

KERTAUSTEHTÄVIEN
RATKAISUT



vierelle kalaportaita, joiden kautta kalat voivat liikkua patojen ohi jokien ylävirroilla oleville lisääntymispaikoilleen.

KERTAUSTEHTÄVIEN RATKAISUT

1.
 - a) Termodynaaminen systeemi on
 - eristetty, jos se ei vaihda ympäristönsä kanssa ainetta eikä energiaa;
 - eristetty systeemi ei siis ole vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa
 - suljettu, jos se vaihtaa ympäristönsä kanssa energiaa mutta ei ainetta
 - avoin, jos se vaihtaa ympäristönsä kanssa sekä ainetta että energiaa.
 - b) Eristetyn systeemin muodostaa lyhyellä aikavälillä tarkasteltuna esimerkiksi termospullo.
Suljetun systeemin muodostaa esimerkiksi kaukolämpöverkko.
Avoimen systeemin muodostavat esimerkiksi kahvikupissa oleva kahvi ja kerma.
 - c) Termodynamiikassa makrotasolla tarkastelun kohteena on koko kappale. Mikrotason mallit selittävät makrotason ilmiöitä. Lämpötila on esimerkiksi makrotason ilmiöstä, mikrotasolla selvitetään lämpötilan aiheutuvan aineen rakenneosasten liikkeestä.
2. Lämpötila on $T = (-12 + 273) \text{ K} = 261 \text{ K}$.
3.
 - a) Ilmanpaine aiheutuu maapallon ilmaan kohdistamasta gravitaatiovoimasta eli painosta. Se puristaa ilmakehää Maata vasten.
 - b) Hydrostaattinen paine aiheutuu nesteen omasta painosta.
4.
 - a) Imukuppia käytettäessä imukupin ja lasin väliin muodostuu alipaine. Ulkoinen ilmanpaine puristaa imukupin suurella voimalla lasipintaan, jolloin imukuppi pysyy kiinni lasissa ja lasin siirtäminen on mahdollista.
 - b) Jos veitsen terä on ohut, veistä painettaessa paine terän alla muodostuu suuremmaksi kuin paksun terän tapauksessa.

c) Viemäriputkessa on vesilukon kohdalla U-kirjaimen muotoinen osa, jonka vesi täyttää. Tällöin ilmvirtaus ei pääse etenemään putkessa ja likakaivosta tulevat kaasut eivät pääse huoneilmaan.

5. Luistimen terä kohdistaa jäähän voiman F , joka on yhtä suuri kuin luistelijaan kohdistuva paino G , joten jäähän kohdistuva keskimääräinen paine on

$$p = \frac{F}{A} = \frac{G}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{86 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{750 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 1,1 \text{ MPa.}$$

6. Bernoullin yhtälöstä saadaan paineen muutokseksi

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\left(22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left(0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right) = 312,18 \text{ Pa.}$$

Paine-erosta aiheutuva voima on $F = pA = 312,18 \text{ Pa} \cdot 450 \text{ m}^2 \approx 140 \text{ kN}$, voiman suunta on katosta ulospäin. Huomaa, että kyseinen voima vastaa reilun 14 000 kg:n kuormaa (14 keskikokoista perheautoa)!

7. a) Energian säilymislain mukaan energian kokonaismäärä pysyy kaikissa tapahtumissa muuttumattomana. Energia ei lisäännä eikä vähene, eikä sitä voi luoda eikä hävittää.

b) Gravitaatiokenttään liittyvän kappaleen potentiaalienergian ja liikeenergian summaa kutsutaan kappaleen mekaaniseksi energiaksi.

c) Systeemin sisäenergia on sen rakenneosasten liikkeeseen ja vuorovaikutuksiin liittyvää energiaa. Rakenneosasten etenemis-, värähtely- ja pyörimisliikkeistä muodostuu mikroskooppisten rakenneosasten liike-energia. Rakenneosasten potentiaalienergia on rakenneosasten kemiallisten sidosten ja rakenneosasten välisten kemiallisten sidosten energiaa.

8. a) Uimahyppäjän potentiaalienergia 10,9 m:n korkeudella potentiaalienergian nollassa on

$$E_p = mgh = 77 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10,9 \text{ m} = 8,2 \cdot 10^3 \text{ J} = 8,2 \text{ kJ}.$$

- b) Uimahyppäjän liike-energia on

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

9. Liike-energia $E = \frac{1}{2}mv^2$ on suoraan verrannollinen nopeuden toiseen potenssiin. Koska nopeus kolminkertaistuu, liike-energia kasvaa

3^2 -kertaiseksi eli yhdeksänkertaiseksi.

10. Lentokoneen mekaaninen energia on sen potentiaalienergian ja liike-energian summa, eli

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

11. a) Jennan käsien kosketusvoima ja painovoima tekevät punnukseen mekaanista työtä noston aikana.

b) Ilman vastus on vähäinen, joten kosketusvoiman punnukseen tekemä mekaaninen työ on likimain yhtä suuri kuin potentiaalienergian muutos eli

$$W \approx E_p = mgh = 5,0 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,95 \text{ m} \approx 47 \text{ J}.$$

(Painon tekemä työ on yhtä suuri kuin potentiaalienergian muutos vastakkaismerkkisenä eli -47 J . Huomaa, että painon suunta on vastakkainen liikkeen suuntaan nähden.)

12. a) Vaijerin tukivoima tekee noston aikana työtä teholla

$$P_{\text{tuotto}} = \frac{W}{t} = \frac{F\Delta h}{t}. \text{ Oletetaan, että elementti nostetaan tasaisella}$$

nopeudella, jolloin nostamiseen tarvittavan vaijerin tukivoiman \bar{F} suuruus on yhtä suuri kuin elementtiin kohdistuvan painon \bar{G} suuruus.

