

# Postizanje niskih temperatura

---

**Dorotek, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:090793>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-03**

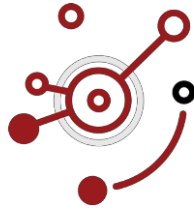


*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ODJEL ZA FIZIKU**

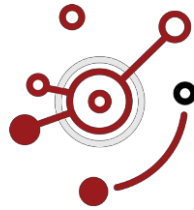


**IVAN DOROTEK**

**POSTIZANJE NISKIH TEMPERATURA**

**Završni rad**

Osijek, 2017.



**IVAN DOROTEK**

## **POSTIZANJE NISKIH TEMPERATURA**

**Završni rad**

Predložen Odjelu za fiziku sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja zvanja prvostupnika fizike

Osijek, 2017.

„Završni rad izradio sam u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Denisa Stanića u sklopu preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“

## Sadržaj

|  |     |
|--|-----|
| Sažetak .....                                  | II  |
| Abstract .....                                 | III |
| Uvod.....                                      | 1   |
| 1. PLIN .....                                  | 2   |
| 2. PLINSKI ZAKONI .....                        | 2   |
| 2.1. Boyle-Mariotteov zakon .....              | 2   |
| 2.2. Gay-Lussacov zakon.....                   | 4   |
| 2.3. Charlesov zakon.....                      | 5   |
| 2.4. Avogadrov zakon .....                     | 5   |
| 2.5. Adijabatski proces.....                   | 6   |
| 3. JEDNADŽBA STANJA IDEALNOG PLINA.....        | 7   |
| 4. METODE POSTIZANJA NISKIH TEMPERATURA .....  | 8   |
| 4.1. Princip rada hladnjaka.....               | 8   |
| 4.2. Kaskadno hlađenje .....                   | 9   |
| 4.3. Lindeov uređaj .....                      | 10  |
| 4.4. Joule-Thompsonov tip ukapljivača.....     | 22  |
| 4.5. Dilucijski hladnjak.....                  | 23  |
| 4.6. Hlađenje laserom.....                     | 24  |
| 5. USKLADIŠTENJE I TRANSPORT UKAPLJEVINE ..... | 25  |
| 6. MJERENJE NISKIH TEMPERATURA.....            | 26  |
| 7. ZAKLJUČAK .....                             | 27  |
| Literatura.....                                | 28  |
| Životopis.....                                 | 30  |

Odjel za fiziku

## POSTIZANJE NISKIH TEMPERATURA

IVAN DOROTEK

Sažetak

U ovom završnom radu opisano je nekoliko metoda za postizanje niskih temperatura: hladnjak, kaskadno hlađenje, Lindeov uređaj, Joule-Thompsonov tip ukapljivača, dilucijski hladnjak te hlađenje laserom.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: dušik/helij/hladnjak/hlađenje/Joule-Thompson/laser/Linde/plinski zakoni/  
ukapljivanje plinova

Mentor: doc.dr.sc. Denis Stanić

Ocijenjivači:

Rad prihvaćen:

## ACHIEVING LOW TEMPERATURES

IVAN DOROTEK

### Abstract

In this bachelor's thesis is described several methods for achievement low temperatures: refrigerator, cascade cooling, Linde's device, Joule-Thompson's type liqueur, dilution cooler and laser cooling.

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords : cooling/gas laws/helium/Joule-Thompson/liquefaction gases/laser/Linde/nitrogen/refrigerator

Supervisor: Denis Stanić, Ph.D

Reviewers:

Thesis accepted:

## Uvod

Prve radove na ukapljivanju plinova niske kritične temperature izveli su gotovo istodobno 1877. godine francuski fizičar Louis Paul Cailletet (1832.-1913.) i švicarski fizičar Raoul Pictet (1846-1929), postigavši pojavu magle kisika u laboratorijskim uvjetima. Time su dokazali da je kisik plin koji se može dovesti u kapljevito i čvrsto stanje. Prvo ukapljivanje zraka uspjelo je 1883. poljskim fizičarima Zygmuntu Wróblewskom (1845.-1888.) i Karolu Olszewskom (1846.-1915.) primjenom trostupanjskog rashladnog stroja. Tadašnje stanje rashladne tehnike nije dopuštalo upotrebu kaskadnih rashladnih uređaja za industrijsku primjenu, ali se oni danas primjenjuju ravnopravno s ostalim sustavima ukapljivanja plinova. Prvi industrijski uređaj za ukapljivanje plinova, ponajprije zraka, patentirao je 1895. godine njemački znanstvenik C. von Linde.



## 1. PLIN

Plin je agregatno stanje u kojemu tvar nema stalan oblik ni obujam. U takvom stanju sve molekule tvari imaju dovoljnu unutarnju energiju da se oslobode iz stabilne strukture, pri čemu temperatura mora biti iznad, a tlak ispod kritične vrijednosti. U suprotnom samo neke molekule imaju dovoljnu energiju, pa uz plinovitu postoji i kapljevit ili kruta faza. Plin uvijek ispunjava sav prostor u kojem se nalazi "svojstvo ekspanzivnosti". Smanjenje volumena plinova zove se kompresija, a povećanje volumena plinova ekspanzija. Bitno svojstvo plinova je nasumično gibanje njihovih čestica, koje nazivamo Brownovo gibanje, prema Robertu Brownu, koji je ovu pojavu po prvi puta uočio na sićušnim zrcima cvjetnog peluda na vodi, promatrajući ih ispod mikroskopa. Kinetička teorija plinova opisuje plin kao velik broj malih čestica koje su stalno u nasumičnom kretanju. [1]

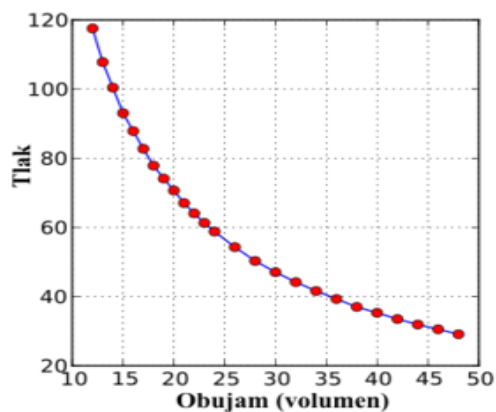
## 2. PLINSKI ZAKONI

Plinski zakoni su se razvili tijekom 17. i 19. stoljeća kada su znanstvenici počeli shvaćati da kod plinova postoji veza između tlaka, volumena i temperature. Plinske zakone promatrat ćemo i opisivati analizirajući ponašanje idealnog plina. Idealni plin je nepostojeći plin u plinovitom agregatnom stanju kod kojeg su međumolekulske sile zanemarive, volumen molekula je zanemariv u odnosu na volumen posude u kojoj se nalazi plin, molekule možemo smatrati materijalnim točkama koje ne djeluju jedna na drugu osim za vrijeme sudara te plin koji se ponaša prema našim matematičkim modelima. Jednadžbu stanja idealnog plina dobit ćemo krenuvši od sljedećih zakona: [2]

### 2.1. Boyle-Mariotteov zakon (izotermni)

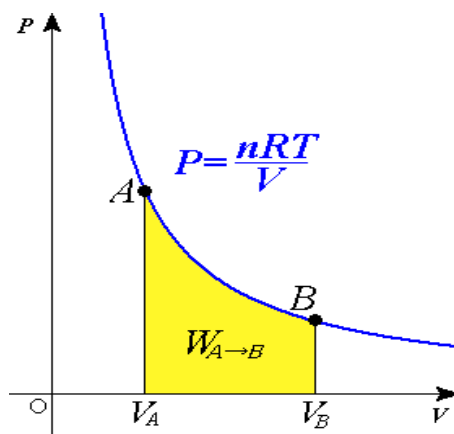
Boyle (1627-1691, engleski fizičar i kemičar) i Mariotte (1620-1684, francuski fizičar i kemičar) su neovisno jedan od drugoga proučavali ovisnost volumena plina o tlaku i našla i da su obrnuto proporcionalni. Ako imamo izotermnu (stalna temperatura) promjenu tlaka, odnosno volumena plina, onda za idealni plin vrijedi Boyle-Mariotteov zakon:

$$pV = \text{const} \quad (T = \text{const})$$



Slika 2.1.1. p-V dijagram [3]

U p -V dijagramu ovisnost tlaka idealnog plina o volumenu prikazana je istostranom hiperbolom koju nazivamo izotermom jer se ovisnost tlaka o volumenu razmatra pri stalnoj temperaturi. Za realne plinove pri visokim tlakovima nastaju određena odstupanja jer se tada volumen pri kompresiji polaganije smanjuje nego što je prikazano zakonom za idealni plin. [2]



Slika 2.1.2. Rad plina pri izotermnom procesu [4]

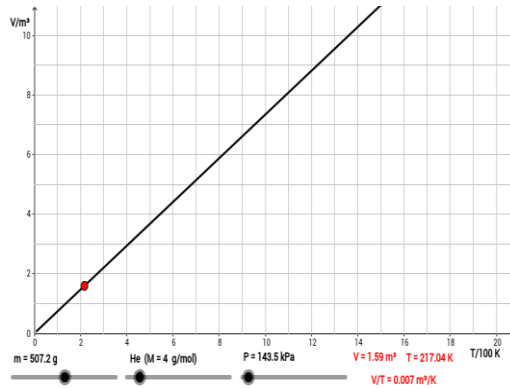
Pri izotermnom procesu rad plina u p-V dijagramu predstavlja površinu ispod krivulje.

$$W = nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = nRT \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right)$$

## 2.2. Gay-Lussacov zakon (izobarni)

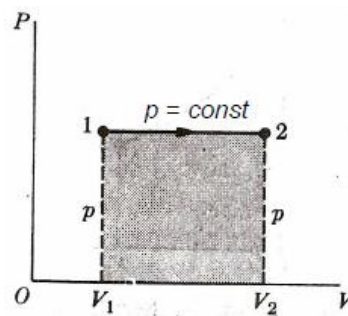
Širenje plinova pri zagrijavanju je veće nego širenje tekućina i čvrstih tijela. Zagrijavamo li plin uz stalni tlak, tj. izobarno, volumen mu se linearno povećava s temperaturom po Gay-Lussacovom (1778-1850, francuski kemičar) zakonu: "volumen plina pri stalnom tlaku je proporcionalan termodinamičkoj temperaturi." [2]

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (p = \text{const})$$



Slika 2.2.1. V-T dijagram [5]

Krivulja ovisnosti volumena o temperaturi pri stalnom tlaku za idealni plin je pravac u V-T dijagramu i zove se izobara. Produžeci pravca sijeku os T u točki koja odgovara temperaturi apsolutne nule. Svi plinovi prije nego što se ohlade do temperature apsolutne nule prelaze u tekuće, odnosno čvrsto stanje pa plinski zakoni u blizini apsolutne nule nemaju fizikalni smisao.



