



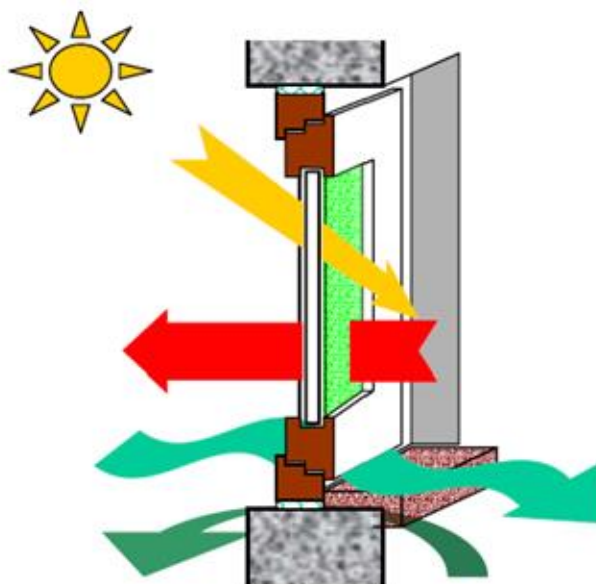
Industrijsko-obrtnička škola
Slavonski Brod

Nastavni program usavršavanja za poslove MONTER/KA SOLARNO TOPLOVODNIH SUSTAVA

Skripta za nastavnu cjelinu

IZMJENA TOPLINE

Autor: Antun Đurić, dipl. ing.



Slavonski Brod, 2020.

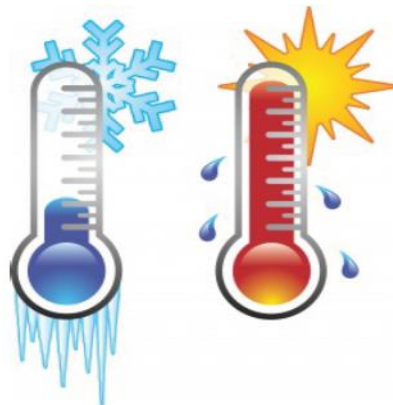
Sadržaj:

1. Fizikalne veličine stanja	4
1.1. Temperatura	4
1.2. Tlak.....	7
1.3. Specifični volumen.....	11
1.4. Protok.....	12
2. Strujanje fluida.....	13
2.1. Vrste strujanja.....	14
2.2. Laminarno strujanje	15
2.3. Turbulentno strujanje.....	15
3. Toplina i toplinski tok	16
3.1. Toplina	16
3.2. Toplinski tok	17
3.3. Sadržaj topline.....	17
4. Zakon kontinuiteta	18
5. Termodinamički procesi.....	19
5.1. Prvi glavni stavak termodinamike	20
5.2. Promjene stanja idealnih plinova.....	20
5.3. Kružni procesi	22
5.4. Drugi glavni stavak termodinamike	24
5.5. Termički stupanj djelovanja	24
5.6. Entalpija, entropija, eksergija	25
5.7. Isparavanje i ukapljivanje.....	27

6. Mehanizmi izmjene topline	28
6.1. Toplinska svojstva tvari	28
6.2. Širenje topline provođenjem.....	31
6.3. Širenje topline konvekcijom.....	31
6.4. Izmjena topline zračenjem.....	32
7. Izmjenjivači topline	33
7.1. Istosmjerni izmjenjivači topline	34
7.2. Protusmjerni izmjenjivači topline	35
7.3. Izmjenjivači topline s križnim strujanjem fluida.....	36
8. Dodatak.....	37
8.1. Toplinska svojstva plinova pri normalnom stanju	37
8.2. Toplinska svojstva vode.....	39
8.3. Toplinska svojstva nekih krutih tvari	40
8.4. Literatura	41

1. Fizikalne veličine stanja

Toplinsko stanje termodinamičkog sustava određeno je veličinama stanja koje to stanje definiraju. Npr. toplinsko stanje nekog plina u posudi određeno je njegovom temperaturom, tlakom i specifičnim volumenom. Prema tome: **temperatura, tlak i specifični volumen** su veličine stanja plina u posudi.



1.1. Temperatura

- je osnovna fizikalna veličina koja karakterizira stupanj zagrijanosti nekog tijela.

Dva tijela imaju istu temperaturu ako su u međusobnoj toplinskoj ravnoteži.

Mjerna jedinica temperature je **stupanj**, s oznakom temperaturne ljestvice po kojoj je temperatura mjerena.

U većini Europskih zemalja, za mjerenje relativnih temperatura (t), upotrebljava se **Celsiusova ljestvica** ($^{\circ}\text{C}$), čije su ishodišne točke: ledište (0°C) i vrelište (100°C) vode pri atmosferskom tlaku $p = 760 \text{ mm Hg} = 101\,325 \text{ Pa}$.

U Engleskoj i SAD-u upotrebljava se **Fahrenheitova ljestvica** ($^{\circ}\text{F}$), gdje je ledište vode na $+32^{\circ}\text{F}$, a vrelište na $+212^{\circ}\text{F}$.

U međunarodnom SI sustavu mjera uvedena je temperaturna ljestvica po **Kelvinu**, a osnovna mjerna jedinica je **stupanj Kelvina** (**K**). Po ovoj se ljestvici temperature izražavaju kao apsolutne temperature (T).

Stupanj Celsiusa i stupanj Kelvina su po veličini jednaki: $1^{\circ}\text{C} = 1 \text{ K}$, a iznosi temperatura definirani su odnosom:

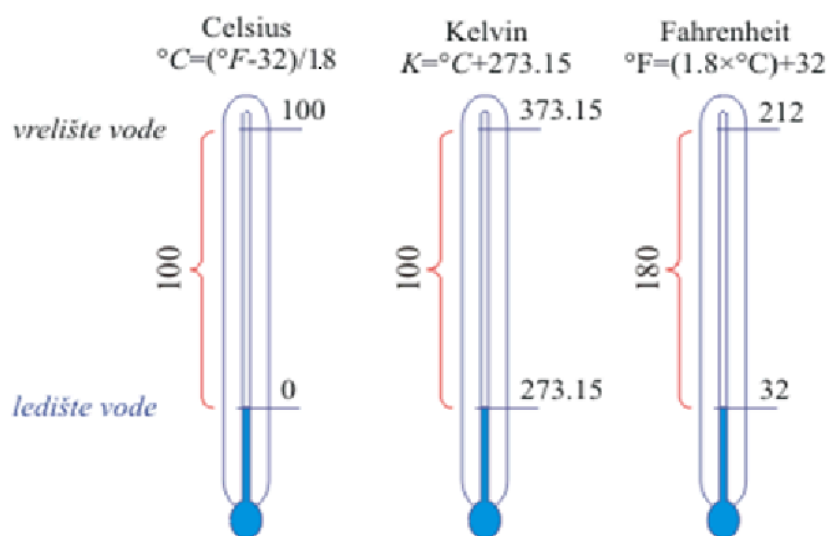
$$T \text{ K} = t \text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15 \quad \text{ili} \quad t = T - T_0,$$

gdje je T_0 apsolutna nula i iznosi 0 K , odnosno $-273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

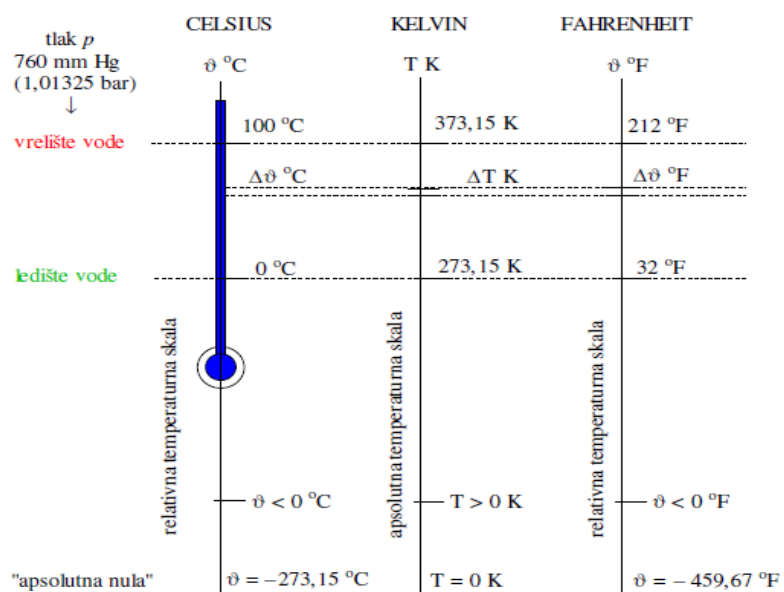
Instrumenti za mjerenje temperature su toplomjeri ili termometri. Ima ih više vrsta i konstrukcija, a najčešće se upotrebljavaju:

- tekućinski (živa ili alkohol);
- metalni (bimetalni) termometri;
- otporni termometri;
- termoelementi.

