

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Energiatehnoloogia instituut

Õppematerjal
KAT0126 Soojuslevi
Harjutustundideks

Mõõtühikute süsteem

pico	nano	micro	milli	canti	deci	deka	hekto	kilo	mega	giga	tera
p	n	μ	m	c	d	da	h	k	M	G	T
10⁻¹²	10⁻⁹	10⁻⁶	10⁻³	10⁻²	10⁻¹	10¹	10²	10³	10⁶	10⁹	10¹²

	SI süsteem	Mittesüsteemsed ühikud
Pikkus (kõrgus)	m (meeter)	1 μm = 10⁻⁶ m
		1 Å = 10⁻¹⁰ m (ongström)
		1 ft = 0,3048 m (jalg)
		1 in = 25,4 10⁻³ m (toll)
Mass	kg (kilogramm)	1 t = 1000 kg
		1 g = 10⁻³ kg
		1 lb = 0,454 kg (nael)
Temperatuur T	K (Kelvin)	t °C = (K - 273)
		t °F = K/1,8 (Fahrenheit)
Jõud (Kaal)	N (Njuuton)	1 kgf = 9,81 N
		1 din = 10⁻⁵ N
		1 lbf = 4,45 N
Dünaamiline viskoossus	Pa s	1 P = 1 din· s/cm² = 0,1 Pa·s (Puaas)
		1 cP = 10⁻³ Pa s
		1 lbf s/ft² = 47,88 Pa s
Kinemaatiline viskoossus	m²/s	1 St = 1 cm²/s = 10⁻⁴ m²/s (Stooks)
		1 ft²/s = 0,093 m²/s

Sagedus	Hz (Hertz)	1 Hz = 1 s⁻¹ = 1 pööret/s
Rõhk	Pa (Paskal)	1 bar = 10⁵ Pa
		1 atm = 9,81 10⁴ Pa = 735 mm Hg
		1 atm = 101325 Pa = 760 mm Hg
		1 kgf/cm² = 9,81 10⁴ Pa
		1 mm H₂O = 9,81 Pa
		1 mm Hg = 133,3 Pa
		1 lbf/in² = 6894,76 Pa
		1 lbf/ft² = 47,88 Pa
Võimsus	W (Vatt)	1 kgf m/s = 9,81 W
		1 kkal/t = 1,163 W
		1 lbf ft/s = 1,356 W
Maht	m³	1 l = 10⁻³ m³ = 1 dm³
		1 ft³ = 28,3 dm³ = 2,83 10⁻² m³
Tihedus	kg/m³	1 g/cm³ = 10³ kg/m³
		1 lb/ft³ = 16,02 kg/m³
		1 lb/in³ = 27,68 10³ kg/m³
Pindala	m²	1 ft² = 0,0929 m²
		1 in² = 6,451 10⁻⁴ m²
Energia	J (Džaul)	1 kgf m = 9,81 J
		1 kW t = 3,6 10⁶ J
		1 cal = 4,19 J (kalor)
		1 lbf ft = 1,356 J
		1 lbf in = 0,133 J

Difusioonikoefitsient	m²/s	1 ft²/s = 0,0929 m²/s
Masskulu	kg/s	1 lb/s = 0,454 kg/s
		1 lb/h = 1,26 10⁻⁴ kg/s
Mahtkulu	m³/s	1 l/min = 16,67 10⁻⁶ m³/s
		1 ft³/s = 28,3 10⁻³ m³/s
		1 in³/s = 16,4 10⁻⁶ m³/s
Soojusmahtuvus	J/(kg K)	1 cal/(kg °C) = 4,19 J/(kg K)
Kiirus	m/s	1 ft/s = 0,3048 m/s
Vaba langemise kiirendus	9,81 m/s²	32,17 ft/s²

1. ENERGIA BILANSS

Energia mõõtühikud

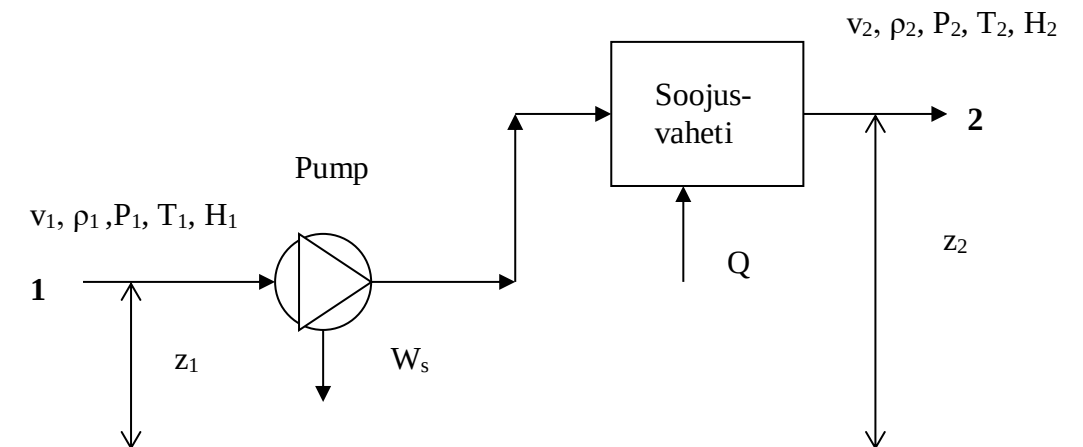
Džaul (tähis J) on töö, energia ja soojushulga mõõtühik rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis (SI).

SI põhiühikute kaudu avaldub džauli kujul

$$1J = 1 \frac{kg * m^2}{s^2} = 1N * m = 1W * s$$

	Džaul J	Kilovatt- tund kW•h	Elektronvolt eV	Kalor cal	Erg erg	btu
1J = 1 W•s	1	$2,778 \times 10^{-7}$	$6,242 \times 10^{18}$	0,239	10×10^6	$9,48 \times 10^{-4}$

Selleks, et vaadata kuidas koostatakse energia bilanss, vaatame järgmist süsteemi:



Pumbaga tõstetakse vedelik kõrguselt z_1 kõrguseni z_2 läbi soojusvaheti, kus tema temperatuur tõuseb.

Süsteemi suunatakse vedelik kiirusega v_1 ja entalpiaga H_1 . Väljuva voo kiirus on v_2 ja entalpia H_2 . Masskulu süsteemis on konstantne.

Kõik energialiigid saab eraldada kahte rühma:

- energia muutused mis on seotud vedelikuga, nendeks on:

1. fluidumi entalpia muutus $\Delta H = H_2 - H_1$

2. fluidumi kineetilise energia muutus

$$\Delta e_k = \frac{1}{2 * \alpha} * (v_2^2 - v_1^2) \quad (1.1.)$$

3. fluidumi potentsiaalse energia muutus

$$\Delta e_p = g * m * (z_2 - z_1) \quad (1.2.)$$

- väljast antud energi:

1. soojus mis eraldub soojusvahetis Q

2. pumbaga sisseviidud mehaniline energia W_s

Kokkuvõttes, kui süsteemi siseneb ja väljub üks voog, siis süsteemi energia muutus on:

$$\Delta H + \Delta e_k + \Delta e_p = \pm Q \pm W_s \quad (1.3.)$$

$$H_2 - H_1 + \frac{1}{2 * \alpha} * (v_2^2 - v_1^2) + g * m * (z_2 - z_1) = \pm Q \pm W_s \quad (1.4.)$$

- Kui süsteemis ei toimu soojenemist ja fluidumi oleku muutust, võib öelda, et ΔH ja $Q = 0$; kui süsteemis toimub soojenemine (süsteem saab energiat), siis $\Delta Q > 0$; kui süsteem jahtub (annab energiat ümbritsevale keskkonnale), siis $\Delta Q < 0$

- Kui süsteemis ei teha mehhaanilist tööd (näiteks pumpamist) siis $W_s = 0$, kui süsteemis töötab pump, siis $\Delta W_s > 0$

- Kui süsteemis ei kasva fluidumi kiirus, siis $\Delta e_k = 0$

- Kui süsteemis ei toimu nivoo langust või tõstmist, siis $\Delta e_p = 0$

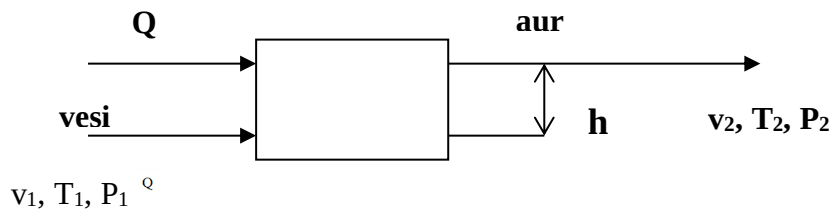
Fluidumi liikumisel me opereerime keskmise kiirusega. Reaalne kiirus igas torustiku punktis on erinev keskmisest kiirusest. See sõltub liikumise režiimist ja bilanssvõrrandis märgitakse kui paranduskoefitsient α kineetilise energia arvutuses:

- **Laminaarses liikumisrežiimis $\alpha = 0,5$**
- **Turbulentses režiimis $\alpha = 0,9 \div 0,99$**

ÜLESANDED

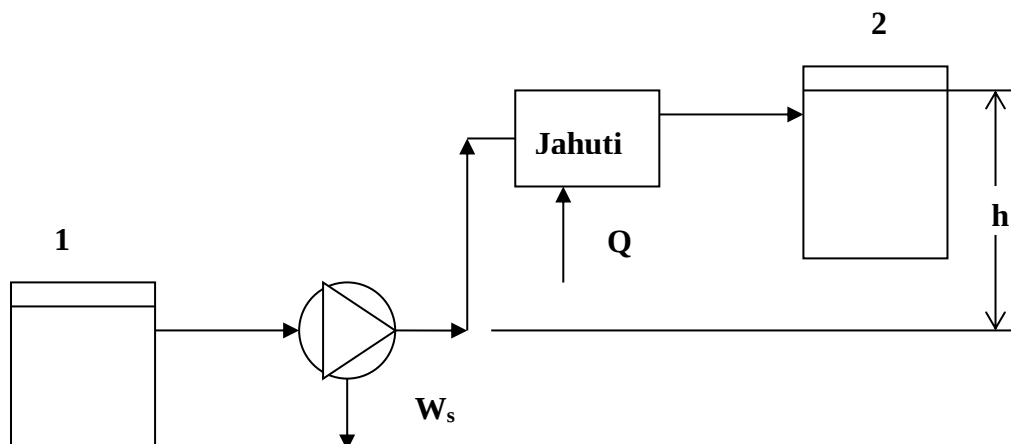
Ülesanne 1.1.

Vesi siseneb boilerisse temperatuuril $18,33^{\circ}\text{C}$ ja rõhul $137,9\text{ kPa}$ kiirusega $1,52\text{ m/s}$. Boilerist väljuv toru on $15,2\text{ m}$ kõrgemal kui sisenev toru. Väljuvas torus on auru temperatuur $148,9^{\circ}\text{C}$, rõhk $137,9\text{ kPa}$ ja kiirus $9,14\text{ m/s}$. Arvutada, kui palju soojust on vaja, et aurustada boileris 1 kg vett kui meil on statsionaarne turbulentne voolamisrežiim? (Entalpia andmed saab Geankopli raamatust (Appendix 2))



Ülesanne 1.2.

Vesi lahtisest anumast 1 pumbatakse teise paaki kuluga $0,7\text{ m}^3/\text{min}$. Anumas 1 on temperatuur 85°C ja rõhk on võrdne atmosfäärirõhuga. Pumba mootori võimsus on 7 kW . Vahepeal läbib vesi soojusvahetit, kus annab ära 1500 kW soojust. Jahutatud vesi tõstetakse kõrgusele 20 m . Mõlemas paagis on vedeliku lõppkiirus 0 m/s . Arvutada temperatuur teises paagis. (Entalpia andmed saab Geankopli raamatust (Appendix 2))



Ülesanne 1.3.

Kui palju on vaja soojust välja viia soojusvahetist, et jahutada $1\text{ m}^3/\text{min}$ vett 80°C kraadist kuni 20°C kraadini? Vastus anda energia ja võimsuse ühikutes. (Entalpia andmed saab Geankopliise raamatust (Appendix 2))

Ülesanne 1.4.

Kui palju energiat kasutab pump, mis pumpab vett 85 m kõrgusele.

Ülesanne 1.5.

Vesi temperatuuriga 20°C pumbatakse soojusvahetisse kiirusega 2 m/s . Soojusvahetist väljuv toru asub 20 m kõrgemal kui sisenev toru. Väljuvas torus on vee temperatuur 80°C ja kiirus 5 m/s . Arvutada, kui palju soojust ja mehaanilist energiat on vaja, et soojendada 1 kg vett, kui meil on statsionaarne turbulentne voolamisrežiim? (Entalpia andmed saab Geankopliise raamatust (Appendix 2))

Ülesanne 1.6.

Torustikus sisediameetriga 100 mm on üleminek diameetrile 200 mm . Mööda torustikku juhatakse $1700\text{ m}^3\text{ n.t./h}$ metaani. Metaani tegelik temperatuur on 25°C . Kui suur on energia muutus ülemineku osas?

2.SOOJUSLEVI

2.1. Energiaühikud

SI süsteemis: J (džaul)

1 kJ = 10^3 J; 1 MJ = 10^6 J

Muud ühikud:

al (kalor) 1 cal = 4,184 J

btu (British thermal unit) 1 btu = 252,16 cal = 1055,06 J

2.2. Soojusvoog (aine füüsikaline soojus) on avaldatav järgmiselt:

$$Q_f = G\Delta H \quad 2.1$$

kus G - on materjali voog, kg s^{-1} , ja ΔH -**entalpia muutus**, J kg^{-1}

$$\Delta H = H_{\text{lõpp}} - H_{\text{alg}} \quad 2.2$$

Vedelike korral, juhul kui soojusmahtuvus on konstantne, leitakse entalpia järgmiselt:

$$\Delta H = C_p (T - T_0) \quad 2.3$$

kus C_p – soojusmahtuvus, J kg^{-1}

Vastavalt sellele

$$Q = GC(T - T_0) \quad \text{või} \quad Q = GC(t - t_0) \quad 2.4$$

2.3. Soojusmahtuvus on soojushulk, mis on vajalik ühe ainehulga ühiku temperatuuri tõstmiseks 1 kraadi võrra.

Soojusmahtuvuse ühik (SI)

Kui ainehulga ühik - **kg** - erisoojusmahtuvus $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Kui ainehulga ühik - **mol** - molaarne soojusmahtuvus $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

2.4. Soojusbilanss

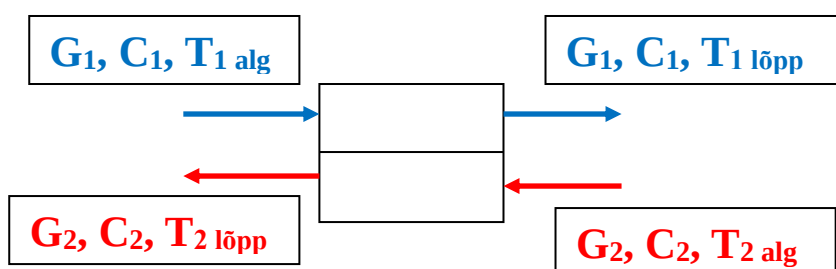
Süsteemis, kus on kaks soojuskandjat, kehtib energiabilanss:

$$Q_1 = Q_2 + Q_{kaod} \quad 2.5$$

või

$$G_1 C_1 \Delta t_1 = G_2 C_2 \Delta t_2 + Q_{kaod} \quad 2.6$$

kus Q_{kaod} – soojuskadu süsteemis.



Kui soojusvahetus toimub soojusjuhtivuse teel, siis toimub temperatuuride vahel põhjustatud soojuslevi läbi mingi pinna:

$$Q = k \delta A \Delta T \quad 2.7$$

kus k – on soojusjuhtivustegur, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,

δ – seina paksus, m

ja A – soojusvahetuspinna pindala m^2

		soojusmahtuvuse ühik (SI)	$P = \text{const}$ (isobaarne)	$V = \text{const}$ (isohooriline)
ainehulga ühik - kg	erisoojusmahtuvus	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	c_p	c_v
ainehulga ühik - mool	molaarne soojusmahtuvus	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	C_p	C_v

Soojendamine, jahutamine: $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ [J] = [kg] · [J/(kg·K)] · [K]

(P = const, c_p = const) $Q = n \cdot C_p \cdot \Delta T$ [J] = [mol] · [J/(mol·K)] · [K]

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ [J/s]} = [\text{kg/s}] \cdot [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \cdot [\text{K}]$$

$$[\text{J/s}] = [\text{W}]$$

$$Q = n \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ [J/s]} = [\text{mol/s}] \cdot [\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})] \cdot [\text{K}]$$

[K]

ÜLESANDED

Ülesanne 2.1. (Geankoplis 1.6-3, lk 31)

Soojusvahetis soojendatakse 454 kg õunapüreed. Püree algtemperatuur on 10°C. Arvutada püree lõpptemperatuur kui soojusvahetis antakse üle 121300 kJ energiat. Õunapüree keskmine soojusmahtuvus on võetud 32.8 °C juures $C_p = 4,2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

Ülesanne 2.2.