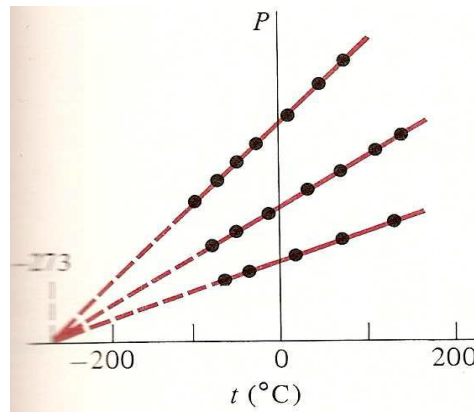
Slika 2.2.2. Rad plina pri izobarnom procesu [6]

Rad plina pri izobarnom procesu računamo:  $W = p(V_2 - V_1)$

### 2.3. Charlesov zakon (izohorni)

Kod izohorne promjene ( $V = \text{const}$ ) stanja plina ovisnost tlaka o temperaturi je dana Charlesovim (1746-1823, francuski fizičar) zakonom: [2]

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (V = \text{const})$$



Slika 2.3.1. V-T dijagram [7]

Rad u izohornom procesu jednak je nuli jer se sva apsorbirana toplina troši na povećanje unutrašnje energije sustava.  $W = 0$

### 2.4. Avogadrov zakon

1811. godine Avogadro (1776-1856, talijanski fizičar) je našao da za plinove vrijedi ovaj zakon: Jednaki volumeni svih plinova na istoj temperaturi i tlaku imaju jednaki broj čestica. [2]

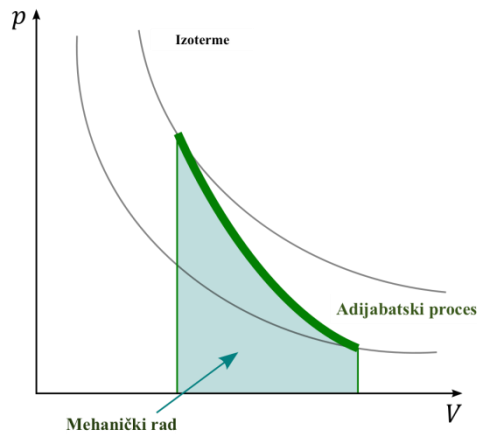
Broj jedinki u n-molova neke tvari je:  $N = n \cdot N_A$ ,

gdje je  $N$  broj čestica u sustavu,  $n$  količina tvari te  $N_A$  Avogadrova konstanta ( $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )

## 2.5. Adijabatski proces

Kod adijabatskog procesa sustav ne razmjenjuje toplinu s okolinom:  $dQ = 0$ ,  $dU = -dW$

U adijabatskoj ekspanziji sustav vrši rad i njegova se unutrašnja energija smanjuje (hladi se), a u adijabatskoj kompresiji nad sustavom se vrši rad te se on grije. Proces je adijabatski ako je sustav dobro toplinski izoliran. [8]



Slika 2.5.1.  $p$ - $V$  dijagram [8]

*Za idealni plin adijabatsko povećanje obujma rezultira hlađenjem*

Adijabata je krivulja kojom prikazujemo adijabatsku promjenu (ekspanziju ili kompresiju) idealnog plina u  $p$ - $V$  dijagramu.

Veze između tlaka, volumena i temperature opisane su Poissonovim jednadžbama:

$$TV^{K-1} = \text{const}, \quad pV^K = \text{const}, \quad T^K p^{1-K} = \text{const},$$

gdje je  $K$  adijabatski koeficijent i ovisi o vrsti plina. Za jednoatomne plinove iznosi 1,67, a za dvoatomne plinove iznosi 1,4.

Usporedba izoterme i adijabate s obzirom da je  $K > 1$  daje da je adijabata strmija od izoterme, to znači da za istu promjenu tlaka promjena volumena kod adijabatske promjene je veća. [8]

Rad plina pri adijabatskoj promjeni jednak je:  $W = nR \cdot (T_1 - T_2) / (K - 1)$

### 3. JEDNADŽBA STANJA IDEALNOG PLINA

Stanje idealnog plina potpuno je određeno tlakom, volumenom i temperaturom. Relacija, koja povezuje tlak, temperaturu i volumen neke tvari, zove se jednadžba stanja i može se pisati kao funkcija:  $f(p, V, T) = 0$ . [2]

Za izvođenje jednadžbe stanja idealnog plina iz plinskih zakona prevest ćemo određenu količinu plina iz početnog stanja određenog volumenom  $V_0$  na temperaturi  $T_0 = 273,15 K$  i normiranom atmosferskom tlaku  $p_0 = 101325 Pa$  u konačno stanje određeno tlakom  $p$ , volumenom  $V$  i temperaturom  $T$ . Plin ćemo iz početnog stanja dovesti u konačno stanje izobarnim zagrijavanjem do konačne temperature, a onda izotermnom kompresijom do konačnog tlaka i volumena. Izobarnim zagrijavanjem plina na temperaturu  $T$  volumen plina po Gay-Lussacovom zakonu je:

$$V = V_0(T/T_0)$$

Izotermnom kompresijom tlak plina povećavamo od početnog  $p_0$  do konačnog  $p$  pri čemu se volumen smanji s  $V'$  na  $V$  prema Boyle-Mariotteovu zakonu:

$$pV = p_0 V'$$

Uvrštavanjem  $V'$  iz prethodne jednadžbe dobijemo vezu između veličina početnog i konačnog stanja:

$$pV/T = p_0 V_0/T_0 = const$$

To je jedan oblik jednadžbe stanja idealnog plina. Pomoću Avogadrova zakona jednadžbu stanja ćemo svesti na pogodniji oblik.

Definiramo opću plinsku konstantu:

$$R = p_0 V_0/T_0 = 8,314 J/kgK \text{ (opća plinska konstanta)}$$

$$p_0 = 101325 Pa, V_0 \approx 22,4 l/mol, T_0 = 273,15 K$$

Jednadžba stanja prelazi u:

$$pV = nRT$$

Uz  $n = N/N_A$ ,  $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} J/kg$  jednadžbu stanja plina možemo pisati i kao:

$$pV = Nk_b T$$

## 4. METODE POSTIZANJA NISKIH TEMPERATURA

Ukapljivanje plinova ili prevođenje plinova u kapljevitost (tekuće) agregatno stanje, provodi se ponajviše radi lakšeg 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 svakom plinu posebno. Ukapljivanje samo kompresijom pri stalnoj temperaturi uspijeva ako je ta temperatura niža od kritične, a samo hlađenjem pri stalnom tlaku ako je tlak niži od kritičnoga. Tako će zrak pri stalnom atmosferskom tlaku prijeći iz plinovitog u kapljevitost agregatno stanje kada ga se ohladi na  $-194\text{ °C}$ . Slično tomu dolazi do ukapljivanja zraka njegovim tlačenjem na dovoljno visok tlak pri stalnoj temperaturi nižoj od kritične (npr. pri  $-150\text{ °C}$  za ukapljivanje zraka potreban je tlak od približno 20 bara). Za zrak je, zbog njegove niske kritične temperature, takav postupak nepraktičan, ali je prikladan npr. za ugljikov dioksid, koji postaje kapljevito primjenom tlaka od 57,4 bara, pri temperaturi od  $20\text{ °C}$ . [9]

### 4.1. Princip rada hladnjaka

Hladnjaci rade na principu toplinskog stroja, ali u suprotnom smjeru. Hladnjak uzima toplinu od hladnog spremnika i predaje ju toplom spremniku. Dvije su promjene stanja karakteristične za rad hladnjaka. To su izotermna kompresija i adijabatska ekspanzija.

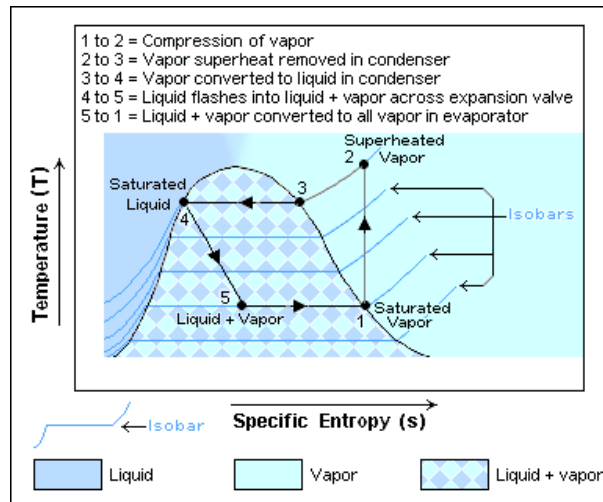
Kružni proces radne tvari koristi se u svrhu hlađenja određenog spremnika kako bi njegovu temperaturu,  $T_h$ , održali trajno ispod temperature okoline,  $T_h < T_o$ . Zato se kaže da se rashladni proces vodi ispod temperature okoline.