Usporedba ljestvica:

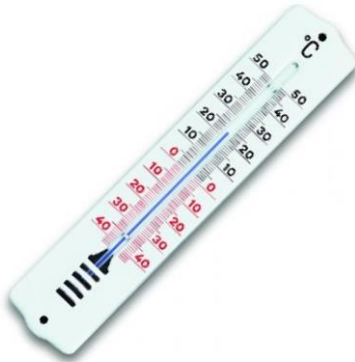


ili



Termometri:

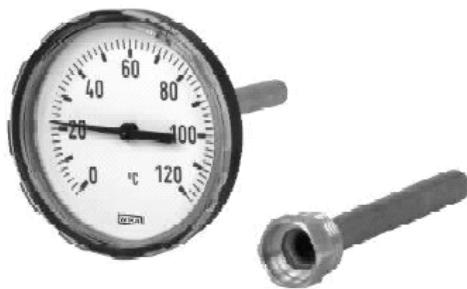
- klasični alkoholni:



- digitalni:



- bimetalni strojni:



- za kotlove (ravni):



- beskontaktni laserski IC:



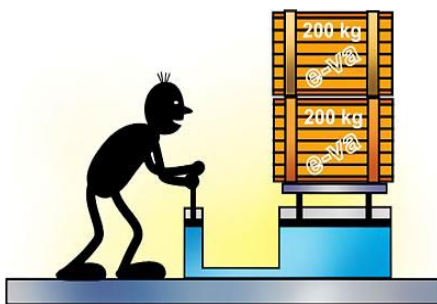
- otporni termoelementi:



Primjeri preračunavanja temperatura:

1. Temperaturu od $t = 85\text{ °C}$ izrazi u °F i K !?
2. $T = 190\text{ K}$. Koliko je to °C i °F ?
3. 100 °F pretvori u °C i K !?

1.2. Tlak



- je omjer sile F (N) i površine A (m^2) na koju ta sila djeluje (djelovanje sile na jedinicu površine).

Označava se slovom p , a mjerna jedinica je Pa – pascal (čitaj: paskal).

$$p = \frac{F}{A} , \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

(1 pascal je tlak što ga proizvodi sila od 1 newtona, koja je jednoliko raspoređena i djeluje okomito na površinu od jednog kvadratnog metra.)

Pascal je relativno mali tlak, pa se često koriste veće mjerne jedinice:

1 hPa (hektopascal)	= 100 Pa
1 kPa (kilopascal)	= 1000 Pa
1 MPa (megapascal)	= 1000 kPa
1 GPa (gigapascal)	= 1000 MPa

Još uvijek se kao mjerna jedinica upotrebljava i **bar** :

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 1000 \text{ hPa} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$$

Atmosferski tlak je tlak okoliša ili ambijenta, a stvara se djelovanjem Zemljine sile teže na površinu Zemlje. Mjeren na razini mora atmosferski tlak iznosi:

$$p_{\text{atm}} = p_0 = 101325 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa}$$

Ovaj tlak smanjuje se s povišenjem nadmorske visine, te se mijenja ovisno o meteorološkim uvjetima.

Atmosferski tlak mjerimo instrumentom zvanim **barometar** .

Apsolutni tlak (p_{ap}) je tlak plina, pare ili nekog drugog medija u zatvorenom prostoru, mjeren od tzv. apsolutnog nultog tlaka, tj. stanja u kojem nema nikakvog tlaka (zrakoprazni prostor ili 100 % vakuum).

Relativni tlak predstavlja razliku između apsolutnog i atmosferskog tlaka, a može biti:

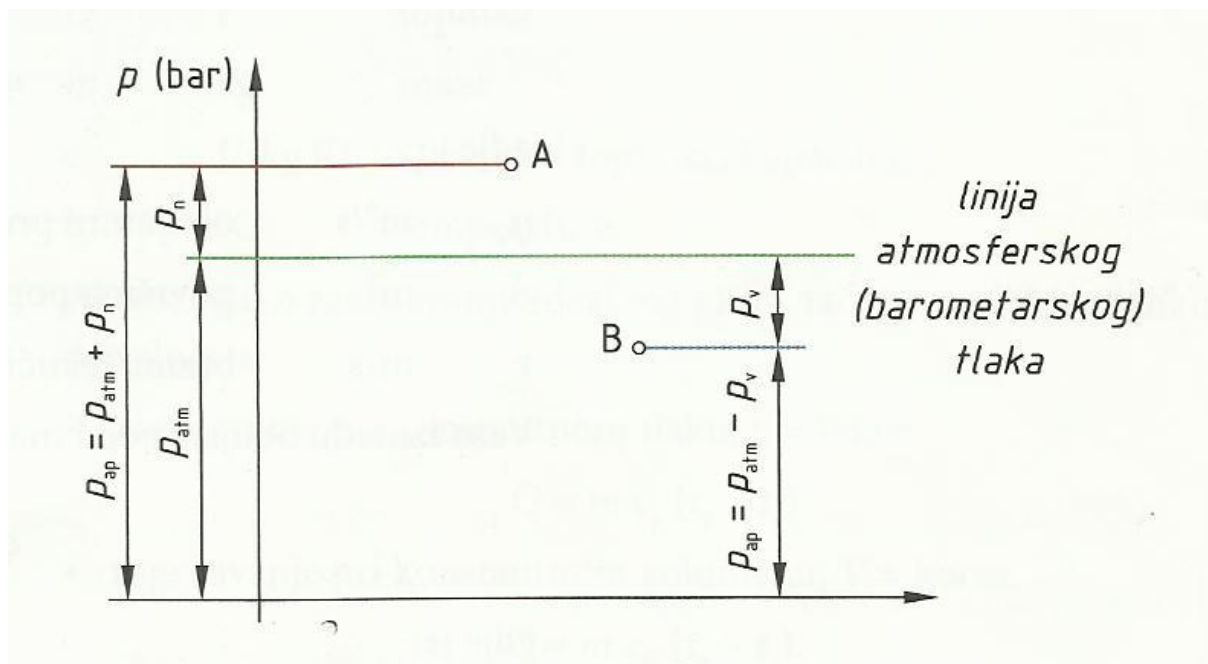
- manji od atmosferskog: podtlak ili vakuum (p_v);
- veći od atmosferskog: pretlak, nadtlak ili manometarski tlak (p_n).

$$p_v = p_{atm} - p_{ap}$$

$$p_n = p_{ap} - p_{atm}$$

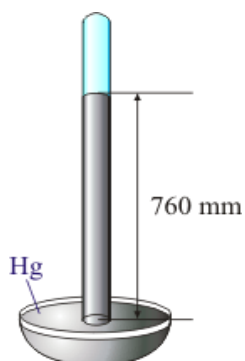
Instrument za mjerenje pretlaka je **manometar**, a podtlaka – **vakuummetar**.

Grafički prikaz odnosa tlakova:



Instrumenti za mjerenje tlaka:

Živin barometar:



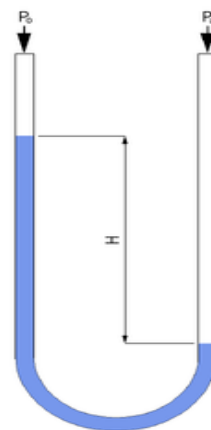
Suhi barometar:



Manometar za kisik:



U-cijev:



Digitalni diferencijalni manometar:



Vakuummetar:



Hidrostatski (hidrostatički) tlak

- je tlak tekućine u posudi, u stanju mirovanja.

Hidrostatski tlak je uzrokovan težinom tekućine koja na dubini h djeluje na površinu A , a proporcionalan je gustoći tekućine, konstanti gravitacije i visini stupca tekućine.

$$p = \rho g h$$

gdje je: p – hidrostatski tlak, Pa
 ρ – gustoća tekućine, kg/m³
 g – konstanta gravitacije = 9,81 m/s²
 h – visina stupca tekućine, m

Odnos visine stupca vode (SV) i tlaka:

Visina SV	Tlak, Pa	Tlak, bar
1 mm	9,81	0,0001
10 mm	98,1	0,001
100 mm	981	0,01
1 m	9810	0,1
5 m	49050	0,5
10 m	98100	1

Hidrometri su manometri kojima je mjerna ljestvica tlaka izražena u metrima stupca vode (mSV) .

Narinuti tlak

- je tlak u tekućinama ili plinovima koji nastaje zbog djelovanja sile na klip zatvorene posude.

Narinuti tlak definiran je silom na jedinicu površine:

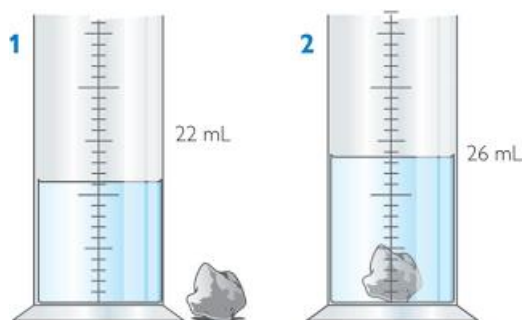
$$p = F / A , \text{ N/m}^2$$

Dok se hidrostatski tlak mijenja s visinom stupca vode, vrijednost je narinutog tlaka na svim razinama jednaka.

U svakoj točki sustava ukupni statički tlak jednak je zbroju hidrostatskog i narinutog tlaka:

$$p_{uk} = \rho g h + F/A , \text{ Pa}$$

1.3. Specifični volumen



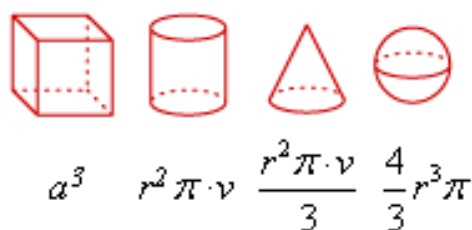
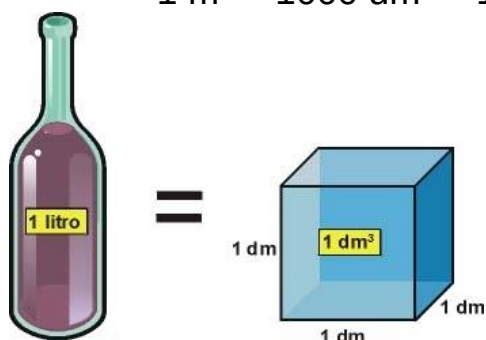
Masa (m) je mjera tromosti tijela. Jedna je od osnovnih veličina Međunarodnog sustava jedinica (SI). Osnovna mjerna jedinica je kilogram (kg), manje jedinice su: g, mg, μg , a 1000 kg je jedna tona (t).