Nostamiseen tarvittava teho on

$$\begin{aligned} P_{\text{tuotto}} &= \frac{F\Delta h}{t} = \frac{G\Delta h}{t} = \frac{mg\Delta h}{t} \\ &= \frac{2600 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 27 \text{ m}}{35 \text{ s}} = 19,6761 \cdot 10^3 \text{ W} \approx 20 \text{ kW}. \end{aligned}$$

b) Hyötysuhde on $\eta = \frac{P_{\text{tuotto}}}{P_{\text{otto}}}$,

joten moottorin sähköverkosta ottama teho on

$$P_{\text{otto}} = \frac{P_{\text{tuotto}}}{\eta} = \frac{19,6761 \text{ kW}}{0,93} \approx 21 \text{ kW}.$$

Nostotyön tekemiseen tarvittava teho on 20 kW ja moottorin sähköverkosta ottama teho 21 kW.

13. Tuulin teho nukkumisen aikana on $P = 53 \text{ kg} \cdot 1,1 \text{ W/kg}$.

Hänen nukkumisaikana tarvitsema energia on

$$Q = Pt = 53 \text{ kg} \cdot 1,1 \text{ W/kg} \cdot 8,0 \cdot 3600 \text{ s} \approx 1,7 \text{ MJ}.$$

14. a) Lämpötila on tilastollinen suure, jonka arvo riippuu kappaleen rakenneosasten lämpöliikkeestä.

Lämpötila määritellään rakennehiukkasten etenemisliikkeen keskimääräisen liike-energian avulla. Mitä nopeammin aineen rakenneosaset keskimäärin liikkuvat, sitä korkeampi on aineen lämpötila.

b) Lämmöllä tarkoitetaan lämpötilaerosta aiheutuvaa energian siirtymistä.

c) Lämpömäärä tarkoittaa siirtyvän energian määrää.

- 15 a) Iho haihduttaa vettä, jonka mukana kehosta poistuu energiaa. Tuuli kuljettaa kostean ja lämpimän ilmakerroksen pois ihon pinnalta. Tällöin iho haihduttaa enemmän. Haihtumiseen tarvitaan energiaa, jonka haihtuva vesi ottaa ihosta. Näin iho viilenee.
- b) Veden haihtuminen poistaa energiaa ihon pinnalta ja pitää ihon lämpötilan siedettävänä. Puhaltaminen vie ihon pinnalta pois suunnilleen ihon lämpöisen ilman ja tuo tilalle kuumaa ilmaa ja kuumassa ilmassa lämmennyt kostea hengityshöyryä. Kuuma ilma ja kuuma vesihöyry tuovat iholle energiaa lämpönä. Ihon pinta aistii kuumuuden.
16. Energia siirtyy patterista ympäristöön johtumalla, kuljetuksessa 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 kuljetuksesta.
- Kuuman patterin pinnan lämpötila on korkeampi kuin huoneen lämpötila, joten patterin pinnasta poistuu lämpösäteilyä enemmän energiaa kuin pinta ottaa ympäristöstä vastaan. Patterin pinnan säteily lämmittää niitä pintoja, joihin säteily osuu. Ilma ottaa lämpösäteilyä huonosti vastaan.
17. Systeemiin tehty mekaaninen työ kasvattaa systeemin sisäenergiaa. Pumpatessa käden kosketusvoima tekee männän välityksellä työtä ja ilman ja pumpun ulkokuoren sisäenergia kasvaa. Energiaa siirtyy ympäristöstä systeemiin.
- Systeemin ympäristöön tekemä työ pienentää sisäenergiaa. Systeemi tekee työtä ympäristöön esimerkiksi silloin, kun se laajetessaan työntää tieltään ilmaa tai muuta ympäristössä olevaa ainetta. Näin tapahtuu, kun painepullosta purkautuu paineilma esimerkiksi ilmapalloon sitä täytettäessä. Systeemistä siirtyy energiaa ympäristöön.

18. Prosessi on isobaarinen. Kaasun tilavuuden kasvu on

$$\Delta V = \frac{2,6 \text{ kJ}}{p} = \frac{2,6 \text{ kJ}}{3,0 \text{ bar}} = \frac{2600 \text{ Nm}}{3,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2} \approx 8,7 \text{ dm}^3.$$

19. Lämpöopin II pääsääntö:

1. Kaikki termodynaamiset prosessit suuntautuvat kohti tasapainoa.
2. Eristetyn termodynaamisen systeemin entropia kasvaa, kunnes systeemi saavuttaa tasapainotilan.
3. Ei ole olemassa lämpövoimakonetta, joka muuntaisi kaiken lämpönä ottamansa energian mekaaniseksi työksi.

20. a) Lämpötilat T_1 ja T_2 ovat lämpösäiliöiden lämpötilat, $T_1 > T_2$.

Q_1 ja Q_2 ovat koneen ja lämpösäiliön välillä siirtyviä energiamääriä.
 W tarkoittaa koneen tekemää työtä.

b) Kaavio 4 on lämpöopin 2. pääsäännön vastainen: kaaviossa 4 lämpö siirtyisi itsestään kylmäsäiliöstä lämpösäiliöön.

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

d) Kaavio 1 esittää kivihiilivoimalaitosta.

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

21. a) Kummassakin tapauksessa lämpöä siirretään alemmasta lämpötilasta ylempään. Tämä on lämpöopin II pääsäännön mukaan mahdotonta ilman ulkoista työtä.

b) Jääkaapin Carnot-hyötysuhteeksi saadaan

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{255,15 \text{ K}}{299,15 \text{ K}} \approx 0,15.$$

Jääkaapin hukkaenergia lämmittää huoneilmaa. Kylmillä ilmoilla se siten pienentää lämmityskustannuksia.

