

## 2.3 PROCESI RAZMENE TOPLOTE

### 2.3.1 Provođenje toplote

**Provođenje (kondukcija)** toplote ostvaruje se u slučaju neposrednog kontakta dva tela, ili različitih čestica tela. Da bi došlo do provođenja toplote neophodno je da temperature tela koja su u kontaktu budu različite.

Smer toplotne razmene, po II principu termodinamike odvija se od tela više, ka telu niže temperature.

Mehanizam procesa može se objasniti ako se uzme u obzir mikroskopska struktura supstancije. Za sve slučajeve karakteristično je da se energija iz jednog dela supstancijalne sredine prenosi u drugi deo sredine, kretanjem mikročestica u procesu difuzije, ili kao rezultat prenošenja talasnog poremećaja.

## ***Furijev zakon:***

Da bi se ostvario proces provođenja toplote potrebno je da postoje nehomogenosti u temperaturskom polju, odnosno oblasti sa različitim temperaturama.

- Furije je eksperimentalno došao do zaključka da je količina toplote  $dQ$  koja u jedinici vremena  $dt$  prođe kroz jedinicu izotermske površine  $dS$ , proporcionalna negativnom gradijentu temperature  $\frac{\partial T}{\partial x}$ .

Furijev zakon u matematičkoj formulaciji, za homogene supstancijalne sredine gde je gradijent temperature je u svim tačkama isti, može se zapisati u sledećem obliku:

$$dQ = -\lambda \frac{\Delta T}{d} dS dt \quad ,$$

gde je sa  $\Delta T$  predstavljena razlika temperatura sa različitih strana homogene supstancijalne sredine debljine  $d$ .

Prisustvo vlage u materijalima znatno utiče na povećanje toplotne provodljivosti, jer u mehanizmu toplotne razmene u ovoj situaciji učestvuje i konvekcija . Kao ilustraciju navedimo da toplotna provodljivost suve cigle sa  $\lambda_S = 0.35 \frac{W}{mK}$ , poraste na  $\lambda_V = 1.0 \frac{W}{mK}$  u slučaju vlažne cigle.

Toplotni fluks predstavlja količinu toplote koja u jedinici vremena prođe kroz datu površinu  $S$  (u datom smeru), tj.

$$\Phi_t = \frac{dQ}{dt}.$$

U slučaju kada se temperature površine čvrstog tela i fluida koji naleže na površinu razlikuju, postoji proces toplotne razmene između dve supstancijalne sredine.

### ***Njutnov zakon:***

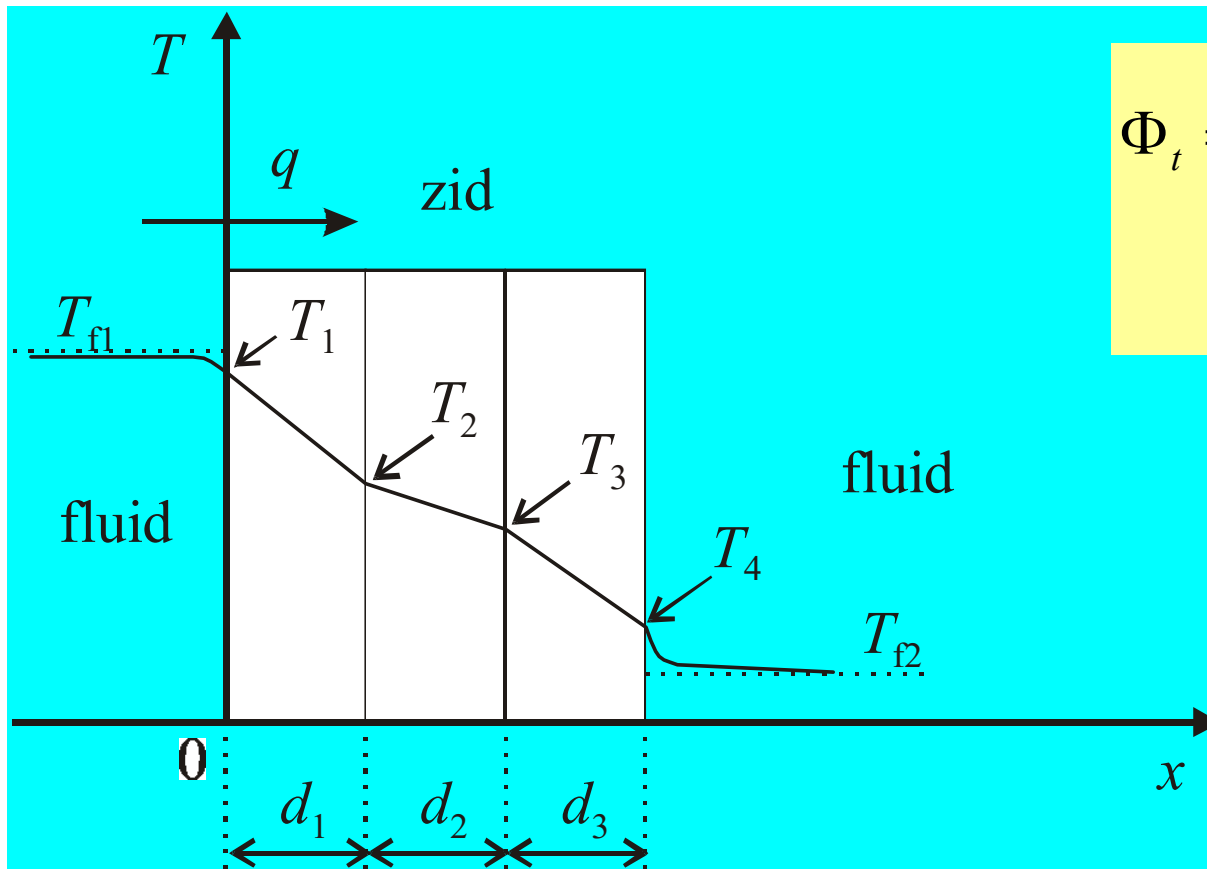
Njutn je eksperimentalnim putem došao do zaključka da je količina toplote koju u jedinici vremena preda (primi) telo srazmerna površini dodira i razlici temperatura površine čvrstog tela  $T_t$  i naleglog fluida  $T_f$ :