Anumas on 2 kg vett temperatuuriga 10°C. Seda kasutatakse alumiiniumtüki jahutamiseks. Leida tasakaalne temperatuur, kui alumiiniumtüki mass on 300 g ja algtemperatuur on 95°C.

Ülesanne 2.3.

300 kg/h o-ksüleeni siseneb toru-torus soojusvahetisse temperatuuril 60°C ning väljub temperatuuril 30°C. Leida jahutusvee kulu [kg/h], kui jahutusvee algtemperatuur on 10°C ning temperatuur soojusvahetist valjumisel on 18°C. o-ksüleeni soojusmahtuvus on 1,721 kJ/(kg K).

Ülesanne 2.4.

Kui palju energiat [kJ] on vaja 0,5 kg benseeni aurustamiseks atmosfäärirõhu juures, kui benseeni algtemperatuur on 20°C? Benseeni keemistemperatuur 1 atm juures on 80,1°C ning aurustamissoojus on 394 kJ/kg.

Ülesanne 2.5.

Kui palju energiat on vaja, et kuumutada 2 kg tolueeni 20°C-lt kuni 90°C-ni 1 atm juures?

Ülesanne 2.6.

Vee faasidiagramm. Joonistada graafikud $T = f(Q)$: tahke $\rightarrow$ vedelik $\rightarrow$ aur

$h = f(T)$: vedelik $\rightarrow$ aur

Ülesanne 2.7.

Veeauru tabel

a)

T [°C]	P [bar]	h [kJ/kg]	x	faasi kirjeldus
19			0	
	9		1	
70			0.8	
280	3			
	30	3138.7		
	50	592.15		

b) $P = 165$ bar, $T = 460^\circ\text{C}$. $h = ?$ [kJ/kg]

c) $P = 5$ bar. $T_{\text{alg}} = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{lõpp}} = 280^\circ\text{C}$. $\Delta h = ?$ [kJ/kg]. Graafik $h = f(T)$

Ülesanne 2.8.

Veeauru tabelid

- $P = 35$ bar, $x = 1$. $v = ?$ $u = ?$ $h = ?$
- $P = 0,8$ bar, $x = 0,7$. $v = ?$ $u = ?$ $h = ?$
- Kui palju muutub veeauru siseenergia, kui küllastatud 100°C juures olev aur kuumutatakse kuni 400°C 20 bari juures?
- Leida küllastatud auru mahtkulu 5 bari juures, kui masskulu on 2 kg/s.

5. Leida energiakulu [kW] 200 kg/h auru soojendamisel 3 bari juures, kui algtemperatuur on 160°C ja lõpptemperatuur on 200°C.

Ülesanne 2.9.

Veest, mille temperatuur on 20°C, saadakse aur temperatuuriga 320°C. Leida protsessi läbiviimiseks vajalik energiakulu [kJ/kg], kui rõhk süsteemis on 15 bari.

Ülesanne 2.10.

Aurugeneraatorisse siseneb 2300 kg/h vett temperatuuriga 12°C. Absoluutrõhk aparaadis on 2 bari. Leida auru genereerimiseks vajalik energia kulu [kW], kui nõutud auru temperatuur on 160°C.

2.5. Soojusjuhtivustegur näitab; milline hulk soojust kandub läbi pinnaühiku ühikulise temperatuurigradiendi korral. See sõltub materjalist ja selle struktuurist.

$$\langle \text{levimiskiirus} \rangle = \left\langle \frac{\text{liikumapanev jõud}}{\text{takistus}} \right\rangle$$

Üldjuhul soojusjuhtivusteguri saab esitada järgmisel kujul:

$$k = a + bT \quad 2.8$$

kus a ja b on konstandid iga materjali jaoks (kättesaadavad käsiraamatus).

Tasakaalustatud soojusjuhtivusprotsessis on soojusvoog läbi pinnaühiku arvutatav Fourier seadusega ristkoordinaatides järgmiselt:

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{\delta} \quad 2.9$$

kus Q [W = J/s] – soojusvool läbi plaadi pinna A temperatuuri vähenemise suunas

A [m²] – pind

q_A [W/m²] – soojusvool pinnaühiku kohta ehk soojusvoog

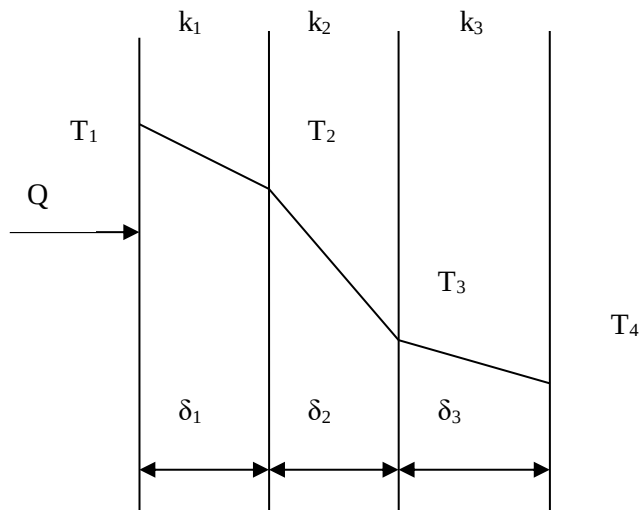
k [W/(m·K)] – soojusjuhtivustegur

T [K või °C] – kohalik temperatuur

δ [m] – soojusvoolu suunaline koordinaat

Võrrand 2.9 kehtib, kui soojusvoog toimub läbi ühekihilise seina.

Kui on tegemist soojusvooga läbi mitmekihilise seina, mille kihid on erinevast materjalist ja erineva soojusjuhtivusteguriga, siis igas kihis on oma temperatuuriprofiil:



Kuna seinä igat kihti läbib üks sama suur soojusvoog, saab sellise olukorra jaoks panna kirja järgmise võrrandi:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\delta_1}{k_1} + \frac{\delta_2}{k_2} + \frac{\delta_3}{k_3}} \quad 2.10$$

Võrrand 2.10 annab võimaluse arvutada kas läbi teatava pinna kantavat soojushulka, või soojusvahetuseks vajaliku soojusvahetuspinna suuruse.

Soojusjuhtivus õõnsas silindris (torus) (Geankoplis, lk 242)

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dr}$$

$$Q = 2\pi Lk \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk}$$

$$Q = -kA_{lm} \frac{T_2 - T_1}{r_2 - r_1} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{r_2 - r_1}{kA_{lm}}} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$R = \frac{r_2 - r_1}{kA_{lm}}$$

$$A_{lm} = \frac{A_2 - A_1}{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)} = \frac{2\pi Lr_2 - 2\pi Lr_1}{\ln\left(\frac{2\pi Lr_2}{2\pi Lr_1}\right)} = \frac{2\pi L(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

ÜLESANDED

Ülesanne 2.10.

Mitu korda suureneb terasplaadi (plaadi paksus on 2,5 mm) soojustakistus selle katmisel 0,5 mm paksuse emailikihiga. Soojusjuhtivustegurid: $k_{\text{teras}} = 46,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $k_{\text{email}} = 1,05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Ülesanne 2.11

Aurutorustik mõõtmatega $L = 40 \text{ m}$ ja $D = 51 \times 2,5 \text{ mm}$ on kaetud 30 mm paksuse isolatsioonikihiga, mille soojusjuhtivustegur on

0,116 W/(m·K). Isolatsioonikihi välispinna temperatuur on 45°C ja sisepinnal 175°C. Arvutada soojuskadu tunnis [kJ/h].

Ülesanne 2.12

Külmutusseadme toru (60×3 mm) on kaetud kahekordse isolatsioonikihiga. Alumine korgikiht – 30 mm, ja pealmine soveliidist kattekiht – 40 mm. Toru välisseina temperatuur on -110°C ja isolatsiooni välispinnal +10°C. Kihtide soojusjuhtivustegurid on: korgil 0,047 W/(m·K), kattekihil 0,098 W/(m·K). Arvutada 1 m pikkuse toru külma kadu tunnis [kJ/h].

Ülesanne 2.13

Mitu % suureneb külma kadu eelmise ülesande tingimustes, kui teha seesmine kiht soveliidist (40 mm; 0,098 W/(m·K)) ja välimine korgist (30 mm; 0,047 W/(m·K))?

Ülesanne 2.14.

Leida aparaadi müüritise sisepinna temperatuur, kui müüritise välispinna temperatuur on 35°C. Müüritise paksus on 260 mm. Termomeeter, mis on paigutatud müüritisse 50 mm sügavusele välispinnast, näitab 70°C.