22. Lämpövoimakoneita ovat esimerkiksi höyrykoneet, auton polttomoottori ja suuri osa lentokoneiden suihkumoottoreista. Koneen toiminta edellyttää, että energia siirtyy itsestään koneen läpi. Tällöin osa tästä energiasta muuntuu koneessa mekaaniseksi työksi. Lämmönsiirtokone, kuten jääkaappi ja lämpöpumput, toimii päinvastaiseen suuntaan kuin lämpövoimakone. Se ottaa energiaa ulkoilmasta, maaperästä tai vedestä ja siirtää sen huoneilmaan. Lämmönsiirtokone vaatii toimiakseen työtä tekevän koneen, yleensä sähköllä toimivan pumpun, joka tarvitsee energiaa.

23. a) Nestelämpömittarin toiminta perustuu nesteen lämpölaajenemiseen.
b) Kaksoismetallilämpömittarissa on kaksi metalliliuskaa kiinnitetty päällekkäin toisiinsa. Kun metalleilla on erilainen pituuden lämpötilakerroin, kaksoismetalliliuska taipuu lämpötilan mukaan.

24. Näsinneulan pituuden muutos on

$$\Delta l = \alpha l \Delta T = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 120 \text{ m} \cdot 60 \text{ K} \approx 9,0 \text{ cm}.$$

25. Säiliön tilavuuden kasvu oli

$$\Delta V_s = \gamma_s V_s \Delta T = 3\alpha V_s \Delta T = 3 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 2100 \text{ l} \cdot 35 \text{ K} = 2,646 \text{ l}.$$

Öljyn tilavuuden kasvu oli

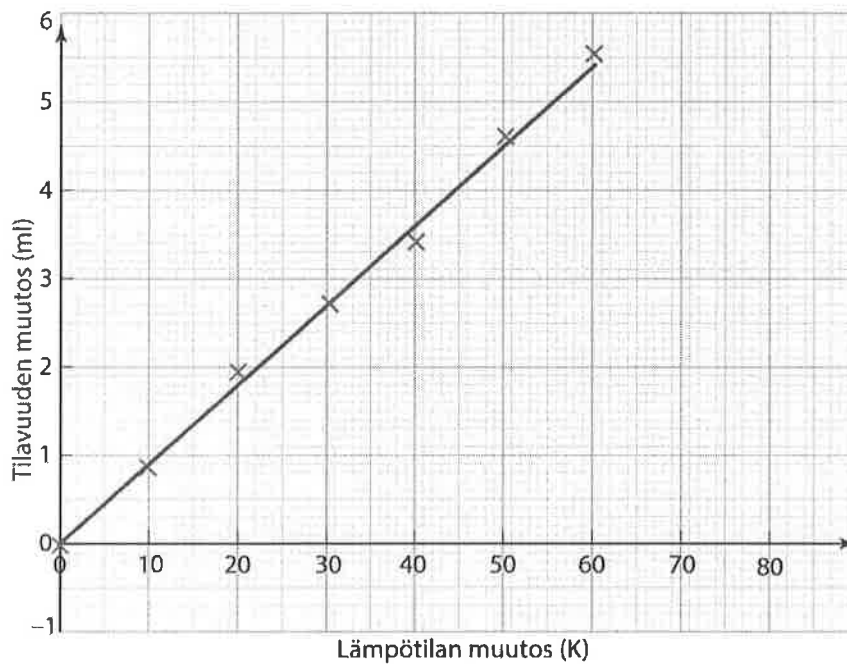
$$\Delta V_o = \gamma_o V_o \Delta T = 9,0 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{K}} \cdot 2100 \text{ l} \cdot 35 \text{ K} = 66,15 \text{ l}.$$

Öljyä valui yli $66,15 \text{ l} - 2,646 \text{ l} \approx 64 \text{ l}$.

26. Nesteen lämpölaajeneminen noudattaa yhtälöä $\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$, jossa ΔV on nesteen tilavuuden muutos. Nesteen tilavuus alussa on $V_0 = 100,0$ ml. Lasketaan taulukkoon nesteen tilavuuden ja lämpötilan muutokset:

| | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t (°C) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| Δt (°C) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| ΔT (K) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| V (ml) | 100,0 | 100,8 | 101,9 | 102,7 | 103,4 | 104,6 | 105,5 |
| ΔV (ml) | 0 | 0,8 | 1,9 | 2,7 | 3,4 | 4,6 | 5,5 |

Esitetään mittaustulokset $\Delta T, \Delta V$ -koordinaatistossa.



Suoran $\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$ fysikaalinen kulmakerroin on

$$\gamma V_0 = \frac{5,4 \text{ ml}}{59 \text{ K}} \approx 0,0915254 \frac{\text{ml}}{\text{K}},$$

joten nesteen tilavuuden lämpötilakerroin on

$$\gamma = \frac{0,0915254 \frac{\text{ml}}{\text{K}}}{100,0 \text{ ml}} \approx 0,00092 \frac{1}{\text{K}}.$$

27. Yhtälöstä $Q = cm\Delta T$ ratkaistaan ominaislämpökapasiteetti c :

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{6,5 \text{ kJ}}{10 \text{ kg} \cdot 5,0 \text{ K}} = 0,13 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

28. Kuparin ominaislämpökapasiteetti on $c_k = 0,387 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ja veden

$$c_v = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}. \text{ Kuparin lämpötilan muutos on } \Delta T_k = 95 \text{ K} \text{ ja veden } 5 \text{ K}.$$