$$\Phi_t = \alpha S (T_t - T_f) \quad ,$$

gde je  $\alpha$  koeficijent proporcionalnosti koji se naziva koeficijent prelaza toplote.

### Primer: prolazak toplote kroz višeslojni zid

Odrediti toplotni fluks kroz ravan zid površine  $S$  sastavljen od  $n$  homogenih slojeva različitih debljina  $d_i$ , i od različitih materijala koeficijenta toplotne provodljivosti  $\lambda_i$ . Pretpostaviti da je kontakt između slojeva idealan tako da se može zanemariti temperaturski skok između slojeva. Smatrati takođe da se provođenje toplote odvija u stacionarnom stanju, za koje je  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ .



$$\Phi_t = \frac{S(T_{f1} - T_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}}$$

## 2.3.2 Prenos topline konvekcijom

Strujanje fluida iz oblasti u kojoj je temperatura  $T_1$ , u oblast u kojoj je temperatura  $T_2$  praćeno je prenosom topline iz jedne oblasti u drugu. Ovaj oblik prenosa topline praćen je prenosom supstance. Usled toga je prenos topline strujanjem, odnosno konvekcijom, **moć samo u sredinama u kojima je moguće kretanje jednih delova sredine u odnosu na druge.**

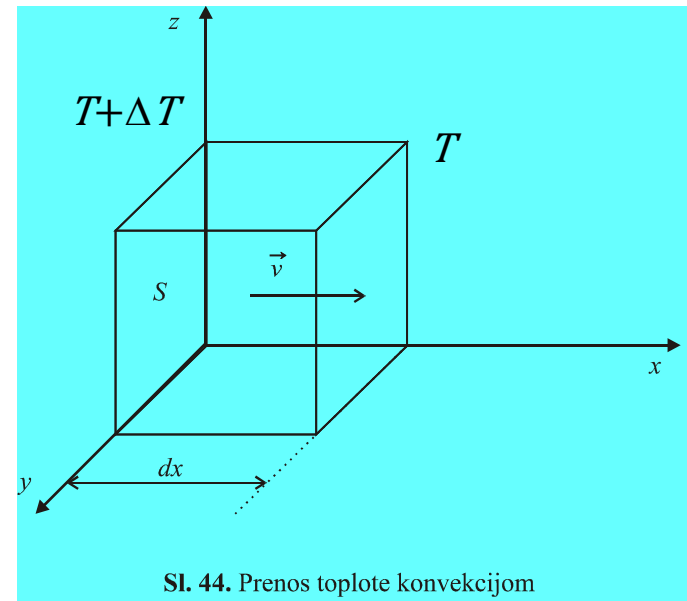
Posmatraćemo kretanje fluida u pravcu  $x$ -ose, kroz deo prostora oblika kocke, čija je jedna ivica paralelna  $x$ -osi. Neka razlika temperatura na suprotnim stranama kocke iznosi  $\Delta T$ . U nekom intervalu vremena  $\Delta t$  kroz kocku će proteći količina fluida čija je masa  $m$ , pri čemu će na drugu stranu kocke biti preneti količina topline  $Q$ :

$$Q_k = mc\Delta T$$

gde je  $c$  specifični toplotni kapacitet supstancijalne sredine koja protiče.

