm} \cdot 75 \text{ K} \approx 0,10 \text{ mm}.$$

Huoneen lämpötilassa akseli oli 0,10 mm alimittainen.

- 8-9.** $m = 0,35 \text{ g}$, $\Delta T = 40 \text{ K}$, $V_0 = 55,48 \text{ ml}$, $\rho = 0,9832 \text{ g/ml}$,
 $\gamma_{\text{vesi}} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$.

Veden tilavuuden muutos on

$$\Delta V_{\text{vesi}} = \gamma_{\text{vesi}} \cdot V_0 \cdot \Delta T = 0,21 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{K} \cdot 55,48 \text{ ml} \cdot 40 \text{ K} = 0,466032 \text{ ml}.$$

Astiasta ylivirranneen veden tilavuus on

$$V_{\text{yli}} = \frac{m}{\rho_{\text{vesi}}} = \frac{0,35 \text{ g}}{0,9832 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 0,355980 \text{ ml}.$$

Astiaan lämmityksen jälkeen jääneen veden tilavuus on silloin

$$\begin{aligned} V_{\text{vesi}} &= V_0 + \Delta V_{\text{vesi}} - V_{\text{yli}} \\ &= 55,48 \text{ ml} + 0,466032 \text{ ml} - 0,355980 \text{ ml} \\ &= 55,5901 \text{ ml}. \end{aligned}$$

Astian tilavuus on kasvanut

$$\Delta V_{\text{astia}} = 55,5901 \text{ ml} - 55,48 \text{ ml} = 0,110100 \text{ ml}.$$

Yhtälöstä $\Delta V_{\text{astia}} = \gamma_{\text{astia}} V_0 \Delta T$ saadaan astian tilavuuden lämpötilakertoimeksi

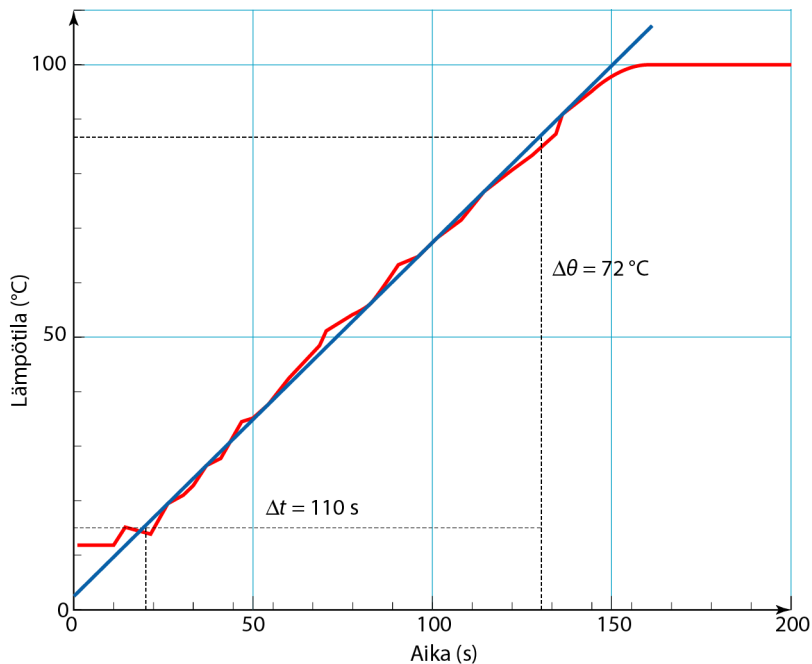
$$\gamma_{\text{astia}} = \frac{\Delta V_{\text{astia}}}{V_0 \cdot \Delta T} = \frac{0,1101 \text{ ml}}{55,48 \text{ ml} \cdot 40 \text{ K}} \approx 50 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}.$$

Kuparin pituuden lämpötilakerroin on $16,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, joten kuparin tilavuuden lämpötilakerroin on noin $3 \cdot 16,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K} = 50,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$.

Astia on todennäköisesti kuparia.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 9-1.** a) Ihminen on suurimmaksi osaksi vettä, joten ihmiskehon ominaislämpökapasiteetti on lähes yhtä suuri kuin veden. Tämän takia ympäristön lämpötilan muutokset eivät aiheuta nopeita kehon lämpötilan muutoksia. Sen takia esimerkiksi saunominen ja avantouinti ovat mahdollisia.
- b) Märkä hiekka lämpenee auringonpaisteessa hitaammin kuin kuiva, sillä märässä hiekassa olevan veden lämpötila kasvaa hitaasti veden suuren ominaislämpökapasiteetin takia.
- 9-2.** a) Ei ole totta. Lämpökapasiteetti on verrannollinen massaansa, joten alumiiniveneellä on suurempi lämpökapasiteetti kuin alumiinikattilalla.
- b) Totta.
- c) Ei ole totta. Lämpökapasiteetin yksikkö on 1 J/K .
- d) Totta.
- 9-3.** a) Käyrän alkupisteestä nähdään, että veden lämpötila mittauksen alussa oli noin 12°C .
- b) Vedenkeittimen sähkövastuksen luovuttama energia aikavälillä Δt on $Q_{\text{vastus}} = P\Delta t$, ja laitteiston vastaanottama energia on $Q_{\text{laitteisto}} = C\Delta\theta$, kun lämpötilan muutos on $\Delta\theta$. Jos lämpövuotoja ei ole, sähkövastuksen luovuttama energia on yhtä suuri kuin laitteiston vastaanottama energia eli $P\Delta t = C\Delta\theta$.
- Kuvaajan perusteella lämpötila kohoaa kiehumispisteeseen lähes tasaisesti lämmityksen aikana. Piirretään kuvioon suora, joka likimain kuvaa lämpötilan kohoamista.



Suoran fysikaalinen kulmakerroin on

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{72 \text{ °C}}{110 \text{ s}} \approx 0,655 \frac{\text{°C}}{\text{s}}.$$

Yhtälöstä $P\Delta t = C\Delta\theta$ saadaan laitteiston lämpökapasiteetiksi

$$C = \frac{P\Delta t}{\Delta \theta} = \frac{P}{\Delta \theta / \Delta t} = \frac{2200 \text{ W}}{0,655 \text{ °C/s}} \approx 3,4 \frac{\text{kJ}}{\text{°C}}.$$

Koko laitteiston lämpökapasiteetti on 3,4 kJ/°C.

- 9-4. a)** Veden lämpötilan muutos celsiusasteina on $\Delta t = 42 \text{ °C} - 37 \text{ °C} = 5 \text{ °C}$ eli kelvineinä $\Delta T = 5 \text{ K}$.

Elimistö saa energiaa lämpönä

$$Q = cm\Delta T = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,33 \text{ kg} \cdot 5 \text{ K} \approx 7 \text{ kJ}.$$

- b)** Veden lämpötilan muutos celsiusasteina on

$$\Delta t = 37 \text{ °C} - 10 \text{ °C} = 27 \text{ °C} \text{ eli kelvineinä } \Delta T = 27 \text{ K}.$$

Elimistö luovuttaa energiaa lämpönä

$$Q = cm\Delta T = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,33 \text{ kg} \cdot 27 \text{ K} \approx 37 \text{ kJ}.$$

- 9-5.** Saavissa olevan veden lämpötilan muutos celsiusasteina on $\Delta t_1 = 37^\circ\text{C} - 31^\circ\text{C} = 6^\circ\text{C}$ ja kelvineinä $\Delta T_1 = 6 \text{ K}$. Lisätyn veden lämpötilan muutos celsiusasteina on $\Delta t_2 = 55^\circ\text{C} - 37^\circ\text{C} = 18^\circ\text{C}$ ja kelvineinä $\Delta T_2 = 18 \text{ K}$. Kylmempään veteen sitoutuu yhtä suuri määrä energiaa kuin minkä kuumempi vesi luovuttaa, joten $Q_1 = Q_2$ eli $cm_1\Delta T_1 = cm_2\Delta T_2$. Lisättävän lämpimämmän veden massa on

$$m_2 = \frac{cm_1\Delta T_1}{c\Delta T_2} = \frac{m_1\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{25 \text{ kg} \cdot 6 \text{ K}}{18 \text{ K}} \approx 8 \text{ kg}.$$

- 9-6.** Teen massa on

$$m_{\text{tee}} = \rho V = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 0,200 \text{ kg}$$

ja sen ominaislämpökapasiteetti on sama kuin veden eli

$$c_{\text{vesi}} = 4190 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}.$$

Teelasin ominaislämpökapasiteetti on lasin ominaislämpökapasiteetti

$$c_{\text{lasi}} = 0,84 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}.$$

Merkittään $t_1 = 25^\circ\text{C}$ ja $t_2 = 95^\circ\text{C}$. Teen luovuttama energia on sama kuin teelasiin sitoutuva energia, joten

$$m_{\text{tee}} c_{\text{vesi}} (T_2 - T) = m_{\text{teelasi}} c_{\text{lasi}} (T - T_1) \text{ eli}$$

$$(m_{\text{tee}} c_{\text{lasi}} + m_{\text{tee}} c_{\text{vesi}}) T = T_1 m_{\text{teelasi}} c_{\text{lasi}} + T_2 m_{\text{tee}} c_{\text{vesi}}.$$

Tästä saadaan lämpötilalle T

$$\begin{aligned} T &= \frac{T_1 m_{\text{teelasi}} c_{\text{lasi}} + T_2 m_{\text{tee}} c_{\text{vesi}}}{m_{\text{teelasi}} c_{\text{lasi}} + m_{\text{tee}} c_{\text{vesi}}} \\ &= \frac{(25 + 273,15) \text{ K} \cdot 0,150 \text{ kg} \cdot 840 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + (95 + 273,15) \text{ K} \cdot 0,200 \text{ kg} \cdot 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}{0,150 \text{ kg} \cdot 840 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + 0,200 \text{ kg} \cdot 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} \\ &= 359,001 \text{ K} \text{ eli } 85,85^\circ\text{C} \approx 86^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Vastaus b.

