

TARTU ÜLIKOOL

TEADUSKOOL

**ETTEVALMISTUS FÜÜSIKAOLÜMPIAADIKS**

**SOOJUS**

**Koostas Urmo Visk**

Õppevahend TK õpilastele

Tartu 2008



# Sisukord

Koostas Urmo Visk.....	1
Soojushulk.....	1
Sulamine ja tahkumine.....	5
Allajahtunud vedelik.....	8
Aurustumine ja kondenseerumine.....	9
Ülekuumenenud vedelik.....	11
Näidisülesanne 1.....	12
Näidisülesanne 2.....	15
Võimsus ja kasutegur.....	16
Näidisülesanne 3.....	19
Soojusülekanne.....	21
Näidisülesanne 4.....	23
Näidisülesanne 5.....	24
Näidisülesanne 6.....	27
Graafikud.....	28
Näidisülesanne 7.....	28



# Soojushulk

Kui lõhkuda mingit eset järjest väiksemateks osadeks, siis selle eseme väiksemateks detailideks on molekulid ja aatomid. Aatomite tüüpiline läbimõõt on  $10^{-10}$  m ehk aatomid on üle miljardi korda väiksemad kui üks meeter.

Molekulid ja aatomid osalevad pidevas juhuslikus soojusliikumises, mõneti nagu tolmukübemed seisvas õhus. Inimesed ei taju aatomite ja molekulide liikumist seepärast, et molekulid on meist tohutult väiksemad. Aatomid liiguvad ainete sees seda kiiremini, mida kõrgem on temperatuur. Nii saab aatomite kiirust mõõta nii meetrites sekundis kui ka temperatuuriga. Saab tõestada, et keha temperatuur  $T$  on võrdeline aatomite keskmise kineetilise energiaga  $E_{KIN}$ :

$$E_{KIN} = \frac{3}{2} k_B T \quad (1)$$

( $k_B$  on konstant). Seepärast öeldakse, et temperatuur on aatomite keskmise kineetilise energia mõõt.

Valemis (1) on temperatuuriks absoluutne temperatuur, mida mõõdetakse Kelvini kraadides ehk kelvinites. Temperatuuri muutus ühe kelvini võrra on sama suur kui tem-

peratuuri muutus ühe Celsisuse kraadi võrra. Kahe temperatuuriühiku erinevus on selles, et Kelvini skaala nullpunkt asub Celsiuse skaalal temperatuuril  $-273^{\circ}\text{C}$ .

Temperatuuri kasvades suureneb ka keha sees olevate aatomite ja molekulide kiirus ning kineetiline energia. Tõstmaks keha temperatuuri, tuleb valemi (1) järgi suurendada molekulide kineetilist energiat. Selleks tuleb kehale anda soojust. Jahtumisel väheneb molekulide kineetiline energia ja keha annab soojust ära. Kui keha on ära andnud nii palju soojust, et molekulid ja aatomid aine sees seisavad, siis on molekulide kineetiline energia ja keha temperatuur null (see kehtib vaid siis, kui temperatuuri mõõta Kelvini kraadides; Celsiuse skaala nulli juures ei jää molekulid veel sugugi seisma).

Soojuse kogust, mis tuleb kehale soojendamiseks anda või mille annab keha jahtudes ära, nimetatakse soojushulgaks. Selle tähiseks on  $Q$  ja ühikuks on džaul:  $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ . Soojushulgal on sama ühik mis energial, kuna soojushulk on kõigi molekulide kineetiliste energiatega summaarne muutus (see järeldeb valemist (1)).

Keha soojendamiseks kuluv soojushulk on seda suurem, mida rohkem on aines aatomeid. Seega on soojushulk

võrdeline keha massiga. Aatomite kineetilise energia muutus sõltub keha temperatuuri muutust, mistõttu sõltub ka soojushulk keha temperatuuri muutust. Järelikult saab soojushulka arvutada valemiga:

$$Q = m c (t_1 - t_2) \quad (2)$$

kus  $m$  on keha mass,  $c$  on konstant,  $t_1$  ja  $t_2$  on keha temperatuurid soojenemise (või jahtumise) alguses ja lõpus. Konstanti  $c$  nimetatakse erisoojuseks. See konstant on eri materjalidel erinev. Erisoojuse ühik on  $J / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ . Arvutades valemis (2) temperatuuride vahet ( $t_1 - t_2$ ), lahutatakse kõrgem temperatuur madalamast, nii et soojushulk on alati positiivne. Sealjuures tuleb meeles pidada, kas keha sai või andis soojushulga ära.

Aine massi ja erisoojuse korrutist nimetatakse soojusmahtuvuseks:

$$C = m c. \quad (3)$$

Soojusmahtuvus näitab, kui suur soojushulk tuleb anda kehale, tõstmaks selle temperatuuri ühe kraadi võrra. Sealjuures ei pea keha mass olema üks kilogramm, vaid võib olla meelevaldne. Soojusmahtuvuse ühik on  $J/^\circ\text{C}$ .