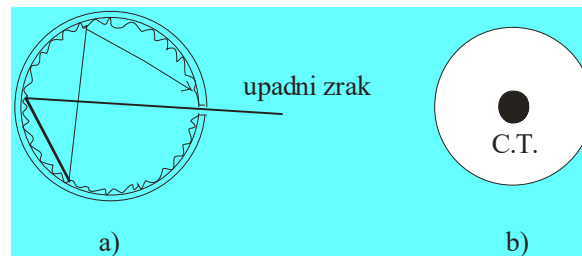
Konvekcijom se na ovaj način prenese u jedinici vremena količina topline koja predstavlja konvektivni toplotni fluks:

$$\Phi_t = \rho S \frac{dx}{dt} c\Delta T = \rho S v c\Delta T$$



## 2.3.3 Prenosenje toplote zračenjem

Telo koje potpuno apsorbuje elektromagnetno zračenje koje na njega padne nazivamo **apsolutno crno telo**. Idealno crno telo ne postoji u prirodi, ali nam kao dobar model može poslužiti izotermna šupljina sa malim otvorom.



**Spektralna emisiona moć** apsolutno crnog tela ima smisao univerzalne funkcije,  $f(\lambda, T)$ , i predstavlja energiju koju apsolutno crno telo izrači u jedinici vremena, po jedinici površine, u jediničnom intervalu talasnih dužina. Analitički oblik univerzalne funkcije uspeo je da odredi Maks Plank

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

gde je  $T$  temperatura apsolutno crnog tela,  $c$  brzina svetlosti u vakuumu,  $k$  je Bolcmanova konstanta, a  $h$  je Plankova konstanta, čija je vrednost  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} Js$ .

**Stefan – Bolcmanov zakon:** Emisiona moć apsolutno crnog tela srazmerna je četvrtom stepenu apsolutne temperature (**Stefan – Bolcmanov zakon**).

$$I_e^{CT} = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad ,$$

gde je sa  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  predstavljena Stefan – Bolcmanova konstanta.

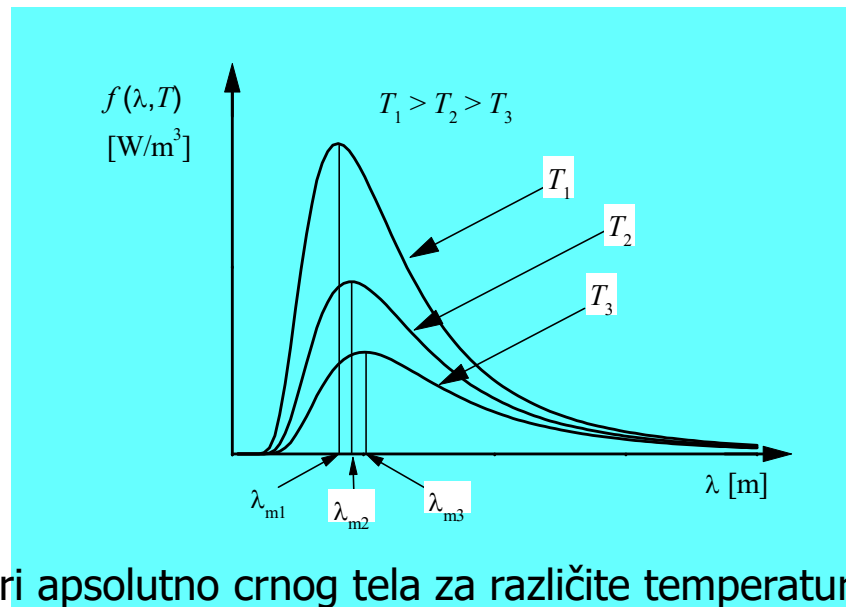
Ako se na grafiku predstavi zavisnost univerzalne funkcije  $f(\lambda, T)$  od talasne dužine  $\lambda$ , tada će površina pod krivom imati smisao emisione moći apsolutno crnog tela (vidi sliku).

### **Vinov zakon pomeranja:**

Proizvod talasne dužine  $\lambda_m$  kojoj odgovara maksimum spektralne emisione moći apsolutno crnog tela i apsolutne temperature  $T$ , konstantna je veličina (**Vinov zakon**)

$$\lambda_m T = b \quad ,$$

gde je  $b = 2.898 \text{ Km}$  Vinova konstanta.



Spektri apsolutno crnog tela za različite temperature

Čoveka kao i bilo koji drugi makroskopski objekat možemo posmatrati kao termodinamički sistem. Toplotna razmena organizma sa okolinom ostvaruje se provođenjem (kondukcijom), strujanjem (konvekcijom), toplotnim zračenjem i isparavanjem.