Volumen (obujam, zapremina) je prostor koji zauzima čvrsta tvar, kapljevinu, para ili plin. Označava se slovom V , a osnovna mjerna jedinica je m^3 . Volumen kapljevinu najčešće mjerimo u litrama (l).

$$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$$

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3 = 1000 \text{ l}$$



Specifični volumen (v) nekog tijela je omjer njegova volumena V i njegove mase m :

$$v = \frac{V}{m}, \text{ m}^3/\text{kg}$$

Gustoća (ρ) je izvedena fizikalna veličina, kazuje nam kolika je masa neke tvari po jedinici obujma, recipročna je specifičnom obujmu:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}, \text{ kg/m}^3$$

Gustoća nekih tvari:

Tvari:	Gustoća ρ , kg/m ³
nestlačive (čvrste i kapljevite) tvari	
aluminij	2700
bakar	8300
čelik	7850
armirani beton	2400
voda (pri 4°C)	1000
led (pri 0°C)	917
etilen-glikol (pri 20°C)	1140
propilen-glikol (pri 20°C)	1050
stlačive tvari (plinovi) pri 101325 Pa i 0°C	
metan, CH ₄	0,7175
propan, C ₃ H ₈	2,011
butan, C ₄ H ₁₀	2,709
prirodni plin	0,783
dušik, N ₂	1,25
kisik, O ₂	1,429
ugljični dioksid, CO ₂	1,977

1.4. Protok

- predstavlja strujanje neke tekućine brzinom v (m/s) kroz otvor površine A (m²), odnosno obujam tekućine V (m³) u jedinici vremena t (s).

$$q_v = A \cdot v = V / t, \text{ m}^3/\text{s} \quad - \text{ obujmni (volumni) protok}$$

$$q_m = \rho \cdot q_v, \text{ kg/s} \quad - \text{ maseni protok.}$$



2. Strujanje fluida

Fluid = tekućina = kapljevina + plin + para + plazma + meka plastika

Pod fluidom se dakle podrazumijeva svaka tvar koja nije krutina (sve što teče).

Jedno od najbitnijih svojstava fluida je lakoća kojom se fluid giba odnosno struji. I najmanje smično naprezanje, ili neravnoteža normalnog naprezanja (tlakova), uzrokovat će kretanje fluida.

Strujanje odnosno gibanje fluida razlikuje se od gibanja materijalne točke odnosno čvrstog tijela. Uslijed lake međusobne pomičnosti čestica (elemenata) fluida, brzine čestica fluida imaju različitu veličinu i smjer.

Uzrok gibanja čestica fluida može biti jedna ili više sila koje na njih djeluju:

- a) **masene (volumenske) sile** poput sile teže, inercijskih sila (npr. centrifugalne sile) i sl.;
- b) **površinske sile** poput sile tlaka, koje nastaju zbog razlike tlakova u raznim točkama fluida, ili adhezijske sile;
- c) **sile viskoziteta** kao posljedica unutrašnjeg trenja među česticama fluida; i
- d) **elastične sile** (uglavnom kod plinova) zbog kompresibilnosti (stlačivosti) fluida.

2.1. Vrste strujanja

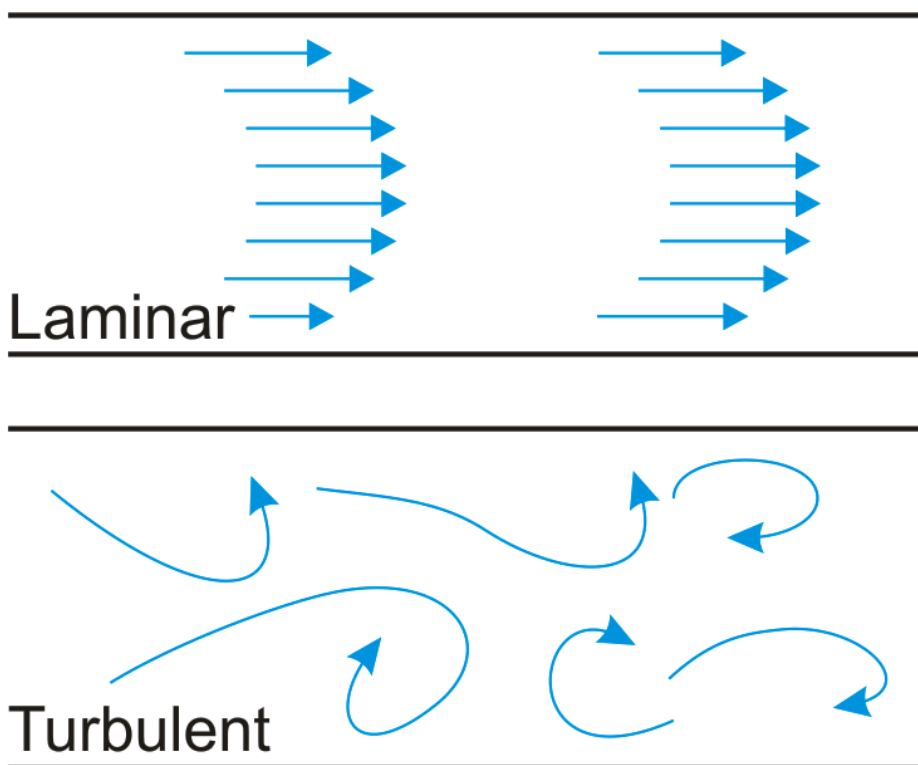
Strujanje fluida može biti jako složeno, ali u načelu razlikujemo dva različita načina strujanja fluida:

- **Stacionarno ili ustaljeno:** vektor brzine strujanja fluida, tlak i gustoća u nekoj točki fluida je isti u svakom trenutku. Ne dolazi do miješanja susjednih slojeva fluida (strujnice se ne sijeku);
- **Nestacionarno ili neustaljeno:** brzina, tlak i gustoća su funkcije prostora i vremena (ovisno o prostoru i vremenu nastaju vrtlozi).

Pri nestacionarnom gibanju fluida brzine se neprestano mijenjaju, pa je razmatranje ovakvog strujanja otežano. To je razlog da ćemo se dalje pozabaviti samo s razmatranjima koja se odnose na stacionarno strujanje.

Ovisno o dimenzijama i obliku kanala kroz koji se odvija strujanje, te brzini strujanja i vrsti fluida koji struji, razlikujemo:

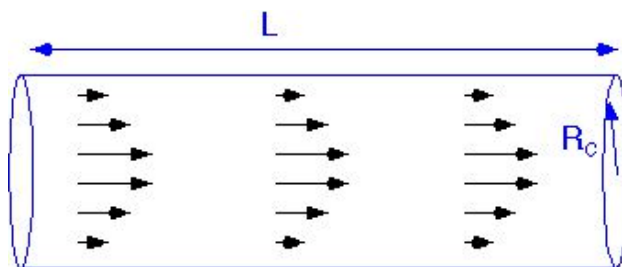
- **laminarno (slojevito) strujanje;**
- **turbulentno (vrtložno) strujanje.**



2.2. Laminarno strujanje

Pri laminarnom strujanju strujne linije su međusobno paralelne i nema prijelaza čestica fluida s jedne na drugu strujnu liniju.

U zatvorenoj cijevi kapljevina se kreće Laminarnim kretanjem, odnosno, pri manjim brzinama realni fluid (voda), struji laminarno, tj. u slojevima. Svaki sloj kapljevine ima svoju brzinu tako da je veća brzina strujanja u središtu cijevi nego uz samu cijev gdje je brzina kretanja tekućine gotovo jednaka nuli...

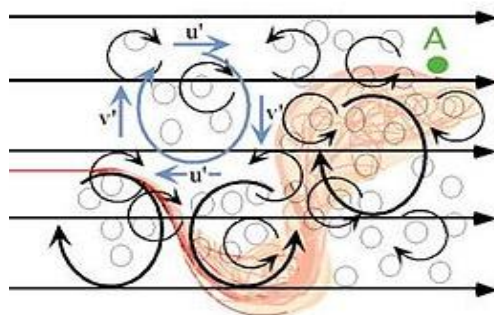


Ako brzina fluida postane veća od neke kritične brzine, strujanje iz laminarnog prelazi u turbulentno.

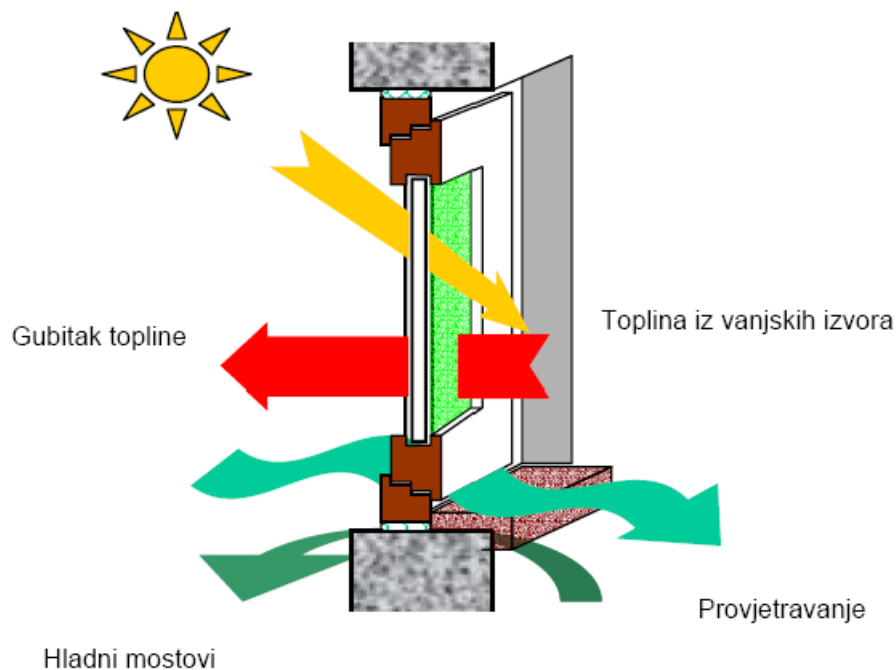
2.3. Turbulentno strujanje

Kod turbulentnog strujanja dolazi do miješanja slojeva fluida, pojavljuju se lokalna nepravilna strujanja po zatvorenim strujnim linijama koja zovemo vrtlozima, pojava vrtloga je nasumična.