Ülesanne 2.15.

Geankoplis 4.3-9, lk 346

Ülesanne 2.16.

Geankoplis 4.3-3, lk 345

Ülesanne 2.17.

Roostevabast terasest $\{k_A = 21,63 \text{ W/(m·K)}\}$ toru sisediameetriga 0,0254 m ja välisdiameetriga 0,0508 m on kaetud

isolatsioonikihiga, mille paksus on 0,0254 m. Isolatsioonmaterjali soojusjuhtivustegur on 0,2423 W/(m·K). Toru sisepinna temperatuur on 811 K, isolatsioonikihi välispinna temperatuur on 310,8 K. 1) Arvutada soojuskadu [W], kui toru pikkus on 0,305 m. 2) Leida temperatuur metalli ja isolatsioonmaterjali piirpinnal [K] ja [°C].

Ülesanne 2.18.

Terastoru $\{k_A = 46,5 \text{ W/(m·K)}\}$ diameetriga 58×3 mm ja pikkusega 5 m on kaetud kahekordse isolatsioonikihiga. Sisemise kihi paksus on 25 mm $\{k_B = 0,052 \text{ W/(m·K)}\}$, välimise kihi paksus on 45 mm $\{k_C = 0,12 \text{ W/(m·K)}\}$. Leida soojuskadu ja temperatuur isolatsiooni välispinnal, kui temperatuur terastoru sisepinnal on 130°C ja kahe isolatsioonikihi piirpinnal on 80°C.

Ülesanne 2.19.

Terastoru mõõtmetega 60,33×3,91 mm on kaetud 25,4 mm isolatsioonikihiga. Toru sisepinna temperatuur on 121,1°C ja isolatsioonmaterjali välispinna temperatuur on 26,7°C. Leida soojuskadu [W], kui toru pikkus on 30,5 m. Leida toru välispinna temperatuur. Terasel soojusjuhtivustegur on 45 W/(m·K), isolatsioonmaterjali soojusjuhtivustegur on 0,182 W/(m·K).

Ülesanne 2.20.

Klaasakna pindala on 0,6 m². Toa välisseina mõõtmed on 2,44×3,05 m. Sein on tehtud materjalist, mille soojusjuhtivustegur on 0,15 W/(m·K). Seina paksus on 25,4 mm, klaasi paksus on 3,2 mm. Õhu temperatuur toas on 27°C, välisõhu temperatuur on -6°C. Leida summaarne soojuskadu [W] (konvektiivset soojuslevi mitte arvestada).

3. Soojuslevi mehhanismid

Soojusjuhtivuse korral levib soojusenergia aine mikroosakeste soojusliikumise tulemusena (mikroosakeste kokkupõrgetes).

Gaasides ja vedelikes toimub molekulide liikumine; tahketes kehaes toimub kristallvõre võnkumine; metallides – vabade elektronide liikumine. Soojusjuhtivus on peamine soojuslevi mehhanism tahketes kehaes; kui kehad on üksteisega vahetus kontaktis, siis ühe keha osakeste energia antakse vahetult üle teise keha osakestele.

Soojuslähikanne on soojusvahetusprotsess, milles soojus levib samaaegselt nii konvektsiooni, kui ka soojusjuhtivuse teel.

Konvektiivne soojusülekanne sõltub soojuskandjate liikumisest ja on seda efektiivsem, mida turbulentsem on fluidumi liikumine ja mida paremini toimub seal osakeste segamine. Konvektiivne soojusülekanne võib olla:

- **loomulik (vaba) konvektsioon**, mis on tingitud fluidumi tiheduste erinevusest,
- **sundkonvektsioon**, mis toimub pumpade, ventilaatorite vms abil.

Soojuskandja turbulentisel voolamisel on seinä ääres vedeliku liikumine laminaarne ja selles kihis on kõige suurem temperatuurigradient. Soojus levib seal soojusjuhtivuse teel ja konvektsiooni osakaal on väga väike. Voolu turbulentsetes tuumas

soojuslevi toimub valdavalt konvektsiooni teel. Selleks, et soojusülekanne toimuks intensiivselt, peab laminaarne soojuslik aluskiht olema võimalikult väike.

Soojuse levi saab hinnata temperatuurijuhtivuskoefitsientiga:

$$a = \frac{k}{c\rho} \quad 3.1$$

Reaalses olukorras on soojushulk, mis läheb läbi pinna konkreetse temperatuuriga seinalt, võrdeline temperatuuride vahe, pinna suuruse ja ajaga:

$$Q = hA(T_{sein} - T_{kk}) = hA\Delta T \quad 3.2$$

kus h on soojusülekanDETegur, $Wm^{-2}K^{-1}$

SoojusülekanDETegur sõltub mitmest tegurist: keskkonna hüdrodünaamika, fluidumi omadused (viskoossus, tihedus, soojusmahtuvus, soojusjuhtidus, soojuspaisuvustegur) ning voolu geomeetrilises parameetritest.

SoojusülekanDEVõrrand: Newton-Richmani valem

$$Q = h \cdot A \cdot (T - T_{sein}) \quad 3.3$$

kus h [$W/(m^2 \cdot K)$] – soojusülekanDETegur

A [m^2] – pind

T [K] – ühtlane fluidumi temperatuur

T_{sein} [K] – seina temperatuur

SoojusülekanDE korral kehtib järgmine kriteeriaalvõrrand:

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{Pr}{Pr_{sein}}, Gr, \frac{L}{d}, Pe, \dots) \quad 7.13$$

kus Nu – Nusselti kriteerium, $Nu = \frac{hl}{k}$ (l – süsteemi geomeetriline parameeter, toru sissediameter või ekvivalentdiameeter),

Pr – Prandtli kriteerium, $Pr = \frac{C_p \mu}{k}$ - näitab hüdrodünaamilise viskoosse aluskihi ja soojusliku aluskihi suhet,

Pr_{sein} – Prandtli kriteerium seina temperatuuril,

Gr – Grasgofi kriteerium, $Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta T}{\nu^2}$ - kirjeldab hõõrde-, inerts- ja üleslükkejõud.

Pe – Pecleti kriteerium, $Pe = Re Pr = \frac{wlc\rho}{\nu}$ - iseloomustab konvektiivsel ja konduktiivsel teel ülekantavate soojushulkade suhet.

Soojusülekande soojusenergia korral kehtivaid kriteeriaalvõrrandid

<i>Protsess</i>	<i>Nusselti kriteerium</i>
<i>Laminaarne liikumine läbi toru</i>	$1,86 * \left(Re * Pr * \frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$
<i>Turbulentne liikumine läbi toru</i>	$0,027 * Re^{0,8} * Pr^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$
<i>Vedela metalli turbulentne liikumine läbi toru</i>	$0,625 * Pe^{0,4}; Pe = Re * Pr$
<i>Laminaarne liikumine plaadi juures</i>	$0,664 * Re^{0,5} Pr^{\frac{1}{3}}$

<i>Turbulentne liikumine plaadi juures</i>	$0,0366 * Re^{0,8} * Pr^{\frac{1}{3}}$
<i>Liikumine sfääri juures</i>	$2,0 + 0,6 * Re^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}}$
<i>Loomulik konvektsioon erinevate pindade juures</i>	$a * (Gr * Pr)^m *$
<i>Keemine tuumas</i>	$h = 537 * (\Delta T)^{\frac{1}{7}} \text{ kui } \frac{q}{A} < 3$ $h = 7,95 * (\Delta T)^3 \text{ kui } 3 < \frac{q}{A} < 63$
<i>Keemine kelmes</i>	$h =$ $= 0,62 *$ $* \left[\frac{k_g^3 * \rho_g * (\rho_l - \rho_g) * g * (r + 0,4 * c * \Delta T)}{D * \mu_g * \Delta T} \right]^{\frac{1}{4}}$
<i>Kondensatsioon vertikaalsel pinnal laminaarse liikumise korral</i>	$1,13 * \left[\frac{\rho_l * (\rho_l - \rho_g) * g * r * L^3}{\mu_l * k_l * \Delta T} \right]$
<i>Kondensatsioon vertikaalsel pinnal turbulentse liikumise korral</i>	$0,0077 * \left(\frac{g * \rho_l^2 * L^3}{\mu_l^3} \right)^{\frac{1}{3}} * Re^{0,4}$

ÜLESANDED

Ülesanne 3,1.

Metaan suunatakse soojusvaheti torudevahelisse ruumi ülerõhul 5 at. Metaani keskmine temperatuur on 75°C ning kiirus 4,6 m/s. Soojusvaheti korpuses siseläbimõõduga 190 mm on 37 terastoru diameetriga 18×2 mm. Metaani soojusjuhtivustegur on 0,0413 W/(m·K).