9-7. a) Veden lämpötilan muutos on celsiusasteina

$$\Delta t = 42\text{ °C} - 0\text{ °C} = 42\text{ °C ja keltvineinä } \Delta T = 42\text{ K}.$$

Lämmin vesi luovuttaa jäähtyessään energian

$$Q_1 = cm\Delta T = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,50 \text{ kg} \cdot 42 \text{ K} = 87,99 \text{ kJ} \approx 88 \text{ kJ}.$$

b) Koska vesi luovuttaa nolla-asteiseksi muuttuessaan energiaa 88 kJ ja jään sulaminen vaatii $0,55 \text{ kg} \cdot 333 \text{ kJ/kg} = 166 \text{ kJ}$ energiaa, vedestä vapautuva energia ei riitä koko jäämassan sulattamiseen. Lopputuloksena on veden ja jään seos, jonka lämpötila on 0 °C .

9-8. Vedenkeittimen sähkövastus luovuttaa energiaa veteen teholla P_{anto} .

Veden vastaanottama energia $Q_v = cm\Delta T$ on yhtä suuri kuin

sähkövastuksen luovuttama energia $Q_{\text{sv}} = P_{\text{anto}}\Delta t$. Saadaan

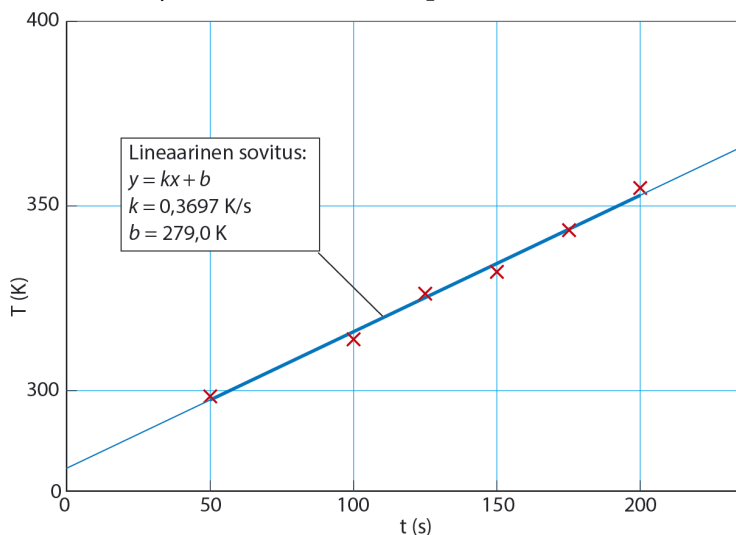
yhtälö $P_{\text{anto}}\Delta t = cm\Delta T$, josta lämmitystehoksi saadaan

$$P_{\text{anto}} = \frac{cm\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta T}{\Delta t} cm.$$

Lämpötilan muutos celsiusasteina on yhtä suuri kuin muutos keltvineinä.

Siirretään mittausarvot mittausohjelmaan (lämpötilat keltvineinä eli θ

+273, 15) ja sovitetaan mittauspisteisiin suora.



Mittausohjelma antaa suoran fysikaaliseksi kulmakertoimeksi

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx 0,3697 \text{ K} / \text{s}.$$

Veden lämmitysteho on

$$P_{\text{anto}} = \frac{\Delta T}{\Delta t} cm = 0,3697 \frac{\text{K}}{\text{s}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1,000 \text{ kg} = 1,549 \text{ kW} \approx 1,5 \text{ kW}.$$

$$\text{Hyötysuhde on } \eta = \frac{P_{\text{tuotto}}}{P_{\text{otto}}} = \frac{1,549 \text{ kW}}{1,6 \text{ kW}} \approx 0,97.$$

Vedenkeittimen veden lämmitysteho 1,5 kW ja hyötysuhde 0,97 (97 %).

TEHTÄVIEN RATKAISUT

10-1. a) Oikein.

b) Oikein.

c) Väärin. Kun ainetta on yhden moolin verran, aineen massa on ko. aineen moolimassa kertaa ainemäärä mooleina.

d) Väärin. Happi ja otsoni ovat kaksi eri kaasua, ja moolissa niitä kumpaakin on sama määrä molekyyliä.

e) Väärin. Normaaliolosuhteissa mooli kaasua on tilavuudeltaan 22,4 l, joten vappupallossa on noin yksi mooli heliumia.

10-2. Reaalikaasun molekyyleillä on äärellinen koko ja sisäinen rakenne, ideaalikaasun molekyylit oletetaan pistemäisiksi. Reaalikaasun molekyyleillä on etävuorovaikutuksia keskenään, jotka vaikuttavat kaasun käyttäytymiseen varsinkin silloin, kun paine on suuria ja molekyylit ovat pakkautuneet lähelle toisiaan. Ideaalikaasun molekyyleillä ei ole muita vuorovaikutuksia kuin törmäykset toisiinsa ja astian seinämiin.

10-3. Normaaliolosuhteissa kaasun lämpötila on 273,15 K ja paine 101 325 Pa.

10-4. Tilanyhtälöstä $pV = nRT$ saadaan paineella jakamalla tilavuudelle yhtälö

$$V = \frac{nRT}{p}.$$

Normaaliolosuhteissa lämpötila on $T = 273,15$ K ja paine 101 325 Pa.

Baareina ilmaistuna paine on $p = 1,013$ bar. Ainemäärä on yksi mooli eli $n = 1$ mol. Moolinen kaasuvakio on $R = 0,08314510$ bar · dm³ / (mol · K). Sijoittamalla nämä yhtälöön saadaan tilavuudeksi

$$V = \frac{nRT}{p} = \frac{1 \text{ mol} \cdot 0,08314510 \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 273,15 \text{ K}}{1,013 \text{ bar}} = 22,420 \text{ l} \approx 22,4 \text{ l}.$$

Yhden kaasumoolin tilavuus normaaliolosuhteissa on 22,4 l.

- 10-5.** Vetykaasun moolimassa on $M_{\text{H}_2} = 2,016 \text{ g/mol}$, joten 12 g:ssa on

$$n = \frac{m}{M_{\text{H}_2}} = \frac{12 \text{ g}}{2,016 \text{ g/mol}} = 5,95 \text{ mol} \approx 6,0 \text{ mol}.$$

Yhdessä moolissa on Avogadron vakion mukainen määrä molekyylejä, joten molekyylejä on kaikkiaan

$$n \cdot N_A = 5,95 \text{ mol} \cdot 6,0221367 \cdot 10^{23} \cdot \frac{1}{\text{mol}} \approx 3,6 \cdot 10^{24} \text{ molekyylejä}.$$

- 10-6.** Kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ saadaan paineeksi

$$p_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{T_1 V_2} = \frac{101,3 \text{ kPa} \cdot 75 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot (273,15 + 37) \text{ K}}{(273,15 + 18) \text{ K} \cdot 33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} \approx 0,25 \text{ MPa}.$$

- 10-7.** Koska lasisen pullon tilavuus ei muutu, kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ seuraa } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \text{ Tästä voidaan ratkaista paine } p_2, \text{ kun}$$

$$\text{sijoitetaan } p_1 = 101,3 \text{ kPa}, T_1 = (273,15 + 25) \text{ K} = 298,15 \text{ K ja}$$

$$T_2 = (273,15 - 25) \text{ K} = 248,15 \text{ K:}$$

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{101,3 \text{ kPa} \cdot 248,15 \text{ K}}{298,15 \text{ K}} = 84,31 \text{ kPa} \approx 84 \text{ kPa}.$$

Koska paine pullon ulkopuolella on suurempi kuin pullon sisäpuolella, muovipullo painuisi jonkin verran kasaan, jolloin paine-ero tasoittuisi.

10-8. Ideaalikaasun tilanyhtälöstä $pV = nRT$ saadaan hapen ainemääräksi

$$\begin{aligned} n &= \frac{pV}{RT} \\ &= \frac{10,0 \text{ MPa} \cdot 40,0 \text{ dm}^3}{0,0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 290,15 \text{ K}} = \frac{100 \text{ bar} \cdot 40,0 \text{ dm}^3}{0,083145 \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 290,15 \text{ K}} \\ &\approx 165,806 \text{ mol}. \end{aligned}$$

Koska 1 mooli happea vaatii tilavuuden $22,4141 \text{ dm}^3$, $165,806 \text{ mol}$ happea vaatii tilavuuden $165,806 \cdot 22,4 \text{ dm}^3 = 3714,05 \text{ dm}^3$. Näin ollen tiheyden yhtälöstä saadaan hapen massaksi

$$m = \rho V = 1,43 \text{ g/dm}^3 \cdot 3714,05 \text{ dm}^3 \approx 5,3 \text{ kg}.$$

10-9. Tarkastellaan tiettyä ilmamäärää, jonka massa m pysyy vakiona.

Tiheyden määritelmästä $\rho = \frac{m}{V}$ saadaan ilman alkutilavuudeksi $V_1 = \frac{m}{\rho_1}$

ja lopputilavuudeksi $V_2 = \frac{m}{\rho_2}$. Sijoitetaan tilavuudet kaasujen yleiseen

$$\text{tilanyhtälöön } \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \text{ jolloin saadaan yhtälö } \frac{p_1 m}{T_1 \rho_1} = \frac{p_2 m}{T_2 \rho_2}.$$

Ilman tiheydeksi 20 km korkeudella saadaan

$$\rho_2 = \frac{T_1 p_2 \rho_1}{T_2 p_1} = \frac{273,15 \text{ K} \cdot 53 \text{ mbar} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3}{213,15 \text{ K} \cdot 1013 \text{ mbar}} \approx 0,086 \text{ kg/m}^3.$$

10-10. $p_1 = 350 \text{ kPa}$, $T_1 = 5,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_2 = p_0 = 101,3 \text{ kPa}$, $T_2 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$.