Veden luovuttama energia on $Q_v = c_v m_v \Delta T_v$ ja kuparin vastaanottama energia $Q_k = c_k m_k \Delta T_k$. Jos energiaa ei poistu ympäristöön eikä kalorimetrin lämpökapasiteettia otetaan huomioon, luovutettu ja vastaanotettu energia ovat yhtä suuret:

$$Q_v = Q_k \text{ eli } c_v m_v \Delta T_v = c_k m_k \Delta T_k.$$

Ratkaistaan yhtälöstä veden massa:

$$m_v = \frac{c_k m_k \Delta T_k}{c_v \Delta T_v} = \frac{0,387 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,200 \text{ kg} \cdot 95 \text{ K}}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 5 \text{ K}} \approx 0,35 \text{ kg}.$$

29. Raudan jähmettyessä vapautuu energiaa $Q_{\text{rauta}} = c_{\text{rauta}} \cdot m_{\text{rauta}} \Delta T_{\text{rauta}}$, jossa c_{rauta} on raudan ominaislämpökapasiteetti $0,45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Veden vastaanottama energia on $Q_{\text{vesi}} = c_{\text{vesi}} m_{\text{vesi}} \Delta T_{\text{vesi}}$, jossa c_{vesi} on veden ominaislämpökapasiteetti $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Oletetaan, että lämpöhäviöitä ei ole, joten raudan luovuttama energia on yhtä suuri kuin veden vastaanottama energia eli

$$c_{\text{rauta}} \cdot m_{\text{rauta}} \Delta T_{\text{rauta}} = c_{\text{vesi}} m_{\text{vesi}} \Delta T_{\text{vesi}}. \text{ Yhtälöstä ratkaistaan lämpötilamuutosten suhde:}$$

$$\frac{\Delta T_{\text{vesi}}}{\Delta T_{\text{rauta}}} = \frac{c_{\text{rauta}} m_{\text{rauta}}}{c_{\text{vesi}} m_{\text{vesi}}} = \frac{0,45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 3,0 \text{ kg}}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50,0 \text{ kg}} \approx 6,44391 \cdot 10^{-3}.$$

Jos T on loppulämpötila, on

$$\Delta T_{\text{vesi}} = T - 273,15 \text{ K ja}$$

$$\Delta T_{\text{rauta}} = (1535 + 273,15) \text{ K} - T = 1808,15 \text{ K} - T,$$

jossa $1535 \text{ }^\circ\text{C}$ on taulukkokirjasta saatu raudan sulamispiste.

Yhtälöstä $\Delta T_{\text{vesi}} = 6,44391 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T_{\text{rauta}}$ saadaan

$$T - 273,15 \text{ K} = 6,44391 \cdot 10^{-3} \cdot (1808,15 \text{ K} - T) \text{ eli}$$

$$(1 + 6,44391 \cdot 10^{-3})T = 6,44391 \cdot 10^{-3} \cdot 1808,15 \text{ K} + 273,15 \text{ K} = 284,80 \text{ K}.$$

Tästä saadaan loppulämpötilaksi

$$T = \frac{284,80 \text{ K}}{1 + 6,44391 \cdot 10^{-3}} \approx 283,0 \text{ K}.$$

Veden (ja raudan) lämpötila lopussa on $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

30. Koska lämpötila ei muutu, seuraa yleisestä kaasulaista $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ yhtälö

$p_1 V_1 = p_2 V_2$. Kaasun tilavuus $1,0 \text{ bar}$:n paineessa on

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{100 \text{ bar} \cdot 40 \text{ l}}{1,0 \text{ bar}} = 4000 \text{ l}.$$

Kaasua on jäljellä $1,0 \text{ bar}$:n paineessa $4000 \text{ l} - 800 \text{ l} = 3200 \text{ l}$.

Käytön jälkeen pullossa vallitseva paine on

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = \frac{1,0 \text{ bar} \cdot 3200 \text{ l}}{40 \text{ l}} = 80 \text{ bar}.$$

31. a) Painemittarin lukemaan pitää lisätä vallitseva ilmanpaine, joka on normaalioloissa noin $1,0 \text{ bar}$. Renkaan sisällä vallitsee siis noin $3,0 \text{ bar}$:n paine.

b) Koska huoltoaseman painemittari näyttää ylipainetta, renkaan todellinen paine on

$$p_1 = 1,6 \text{ bar} + 1,0 \text{ bar} = 2,6 \text{ bar}.$$

Kaasun yleisestä tilanyhtälöstä $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ renkaassa olevaksi paineeksi saadaan

$$p_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{T_1 V_2} = \frac{2,6 \text{ bar} \cdot V_1 \cdot 308,15 \text{ K}}{281,15 \text{ K} \cdot 1,045 \cdot V_1} = 2,727 \text{ bar}.$$

Mittari näytti lukemaa $2,727 \text{ bar} - 1,0 \text{ bar} \approx 1,7 \text{ bar}$.

32. Vaihtoehto a on oikein.
33. a) Isobaari on systeemiä kuvaava T, V -koordinaatiston käyrä, joka vastaa vakioaineessa tapahtuvia muutoksia.
b) Isotermisessä muutoksessa lämpötila ei muutu.
c) Isokoorisessa muutoksessa ei muutu tilavuus.

34. Aineen tiheys saadaan jakamalla aineen massa tilavuudella eli $\rho = \frac{m}{V}$.

Kaasun määrän ei oleteta muuttuvan eli sen massa ja ainemäärä n eivät muutu. Tiheyden muutoksen selvittämiseksi pitää siis selvittää tilavuuden

muutos. Ideaalikaasun tilanyhtälöstä $\frac{pV}{T} = nR$ seuraa $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$.

Tästä saadaan tilavuuksien suhteelle

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}.$$

Paine ja lämpötila kaksinkertaistuvat, ts. $p_2 = 2p_1$ ja $T_2 = 2T_1$.