<b>Aine</b>	<b>Erisoojus (J/(kg·°C) )</b>	<b>Aine</b>	<b>Erisoojus (J/(kg·°C) )</b>
Alumiinium	900	Kuld	129
Betoon	920	Polüeteen (PE)	2100
Etanool	2430	Raud	450
Graniit	800	Teflon	1000
Höbe	235	Teras	460
Jää	2200	Tina	217
Kips	1100	Vask	387
Kork	2100 – 2900	Vesi	4190
		Õhk	1010

*Tabel 1: Erinevate ainete erisoojused.*

Sooja ja külma keha kokkupuutepunktis põrkuvad üksteisega mõlemast kehast pärinevad aatomid. Põrkel annab kiirem aatom osa oma kiirusest aeglasemale aatomile. Soojema keha aatomid on kiiremad külmemale keha omadest, mistõttu väheneb põrgetel soojema keha aatomite kiirus ja kasvab külmemale keha aatomite kiirus. Nii kandub eri temperatuuriga kehade kokkupuutel soojus kuumemalt kehalt külmemale. Kuumem keha annab soojushulga ära ja külmem keha saab



soojushulga juurde. Sealjuures on kuumema keha poolt ära antud soojushulk võrdne külmema keha poolt saadud soojushulgaga:

$$Q_a = Q_s . \quad (4)$$

Selles valemis on  $Q_a$  ära antud soojushulk ja  $Q_s$  saadud soojushulk.

Soojusülekanne toimub seni, kuni kehade temperatuurid võrdsustuvad. Siis on mõlemas esemes aatomite keskmised kineetilised energiad võrdsed. Seega ei muutu aatomite keskmine kiirus kokkupõrgetel ja soojushulk ei kandu ühelt kehalt teisele. Kui kehad puutuvad üksteisega kokku ning soojushulk ei liigu ühelt kehalt teisele, siis on kehad soojuslikus tasakaalus ning nende temperatuurid on võrdsed. Õige on ka vastupidine: kui esemete temperatuurid on ühesugused, siis on ühelt kehalt teisele antav soojushulk null.

## **Sulamine ja tahkumine**

Tahkistes ja vedelikes mõjuvad molekulide vahel mitmesugused tõmbejõud, mis takistavad molekulide liikumist aine sees. Tõmbejõududele töötab vastu molekulide juhuslik

liikumine: kui molekuli kiirus on piisavalt suur, siis suudab molekul ületada talle mõjuvad tõmbejõud ja liikuda uude asukohta. Tahkistes on molekulide kiirused väiksemad kui vedelikes, mistõttu vahetavad molekulid oma asukohta tahketes ainetes harvemini. Sellepärast muudavadki vedelikud oma kuju lihtsamalt kui tahked ained.

Temperatuuri, mille juures tahkis muutub vedelaks, nimetatakse sulamistemperatuuriks. Selle temperatuuri juures ei pea keha tingimata sulama. Sulamistemperatuuril võib keha olla nii tahke kui ka vedel, sest aine mõlemad olekud on siis stabiilsed. Keha muutub sulamistemperatuuril vedelaks vaid siis, kui sellele antakse soojust juurde. Kui keha ei saa soojust lisaks, siis aine ei sula, vaid püsib sulamistemperatuuril tahkena. Kui õues on  $0^{\circ}\text{C}$  sooja, siis jää varjus ei sula, küll aga päikese käes, sest varjus ei saa jää päikeselt sulamiseks vajalikku soojust. Analoogselt tahkestub aine sulamistemperatuuril vaid siis, kui keha annab soojust ära.

Aines juhuslikus suunas liikuvatest aatomitest on alati mõned kiiremad ja teised jälle aeglasemad. Tahkise sulamisel suurenevad aatomite kiirused hüppeliselt. Sulamistemperatuuri juures liigub osa aatomeid juba nii kiiresti nagu vedelikus, mis-

tõttu kiiremad aatomid eralduvad tahkest ainest ja moodustavad vedeliku. Tahkisesse jäävad vaid aeglasemad molekulid, mille kiirus on vedelikuks muutumiseks liiga väike. Kui soojendada tahket ainet, siis muutuvad aeglasemad molekulid kiiremaks. Viimaks on ka need piisavalt nobedad, eralduvad tahkest ainest ja muutuvad vedelikuks.

Tahkise soojendamisel kasvab selle temperatuur, kuna molekulide kineetiline energia suureneb soojenemisel. Sulamisel tuleb aga soojust anda aeglasemate molekulide järele aitamiseks, mistõttu ei tõuse keha temperatuur enne üle sulamistemperatuuri, kui kõik molekulid on piisavalt kiirust kogunud ja kogu aine on sulanud. Võib ka öelda, et sulamisel ainele antav soojushulk kulub aatomite omavahelise seosenergia ületamiseks.

Tahke keha sulatamiseks tuleb esemele anda soojushulk:

$$Q = m \lambda \quad (5)$$

Siin on  $Q$  soojushulk,  $m$  keha mass ja  $\lambda$  aine sulamissoojus. Sulamissoojus on soojushulk, mis kulub ühe kilogrammi aine sulatamiseks. Ühe kilo vedeliku tahkestumisel eralduv soojushulk on arvuliselt võrdne sama aine sulamissoojusega, kuid

nüüd annab aine soojust ära, mitte ei saa seda juurde. Ainete sulamistemperatuurid ja -soojused on materjali kirjeldavad konstandid. Nende väärtused sõltuvad eelkõige aine keemilisest koostisest, struktuurist ja rõhust.