Leida soojusülekande teguri väärtus [W/(m²·K)].

Soojusülekanne gaaside voolamisel sirgetes kanalites, kui $Re >$

10000: $Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$

Ülesanne 3,2.

Kuuma vedeliku jahutamiseks kasutatakse õhku, mida suunatakse toru-torus soojusvaheti torudevahelisse ruumi kiirusega 4,7 m/s. Soojusvaheti torude diameetrid on 40×2,5 mm ning 95×3,5 mm. Õhu keskmine temperatuur on 65,6°C. Eeldades seina konstantset temperatuuri (93,3°C), leida soojusülekande tegur õhu soojendamisel juhul kui $L/D > 60$.

Nusselti arvu leidmiseks kasutada võrrandit Geankopli raamatust.

Ülesanne 3.3.: Geankopli 4.6-1, lk 349

Ülesanne 3.4: Geankopli 4.6-3, lk 349

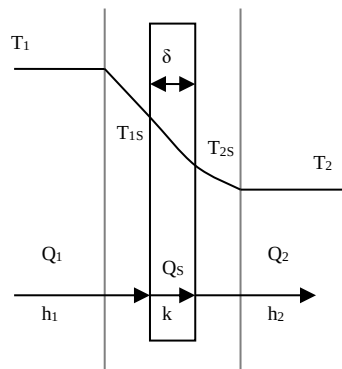
Vabakonvektsioon

Ülesanne 3.5: Geankopli 4.7-3, lk 349

Ülesanne 3.6: Geankopli 4.7-2, lk 349

4.Soojuslähikanne

Soojuslähikanne on soojuse levi ühelt soojuskandjalt teisele läbi seinast. See protsess koosneb soojusülekandest kahes fluidumis ning soojusjuhtivusest seinast. Soojuslähikande liikumispanevas jooks on kahe fluidumi temperatuuride vahe. Temperatuuride profiil sellel juhul näeb välja järgmine:



Soojuslähikannet saab matemaatilised kirjeldada järgmiselt:

$$Q = UA(T_1 - T_2) \quad 4.1$$

kus U on soojuslähikandetegur, $Wm^{-2}K^{-1}$.

Samas, soojuslähikannet saab esitada ka järgmiselt:

$$Q = Q_1 = Q_s = Q_2 = h_1 A(T_1 - T_{1s}) = \frac{k}{\delta} A(T_{1s} - T_{2s}) = h_2 A(T_2 - T_{2s}) \quad 4.2$$

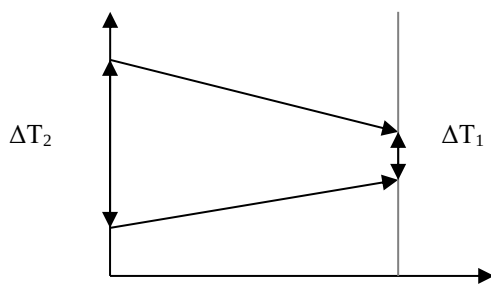
Vastavalt sellele, sõltub soojuslähikandetegur mõlema fluidumi soojusülekandestegurist ning seinast soojusjuhtivustegurist ja paksusest:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum \frac{\delta}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad 4.3$$

4.1. Soojuslähikande protsessi liikumispaneel jõud

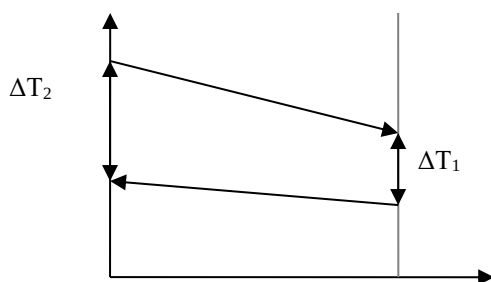
Kahe fluidumi liikumisel soojusvahetis, muutub nende temperatuuride vahe ehk soojuslähikande protsessi liikumispaneel jõud.

Temperatuuride muutusi kahe fluidumi liikumisel soojusvahetis päri- ja vastuvooluga saab väljendada järgmiselt:



pärivool

$$\Delta T_{\text{kesk}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad 4.4$$



vastuvool

$$\text{Või, kui } \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \leq 2$$

$$\Delta T_{\text{kesk}} = \frac{\Delta T_2 + \Delta T_1}{2} \quad 4.5$$

Paljudes arvutustes figureerib seina temperatuur. Seda saab arvutada kasutades soojusülekanne- ja soojuslähikande võrrandeid järgmiselt:

$$T_{1s} = T_1 - \frac{U\Delta T_{kesk}}{h_1} \quad \text{ja} \quad T_{2s} = T_2 + \frac{U\Delta T_{kesk}}{h_2} \quad 4.6$$

4.2. Keemine ja kondensatsioon on protsessid, kus soojusülekanne toimub koos faasimuutusega.

Keemisel vedelik läheb üle gaasilisse oleku ja see protsess algab vedeliku keemistemperatuuril kasutatava aparaadi rõhul. Nendes tingimustes soojuspinna temperatuur peab olema kõrgem, kui vedeliku keemistemperatuur ja keemise režiim sõltub nende temperatuuride vahest.

Kondensatsioon on vastupidine nähtus, kus gaas läheb üle vedelasse oleku ja toimub siis, kui aur sattub kontakti pinnaga, mille temperatuur on auru omast madalam.

Peab silmas pidama, et keemise- ja kondensatsiooniprotsessis kondenseeruva või keeva fluidumi temperatuur jääb konstantseks ja soojusvoog on avaldatav järgmisel kujul:

$$Q = Gr_a \quad 4.8$$

kus r_a – on aurustamissoojus (kondensatsioonissoojus) aurustumistemperatuuril. (soojushulk, mida on vaja 1 kg aurustamiseks konstantsel temperatuuril ja rõhul).

ÜLESANDED

Ülesanne 4.1.

Soojusvahetisse siseneb kuum vesi (1 kg s^{-1}) temperatuuriga 55°C , ning väljub temperatuuriga 32°C . Külma vee (1 kg s^{-1}) temperatuur soojusvahetisse sisenemisel on 8°C , ning väljumisel 31°C . Leidke soojusvahetuse keskmine liikumapanev jõud päri- ja vastuvoolu korral, ning koostage ja arvutage soojusbilanss.

Ülesanne 4.2.

Kondensaatoris toimub benseeni soojendamine. Benseeni temperatuur soojusvahetisse sisenemisel on 20°C , ning väljumisel $80,2^\circ\text{C}$. Kütteauru temperatuur on 150°C . Leidke soojusvahetuse keskmine liikumapanev jõud päri- ja vastuvoolu korral

Ülesanne 4.3. PR N 4.11 $V: 1) \Delta T_k = 130,13^\circ\text{C}; 2) \Delta T_k = 180^\circ\text{C}, \Delta T_k = 179,58^\circ\text{C} (\log \text{ kesk})$

Leida keskmine temperatuuride vahe päri- ja vastuvooluga töötavale vedelik-vedelik soojusvahetile, kui kuum vedelik jahtub 350°C kuni 220°C ja külm vedelik soojeneb 25°C kuni 185°C .

Ülesanne 4.4. PR 4.15

$V: 1) \Delta T_k = 36,68^\circ\text{C}; 2) \Delta T_k = 50,5^\circ\text{C},$

$\Delta T_k = 50,3^\circ\text{C} (\log \text{ kesk})$

Aurustist väljuvat kuuma kontsentreeritud lahust temperatuuriga 106°C kasutatakse külma lahja lahuse soojendamiseks temperatuurist 15°C kuni 50°C -ni. Leida keskmine temperatuuride vahe päri- ja vastuvoolu soojusvahetis, kui kuuma lahuse lõpptemperatuur on 60°C .