Toplina odvedena hlađenom spremniku,  $Q_{hl}$ , dovodi se radnoj tvari,  $Q_{dov} = -Q_{hl}$ , čija temperatura mora biti niža od temperature hlađenog sudionika,  $T_{dov} = T_1 < T_h$ . Da bi se primljena toplina mogla odvesti od radne tvari i predati okolini,  $Q_{odv} = -Q_o$ , potrebno je utrošiti mehanički rad,  $W < 0$ , kako bi se povećalo toplinsko stanje i radna tvar dovela na temperaturu,  $T_{odv}$ , koja mora biti veća od temperature okoline,  $T_{odv} = T_2 > T_o$ . Energija, koja se u obliku topline predaje okolini,  $Q_{odv}$ , predstavlja zbroj topline  $Q_{dov}$  i mehaničkog rada,  $W$ .

Uzavši u obzir smisao (predznak) ovih energija može se pisati:

$$|Q_{odv}| = Q_{dov} + |W|, \quad (Q_{odv} < 0, W < 0).$$

Učinkovitost rashladnih procesa,  $z$ , izražava se kao odnos topline  $Q_{dov}$  (rashladne topline) i utrošenog mehaničkog rada,  $W$ , koji se mora dovesti za provođenje kružnog procesa. [10]

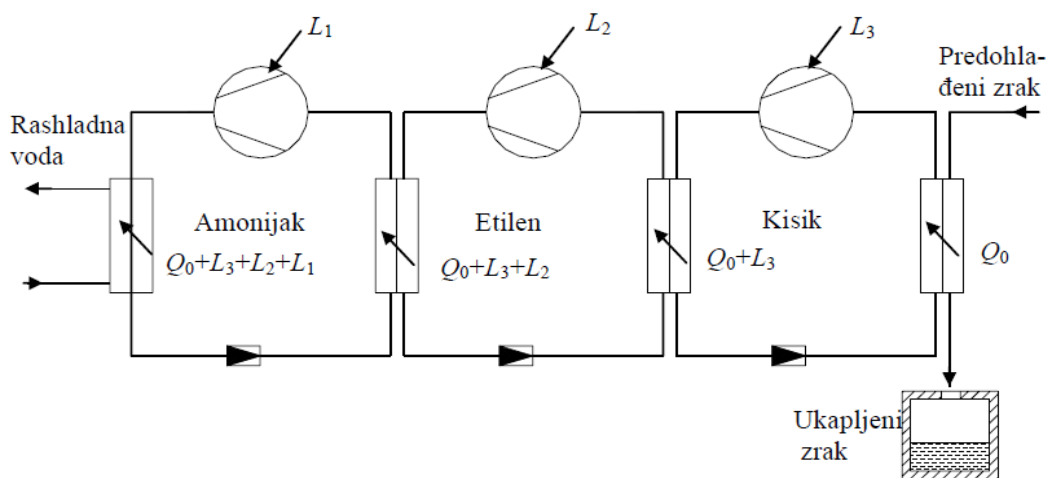


Slika 4.1.1. T-s dijagram [11]

Na slici 4.1.1. primjećujemo sljedeći ciklus. Kompresor usisava suhozasićenu paru stanja 1 pri isparivačkom tlaku i izentropski je komprimira do stanja 2. Sa stanjem 2 para ulazi u kondenzator u kojem, predajući toplinu rashladnom spremniku, potpuno kondenzira do stanja 4, s kojim ta vrela kapljevina ulazi u prigušni ventil u kojem expandira do točke 5 koja leži na isparivačkom tlaku. Dovođenjem topline iz hladionice zasićena para stanja 5 u isparivaču pri isparivačkom tlaku dolazi u stanje suhozasićene pare 1, čime je ciklus zatvoren.

#### 4.2. Ukapljivanje plinova kaskadnim hlađenjem

Ukapljivanje je moguće provesti pomoću kaskadnih rashladnih uređaja, pri čemu za radne tvari dolaze u obzir one s povoljnim kritičnim temperaturama. [12]



Slika 4.2.1. Ukapljivanje plinova kaskadnim hlađenjem [12]



### 4.3. Ukapljivanje plinova prema Lindeu

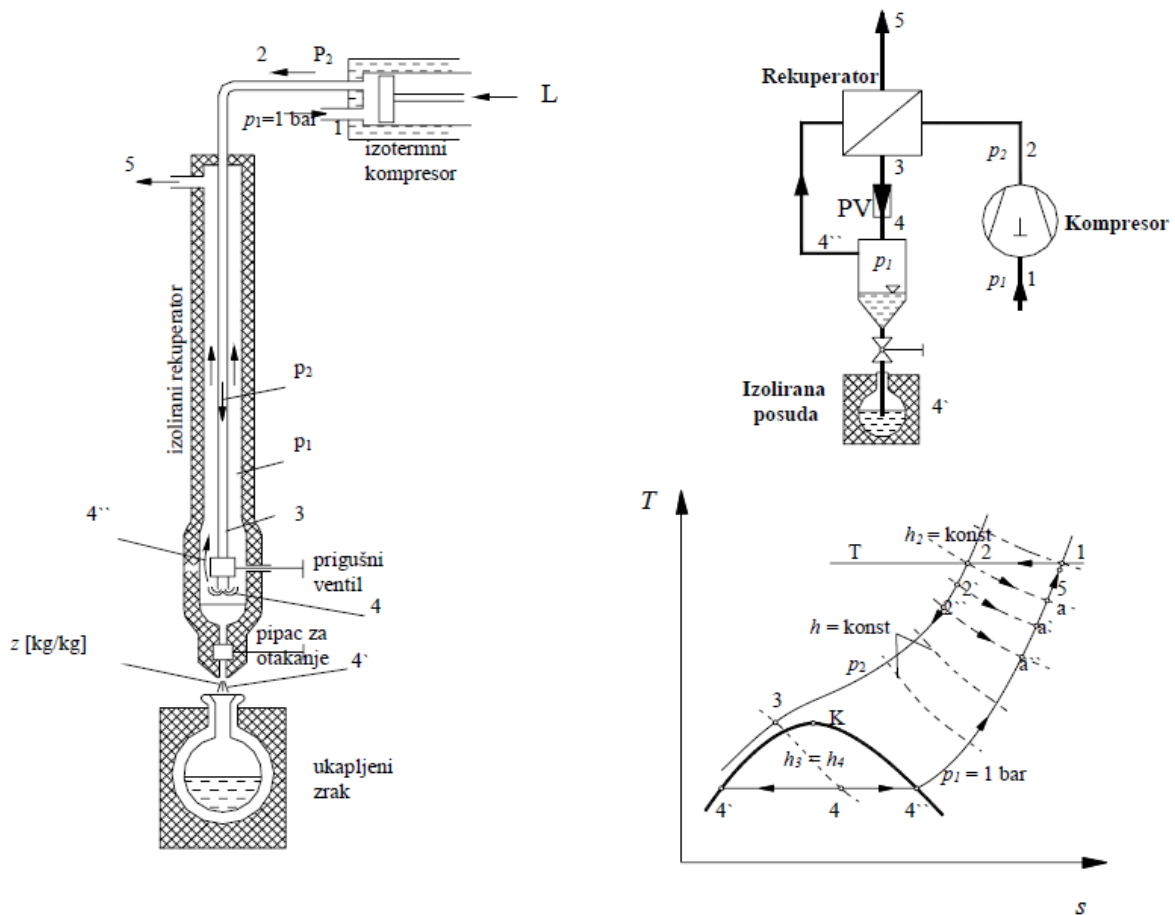
Lindeov postupak ukapljivanja temelji se na Joule - Thomsonovom prigušnom efektu. Ako idealni plin prigušujemo od nekog višeg tlaka  $p$  na tlak  $p_0$ , njegova se temperatura ne mijenja. Realni plinovi se tako vladaju samo pri nižim tlakovima, dok se pri višim tlakovima njihova temperatura više ili manje mijenja. Kao prigušni efekt označujemo omjer  $\left(\frac{\Delta T}{\Delta p}\right) = \frac{T - T_0}{p - p_0}$ . Kod nekih je plinova on negativan, tj. prigušivanjem se plinu smanjuje temperatura (npr. zrak, CO<sub>2</sub>), dok je kod drugih pozitivan, pa prigušivanjem plinu temperatura raste (vodik). Kod svakog plina postoji temperatura inverzije kod koje prigušni efekt mijenja predznak. Što je niža kritična temperatura neke tvari, to je niža i njena temperatura inverzije. [12]

*Tablica 4.3.1. Kritične temperature i temperature inverzije za zrak, vodik i helij [12]*

| Tvar           | $T_K$ | $T_{inv0}$    | $T_{inv0} / T_K$ |
|----------------|-------|---------------|------------------|
| Zrak           | 132,6 | $\approx 760$ | $\approx 5,7$    |
| H <sub>2</sub> | 33,18 | $\approx 200$ | $\approx 6$      |
| He             | 5,19  | $\approx 40$  | $\approx 7,5$    |

Želimo li prigušivanjem postići ohlađivanje, trebalo bi vodik najprije nekako ohladiti ispod 200 K, dok je kod zraka već temperatura okoline daleko ispod temperature inverzije. Prigušivanjem pri temperaturi okoline vodik i helij će se ugrijati, dok će se zrak ohladiti. Ovu je pojavu spretno iskoristio Linde kod svojeg uređaja za ukapljivanje zraka.

