

# 1.

---

## Toplina

---

---

### 1.1. Temeljni pojmovi nauke o toplini

#### 1.1.1. Temperatura

U nauci o toplini pojam *temperature* je usvojen iz svakodnevnog života (iz iskustva). Svakome su bliske izjave: u kući je toplo, vani je hladno, sladoled je hladan, čaj je topao, . . . itd. Ovo su naše *subjektivne procjene temperature*, pri čemu ocjenjujemo temperaturu zraka vani ili u kući, temperaturu čaja ili sladoleda, . . . s obzirom na vlastitu tjelesnu temperaturu. Naime, dodirujemo li našim osjetilima (jezik, prsti, koža) razna materijalna tijela, naši živci osjetljivi na temperaturu i odgovarajući centri u mozgu daju nam približne ocjene (podatke) o temperaturi vanjskih tijela, odnosno relativne ocjene temperature tijela. Osjeti temperature tijela su, dakle, subjektivne netočne procjene.

**Temperatura je temeljna, fenomenološka i kvantitativna fizikalna veličina znanosti o toplini.** Kao takva morala je najprije dobiti neovisnu, objektivnu mjeru za točne kvantitativne usporedbe stupnja zagrijanosti nekog tijela, sustava ili procesa. Mjerenje temperature počiva na takvim svojstvima tijela ili procesa koja se mijenjaju s temperaturom i koja se lako mogu izmjeriti. Takvo zorno svojstvo, za koje se od davnih vremena zna da se značajno mijenja s temperaturom jest volumen nekog čvrstog, kapljevitoog ili plinovitog tijela.

Znanstveni, fizikalni pojmovi topline i temperature, iako u osnovi dolaze iz Newtonove mehanike, izgrađeni su na novoj, posebnoj znanstvenoj paradigmi koja ujedinjuje makroskopski i mikroskopski pristup, odnosno *makroskopske i mikroskopske fizikalne veličine*. Naime, kada se radi o toplini, onda fizikalne toplinske sustave karakterizira puno stupnjeva slobode. Toplinski sustavi, naprimjer, broje više od  $10^{23}$  čestica (atoma ili molekula) tako da se njihova gibanja ne mogu više

opisati (računati) Newtonovim jednadžbama gibanja. Zato su smišljene i izgrađene nove metode i novo pojmovlje za znanstveno opisivanje toplinskih sustava. U znanosti o toplini razlikujemo dvije temeljne vrste fizikalnih veličina:

- *Makroskopske fizikalne veličine* ili *termodinamičke varijable*: temperatura, volumen, tlak, molni broj, entropija, . . .
- *Mikroskopske fizikalne veličine* opisuju srednje vladanje čestica (srednje vrijednosti pripadajućih fizikalnih veličina). Takva je veličina, naprimjer, srednja vrijednost kvadrata brzine čestice  $\overline{v^2} \equiv \langle v^2 \rangle$ . Cilj je kinetičke teorije i statističke fizike upravo povezivanje mikroskopskih varijabli s termodinamičkim (makroskopskim) veličinama, naprimjer tlaka  $p$  s  $\overline{v^2}$ .

Kalorimetrijska (fenomenološka) definicija topline: *toplina je energija koja prelazi s jednog tijela na drugo zbog njihovih nejednakih temperatura.*

Dva su temeljna puta u fizici u izgradnji njene znanosti o toplini. Predočavamo ih shematski, sljedećom tablicom:

<p><b>I. TERMODINAMIKA</b></p> <p>Formulira <i>opće zakone</i>, na temeljnim pretpostavkama postojanja ravnotežnih stanja s dobro definiranim termodinamičkim varijablama.</p>	<p><b>II.A KINETIČKA TEORIJA TOPLINE</b> (kinetička teorija plinova)</p> <p>Daje <i>mikroskopske opise</i> sustava pomoću klasičnih mehaničkih modela (model bilijarskih kuglica). Osnova je <i>Maxwell-Boltzmannova</i> razdioba energije.</p> <p><b>II.B STATISTIČKA MEHANIKA</b></p> <p><i>Opća mikroskopska teorija topline.</i> Povezuje vjerojatnost makroskopskog stanja sustava s brojem njegovih mikroskopskih stanja. <i>Stanje s najvećom vjerojatnošću jest ravnotežno.</i></p>
--	---