Za turbulentno strujanje karakteristično je da pored srednje brzine cijelog strujanja, svaka čestica kapljevine ili plina ima još i dodatnu brzinu koja može biti djelomično u smjeru glavnog strujanja, djelomično suprotna na smjer strujanja.



3. Toplina i toplinski tok



3.1. Toplina

Toplina je energija koja prelazi s jednog tijela na drugo (s toplijeg na hladnije) zbog njihove temperaturne razlike.

Toplina se najčešće označava slovom Q .

Mjerna jedinica za toplinu (kao i za sve oblike energije) je joule (čitaj: džul); oznaka: 1 J, ili veće jedinice: 1 kJ, 1 MJ, . . .

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ Nm (č: njutnmetar)}$$

Koristi se i izvedena jedinica: 1 kW h (kilovat sat).

$$1 \text{ kW h} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Nesistemska jedinica je **kalorija** definirana kao količina topline potrebna da se temperatura 1 g vode podigne s 14,5°C na 15,5°C:

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

Dakle, toplina je oblik energije (toplinska energija), a temperatura je jedna od osnovnih fizikalnih veličina.

3.2. Toplinski tok

Toplinski tok (Φ : č. fi) predstavlja prenesenu toplinsku energiju (Q) u jedinici vremena (t):

$$\Phi = \frac{Q}{t}, \frac{\text{J}}{\text{s}} [=W]$$

Gustoća toplinskog toka (q) je toplinski tok po jedinci površine (A) okomitoj na smjer toka:

$$q = \frac{\Phi}{A}, \text{ W/m}^2$$

3.3. Sadržaj topline (potrebna topline, toplinski kapacitet)

Toplina potrebna za zagrijavanje nekog tijela, tekućine ili plina mase m , od temperature T_1 na temperaturu T_2 , uz prosječnu vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta c , računa se prema izrazu:

$$Q = m c (T_2 - T_1), \text{ J}$$

gdje je: Q , J - topline
 m , kg - masa
 c , J/(kg K) - specifični toplinski kapacitet
 T_1, T_2 , K - temperature

Specifični toplinski kapacitet tijela (c) je količina topline koju tijelo treba primiti da bi mu se temperatura podigla za jedan stupanj, odnosno:

$$c = \frac{Q}{m \Delta T}, \text{ J/(kg K)}$$

Specifični toplinski kapacitet zraka u ovisnosti o temperaturi:

t , °C	c , kJ/(kg K)
0	1,004
50	1,007
100	1,01
200	1,024

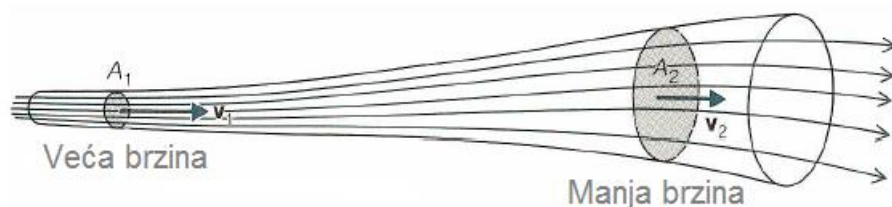
Specifični toplinski kapacitet različitih tvari, na temperaturi od 20°C:

Tvar	c , kJ/(kg K)
aluminij	0,942
bakar	0,385
čelik	0,477
lijevano željezo	0,540
beton (suhi)	0,88
puna cigla	0,84
zemlja (suha)	0,84
loživo ulje	1,88
mineralno ulje	2,00
amonijak	4,73
voda	4,20
led pri 0°C	2,05

4. Zakon kontinuiteta

Za idealan fluid vrijedi: masa fluida koja u vremenu Δt protekne kroz bilo koji presjek strujanja fluida je konstantna.

Cijev različitog presjeka:



Volumni protok:

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} = A \cdot v$$

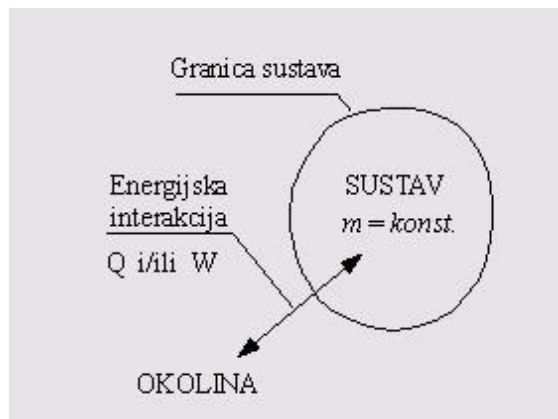
$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{konst.}$$

$$\boxed{A \cdot v = \text{konst.}} \quad - \text{ jednačba kontinuiteta!}$$

Protok nestlačivog fluida je konstantan u bilo kojoj točki cijevi!

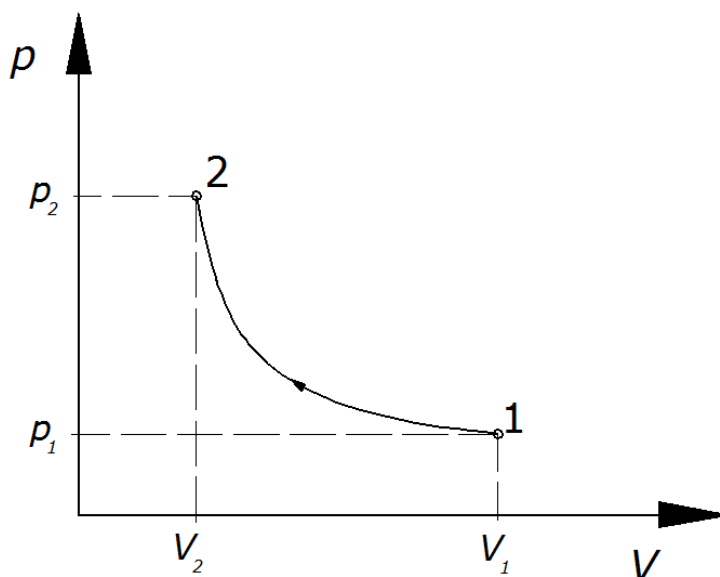
5. Termodinamički procesi

Skup elementarnih čestica neke tvari ograden stvarnim ili zamišljenim granicama nazivamo **sustav**. Sve što se nalazi izvan granice sustava nazivamo **okolina sustava**. Sustav je od okoline odvojen graničnom površinom ili **granicom sustava**.



Termodinamički sustav predstavlja određenu količinu tvari ograničenu nekom zatvorenim površinom unutar koje se odvijaju toplinske promjene – **termodinamički procesi**.

$p - V$ dijagram (tlak – volumen):



5.1. Prvi glavni stavak termodinamike

Toplina dovedena sustavu troši se na povećanje unutrašnje energije sustava i rad.

$$Q = \Delta U + W$$

Rad i toplina su oblici prijelaza energije koji se u sustavu očituju kao promjene unutrašnje energije.

Za razliku od unutrašnje energije i rad i toplina nisu funkcije stanja. Njihovi iznosi ovise o načinu na koji se energija izmjenjuje, odnosno o putu kojim se iz početnog prelazi u konačno stanje.

Ovaj stavak proizlazi iz Zakona o očuvanju energije, koji glasi:

Energija se ne može stvoriti ni iz čega niti se može uništiti, već se može samo prenijeti iz jednog oblika u drugi, ili s jednog tijela na drugo.

Alternativna formulacija glasi: nemoguće je napraviti stroj (perpetuum mobile) koji bi stvarao energiju ni iz čega.

5.2. Promjene stanja idealnih plinova

Idealni plin je takav plin čije čestice (atomi ili molekule) imaju ukupno zanemarljivo malen vlastiti obujam. Također, između njih ne postoje međumolekularne sile, pa se idealni plin ne može prevesti u tekuće ili čvrsto stanje.

Idealni plin je teorijski koncept, a realni plinovi mu se približavaju tek pri niskim tlakovima i visokim temperaturama.

Idealni plin se ponaša prema **jednadžbi stanja** idealnog plina:

$$p \cdot v = R \cdot T$$

$$\frac{p \cdot v}{T} = R, \text{ J/(kg K)} = \text{konst.} - \text{plinska konstanta}$$

Plinska konstanta R jednoznačno je određena vrijednost za svaki plin.

Jednadžba stanja može se prikazati i na sljedeće načine:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

$$p = \varrho \cdot R \cdot T$$

gdje je:

- p , N/m² - tlak;
- v , m³/kg - specifični volumen;
- V , m³ - volumen;
- T , K - apsolutna temperatura;
- R , J/(kgK) - plinska konstanta;
- m , kg - masa plina;
- ϱ , kg/m³ - gustoća plina.

Kad se plinovima dovodi ili odvodi topline, ili ako primaju ili daju rad, njihova se stanja neprekidno mijenjaju, a to znači da se mijenjaju i termodinamičke veličine koje ta stanja definiraju.

Iz stanja 1 u stanje 2 može se doći na bezbroj načina, koji su u p - V dijagramu najčešće prikazani krivuljom. Pri tome se mogu mijenjati sve osnovne veličine stanja (p , V , T) uz istodobnu razmjenu topline ili mehaničkog rada, ili se promjena stanja može odvijati a da se jedna od osnovnih veličina stanja u tijeku procesa ne mijenja.