## Jednostavni uređaj za ukapljivanje plinova po Lindeu



Slika 4.3.1. Jednostavni uređaj za ukapljivanje plinova po Lindeu (skica uređaja, shematski prikaz i  $T/s$  dijagram procesa) [12]

Kompresor siše zrak vanjskog stanja i komprimira ga izotermno (kompresor je hlađen vodom). Tlak  $p_2$  se kreće od 50 do 200 bar. U ustaljenom se stanju tlačni zrak stanja 2 odvodi u rekuperator gdje se u protustruji hladi prigušenim zrakom koji izlazi iz rekuperatora. Ispred prigušnog ventila stanje tlačnog zraka je 3, dok je iza prigušnog ventila stanje zraka 4. Točka 4 pada u zasićeno područje, pa se može razdvojiti na paru 4'' i vrelu kapljevину 4' koju je moguće otpustiti pomoću pipca za otakanje. Cijeli uređaj mora biti dobro izoliran. Nastoji se da izlazni zrak 5 ima temperaturu čim bližu temperaturi okoline, tj. temperaturi ulaznog zraka 2. Izjednačenje ovih dviju temperatura može se postići samo kod beskonačno velike površine rekuperatora. U svim drugim slučajevima biti će položaj točke 5 u  $T$ - $s$  dijagramu niže od točke 2.

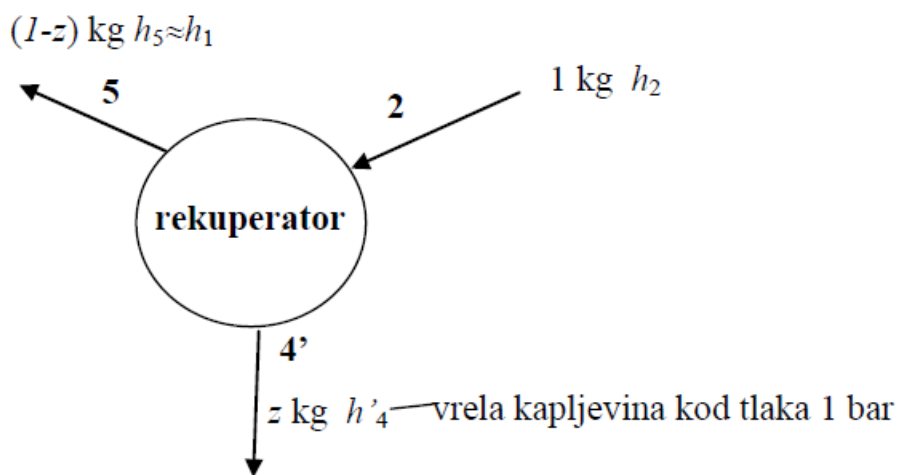
### Opis $T$ - $s$ dijagrama

1-2: izotermna kompresija. Kompresor siše zrak okolnog stanja  $p_1$  i  $T_1$  i komprimira ga na  $p_2 = 50\text{-}200$  bar izotermno (uz hlađenje kompresora rashladnom vodom). sa stanjem 2 zrak ulazi u protustrujni izmjenjivač topline.

2-3: hlađenje zraka pri  $p_2 = \text{konst.}$  Prolaskom kroz izmjenjivač, temperatura zraka se snižava. U ustaljenom pogonu ispred prigušnog ventila je stanje 3.

Promjena stanja 3-4: je prigušivanje od  $p_2$  na  $p_1$  pri  $h = \text{konst.}$  Pri  $p_1 = 1$  bar zrak se dijeli na vrelu kapljevину 4' i paru 4". Preko pipca se može otočiti vreli kapljeviti zrak stanja 4'. Suhozasićena para stanja 4" vraća se rekuperator i služi za pothlađivanje zraka koji dolazi i kompresora. Iz rekuperatora se taj zrak odvodi sa stanjem 5. Na početku rada nema ukapljivanja. Pri puštanju uređaja u pogon prigušit će se zrak stanja 2 u prigušnom ventilu kod konstantne entalpije na stanje  $a$  (ispred prigušnog ventila je stanje zraka 2, jer ga nema što ohladiti do stanja 3). Sa stanjem  $a$  sav se zrak vraća kroz rekuperator u kojem se zagrijava jer preuzima na sebe toplinu od zraka stlačenog na tlak  $p_2$ , koji se pritom ohladi na stanje 2'. Sada se taj zrak 2' prigušuje do  $a'$ . Prigušeni zrak stanja  $a'$  vraća se kroz rekuperator gdje se novonadošli zrak hladi do 2". To se nastavlja dok god se ne postigne stanje 3.

U ustaljenom se stanju ispred prigušnog ventila uspostavlja stanje 3 a iza 4, dok se iz uređaja neprekidno otače  $z$  kg kapljevitoг zraka za svaki kilogram komprimiranog zraka stanja 2.



Slika 4.3.2. Toplinska bilanca rekuperatora za jednostavni uređaj [12]

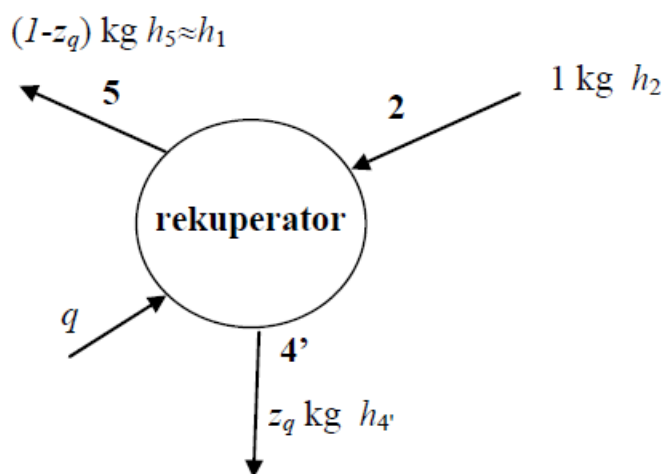
Predhlađivanje tlačnog zraka to je bolje što se bolje iskoristi niska temperatura prigušenog zraka. Zato se nastoji da se do gornjeg kraja rekuperatora temperatura  $T_5$  što više izjednači s  $T_2$ , tj. da se postigne  $T_5 \cong T_2 = T_1$ . Za to je potrebna vrlo velika površina izmjenjivača. U tom, najpovoljnijem slučaju, odlaziti će prigušeni zrak iz izmjenjivača sa stanjem okoline, pa je  $h_5 = h_1$ . U svakom drugom slučaju biti će stanje 5 ispod točke 1 na izobari  $p_1 = 1$  bar i  $h_5 < h_1$ . Kad je aparat tako dobro izoliran da se izmjena topline s okolinom može zanemariti, vrijedi bilanca

$h_2 = (1 - z)h_5 + zh_4'$ . Odatle slijedi iscrpak kapljevitozraka za savršeno dobro izoliran aparat:

$$z = \frac{h_1 - h_5}{h_1 - h_4'} \leq \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4'} \quad (\text{znak jednakosti vrijedi kad je } h_5 = h_1, \text{ a } < \text{ kad je } h_5 < h_1.)$$

Nazivnik u gornjem izrazu je prilično velik broj. Konačni se iscrpak zraka može dobiti samo onda ako je brojnik  $(h_1 - h_2) > 0$ . Pritom se  $h_1$  i  $h_2$  odnose na tlakove  $p_1$  i  $p_2$ , ali na temperaturi okoline  $T = T_2 = T_1$ . Iscrpak zraka ne ovisi o stanjima 3 i 4, već ovisi o entalpiji  $h_4'$  vrelog kapljevitozraka tlaka 1 bar.

slučaj nesavršene izolacije



Slika 4.3.3. Toplinska bilanca rekuperatora za jednostavni uređaj i slučaj nesavršene izolacije [12]

U rekuperator prodire toplina  $q$  [kJ/kg] tlačnog zraka, pa je bilanca:

$$h_2 + q = (1 - z_q)h_5 + z_q h_4'$$

$$z_q = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4'} - \frac{q}{h_1 - h_4'}$$

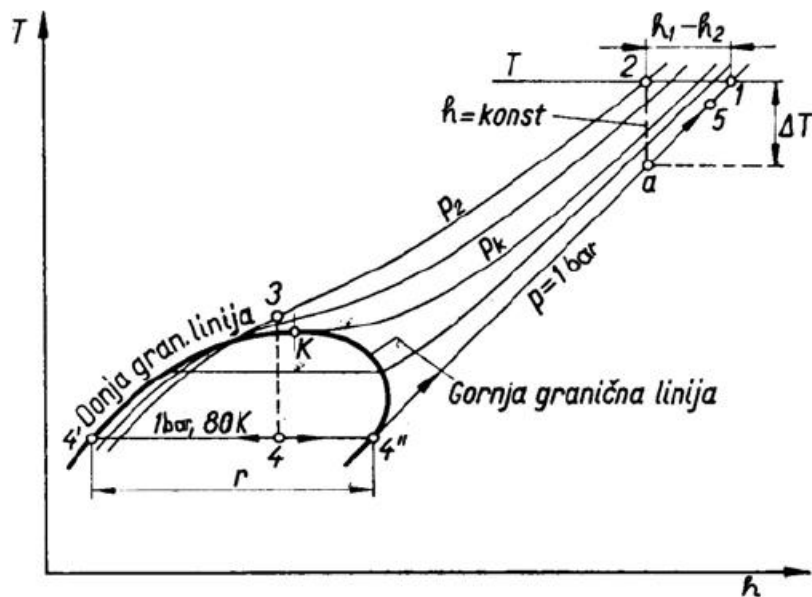
$$z_q = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4'} \left( 1 - \frac{q}{h_1 - h_2} \right)$$

Iscrpak tekućeg zraka nesavršeno izoliranog aparata je tada:

$$z_q = z \left( 1 - \frac{q}{h_5 - h_2} \right) \leq z \left( 1 - \frac{q}{h_1 - h_2} \right)$$

Ako je dotok toplote podjednako velik kao razlika entalpija ( $h_1 - h_2$ ) pri temperaturi okoline, mora naprava zatajiti. Zato je potrebno obratiti veliku pažnju na toplinsku izolaciju.