U toplotnoj razmeni čovekovog organizma sa okolinom kondukcija utiče neznatno, dok se konvekcijom razmeni 15% - 20% od ukupne toplotne razmene, isparavanje i disanje doprinosi sa oko 30% u procesu toplotne razmene, **dok se dominantna razmena energije sa okolinom, od oko 50% (i više), obavlja u obliku elektromagnetnog zračenja.**

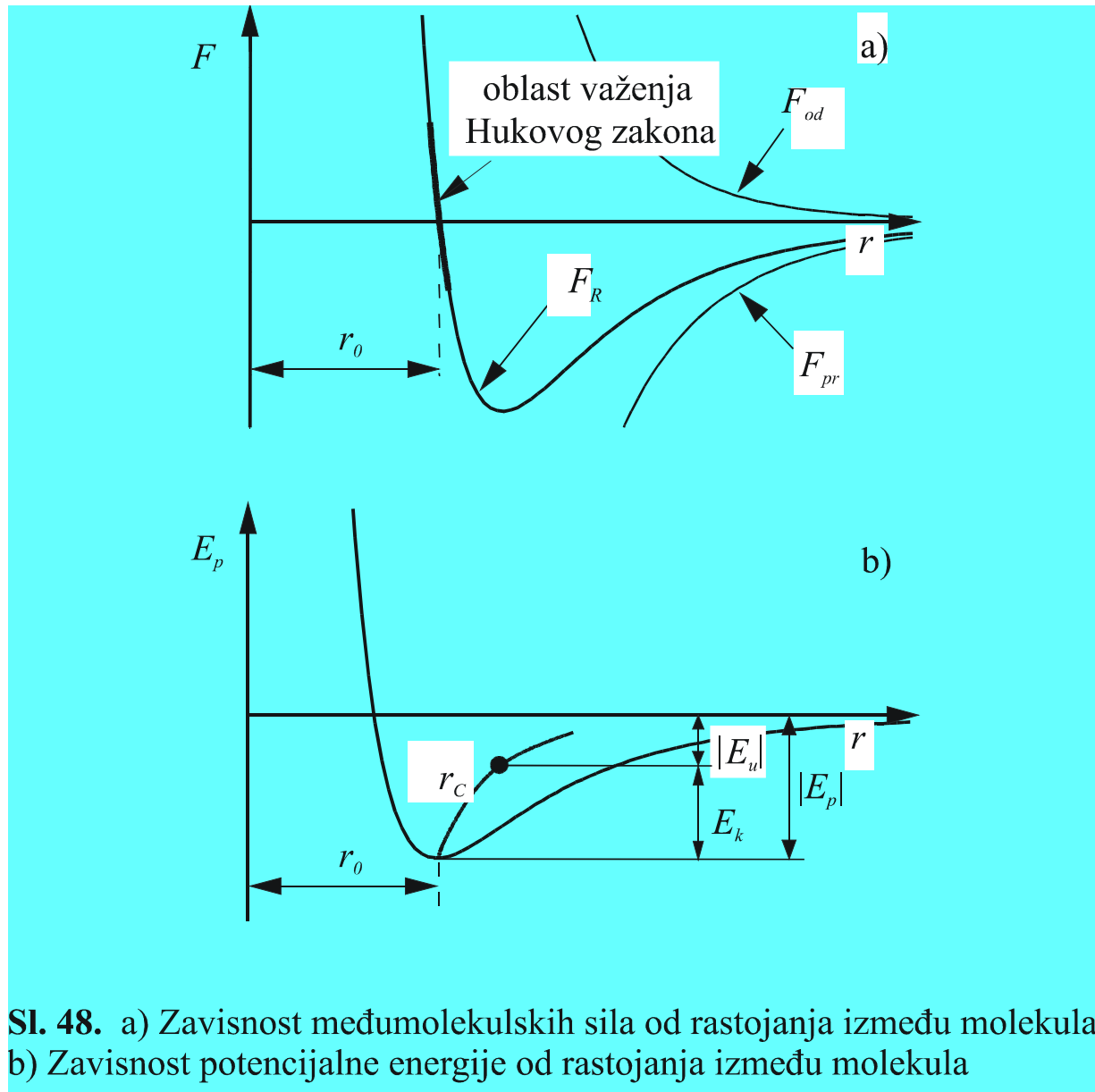
Zato ja za naš subjektivni doživljaj toplog ili hladnog izuzetno važno ne samo kolika će biti temperatura okolnog vazduha, već i kolika je temperatura zidova (ako se nalazimo u zatvorenom prostoru).

## 2.4. Molekulske sile i fazni prelazi

### 2.4.1 Osnovne karakteristike međumolekulskih sila

Međumolekulske sile ne predstavljaju jednu od osnovnih interakcija u prirodi. U osnovi delovanja međumolekulskih sila leži elektromagnetna interakcija. Da bi se odredilo delovanje jednog molekula na drugi trebalo bi uračunati delovanja svih pozitivnih i negativnih naelektrisanja jednog molekula, na pozitivna i negativna naelektrisanja drugog molekula.. Pri tome se javljaju dva tipa sila: privlačne izazvane delovanjem raznoimenih naelektrisanja; i odbojne izazvane delovanjem istoimenih naelektrisanja. Rezultantne sile privlačenja i odbijanja,  $\vec{F}_{pr.}$  i  $\vec{F}_{od.}$ , opadaju sa povećanjem rastojanja između molekula različitom brzinom.