S obzirom na to razmjenjuje li se u tijeku procesa topline i mehanički rad, te ostaje li nepromijenjena neka od osnovnih veličina stanja, mogu se izdvojiti sljedeće promjene stanja:

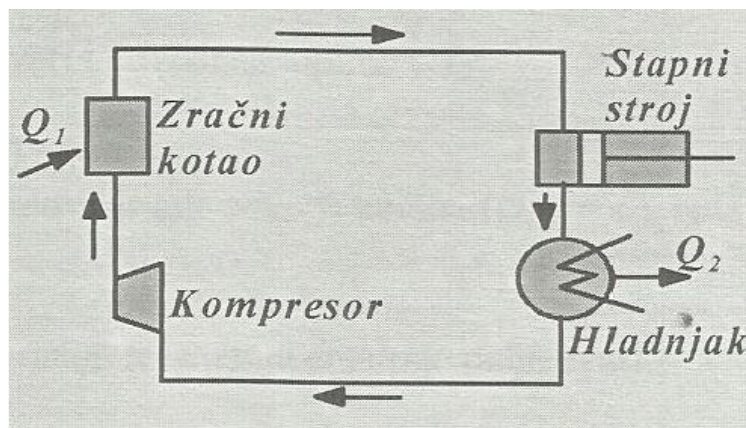
- **izobara:** promjena stanja pri stalnom tlaku, $p = \text{konst}$;
- **izohora:** promjena stanja pri stalnom volumenu, $V = \text{konst}$;
- **izoterma:** promjena stanja pri stalnoj temperaturi, $T = \text{konst}$;
- **adijabata:** promjena stanja bez razmjene topline s okolinom.

5.3. Kružni procesi

Od toplinskih se strojeva traži da neprekidno proizvode mehanički rad. Zbog toga je ponavljanje procesa ekspanzije (dobivanja mehaničkog rada) od najveće važnosti za tehničku termodinamiku. Da bi se to postiglo, potrebno je radnu tvar ponovno vratiti u početno stanje.

Kružni procesi su dakle procesi koji termodinamički sustav prevode nakon niza stanja ponovo u početno stanje, ostvarujući radne cikluse (reverzibilni kružni procesi).

Na donjoj slici prikazana je shema postrojenja koje toplinsku energiju plina (zraka) pretvara u mehanički rad:

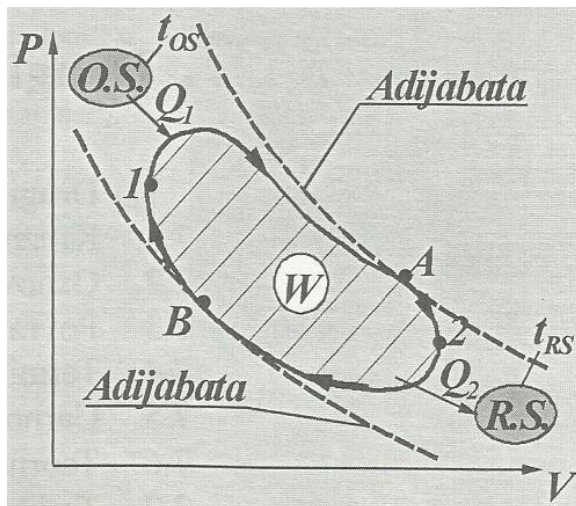


U ložištu zračnog kotla izgara gorivo i pritom se oslobođena toplina Q_1 predaje zraku. Zagrijani zrak se odvodi u stapni stroj (ili plinsku turbinu), gdje se toplinska energija zraka pretvara u mehanički rad (zrak ekspanzira i pokreće stap). Nakon ekspanzije zrak se odvodi u hladnjak, gdje mu se oduzima toplina Q_2 . Ohlaženi zrak iz hladnjaka kompresor tlači ponovno u kotao. Na taj se način radna tvar (zrak) vratila u početno stanje, pa kažemo da je izvršila kružni (zatvoreni) proces.

Termodinamički procesi, da bi bili korisni, moraju biti zatvoreni i moraju se periodički ponavljati.

Sljedeća slika prikazuje općeniti kružni proces u p-V dijagramu.

Neka se radna tvar širi od stanja 1 do stanja 2. Pri tome je radna tvar ekspanzirala i izvršila mehanički rad. Da bi se rad mogao korisno ponoviti, moramo radnu tvar vratiti u stanje 1, ali nikako istim onim putem 1-A-2 kojim smo došli u stanje 2. Ako bi povratak u stanje 1 izveli istim putem kojim smo došli u stanje 2, dobiveni rad ekspanzijom radne tvari bio bi u potpunosti utrošen na vraćanje (kompresiju) radne tvari u početno stanje. Takav kružni proces ne bi imao smisla, jer ne bi davao koristan rad.



Iz stanja 2 radnu tvar možemo vratiti u početno stanje i nekim drugim putem. Može to npr. biti put 2-B-1. Sada se radna tvar stlači i pritom troši rad koji je u p-V dijagramu prikazan površinom ispod krivulje promjene stanja 2-B-1. Taj rad kompresije manji je od rada ekspanzije (ispod krivulje 1-A-2), pa kažemo da je taj kružni proces koristan, jer daje rad.

U tehničkim toplinskim procesima, kojima je svrha toplinsku energiju pretvoriti u mehanički rad, neophodna su 2 toplinska izvora: ogrijevni spremnik (O.S.) i rashladni spremnik (R.S.) Toplina prelazi s jednog na drugi, pri čemu se dio toplinske energije koja dolazi iz ogrijevnog spremnika pretvara u mehanički rad, a ostatak se nužno predaje rashladnom spremniku. Rashladni spremnik je najčešće okolina (zrak ili voda rijeka ili mora), koji gotovo bez ograničenja mogu primati toplinu od toplinskih procesa.

Koristan mehanički rad W_k jednak je iskorištenoj toplini Q_k , tj. razlici radnoj tvari dovedene i od radne tvari odvedene topline:

$$W_k = Q_k = Q_1 - Q_2$$

Dobiveni koristan rad u prikazanom kružnom procesu predstavljen je površinom unutar zatvorene krivulje, koja predstavlja zatvoreni kružni proces, a predstavlja i razliku rada širenja (1-A-2) i rada tlačenja (2-B-1) radne tvari:

$$W_k = W_{1-A-2} - W_{2-B-1}$$

U prethodnom slučaju promjene stanja su se odvijale u smjeru kretanja kazaljke na satu, pa takav proces nazivamo desnokretnim procesom.

Također, kružni proces može biti lijevokretni (suprotno od smjera kretanja kazaljke na satu), kada je ukupan rad procesa negativan, tj. moramo trošiti rad u tijeku procesa. Tako npr. rade rashladni strojevi.

5.4. Drugi glavni stavak termodinamike

Nije moguće napraviti takav toplinski stroj koji će svu toplinsku energiju uzetu od toplinskog izvora (ogjevnog spremnika) pretvoriti u mehanički rad, već se uvijek dio te topline mora predati hladnijem toplinskom izvoru (rashladnom spremniku).

ili

Toplina ne može sama od sebe prelaziti s tijela niže temperature na tijelo koje ima višu temperaturu.

Kao što se iz formulacije vidi, Drugi glavni stavak jasno govori da u pretvorbi toplinske energije u mehanički rad moraju postojati dva toplinska izvora. Jedan je na višoj, a drugi na nižoj temperaturnoj razini. Smjer kretanja topline je od ogrijevnog prema rashladnom spremniku. Dakle, od tijela više, prema tijelu niže temperature, a to se ne protivi osnovnom zakonu prostiranja topline.

5.5. Termički stupanj djelovanja

Stupanj djelovanja bilo kakvog procesa uvijek je jednak omjeru dobivenog prema utrošenom. Od toplinskih se strojeva traži da proizvode što više mehaničkog rada na račun utrošene toplinske energije. To znači da je potrebno iskoristiti što je moguće više one topline koja se radnoj tvari dovodi iz ogrijevnog spremnika.

Omjer iskorištene topline (dobivenog rada) i dovedene topline radnoj tvari, naziva se **termički** ili **toplinski stupanj djelovanja**:

$$\eta_t = \frac{Q_k}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Termički stupanj djelovanja je uvijek manji od 1, a vrijednost mu je to veća (bliža jedinici) što je veća količina dovedene topline Q_1 , a manja količina odvedene topline Q_2 . To u praksi znači da se pri radu toplinskom stroju treba dovesti što više topline, a što manje topline od njega odvesti prema rashladnom spremniku.

5.6. Entalpija, entropija, eksergija

Entalpija (H) je mjera za unutarnji sadržaj toplinske energije i općenito se može definirati izrazom:

$$H = U + pV$$

gdje je U unutarnja energija, p tlak, a V volumen sustava.

Entalpija je funkcija stanja nekog sustava, a njezin prirast odgovara vezanoj ili oslobođenoj toplini/energiji u procesu koji se odvija uz stalan tlak.

Entropija (S) je u termodinamici funkcija stanja sustava, a definirana je izrazom:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Ovdje je dQ toplina razmijenjena u reverzibilnom procesu kojim sustav prelazi iz jednog stanja u drugo, a T je apsolutna temperatura.

Termodinamička veličina koja opisuje stupanj nereda zove se entropija i označava se slovom S . Entropija je, kao i entalpija, funkcija stanja, što znači da ovisi samo o konačnom i početnom stanju sustava, a može imati pozitivnu i negativnu vrijednost.

Bez obzira na temperaturu i količinu topline, u povratnim (reverzibilnim) procesima u termodinamici, ukupna entropija svih dijelova sustava ostaje nepromijenjena. U nepovratnim (ireverzibilnim) procesima entropija uvijek raste.