Ülesanne 4.5. PR N 4.7 $V: U = 0,8889 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}); q_A =$

$1222 \text{ W}/\text{m}^2; T_3 = 733^\circ\text{C}$

Ahju sein koosneb kahest kihist: tulekindla tellise kiht (600 mm) on kaetud ehitustellise kihiga (300 mm). Temperatuur ahju sees (T_1)

on 1400°C ja väliskeskkonnas (T_5) on 25°C . Leida soojuslähikandegur, ahju soojuskadu 1 m^2 seinä välispinnalt ja temperatuur kihtide piirpinnal (T_3), kui soojusüleandegur suitsugaasidelt seinä sisepinnale (h_1) on $34,8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ja välisseinalt keskkonda (h_2) on $16,2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Soojusjuhtivustegurid: tulekindel tellis (k_1) – $1,16\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ehitustellis (k_2) – $0,58\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Ülesanne 4.6. PR 4.13

$$V: \Delta U/U_1 = -4,6\%$$

Soojusvaheti koosneb 3 mm paksuse seinaga terastorudest. Kuidas muutub gaasi vesijahuti soojuslähikandegur, kui terastoru seintele moodustub katlakivi kiht paksusega 2 mm? Gaasi soojusüleandegur on $58\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, vee soojusüleandegur on $580\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Terase soojusjuhtivustegur on $46,5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, katlakivi soojusjuhtivustegur on $2,17\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Ülesanne 4.7. PR 4.18

$$V: a) A = 2,2\text{ m}^2, m_{iv} = 3546\text{ kg/h}, b)$$

soojusvaheti ei sobi

a) Leida vajalik soojusvaheti jahutuspinna suurus 350 kg/h etanooli küllastatud auru kondenseerimiseks atmosfääri rõhu juures, kui soojuslähikandegur on $700\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Jahutusvee temperatuur muutub $15^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$. Vedel etanool väljub jahutist kondensatsioonitemperatuuril. Leida jahutusvee kulu $[\text{t/h}]$.

b) Kas olemasolev torukimpsoojusvaheti 19 messingtoruga (ühe toru diameeter on $18\times 2\text{ mm}$ ning pikkus $1,2\text{ m}$) on selleks otstarbeks sobiv?

1. Etanooli keemistemperatuur (PR tab. XLIV):

$$T_{keem} = 78,3^{\circ}\text{C}$$

Etanooli aurustamissoojus (PR tab. XLV):

T [$^{\circ}\text{C}$]	ΔH_{aur} [kJ/kg]
60	879.9
100	812.9

Ülesanne 4.8. PR 4.20

$V: U = 2135 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

Soojusvahetis pinnaga 48 m^2 soojendatakse $85,5 \text{ t/h}$ vett $77^\circ\text{C} \rightarrow 95^\circ\text{C}$. Soojendamiseks kasutatakse küllastatud kütteauru, mille ülerõhk on $19\,495 \text{ Pa}$. Leida soojuslähikandeteguri väärtus.

Ülesanne 4.9. PR 4.17

$V: m = 1822 \text{ kg/h}$

Vastuvoolusoojusvahetis pinnaga 6 m^2 jahutatakse 1930 kg/h butanooli $90^\circ\text{C} \rightarrow 50^\circ\text{C}$. Jahutusvee algtemperatuur on 18°C . Soojuslähikandetegur on $230 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Leida jahutusvee kulu $[\text{kg/h}]$ eeldusel, et ΔT_k tohib arvutada kui aritmeetilist keskmist. Butanooli soojusmahtuvus temperatuuril 70°C : $c_p = 2,525 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$.

Ülesanne 4.10. PR 4.22

$V: m_1 = 39,7 \text{ t/h}; m_2 = 144,8 \text{ t/h}; A_1 = 18 \text{ m}^2; A_2 = 356 \text{ m}^2$

Kondenseeritakse 10 t/h küllastatud n-heksaani auru 70°C juures. Vedel heksaan väljub seadmest kondensatsioonitemperatuuril. Kondensaatori jahutamiseks võib kasutada 1) vett, mis soojeneb $16^\circ\text{C} \rightarrow 36^\circ\text{C}$, 2) õhku $25^\circ\text{C} \rightarrow 48^\circ\text{C}$. Mõlemal juhul on heksaani kondensatsioonil soojusülekanne $(h_{heks.})$ $1700 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Soojusülekanne vee jaoks on $3500 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ning õhu jaoks $85 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Sein soojustakistus mitte arvestada. Heksaani kondensatsiooni erisoojus on $33,3 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$. Vee soojusmahtuvus on $4190 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, õhu soojusmahtuvus on $1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Leida vee ja õhu kulu – m_1, m_2 $[\text{t/h}]$, vajalikud soojusvahetuspinnad – A_1, A_2 $[\text{m}^2]$.

Ülesanne 4.11.

Soojusvahetis pinnaga 48 m^2 soojendatakse $85,5 \text{ t/h}$ vett $77^\circ\text{C} \rightarrow 95^\circ\text{C}$. Soojendamiseks kasutatakse küllastatud kütteauru, mille ülerõhk on $19\,495 \text{ Pa}$. Leida soojuslähikandeteguri väärtus.

Ülesanne 4.12.

Vastuvoolusoojusvahetis pinnaga 6 m^2 jahutatakse 1930 kg/h butanooli $90^\circ\text{C} \rightarrow 50^\circ\text{C}$. Jahutusvee algtemperatuur on 18°C . Soojuslähikandegur on $230 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Leida jahutusvee kulu $[\text{kg/h}]$ eeldusel, et ΔT_k tohib arvutada kui aritmeetilist keskmist. Butanooli soojusmahtuvus temperatuuril 70°C : $c_p = 2,525 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Ülesanne 4.13.

Kui suur peab olema kütteauru (küllastatud veeaur, $p_{\text{abs}}=3 \text{ at}$) kulu, et aurustada $2.4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ keemistemperatuuril olevat butanooli (keemistemperatuur 117.7°C , aurustumissoojus 589.5 kJ kg^{-1})? Leida ka vajalik soojusvahetuspind, kui soojusvaheti soojuslähikandekoefitsient on $800 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Kütteaur:

$p_{\text{abs, ka}}=3 \text{ at}$: $i' = 558.9 \text{ kJ kg}^{-1}$ – vedeliku erientalpia

$i'' = 2730 \text{ kJ kg}^{-1}$ – auru erientalpia

$T_{\text{ka}} = 132.9^\circ\text{C}$

Butanool:

Temperatuur, $^\circ\text{C}$	100	120
Tihedus, kg m^{-3}	751	735

Temperatuur, $^\circ\text{C}$	100	140
Aurustumissoojus, kJ kg^{-1}	611.7	561.5

Ülesanne 4.14.

Millise temperatuurini soojeneb 2 tonni CaCl_2 lahust, kui kütteauru (aurustumissoojus 2080 kJ kg^{-1}) kulub 2 tunni jooksul 200 kg ? Soojuskaod aparaadi ülessoojenemiseks ja ümbritsevasse keskkonda on 2030 W . Lahuse algtemperatuur on 10°C ja soojusmahtuvus on $2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Ülesanne 4.15.

Vastuvoolu kondensaatoris kondenseerub atmosfäärirõhul 850 kg CS₂ auru tunnis. CS₂ aurud sisenevad kondensaatorisse temperatuuril 90 °C ja väljuvad kondensatsioonitemperatuurist 8 °C madalamal temperatuuril. Määrata kondensaatoris jahutusveele üleantav soojushulk. CS₂ keemistemperatuur on 46 °C; CS₂ aurustumissoojus 20 °C juures on 367 kJ kg⁻¹ ning 60 °C juures on 344.4 kJ kg⁻¹; CS₂ aurude keskmine soojusmahtuvus on 670 J kg⁻¹ K⁻¹. Vedela CS₂ keskmine soojusmahtuvus on 1500 J kg⁻¹ K⁻¹.

5. AURUSTAMINE

Aurustamine on lahuse kontsentreerimine lenduva lahusti väljaurustamisel. Protsess toimub lahusti keemistemperatuuril aurutusaaparaadis oleval rõhul ja teda saab teostada nii selleks, et saada lahti üleliigsest lahustist ning kontsentreerida lahust, või vastupidi, selleks et saada lahusti puhtal kujul, näiteks mageda vee tootmisel mereveest.

Aurustamist mõjutavad järgmised **faktorid**:

- lahuse kontsentratsioon protsessis muutub ja koos sellega muutuvad lahuse viskoossus (reeglina suureneb) ja soojuslähikandegur (sageli langeb);
- aine lahustuvus sõltub temperatuurist (tavaliselt kasvab temperatuuri tõusuga) ja lahuse allajahtumisel peale aurustamist võib järgneda kristallisatsioon;
- aine temperatuuritundlikkus mõjutab temperatuuri ja rõhu valikut, sest ained ei tohi laguneda protsessi toimel;
- lahuse vahutamise võimalus tähendab seda, et koos lahusti aurudega väljub aurutusaparaadist ka osa lahust;
- tahke sette teke aparaadi seinale vähendab soojuslähikandegurit ning suurendab energiakulu;
- teised lahuse füüsilised omadused (soojusmahtuvus, kontsentreerimissoojus, keemiline agressiivsus, toksilisus, plahvatusohtlikkus, külmemispunkt) on samuti tähtsad protsessi ohutul läbiviimisel.

- konstruktsioonimaterjalid ja nende keemilised ja mehhaanilised omadused peavad garanteerima maksimaalse võimaliku soojusvahetuse kiiruse.

