

12. Faasidiagrammi

Harjoittele

Tehtävä 12.1.

Väittämistä ovat oikein b), d) ja e).

Korjaukset vääriin väittämiin:

- a) Faasidiagrammista voi päätellä aineen mahdolliset olomuodot tietyssä paineessa ja lämpötilassa.
- c) Kolmoispisteessä kaikki kolme eri olomuotoa ovat tasapainossa. Kriittisessä pisteessä kaasu- ja nestefaasin ero häviää.
- f) Veden kiehumispiste riippuu paineesta. Normaalissa ilmanpaineessa veden kiehumispiste on 100 celsiusastetta.
- g) Ilman suhteellinen kosteus nousee, kun lämpötila laskee.

Tehtävä 12.2.

a) Pisteessä A aineen olomuoto on neste.

b) Olomuodonmuutokset ovat

a = sulaminen

b = sublimoituminen

c = tiivistyminen

c) Kun faasidiagrammissa liikutaan vaakasuunnassa, kuten prosesseissa a ja b, paine pysyy samana. Molemmissa prosesseissa liikutaan kohti korkeampaa lämpötilaa, eli a:ssa ja b:ssä lämpötila nousee vakioaineessa.

Kun faasidiagrammissa liikutaan pystysuunnassa, kuten prosessissa c, lämpötila pysyy samana. Prosessissa c siirrytään vakioaineessa korkeampaan paineeseen.

d) Piste C on kolmoispiste, jossa kolme eri olomuotoa ovat tasapainossa. Pisteen läheisyydessä olomuoto muuttuu helposti pienellä paineen tai lämpötilan muutoksella.”

Tehtävä 12.3.

- a) Etsitään veden faasidiagrammilta piste, jossa lämpötila on 110 °C ja paine $101\,325\text{ Pa}$. Veden olomuoto on tuolloin kaasu.
- b) Etsitään kuvaajalta piste, jossa lämpötila on 50 °C ja paine 1 MPa . Veden olomuoto on tuolloin neste.
- c) Lämpötilassa 100 °C ja paineessa 100 Pa veden olomuoto on kaasu. Kun lämpötila laskee ja paine pysyy samana, liikutaan faasidiagrammissa vaakasuunnassa vasemmalle. Silloin kaasumaisen veden olomuoto muuttuu kiinteäksi, eli vesi härmistyy.
- d) Lämpötilassa 150 °C ja paineessa $0,1\text{ bar}$ eli 100 mbar veden olomuoto on kaasu. Kun lämpötila pysyy samana ja paine kasvaa, liikutaan faasidiagrammissa suoraan ylöspäin. Silloin kaasumaisen veden olomuoto muuttuu nesteeksi, eli vesi tiivistyy.

Tehtävä 12.4.

a) Ilmanpaine $p = 70$

kPa = 70 000 Pa = 0,70 bar = 700 mbar.

Kiehuminen tapahtuu kylläisen vesihöyryn paineessa.

Kylläisen vesihöyryn paine ja tiheys -taulukon perusteella kylläisen vesihöyryn paine on noin

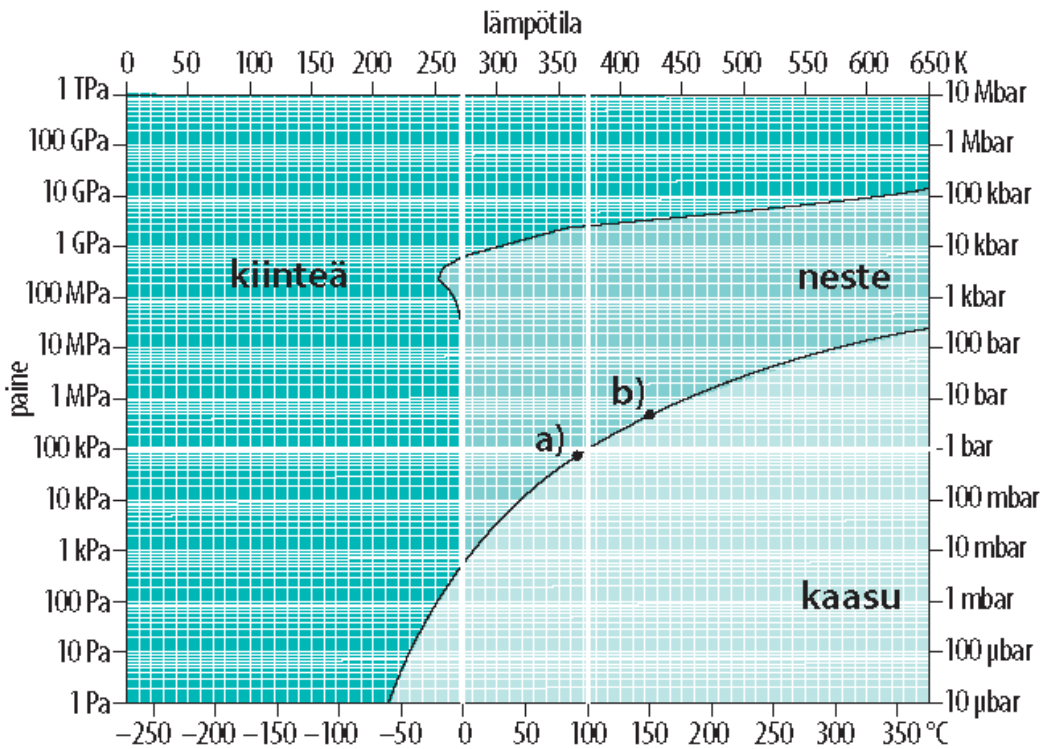
700 mbar, kun lämpötila on 90 °C.