Stvarni procesi u prirodi su uvijek ireverzibilni, tj. kod njih entropija uvijek raste. Entropija je specifična u odnosu na ostale fizikalne veličine po tome što možemo reći da entropija određuje smjer vremena u makroskopskom svijetu. Stvarni smjer vremena (uobičajeni smjer, vrijeme ide prema "naprijed") je onaj u kojem se entropija makroskopskih sustava povećava ili ostaje ista.

U termodinamici, **eksergija** nekog sustava predstavlja maksimalni koristan rad otvorenog sustava koji se može postići tijekom procesa koji taj sustav dovodi u ravnotežu s nekom toplinskim spremnikom. Kada je okolina toplinski spremnik, eksergiju predstavlja potencijal sustava da vrši promjene dok postiže ravnotežu sa svojom okolinom. Općenito, eksergija je dio energije koji je raspoloživ za upotrebu. Kada sustav postigne ravnotežu s okolinom, eksergija je nula.

U energetici postoji još jedna definicija eksergije. Eksergija je dio energije koja se u potpunosti može pretvoriti iz jednog oblika u drugi oblik. Primjeri eksergije su električna struja i mehanički rad.

U skladu s prvim zakonom termodinamike, energija se ne može uništiti u procesima, već se transformira iz jednog oblika u drugi. Za razliku od nje, eksergija se može uništiti, i to se događa uvijek u procesima koji uključuju temperaturne promjene. Uništenje eksergije je proporcionalno povećanju entropije u sustavu. Uništeni dio eksergije se naziva **anergija**. U izotermnom procesu ne dolazi do nastanka anergije.

Eksergija nekog sustava se može prikazati sljedećim izrazom:

$$Ex = E - T_0 S$$

Gdje je:

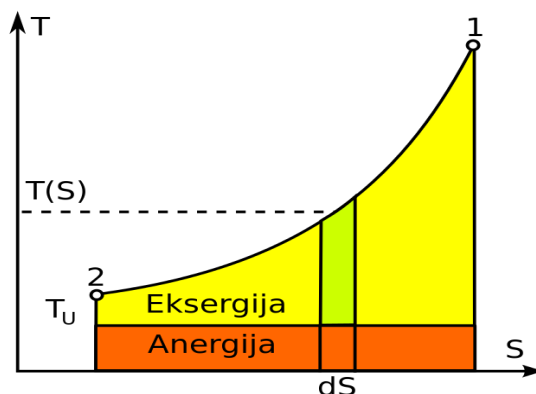
Ex – eksergija sustava

E – energija sustava

T_0 – temperatura referentne okoline u kelvinima

S – entropija sustava.

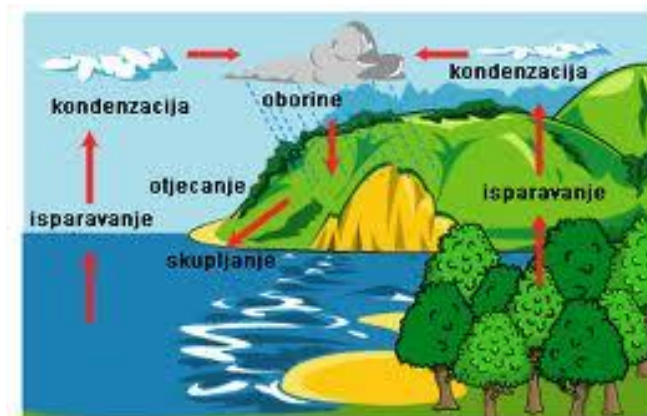
Dakle, drugi član desne strane jednadžbe je anergija.



5.7. Isparavanje i ukapljivanje

Isparavanje je fazni prijelaz iz kapljevitog ili krutog u plinovito agregatno stanje, a razlikuju se tri različita oblika:

- hlapljenje je isparavanje kapljevine ispod temperature vrelišta i odvija se na slobodnoj površini;
- vrenje je isparavanje kapljevine kada temperatura postane jednaka vrelištu i odvija se unutar cijelog obujma;
- sublimacija je isparavanje krutina pri tlaku na kojem ne postoji kapljevito agregatno stanje.



Ukapljivanje ili **kondenzacija** je fazni prijelaz iz plinovitog agregatnog stanja u kapljevito. To je proces suprotan isparavanju. Treba razlikovati ovaj pojam od prelaska iz plinovitog u kruto stanje, koji se naziva depozicija i suprotan je sublimaciji.

Ukapljivanje plinova je prevođenje plinova u kapljevito (tekuće) agregatno stanje. Provodi se ponajviše radi lakšega transporta i skladištenja plinova, te za postizanje niskih temperatura.

Plinovi se mogu ukapljiti hlađenjem, kompresijom ili kombinacijom tih postupaka. Pritom značajnu ulogu imaju kritični tlak i kritična temperatura, svojstveni svakomu plinu posebno.



6. Mehanizmi izmjene topline

Izmjena energije između dva sustava, koja nastupa zbog njihovih različitih temperatura, naziva se **prijelaz topline**. Ako nema drugih uzroka, stanje promatranih sustava mijenjat će se sve dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža, tj. dok se ne uspostavi jednaka temperatura u oba sustava. Tada prestaje izmjena topline.

Tijekom izmjene topline između dva sustava (tijela u krutom, kapljevitom ili plinovitom stanju) njihove materijalne čestice nalaze se na različitim temperaturama, pa kažemo da se unutar njih uspostavljaju temperaturna polja. Zbog toga, osim vanjske toplinske neravnoteže između tih sustava (tijela) postoji i unutarnja toplinska neravnoteža unutar svakog od njih.

6.1. Toplinska svojstva tvari

Toplinska vodljivost (provodljivost, provodnost) je svojstvo tvari da provode toplinu.

Toplinska provodljivost nekog materijala λ , definira se kao količina topline koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala površine presjeka 1 m^2 i debljine 1 m , okomito na njegovu površinu, pri razlici temperature 1 K :

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \cdot \frac{d}{t} \quad [\text{W}/(\text{m K})]$$

Gdje je:

- Q [J] - količina topline,
- A [m^2] površina,
- ΔT [K] razlika temperature,
- d [m] debljina materijala,
- t [s] vrijeme prolaza topline.

Materijali s malom vrijednošću λ zovu se toplinski izolatori, a oni s velikom vrijednošću toplinske provodljivosti nazivaju se vodiči topline.

Toplinska vodljivost nekih materijala:

Materijal:	λ [W / m K]	Materijal:	λ [W / m K]
Srebro	420	Voda	0,6
Bakar	385	Azbestni cement	0,5
Aluminij	205	Drvo	0,13
Željezo	60	Guma	0,15
Beton	1,3	Papir	0,13
Staklo	0,8	Polistiren	0,01
Žbuka	0,8	Staklena vuna	0,035
Cigla	0,7	Poliuretanska pjena	0,03
Zemlja	0,5	Zrak	0,025

Toplinsko istezanje je svojstvo materije da mijenja obujam, u ovisnosti od temperature. Kada se materija grije, čestice se počinju kretati sa međusobno većim razmakom između njih.

Materijali koji se sa povećanjem temperature skupljaju su rijetki i to samo za određene temperature. Stupanj širenja materijala podijeljenim sa promjerom temperature, naziva se koeficijent toplinskog istezanja i uglavnom se mijenja s temperaturom.

Linearno temperaturno rastezanje (produljenje) Δl (čitaj: delta el):

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \quad [\text{m}]$$

gdje je:

α = linearni koeficijent temperaturnog rastezanja [K⁻¹];

l_0 = početna duljina cjevovoda [m];

ΔT = temperaturna razlika [K].

Linearni koeficijent temperaturnog rastezanja α ovisi o materijalu, pa za pojedine materijale iznosi:

Materijal:	α [K ⁻¹]
Aluminij	0,0000238
Bakar	0,0000165
Čelik	0,0000120
Beton	0,0000120
Polivinilklorid (PVC)	0,0000800
Poliamid	0,0001100

Primjer:

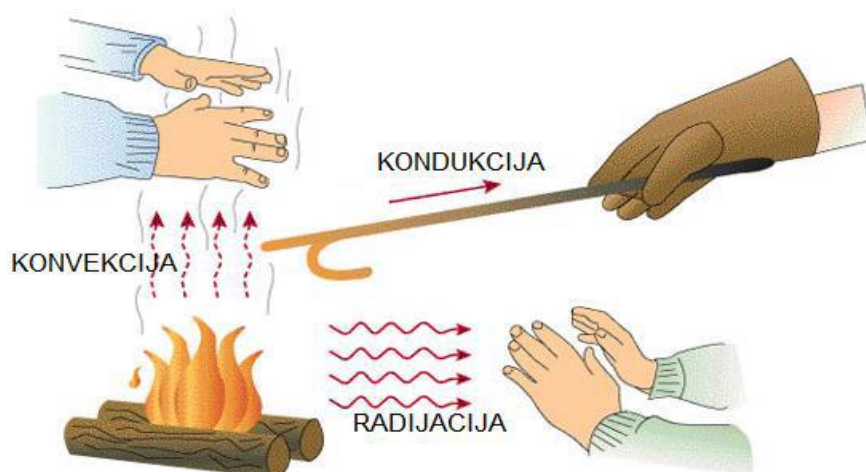
Potrebno je izračunati produljenje čeličnog cjevovoda duljine 100 m, ako se temperatura od 10 °C poveća na 90 °C !?

$$\begin{aligned}\Delta l &= \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \text{ [m]} = \\ &= 0,000012 \cdot 100 \cdot (90 - 10) = 0,096 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\underline{\Delta l = 96 \text{ mm}}$$

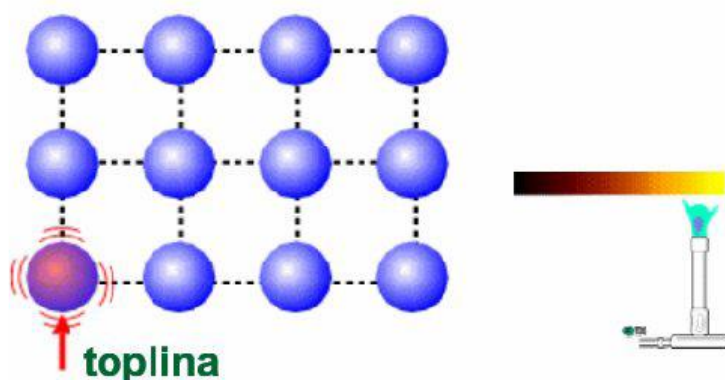
Prijenos topline između tijela različitih temperatura vrši se na tri osnovna načina:

- izmjena topline konvekcijom (strujanjem, komešanjem);
- izmjena topline provođenjem ili kondukcijom;
- izmjena topline toplinskim zračenjem ili radijacijom.