Olkoon ilmakuplan tilavuus järven pohjalla V_1 . Kirjoitetaan tilavuus veden pinnalla muodossa $V_2 = x V_1$, jossa x on kysytty tilavuuden suurenemistekijä.

Lämpötila järven pohjalla on $T_1 = (5,0 + 273,15) \text{ K} = 278,15 \text{ K}$ ja pinnalla $T_2 = (19 + 273,15) \text{ K} = 292,15 \text{ K}$.

Kaasun tilanyhtälö $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ saadaan muotoon $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot x V_1}{T_2}$, josta

saadaan

$$x = \frac{p_1 V_1 T_2}{p_2 T_1 V_1} = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} = \frac{350 \text{ kPa} \cdot 292,15 \text{ K}}{101,3 \text{ kPa} \cdot 278,15 \text{ K}} \approx 3,60.$$

Ilmakuplan tilavuus kasvaa 3,6-kertaiseksi.

10-11. Kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ saadaan

$$T_2 = \frac{T_1 p_2 V_2}{p_1 V_1} = \frac{291,15 \text{ K} \cdot (1 - 0,40) p_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) V_1}{p_1 V_1} = 232,92 \text{ K} \approx -40 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

10-12. $V = 11 \text{ l}$, $p_{m1} = 0 \text{ Pa}$, $p_{m2} = 2,00 \cdot 10^7 \text{ Pa}$, $t_1 = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_2 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$,

$$M_{\text{ilma}} = 28,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}.$$

Sovelletaan ideaalikaasun tilanyhtälöä. Tilanyhtälöä varten muutetaan lämpötilat kelvineiksi, ja paine saadaan lisäämällä mittapaineeseen normaali ilmanpaine $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

Moolimäärä ennen täyttöä on

$$n_1 = \frac{(p_{1m} + p_0)V}{RT_1} = \frac{(0 + 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}) \cdot 11,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{8,31451 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot (22 + 273,15) \text{ K}} = 0,454182 \text{ mol}.$$

Moolimäärä täytön jälkeen on

$$\begin{aligned} n_2 &= \frac{(p_{2m} + p_0)V}{RT_2} = \frac{(2,0 \cdot 10^7 \text{ Pa} + 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}) \cdot 11,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{8,31451 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot (40 + 273,15) \text{ K}} \\ &= 84,9236 \text{ mol}. \end{aligned}$$

Moolimäärän lisäys on $84,9236 \text{ mol} - 0,454182 \text{ mol} = 84,4694 \text{ mol}$.

Tämä vastaa massaa

$$M_{\text{ilma}} \cdot 84,4694 \text{ mol} = 28,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol} \cdot 84,4694 \text{ mol} = 2,43 \text{ kg} \approx 2,4 \text{ kg}.$$

Sukeltajan painepullon massa kasvaa 2,4 kg.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

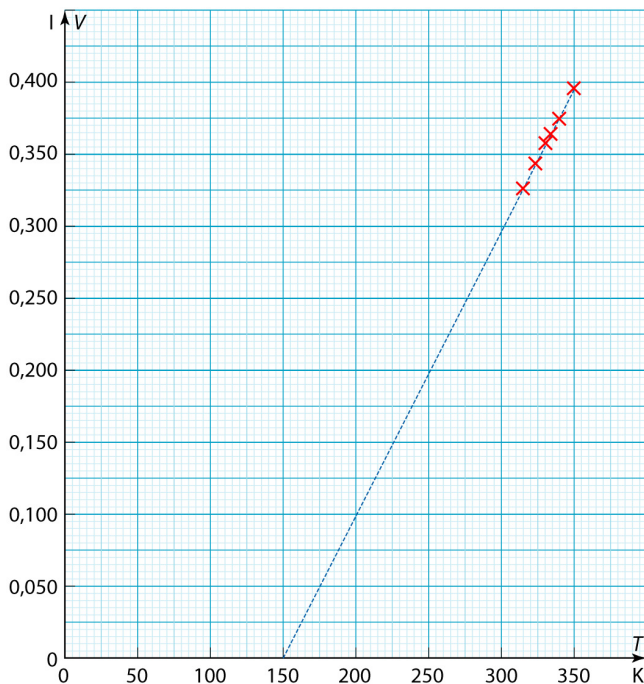
- 11-1.** Kun lämpötila ei muutu, kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

seuraa Boylen lain mukaan yhtälö $p_1 V_1 = p_2 V_2$. Säiliössä olevan kaasun loppupaineen suuruus on

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = \frac{220 \text{ kPa} \cdot 250 \text{ dm}^3}{150 \text{ dm}^3} \approx 370 \text{ kPa}.$$

- 11-2. a)** Kun mittaustulokset siirretään T , V -koordinaatistoon, kuvaajaksi tulee suora. Näin ollen suureiden välillä on lineaarinen riippuvuus $V \sim T$.

b) Suoran pitäisi leikata T -akseli absoluuttisessa nollapisteessä. Nyt suora leikkaa T -akselin kohdassa 150 K. Kyseessä on jokin systemaattinen mittausvirhe.



11-3. $V_1 = 2,0 \text{ l}$, $t_1 = 22 \text{ °C}$, $V_2 = 2 V_1$.

Vakiopaineessa yleisestä kaasulaista

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ seuraa } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2},$$

jossa lämpötilat ovat kelvineissä. Lämpötila alussa on

$$T_1 = (273,15 + 22) \text{ K} = 295,15 \text{ K}, \text{ joten kaasun lämpötila lopussa on}$$

$$T_2 = \frac{T_1 \cdot V_2}{V_1} = \frac{295,15 \text{ K} \cdot (1,25 \cdot 2 \text{ l})}{2 \text{ l}} = 368,938 \text{ K}.$$

Kaasun lämpötila lopussa on celsiusasteina

$$(368,938 - 273,15) \text{ °C} = 95,7875 \text{ °C} \text{ eli kaasun lämpötila on lopussa } 95,7875 \text{ °C} - 22 \text{ °C} \approx 74 \text{ °C} \text{ korkeampi kuin alussa.}$$

11-4. $T_1 = (20 + 273,15) \text{ K} = 293,15 \text{ K}$, $T_2 = (85 + 273,15) \text{ K} = 358,15 \text{ K}$.

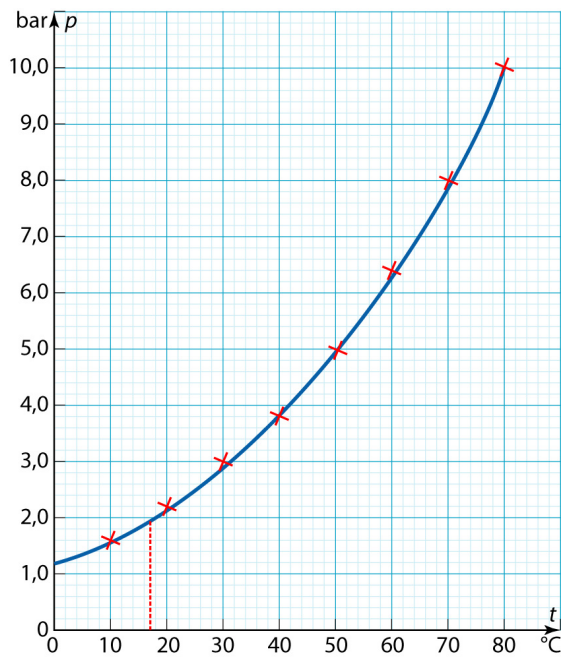
Vakiotilavuudessa yleisestä kaasulaista $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ seuraa $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, josta

saadaan

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{358,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} \approx 1,22.$$

Kaasun tilavuus on kasvanut 22 %.

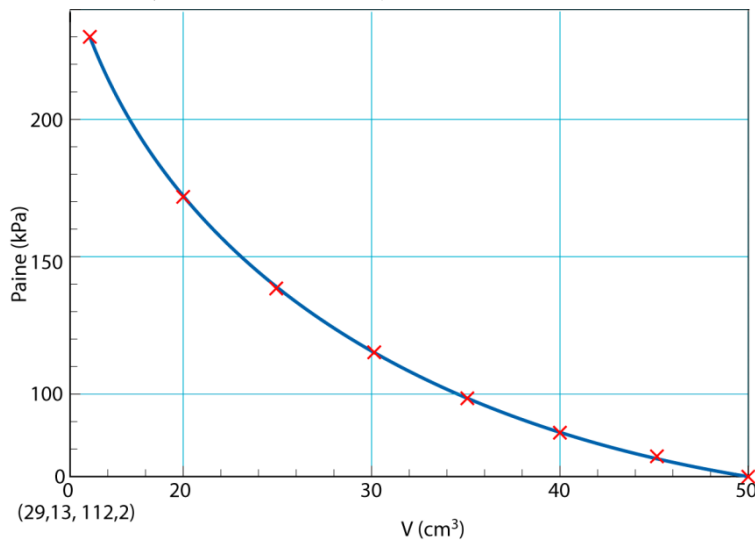
11-5. a) Kaasun paineen riippuvuus kaasun lämpötilasta:



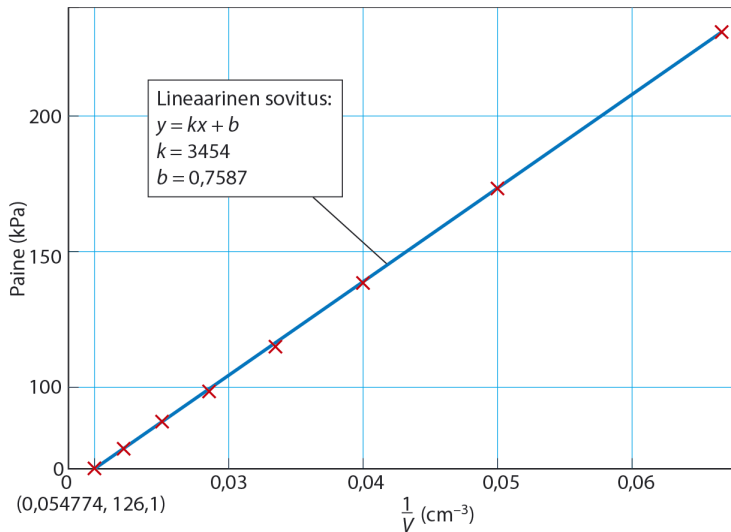
b) Kun kaasun lämpötila on 17°C , kaasun paine on 1,9 bar.

c) Paine alenee nestekaasupulloon liitettyssä paineenalennusventtiilissä
 $1900 \text{ mbar} - 1013 \text{ mbar} - 30 \text{ mbar} = 857 \text{ mbar} \approx 0,9 \text{ bar}$.