Sama asia voidaan todeta veden faasidiagrammin höyrystymiskäyrältä, kun paine on 700 mbar.

Vesi kiehuu 70 kPa:n paineessa lämpötilassa 90 °C.

b) Taulukkokirjan mukaan lämpötilassa 140 °C kylläisen vesihöyryn paine on 3 614 mbar eli 361 400 Pa. Veden faasidiagrammin höyrystymiskäyrällä on vastaavat arvot.

Vesi kiehuu 140 °C:n lämpötilassa paineessa 361 400 Pa.



Tehtävä 12.5.

Kiehuvaassa vedessä olevat kuplat ovat vesihöyryä.

Kiehuvaassa vedessä höyrystymistä tapahtuu kaikkialla nesteessä, jolloin nesteeseen syntyy vesihöyrykuplia.

Tehtävä 12.6.

a) Kylläisen vesihöyryn paine ja tiheys -taulukosta voidaan lukea, että lämpötilassa $T = 21 \text{ °C}$ kylläisen vesihöyryn tiheys eli maksimimäärä vesihöyryä ko. lämpötilassa on

$$\rho_{\max} = 18,33 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}.$$

b) Koska $\rho_{\max} = 18,33 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ja ilmassa olevan vesihöyryn määrä on

$\rho_{\text{ilma}} = 12,3 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, suhteelliseksi kosteudeksi saadaan

$$RH = \frac{\rho_{\text{ilma}}}{\rho_{\max}} \cdot 100 \% = \frac{12,3 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{18,33 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}} \cdot 100 \% = 67,103 \% \approx 67 \%.$$

Tehtävä 12.7.

- a) Ilmanpaine 1 500 m korkeudella on noin 84 kPa.
- b) Vuoristossa 3 000 metrin korkeudessa ilmanpaine on alle 70 kPa. Tässä paineessa vesi kiehuu noin 90 °C:ssa. Koska pienessä paineessa nesteillä on matalampi kiehumispiste, ruokaa voi joutua kypsentämään kauemmin.

Sovella

Tehtävä 12.8.

a) Kylläisen vesihöyryn paine ja tiheys -taulukosta voidaan lukea, että lämpötilassa $T = 22 \text{ °C}$ kylläisen vesihöyryn tiheys eli maksimimäärä vesihöyryä kyseisessä

lämpötilassa on $\rho_{\max} = 19,42 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$.

Ilman suhteellinen kosteus $RH = 64 \%$.

Ratkaistaan ilmassa olevan vesihöyryn tiheys suhteellisen kosteuden yhtälöstä.

$$\begin{aligned} RH &= \frac{\rho_{\text{ilma}}}{\rho_{\max}} \cdot 100 \% \\ \frac{RH}{100 \%} &= \frac{\rho_{\text{ilma}}}{\rho_{\max}} \\ \rho_{\text{ilma}} &= \frac{RH}{100 \%} \cdot \rho_{\max} = \frac{64 \%}{100 \%} \cdot 19,42 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ &= 0,64 \cdot 19,42 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 12,4288 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \approx 12,4 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Vettä on kuutiometrissä ilmaa 12,4 grammaa.

b) Kastepiste on lämpötila, jossa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Kylläisen vesihöyryn paine ja tiheys - taulukosta voidaan lukea, että kylläisen vesihöyryn tiheys on $\rho_{\max} = 12,07 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, kun lämpötila on $T = 14 \text{ }^\circ\text{C}$. Tämä on lähimpänä a-kohdassa laskettua ilmassa olevan veden tiheyttä.