6.2. Širenje topline provođenjem

Kondukcija (provođenje) način je prijenosa topline kroz materijal, gdje susjedni atomi predaju toplinu (toplinske vibracije) jedan drugomu. Na taj se način topline prenosi kroz kruta tijela koja su međusobno u dodiru (kontaktu), a temperatura im je različita.

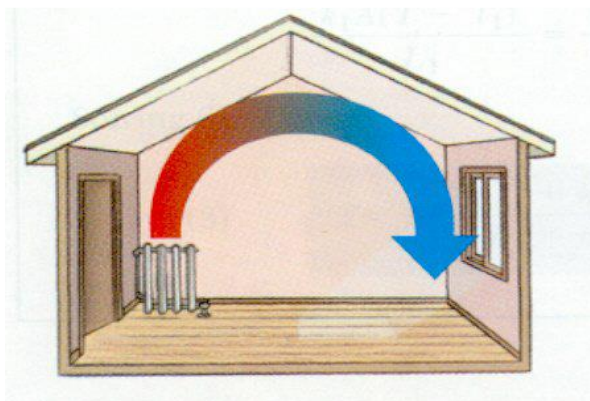


6.3. Širenje topline konvekcijom

Konvekcija (strujanje, komešanje) je prijenos topline koji se događa prijenosom grupa molekula (koje imaju određenu temperaturu) unutar medija. Taj je način izražen u zoni dodira fluida i čvrstog tijela. Razlikujemo prirodnu i prisilnu konvekciju (i kombinacije).

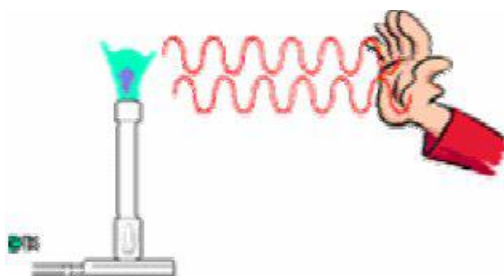
Primjer prijenosa topline konvekcijom je zagrijavanje prostorija pri čemu se topline s radijatora prenosi po cijeloj sobi. Zagrijani zrak iznad

radijatora diže se uvis, a hladan zrak dolazi do radijatora odozdo, te se strujanjem zraka topline raznosi po sobi.

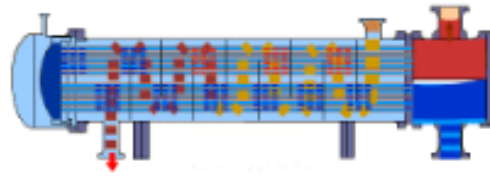
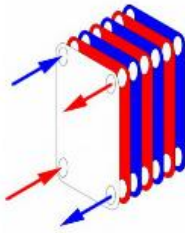


6.4. Izmjena topline zračenjem

Radijacija (zračenje) je prijenos topline koji se događa emitiranjem i upijanjem elektromagnetskih valova. Sva tijela na temperaturi većoj od apsolutne nule (0 K) emitiraju elektromagnetsko zračenje.



7. Izmjenjivači topline



Izmjenjivači topline su uređaji u kojima se razmjenjuje toplina između dva fluida, radi toga da se jedan od fluida grije, a drugi hladi. Primjenjuju se u tehnici grijanja i klimatizacije, termoenergetskim i nuklearnim postrojenjima, kemijskoj industriji i drugim granama tehnike.

Razlikujemo dva načina prenošenja topline s jednog fluida na drugi:

- fluidi (radni mediji) su u tijeku procesa u međusobnom dodiru, međusobno se miješaju – izmjenjivači s *izravnom izmjenom*;
- fluidi su u procesu razmjene topline međusobno razdvojeni metalnom površinom, koja se naziva **ogrjevn**a ili **rashladna** površina, ovisno o tome je li cilj izmjenjivača grijanje ili hlađenje nekog od fluida – izmjenjivači s *neizravnom izmjenom*.

U tehničkim izmjenjivačima najčešće su fluidi, koji sudjeluju u procesu razmjene topline, međusobno razdvojeni metalnom površinom. Takvi izmjenjivači mogu biti:

- **rekuperativni**
- **regenerativni.**

Kod rekuperativnih izmjenjivača dva su fluida u tijeku procesa međusobne razmjene topline odvojena čvrstom metalnom ogrjevnom ili rashladnom površinom.

Kod regenerativnih izmjenjivača toplina se prenosi na način da preko iste površine (ogrjevn

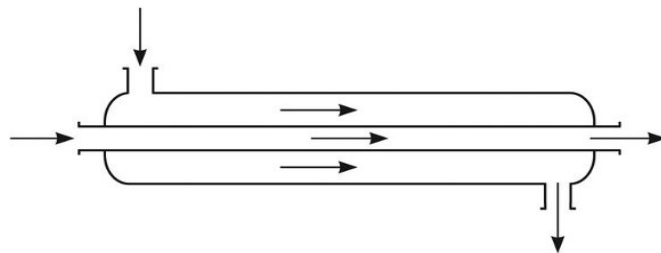
U praksi se više koriste rekuperativni izmjenjivači.

U tijeku rada ovih izmjenjivača treba voditi računa o načinu međusobnog strujanja radnih medija.

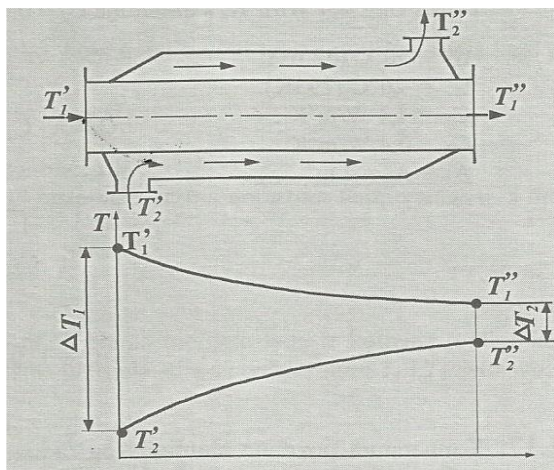
Prema smjeru strujanja medija, ovi se izmjenjivači mogu podijeliti na:

- istosmjerne (istostrujne);
- protusmjerne (protustrujne);
- križne.

7.1. Istosmjerni izmjenjivači topline



Kod ovih izmjenjivača oba fluida struje u istom smjeru.



Fluid 1 ima na ulazu u izmjenjivač temperaturu T_1' , a na izlazu T_1'' . Fluid 2 prima toplinu i na ulazu u izmjenjivač ima temperaturu T_2' , a na izlazu T_2'' . U tijeku razmjene topline najveća razlika temperatura među fluidima je na ulazu u izmjenjivač i iznosi ΔT_1 , a najmanja na izlazu gdje iznosi ΔT_2 .

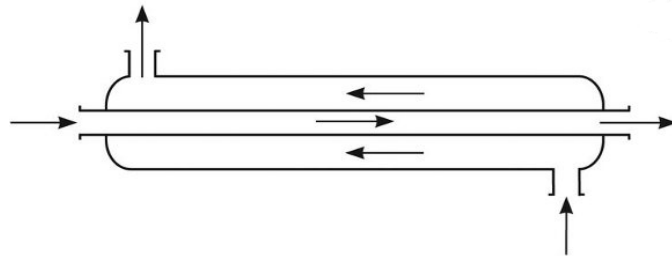
U donjem dijelu prethodne slike prikazan je tijek promjene temperatura oba fluida u procesu razmjene topline. Vidi se da promjena temperatura nije linearna, već je logaritamska. Zbog toga se u proračunu ovakvih izmjenjivača mora računati sa srednjom logaritamskom temperaturnom razlikom.

Srednja logaritamska razlika temperatura se određuje pomoću izraza:

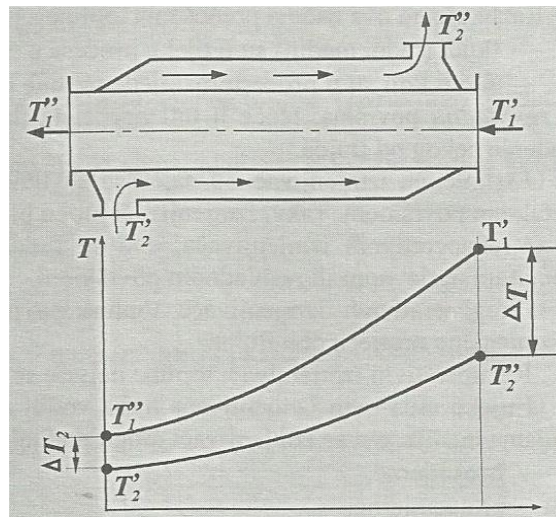
$$\Delta T_{\text{sr}} = \frac{(T_1' - T_2') - (T_1'' - T_2'')}{\ln \frac{(T_1' - T_2')}{(T_1'' - T_2'')}}}$$

Kod ovih izmjenjivača topline uvijek je najniža temperatura fluida koji predaje toplinu viša od najviše temperature fluida koji tu toplinu prima ($T_1'' > T_2''$).