Zatvoreni sustav u toplinskoj ravnoteži (termičkoj ravnoteži) *karakteriziran je temperaturom*. To znači da je promatrani sustav u svojoj cjelini na istoj temperaturi  $T$ . Dva sustava  $A$  i  $B$  u međusobnom toplinskome dodiru, nakon dovoljno dugog vremena, imat će jednaku (istu) temperaturu  $T$ .

Neka je  $T_A > T_B$  prije toplinskog kontakta! Energija će prelaziti iz sustava  $A$  u sustav  $B$  u obliku (formi) topline, dok se ne uspostavi zajednička temperatura  $T$ :

$$T_A > T > T_B$$

$$\Delta Q_A \searrow = C_A(T_A - T) = \Delta Q_B \nearrow = C_B(T - T_B)$$

gdje su  $C_A$ ,  $C_B$  toplinski kapaciteti sustava  $A$  i  $B$  a strelice označavaju prijenos (predaju ili primanje) topline. Dakle, temeljna toplinska jednadžba ima oblik:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

( $\Delta Q$  i  $\Delta T$  su infinitezimalne veličine).

**Toplinski kapacitet  $C$  ovisi o temperaturi. Toplina  $Q$  je jedan oblik (forma) energije.**

### 1.1.2. Termometrija. Živin termometar

Metode mjerenja temperature se temelje na *temperaturnim ljestvicama*. One se temelje na promjeni veličine nekog odabranog svojstva tvari s temperaturom. Da bi se mogla tehnički i mjeriteljski ostvariti neka temperaturna ljestvica, moraju se definirati i odabrati sljedeći uvjeti:

- termometrijska tvar [živa, plin (zrak, vodik, helij, dušik), staklo].
- termometrijsko svojstvo [promjena volumena žive, stakla, povećanje tlaka plina (zraka, vodika, helija, dušika)].
- *fiksne termometrijske točke*  $\equiv$  stanja nekih kemijski čistih tvari koje u termičkoj ravnoteži imaju stalnu temperaturu (ledište i vrelište vode pri standardnom atmosferskom tlaku).
- *brojčane oznake* koje se pripisuju *fiksniim točkama* [R. Hooke je predložio da *talište leda* u zraku pri standardnom tlaku dobije oznaku *ništice*, 0, a Ch. Huygens da *vrelište vode* u zraku pri standardnom tlaku ima oznaku 100].
- *Funkcionalna veza* (linearna ovisnost) između temperature fiksnih točaka i veličine termometrijskog svojstva.

Jedna od prvih zadovoljavajućih temperaturnih ljestvica koja se jednostavno mogla koristiti u praksi bila je *ljestvica žive*, a instrument **živin termometar**. Funkcionalna veza promjene volumena žive u termometru je opisana centezimalnom razdiobom

#### Centezimalna razdioba — celzijev stupanj.

Interval između 0 i 100 razdijeljen je na 100 jednakih dijelova, a ljestvica ekstrapolirana iznad 100 i ispod 0 s istom razdiobom.

**Jedan Celzijev stupanj**<sup>1</sup>, znak  $^{\circ}\text{C}$ , jest jedan dio (interval) *centezimalne razdiobe* temperature (oznake  $t$ ) čija veličina po definiciji iznosi:

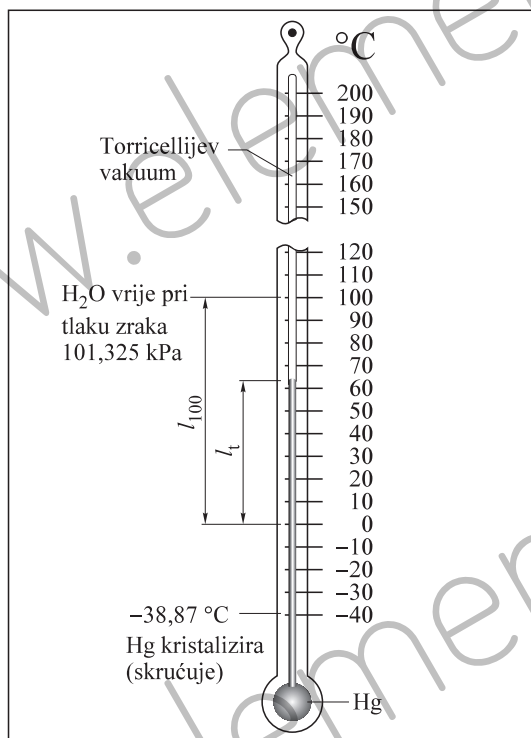
$$1^{\circ}\text{C} = \frac{l_{100}}{100}.$$

<sup>1</sup> Anders Celsius (1701. – 1744.), astronom i upravitelj prvog švedskog opservatorija Uppsala.

Na nekoj temperaturi  $t$ , stupac žive  $l_t$  ima visinu:

$$l_t = \frac{l_{100}}{100\text{ }^\circ\text{C}}t \implies t = \frac{100\text{ }^\circ\text{C}}{l_{100}}l_t.$$

Živinim termometrom, kao i *plinskim* termometrima, mjere se intervali temperature. Živin termometar s karakterističnim fiksnim točkama i drugim fizikalnim i tehničkim podacima, prikazan je na slici 1.1. Iznad razine žive u drugoj staklenoj cijevi je Toricellijev vakuum, prostor u kojem su živine pare.



Sl. 1.1. Živin termometar.

U anglosaksonskim zemljama još se rabi *Fahrenheitova* ljestvica, a u francuskom govornom području *Réaumurova* ljestvica. Za Fahrenheitovu ljestvicu, naprimjer, vrijedi: ledište vode je na 32 °F, vrelište vode je na 212 °F. Interval između fiksnih termometrijskih točaka podijeljen je na 180 jednakih dijelova.

*Réaumurova* ljestvica koja počiva na *Réaumurovu* stupnju (*Reomirov stupanj*, znak °R) danas se slabije rabi nego Celzijeva ili Fahrenheitova. Na toj ljestvici ledištu vode pri normalnom tlaku pridružena je vrijednost 0 °R, a normalnom vrelištu vode 80 °R (1 °R = 1,25 °C).

Relacije za pretvorbe iz jedne ljestvice (stupnjeva) u drugu ljestvicu (stupnjeva), glase:

$$t_C = \frac{5}{4}t_R = (t_F - 32) \cdot \frac{5}{9}$$

$$t_F = \frac{9}{5}t_C + 32 = \frac{9}{4}t_R + 32$$

$$t_R = \frac{4}{5}t_C = (t_F - 32) \cdot \frac{4}{9}.$$

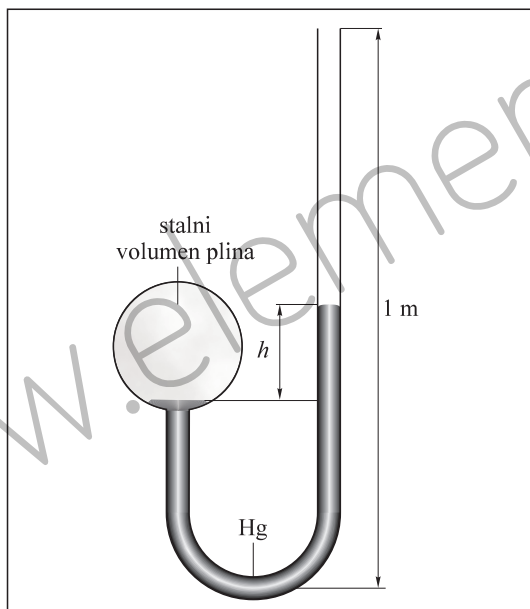
### 1.1.3. Plinske ljestvice temperature

Riječ je o jednom od prvih (Amontons, 1663. – 1705.), preciznih i osjetljivih, plinskih termometara koji kao termometrijsko svojstvo koriste promjenu tlaka plina s temperaturom, uz stalni volumen (*izohorna promjena*).