Huoneilman kastepiste on $14 \text{ }^\circ\text{C}$.

c) Jos huoneilman lämpötila laskisi alle $14 \text{ }^\circ\text{C}$:n eli kastepisteen alapuolelle, huoneilmassa olevan vesihöyryn määrä ylittäisi kylläisen vesihöyryn tiheyden. Silloin ilmassa oleva vesihöyry alkaisi tiivistyä sumuksi tai nestepisaroiiksi eli kasteeksi pinnoille.

Tehtävä 12.9.

- a) Silmälasien lämpötila on matalampi kuin kastepiste eli huoneilmassa on enemmän kosteutta kuin silmälasien lämpötilassa voisi ilmassa olla. Silloin ilmasta lasien läheisyydestä tiivistyy vettä kasteeksi lasien pintaan.
- b) Parkkihallin lämpötila $T = 15\text{ °C}$.

Taulukkokirjan mukaan tässä lämpötilassa kylläisen vesihöyryn tiheys on $\rho_{\max} = 12,83\text{ g/m}^3$.

suhteellinen kosteus $RH = 78\%$

Suhteellinen kosteus on $RH = \frac{\rho_{\text{ilma}}}{\rho_{\max}} \cdot 100\%$, joten ilmassa olevan veden tiheys

$$\begin{aligned}\rho_{\text{ilma}} &= \frac{RH}{100\%} \cdot \rho_{\max} \\ &= \frac{78\%}{100\%} \cdot 12,83 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 0,78 \cdot 12,83 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 10,0074 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \approx 10,01 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

Ilmassa on siten vesihöyryä $10,01\text{ g/m}^3$. Tämä vastaa maksimaalista ilmankosteutta eli kylläisen vesihöyryn tiheyttä lämpötilassa 11 °C . Jos tuulilasi on tätä kylmempi, alkaa sen pintaan tiivistyä ilmasta vettä pisaroiksi.

Tuulilasin lämpötila on alle 11 °C .

Tehtävä 12.10.

- a) Suihkun jälkeen kylpyhuoneen ilman suhteellinen kosteus on usein hyvin korkea. Jos suhteellinen kosteus on 100 %, ilmassa on jo suurin mahdollinen määrä vesihöyryä. Niinpä pyykeistä ei voi haihtua yhtään lisää vettä.
- b) Märistä pyykeistä haihtuva vesi sitoo energiaa. Haihtuminen on höyrystymistä, ja olomuodon muutokseen nesteestä kaasuksi tarvitaan energiaa. Jos pyykit kuivataan lämmitetyissä sisätiloissa, energiaa kuluu silloin myös veden haihduttamiseen.
- c) Höyrystyneen veden massa $m = 32 \text{ g} = 0,032 \text{ kg}$.

Veden ominaishöyrystymislämpö

$$r = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2260000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}.$$

Veden haihtumisessa sitoma energia

$$Q = rm = 2260000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 0,032 \text{ kg} = 72320 \text{ J} \approx 72 \text{ kJ}.$$

Keho luovuttaa veden höyrystymiseen tarvittavan energian eli 72 kJ.

Tehtävä 12.11.

- a) Uloshengitetyn ilman suhteellinen kosteus on korkea. Kun ilma jäähtyy sen suhteellinen kosteus kasvaa, kunnes se on 100 %. Tällöin uloshengityksessä olevaa vettä alkaa tiivistyä pieniksi pisaroiksi. Ilmassa oleva vesi voidaan nähdä, kun vesi on tiivistynyt pieniksi pisaroiksi ilmaan eli sumuksi. Todellisuudessa näkyvä "höyry" on siis pieniksi pisaroiksi tiivistynyttä vettä.
- b) Kyseessä on kylmän veden putki. Suihkussa käynnin aikana ilmassa olevan vesihöyryn määrä kasvaa. Mitä kylmempää ilma on, sitä pienempi on kylläisen vesihöyryn tiheys eli ilmaan "mahtuvan" vesihöyryn maksimipitoisuus. Kylmän putken pinnalla ilman on huoneilmaa kylmempää, jolloin putken läheisyydessä kylläisen vesihöyryn tiheys on pienempi. Silloin huoneilmassa oleva vesihöyry tiivistyy sen pinnalle nesteeksi. Tämä näkyy kylmän putken pintaan tiivistyneinä pisaroina.

Tehtävä 12.12.

a) Luetaan kuvaajalta: Aamulla klo 04 lämpötila oli noin $7,5\text{ °C}$ ja suhteellinen ilmankosteus oli 100% . Iltapäivällä klo 15 lämpötila oli noin 23 °C ja suhteellinen ilmankosteus oli 47% .

b) Klo 21 suhteellinen ilmankosteus on kuvaajan mukaan $RH = 70\%$, ja lämpötila on $T = 19\text{ °C}$.