7.2. Protusmjerni izmjenjivači topline



Kod ovih izmjenjivača smjer strujanja radnih fluida je suprotan.



Temperaturne razlike dvaju fluida su:

- na strani ulaza toplijeg fluida: $\Delta T_1 = T_1' - T_2''$
- na strani izlaza toplijeg fluida: $\Delta T_2 = T_1'' - T_2'$

Srednja logaritamska temperaturna razlika izračunava se kao u prethodnom slučaju:

$$\Delta T_{sr} = \frac{(T_1' - T_2'') - (T_1'' - T_2')}{\ln \frac{(T_1' - T_2'')}{(T_1'' - T_2')}}}$$

Najviša temperatura hladnijeg fluida može biti viša od najniže temperature toplijeg fluida. Pri istoj temperaturnoj razlici na ulazu i izlazu toplijeg i hladnijeg fluida, protustrujni izmjenjivač ima višu srednju temperaturnu razliku od istosmjernog.

To ujedno znači da će za istu razmjenu topline protustrujni izmjenjivač imati manju površinu, što ga čini jeftinijim.

Količina topline koja se razmjenjuje u izmjenjivačima je:

$$Q = A \cdot k \cdot \Delta T_{sr} , W$$

gdje je:

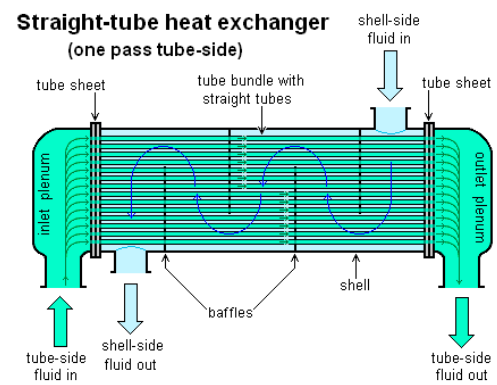
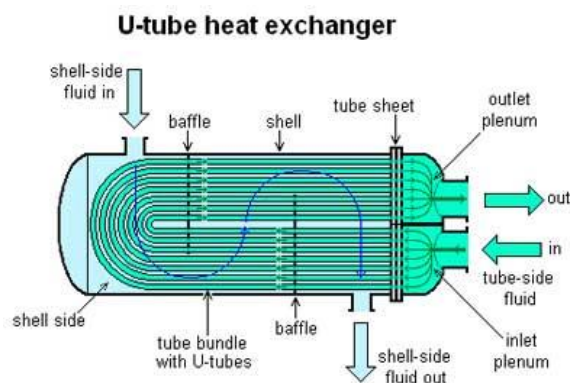
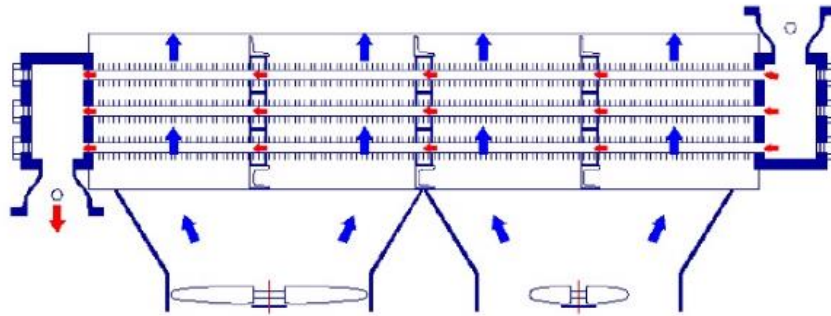
A , m² - površina izmjenjivača kroz koju se razmjenjuje topline;

k , W/m²K - koeficijent prolaza topline;

ΔT_{sr} , K - srednja logaritamska temperaturna razlika fluida.

7.3. Izmjenjivači topline s križnim strujanjem fluida

Kod ovih izmjenjivača topline pravci strujanja radnih tvari se međusobno križaju, pa je određivanje srednje temperaturne razlike znatno složenije, što je razlog da te izmjenjivače ovdje nećemo detaljnije obrađivati.



8. Dodatak

8.1. Toplinska svojstva plinova pri normalnom stanju ($p = 1,01235 \text{ bar}$, $t = 0^\circ\text{C}$)

Plin		Relativna molekularna masa	Spec. topl. kapacitet pri 0°C	Plinska konstanta	Gustoća pri 0°C i 1,01325 bara	$\kappa = C_p/C_v$
Naziv	Kemijska oznaka	M (kg/kmol)	c_p (kJ/kgK)	R (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	pri 0°C
Acetilen	C ₂ H ₂	26,04	1,641	319,6	1,1709	1,23
Amonijak	NH ₃	17,03	2,060	488,2	0,7714	1,32
Argon	Ar	39,94	0,583	208,2	1,7839	1,67
Dušik	N ₂	28,02	1,043	296,7	1,2505	1,40
Etan	C ₂ H ₆	30,07	1,666	276,7	1,356	1,22
Freon	CF ₂ Cl ₂	120,93	0,611	68,8	—	1,14
Helij	He	4,003	5,234	2078,0	0,1785	1,66
Kisik	O ₂	32,00	0,913	259,8	1,4289	1,4
Klor	Cl ₂	70,92	0,502	117,3	3,220	1,34
Metan	CH ₄	16,04	2,177	518,8	0,7168	1,30
Ozon	O ₃	48,00	—	173,4	—	1,29
Sumporni dioksid	SO ₂	64,06	0,632	129,8	2,9263	1,40
Ugljični dioksid	CO ₂	44,01	0,825	188,8	1,9768	1,31
Ugljični monoksid	CO	28,01	1,051	296,9	1,2500	1,40
Zrak	—	29	1,00	287	1,2928	1,40
Vodik	H ₂	2,016	14,235	4122,0	0,0898	1,41

8.2. Toplinska svojstva vode

Temperatura		Specifični toplinski kapacitet	Toplinska vodljivost	Gustoća
T K	t °C	c_p kJ/kgK	λ W/mK	ρ kg/m ³
273	0	4,225	0,558	1000
278	5	4,206	0,567	1000
283	10	4,194	0,577	1000
288	15	4,186	0,587	999
293	20	4,181	0,596	998
298	25	4,178	0,606	997
303	30	4,176	0,615	996
308	35	4,175	0,624	994
313	40	4,175	0,632	992
318	45	4,176	0,640	990
323	50	4,177	0,646	998
328	55	4,178	0,652	986
333	60	4,180	0,658	983
338	65	4,183	0,662	981
343	70	4,186	0,667	978
348	75	4,189	0,671	975
353	80	4,193	0,673	972
358	85	4,197	0,675	969
363	90	4,201	0,678	965
368	95	4,205	0,680	962
373	100	4,210	0,681	958
393	120	4,231	0,685	944
413	140	4,256	0,684	926
433	160	4,284	0,680	908
453	180	4,395	0,673	887
473	200	4,500	0,665	863

8.3. Toplinska svojstva nekih krutih tvari

VRSTA MATERIJALA	Gustoća ρ	Toplinska vodljivost λ	Spec. toplinski kapacitet c_p	Temperatura t
METALI	kg/m ³	W/mK	kJ/kgK	°C
Aluminij	2700	229	0,897	0
Bakar čisti	8930	386	0,380	0
Bakar trgovački	8300	372	0,419	20
Cink	7130	112	0,385	0
Olovo	11340	35	0,128	0
Srebro	10500	411	0,234	0
Željezo čisto	7800	58	0,465	0
Željezo lijevano	7280	56 – 64	0,538	20
Ugljični čelik (0,1% C)	7850	59	0,460	0
Ugljični čelik (0,1% C)	7850	52	0,460	100
Mjed	8600	105	0,380 – 0,420	0
GRAĐEVINSKI MATERIJALI				
Asfalt	2120	0,698	0,921	20
Beton	1500	0,593	0,880	20
Beton	2000	0,663	0,880	20
Beton	2500	0,837	0,880	20
Beton (armirani)	2500	1,512	–	20
Drvo (suho)	–	0,13 – 0,42	2,3 – 2,7	20
Granit	2600 – 2900	2,91 – 4,07	0,712	20
Malter	–	0,66 – 1,40	–	20
Opeka /suha)	1600 – 1800	0,38 – 0,52	–	20
Staklo	2400 – 3200	0,58 – 1,05	0,729 – 0,840	20
Zid od opeke	1000 – 1800	0,870	0,837	20
Zid od šuplje cigle	800	0,35 – 0,52	0,830	20
IZOLACIJSKI MATERIJALI				
Azbestne ploče	2000	0,70	0,798	20
Azbestna vuna	300 – 400	0,16	0,798	20
Pluto	45 – 350	0,009 – 0,060	0,8 – 1,3	20
Staklena vuna	50 – 400	0,037 – 0,055	0,837	20
TEKUĆINE				
Amonijak	–	0,585	4,56	–20
	–	0,540	0,42	0
	–	0,495	4,73	20
Etilni alkohol	–	0,182	2,47	20
Ulje za podmazivanje	–	0,130	1,85	25
	–	0,128	–	50
	–	0,125	–	75

8.4. Literatura

Ivo Njire: TERMODINAMIKA udžbenik,
Pučko otvoreno učilište Zagreb, 2006.

Antun Galović: TERMODINAMIKA I,
Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1997.

Aurel Kostelić: NAUKA O TOPLINI,
Školska knjiga Zagreb, 1989.

Internetski izvori, razni.