Tällöin saadaan

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = \frac{2p_1 \cdot T_1}{p_1 \cdot 2T_1} = 1.$$

Kaasun tilavuus ei siis muutu, joten kaasun tiheys säilyy entisellään eli on $1,70 \text{ kg/m}^3$.

35. Ideaalikaasun tilanyhtälö on $pV = nRT$. Koska $n = \frac{m}{M}$, yhtälö saadaan

muotoon $pV = \frac{m}{M}RT$. Tästä saadaan kaasun massaksi

$$m = \frac{pVM}{RT} = \frac{15 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,035 \text{ m}^3 \cdot 39,9 \text{ g/mol}}{8,3145 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \cdot 294,15 \text{ K}} \approx 8,6 \text{ kg}.$$

36. Alussa paine on $p_1 = 0,060 \text{ MPa}$ ja lämpötila

$$T_1 = (20,0 + 273,15) \text{ K} = 293,15 \text{ K}.$$

Normaali ilmanpaine on $p_2 = 101,325 \text{ kPa} = 0,101325 \text{ MPa}$. Koska lampun tilavuus ei merkittävästi muutu, prosessi on isokoorinen.

Yhtälöstä $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ saadaan lämpötilaksi

$$T_2 = \frac{p_2 T_1}{p_1} = \frac{0,101325 \text{ MPa} \cdot 293,15 \text{ K}}{0,060 \text{ MPa}} = 495 \text{ K} \approx 220 \text{ }^\circ\text{C}.$$

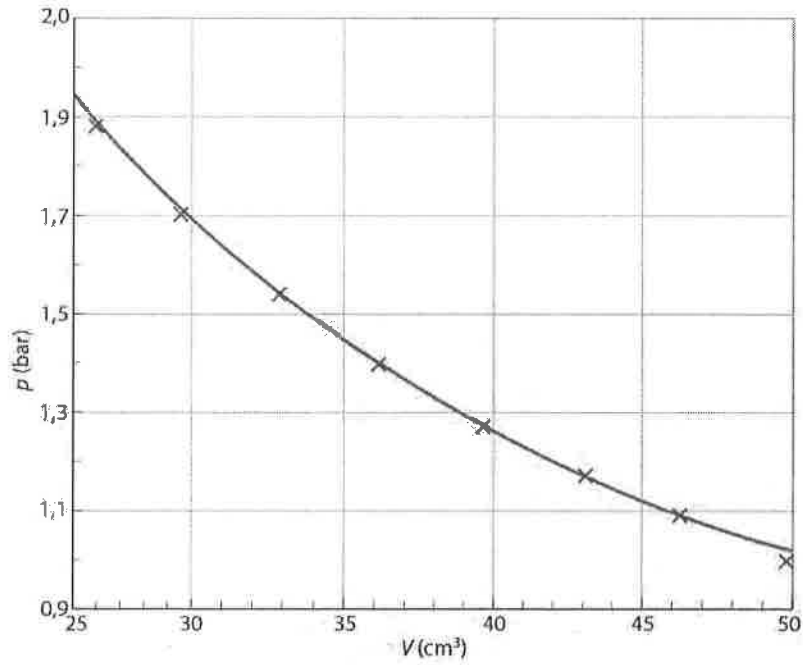
37. Kun valitaan jokin lämpötilan arvo, huomataan että kuvaaja A vastaa korkeampaa painetta kuin kuvaaja B tässä lämpötilassa. Koska lämpötila on sama, päätellään painetilavuuslaista $pV = \text{vakio}$, että käyrällä A tilavuus on pienempi kuin käyrällä B. Käyrä B siis vastaa suurempaa tilavuutta.

38. Videon mittaustulokset taulukoitiin.

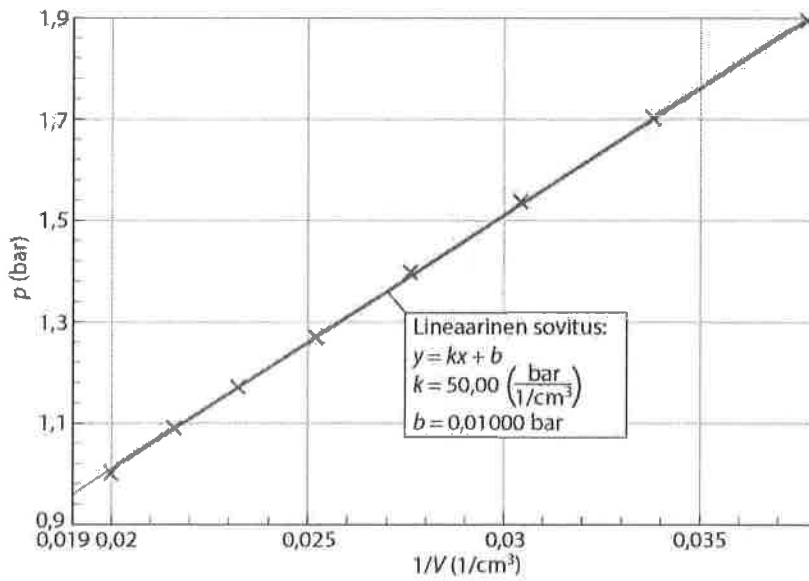
| $V(\text{cm}^3)$ | $p(\text{bar})$ | $pV(\text{bar}\cdot\text{cm}^3)$ | $1/V(1/\text{cm}^3)$ |
|------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------|
| 50 | 1,0 | 50 | 0,02 |
| 46,3 | 1,09 | 50,5 | 0,0216 |
| 43,1 | 1,17 | 50,4 | 0,0232 |
| 39,7 | 1,27 | 50,4 | 0,0252 |
| 36,2 | 1,40 | 50,7 | 0,0276 |
| 32,9 | 1,54 | 50,7 | 0,0304 |
| 29,6 | 1,70 | 50,3 | 0,0338 |
| 26,5 | 1,90 | 50,5 | 0,038 |

Mittaustarkkuuden rajoissa tulo $pV = \text{vakio}$. Näin ollen Boylen laki on voimassa.