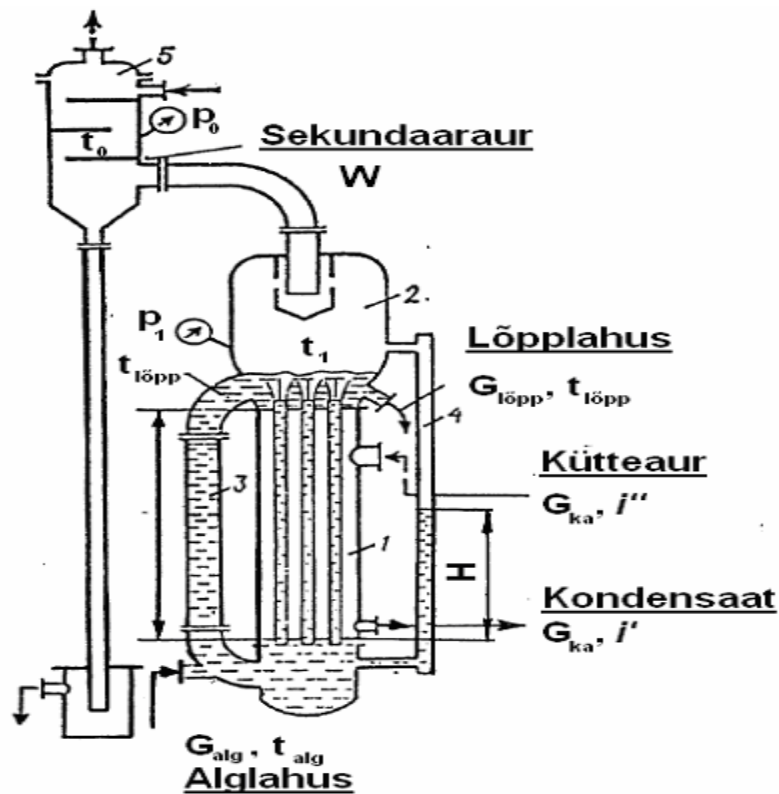
Aurustamist saab viia läbi järgmiselt:

- ühekorpuselises aparaadis, kus lahustatakse soojendatakse **kütte-** e. **primaaraauruga**. Tekkinud lahusti aur e. **sekundaaraur** eemaldatakse süsteemist ning kondenseeritakse.
- mitmekorpuselises aparaadis, kus eelmise aurusti sekundaarauru kasutatakse järgmise korpuse küttauruna. Selleks võib aga olla vaja langetada rõhku igas järgmises aurustis eelmisega võrreldes.

Kõik aurustid võivad töötada:

- atmosfäärirõhul (kõige lihtsam kuid ebaefektiivne viis),
- alarõhul (madalam lahuse keemistemperatuur, suurem auramissoojus ja kasulik temperatuuride vahe),
- atmosfäärirõhust kõrgemal rõhul (kõrged sekundaarauru temperatuurid).

Ühekorpuselise aurusti temperatuurirežiime saab vaadelda järgmise aparaadi baasil:



Skeemis on näidatud aurusti, milles toimub vedeliku liikumine alt ülesse ja mis on varustatud baromeetrilise kondensaatoriga sekundaarauru kondenseerimiseks.

Rõhkude, temperatuuride ja kulude tähistused seadmes on järgmised:

- alglahus: t_{alg} , G_{alg} , C_{alg}
- kütteaur: t_{ka} , P_{ka} , G_{ka}
- lahuse keemine küttekeha juures: t_{keem} , P_{keem}
- lahuse keemine separaatoris: $t_{lõpp}$, P_1 , $G_{lõpp}$, $C_{lõpp}$
- aurufaas separaatoris: t_1 , P_1 , W
- baromeetriline kondensaator: t_0 , P_0 , W

5.1. Temperatuuri muutused aurustamisprotsessis

Temperatuuride muutused seadmes: $t_0 < t_1 < t_{l\ddot{o}pp} < t_{keem} < t_{ka}$

Aurustumise protsessis ilmneb sageli selline juhus, et lahuse keemistemperatuur on kõrgem võrreldes puhta lahusti keemistemperatuuriga samal rõhul. Seda nähtust nimetatakse **temperatuuriliseks depressiooniks**.

$$\Delta t_{depr} = (t_{keem,lahus} - t_{keem,lahusti})_p \quad 5.1$$

Kui vaadata meie aparati, siis

$$\Delta t_{dept} = (t_{l\ddot{o}pp} - t_1) \quad 5.2$$

Kui aparadi torud on suhteliselt pikad, hakkab protsessis mängima rolli **hüdrostaatiline depressioon** mis on põhjustatud vedelikusamba rõhust aurustis:

$$\Delta t_{hs} = t_{keem} - t_{l\ddot{o}pp} \quad 5.3$$

kus t_{keem} on lahuse keemistemperatuur järgmisel rõhul:

$$P_{kesk} = P_1 + \Delta P_{hs} = P_1 + 0.5 \rho_{lahus} gH \quad 5.4$$

Hüdrauliline depressioon on sekundaarauru temperatuuride vahe separaatoris ja baromeetrilises kondensaatoris, mille põhjuseks on hüdrauliline takistus auru liikumisel torudes:

$$\Delta t_{h\ddot{u}dr} = t_1 - t_0 \quad 5.5$$

Aurusti töö efektiivsust saab iseloomustada kahe põhilise teguriga. Need on

- tootlikkus: aurustatud lahusti kogus ajaühikus (sekundaarauru kulu)
- ökonoomsus: aurustatud lahusti hulk 1 kg tarbitud kütteauru kohta.

8.2. Aurustamisprotsessi materjali- ja soojusbilansid

Üldise materjalibilansi ühekorpuselisele aurustile saab kirja panna järgmiselt:

$$G_{alg} = G_{lõpp} + W \quad 5.6$$

kus G_{alg} on algse lahuse kulu,

$G_{lõpp}$ on aurustatud lahuse kulu, ning

W on aurustamisel tekkinud sekundaarauru kulu.

Materjalibilansi saab koostada ka lahustunud aine kohta:

$$G_{alg} x_{alg} = G_{lõpp} x_{lõpp} \quad 5.7$$

kus x on lahustunud aine kontsentratsioon.

Aurusti **soojusbilansi** üldkujul saab kirja panna järgmiselt:

$$G_{alg} C_{alg} t_{alg} + G_{ka} h_{ka_{alg}} = G_{lõpp} C_{lõpp} t_{lõpp} + G_{ka} h_{ka_{kond}} + Wh_{sa} + Q_{konts} + Q_{kadu} \quad 5.8$$

kus C_{alg} ja $C_{lõpp}$ alg ja lõpplahuse soojusmahtuvused,

$h_{ka_{alg}}$ ja $h_{ka_{kond}}$ on alg- ja kondenseerunud kütteauru entalpia.

h_{sa} – sekundaarauru entalpia,

Q_{konts} – kontsentreerimissoojus,

Q_{kadu} – soojuskaod.

Aurustamiseks **vajaliku soojushulga** saab avaldada järgmiselt:

$$Q = G_{ka} (h_{ka_{alg}} - h_{ka_{kond}}) = G_{lõpp} C_{lõpp} t_{lõpp} - G_{alg} C_{alg} t_{alg} + Wh_{sa} + Q_{kon} + Q_{kadu} \quad 5.9$$

ÜLESANDED

Ülesanne 5.1.

Aurutusaparaati siseneb atmosfäärirõhul 2.69 t h^{-1} alglahust kontsentratsiooniga 7 %. Lahuse algtemperatuur on $95 \text{ }^{\circ}\text{C}$, lõpp-temperatuur $103 \text{ }^{\circ}\text{C}$, keskmine keemistemperatuur aparaadis on $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Küllastatud kütteauru ülerõhuks on 2 kgf cm^{-2} . Soojusvahetuspinnaks on 52 m^2 , soojuslähikandeteguriks $1060 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, soojuskaod on 110000 W . Leidke lahuse lõpp-kontsentratsioon, ning kütteauru kulu, eeldades, et see sisaldab 5 % vett.

Kütteaur:

$p_{\text{abs, ka}} = 3 \text{ at}$: $i' = 558.9 \text{ kJ kg}^{-1}$ – vedeliku erientalpia

$i'' = 2730 \text{ kJ kg}^{-1}$ – auru erientalpia

$T_{\text{ka}} = 132.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Sekundaarauru entalpia lahuse lõpp-temperatuuril:

Temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	100	105
$i_{\text{sa}}, \text{ kJ kg}^{-1}$	2679	2687

Ülesanne 5.2.