Taulukkokirjan mukaan lämpötilassa 19 °C kylläisen vesihöyryn tiheys on $\rho_{\max} = 16,30\text{ g/m}^3$.

Klo 21 ilmassa olevan veden tiheys on

$$RH = \frac{\rho_{\text{ilma}}}{\rho_{\max}} \cdot 100\%$$

$$\rho_{\text{ilma}} = \frac{RH}{100\%} \cdot \rho_{\max} = \frac{70\%}{100\%} \cdot 16,30 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 0,70 \cdot 16,30 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 11,41 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Taulukkokirjan mukaan kylläisen vesihöyryn tiheys on 14 °C :n lämpötilassa $\rho_{\max} = 12,07\text{ g/m}^3$ ja 13 °C :n lämpötilassa $\rho_{\max} = 11,34\text{ g/m}^3$. Ilmassa klo 21 oleva vesimäärä vastaa siis 100% :n suhteellista ilmankosteutta, kun lämpötila laskee lähelle 13 °C :a. Kastepiste on siten 13 °C .

c) Kuvaajassa esitetty suhteellinen ilmankosteus ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyryn määrän prosentteina suhteessa maksimimäärään eli

$$RH = \frac{\rho_{\text{ilma}}}{\rho_{\text{max}}} \cdot 100 \%$$

Vesihöyryn maksimitiheys ilmassa riippuu lämpötilasta: korkeammassa lämpötilassa ilma voi sisältää enemmän vesihöyryä.

Vaikka ilmassa oleva vesihöyryn absoluuttinen määrä (jonka yksikkö on g/m^3) pysyisi samana, voi suhteellinen ilmankosteus pienentyä. Tämä johtuu siitä, että vesihöyryn maksimimäärä sitä suurempi, mitä korkeampi lämpötila on. Vastaavasti kun lämpötila laskee, ilmaan "mahtuu" vähemmän vesihöyryä. Tällöin vesihöyryn maksimimäärä (eli arvo, johon prosenttilaskussa verrataan) pienenee ja lopputuloksena on suurempi suhteellinen ilmankosteus.

Tehtävä 12.13.

a) Veden lämpötila oli kokeen alussa $43,6\text{ °C}$. Kun tyhjiöpumppu laitettiin päälle, hetken kuluttua vesi alkoi kiehua ja veden lämpötila laski.

Mittauksen lopussa veden lämpötila oli $34,4\text{ °C}$.

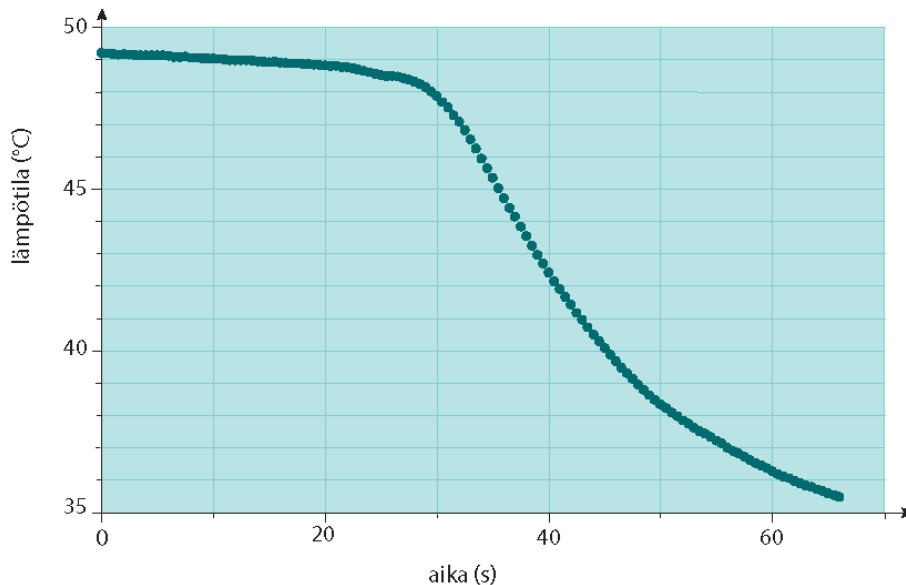
b) Vesi alkaa jäähtyä heti mittauksen alussa, sillä se on ympäristöään lämpimämpää. Kun veden kiehuminen alkaa, veden lämpötilan alkaa laskea nopeammin. Veden höyrystyminen vaatii energiaa. Höyrystynyt vesi vastaanottaa energiaa nestemäisen veden sisäenergiasta. Nestemäisen veden sisäenergia pienenee, mikä ilmenee nestemäisen veden lämpötilan laskuna.