Aine	Sulamistemperatuur (°C)	Sulamissoojus (kJ / kg)
Alumiinium	660	397
Etanool	-117	102
Hõbe	962	105
Kuld	1063	64
Raud	1535	276
Tina	232	57
Vask	1083	205
Vesi	0	330

*Tabel 2: Mitmesuguste ainete sulamistemperatuurid ja -soojused.*

## Allajahtunud vedelik

Kui vedeliku temperatuur langeb allapoole sulamistemperatuuri, siis vedelik tahkestub. Protsessi algatamiseks

peab vedelikus olema kristalliseerumistsentreid. Need on vedelikus olevad väikesed tahked lisandid, enamasti lihtsalt tolmu-terad. Kui vedelik on väga puhas ja selles pole kristalliseerumistsentreid, siis jahtuv vedelik ei tahkestu sulamistemperatuuril. Vedeliku temperatuur võib langeda kümme-kond kraadi allapoole sulamistemperatuuri ja aine jääb ikka vedelaks. Sellist vedelikku kutsutakse allajahtunud vedelikuks. Kui allajahtunud vedelikku panna näiteks liiva (väikesed liiva-terad on väga head kristalliseerumistsentrid), siis tahkestub vedelik peaaegu hetkeliselt.

Vedelike tahkestumisel eraldub soojust. Allajahtunud vedeliku tahkestumisel eraldunud soojus tõstab vedeliku enda temperatuuri. Tahkestumine kestab, kuni vedelik on soojenenud sulamistemperatuurini ega ole enam allajahtunud. Ka vedeliku tahkeks muutuv osa tuleb enne jäätumist soojendada sulamistemperatuurini, sest tahkestumine toimub sulamistemperatuuril.

## **Aurustumine ja kondenseerumine**

Aurustumine on vedeliku muutumine gaasiks ja kondenseerumine on gaasi muutumine vedelikuks. Aurustumine ja

kondenseerumine on väga sarnased sulamisele ja tahkumisele.

Ka aurustumisel püsib keha temperatuur muutumatu, kuni kogu vedelik on aurustunud. Samuti on keemistemperatuuril korraga püsivad nii aur kui ka vedelik, mistõttu võib keemistemperatuuril vedelik aurustuda või aur kondenseeruda. Esimesel juhul tuleb vedelikku soojendada, teisel juhul annab gaas sooja ära. Gaasis on molekulide kiirused palju suuremad kui vedelikes, mistõttu tuleb keemisel anda vedelikule lisaenergiat aeglasemate molekulide järeleaitamiseks nagu tahkise sulamiselgi.

Vedeliku aurustamiseks tuleb sellele anda soojushulk:

$$Q = m L \quad (6)$$

( $Q$  on soojushulk,  $m$  on vedeliku mass ja  $L$  on vedeliku aurustumissoojus). Aurustumissoojus on soojushulk, mis kulub ühe kilogrammi aine aurustamiseks. Ühe kilogrammi gaasi veeldumisel eralduv soojushulk on arvuliselt võrdne sama aine aurustumissoojusega, kuid nüüd annab keha soojust ära, mitte ei saa seda juurde. Keemistemperatuur ja aurustumissoojus on konstandid, mis on eri ainetel erinevad.

<b>Aine</b>	<b>Keemistemperatuur (°C)</b>	<b>Aurustumissoojus (kJ / kg)</b>
Etanool	79	840
Hapnik	-183	213
Raud	2750	276
Lämmastik	-196	200
Süsinikdioksiid	-79	573
Vask	2570	205
Vesi	100	2260

*Tabel 3: Mitmesuguste ainete keemistemperatuurid ja aurustumissoojused.*

## Ülekuumenenud vedelik

Selleks, et vedelik hakkaks keemistemperatuuril keema, peab vedelikus olema keemistsentreid. Nendeks võivad olla mistahes mikroskoopilised tahked osakesed, näiteks liivaterad. Kui vedelikus pole keemistsentreid, siis võib vedeliku temperatuur tõusta üle keemistemperatuuri, ilma et see keema hakkaks. Kui ülekuumenenud vedelikku kallata peotäis liiva või vedelikku järsult raputada, siis hakkab vedelik väga intensiivselt keema ja aurustuma.

Vedeliku aurustamiseks tuleb vedelikule soojust juurde anda. Ülekuumenenud vedeliku aurustamiseks vajalik soojus võetakse vedelikult endalt, nii et selle temperatuur langeb keemisel. Kui vedeliku temperatuur on langenud keemistemperatuurini, siis pole vedelik enam ülekuumenenud ja keemine lõpeb. Kuna aurustumine toimub keemistemperatuuril, siis peab ka vedeliku aurustuv osa enne gaasiks muutumist keemistemperatuurini jahtuma.

Gaasidel on olemas ka ülekuumenemisele vastupidine nähtus: auru üleküllastumine. Kui jahtuvas gaasis pole kondenseerumistsentreid (nendeks on jällegi tolmuterad), siis võib gaasi temperatuur langeda allapoole keemistemperatuuri, ilma et gaas muutuks vedelikuks. Kondenseerumistsentreid võib asendada ka gaasist külmem pind. Näiteks talvel köögis rohkelt vett keetes kondenseerub aur akendele. Need on külmad, kuna aknaid jahutab õues olev külmem õhk.