Esitetään ensin mittaustulokset V, p -koordinaatistossa:



Mittaustulokset $\frac{1}{V}, p$ -koordinaatistossa:



Koska kuvaaja $\frac{1}{V}, p$ -koordinaatistossa on suora, $p \sim \frac{1}{V}$ eli $p = \text{vakio} \cdot \frac{1}{V}$

ja edelleen $pV = \text{vakio}$. Boylen laki toteutuu.

39. Kalorimetrin ja siinä olevan veden lämpötilan muutos celsiusasteina on $\Delta t_{\text{kal}} = \Delta t_v = 24,0 \text{ }^\circ\text{C} - 21,0 \text{ }^\circ\text{C} = 3,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kelvineinä $\Delta T_{\text{kal}} = \Delta T_v = 3,0 \text{ K}$. Kalorimetriin pantavan kappaleen lämpötilan muutos celsiusasteina on $\Delta t_k = 100,0 \text{ }^\circ\text{C} - 24,0 \text{ }^\circ\text{C} = 76,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kelvineinä $\Delta T_k = 76,0 \text{ K}$. Kalorimetri ja siinä oleva vesi ottavat vastaan energiaa, jonka kuuma kappale luovuttaa. Energiahäviöt oletetaan merkityksettömiksi, jolloin luovutettu ja vastaan otettu energia ovat yhtä suuret:

$$Q_{\text{kalorimetri}} + Q_{\text{vesi}} = Q_{\text{kappale}} \text{ eli } C\Delta T_{\text{kal}} + c_v m_v \Delta T_v = c_k m_k \Delta T_k.$$

Kappaleen ominaislämpökapasiteetti on

$$c_k = \frac{C\Delta T_{\text{kal}} + c_v m_v \Delta T_v}{m_k \Delta T_k} \\ = \frac{72 \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 3,0 \text{ K} + 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,650 \text{ kg} \cdot 3,0 \text{ K}}{0,21 \text{ kg} \cdot 76,0 \text{ K}} \approx 0,53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

40. a) Aineen sulamispiste on $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kiehumispiste $140 \text{ }^\circ\text{C}$.
b) Sulamispistettä vastaavan käyrän vaakasuoran osan pituus kuvaa sulamiseen tarvittavaa energiaa. Tämä on noin kaksinkertainen verrattuna energiaan, joka tarvitaan lämpötilan kohottamiseen sulamispisteestä kiehumispisteeseen. Aineen sulattamiseen tarvitaan enemmän energiaa kuin lämpötilan kohottamiseen sulamispisteestä kiehumispisteeseen.

41. a) Painekattilassa paine on normaalia ilmanpainetta suurempi ja veden kiehumislämpötila korkeampi kuin $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ruoka valmistuu painekattilassa nopeammin kuin tavallisessa kattilassa, koska ruoka-aineissa ja kattilassa oleva vesi ovat siellä kuumempia kuin tavallisessa kattilassa.
- b) Korkealla vuoristossa veden pintaan vaikuttava ilmanpaine on pienempi kuin meren pinnan tasolla. Kun vettä lämmitetään vuoristossa, veden sisäinen höyrynpaine saavuttaa ulkoisen paineen arvon alhaisemmassa lämpötilassa kuin meren pinnan tasolla, joten vesi kiehuu alle $100\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa.
- c) Vuoristokiipeilijät voivat käyttää ruoan kypsentämiseen painekattilaa.
42. a) Virvoitusjuomapullon kylmän lasipinnan lähellä ilman lämpötila laskee kastepisteen alapuolelle, ilmassa oleva vesihöyry muuttuu kylläiseksi ja tiivistyy vedeksi kylmän pullon pinnalle.
- b) Jos ilman kastepiste laskee alemmas kuin veden jäätymispiste, vesihöyry muuttuu suoraan kuuraksi eli kylmille pinnoille kuten ruohon pintaan syntyy jäähileitä.
43. a) Faasikaaviossa tasapainokäyrät sulamiskäyrä, höyrystymiskäyrä ja sublimoitumiskäyrä kohtaavat pisteessä, jota kutsutaan kolmoispisteeksi. Kolmoispisteen lämpötilassa ja paineessa kaikki kolme olomuotoa ovat tasapainossa ja aine voi esiintyä samanaikaisesti kaikissa kolmessa olomuodossaan.
- b) Veden kolmoispiste on tarkasti mitattavissa. Absoluuttisen lämpötilasteikon eli kelvinasteikon toiseksi peruspisteeksi on valittu veden kolmoispisteen lämpötila, jolle on sovittu arvo $273,16\text{ K}$. Toinen peruspiste on absoluuttinen nollalämpötila. Molemmat peruspisteet ovat olosuhteista riippumattomia toisin kuin esimerkiksi celsiusasteikon peruspisteet, veden sulamis- ja kiehumispisteet, jotka riippuvat paineesta.

44. Kuvaajista ylempi on veden ja alempi hiilidioksidin faasikaavio.
- a) Alhaisessa lämpötilassa hiilidioksidi on kiinteässä olomuodossa, joten lämpötilan kohotessa normaalipaineessa kiinteä hiilidioksidi muuttuu kaasuksi.
- b) Kun vettä puristetaan kokoon lämpötilassa $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, veden olomuoto muuttuu kaasusta nesteeksi.
- c) Kun paine kasvaa, veden sulamispiste laskee, mutta hiilidioksidin kasvaa.

45. Veden höyrystymiseen tarvitaan energiaa määrä $Q = rm$, joka on yhtä suuri kuin sähkölevyn luovuttama energia $Q = Pt$ eli $Pt = rm$.