### rad ukapljenog plina



Slika 4.3.4. Proces ukapljivanja zraka Lindeovim postupkom T-h dijagram [12]

Na slici je prikazan proces u T-h dijagramu. Entalpija  $h_1$  određena je okolnim stanjem, dok  $h_2$  može varirati, ovisno u konačnom tlaku  $p_2$ . Kod viših tlakova  $p_2$  pada točka 2 više ulijevo pa je veća razlika entalpija ( $h_1 - h_2$ ), čime se povećava iscrpak zraka. Međutim povećanje tlaka

$p_2$  ima granice, jer se dostizanjem inverzijskog tlaka razlika entalpija ( $h_1 - h_2$ ) počinje smanjivati. Specifični potrošak rada po 1 kg odtočenog ukapljenog zraka je:  $l_z = \frac{l}{z}$ .

Iako zrak pri visokim tlakovima nije više idealni plin, rad za izotermnu kompresiju od tlaka  $p_1$  na tlak  $p_2$  ipak se može proračunati prema:

$$l = R T_1 \ln \frac{p_2}{p_1}, \text{ pa je}$$

$$l_z = \frac{l}{z} = \frac{RT_1 \ln p_2/p_1}{h_5 - h_4} (h_5 - h'_4) \geq \frac{RT_1 \ln p_2/p_1}{h_1 - h_4} (h_1 - h'_4)$$

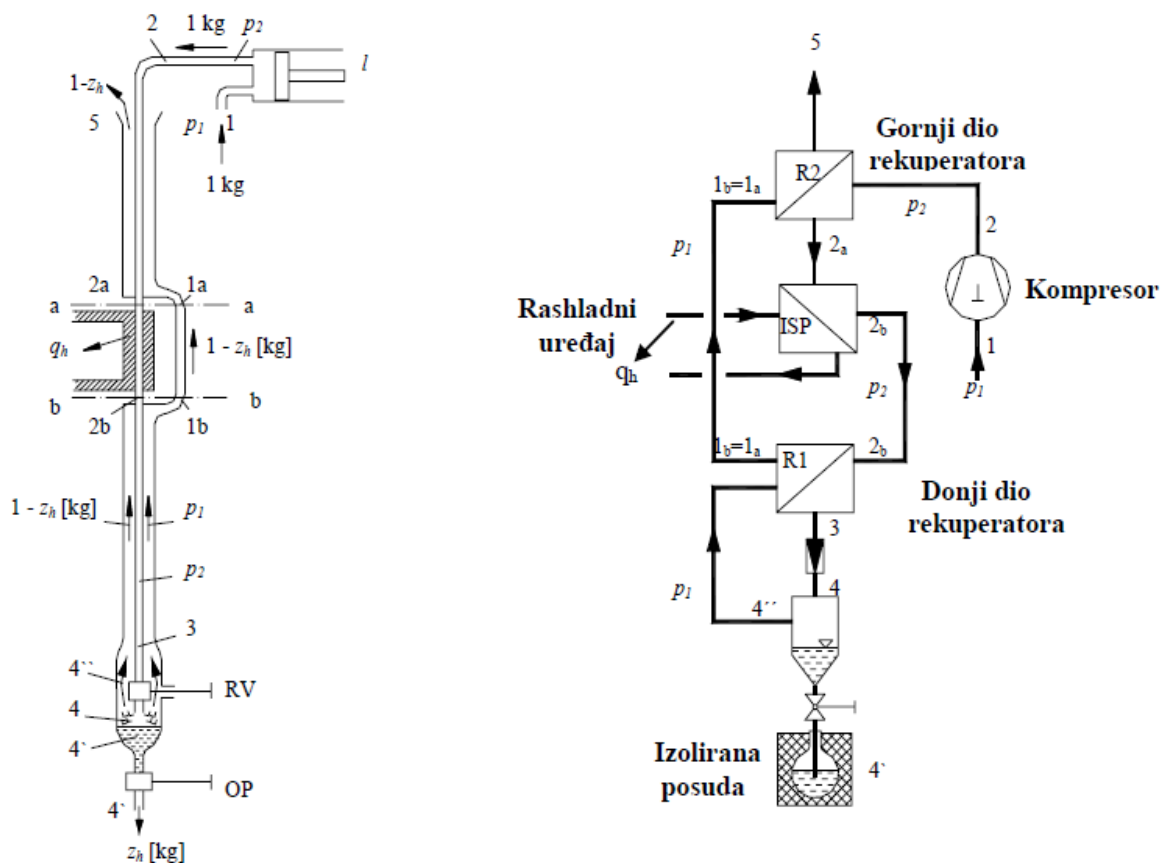
efektivan rad  $l_e = \frac{lz}{\eta}$ , pri čemu dobro izvedeni kompresori imaju  $\eta \cong 0.6$ .

Tablica 4.3.2. Specifični utrošak rada za različite konačne tlakove nakon kompresije [12]

| $p_1 = 1 \text{ bar} \quad \vartheta_1 = 15^\circ\text{C}$ |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
| $p_2$ [bar]  | 50    | 100   | 200   |
| $(h_1 - h_2)$ [kJ/kg]                                      | 10,9  | 21,4  | 38,5  |
| $z$ [kg/kg]  | 0,027 | 0,053 | 0,095 |
| $l/z$  | 11800 | 7030  | 4500  |

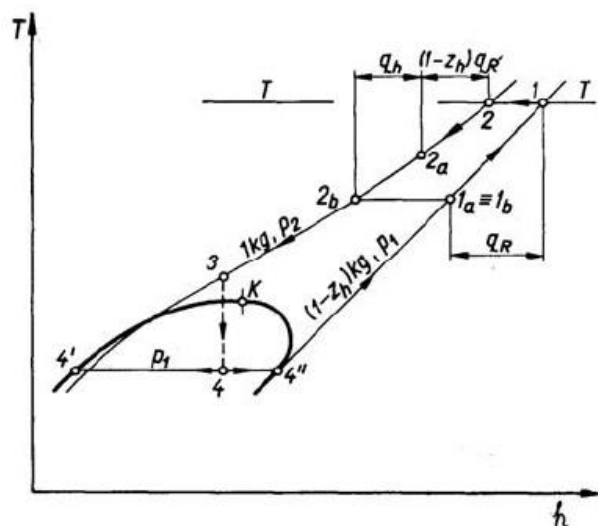
U tablici 4.3.2. dani su računski podaci za nekoliko tlakova  $p_2$ , pri čemu je rad određen grafički iz  $h$ - $s$  dijagrama.

lindeov uređaj s jednostavnim optokom i predohlađivanjem pomoću rashladnog uređaja



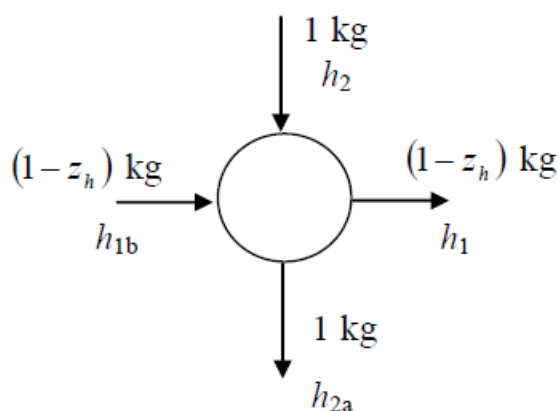
Slika 4.3.5. Lindeov uređaj s jednostavnim optokom i predohlađivanjem pomoću rashladnog stroja (skica uređaja i shematski prikaz) [12]

Rekuperator je podijeljen na dva dijela. U gornjem se dijelu stanje zraka mijenja od 2 do 2a, a u donjem dijelu od 2b do 3. Stanja 1a i 1b se podudaraju ( $1a \equiv 1b$ ) jer se stanje zraka koji se vraća iz rekuperatora ne mijenja. Od staja 1a do 1 odvodi se toplina  $q_r$  u gornjem dijelu rekuperatora.



Slika 4.3.6. Proces ukapljivanja zraka Lindeovim uređajem s jednostavnim optokom i predohlađivanjem pomoću rashladnog stroja  $h, T$  dijagram [12]

Za gornji dio rekuperatora postavlja se bilanca topline: " $h_2 - h_{2a} = (1 - z_h)(h_1 - h_{1b}) = (1 - z_h)q_r$ "



Slika 4.3.7. Toplinska bilanca gornjeg dijela rekuperatora [12]

U presjeku  $b-b$  mora biti temperatura niskotlačnog zraka niža od temperature ohlađenog visokotlačnog zraka, tj.  $T_{1b} \leq T_{2b}$  (na  $T, h$  - dijagramu prikazan je krajnji slučaj  $T_{1b} = T_{2b}$ ). Hlađenje rashladnim uređajem uzrokuje promjenu stanja tlačnog zraka od  $2a$  do  $2b$ . U isparivaču rashladnog uređaja se od zraka predaje radnoj tvari rashladnog uređaja toplina  $q_h = h_{2a} - h_{2b}$ , zrak se hladi od  $T_{2a}$  na  $T_{2b}$ , a radna tvar isparuje.