Tehtävä 12.14.

- a) Havaitaan, että huoneenlämpötila on hieman korkeampi kuin vesilasissa olevan veden lämpötila.
- b) Vesilasissa olevasta vedestä haihtuu vettä koko ajan. Vesi ottaa haihtumiseen tarvittavan energian veden sisäenergiasta, mikä alentaa veden lämpötilaa. Tällöin veden lämpötila ei ole sama kuin huoneilman lämpötila, vaan alempi.

Tehtävä 12.15.

a)



b) Vesi alkaa jäähtyä heti mittauksen alussa, sillä se on ympäristöön lämpimämpää. Kun veden kiehuminen alkaa, veden lämpötilan alkaa laskea nopeammin. Olomuodonmuutosprosessi nesteestä kaasuksi sitoo energiaa, joka otetaan lämpimästä vedestä. Veden sisäenergia pienenee nopeasti. Tämä havaitaan lämpötilan laskuna.

c) Vesi alkaa kiehua, kun sen lämpötila on noin 48 °C. Kiehumisessa höyrystymistä tapahtuu kaikkialla nesteessä, ja tämä on mahdollista, kun kylläisen vesihöyryn paine on ulkoisen ilmanpaineen suuruinen.

Taulukkokirjan mukaan kylläisen vesihöyryn paine on 45 °C:ssa on 95,81 mbar ja 50 °C:ssa on 123,3 mbar.

Paine on näiden arvojen välistä. Kun lämpötila on 48 °C, on paine noin 110 mbar = 0,110 bar = 11 kPa.

Tehtävä 12.16.

Kylmäkuivauksessa vesi poistetaan ruoasta. Ensin ruoan lämpötilaa lasketaan, kunnes se jähmettyy kiinteäksi. Sitten painetta pienennetään ja säädetään lämpötila sellaiseksi, että kiinteä vesi sublimoituu kaasuksi.

Tehtävä 12.17.

- a) Polttoaineen nestemäisyyden voi huomata, jos pulloa heiluttaa. Tällöin nesteen hölskyminen kuuluu ja tuntuu kädessä.
- b) Pullossa kaksi faasia on tasapainossa. Pohjan lähellä polttoaine on nesteenä ja ylempänä kaasumaisena. Pullossa olevan kaasun paine on suurempi kuin ulkoinen paine, joten kaasu virtaa paine-eron vuoksi ulos pullosta. Kun pullosta päästetään kaasua, pullossa oleva neste kiehuu ja ainetta siirtyy nestefaasista kaasufaasiin.
- c) Painemittari ei voi käyttää kaasun määrän mittaamiseen, sillä pullossa on aina nestepinnan yläpuolella kaasua likipitäen samassa paineessa. Nesteen vähentyessä, säiliössä olevan kaasun osuus kasvaa. Kaasun tilavuus kasvaa, mutta paine on sama, sillä nesteestä höyrystyy lisää ainetta kaasufaasiin.
- d) Jos säiliöön tulee vuoto, kaasua alkaa virrata ulos säiliöstä ja paine säiliön sisällä alkaa pienentyä. Tämän vuoksi nestekaasu alkaa kiehua pullossa. Kiehumiseen tarvittava energia siirtyy nestemäisen polttoaineen sisäenergiasta, ja nestemäisen polttoaineen lämpötila alkaa laskea. Tämä olomuodonmuutos jäähdyttää kaasusäiliön hyvin kylmäksi.

Syvennä

Tehtävä 12.18.

Kuivausrumpu lämmittää ilmaa, jolloin ilman suhteellinen kosteus vähenee. Kun ilmassa on vähemmän kosteutta, veden haihtuminen märistä pyykeistä nopeutuu. Kuuma ilma ohjataan rummussa pyörivien pyykkien läpi, jolloin pyykeistä haihtuu vettä kuumaan ja kuivaan ilmaan. Samalla kuumen ilman suhteellinen kosteus nousee. Kuuma ja kostea ilma ohjataan lauhduttimeen, jossa ilma jäähtyy ja ilman sitomasta vesihöyrystä suuri osa tiivistyy vedeksi.