Höyrystymiseen kuluva aika on

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

46. Sähkövastus ottaa sähköverkosta energian

$$E = Pt = 650 \text{ J/s} \cdot 35 \cdot 60 \text{ s} = 1\,365 \text{ kJ.}$$

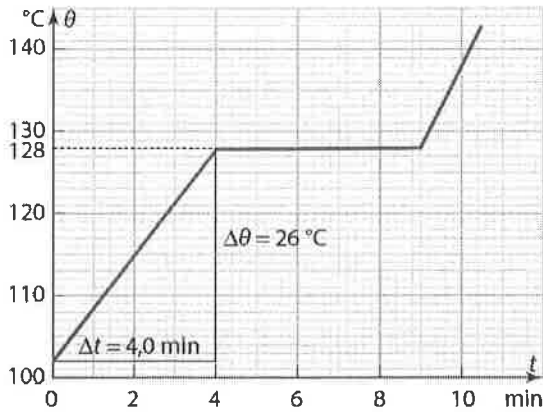
Vesi lämpenee kiehumispisteeseen ja osa vedestä höyrystyy. Veden vastaanottama energia on

$$\begin{aligned} Q &= c m_v \Delta T + m_h r \\ &= 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2,0 \text{ kg} \cdot 80 \text{ K} + 0,24 \text{ kg} \cdot 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 1212,8 \text{ kJ.} \end{aligned}$$

Sähköverkosta otetusta energiasta siirtyvä osa prosentteina on

$$\frac{1212,8 \text{ kJ}}{1365 \text{ kJ}} \cdot 100 \% \approx 89 \%$$

47.



a) Aineen lämpötila kohoaa, kunnes aine alkaa sulaa, jolloin kaikki energia menee olomuodon muutokseen eikä lämpötila kohoaa. Kuvion perusteella aineen sulamispiste on $128\text{ }^{\circ}\text{C}$.

b) Aikavälillä $0 \dots 4,0\text{ min}$ aine lämpenee. Vakioteholla lämmitettäessä aineeseen sitoutuva energia on $Q = P\Delta t$. Tämä energia aiheuttaa aineen lämpenemisen, joten toisaalta $Q = cm\Delta T$. Kuvion mukaan lämpötilan nousu on $\Delta\theta = 128\text{ }^{\circ}\text{C} - 102\text{ }^{\circ}\text{C} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten $\Delta T = 26\text{ K}$.

Yhtälöstä $P\Delta t = cm\Delta T$ lämmitysteho on

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{cm\Delta T}{\Delta t} = \frac{6,0 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,080 \text{ kg} \cdot 26 \text{ K}}{4,0 \cdot 60 \text{ s}} = 52 \text{ W}.$$

c) Kuvaajan vaakasuora osa kuvaa sulamisaikaa, jonka pituus on $t = 5,0\text{ min}$. Vakioteholla lämmitettäessä aineeseen sitoutuva energia on $Q = Pt$. Tämä energia aiheuttaa aineen sulamisen, joten toisaalta $Q = sm$. Yhtälöstä $sm = Pt$ ratkaistaan aineen ominaissulamislämpö:

$$s = \frac{Pt}{m} = \frac{52 \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 5,0 \cdot 60 \text{ s}}{0,080 \text{ kg}} = 195 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

48. Kuuma vesi luovuttaa jäähtyessään energiaa. Lämpötila voi alentua korkeintaan 100 K, jolloin vesi voi luovuttaa energiaa enintään määrän

$$Q_1 = cm\Delta T = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1,0 \text{ kg} \cdot 100 \text{ K} = 419 \text{ kJ}.$$

Jää ottaa sulassaansa vastaan energiaa määrän

$$Q_2 = sm = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 5,0 \text{ kg} = 1665 \text{ kJ}.$$

Vapautuva energia ei riitä koko jäämassan sulattamiseen, joten jäätä jää sulamatta.

Loppulämpötila on 0,0 °C.

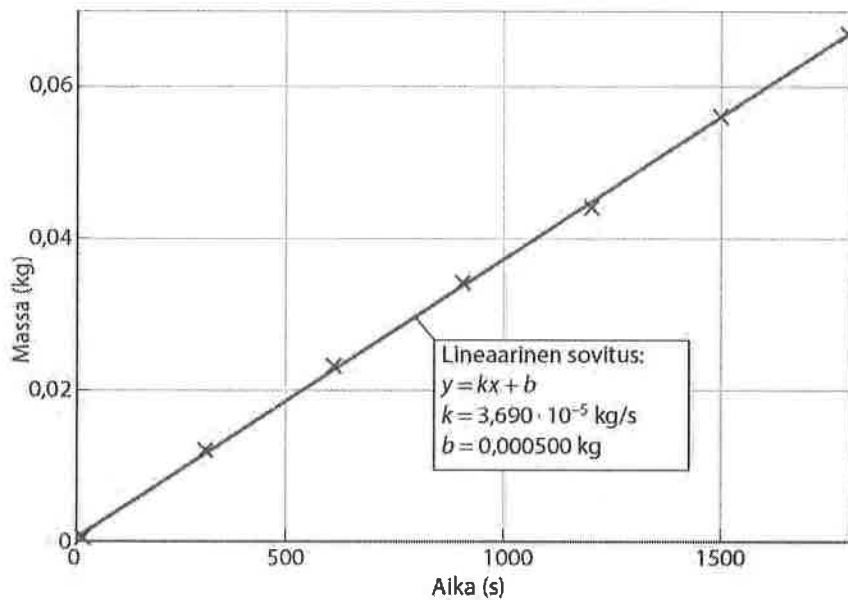
49. Lasketaan veden tilavuuden avulla vastaavat veden massojen arvot yhtälöstä

$$m = \rho \cdot V = 1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot V.$$