11-6. a) Käytetään mittausohjelmaa.



11 Kaasun tilan muuttuminen



Ensimmäisessä kuvassa mittausohjelman sovitus $p = \text{vakio} / V$ sopii

hyvin mittauspisteisiin. Jälkimmäisessä kuvassa paineen p ja suureen $1 / V$ välinen riippuvuus on lineaarinen eli $p \sim 1 / V$.

Molemmat kuvaajat osoittavat, että $pV = \text{vakio}$ eli vakiolämpötilan kaasulaki on voimassa.

b) Ensimmäisestä kuvasta voi mittausohjelman avulla lukea, että kun tilavuus on $42,0 \text{ cm}^3$, paine on $85,6 \text{ kPa}$.

c) Ensimmäisestä kuvasta voi lukea, että kun paine on 120 kPa , tilavuus on 29 cm^3 .

11-7. Koska pullon tilavuus ei muutu, yleisen kaasulain $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

perusteella pullossa olevalle ilmalle on voimassa yhtälö $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$. Tästä

saadaan pullossa olevan ilman paineeksi

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = \frac{102,1 \text{ kPa} \cdot (273,15 - 18) \text{ K}}{(273,15 + 25) \text{ K}} = \frac{102,1 \text{ kPa} \cdot 255,15 \text{ K}}{298,15 \text{ K}} \approx 87,375 \text{ kPa}.$$

Korkkiin kohdistuva voima on ulkoisen ilmanpaineen korkkiin kohdistaman voiman F_1 ja pullon sisällä olevasta paineesta aiheutuvan voiman F_2 erotus:

$$\begin{aligned} F &= F_1 - F_2 = p_1 A - p_2 A = (p_1 - p_2) A \\ &= (101,325 \text{ kPa} - 87,375 \text{ kPa}) \cdot 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \\ &\approx 6,0 \text{ N}. \end{aligned}$$

Voiman suunta on pulloon päin.

11-8. a) Luokassa olevan ilman massa on

$$\begin{aligned} m &= \rho V \\ &= 1,293 \text{ kg/m}^3 \cdot 11 \text{ m} \cdot 8,5 \text{ m} \cdot 2,7 \text{ m} \\ &= 1,293 \text{ kg/m}^3 \cdot 252 \text{ m}^3 \\ &\approx 330 \text{ kg}. \end{aligned}$$

b) Luokan tilavuus on $V_1 = 252 \text{ m}^3$. Koska paine oletettiin vakioiksi,

seuraa yleisestä tilanyhtälöstä $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ yhtälö $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, josta saadaan

$$V_2 = \frac{V_1 T_2}{T_1} = \frac{252 \text{ m}^3 \cdot 298,15 \text{ K}}{292,15 \text{ K}} \approx 257,2 \text{ m}^3.$$

Näin ollen luokasta on poistunut ilmaa

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 257,2 \text{ m}^3 - 252 \text{ m}^3 \approx 5,2 \text{ m}^3.$$

11-9. Kun pullosta poistetaan pumpulla ilmaa, ilmanpaine pullon sisällä laskee pienemmäksi kuin ilmapallon sisällä. Ilmapallo laajenee, jolloin paine sen sisällä pienenee Boylen lain $pV = \text{vakio}$ mukaisesti.

TESTAA, OSAATKO S. 103

1. c 2. b, c 3. b 4. c 5. a, c, d 6. a, b, c, d 7. b 8. c 9. a, b, c 10. a, b 11. a, c 12. c

TEHTÄVIEN RATKAISUT

12-1. a) Aineen B höyrystämiseen tarvitaan kuvion mukaan enemmän energiaa kuin aineen A (koska aineen B ylin vaakasuora tasanne on pitempi kuin aineen A).

b) Aineen B sulattamiseen tarvitaan enemmän energiaa kuin aineen A sulattamiseen, koska kuvaajan perusteella B:n sulattamiseen tarvittava energia ΔQ on suurempi kuin aineen A sulattamiseen tarvittava vastaava energia.

c) Aineen A sulamis- ja kiehumispisteiden ero on suurempi kuin aineella B, koska kuvaajan perusteella aineen A sulamis- ja kiehumispisteiden väli ΔT on suurempi kuin aineen B vastaava lämpötilaväli.

d) Aine B luovuttaa jäähtyessään kiehumispisteestään sulamispisteeseen enemmän energiaa kuin aine A, koska kuvaajan perusteella aineen B luovuttama energia ΔQ on suurempi kuin aineen A luovuttama vastaava energia.

12-2. a) Alueet liittyvät aineen olomuotoihin ja ovat kiinteä (ruskea), neste (sininen) ja kaasu (harmaa).

b) Nuoli 1 kuvaa olomuodonmuutosta kiinteästä aineesta kaasuksi (sublimoituminen), nuoli 2 kiinteästä nesteeksi (sulaminen) ja nuoli 3 nesteestä kaasuksi (höyrystyminen).

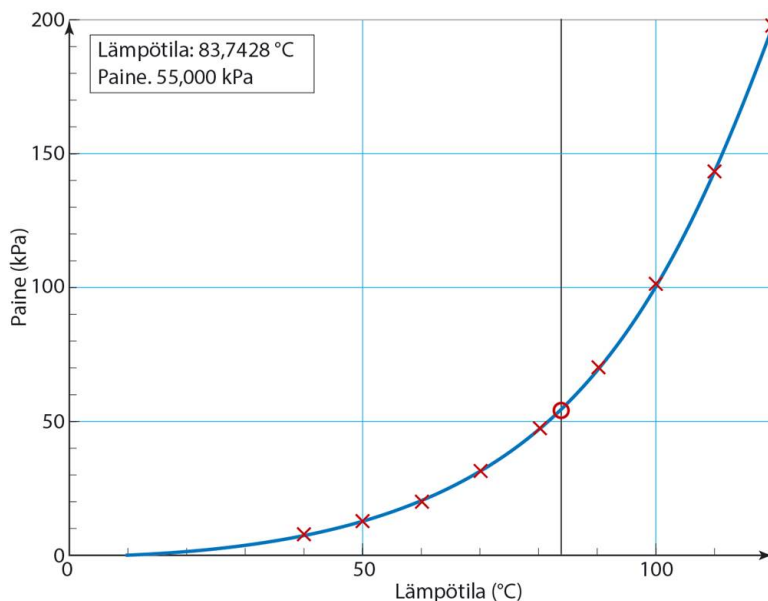
c) Aineiden A ja B sulamiskäyrät kaartavat eri suuntiin. Aineen A tapauksessa paineen kasvaessa sulamispiste alenee. Aineen B tapauksessa paineen kasvaessa sulamispiste kohoaa.

12-3. a) Keittolevystä johtuu energiaa kattilaan ja edelleen kattilasta veteen. Kiehumisen aikana veden lämpötila ei muutu, koska energia kuluu olomuodon muutokseen nesteestä höyryksi.

b) Ilman maksimikosteus pienenee, kun lämpötila laskee. Kylmän virvoitusjuomapullon ympärillä oleva ilma jäähtyy alle kastepisteen, jolloin se ei pysty sitomaan kaikkea siinä alun perin ollutta kosteutta. Osa vesihöyrystä tiivistyy tämän takia pullon pinnalle vedeksi.

- 12-4.** a) 1) Normaalipaineessa $101,3 \text{ kPa} = 0,1013 \text{ MPa}$ vesi voi olla olomuodoltaan kiinteätä (jäätä), kun lämpötila $T < 273,15 \text{ K}$.
2) Normaalipaineessa $101,3 \text{ kPa} = 0,1013 \text{ MPa}$ vesi voi esiintyä nesteinä, kun lämpötila $273,15 \text{ K} < T < 373,15 \text{ K}$.
3) Kaasumaista ainetta kutsutaan höyryksi, jos sen lämpötila on enintään yhtä suuri kuin kyseisen aineen kriittinen lämpötila. Näin ollen vesi voi esiintyä höyrynä, kun lämpötila $373,15 \text{ K} < T < 647,4 \text{ K}$.
4) Vesi voi esiintyä kaasuna, kun lämpötila $T > 647,4 \text{ K}$. Kaasun lämpötila on suurempi kuin kyseisen aineen kriittinen lämpötila.
- b) Vesi voi esiintyä nesteinä, kun paine $p > 0,00061 \text{ MPa}$.
- c) 1) Vesi muuttuu lämpötilan laskiessa kaasusta höyryksi ja härmistyy höyrystä kiinteäksi.
2) Vesi muuttuu kaasusta höyryksi, tiivistyy höyrystä nesteeksi ja jähmettyy sitten nesteestä kiinteäksi.
- d) Lämpötilan $370 \text{ °C} = 643 \text{ K}$ ja paineen $0,2 \text{ MPa}$ arvot sijoittuvat faasidiagrammissa höyryn alueelle; veden olomuoto on siis höyry.