Tehtävä 12.19.

a) 1 kiinteä, 2 neste, 3 kaasu

Kiinteän aineen ja nesteen erottaa sulamiskäyrä, kiinteän ja kaasun sublimoitumiskäyrä sekä nesteen ja kaasun höyrystymiskäyrä.

b) Kolmoispiste ja kriittinen piste tarkoittavat tiettyjä lämpötilan ja paineen arvoja. Kolmoispisteessä kaikki aineen kolme olomuotoa (kiinteä, neste ja höyry) ovat tasapainossa keskenään. Kun lämpötila on korkeampi kuin kriittisen pisteen lämpötila, ainetta ei voida puristaa nesteeksi. Ainetta sanotaan silloin kaasuksi. (Jos kaasu voidaan puristaa nesteeksi, se on höyryä.)

c) Jään (vesi) käyttäytyminen on poikkeuksellista muihin aineisiin verrattuna. Veden sulamispiste alenee kun paine kasvaa eli veden faasidiagrammissa sulamiskäyrää kaartuu vasemmalle. A on veden ja B on hiilidioksidin faasidiagrammi.

Tehtävä 12.20.

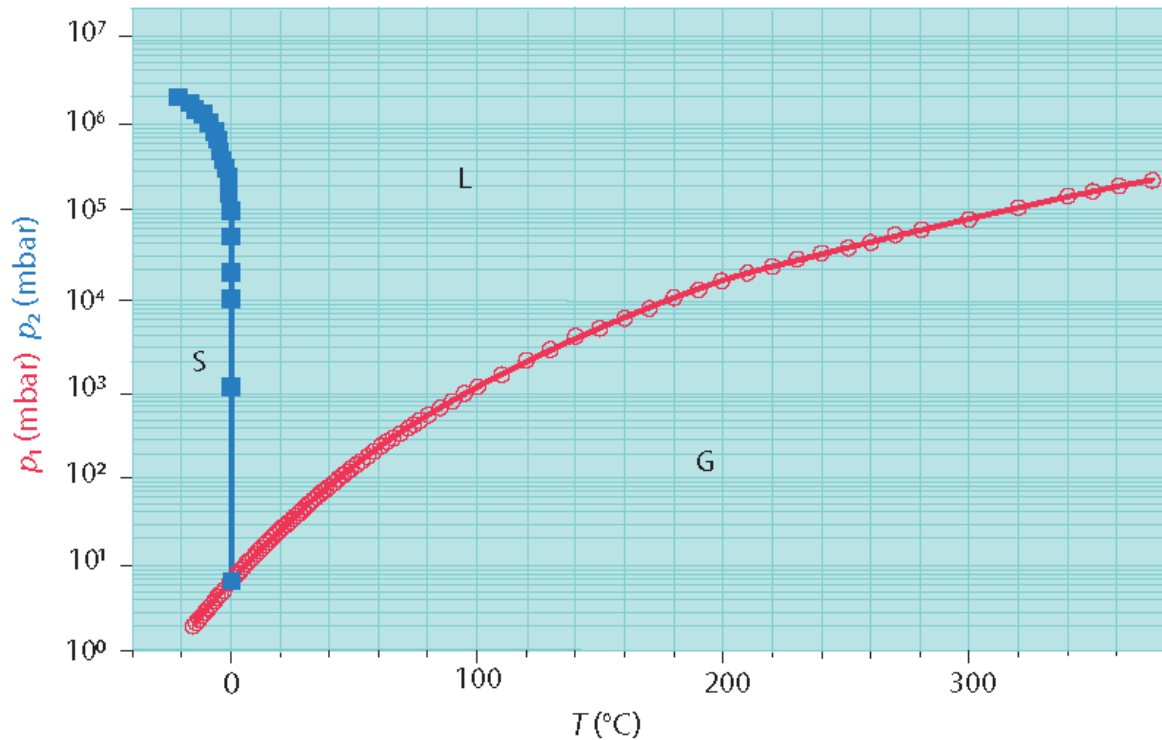
- a) Maapallolla esiintyy lämpötiloja, jotka mahdollistavat veden kaikki kolme olomuotoa. Vesi voi esiintyä Maassa kiinteänä, nesteenä ja kaasuna.
- b) Vesi voi olla Venuksella vain kaasuna. Koska lämpötila on korkeampi kuin kriittisen pisteen lämpötila, vettä ei saada nesteeksi edes puristamalla.
- c) Faasidiagrammin mukaan vesi voi esiintyä Marsissa kiinteässä olomuodossa ja kaasumaisena. Matalissa lämpötiloissa vesi esiintyy kiinteänä ja lämpötilan noustessa se sublimoituu suoraan kaasumaiseen olomuotoon.
- d) Veden kolmoispiste on (0,01 °C; 611,7 Pa). Marsin pinnalla kaasukehän paine 610 Pa on juuri alle kolmoispisteen paineen. Pieni lisäys paineessa mahdollistaa veden esiintymisen myös neste-olomuodossa. Kraatterissa voisi siis esiintyä myös nestemäistä vettä.