Velika staklena posuda spojena je s tankom, staklenom U-cijevi. Živa se nalazi u svinutom dijelu cijevi i vrlo malo u posudi, tek pri dnu, kao što se vidi u shematskom prikazu na slici 1.2. Kako je volumen posude puno veći od volumena cijevi, možemo uzeti da volumen zraka ostaje stalan, bez obzira na visinu  $h$  stupca žive. Radi se o izohornoj promjeni tlaka plina u promatranome sustavu. Tlak je određen hidrostatskom formulom:

$$p = \rho_{Hg}gh + p_a,$$

gdje je  $p_a$  tlak atmosfere u paskalima.



Sl. 1.2. Shematski prikaz plinskog (Amontonsovog) termometra.

Termometar se može baždariti standardnim načinom. Uranjanjem u smjesu leda i kapljevite vode označi se s  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  položaj visine stupca žive nakon što je uspostavljena ravnoteža. Uranjanjem u posudu s vodom koja vrije, pri standardnom atmosferskom tlaku, dobivamo drugu fiksnu točku, visinu stupca žive na  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Razdiobom ovog razmaka između  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  na 100 dijelova, te ekstrapolacijom ove razdiobe, dobivamo plinski (Amontonsov) termometar koji Celzijeve stupnje mjeri *plinskom ljestvicom*. Vrijede sljedeće jednadžbe (pravila) očitavanja temperature  $t$ :

$$\text{tlak jednog Celzijeovog stupnja} \equiv \frac{p_{100} - p_0}{100\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

gdje je  $p_0$  tlak plina na  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{100}$  tlak plina na  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

$$p_t - p_0 = \frac{p_{100} - p_0}{100\text{ }^{\circ}\text{C}} \cdot t \implies t = \frac{p_t - p_0}{p_{100} - p_0} \cdot 100\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

### Povijesna crtica

Prva *Međunarodna konferencija za utege i mjere* (Pariz, 1889.) usvojila je plinsku ljestvicu temperature zasnovanu na vodiku stalnog volumena kojemu je tlak pri  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  odgovarao točno 1 m normalne visine stupca žive. Ubrzo je vodik kao termometrijska tvar napušten i zamijenjen helijem čije je ponašanje bliže onom idealnog plina. Na visokim temperaturama koristi se dušik jer helij difundira kroz stijenku posude.

Termometar, smješten u Međunarodnom uredu za utege i mjere u Sévresu kod Pariza, jest baš jedan od kompliciranijih plinskih termometara.

## 1.1.4. Specijalni (električni) termometri

To su termometri koji su zasnovani na promjeni električkih veličina s temperaturom (za interpolaciju i ekstrapolaciju temperature). U laboratorijskim ili industrijskim primjenama, koriste se dvije tehnike:

### I. Pravilna promjena električnog otpora s temperaturom:

*Platinski termometar* služi za precizno mjerenje od vrlo niskih temperatura (80 K) do visokih (933 K). Električni otpor platinske žice mijenja se po zakonu:

$$R = R_{273} [1 + A(T - 273\text{ K}) + B(T - 273\text{ K})^2]$$

Konstante  $R_{273}$ ,  $A$  i  $B$  se prilagođavaju mjerenjem  $R$  na tri osnovne fiksne točke: trojnoj točki vode, vrelištu vode i kristalizaciji cinka.

*Platinski termometar* može poslužiti i kao termometar za interpoliranje (područje od 80 K do 273 K). U tom slučaju se gornjoj jednadžbi dodaje kubni član temperaturne ovisnosti s novom konstantom. Ona se određuje mjerenjem otpora na osnovnoj fiksnoj točki standardnog vrelišta kisika.