- 12-5. a)** Sijoitetaan arvot mittausohjelmaan, joka sovittaa käyrän mittauspisteisiin



- b)** Käyrä antaa kiehumispisteeksi 84 °C, kun paine on 55 kPa.

- 12-6. a)** Lämpötilassa 19 °C taulukkokirjan mukaan kylläisen vesihöyryn tiheys on 16,30 g/m³. Koska ilman suhteellinen kosteus on 49 %, yhdessä kuutiometrissä ilmaa on vettä $0,49 \cdot 16,30 \text{ g} = 7,987 \text{ g} \approx 8,0 \text{ g}$.
- b)** Veden määrä huoneilmassa on $53 \text{ m}^3 \cdot 7,987 \text{ g/m}^3 \approx 420 \text{ g}$.
- c)** Jos yhdessä kuutiometrissä ilmaa on 8,0 g vettä, taulukkokirjan mukaan tiheyttä 8,0 g/m³ vastaava kastepiste on lämpötilojen 7 °C ja 8 °C välillä. Kastepiste on likimain 7,5 °C.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

13-1. a) Kostealta iholta haihtuu vettä. Haihtuminen tarvitsee energiaa, joka on osittain lähtöisin ihosta. Tästä seuraa viileä olo.

b) Iholta haihtuva neste (kynsilakanpoistoaine) ottaa haihtumiseen tarvittavan energian lämpimästä ihosta. Tällöin ihon pinta viilenee.

c) Märästä pyyhkeestä haihtuu vettä. Haihtumiseen tarvitaan energiaa, joka on peräisin osittain virvoitusjuomapullostä, jolloin virvoitusjuomapullo ja juoma jäähtyvät.

13-2. Kullan sulattamiseen tarvittu energia on $Q_{\text{tuotto}} = sm$. Sulatusuunin ottama energia on Q_{otto} . Uunin hyötysuhde on $\eta = \frac{Q_{\text{tuotto}}}{Q_{\text{otto}}}$. Uunin tarvitsema energia kullan sulattamiseen on

$$Q_{\text{otto}} = \frac{Q_{\text{tuotto}}}{\eta} = \frac{sm}{\eta} = \frac{64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 30,0 \text{ kg}}{0,58} \approx 3300 \text{ kJ}.$$

13-3. a) Veden ominaissulamislämpö on 333 kJ/kg, eli jättä sulaa yhden kilogramman verran, kun sulamispisteessä olevaan jäähän tuodaan energiaa 333 kJ.

b) Raudan ominaishöyrystymislämpö on 6,80 MJ/kg, eli rautaa höyrystyy puoli kilogrammaa, kun kiehumispisteessä olevaan rautaan tuodaan energiaa 3,40 MJ.

13-4. a) Jää on sulamispisteessä. Sulattamiseen tarvittava energia on $Q = sm = 0,15 \text{ kg} \cdot 333 \text{ kJ/kg} \approx 50 \text{ kJ}$.

b) Rauta on kiehumispisteessä. Höyrystämiseen tarvittava energia on $Q = rm = 0,012 \text{ kg} \cdot 6,80 \text{ MJ/kg} \approx 0,082 \text{ MJ} = 82 \text{ kJ}$.

- 13-5.** Veden höyryttämiseen tarvittava energia on $Q = rm$, joka on yhtä suuri kuin sähkölevyn luovuttama energia $Q = Pt$ eli $Pt = rm$. Höyryttämiseen kuluva aika on

$$t = \frac{rm}{P} = \frac{2260 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot 0,25 \text{ kg}}{850 \text{ W}} \approx 664,706 \text{ s} = \frac{664,706}{60} \text{ min} \approx 11 \text{ min.}$$

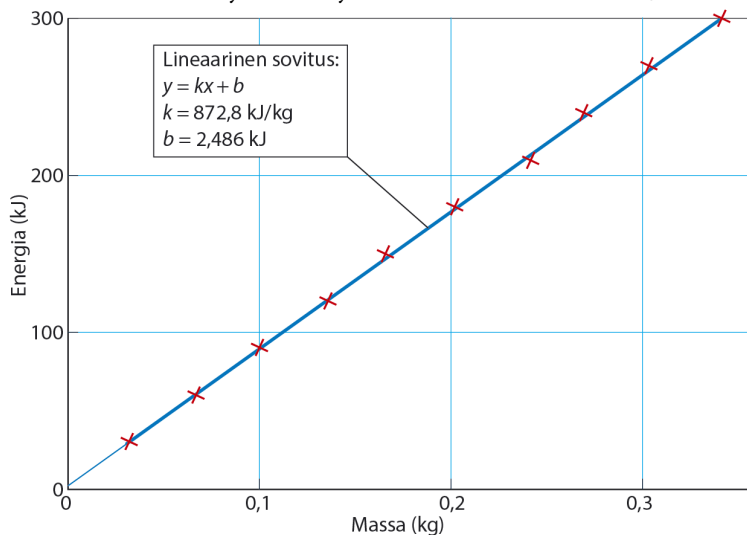
- 13-6.** Oletetaan, että lämpöhäviöt ovat vähäisiä, joten sähkövastuksen tuottama energia on likimain yhtä suuri kuin sulamiseen tarvittava energia. Aineen sulattamiseen tarvitaan energiaa $Q = sm$, jossa s on aineen ominaissulamislämpö. Kuvion mukaan sähkövastuksen tuottama energia sulattamisen aikana on 33 kJ, joten aineen ominaissulamislämpö on

$$s = \frac{Q}{m} = \frac{33 \text{ kJ}}{0,185 \text{ kg}} \approx 180 \text{ kJ/kg.}$$

Taulukkokirjan mukaan glyserolin ominaissulamislämpö on 176 kJ/kg (ja sulamispiste 17,9 °C, kuviossa 18 °C). Aine on glyserolia.

Ominaislämpökapasiteetin arvon poikkeaminen taulukkoarvosta johtuu energiahäviöistä, eli osa energiasta ei lämmitä glyserolia vaan mittaussysteemin muita osia ja ilmaa.

- 13-7.** Höyrystyneen etanolin massa ja uppokuumen ottama energia vietiin mittausohjelmaan ja tulokset esitettiin m, Q -koordinaatistossa.



Siirtyvän energian ja massan välinen yhteys on lineaarinen ja sitä kuvaavan suoran yhtälö on $Q = rm$. Suoran fysikaalinen kulmakerroin $r = \Delta Q / \Delta m$ on tutkittavan aineen ominaishöyrystymislämpö. Mittausohjelmasta saadaan etanolin ominaishöyrystymislämmöksi 870 kJ/kg. Tulos on liian suuri, koska osa energiaa siirtyi etanolista ympäristöön.

13-8. a) Veden lämpötilan muutos on celsiusasteina

$\Delta\theta = 100\text{ °C} - 25\text{ °C} = 75\text{ °C}$ ja kelvineinä $\Delta T = 75\text{ K}$. Jos lämpöhäviöitä ei oteta huomioon, veden kuumentamiseen ja höyrystämiseen tarvittava energia $Q = cm\Delta T + rm$ on yhtä suuri kuin lämmitystehon tuottama energia $Q = P\Delta t$, eli yhtälöstä $P\Delta t = cm\Delta T + rm$ lämmitysteho on

$$P = \frac{cm\Delta T + rm}{\Delta t}$$

$$= \frac{4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2500 \text{ kg} \cdot 75 \text{ K} + 2260 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 2500 \text{ kg}}{1,0 \text{ s}}$$

$$\approx 6,4 \text{ GW}.$$

b) Lämmitystehon pitää olla laskettua suurempi, koska höyry kuumennetaan korkeaan lämpötilaan (290 °C). Kuumalla höyryllä on myös liike-energiaa, koska korkeapaineinen, kuuma, nopeasti virtaava höyry pyörittää voimalaitoksen turbiineja.

13-9. Kuparin lämpötilan muutos on celsiusasteina

$\Delta t_{\text{kupari}} = 21\text{ °C} - (-195,8\text{ °C}) = 216,8\text{ °C}$ ja kelvineinä $\Delta T_{\text{kupari}} = 216,8\text{ K}$.

a) Kuparikappale jäähtyy nestetyypen lämpötilaan (−195,8 °C) ja luovuttaa energiaa. Vapautuva energia aiheuttaa typen höyrystymistä. Typpi kiehuu voimakkaasti, kunnes kuparikappale on jäähtynyt.

b) Oletetaan, että typpeä on riittävästi ja lämpöhäviöt ovat vähäisiä. Typen vastaanottama energia on yhtä suuri kuin kuparin lämpönä luovuttama energia, joten

$$Q_{\text{typpi}} = Q_{\text{kupari}} \text{ eli } r_{\text{typpi}} m_{\text{typpi}} = c_{\text{kupari}} m_{\text{kupari}} \Delta T_{\text{kupari}}.$$

Yhtälöstä $r_{\text{typpi}} m_{\text{typpi}} = c_{\text{kupari}} m_{\text{kupari}} \Delta T_{\text{kupari}}$ typen massaksi saadaan

$$m_{\text{typpi}} = \frac{c_{\text{kupari}} m_{\text{kupari}} \Delta T_{\text{kupari}}}{r_{\text{typpi}}} = \frac{0,387 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,102 \text{ kg} \cdot 216,8 \text{ K}}{200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \approx 43 \text{ g}.$$

TESTAA, OSAATKO S. 123

1. b 2. a 3. a,b,c 4. b 5. b 6. a, c 7. c 8. a, c, d 9. b, d 10. b,d,e, 11. c

TEHTÄVIEN RATKAISUT

14-1. a) Energian käyttäminen tarkoittaa energian muuntamista tarvittavaan muotoon. Esimerkiksi bensiinin kemiallinen energia muunnetaan moottoripyörän liike-energiaksi.

b) Primäärienergia tarkoittaa jalostamatonta energiaa siinä muodossa, jossa se on ennen energiantuotantoprosessia. Esimerkiksi kivihiilen kemiallinen energia on primäärienergiaa.

c) Sekundäärienergia tarkoittaa tuotantoprosessissa tuotettua energiaa. Esimerkiksi bensiinissä oleva energia on sekundäärienergiaa.