## ***Näidisülesanne 1***

Potis on  $M = 0,4$  kg vett temperatuuriga  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ . Vette pannakse alumiiniumist kuul massiga  $m = 0,1$  kg. Kuuli algtemperatuur on  $t_{K0} = 90^\circ\text{C}$ . Oodatakse, kuni kuuli ja vee



temperatuurid on võrdsustunud, misjärel pannakse vette teine samasugune kuul. Ka nüüd oodatakse, kuni temperatuurid anumas on ühtlustunud. Kui kõrge on vee temperatuur siis, kui a) esimene kuul võeti enne teise kuuli vette panekut potist välja, ja siis, kui b) esimest kuuli ei võetud anumast välja? Anuma soojusmahtuvuse ja anuma soojusvahetuse väliskeskkonnaga võib lugeda nulliks.

### Lahendus

Vee erisoojus  $c = 4190 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$  ja alumiiniumi erisoojus  $c_K = 900 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ . Lahendame esmalt ülesande a) osa.

Olgu vee temperatuur pärast esimese kuuli jahtumist  $t_1$ . Kuul andis jahtumisel ära soojushulga  $Q_a = mc_K(t_{K0} - t_1)$  ja vesi sai soojushulga  $Q_s = Mc(t_1 - t_0)$ . Võrdsustame omavahel  $Q_a$  ja  $Q_s$  (vaata valemit (4)):

$$mc_K(t_{K0} - t_1) = Mc(t_1 - t_0), \text{ kust}$$

$$t_1 = \frac{Mct_0 + mc_Kt_{K0}}{Mc + mc_K} = 14,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kui esimene kuul võeti enne teise kuuli potti panekut veest välja, siis soojendab teine kuul ainult vett. Võrrandid  $Q_s$  ja  $Q_k$  jaoks on samasugused kui esimese kuuli korral, kuid vee

algtemperatuur on nüüd  $t_1$  ja lõpptemperatuur  $t_2$ . Kuul andis jahtumisel ära soojushulga  $Q_a = mc_K(t_{K0} - t_2)$  ja vesi sai soojushulga  $Q_s = Mc(t_2 - t_1)$ . Võrdsustame omavahel  $Q_a$  ja  $Q_s$  :

$$mc_K(t_{K0} - t_2) = Mc(t_2 - t_1), \text{ kust}$$

$$t_2 = \frac{Mct_1 + mc_Kt_{K0}}{Mc + mc_K} = 17,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Lahendame ülesande b) osa. Vee temperatuur pärast esimese kuuli jahtumist on samasugune kui ülesande a) osas. Seega  $t_1 = 14,1^\circ\text{C}$ . Teine kuul soojendab nüüd nii vett kui ka esimest kuuli. Olgu vee lõpptemperatuur  $t_2$ . Teine kuul annab ära soojushulga  $Q_a = mc_K(t_{K0} - t_2)$ . Vesi ja esimene kuul saavad soojushulga  $Q_s = Mc(t_2 - t_1) + mc_K(t_2 - t_1)$ . Võrdsustame  $Q_a$  ja  $Q_s$  omavahel:

$$mc_K(t_{K0} - t_2) = Mc(t_2 - t_1) + mc_K(t_2 - t_1)$$

$$t_2 = \frac{Mct_1 + mc_Kt_{K0} + mc_Kt_1}{Mc + 2mc_K} = 17,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kuna vee erisoojus on palju suurem alumiiniumi erisoojusest, siis muutub vee temperatuur palju vähem kui alumiiniumi temperatuur. Samal põhjusel on ka ülesande a) ja b)

osade vastused peaaegu võrdsed, kuigi teises osas tuli lisaks veele ka metallkuuli soojendada.

## **Näidisülesanne 2**

Vett jahutati allapoole sulamistemperatuuri kuni  $t_1 = -5^\circ\text{C}$  -ni. Kui vett loksutati, jäätus osa veest kiiresti. Mitu protsenti veest jäätus? Soojusvahetuse väliskeskkonnaga võib lugeda nulliks, sest jäätumine toimus kiiresti. Veenõu soojusmahtuvusega pole vaja arvestada.

### **Lahendus**

Kui vesi on jahtunud allapoole vee sulamistemperatuuri, siis on tegu allajahtunud vedelikuga. Allajahtunud vee jäätumisel eraldub soojus, mille abil soojendatakse allajahtunud vett ennast. Tahkestumine lõpeb, kui vee temperatuur on tõusnud sulamistemperatuurini. Kuna jäätumine toimub temperatuuril  $0^\circ\text{C}$ , siis tuleb ka jääks muutuv vesi esmalt soojendada sulamistemperatuurini.

Vee erisoojus on  $c = 4190 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$  ja jää sulamissoojus on  $\lambda = 330 \text{ kJ}/\text{kg}$ . Olgu vee mass algselt  $M$  ja jäätugu  $p$  protsenti veest. Jää mass on siis  $m_j = p M$ .