**II. Termoelektrični članak** je instrument iz dviju žica od različitih materijala (metali ili slitine metala), spojenih na oba kraja tako da se spojevi drže na

različitim temperaturama. Takav spoj se naziva *termokriž* ili *termoelement*, a prvi ga je opisao Th. J. Seebeck<sup>2</sup> (1826.), njemački fizičar–liječnik po kome pojava nosi ime: Seebeckov učinak [Seebeck's effect; Seebeck-Effekt; Эффект Зеебека]. Termoelementom će teći struja i moći će se očitavati napon (elektromotorna sila *EMS*), sve dok su dva spojišta na različitim temperaturama jer pojava ima termoelektričnu, ali i kvantnomehaničku narav (različiti radovi izlaza i Fermijevi nivoi materijala ili slitina u elementu). Napon termokriža je u pravilu mali, pa on ne služi kao izvor već kao termometar u laboratorijskim i industrijskim primjenama.

Za ekstrapolaciju temperature, između 903 K i 1336 K, koristi se članak iz platine i slitine platine i 10 % rodija. Termoelektrična elektromotorna sila  $\epsilon$  tog članka se može prikazati (prilagoditi) matematički:

$$\epsilon = a + bT + cT^2$$

Konstante  $a$ ,  $b$  i  $c$  se umjeravaju mjerenjem  $\epsilon$  na osnovnim fiksnim točkama kristalizacije antimona, srebra i zlata.

### 1.1.5. Termodinamička ljestvica temperature

Ovom ljestvicom se mjeri (definira) temperatura  $T$  u fizici i zovemo je termodinamičkom temperaturom, prema prijedlogu slavnog W. Thomsona, lorda KELVINA (1824. – 1907.), jednog od utemeljitelja termodinamike. Ova ljestvica je sasvim neovisna o nekoj određenoj termometrijskoj tvari, i nadomješta standardne ljestvice (živinu ili plinske) temperature koje uz nju postaju metode mjerenja temperaturnih intervala.

Mjerna jedinica termodinamičke temperature (koja je bezdimenzijska veličina) na apsolutnoj (termodinamičkoj) ljestvici jest kelvin, znak K.

Definicija: ***Kelvin je 1/273,16-ti dio temperature trojne točke vode.***

[Trojno stanje vode je točka, na određenoj temperaturi i tlaku, u kojoj su sve tri faze (agregatna stanja) u ravnoteži. Temperatura trojnog stanja vode je 0,01 °C (273,16 K), a tlak  $6,150 \cdot 10^2$  Pa.]

Jedinica *kelvin* nije samo apsolutna mjera. Njome se izražava i interval temperature, podudaran intervalu termodinamičke temperature izraženom u Celzijevim stupnjevima. Veza između termodinamičke temperature  $T$  i Celzijusove temperature  $t$  glasi:

$$T = 273,15 + t \quad \text{ili} \quad T(\text{K}) = 273,15 + t (\text{°C})$$

Vidimo da vrijedi jednakost temperaturnih intervala s obzirom na mjeru,  $\Delta T = \Delta t$  ili  $\text{K} = \text{°C}$ . Dakle, kelvinom se izražavaju temperaturni intervali (razlike) koji su identični intervalima termodinamičke temperature izraženima u stupnjevima Celzija. Valja naglasiti da plinske ljestvice pokazuju mala stvarna odstupanja od termodinamičke temperature, koja ovisе o promatranoj temperaturi i vrsti plina

<sup>2</sup> Seebeck, Thomas Johann (1770. – 1831.)

(vodik, helij, dušik). *Temperaturna ljestvica idealnog plina potpuno je podudarna s termodinamičkom ljestvicom.*

### Međunarodne osnovne i sekundarne fiksne točke temperature.

U mjerenjima temperature u praksi nemoguće je koristiti vrlo točne plinske ili živine termometre, tako da je Međunarodna konferencija za utege i mjere definirala osnovne (7 tvari) i sekundarne (24 tvari) fiksne točke temperature pri standardnome tlaku atmosfere. Pomoću ovakvih točaka mogu se povremeno, neposredno i točno umjeravati (baždariti) termometri u inženjerskoj praksi. U tablici 1. navodimo samo osnovne međunarodne fiksne točke temperature, pri atmosferskome tlaku  $p^\theta = 101,325 \text{ kPa}$ .