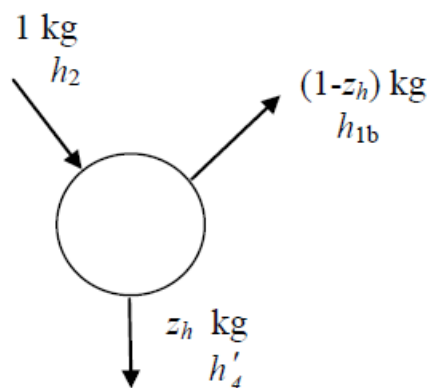


Temperatura u isparivaču odabire se do oko  $-50^{\circ}\text{C}$ . Niža temperatura nije opravdana jer se faktor hlađenja (rashladni množilac)  $\varepsilon_0$  pogoršava. Iscrpak tekućeg zraka  $z_h$  može se odrediti na temelju toplinske bilance uređaja:

$$z_h = \frac{h_5 - h_4}{h_5 - h_4} + \frac{qh}{h_5 - h_4} \leq \frac{h_1 - h_4}{h_1 - h_4} \left(1 + \frac{qh}{h_1 - h_4}\right) = z \left(1 + \frac{qh}{h_1 - h_4}\right)$$

gdje je  $z$  iscrpak zraka jednostavnog Lindeovog uređaja. Bilanca donjeg dijela rekuperatora, ispod presjeka  $b-b$  daje:

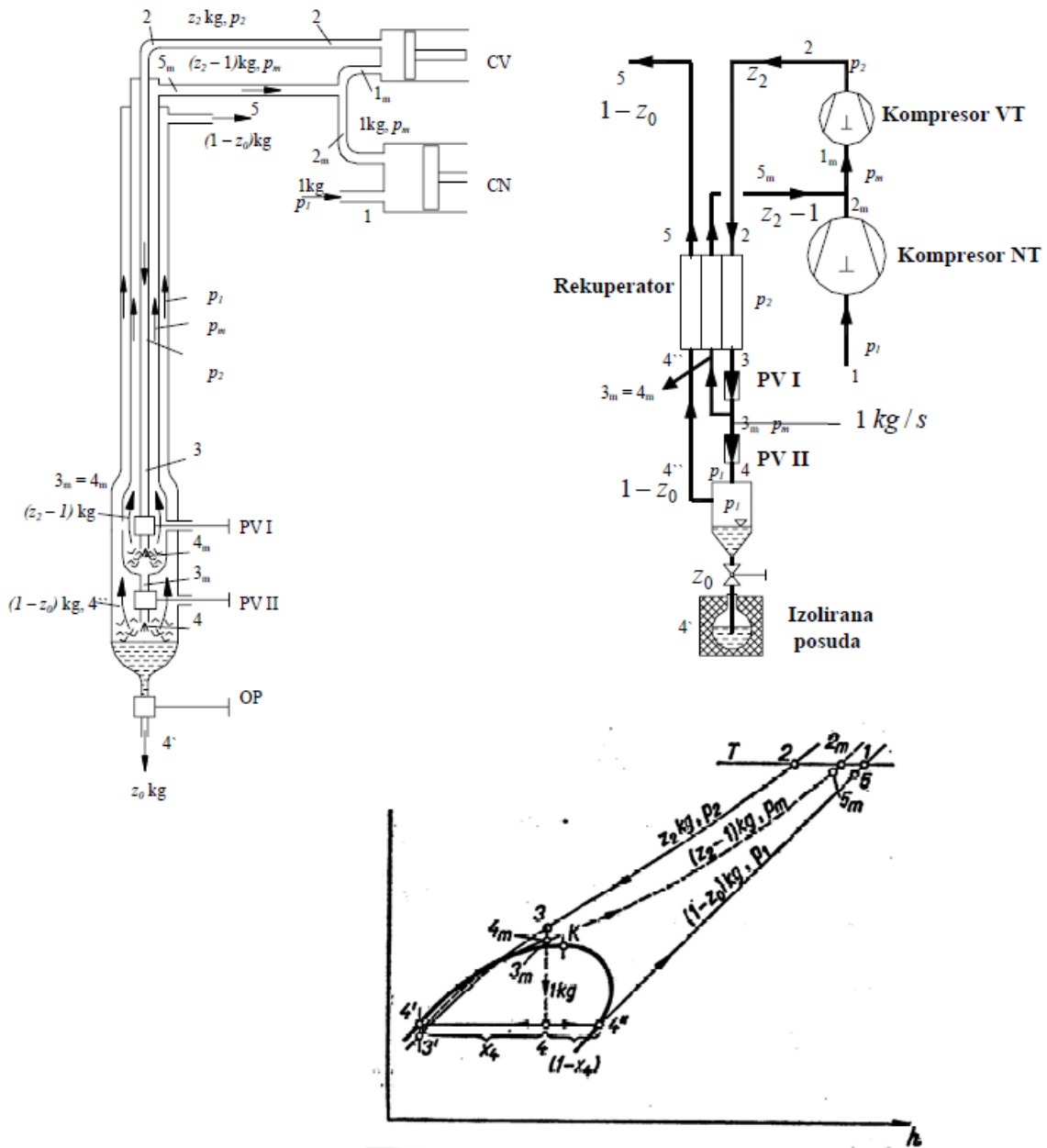
$$h_{2b} = (1 - z_h)h_{1b} + z_h h'_4 \quad \text{i odatle} \quad z_h = \frac{h_{1b} - h_{2b}}{h_{1b} - h'_4}$$



Slika 4.3.8. Toplinska bilanca donjeg dijela rekuperatora [12]

Što je veći  $q_h$ , veći će biti i iscrpak zraka. Iscrpak će biti to veći što je niža odabrana temperatura  $T_b$ , jer se time povećava  $(h_{1b} - h_{2b})$ , a smanjuje  $(h_{1b} - h'_4)$ . Potrošak rada za 1 kg tlačnog zraka je ovdje  $l_{\square v}$  pri čemu se uzima u obzir rad potreban za izotermnu kompresiju i rad potreban za pogon rashladnog uređaja.  $l_{\square v} = l + l_q = RT \ln \frac{p_{\square}}{p_{\square}} + \frac{qh}{\varepsilon_0}$ . Za 1kg ukapljenog zraka, potrošak rada je  $l_h = \frac{l_{\square v}}{z_h}$ . U praksi se obično primjenjuje dvostruki optok s pred ohlađivanjem na  $-50^{\circ}\text{C}$ .

lindeov uređaj s dvostrukim optokom

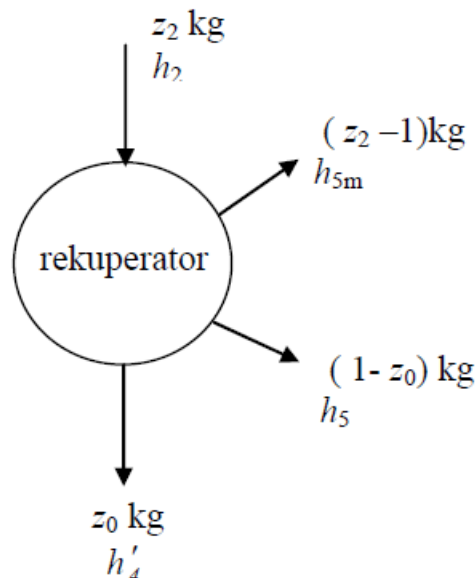


Slika 4.3.9. Lindeov uređaj za ukapljivanje zraka s dvostrukim optokom (skica uređaja, shematski prikaz i  $T, s$  - dijagram procesa) [12]

Cilindar visokog tlaka dobavlja  $z_2$  kg visokotlačnog zraka 2 s temperaturom okoline. U izmjenjivaču se taj zrak hladi do stanja 3. U regulacijskom ventilu RVI prigušuje se sav visokotlačni zrak na srednji tlak  $p_m$ , točka 4m u  $T, h$  - dijagramu. Dio tog zraka, i to 1 kg prigušuje se u RVII dalje, dok preostali dio  $(z_2 - 1)$  kg pri tlaku  $p_m$  struji natrag u rekuperator, odakle ga sa stanjem 5m visokotlačni cilindar ponovno usisava. Pri tome optječe uređajem

količina  $(z_2 - 1)$  kg zraka u kružnom toku između tlakova  $p_m$  i  $p_2$ . U prigušnom ventilu RVII se na okolni tlak prigušuje 1 kg zraka od stanja  $3m \equiv 4m$  na stanje 4. Pri tome se ukapljuje  $z_0$  kg, a ostatak od  $(1-z_0)$  kg vraća se niskotlačnim vodom rekuperatora okolini. Toplinska bilanca rekuperatora za dvostruki optok:

$$z_2 h_2 = (z_2 - 1)h_{5m} + (1 - z_0)h_5 + z_0 h'_4 \quad \text{odakle slijedi } z_0 = \frac{h_5 - h_{5m}}{h_5 - h'_4} + z_2 \frac{h_5 - h_2}{h_5 - h'_4}$$



Slika 4.3.10. Toplinska bilanca rekuperatora za dvostruki optok [12]

Prema tome je  $z_0 \leq \frac{h_5 - h_{5m}}{h_5 - h'_4} + z_2 \frac{h_5 - h_2}{h_5 - h'_4}$

Može se vidjeti da se dvostrukim optokom iscrpак može povisiti. Iscrpак  $z_0$  je to veći što je veći optočni tok  $(z_2 - 1)$  i što je veća razlika  $(h_2 - h_{5m})$ . Budući se  $(z_2 - 1)$  i  $(h_2 - h_{5m})$  ne mogu po volji i neovisno mijenjati, potrebna su opsežna istraživanja da se nađu najpovoljnije pogonske granice.