Sabiranjem dve funkcija,  $F_{pr.}$  i  $F_{od.}$  dobija se treća kriva koja ima smisao rezultantne sile  $F_R$ . Nultoj vrednosti rezultantne sile odgovara ravnotežno rastojanje  $r_0$  između molekula. Ako je rastojanje  $r > r_0$ , dominantna je privlačna sila koja teži da smanji rastojanje među molekulima. Nasuprot ovome, kada je  $r < r_0$ , dominantna je odbojna sila koja teži da poveća rastojanje između molekula. Za  $r \approx r_0$  rezultujuća sila skoro linearno zavisi od rastojanja između molekula. U ovoj oblasti međumolekulskih rastojanja važi Hukov zakon.



Minimalnoj vrednosti potencijalne energije odgovara ravnotežno rastojanje između molekula  $r_0$ .

Sa povećanjem energije molekul se kreće u sve većoj oblasti, "penjući se" pri tome ka vrhu potencijalne jame. Usled asimetričnosti krive potencijalne energije, sa povećanjem energije molekula povećava se srednje rastojanje  $r_C$  između molekula, vidi Sl. 48b.

Eksperimentalni rezultati daju sledeću funkcionalnu zavisnost između dužine  $l_0$  koju telo ima na  $0^\circ\text{C}$ , i dužine  $l$  koju telo ima na temperaturi  $t$ :

$$l = l_0(1 + \alpha t)$$

gde je  $\alpha$  termički koeficijent linearnog širenja.

Empirijska ispitivanja daju sledeću jednostavnu vezu između zapremine  $V_0$  na  $0^\circ\text{C}$  i zapremine  $V$  koju telo ima na temperaturi  $t$ :

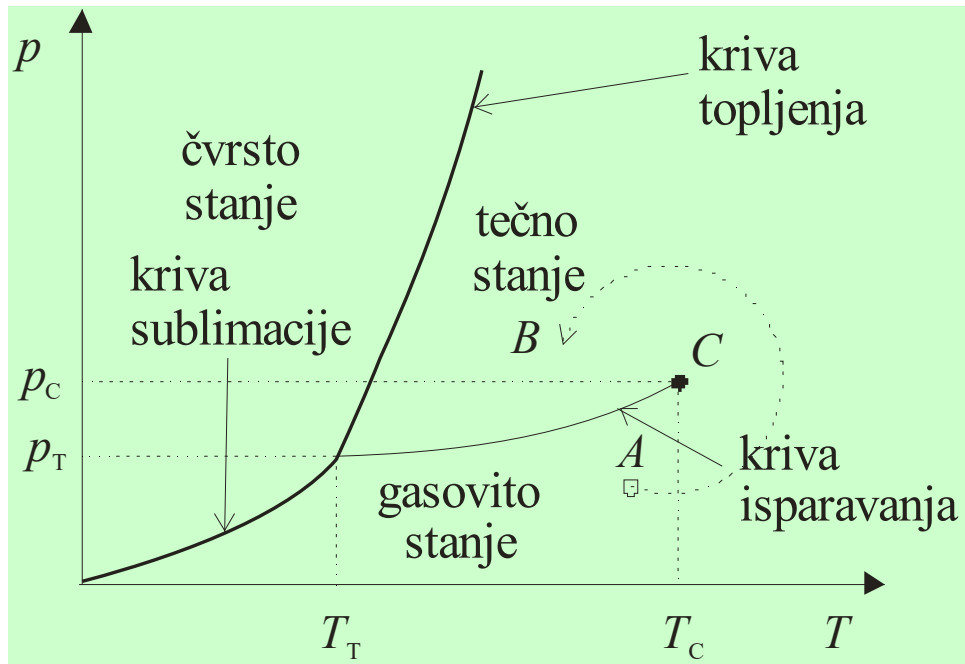
$$V = V_0(1 + \beta t)$$

gde je  $\beta$  termički koeficijent zapreminskog širenja. Termički koeficijenti linearnog širenja i zapreminskog širenja dimenziono se predstavljaju sa  $[\alpha] = \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , odnosno  $[\beta] = \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , i karakterišu konkretni materijal.

## 2.4.2 Fazni prelazi

➤ U termodinamici **faza** predstavlja svaki homogeni sistem, tj. telo čija su fizička svojstva u svim tačkama ista.

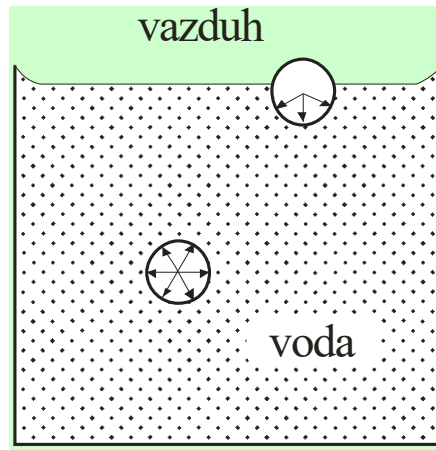
Dijagram faznih prelaza:



Tpote faznih prelaza supstancije:  $Q_{\dot{c}t} = m\lambda_{\dot{c}t}$ ,  $Q_{tg} = m\lambda_{tg}$ ,  $[\lambda] = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

### 2.4.3 Površinski sloj tečnosti

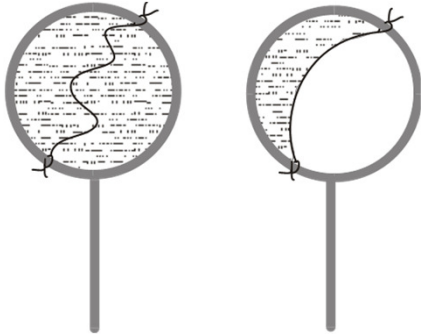
Molekule tečnosti možemo podeliti na dve grupe: molekule koji se nalaze na površini tečnosti, i molekule koji se nalaze u unutrašnjosti tečnosti.



Svaki fizički sistem teži da pređe u stanje sa **minimumom** potencijalne energije. Kako je broj molekula koji se nalaze na površini tečnosti srazmeran slobodnoj površini tečnosti, težnja fizičkog sistema da pređe u stanje sa minimumom potencijalne energije ispoljava se kao **težnja za smanjenjem slobodne površine tečnosti**.

## 2.4.4 Površinski napon

Sile koje deluju duž tangente u odnosu na površinu tečnosti nazivaju se **sile površinskog napona**. Delovanje ovih sila manifestuje se kao težnja površinskog sloja tečnosti da smanji svoju slobodnu površinu.



Sila površinskog napona srazmerna dužini konturne linije kojom je površina ograničena.

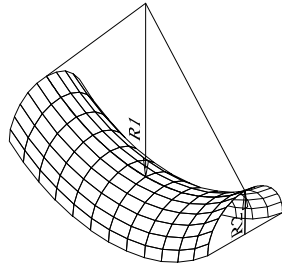
$$F = \gamma l$$

Sa  $\gamma$  je označen koeficijent površinskog napona, veličina koja zavisi od vrste tečnosti, ali i od njene temperature. Koeficijent površinskog napona može se definisati i kao rad izvršen pri jediničnom povećanju slobodne površine tečnosti:

$$\gamma = \frac{dA}{dS} \quad [\gamma] = \frac{\text{N}}{\text{m}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

## 2.4.5 Kapilarne pojave

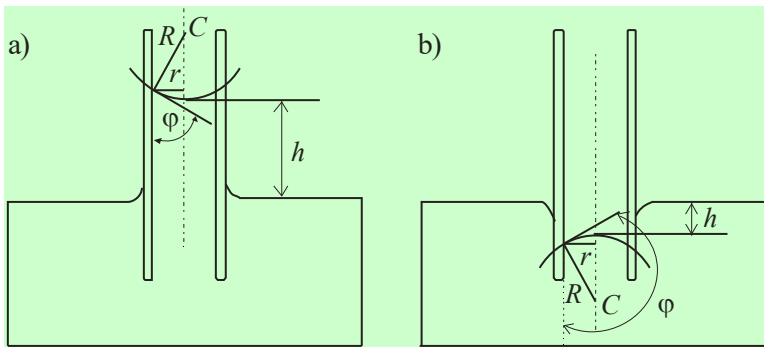
Površinski sloj tečnosti deluje kao neka vrsta opne u odnosu na slojeve tečnosti koji se nalaze ispod površine. Ako je površinski sloj tečnosti ispupčen, pod dejstvom sila površinskog napona povećaće se pritisak u unutrašnjosti tečnosti. Nasuprot ovome, u slučaju izdubljenog površinskog sloja doći će do smanjenja pritiska u unutrašnjosti tečnosti. Laplas je došao do izraza za dodatni pritisak izazvan delovanjem sila površinskog napona:



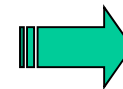
$$\Delta p = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$p = p_0 \pm \Delta p$$