Tvar	Kisik	Voda	Sumpor	Cink	Antimon	Srebro	Zlato
Vrelište T/ K	90,18	373,15	717,75				
Kristaliza- cija, T/ K		273,16 trojna t.		692,66	903,7	1234,01	336,2

## 1.2. Toplinsko rastezanje čvrstih tijela

Toplinskim zagrijavanjem gotovo sva tijela povećavaju volumen. Izuzetak je anomalno vladanje vode. *Termičko rastezanje* čvrstog tijela je trodimenzionalno, ali ako su dvije dimenzije značajno manje od treće (štapovi, cijevi, žice, tračnice, ...), promatramo samo *linearno rastezanje*. U slučaju zanemarive debljine tijela (ploče, stijene) govorimo o *površinskom širenju*.

**Linearno rastezanje.** Eksperimenti pokazuju da se duljina tijela pri njegovu zagrijavanju za  $\Delta T = T - T_0$ , pravilno mijenja, prema zakonu:

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T),$$

$$l = l_{273}[1 + \alpha(T - 273 \text{ K})],$$

gdje je  $l_0$  početna duljina tijela na temperaturi  $T_0$  (obično  $0^\circ \text{C}$ ), a  $T$  konačna temperatura.

Bitni toplinski parametar u gornjoj jednadžbi jest *koeficijent linearnog rastezanja*  $\alpha$ , definiran jednadžbom (koja je ujedno i njegova dimenzijska jednadžba):

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l - l_0}{T - T_0} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad [\alpha] = \text{K}^{-1}$$

$$\alpha = \frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right)_p.$$

Mjera koeficijentu linearnog rastezanja jest recipročni kelvin (znak  $\text{K}^{-1}$ ). Koeficijenti  $\alpha$  su od materijala do materijala različiti, a tipična im je vrijednost  $\approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . U slučajevima kad su krajevi neke žice ili štapa učvršćeni tako da se



njegova duljina ne može mijenjati, temperaturne promjene dovode do mehaničkih napetosti (deformacija, ili čak lomljenja materijala). Ako su promjene krutog tijela uslijed toplinskog zagrijavanja linearne, možemo ih opisati Hookeovim zakonom:

$$\sigma = \frac{\Delta F}{S} = E \cdot \epsilon = E \cdot \frac{\Delta l}{l} = E \cdot \alpha \Delta T$$

gdje je  $\sigma$  napetost,  $E$  Youngov modul elastičnosti materijala, a  $\epsilon$  linearna deformacija promatranog tijela<sup>3</sup>.

**Volumno rastezanje.** Izrazi (zakoni) za volumno rastezanje tijela i materijala dobivaju se poopćenjem zakona za linearno rastezanje:

$$\begin{aligned} V &= l_0(1 + \alpha \Delta T) \cdot l_0(1 + \alpha \Delta T) \cdot l_0(1 + \alpha \Delta T) = l_0^3(1 + \alpha \Delta T)^3 \\ &= l_0^3[1 + 3\alpha \Delta T + 3(\alpha \Delta T)^2 + (\alpha \Delta T)^3], \\ V &= V_0(1 + 3\alpha \Delta T) = V_0(1 + \gamma \Delta T) \end{aligned}$$

je zakon volumnog rastezanja u dobroj aproksimaciji, uz pretpostavku da je tijelo oblika kocke i da članovi višeg reda ne doprinose prema linearnim članovima širenja. Dakle, kvadratni i kubni član koji sadrže koeficijent  $\alpha$  zanemarili smo zbog vrlo male vrijednosti  $\alpha$ .