Pri ocjenjivanju najpovoljnijeg pogona od bitnog je značenja i rad potreban za kompresiju. Sveukupni specifični rad kompresora za 1 kg ukapljenog plina je:

$$l_{z_0} = \frac{l_v}{z_0} = \frac{RT \ln(p_2/p_1) + z_0 RT \ln(p_2/p_1)}{z + (z_2 - 1)(h_5 - h_{5m}) / (h_5 - h'_4)}$$

Računska ispitivanja pokazala su da je optimalan pogon uređaja za ukapljivanje zraka kod  $p_1=100$  bar i  $z_2 \cong 8$  ako su zadani polazni uvjeti  $p_1 = 1$  bar,  $p_2 = 200$  bar i  $\vartheta = 15^\circ\text{C}$ .

Tablica 4.3.3. Iscrpak  $z_o$  (kg/kg) i specifični rad  $l_{z_o}$  (kJ/kg) po 1kg ukapljenog zraka pri Lindeovu dvostrukom optoku [12]

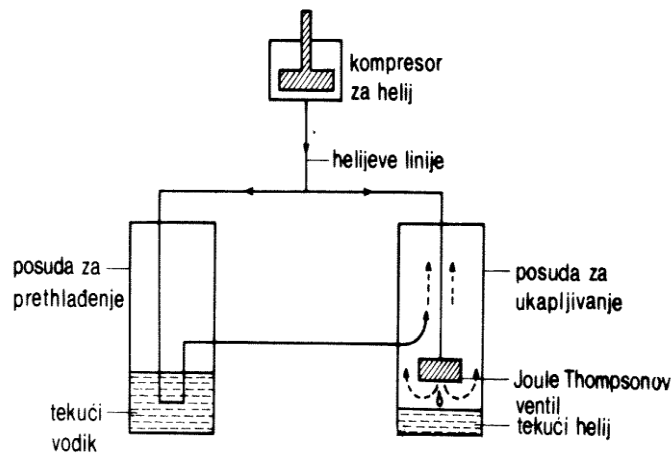
|                   |       | $p_1 = 1 \text{ bar}$ | $p_2 = 200 \text{ bar}$ | $\vartheta = 15^\circ\text{C}$ |       |       |
|-------------------|-------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| $p_m$ [bar]       | 40    | 60                    | 80                      | 100                            | 120   | 140   |
| $z_2$ [kg/kg]     | 6,45  | 6,93                  | 7,55                    | 8,17                           | 8,99  | 10,6  |
| $z_o$ [kg/kg]     | 0,562 | 0,475                 | 0,441                   | 0,399                          | 0,360 | 0,323 |
| $l_{z_o}$ [kJ/kg] | 2205  | 2090                  | 2050                    | 2040                           | 2050  | 2130  |

Tablica 4.3.4. Vrijednosti za dvostruki optok s pred ohlađivanjem do  $-50^\circ\text{C}$  [12]

|                       |      | $p_1 = 1 \text{ bar}$ | $p_2 = 200 \text{ bar}$ | $\vartheta = 15^\circ\text{C}$ |      |      |
|-----------------------|------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|------|------|
| $p_m$ [bar]           | 40   | 60                    | 80                      | 100                            | 120  | 140  |
| $(z_2)_{opt}$ [kg/kg] | 3,39 | 3,70                  | 4,15                    | 4,75                           | 5,88 | 7,70 |
| $l/z_h$ [kJ/kg]       | 1277 | 1235                  | 1226                    | 1235                           | 1256 | 1290 |

Vrijednosti za rad u prikazanim tablicama vrijede za čisti izotermni rad kompresora bez gubitaka, te za potpuno izjednačenje temperatura u rekuperatoru ( $T_5 = T_1$ ). Praktički je specifični rad prema mjerenjima gotovo tri puta veći od navedenih vrijednosti, čemu su uzrok izotermni stupanj djelovanja kompresora ( $\eta = 0,6$ ), konačne razlike temperatura u rekuperatoru, te priliv topline uslijed nesavršene izolacije rekuperatora. Tako je kao stvarni potrošak rada dvostepenog Lindeovog uređaja s pomoćnim predohlađivanjem mjerenjima nađeno oko 3400 kJ/kg ukapljenog zraka.

#### 4.4. Joule Thompsonov tip ukapljivača



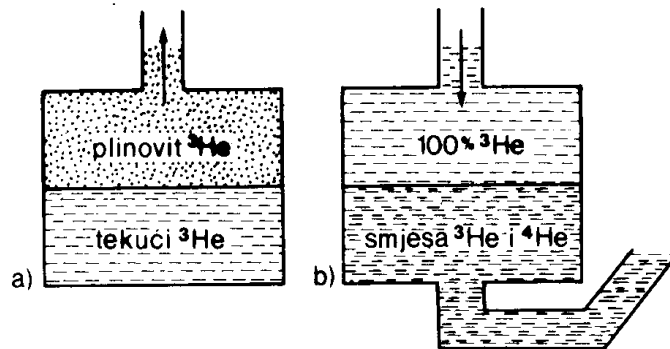
*Slika 4.4.1. Joule-Thompsonov tip ukapljivača za helij. Komprimirani helij u početnoj fazi struji lijevom spremnikom i prolazom kroz tekući vodik toliko se ohladi da prijelazom u drugi spremnik dovoljno ohladi Joule-Thompsonov ventil. Zatim se helij spušta desnom linijom i prolaskom kroz Joule-Thompsonov ventil toliko se ohladi da počne ukapljivanje. [13]*

Joule-Thompsonov efekt daje mnogo manje učinke hlađenja od onih što se postiže adijabatskim strojem. No u Joule-Thompsonovom ventilu nema pokretnih dijelova pa se istoimeni efekt često primjenjuje u komercijalnim uređajima za ukapljivanje.

Na slici 4.4.1. je pojednostavljena shema mogućeg ukapljivača za helij u kojem tekući vodik služi da bi se helij u početku ohladio na temperaturu pri kojoj funkcioniра Joule-Thompsonov ventil.

Kompresorska linija prolazom kroz tekući vodik osigurava da izotop  ${}^4\text{He}$  prije ulaska u Joule-Thompsonov ventil bude ohlađen u području temperatura za koje prisilno protjecanje kroz ventil daje efekt hlađenja. Stoga će se  ${}^4\text{He}$ , koji drugom linijom dolazi u ventil, ohladiti i ukapljivati u dnu desne posude. Izmjenjivač toplote dio je desne posude iznad ventila. U tom području hladni helij iz lijevog cilindra hladi ulazni helij do temperatura pri kojima se ostvaruje Joule-Thompsonov efekt. [13]

#### 4.5. Dilucijski hladnjak



Slika 4.5.1. Dilucijski hladnjak

a) Klasični način hlađenja otpumpavanjem. Atomi  ${}^3\text{He}$  prolaskom kroz površinu tekućine i prelaskom u plinsku fazu hlade tekućinu.

b) U mješavini  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  s otpumpavanjem helija-3 kroz mješavinu kao "teški vakuum" služi helij-4. Kada helij-3 prolazi kroz površinu odozgo nadolje, hladi se gornja komponenta. [13]

Prema milikelvinskom području upućuje nas nova tehnika hlađenja koja se koristi osobujnim svojstvima mješavine  ${}^3\text{He}$  i  ${}^4\text{He}$  na niskoj temperaturi (slika 4.5.1.b). Na temperaturi nižoj od 0.8 K tekuća mješavina tih dvaju izotopa separira se u dvije faze. Gornja faza praktički je čisti  ${}^3\text{He}$ , a u donjoj je fazi glavna komponenta izotop  ${}^4\text{He}$ . Princip hlađenja istaknut je na slici 4.5.1.b i uspoređen s uobičajenom tehnikom isisavanja (slika 4.5.1.a). Prije bismo crpili  ${}^3\text{He}$  i snižavanjem vrelišta snižavali temperaturu tekućine (slika 4.5.1.a).

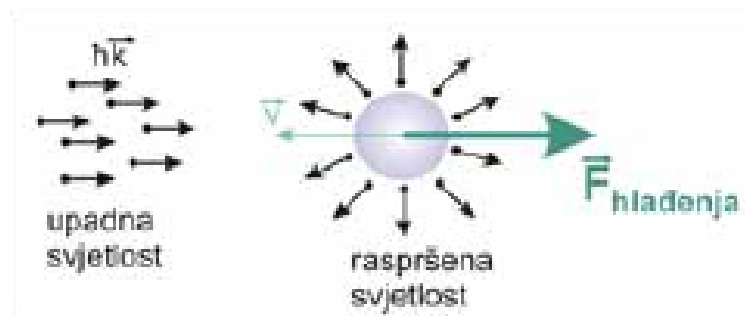
Na slici 4.5.1.b idejno je prikazana nova metoda u kojoj je uzrok hlađenja otpumpavanje  ${}^3\text{He}$ . Znači, prijelaz iz čiste faze u mješovitu, hladi čistu fazu  ${}^3\text{He}$ . No zanimljivom igrom prirode postotak  ${}^3\text{He}$  u donjoj fazi ostaje isti, praktički neovisno o temperaturi, pa ćemo za jednake korake u sniženju temperature trebati crpiti jednake količine molekula  ${}^3\text{He}$ . U tome je bitna razlika od prijašnje tehnike otpumpavanja. Uloga izotopa  ${}^4\text{He}$  u donjoj je fazi dvostruka. On za izotop  ${}^3\text{He}$  djeluje kao "teški vakuum", a istovremeno zbog stalnog udjela  ${}^3\text{He}$  faze u smjesi, eliminira potrebu za pojačanim pumpanjem kako se temperatura snižava. Tlak para pri normalnom odsisavanju  ${}^3\text{He}$  snižava se eksponencijalno s temperaturom, a pri ovom postupku zapravo ostaje konstantan. [13]

#### 4.6. Hlađenje laserom

Osnovni princip hlađenja atoma laserom je prijenos momenta impulsa s fotona na atom u ciklusima apsorpcije i spontane emisije svjetlosti. Uslijed takve rezonantne interakcije atoma s laserskim zračenjem na atome djeluje sila. U svrhu procjene iznosa te sile, promatra se jednostavni atomski sistem, koji se sastoji od samo dva energijska nivoa, osnovnog i pobuđenog. Laser djeluje na atome najjače kada mu je frekvencija točno prilagođena frekvenciji elektronskih pobuđenja atoma. Podešavanjem, laserska se frekvencija odabire tako da usporava atome koji idu prema laserskom izvoru a slabo djeluje na atome koji se kreću u suprotnom smjeru. Za te atome koji se gibaju u suprotnom smjeru brine se laser izvor sa suprotne strane.