Uzane cevi prečnika oko  $1 \text{ mm}$  nazivamo kapilarama



$$\frac{2\gamma}{R} = \rho g h$$



$$h = \frac{2\gamma \cos \varphi}{\rho g r}$$

## 2.5 Difuzija vodene pare

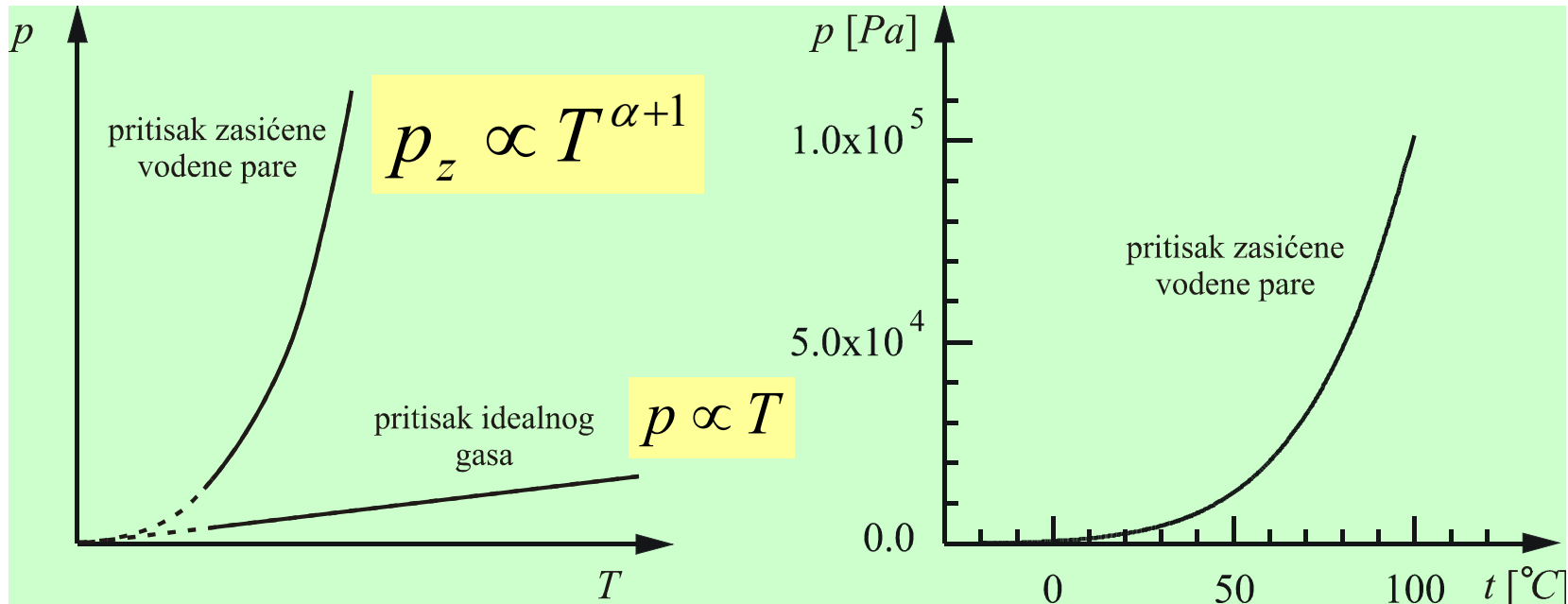
### 2.5.1 Osnovne karakteristike vodene pare

Na površinskom sloju koji odvaja tečnost od gasa odvija se proces prelaska tečnosti u gasovito stanje. U tečnosti se, bez obzira na temperaturu, nalazi izvestan broj molekula čije su energije dovoljno velike da savladaju privlačne sile ostalih molekula i pređu u gasovitu fazu. Ovaj proces, prelaza tečne faze u gasnu fazu, naziva se isparavanje, a nastali gas predstavlja paru supstancije koja isparava.

Uporedo sa procesom isparavanja, na graničnoj površi između tečne i gasovite faze, odvija se i proces kondenzacije - povratka molekula iz gasne u tečnu fazu. Proces kondenzacije je utoliko izraženiji što je veća koncentracija molekula u gasnoj fazi.

Stanje dinamičke ravnoteže nastaje kada se izjednači broj molekula koji u jedinici vremena ispare i broj molekula koji se u istom vremenskom intervalu kondenzuju. U tom trenutku para postaje zasićena, a pritisak zasićene pare tačno je određen temperaturom na kojoj se nalazi dati termodinamički sistem.

U slučaju zasićene vodene pare povećanje pritiska izazvano je kako povećanjem kinetičke energije, tako i povećanjem koncentracije idealnog gasa.