Leidke temperatuuriline depressioon 10 %-ilise NaOH lahuse keemisel, kui absoluutne rõhk keeva lahuse kohal on 0.36 kgf cm^{-2} .

Vee keemistemperatuur rõhul 0.36 kgf cm^{-2} :

Rõhk, kgf cm^{-2}	0.3	0.4
Temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	68.7	75.4

Ülesanne 5.3.

Eelmise ülesande põhjal leidke hüdrostaatiline depressioon, kui NaOH lahuse kihi kõrgus aurusti torudes on 5 m. Milline on NaOH lahuse keemistemperatuur antud aparaadis?

Vee keemistemperatuur aparaadis oleva rõhu juures:

Rõhk, kgf cm^{-2}	0.6	0.7
Temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	85.8	89.3

Ülesanne 5.4.

Sekundaaraur liigub aurutist baromeetrilisse kondensaatorisse läbi 150 mm läbimõõduga toru. Auru kiirus torus on 50 m s^{-1} . Absoluutne rõhk kondensaatoris on 0.3 kgf cm^{-2} . Toru pikkuseks on 14 m, hõõrdetakistuskoeffitsient on 0.03. Torul on samuti kolm põlve kohttkistusega 0.2. Kohttakistuskoeffitsient sisenemisel torusse on 0.5, väljumisel torust 1.0. Leidke hüdrauliline depressioon.

$$\text{kgf cm}^{-2}: t_0 = 68.7^\circ\text{C}, \rho_{\text{aur}} = 0.188 \text{ kg m}^{-3}$$

Ülesanne 5.5. PR 5.5. $V: 1100 \text{ kg/h}$

Kui palju on vaja välja aurustada vett 1500 kg kaaliumkloriidi lahusest, et muuta lahuse kontsentratsioon $8\% \rightarrow 30\%$ (massi%)?

Ülesanne 5.6.

Aurusti tootlikus kontsentreeritud lahuse järgi on 2400 kg/h . Kui palju saadakse sekundaarauru, kui toite kontsentratsioon on 11% ja produkti kontsentratsioon on 40% ?

Ülesanne 5.7. PR 5.2. $V: 0,141 \text{ kg/s}$

Aurusti tootlikus alglahuse järgi on 2650 kg/h . Alglahuse kontsentratsioon on 50 g ainet 1 L vee kohta. Kontsentreeritud lahuse kontsentratsioon on 295 g 1 L lahuse kohta. Leida aurusti tootlikus kontsentreeritud lahuse järgi $[\text{kg/h}]$ ja $[\text{kg/s}]$.

Ülesanne 5.8. PR 5.6. $V: 529,5 \text{ kg}; 0,56 \text{ m}^3$

Kui palju on vaja välja aurustada vett 1 m^3 väävelhapest tihedusega 1560 kg/m^3 ($65,2 \text{ massi\%}$) et saada hape tihedusega 1840 kg/m^3 (kontsentratsioon $98,7\%$)? Kui suur on saadud kange happe maht $[\text{m}^3]$?

Ülesanne 5.9. PR 5.7. $V: 79 \text{ kW}$

Atmosfäärirõhul töötavasse aurustisse siseneb $1,4 \text{ t/h}$ 9% lahust, mis kontsentreeritakse 32% -ni (massi%). Lahja lahus siseneb aurustisse 18°C juures ja keeb 105°C juures. Kütteauru

kulu on 1450 kg/h ($P_{S\ \text{üle}} = 2\text{ at}$, niiskus 4,5%). Arvutada soojuskadu.

Ülesanne 5.10. PR 5.1. V : (a) 1,025 kg/kg; 1,068 kg/kg; (b) 1,184 kg/kg; 1,152 kg/kg

Leida kütteauru ($P_{abs} = 2\text{ at}$) erikulu vee aurustamisel atmosfäärirõhul (1 at) ning 0,8 at alarõhul, kui toide siseneb aurustisse (a) keemistemperatuuril, (b) algtemperatuuril 15°C. Kütteauru erikulu on suhe: S/W [kg/kg].

Ülesanne 5.11. PR 5.21. V : 2156 kg/h; 43,6 m²

Atmosfäärirõhul töötavasse aurustisse siseneb 2200 kg/h vesilahust, mis kontsentreeritakse 7% → 24%. Lahja lahus siseneb aurustisse 19°C juures. Temperatuurtri depressioonid: $\Delta' = 3,5^\circ\text{C}$, $\Delta'' = 3,0^\circ\text{C}$, $\Delta''' = 1,0^\circ\text{C}$. Kütteaur: ülerõhk 2 at, niiskus 5%. Soojuskadu on 5% kasulikust soojusest. Leida kütteauru kulu [kg/h] ja vajalik küttepind [m²], kui soojuslähikandetegur on 1100 W/(m²·K).

Ülesanne 5.12. PR 5.4. V : $P_{S2} = 3,57\text{ at}$

Aurusti töötab koormusega 1200 kg/h alglahust. Aurusti tootlikkust alglahuse järgi on vaja tõsta kuni 1900 kg/h. Aurustamine toimub atmosfäärirõhul. Lahus antakse aurustisse keemistemperatuuril 105°C. Algselt kasutati kütteauru ülerõhuga 1,5 at. Kui kõrgele peaks toodangu suurendamiseks tõstma kütteauru rõhku? Soojuskadu mitte arvestada. Eeldada, et soojuslähikandetegur ja lahuse lõppkontsentratsioon ei muutu.

Ülesanne 5.13. PR 5.13. V : 1427 kg/h; 981 kg/h; 3,9 m²

Aurustisse siseneb 12,5% ammooniumsulfaadi vesilahus, mis aurustatakse atmosfäärirõhul 30,6%-ni (massi%). Kontsentraati saadakse 800 kg/h. Aurusti soojuskadu on 6% kasulikust soojusest. Ammooniumsulfaadi lahuse keemistemperatuur atmosfäärirõhu juures on 103°C; $\Delta'' + \Delta''' = 6^\circ\text{C}$. Lahja lahus eelsoojendatakse 24°C → 80°C sekundaarauruga. Sekundaarauru ülejääk kulutatakse mujal.

Leida (a) küttauru kulu, kui küttauru ülerõhk on 2 at ja niiskus on 5%; (b) sekundaarauru ülejääk; (c) lahuse eelsoojendamiseks vajalik soojusvahetuspind, kui soojuslähikandetegur on $700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Ülesanne 5.14. PR 5.25. $V: 32 \text{ m}^3/\text{h}; 35 \text{ m}^3/\text{h}$

Kaaliumkarbonaadi vesilahus aurustatakse $8\% \rightarrow 36\%$ (massi%) alarõhul 0,2 at. Alglahuse kulu on 1500 kg/h . Leida (a) pindkondensaatoris kasutatava jahutusvee kulu $[\text{m}^3/\text{h}]$, kui sekundaarauru kondensaadi lõpptemperatuur on 5°C madalam kondensatsioonitemperatuurist; (b) baromeetrilises kondensaatoris kasutatava jahutusvee kulu $[\text{m}^3/\text{h}]$. Mõlemal juhul jahutusvesi soojeneb $15^\circ\text{C} \rightarrow 35^\circ\text{C}$.

Ülesanne 5.15. PR 5.27. $V: 35^\circ\text{C}$

Aurustis on alarõhk 0,7 at. Aurustisse siseneva lahja veelahuse masskulu on $2,4 \text{ t/h}$ ning selle kontsentratsioon on 12%. Lahuse lõppkontsentratsioon on 32%. Baromeetrilise kondensaatorisse suunatakse $38,6 \text{ m}^3/\text{h}$ jahutusvett temperatuuriga 12°C . Leida vee temperatuur kondensaatorist väljumisel. Temperatuuri depressioone mitte arvestada.

Ülesanne 5.16. PR 5.30. $V: W_{ise2} = 13,74 \text{ kg/h}$ ehk $4,1\% W_{2st}$

Päriooluga töötavasse kahekorpuselisse aurustisse pumbatakse 1000 kg/h NaNO_3 vesilahust. Lahuse algkontsentratsioon on 10%, esimesest korpusest väljuva lahuse kontsentratsioon on 15% ning selle temperatuur on 103°C , teisest korpusest väljuva lahuse kontsentratsioon on 30% ja temperatuur on 90°C . Kui palju vett $[\text{kg/h}]$ aurustub teises korpusis iseaaurustumise teel? Mitu % teises korpusis väljaaurustatud veest moodustub vesi, mis aurustub iseaaurustumise teel?

Depressioonid teises korpusis: $\Delta'_2 = 4^\circ\text{C}$, $(\Delta'' + \Delta''')_2 = 5^\circ\text{C}$.