Tehtävä 12.21.

- a) Jotta indiumin höyrynpaine on vähintään ympäristön eli tyhjiökammion paine ($1 \cdot 10^{-9}$ mbar), sen lämpötilan on oltava vähintään 450 °C.
- b) Kun metallien lämpötila on 450 °C, sinkin höyrynpaine on noin 1 mbar ja indiumin höyrynpaine on noin $1 \cdot 10^{-9}$ mbar. Sinkin höyrynpaine on 450 °C:n lämpötilassa suurempi.
- c) Sinkin höyrynpaine 250 °C lämpötilassa on kuvaajan perusteella $1 \cdot 10^{-4}$ mbar. Tämä on selvästi suurempi kuin kammion sisällä oleva paine $1 \cdot 10^{-9}$ mbar. Sinkin höyrynpaine on siten riittävän suuri Zn-kalvon valmistukseen.
- d) Kuvaajan perusteella sinkin sulamispiste on noin 420 °C, joten 250 °C:n lämpötilassa sinkki on kiinteässä olomuodossa. Zn-kalvoa valmistettaessa sinkki sublimoituu kiinteästä höyryksi.

Tehtävä 12.22.

a) ja b)



a)-kohdan pisteet:

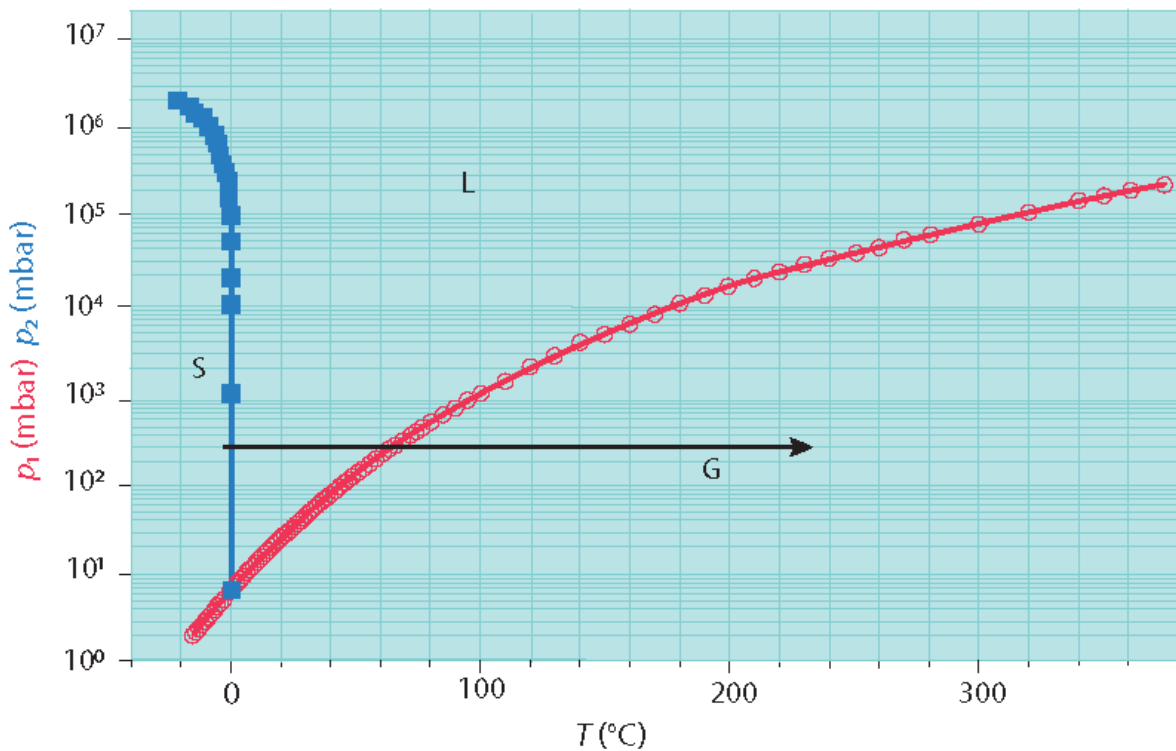
Kaikki mittauspisteet näkyvät kuvaajassa (1 p).

Akselit on merkitty oikein ja akselien yksiköt ovat näkyvissä (1 p).