14-2. a) Väärin. Energian kulutus tarkoittaa energian muuntamista tarvittavaan muotoon.

b) Väärin. Energian tuottamisessa energian määrä ei muutu. Energian tuottaminen tarkoittaa energian muuntamista yhteiskunnan ja kotitalouksien tarvitsemaan muotoon.

c) Oikein.

14-3. a) Generaattori tuottaa voimalaitoksessa sähköä.

b) Lämpö- ja vesivoimalaitoksissa höyryn tai veden liike-energia muuntuu turbiinissa pyörimisen energiaksi. Turbiini on kytketty pyörittämään sähkögeneraattoria.

c) Tuulivoimalaitoksessa tuulen liike-energia muuntuu roottorissa pyörimisen energiaksi. Roottori on kytketty pyörittämään sähkögeneraattoria.

14-4. a) Kivihiilivoimalaitos on lämpövoimalaitos, joka käyttää energianlähteenä hiiltä. Siinä korkeapaineisen höyryn avulla pyöritetään turbiinia, joka on liitetty sähköä tuottavaan generaattoriin. Vastapainevoimalaitoksissa osa höyryssä olevasta energiasta otetaan talteen paikallisessa kaukolämpöverkossa käytettäväksi. Energiaa voidaan siirtää myös höyrynä lähiympäristön teollisuuslaitosten käyttöön.

b) Lauhdevoimalaitoksessa paineesta hyödynnetään suurempi osa höyryturbiinin pyörittämiseen kuin vastapainevoimalaitoksessa. Näin lauhdevoimalaitoksen generaattorista saadaan suuri sähköteho. Lauhdevoimalaitoksen lauhdevesi poistuu hukkalämpönä vesistöön tai ilmaan. Lauhdevoimalaitos tuottaa vain sähköä.

14-5. a) Kivihiilivoimalaitoksen ja ydinvoimalaitoksen samankaltaisuuksia ovat seuraavat:

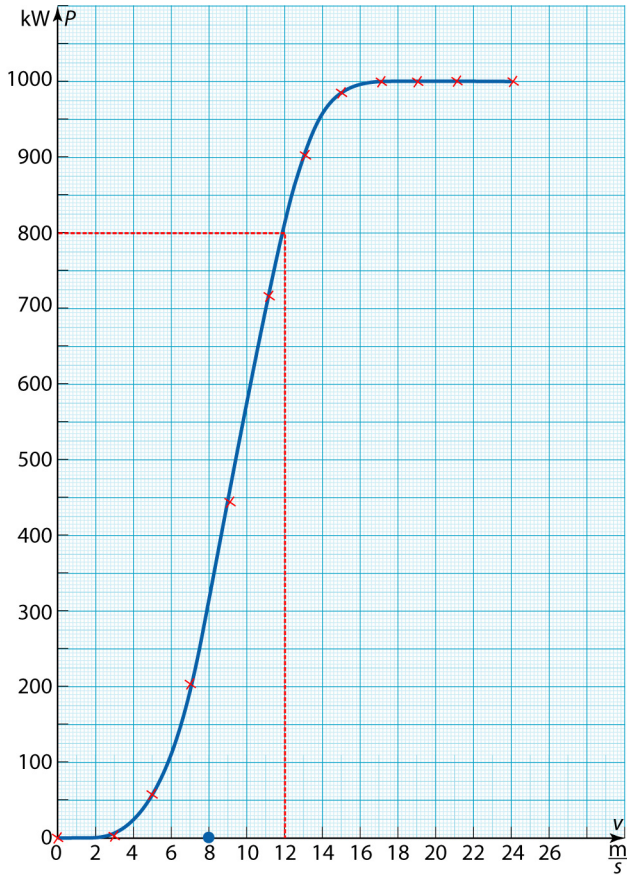
1. Molemmat voimalaitokset ovat lämpövoimalaitoksia.
2. Kummassakin voimalaitoksessa kuuma, korkeapaineinen höyry pyörittää turbiinia, joka on liitetty sähköä tuottavaan generaattoriin.
3. Ydinvoimalaitos on lauhdevoimalaitos, jossa turbiinin jälkeen vapautuvaa hukkaenergiaa ei hyödynnetä, vaan höyry haihdutetaan ilmaan tai se lauhdutetaan lauhdevedellä. Myös kivihiilivoimalaitos voi olla lauhdevoimalaitos.
4. Kumpikin voimalaitos käyttää uusiutumatonta energialähdettä.

b) Kivihiilivoimalaitoksen ja ydinvoimalaitoksen eroavaisuuksia ovat seuraavat:

1. Kivihiilivoimalaitoksen energiantuotanto perustuu polttoprosessiin, jossa polttoaineena on kivihiili. Ydinvoimalaitoksen energia on peräisin uraaniydinten halkeamisesta.
2. Kaikki ydinvoimalaitokset ovat lauhdevoimalaitoksia. Kivihiilivoimalaitokset voivat olla myös vastapainevoimalaitoksia.

3. Kivihiilivoimalaitos tuottaa päästöinä mm. hiilidioksidia ja rikkiyhdisteitä. Toimiva ydinvoimalaitos tuottaa päästöinä ilmakehään vain vesihöyryä. Ydinvoimalaitoksissa tapahtuneet onnettomuudet ovat vapauttaneet luontoon radioaktiivisia aineita.

14-6. a) Voimalaitoksen teho P riippuu tuulen nopeudesta v kuvaajan mukaisesti.



b) Kuvaajan mukaan tehoa $P = 800$ kW vastaavaksi tuulen nopeudeksi saadaan $v \approx 12$ m/s.

c) Voimalaitoksen keskimääräinen teho vuonna 2006 oli

$$P_k = \frac{E}{t} = \frac{2517 \text{ MWh}}{365 \cdot 24 \text{ h}} = 0,287329 \text{ MW} \approx 290 \text{ kW}.$$

14-7. Taulukko on otsikoitu ”Energian kokonaiskulutus energialähteittäin”, joka samalla kuvaa likimain energian kokonaistuotantoa. Tuontisähkön osuus on vain 5 % kokonaiskulutuksesta.

a) Öljyn käyttö on vähentynyt 3 %, hiilen 11 % ja maakaasun 14 %. Muutokset ovat merkittäviä kokonaiskulutuksen kannalta. Öljy, hiili ja maakaasu ovat fossiilisia polttoaineita ja merkittäviä energialähteitä Suomessa. Uusiutuvien energialähteiden osuus kulutuksessa ei kuitenkaan ole kasvanut läheskään yhtä suuressa määrin. Vesivoimalaitosten osuus energian kokonaiskulutuksesta on vain 4 % ja kasvu samoin 4 %. Fossiilisia polttoaineita on korvattu lisäämällä sähkön tuontia sekä turpeen ja muiden energialähteiden käyttöä energian tuotannossa.

b) Tuulienergian kasvu (44 %) on voimakasta, mutta sen osuus koko energiankulutuksesta on vain 0,3 % (laskettu taulukon arvoista). Tuulienergian osuus on edelleen vuonna 2014 kokonaiskulutuksen kannalta hyvin vähäinen.

14-8. $P = 1400 \cdot 10^6 \text{ W}$, $t = 1 \text{ d} = 86\,400 \text{ s}$.

Uraanin tuottama energia vuorokaudessa on

$$Q = Pt = 1400 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 86\,400 \text{ s} = 1,2096 \cdot 10^{14} \text{ J}.$$

Uraanin massa pienenee yhtälön $E = \Delta mc^2$ mukaisesti, kun $E = Q$ ja c valonnopeus.

Energiaksi muuttuva massa vuorokaudessa on

$$\Delta m = \frac{Q}{c^2} = \frac{1,2096 \cdot 10^{14} \text{ J}}{(2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} \approx 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg} = 1,3 \text{ g}.$$

14-9. $\eta = 0,84$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $h = 32,4 \text{ m}$, $P_{\text{tuotto}} = 120 \text{ MW}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Ratkaistaan tuottotehoyhtälöstä $P_{\text{tuotto}} = \eta \frac{\rho V g h}{t}$ virtaama $\frac{V}{t}$ eli

$$\frac{V}{t} = \frac{P_{\text{tuotto}}}{\eta \rho g h} = \frac{120 \cdot 10^6 \text{ W}}{0,84 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 32,4 \text{ m}} \approx 450 \text{ m}^3/\text{s}.$$

14-10. $\eta = 0,32$, $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$, $r = 30,0 \text{ m}$, $P_{\text{tuotto}} = 53 \text{ kW}$.