Jäätumisel eraldus soojushulk  $Q_e = p M \lambda$ . Selle soojushulgaga soojendatakse kogu vesi sulamistemperatuurini. Soojendamiseks on vajalik soojushulk  $Q_s = M c (0^\circ \text{C} - t_1)$ . Võrdsustame omavahel mõlemad soojushulgad:

$$p M \lambda = M c (0^\circ \text{C} - t_1)$$

$$p M \lambda = -M c t_1 \mid \div M$$

$$p \lambda = -c t_1$$

$$p = -\frac{c t_1}{\lambda} = 6,3 \%$$

## Võimsus ja kasutegur

Võimsus näitab, kui palju mehaanilist tööd teeb keha ühes sekundis. Mehaanilise tööna mõistetakse siin kas tööd tegeva keha enda või ka mõne muu eseme liigutamiseks kulutatud energiat. Võimsuse saab arvutada valemist:

$$P = \frac{A}{t} \quad (7)$$

( $P$  on võimsus,  $t$  on aeg ja  $A$  on aja  $t$  jooksul tehtud töö). Võimsuse ühik on vatt ja selle tähis on W. Üks vatt on võimsus, mille korral töö üks džaul tehakse ühes sekundis.  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$ . Mehaanilise töö järgi arvutatud võim-

sust nimetatakse ka mehaaniliseks võimsuseks.

Paljud masinad ei teegi mehaanilist tööd, mistõttu pole nendel ka mehaanilist võimsust. Näiteks radiaator toodab vaid soojust ega liiguta ühtegi keha. Samas ongi radiaatori ülesanne soojuste tootmine, mistõttu on radiaatori kasulikuks tööks toodetud soojushulk. Kuna inimestele kasulik töö pole alati mehaaniline töö, siis kasutatakse igapäevaelus võimsuse arvu- tamiseks mitte seadme tehtud mehaanilist tööd, vaid seadme poolt tarbitud energiat. Siis iseloomustab võimsus seda, kui palju energiat seade ühes sekundis kulutab. Radiaatori võimsus näitab seega, kui palju radiaator sekundis energiat tarbib (üht- lasi toodab radiaator ka sama palju soojust). Nii saab elektri- seadmete võimsuse järgi lihtsalt arvutada, kui suur on kuu lõpus elektriarve. Ka kulutatud energia järgi arvutatud võim- sust tähistatakse tähega  $P$  ja mõõdetakse vattides. Võimsuse saab aga nüüd arvutada valemist

$$P = \frac{E}{t} = \frac{Q + A}{t} \quad (8)$$

( $t$  on aeg,  $E$  on seadme poolt aja  $t$  jooksul tarbitud energia,  $Q$  on aja  $t$  jooksul eraldunud soojus ja  $A$  on aja  $t$  jooksul tehtud mehaaniline töö).

Kasutegur näitab, kui suur osa kehale antud energiast muudetakse mehaaniliseks tööks. Sellest ülejäänud energia muutub soojuseks. Kasutegurit arvutatakse valemiga

$$\eta = \frac{A}{A+Q} . \quad (9)$$

Siin on  $\eta$  kasutegur,  $A$  on mehaaniline ehk kasulik töö ja  $Q$  on soojushulk. Kasutegurit väljendatakse harilikult protsentides. Kasuteguri leidmiseks ei pea kasutama tööd ja soojushulka, vaid võib tarvitada ka võimsust. Siis on kasutegur mehaanilise võimsuse ja seadme koguvõimsuse suhe:

$$\eta = \frac{P_A}{P_{kogu}} = \frac{P_A}{P_A + P_Q} , \quad (10)$$

kus  $P_A$  on mehaaniline võimsus ehk kasulik võimsus;  $P_Q$  on ühes sekundis soojuseks muutunud energia;  $P_{kogu}$  on seadme poolt ühes sekundis tarbitud energia ehk  $P_{kogu} = P_A + P_Q$ .

Auto sisepõlemismootorite tüüpiline kasutegur on umbes 30 %. Seega kasutab auto bensiini või diisli põletamisel saadud energiast 30 % sõitmiseks ja ülejäänud 70 % muutub soojuseks. Nii on autoga mõistlikum tuba kütta kui ringi sõita.

### **Näidisülesanne 3**

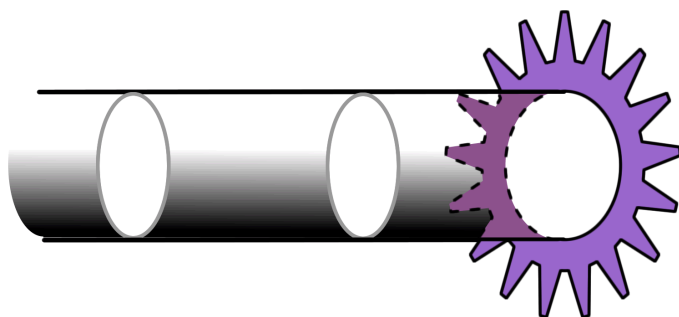
Vesijahutusega elektrimootori kasulik võimsus on  $P = 840$  kW. Jahutusvee temperatuur tõuseb mootori läbimisel  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$  võrra. Mootorisse siseneva jahutusvee toru läbimõõt on  $D = 3,6$  cm. Vee voolukiirus torus on  $v = 0,5$  m/s ja tihedus  $\rho = 1$  kg/dm<sup>3</sup>. Kui suur on mootori kasutegur?

#### **Lahendus**

Kasuteguri leidmiseks peab teadma mootori kasulikku võimsust ja ühes sekundis soojuseks muutunud energiat. Leiname, kui suure soojushulga saab vesi mootori läbimisel. Jahutusvee toru ristlõikepindala on  $S = 0,25\pi D^2 = 10,2$  cm<sup>2</sup>. Kulugu veel mootori läbimiseks aeg  $\tau$ .