Koeficijent toplinskog (volumnog) širenja  $\gamma$  definira se jednadžbom:

$$\gamma = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T} = 3\alpha, \quad [\gamma] = \text{K}^{-1}.$$

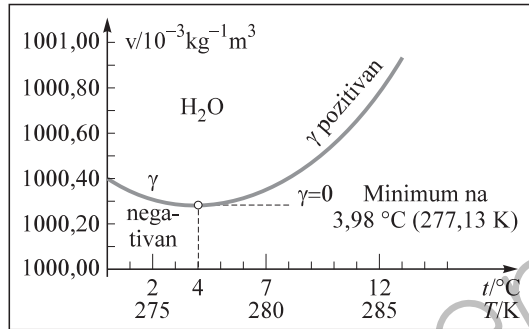
Mjerna jedinica koeficijenta toplinskog širenja  $\gamma$  jest recipročni kelvin ( $\text{K}^{-1}$ ). Koeficijenti toplinskog širenja kapljevine su za red veličine veći ( $\approx 10^{-4} \text{K}^{-1}$ ) nego kod čvrstih tijela ( $\approx 10^{-5} \text{K}^{-1}$ ).

### 1.3. Anomalno rastezanje vode

Karakteristično ponašanje u toplinskom rastezanju pokazuje voda. *Specifični obujam* vode u ovisnosti o temperaturi pri standardnome tlaku atmosfere  $p^\theta = 101,325 \text{ kPa}$ , za usko područje temperature oko  $4^\circ \text{C}$ , prikazan je na slici 1.3.

Vidimo da specifični obujam ima *minimum* pri temperaturi  $3,98^\circ \text{C}$ , ( $277,13 \text{ K}$ ), praktički na  $4^\circ \text{C}$ . Volumni koeficijent  $\gamma$  je negativan od  $0^\circ \text{C}$  do  $4^\circ \text{C}$  (volumen vode se smanjuje), jednak nuli na  $3,98^\circ \text{C}$ , a pozitivan za temperature više od  $4^\circ \text{C}$  (volumen vode se povećava).

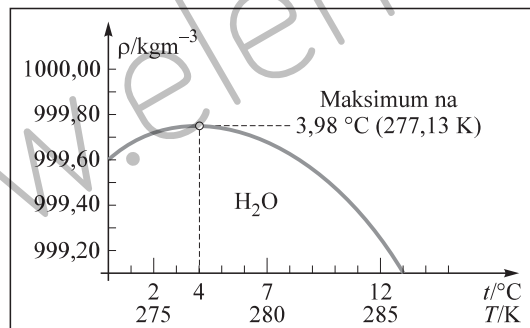
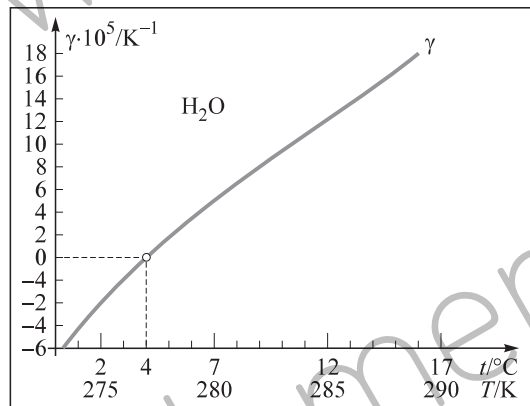
<sup>3</sup> *Izotropija* (izo- + -tropija), svojstvo nekih fizičkih tijela i materijala u modernim tehnologijama da u svim smjerovima prostora imaju iste fizikalne karakteristike i jednake vrijednosti fizikalnih veličina ili parametara. Izotropni elastični materijali se deformiraju na isti način (po Hookeovu zakonu) u svim smjerovima. Optički izotropni materijali provode svjetlost u svim smjerovima jednako jer im je indeks loma izotropan za promatranu valnu duljinu. Vođenje topline ili električne struje u izotropnim tijelima je isto u svim smjerovima, ovisno o gradijentu temperature i toplinskome otporu odnosno električnome naponu i otporu. Izotropni materijali su tipično plinovi i kapljevine, te materijali nekrystalne građe važni u visokim nano-tehnologijama: amorfni poluvodiči (Si), plastike i stakla.