Lasketaan taulukkoon myös höyrystyneen veden massa kilogrammoina ja aika sekunteina.

| | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>t</i> (min) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| <i>t</i> (s) | 0 | 300 | 600 | 900 | 1200 | 1500 | 1800 |
| <i>V</i> (cm³) | 100,0 | 88 | 77 | 66 | 56 | 44 | 33 |
| Veden massa <i>m</i> (g) | 100,0 | 88 | 77 | 66 | 56 | 44 | 33 |
| Höyrystyneen veden massa <i>m</i> (g) | 0 | 12 | 23 | 34 | 44 | 56 | 67 |
| Höyrystyneen veden massa <i>m</i> (kg) | 0 | 0,012 | 0,023 | 0,034 | 0,044 | 0,056 | 0,067 |

Asetetaan mitatut arvot t, m -koordinaatistoon ja sovitetaan pistejoukkoon suora.



Suoran kulmakerroin on $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 3,690 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$.

Vesi oli aluksi kiehuva, joten veden vastaanottama energia kului veden höyrystymiseen. Mikroaaltouuni luovuttaa veden höyrystämiseen energian $Q = Pt$. Toisaalta höyrystämiseen tarvittava energia saadaan yhtälöstä $Q = rm$, joten $Pt = rm$ eli $P\Delta t = r\Delta m$. Mikroaaltouuni höyrystää vettä teholla

$$P = \frac{r\Delta m}{\Delta t} = r \frac{\Delta m}{\Delta t} = 2260 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 3,690 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 83 \text{ W}.$$

Mitattu teho oli pienempi kuin mikroaaltouunin valinta-asteikon ilmoittama teho, koska osa tehosta kului mm. uunin seinämien lämpenemiseen. (Uunin sisälämpötila mitattiin alussa ja lopussa ja sen todettiin kohonneen noin 20 °C.)

50. a) Yhtälöstä $P = \eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$ nähdään, että tuulivoimalaitoksen teho on verrannollinen siiven pituuden toiseen potenssiin. Kun siiven pituus kasvaa kaksinkertaiseksi, teho kasvaa 2^2 -kertaiseksi eli 4-kertaiseksi.
- b) Kun siiven pituus kasvaa 25 metristä 35 metriin, siiven pituus kasvaa $\frac{35}{25}$ -kertaiseksi. Kohdan a perusteella teho kasvaa $\left(\frac{35}{25}\right)^2$ -kertaiseksi eli noin 2,0-kertaiseksi.
- c) Yhtälöstä $P = \eta \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$ nähdään, että tuulivoimalaitoksen teho on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin. Kun tuulen nopeus kasvaa arvosta 3,5 m/s arvoon 7,0 m/s, nopeus kasvaa 2,0-kertaiseksi. Näin ollen tuulivoimalaitoksen teho kasvaa $2,0^3$ -kertaiseksi eli 8,0-kertaiseksi.

51. a) Ydinvoimalaitoksen vuodessa tuottama energia on
 $Q = Pt = 1200 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 37,8432 \cdot 10^{15} \text{ J} \approx 38 \text{ PJ}$.

b) Fissiossa vapautuu energiaa yhtälön $E = \Delta mc^2$ mukaisesti, jossa c on valonnopeus ja Δm halkeavan ytimen ja halkeamistuotteiden massojen erotus.

Massa pienenee:

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{37,8432 \cdot 10^{15} \text{ J}}{\left(2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} \approx 0,42 \text{ kg}.$$

c) Kivihiilen lämpöarvo on $H = 29 \text{ MJ/kg}$ (vaihtelee välillä 26 MJ/kg–32 MJ/kg).

Kivihiilen tuottama energia on $Q = Hm$.

Kivihiltä tarvitaan:

$$m = \frac{Q}{H} = \frac{37,8432 \cdot 10^{15} \text{ J}}{29 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \approx 1,3 \cdot 10^9 \text{ kg} = 1,3 \text{ Mt.}$$

52. Simulaatiossa on kuvattu vastapainevoimalaitoksen toiminta. Vastapainevoimalaitokset on suunniteltu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Höyrykattilassa poltetaan esimerkiksi kivihiltä, josta vapautunut energia kuumentaa ja höyrystää vettä. Korkeapaineinen höyry ohjataan höyryturbiiniin, joka pyörittää sähkögeneraattoria. Generaattorin tuottama sähkö johdetaan sähköverkkoon.

Turbiinin läpi mennyt höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa on kaukolämpöverkkoon liitetty vesiputki. Putkessa kiertävä vesi ottaa vastaan osan voimalaitoksen tuottamasta energiasta. Kuumenneen veden mukana energiaa siirretään paikalliseen kaukolämpöverkkoon tai lähiympäristön teollisuuslaitosten käyttöön.

53. a) Epäsuoraa aurinkoenergiaa ovat esimerkiksi liikkuvan veden ja tuulen energia, fossiilisten polttoaineiden energia, maalämpö, energiakasvien kuten esimerkiksi rapsin, pajun, palmun ja sokeriruohon energia, aaltoenergia, lämpöpumppujen ilmasta tai vedestä ottama energia ja aurinkotornien käyttämä energia.
- b) Ydinenergia ja geoterminen energia eivät ole peräisin Auringosta.
- c) Maapallon kaikki energiavarat ovat peräisin ydinenergiasta, sillä ydinvoimaloiden energia on peräisin raskaiden atomiytimien halkeamisista (fissioista), Auringon energia on kevyiden ytimien

yhdistymisistä (fuusioista) peräisin ja geoterminen energia on peräisin radioaktiivisuuden liittyvistä ydinreaktioista.

54. 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 ilmastonmuutokseksi. 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.