Kuvaaja on riittävän suuri ja selkeä (1 p).

b)-kohdan pisteet: oikeat kirjaimet oikeissa kohdissa 1 p/ oikea kirjain

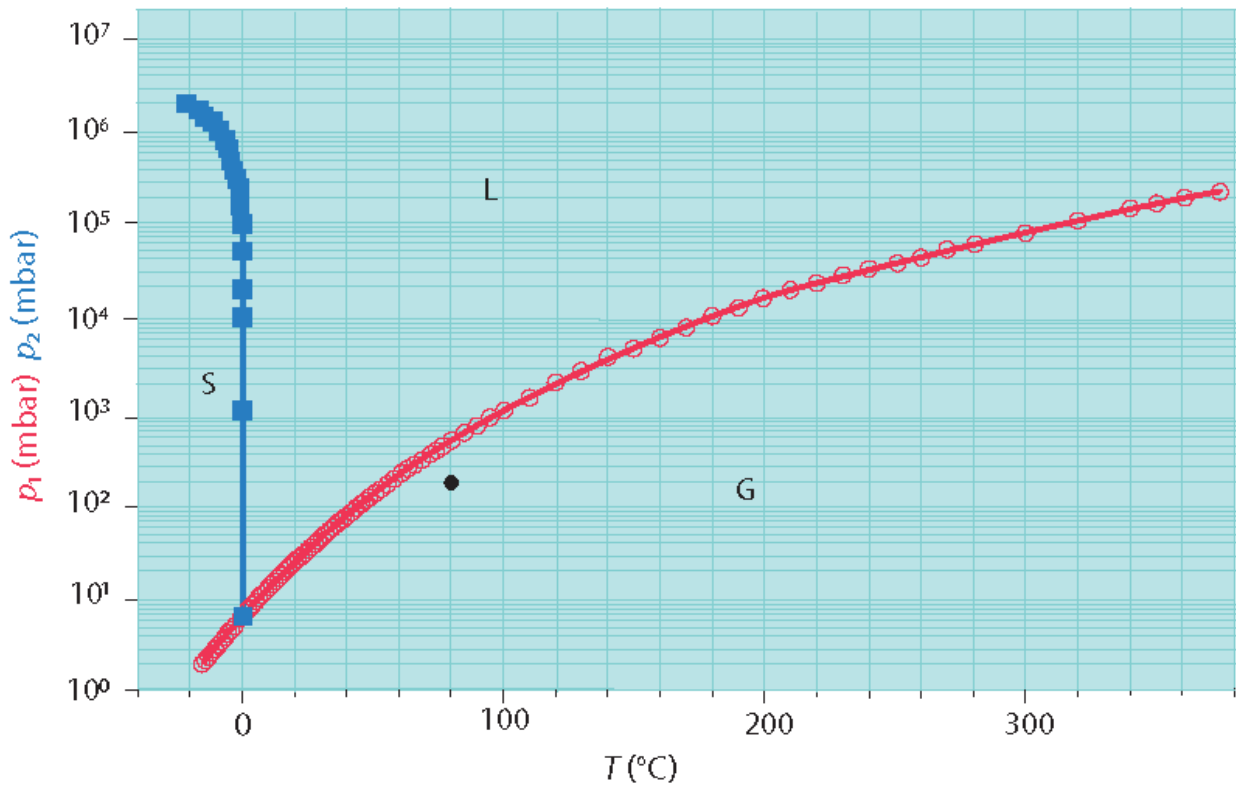
c) Kun vettä ryhdytään lämmittämään $-3,4\text{ °C}$ lämpötilasta isobaarisesti 300 kPa paineessa, vesi on alussa kiinteää. Lämpötilassa 0 °C veden olomuoto muuttuu kiinteästä nesteeksi, eli vesi sulaa. Seuraavaksi lämpötilassa 69 °C vesi höyrystyy eli muuttuu nestemäisestä kaasumaiseksi (höyryksi).



c)-kohdan pisteet: tunnistettu vesi on aluksi kiinteää (1 p), sulaminen 0 °C :ssa (1 p), höyrystyminen 69 °C :ssa (1 p).

Jos lämpötilat puuttuvat, ei pisteitä.

d) Kun lämpötila on $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja paine $0,2\text{ bar} = 200\text{ mbar}$ ollaan faasidiagrammissa sulamiskäyrän alapuolella, eli vesi on kaasufaasissa. (1 p)



(vesi on kaasua tai höyryä 1 p, merkitty kohta kuvaajaan 2 p)

e) Olomuoto muuttuu höyrystä nesteeksi eli vesi tiivistyy (1 p) $80\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa, kun paine ylittää kylläisen vesihöyryn paineen eli $473,6\text{ mbar} = 0,473\text{ bar}$. (2 p)