Vaatleme vee liikumist mootorini viivas jahutusvee torus. Kujutame ette, et me lisame jahutusvette värvi. Siis tekib vees front, millest alates muutub tavaline vesi värvitud veeks. Hakkame vee liikumist vaatlema hetkel, kui front on jõudnud joonisel 1 kujutatud vasakpoolse halli ellipsini. Ajaga  $\tau$  läbib vesi mootori. Sel ajal voolas värviline vesi torus kaugemale ja värvilise vee frondiks on nüüd parempoolne hall ellips joonisel 1. Mootorit läbinud vee ruumala võrdub kahe frondi vahel ole-

va ruumalaga. Kahe frondi kaugus teineteisest on  $s = v\tau$  ehk vee poolt aja  $\tau$  jooksul läbitud vahemaa. Toru ristlõikepinda on  $S$ . Seega on frontide vaheline ruumala  $V = S \cdot s = S v \tau$ . Selles ruumalas oleva vee mass on  $M = \rho V$ . Sama kogus vett läbis ka aja  $\tau$  jooksul mootori.



*Joonis 1: Joonisel kujutatakse jahutusvee toru, mis siseneb paremal pool olevasse mootoris. Hallid ellipsid torus kujutavad värvilise vee fronti eri ajahetkedel. Vasakpoolne ellips on front alghetkel ja parempoolne ellips on front ajavahemiku  $\tau$  möödudes.*

Mootorit läbinud vee temperatuur tõusis  $\Delta t$  võrra, mistõttu sai aja  $\tau$  jooksul mootori läbinud vesi soojushulga



$$Q = M c \Delta t = \rho V c \Delta t = \rho S v \tau c \Delta t. \quad (11)$$

Mootor soojendab vett võimsusega

$$P_Q = Q / \tau = \rho S v c \Delta t = 42,6 \text{ kW}$$

Mootori kasutegur on kasuliku võimsuse jagatis kokuvõimsusega. Viimane võrdub kasuliku võimsuse  $P_A$  ja vee soojendamiseks kulunud võimsuse  $P_Q$  summaga. Mootori kasutegur on:

$$\eta = \frac{P_A}{P_A + P_Q} = 95 \%$$

## Soojusülekanne

Esimeses peatükis kirjeldati, kuidas toimub kahe kokkupuutuva keha vahel soojusülekanne: eri kiirustega liikuvad molekulid põrkuvad omavahel, nii et soojema keha molekulid muutuvad aeglasemaks ja külmemale keha molekulid kiiremaks. Kuna molekulide kineetiliste energiatega summa võrdub soojushulgaga, siis molekulide põrkumisel kandub ühelt kehalt teisele ka soojushulk. Soojushulka, mille soojem keha annab soojusülekanne külmemale, arvutatakse valemist:

$$Q = k S (t_s - t_k) \tau, \quad (12)$$

kus  $Q$  on soojushulk,  $k$  on konstant,  $S$  on kehade kokkupuutepindala,  $t_s$  on soojema keha temperatuur,  $t_k$  on külmema keha temperatuur ja  $\tau$  on aeg, mille vältel soojusülekanne toimub. Kui jagada valemi (12) mõlemad pooled ajaga  $\tau$  läbi, siis saadakse valem soojusülekannde võimsuse jaoks:

$$P = S k (t_s - t_k). \quad (13)$$

Soojusülekannde võimsus näitab, kui suure soojushulga annab soojem keha ühes sekundis külmemale kehale. Valemid (12) ja (13) kehtivad vaid siis, kui kehade temperatuurid ei muutu soojusülekandel. Selline olukord on näiteks talvel köetav maja: välisõhu temperatuur ei muutu, kuna õhu mass õues on väga suur, ja maja temperatuur ei lange, sest maja köetakse. Konstant  $k$  näitab soojusvahetuse kiirust: mida suurem on  $k$ , seda rohkem annab soojem keha ühes sekundis soojust ära. Konstandi  $k$  väärtusi ei saa leida teatmikest, kuna see on iga eseme jaoks erinev. Kui keha pindala ei ole teada, siis käsitletakse korrutist  $k \cdot S$  ühe konstandina (keha pindala soojusülekandel tavaliselt ei muutu; eranditeks on küll õhupallid).

Kui keha temperatuur muutub soojusülekandel, siis

tuleb soojenemiseks kuluv aeg jagada lühikesteks hetkedeks, mille vältel on kehade temperatuurid peaaegu muutumatud. Seejärel tuleb valemeid (12) ja (13) kasutada iga hetke jaoks eraldi ning viimaks soojushulgad kokku liita.

## **Näidisülesanne 4**

Maja köetakse elektriradiaatoritega, mille võimsus kokku on  $P = 3$  kW. Temperatuur toas on  $t_t = 20^\circ\text{C}$  ja õues  $t_\delta = -10^\circ\text{C}$ . Kui soe on majas siis, kui temperatuur õues on  $t_{\delta 2} = -15^\circ\text{C}$ ? Kui suur peab olema radiaatorite koguvõimsus, et toatemperatuur oleks ka külmema ilmaga  $20^\circ\text{C}$ ?