Sl. 1.3. U nacrtanim područjima temperatura,  $\gamma$  je približno linearna funkcija, pa je  $v(T)$  približno parabola.

U području  $273,15 \text{ K} < T \leq 283,5 \text{ K}$ , volumen vode se vrlo fino i točno može parametrizirati empirijskom formulom:

$$V = V_{273,15} [1 - 7,6464645 \cdot 10^{-5} (T - 273,15 \text{ K}) + 8,9344223 \cdot 10^{-6} (T - 273,15 \text{ K})^2 + 7,891946 \cdot 10^{-8} (T - 273,15 \text{ K})^3].$$



Sl. 1.4. (a) Izobarna ovisnost koeficijenta  $\gamma$  za vodu o temperaturi.  
(b) Ovisnost gustoće vode o temperaturi.

Na slici 1.4. prikazana je u gornjem dijagramu izobarna ovisnost ( $p^\theta = 101,325 \text{ kPa}$ ) volumnog koeficijenta širenja vode  $\gamma$  o temperaturi, u temperaturnom intervalu gdje je anomalno vladanje najizraženije.

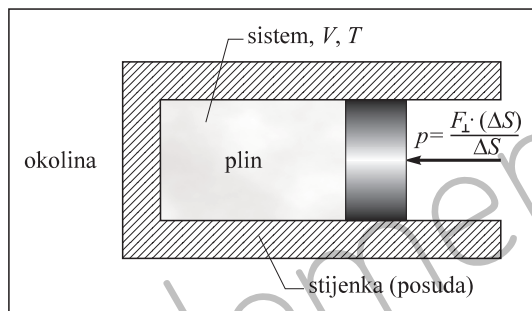
Ovisnost gustoće vode o temperaturi prikazana je dijagramom b) na slici 1.4. Gustoća je *najveća* na  $277,13 \text{ K}$  ( $3,98^\circ \text{C}$ ). Između  $0^\circ \text{C}$  i  $4^\circ \text{C}$  gustoća vode raste s temperaturom, a na temperaturama iznad  $4^\circ \text{C}$  se smanjuje. To ima značenje posljedice za mehaničku ravnotežu vode u jezerima. Razlikujemo dva slučaja:

a) Ako je  $0,1^\circ \text{C} < t < 4^\circ \text{C}$ , ravnoteža mase vode (npr. u jezeru) moguća je ako joj se temperatura *snižava* od dna prema površini.

b) Ako je  $t > 4^\circ \text{C}$ , mehanička ravnoteža vode se uspostavlja ako joj temperatura *raste* od dna prema površini.

### 1.4. Plinski zakoni. Idealni plin

Protumačimo, najprije, neke osnovne pojmove nauke o toplini. Termodinamički sistem — neki plin u prostoru ograničen nekom zatvorenim plohom ili stijenkom (posuda) — u stanju ravnoteže najbolje se može fenomenološki opisati (definirati) pomoću triju *mjerljivih veličina* (koordinata): **tlaka**  $p$ , **volumena**  $V$  i **temperature**  $T$ . To su  $pVT$ -sistemi (vidi sliku 1.5). Tu spadaju kemijski čiste tvari (plinovi), homogene smjese različitih čistih komponenata i heterogene smjese.



Sl. 1.5. Shematski prikaz  $pVT$ -sistema s makroskopskim varijablama i njegove okoline.

Između tlaka, volumena i temperature  $pVT$ -sistema, postoji neka funkcionalna veza:

$$f(p, V, T) = 0,$$

koja se naziva jednačbom stanja  $pVT$ -sistema. U njoj neovisne varijable mogu biti:  $(p, V)$ ,  $(p, T)$  ili  $(V, T)$ .

U proučavanju plinova služit ćemo se *modelom idealnog plina*, koji odgovara (korespondira) većini realnih plinova (zrak, vodik, helij). U idealnom plinu, međumolekularne sile su zanemarive, volumen molekule plina je zanemariv s obzirom na volumen posude, tako da su *molekule sitna tijela* (materijalne točke) koje jedna na drugu djeluju jedino u srazovima (sudarima).