Prilikom prijenosa momenta impulsa s fotona na atom, u procesu apsorpcije, atomi podliježu odboju u smjeru upadnih fotona. Uslijed emisije svjetlosti, atomi također osjećaju odboj, ali u nasumičnom smjeru zbog nasumične prirode procesa spontane emisije. Zbog toga je prosječni impuls fotona prilikom spontane emisije svjetlosti jednak nuli, pa je smjer sile hlađenja određen samo smjerom upadnih fotona prilikom apsorpcije. [14]

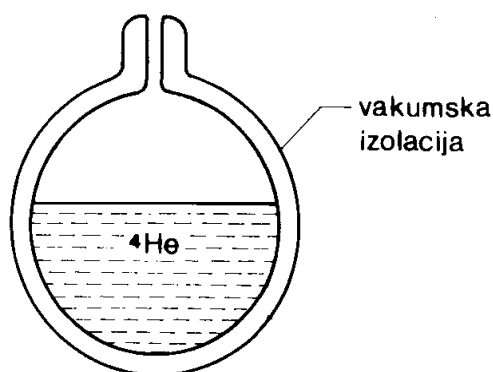
Temperature postignute hlađenjem atoma laserom kreću se u mikrokelvinskom području, a najniža temperatura ikad postignuta je u natrijevom BEC-u i iznosi 450 pK.



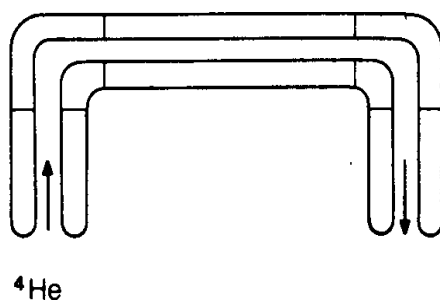
*Slika 4.6.1. Smjer sile hlađenja određen je smjerom upadnih fotona. Na atome koji se gibaju prema laserskom zračenju djeluje sila koja ih gura u suprotnom smjeru [14]*

## 5. USKLADIŠTENJE I TRANSPORT UKAPLJEVINE

Za uskladištenje često se koristimo Dewarovim posudama (slika 5.1.). Dovođenje topline sprečava se vakuumskom izolacijom i visokom reflektivnošću površina. Nekada se to radilo oblogom tekućeg dušika. Transport kapljevina među rezervoarima obavlja se linijama dvostrukih stjenki, između kojih je vakuum (slika 5.2.). Mehaničku stabilnost unutrašnje cijevi prema vanjskoj u transfer-liniji postiže se krilcima od teflona. [13]



Slika 5.1. Uskladištenje  $^4\text{He}$ . Bačva s Dewarovim stjenkama. Dvostruke stjenke odvojene su vakuumom i imaju visok sjaj. [13]

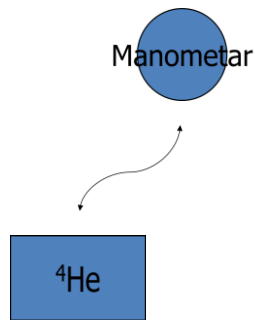


Slika 5.2. Transfer-linija za tekući helij. Cijev za pretakanje helija ponovo ima dvostruke stjenke s vakuumom među njima. Mehanička stabilnost pojačava se telefonskim krilcima položenim poprečno u cijevi. [13]



## 6. MJERENJE NISKIH TEMPERATURA

Dakako, ne postoji jedan mjerni instrument pogodan za sva područja temperatura. U temperaturnom području od 90 K do 4 K mogu se koristiti plinski termometri (slika 6.1.)



*Slika 6.1. Jednostavnije mjerenje niskih temperatura. U posudi kontroliranog volumena je  ${}^4\text{He}$ . Prati se tlak plina i tako određuje temperatura. [13]*

Idealni plin dovodimo uz konstantan volumen u dodir s objektom kojemu želimo izmjeriti temperaturu. Iz  $p = p(T)$  možemo odrediti temperaturu. Dovoljna je kalibracija mjerenjem dvije temperature. U nižem temperaturnom području možemo se za mjerenje koristiti ovisnošću otpora o temperaturi. Na primjer, obični otpornici od ugljika mijenjaju otpor za više redova veličine u temperaturnom intervalu od 0,1 do 1 K. [13]

## 7.ZAKLJUČAK

Danas se od plinova najviše ukapljuje zrak, iz kojega se frakcijskom destilacijom izdvaja kisik (svjetska proizvodnja viša od 100 milijuna tona na godinu) za metalnu i kemijsku industriju, dušik, koji se u kapljevitom stanju koristi za postizanje niskih temperatura, te plemeniti plinovi, prije svega argon. Osim zraka, u velikim se količinama ukapljuju i gorivi plinovi: smjesa propana i butana u bocama za kućansku uporabu kapljevita je pri sobnoj temperaturi već na umjerenim tlakovima (između 2,5 i 8 bara, ovisno o udjelu propana), a za ukapljivanje metana pri atmosferskom tlaku (približno 1 bar) potrebno ga je ohladiti na temperaturu od  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U budućnosti se očekuje izdašna primjena vodika, koji se racionalno skladišti samo u kapljevitom stanju, a kapljeviti helij osobito je važan u istraživanju supravodljivosti. Niske temperature neophodne su i za funkcioniranje snažnih supervodičkih magneta, ključnih dijelova nuklearnih fuzijskih reaktora i akceleratora koji se upravo razvijaju, a također su bile neophodne pri otkriću novih fizikalnih fenomena poput supravodljivosti i suprafluidnosti. Hladni atomi omogućili su spektroskopska istraživanja vrlo visoke preciznosti te nalaze svoju važnu primjenu u atomskim satovima, koji su unaprijedili znanost i tehnologiju, vodeći do inovacija u području globalnog navigacijskog sistema te naprednih komunikacija. Sve to samo je tek dio raznolikih primjena niskih temperatura u znanstvenim istraživanjima i u tehnologiji.

## Literatura:

- [1] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=48736> (dostupno 20.09.2017.)
- [2] Kulišić, P. Mehanika i toplina, Školska knjiga, Zagreb  
[www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/predavanja13-2014.pdf](http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/predavanja13-2014.pdf) (dostupno 20.09.2017.)
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Boyle-Mariotteov\\_zakon#/media/File:Boyle-Mariotteov\\_zakon\\_1.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Boyle-Mariotteov_zakon#/media/File:Boyle-Mariotteov_zakon_1.png) (dostupno 20.09.2017.)
- [4] [https://bs.wikipedia.org/wiki/Izotermni\\_proces#/media/File:Isothermal\\_process.png](https://bs.wikipedia.org/wiki/Izotermni_proces#/media/File:Isothermal_process.png)  
(dostupno 20.09.2017.)
- [5] <https://www.geogebra.org/material/show/id/sKAF9NEA> (dostupno 20.09.2017.)
- [6] <http://fizika.unios.hr/~dstanic/Fizika%201/13.Termodinamika.pdf> (dostupno 20.09.2017.)
- [7] [http://www.fizika.unios.hr/of4/wp-content/uploads/sites/47/2016/04/01-Toplina\\_i\\_temperatura.pdf](http://www.fizika.unios.hr/of4/wp-content/uploads/sites/47/2016/04/01-Toplina_i_temperatura.pdf) (dostupno 20.09.2017.)
- [8] [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/predavanja15-2014.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/predavanja15-2014.pdf) (dostupno 20.09.2017.)  
[https://bs.wikipedia.org/wiki/Adijabatski\\_proces#/media/File:Adiabatic.svg](https://bs.wikipedia.org/wiki/Adijabatski_proces#/media/File:Adiabatic.svg) (dostupno 20.09.2017.)
- [9] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=63058> (dostupno 20.09.2017.)
- [10] <https://www.fsb.unizg.hr/termovel/Kruzni.htm> (dostupno 20.09.2017.)
- [11] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hla%C4%91enje> (dostupno 20.09.2017.)  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=58844> (dostupno 20.09.2017.)
- [12] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/nas/tehnika\\_hladjenja\\_](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/tehnika_hladjenja_)

07/19\_Ukapljivanje\_plinova.pdf (dostupno od 20.09.2017.)

[13] Furić, M. Moderne eksperimentalne metode, tehnike i mjerenja u fizici, udžbenik Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Školska knjiga, 1992.

[14] [http://cold.ifs.hr/wp-content/uploads/2014/06/Goga\\_PhD\\_final\\_small.pdf](http://cold.ifs.hr/wp-content/uploads/2014/06/Goga_PhD_final_small.pdf) (dostupno 20.09.2017.)

## Životopis

Ivan Dorotek rođen je 31.07.1991. godine u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu i srednju Prirodoslovno matematičku gimnaziju završio je u Županji te 2010. godine upisao preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.