Ratkaistaan tuulivoimalaitoksen tuottoteho yhtälöstä

$$P_{\text{tuotto}} = \eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \text{ tuulen nopeus:}$$

$$P_{\text{tuotto}} = \eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$

$$v^3 = \frac{P_{\text{tuotto}}}{\eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2}$$

$$v = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{tuotto}}}{\eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2}} = \sqrt[3]{\frac{53 \cdot 10^3 \text{ W}}{0,32 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3 \cdot \pi \cdot (30,0 \text{ m})^2}} \approx 4,5 \text{ m/s}.$$

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 15-1.** a) Oikein.
b) Oikein.
c) Oikein.
d) Väärin. Muovit on tehty öljystä, joten se on alkuperältään fossiilinen polttoaine.
- 15-2.** a) Biomassalla tarkoitetaan kasvien yhteyttämisen tuloksena syntyvää ainesta.
b) Bioenergialla tarkoitetaan biomassasta saatavaa energiaa.
- 15-3.** a) Maalämpö on maaperän pintakerrokseen sitoutunutta Auringon energiaa. Geoterminen energia on peräisin maan sisällä tapahtuvista radioaktiivisista hajoamisista.
b) Suora aurinkoenergia on muutettavissa suoraan lämmöksi aurinkokeräimissä tai sähköksi aurinkopaneelien fotokennoissa. Epäsuoralla aurinkoenergialla tarkoitetaan kaikkea muuta energiaa paitsi ydinenergiaa, geotermistä energiaa ja suoraa aurinkoenergiaa. Epäsuoraa aurinkoenergiaa ovat esimerkiksi fossiiliset polttoaineet, energiakasvit, tuulen liike-energia ja veden liike- ja potentiaalienergia.
- 15-4.** a) Aurinkokennossa Auringon säteily muunnetaan suoraan sähköksi. Sähkön avulla voidaan käyttää erilaisia laitteita tai sähkö voidaan varastoida akkuihin myöhempää käyttöä varten.
b) Aurinkokeräimissä kiertää neste, jonka Auringon säteily kuumentaa. Kuumenneen nesteen avulla voidaan lämmittää haluttuja kohteita tai lämpö voidaan siirtää varastoon, esimerkiksi vesisäiliöön.

15-5. Ei malliratkaisua.

15-6. Yhdyskuntajäte sisältää esimerkiksi puuta, joka on uusiutuvaa energiaa. Jätteen joukossa on myös muovia, jonka alkuperä on fossiilinen ja siten uusiutumaton.

15-7. Energiaa voidaan varastoida kemiallisena energiana akuissa, potentiaalienergiana esimerkiksi tekojärvissä ja lämpönä lämpövarastoissa kuten vesisäiliöissä.

15-8. Vedyn etuja fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna ovat esimerkiksi seuraavat:

1. Vedyn energiasisältö massayksikköä kohti on lähes kolminkertainen bensiiniin ja dieselöljyyn verrattuna.
2. Vedyn palamisessa ei synny hiilipäästöjä, palamisessa syntyy vain vettä.
3. Jos vedyn valmistukseen käytetään esimerkiksi vesi-, tuuli- tai aurinkoenergiaa, vetyä voidaan valmistaa vähäisillä hiilipäästöillä.
4. Vetyä on saatavilla runsaasti.
5. Vety on myrkytön.
6. Vetyautojen moottorit ovat lähes äänettömiä.

Vedyn käyttö polttoaineena yleistyy sitä mukaa, kun vedyn valmistus- ja varastointimenetelmät kehittyvät.

15-9. $E = 200 \text{ kWh}$, sähkön hinta on 15 snt/kWh
Jos keräimen energia korvataan sähköllä, sen arvo on
 $200 \text{ kWh} \cdot 0,15 \text{ €/kWh} = 30 \text{ €}$.

15-10. Fuusioreaktiossa vapautuu massaan sitoutunutta energiaa, joka voidaan laskea kaavasta $E = mc^2$.

Sekunnissa vapautunut energia on

$$E = mc^2 = 4 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ J} (= 400 \text{ YJ}).$$

15-11. $E = 83 \text{ TWh} = 83 \cdot 10^{12} \text{ Wh}$, $P = 3,0 \text{ MW} = 3,0 \cdot 10^6 \text{ W}$, $t = 1 \text{ a}$.

Yhden tuulivoimalaitoksen tuottama sähkö vuodessa on

$$E = Pt = 3,0 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 1 \text{ a} = 3,0 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} = 2,628 \cdot 10^{10} \text{ Wh}.$$

Tarvittava määrä tuulivoimalaitoksia on

$$\frac{83 \cdot 10^{12} \text{ Wh}}{2,628 \cdot 10^{10} \text{ Wh}} \approx 3200.$$

15-12. a) Teho on

$$P = \eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 = 0,32 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \pi \cdot (32 \text{ m})^2 \cdot \left(4,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 \approx 61 \text{ kW}.$$

b) Teho on

$$P = \eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 = 0,32 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \pi \cdot (75 \text{ m})^2 \cdot \left(8,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 \approx 2000 \text{ kW}.$$

15-13. Vastauksessa voidaan tarkastella ainakin seuraavia seikkoja:

- Auringon energiaa saadaan eniten kesällä lämpiminä ja valoisina kuukausina ja vähiten talvella kylminä kuukausina ja pimeänä kautena.
- Edellisen takia aurinkopaneelit eivät sovi ympärivuotiseen sähköntuotantoon Suomessa. Aurinkopaneeleista saadaan energiaa vähiten silloin, kun sitä tarvitaan eniten.
- Etelässä Auringon säteilyenergia on 20 % suurempi kuin pohjoisessa.
- Muuta asiaan liittyvää pohdintaa.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

16-1. Auringosta maanpinnalle tuleva sähkömagneettinen säteily sisältää ultraviolettisäteilyn, näkyvän valon sekä koko infrapunasäteilyn aallonpituusalueen. Maanpinta lähettää vain pitkäaaltoista infrapunasäteilyä.

16-2. a) Kasvihuoneilmiö selitetään seuraavasti:

- Auringon säteily lämmittää maaperää, joka ottaa vastaan osan Auringon lähettämästä sähkömagneettisesta säteilystä.
- Lämmennyt maaperä lähettää pitkäaaltoista infrapunasäteilyä, joka ei läpäise ilmakehän kasvihuonekaasuja yhtä hyvin kuin lyhyet aallonpituudet.
- Kaasut lämpenevät ja lähettävät säteilyä takaisin maahan.
- Maapallon keskilämpötila olisi 20–30 °C alempi, jos kasvihuonekaasuja ei olisi.
- Ilmiötä kutsutaan kasvihuoneilmiöksi.
- Aikojen kuluessa on syntynyt tasapainotila, jolloin maapallon lämpötila pysyy likimain vakiona, koska maapallolle tulee yhtä paljon säteilyenergiaa kuin samassa ajassa energiaa poistuu.

b) Kasvihuoneilmiö voimistuu kun pitkäaaltoista infrapunasäteilyä vastaanottavien kaasujen määrä kasvaa ilmakehässä. Tällöin avaruuteen poistuvan säteilyn osuus pienenee, ja maanpinnalle palautuvan säteilyn osuus kasvaa. Ilmakehän ja koko maapallon lämpötila kohoaa vähitellen.

c) Kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä ovat kasvaneet, mikä voimistaa kasvihuoneilmiötä ja lämmittää ilmastoa. Tätä lämpenemistä ja siitä aiheutuvia ilmaston häiriöitä kutsutaan ilmastomuutokseksi. Ilmakehän häiriöitä ovat esimerkiksi tuulten voimistuminen, myrskyjen yleistyminen ja voimistuminen ja sateiden muuttuminen niin, että rankkasateet tietyillä alueilla ovat lisääntyneet.

Toisaalta joillakin alueilla on haittaa sateiden vähenemisestä ja tämän aiheuttamasta kuivuudesta.

d) Ihminen voi omalta osaltaan estää kasvihuoneilmiön voimistumista mm. seuraavasti:

- Liikkumisessa tulee suosia kävelemistä, polkupyöräilyä ja joukkoliikennettä mopediin, moottoripyörien ja henkilöautojen sijasta.
- Osa automatkoista ja lentomatkoista voidaan korvata junamatkoilla. Junien kasvihuonekaasupäästöt ovat vähäisiä muihin vaihtoehtoihin verrattuna.
- Lomamatkailussa kotimaisia kohteita pitäisi suosia enemmän lentokoneilla tehtävän kaukomatkailun sijaan.
- Kertakäyttötavotteiden kulutusta tulee vähentää. Joitakin kertakäyttötavotteita voi ottaa toistuvaan käyttöön. Esimerkiksi monet muoviset elintarvikkeiden pakkausrasiat sopivat pakastamiseen.
- Kotona harvoin tarvittavat työkalut ja muut laitteet tai tavarat voi monissa tapauksissa vuokrata tai lainata.
- Nykyään useimmat kulutustavarat tehdään helposti kierrätettäviksi. Esimerkiksi käytöstä poistetut sähkölaitteet, kuten matkapuhelimet, tulee viedä elektroniikkaromun kierrätyspisteisiin. Samalla kun luonnon raaka-aineita säästyy, myös valmistusmateriaalien käsittelyssä säästyy energiaa ja siten kasvihuonekaasujen päästöt ilmakehään vähenevät.

Ruokaan liittyviä tapoja on mahdollista muuttaa ilmakehää vähemmän rasittaviksi:

- Ruokaa tulee hankkia sen verran kuin sitä syödään. Ruuan poisheittäminen aiheuttaa vauriissa maissa paljon kasvihuonekaasujen päästöjä.
- Ravintona kannattaa käyttää lähellä tuotettua ruokaa kuljetusten aiheuttamien haittojen vähentämiseksi.
- Kasvikunnan tuotteiden lisääminen ruokavalioon ja samalla lihan vähentäminen on ilmakehän kannalta hyvä ratkaisu.

- Myös kasvikunnan eri tuotteiden tuotannon välillä on eroja kasvihuonekaasujen päästöissä. Esimerkiksi kotimainen peruna on lähellä tuotettua ruokaa, lisäksi perunan tuotanto aiheuttaa selvästi vähemmän kasvihuonekaasujen päästöjä kuin riisin tuotanto. Riisipellot ovat merkittäviä metaanilähteitä.

16-3. a) Oikein.

b) Oikein.

c) Oikein.