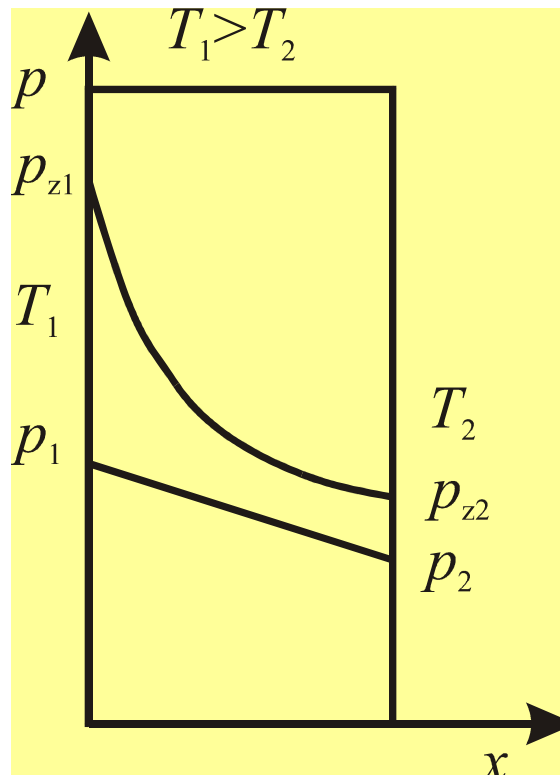


## 2.5.2 Difuzija vodene pare kroz porozni zid

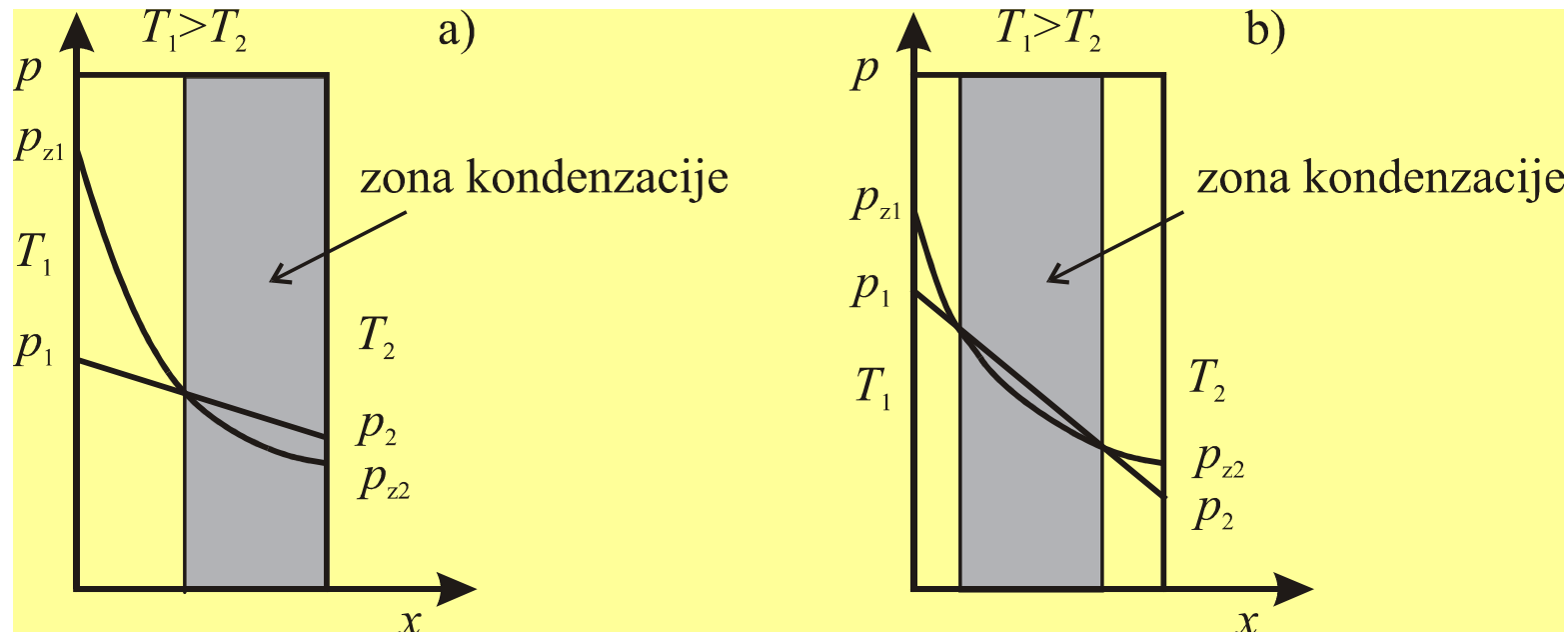
U termodinamičkim sistemima sa narušenom termodinamičkom ravnotežom nastaju procesi kojima termodinamički sistem teži da pređe u stanje termodinamičke ravnoteže. Proces uzajamnog spontanog mešanja dve ili više supstanci, odnosno različitih delova jedne supstance, usled toplotnog kretanja njihovih molekula, dok im koncentracije ne postanu jednake u celoj zapremini sistema, nazivamo difuzijom.

Osnovnu karakteristiku difuzionih procesa predstavlja prenos mase u toku uspostavljanja ravnotežnog stanja.

Može smatrati da pritisak vodene pare (posmatrane kao idealni gas) skoro linearno opada od oblasti većeg, ka oblasti manjeg pritiska. Međusobni odnos pritiska zasićene vodene pare i pritiska vodene pare u preseku građevinskog elementa, određuju oblast u kojoj je moguća kondenzacija. Naime, ukoliko je duž preseka građevinskog elementa, u svim tačkama, pritisak zasićene vodene pare veći od pritiska vodene pare, proces kondenzacije se ne dešava.



Raspodela pritiska zasićene i nezasićene vodene pare kroz jednoslojni zid u slučaju kada postoje uslovi za kondenzaciju. a) Kondenzacija se realizuje u oblasti koja naleže na unutrašnju površinu zida. b) Kondenzacija se realizuje u oblasti u unutrašnjosti zida.



Raspodela pritiska zasićene i nezasićene vodene pare kroz višeslojni zid. a) Izolacioni sloj se nalazi na unutrašnjoj strani zida. b) Izolacioni sloj se nalazi na spoljašnjoj strani.