### **Lahendus**

Kasutame soojuskadude võimsuse arvutamiseks valemit (13). Kuna maja pindala ei muutu, siis käsitleme korrutist  $S \cdot k$  ühe konstandina  $K$ . Leiame konstandi  $K$  väärtuse maja jaoks:

$$K = P / (t_t - t_\delta) = 100 \text{ W}/^\circ\text{C}.$$

Nüüd leiame temperatuuri toas, kui õues on  $15^\circ\text{C}$  külma. Avaldame valemist (13) kõrgema temperatuuri  $t_s$  ning asendame  $t_k$  välisõhu temperatuuriga  $t_{\delta 2}$ :

$$t_s = P/K + t_{\delta 2} = 15^{\circ}\text{C}.$$

Leiame radiaatorite koguvõimsuse, kui ka külmema ilmaga on toatemperatuur  $20^{\circ}\text{C}$ :

$$P_2 = K (t_i - t_{\delta 2}) = 3,5 \text{ kW}.$$

## ***Näidisülesanne 5***

Kuubikujuline nõu on täidetud veega. Kuubi sees on küttekeha, mis soojendab kuupi võimsusega  $P_0$ . Teiseks anumaks on samasugune kuup, mille küljed on kaks korda pikemad. Ka see nõu on vett täis. Suuremat kuupi soojendatakse võimsusega  $4P_0$ . Mitu korda aeglasemalt soojeneb vesi suuremas kuubis võrreldes väiksema anumaga?

### **Lahendus**

Olgu väiksema kuubi tahkude pikkus  $a$ . Suurema kuubi tahkude pikkus on siis  $2a$ . Väiksema kuubi pindala on  $6a^2$  ja suurema kuubi oma  $6 \cdot (2a)^2 = 6 \cdot 4a^2$ . Väiksema kuubi ruumala on  $a^3$  ja suurema kuubi ruumala on  $(2a)^3 = 8a^3$ . Kui vee tihedus on  $\rho$ , siis on vee mass väiksemas kuubis  $\rho a^3$  ja suuremas kuubis  $8\rho a^3$ . Väiksema kuubiga seotud suurustel on edaspidi

alaindeks  $V$  ja suurema kuubiga seotud suuruste alaindeks on  $S$ .

Kuubid saavad soojust kuupide sees asuvatelt küttekehadelt ja kaotavad soojust soojusülekande tõttu. Leiame esmalt, kuidas erinevad kuupide soojusülekande võimsused. Vaatleme kuupe lühikese aja vältel, kui nende temperatuur on  $t_0$ . Selle ajaga anumate temperatuur ei muutu ja kehtib valem (13). Ainus muutuv suurus on selles ülesandes kehade pindala (kuna kuubid on ühesugused, siis on neil konstandid  $k$  võrdsed; kuna vaatleme mõlemat kuupi temperatuuril  $t_0$ , siis on ka temperatuuride vahe kuupide jaoks ühesugune). Kui loeme  $k$  ja temperatuuride vahe konstantseks, saame soojusülekande võimsust arvutada valemiga  $P = K' S$  (siin on  $K'$  uus konstant).

Väiksema kuubi jaoks on soojusülekande võimsus:

$$P_V = K' 6a^2$$

Suurema kuubi soojusülekande võimsus on

$$P_S = K' 4 \cdot 6a^2 = 4P_V.$$

Vee soojendamiseks kuluv võimsus väiksemas kuubis on:

$$p_v = P_0 - P_V.$$

Suures kuubis soojendatakse vett võimsusega:

$$p_s = 4P_0 - P_S = 4P_0 - 4P_V = 4(P_0 - P_V) = 4p_v.$$

Temperatuuri muutumise kiirus ehk temperatuuri muutus aja  $\tau$  jooksul on:

$$v = \frac{\Delta T}{\tau} = \frac{Q}{m c \tau} = \frac{P}{m c}$$

( $P$  on vee soojendamiseks kuluv võimsus,  $m$  on vee mass ja  $c$  on vee erisoojus).

Väiksemas kuubis muutub temperatuur kiirusega:

$$v_v = \frac{P_v}{m c} = \frac{P_v}{\rho a^3 c}.$$

Suuremas kuubis muutub temperatuur kiirusega:

$$v_s = \frac{P_s}{m c} = \frac{4 P_v}{8 \rho a^3 c} = \frac{P_v}{2 \rho a^3 c}.$$

Leian kiiruste suhte:

$$\frac{v_s}{v_v} = \left( \frac{P_v}{2 \rho a^3 c} \right) \div \left( \frac{P_v}{\rho a^3 c} \right) = \frac{1}{2}$$

Seega soojeneb vesi suuremas kuubis kaks korda aeglasemalt kui väiksemas.

## Näidisülesanne 6

Köögis soojendatakse pliidil vett. Sealjuures ei tõuse vee temperatuur üle  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ . Pliidi võimsus  $P = 0,5 \text{ kW}$ . Kui kõrge temperatuurini soojeneb vesi, kui pliidi võimsust tõsta kaks korda? Köögi temperatuur on  $t_k = 20^\circ\text{C}$ .