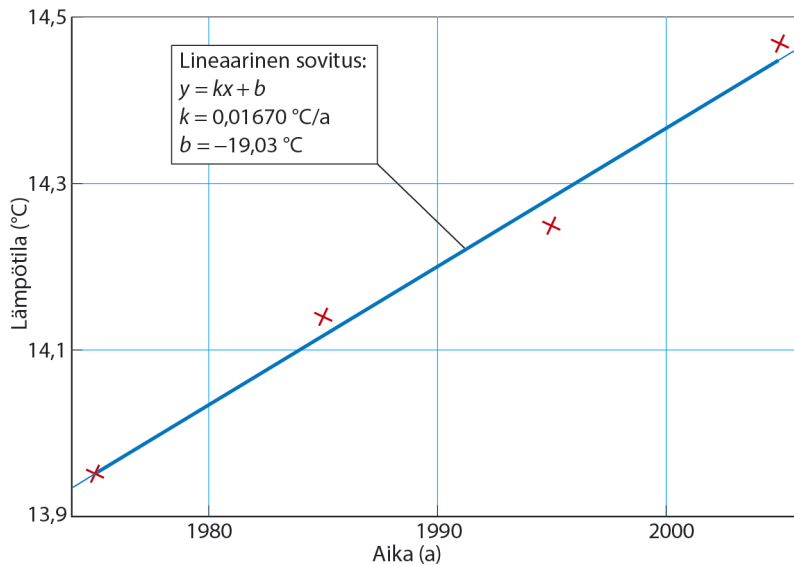
d) Oikein.

16-4. a) Mittausten mukaan keskilämpötila vaihtelee vuosittain ja myös pitemmissä jaksoissa. Esimerkiksi vuosien 1880 ja 1940 tienoilla on ollut lämpimiä vuosia. Viileät ajanjaksot osuvat vuosien 1910 ja 1970 tienoille. Kuviosta havaitaan, että pitkällä aikavälillä maapallon keskilämpötila kohoaa, ja kohoamisnopeus kasvaa koko ajan viileämpien kausien välillä. Huomataan, että 13 vuosikymmenen aikana 1881–2010 lämpötila on kohonnut keskimäärin $0,0579\text{ °C}/10\text{a}$ eli $0,00579\text{ °C/a}$ ja neljän vuosikymmenen aikana 1971–2010 selvästi edellistä ajanjaksoa nopeammin (kohta b).

b) Vuosikymmenien 1971–2010 keskilämpötilat ovat kuvaajan mukaan likimain seuraavat (suluissa vuosikymmentä esittävä vuosiluku kuvaajassa):

Vuosikymmen	1971– (1975)	1981– (1985)	1991– (1995)	2001– (2005)
Keskilämpötila t (°C)	13,95	14,12	14,25	14,47

Viedään taulukon arvot mittausohjelmaan ja sovitetaan pisteiden kautta suora:



Mittausohjelman mukaan lämpötila kohosi vuosina 1971–2010 keskimäärin $0,01670 \text{ } ^\circ\text{C/a}$.

16-5. Ilmaston lämpenemisellä on esimerkiksi seuraavia haitallisia vaikutuksia:

- Mannerjäätiköt sulavat, minkä seurauksena merenpinta nousee ja asuttuja rannikkoalueita ja kokonaisia saariryhmiä jää veden alle.
- Vuoristojen pysyvät jääpeitteet vähenevät ja katoavat, ja samoin käy vuorten rinteiden sulamisvesille. Nykyään elinkelpoiset alueet vuorten rinteillä vähenevät vesipulan takia.
- Pohjoisen napa-alueen jäiden sulaminen aiheuttaa jään olemassaolosta riippuvien eläinten elinalueiden pienenemisen ja eläinten määrän vähenemisen. Samalla esimerkiksi Grönlannin ihmisten elinolosuhteet muuttuvat, kun osa ravinnosta katoaa.
- Tuulet lisääntyvät ja hirmumyrskyt muuttuvat yhä tavallisemmiksi ja voimakkaammiksi.
- Trooppiset taudit lisääntyvät ja leviävät entistä laajemmille alueille.
- Esimerkiksi edellä mainituista syistä elinkelpoinen maa-ala pienenee, ja ihmiset joutuvat jättämään kotiseutunsa.

- Ilmaston lämpeneminen sulattaa ikirouta-alueita, jolloin esimerkiksi Siperian valtavat suoalueet vapauttavat lisää kasvihuonekaasuja ilmakehään. Sama voi tapahtua myös merenpohjassa sen lämmetessä.

16-6. Auringon säteily enimmäkseen heijastuu tai siroaa puhtaasta lumesta. Heijastumisessa ja siroamisessa aallonpituus ei muutu, joten säteilyn lyhytaaltainen osuus läpäisee suurimmaksi osaksi ilmakehän ja poistuu avaruuteen.

Lumen pinnalla oleva hiilipöly lisää maapallon ilmaston lämpenemistä seuraavasti:

- Hiilipöly sitoo tehokkaasti säteilyenergiaa joka muuntuu lämmöksi.
- Hiilipölyn lähettämä pitkäaaltoinen infrapunasäteily sitoutuu ilmakehään, jolloin ilmakehä lämpenee enemmän kuin säteilyn heijastuessa ja sirotessa puhtaasta lumesta.
- Hiilipölyn vastaanottama energia sulattaa lunta ja jäätä, jolloin lumettoman maan ja jäätönnän veden pinta-ala kasvaa. Tämä vähentää tulevan säteilyn heijastumista ja siroamista.
- Lumen ja jään peittämän pinta-alan väheneminen lisää edelleen säteilyenergian sitoutumista maanpintaan ja veteen, ja samalla pitkäaaltoisen infrapunasäteilyn voimistumista.

16-7. a) Biopolttoaineiden kuten palmuöljyn hyvä puoli on, että ne ovat peräisin uusiutuvista energialähteistä. Biopolttoaineilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. Öljypalmujen käytöllä energian tuotannossa on kasvihuonekaasupäästöjen kannalta etua verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin vain jos palmut istutetaan ennestään avoimille paikoille. Öljyä poltettaessa ilmakehään vapautuu hiilidioksidiä, jota palmut sitovat kasvaessaan. Palmuöljyä saadaan öljypalmun siemenistä. Hehtaarin viljelmältä saadaan noin 10000 kg:n siemensato, josta saadaan öljyä noin 3000 kg. Palmuöljyä tuotetaan pääasiassa Kaakkois-Aasian maissa öljypalmuplantaaseilla.

Palmuöljyn tuotannossa huono puoli on, että kasvava palmuöljyn tuotanto vaatii paljon lisää palmujen kasvatukseen sopivaa maa-alaa. Tämä on johtanut sademetsien hävittämiseen palmujen tieltä. Sademetsät ovat tehokkaimpia hiilen (hiilidioksidin) sitojia, joten sademetsien väheneminen vapauttaa hiiltä ja samalla hiilidioksidia ilmakehään ja näin nopeuttaa kasvihuoneilmiötä ja siten ilmakehän lämpenemistä. Sademetsien korvaaminen öljypalmuplantaaseilla ja niillä tuotetun öljyn käyttö polttoaineena on esimerkiksi ilmakehän kannalta huonompi vaihtoehto kuin fossiilisten polttoaineiden käyttö.

b) Suomalaiset tutkijat ovat kehittäneet tavan tuottaa autoihin soveltuvia biopolttoaineita metsäteollisuuden jätteistä, kuten risuista, kannoista ja mäntyöljystä, jota syntyy sellun valmistuksessa.

c) Metsäteollisuuden jätteiden käyttö ei aiheuta metsän hakkuita, kuten palmuöljyn tuotannossa tehdään. Metsäteollisuuden jätteet ovat uusiutuvaa energiaa. Jätteet hajotessaan tuottaisivat joka tapauksessa hiilidioksidipäästöjä. Polttoaineina käytettäessä päästöt eivät lisäännä verrattuna luonnossa tapahtuvaan hajoamiseen. Metsäjätteiden käyttö on kestävä kehityksen kannalta parempi vaihtoehto kuin palmuöljyn käyttö.

16-8. a) Kivihiilivoimalaitosten haittoja ovat suuret rikki-, hiilidioksidi- ja typpioksidipäästöt. Päästöt aiheuttavat ilmakehän lämpenemistä, maaperän ja vesistöjen happamoitumista sekä terveydellisiä haittoja.

b) Ydinvoimalaitoksen suurin haitta on onnettomuuksien riski. Onnettomuuden tapahtuessa reaktorista voi päästä ympäristöön radioaktiivisia aineita, joilla on terveydellisiä vaikutuksia ihmisiin ja haittavaikutuksia luontoon. Ydinsäteily aiheuttaa perimän muutoksia ja lisää syövän riskiä. Ydinvoimalaitosten käytetyn polttoaineen varastointi on myös haittatekijä. Radioaktiiviset jätteet pitää varastoida syvälle maaperään hyvin pitkiksi ajoiksi.

Ainoa päästö, jonka ydinvoimala toimiessaan tuottaa, on lämmin vesi, joka lämmittää vesistöjä, tai vesihöyry, joka kohoaa ilmakehään. Vesihöyry on kasvihuonekaasu. Toisaalta vesihöyry pilvimuodostelmina heijastaa Auringon säteilyä takaisin avaruuteen joten vesihöyryllä voi olla myös ilmakehää viilentävä vaikutus.

c) Tuulivoimalaitoksesta syntyy päästöjä ilmakehään vain sen valmistusprosesseissa. Käytön aikana tuulivoimalat tuottavat meluhaittaa, joten niiden rakentamista asutusten lähelle vältetään.

d) Vesivoimalaitoksesta syntyy päästöjä vain sen rakennusvaiheessa. Vesivoimalaitoksen haittoja ovat veden varastoaltaiden valtaama tila maa-alueilta. Padot estävät kalojen nousun ylävirtaan, mistä on haittaa kalataloudelle. Tätä haittaa on vähennetty rakentamalla kaloille patojen vierelle kalaportaita, joiden kautta kalat voivat liikkua patojen ohi jokien ylävirroilla oleville lisääntymispaikoilleen.