### Lahendus

Vee temperatuur ei tõuse soojendamisel enam kõrge-  
male, kui kogu pliidilt saadud soojus antakse soojukadudena  
ära. Oluliseimaks soojuskaoks on soojusülekanne, mille võim-  
suse saab leida valemist (13):  $P = K(t_k - t_m)$ . Kõrgemaks tem-  
peratuuriks on vee maksimaalne temperatuur  $t_1$  ja madalamaks  
temperatuuriks on toatemperatuur  $t_k$ . Leiame konstandi  $K$  vää-  
rtuse:

$$K = \frac{P}{t_1 - t_k} = 16,7 \text{ W}/^\circ\text{C}$$

Leiame vee maksimaalse temperatuuri, kui pliidi võimsus on  
kaks korda suurem ehk  $1 \text{ kW}$ .

$$t_{max} = \frac{2P}{K} + t_k = 80^\circ\text{C}.$$

## Graafikud

Soojusõpetuses on levinuimaks jooniseks graafik, mille vertikaalteljel on temperatuur ja horisontaalteljel aeg. Joonisel kujutatakse keha temperatuuri muutumist ajas.

Graafiku tõus näitab keha soojenemise kiirust: mida järsem on graafik, seda kiiremini muutub keha temperatuur. Kui graafik on horisontaalne, siis keha temperatuur ei muutu. Seega on keha kas soojuslikus tasakaalus või sulab, kondenseerub jne. Graafiku tõusu saab arvutada järgmiselt:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta t}{\tau} = \frac{Q}{\tau m c} = \frac{P}{C} \quad (14)$$

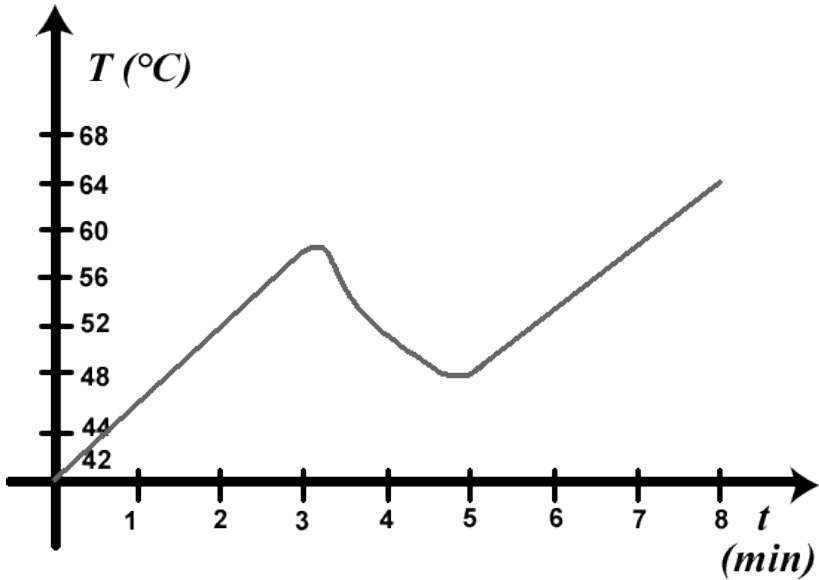
( $\Delta t$  on temperatuuri muut,  $\tau$  on aja muut,  $Q$  on soojushulk,  $m$  on keha mass ja  $c$  keha erisoojus,  $P$  on soojendamise võimsus,  $C$  on keha soojusmahtuvus).

### **Näidisülesanne 7**

Joonisel 2 on toodud pliidil soojendatava vee temperatuuri sõltuvus ajast. Hetkel  $\tau_0 = 2$  min pandi vette jäätükk. Kui suur oli pliidi võimsus, kui vee mass on  $m_1 = 2,4$  kg ja jää mass on  $m_2 = 0,4$  kg? Soojuskadudega ei pea arvestama.



Jää algtemperatuur oli 0°C.



Joonis 2: Vee temperatuuri muutumine ajas.

### Lahendus

Pärast jää vette lisamist hakkas jää sulama. Ühtlasi hakkas ka vesi potis jahtuma, kuna jää sulatamiseks võeti soojust nii küttekehalt kui ka soojalt veelt. Kui kogu jää oli sulanud ja üles soojenenud, hakkas vee temperatuur uuesti tõusma. Graafikult on näha, et see toimus ajahetkel  $\tau = 5$  min.

Jooniselt 2 leiame, et vee temperatuur anumas oli enne jää lisamist  $t_0 = 58^\circ\text{C}$ . Vee temperatuur hetkel  $\tau = 5$  min oli  $t_1 = 48^\circ\text{C}$ . Jää sulatamiseks ja soojendamiseks kulus soojushulk

$$Q_s = m_2 \lambda + m_2 c (t_1 - 0^\circ\text{C}) .$$

Küttekeha andis anumas olnud jääle ning veele soojushulga:

$$Q_{a1} = P (\tau - \tau_0) .$$

Soojalt veelt sai jää soojushulga:

$$Q_{a2} = m_1 c (t_0 - t_1) .$$

Jääle antud soojushulgad võrduvad jää sulatamiseks ja soojendamiseks kulunud soojushulgaga. Seega

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_{a1} + Q_{a2} \\ m_2 \lambda + m_2 c (t_1 - 0^\circ\text{C}) &= P (\tau - \tau_0) + m_1 c (t_0 - t_1) \quad , \text{siit} \\ P &= \frac{m_2 \lambda + m_2 c t_1 - m_1 c (t_0 - t_1)}{\tau - \tau_0} = 930 \text{ W} \end{aligned}$$