# *PREDGOVOR*

*Ova knjiga namenjena je studentima Mašinskog fakulteta u Beogradu usmerenja za termotehniku, kao osnovni udžbenik za predmete iz oblasti Tehnike hlađenja i Toplotnih pumpi; ona takođe može koristiti i mašinskim inženjerima koji se u praksi bave tom problematikom. Iako se sve što je u ovoj knjizi rečeno o Rashladnim uređajima može skoro u potpunosti odnositi i na Toplotne pumpe, koje se od rashladnih uređaja razlikuju jedino po vrstama i temperaturama toplotnih izvora i ponora, po tradiciji zadržan je naslov »Rashladni uređaji« - prema prvobitnoj nameni toplotnih mašina koje rade po levokretnom ciklusu. Osim toga, u oblasti hlađenja mašine koje rade po levokretnom ciklusu nemaju alternativu, dok su u grejanju Toplotne pumpe samo jedno od alternativnih rešenja.*

*Osim materije koja se najdirektnije odnosi na Toplotne mašine koje rade po levokretnim ciklusima u dodatku prvog dela knjige su još dati i odeljci koji se tiču one problematike kojom se u našim uslovima bave mašinski inženjeri u praksi, a predmet su Građevinske termofizike (Odeljak D1 Toplotna izolacija) ili Tehnologije hlađenja prehrambenih proizvoda (Odeljci. D3 (Termofizičke karakteristike namirnica) i D4 (Proračun potrebe hlađenja)); osim toga, da bi kao mašinski inženjeri u praksi uspešno sarađivali sa tehnolozima prehrabenog usmerenja u dodatak je uvršten i odeljak D2 Konzervisanje namirnica.*

*Kao retko koja druga oblast Termotehnike, Rashladni uređaji i Toplotne pumpe se snažno oslanjaju na Tehničku termodinamiku; zbog toga je izlaganje započeto odeljkom "Termodinamičke osnove" koji bi trebao da, kao podsetnik i mala dopuna, olakša praćenje daljih izlaganja. Pored toga u Dodatak je uvršten i odeljak D5 (Opšti termodinamički odnosi) koji izlazi iz okvira predmeta ove knjige, ali ga smatram korisnim radi objašnjenja neizbežne međuzavisnosti između pojedinih termodinamičkih osobina rashladnog fluida. I, na kraju, u dodatku D6 su date i parne tabele i dijagrami stanja najvažnijih rashladnih fluida koji se koriste u praksi. Tim povodom izražavam posebnu zahvalnost firmi Solvay Fluor GmbH, koja je odobrila preuzimanje tabela i dijagrama iz knjige "Suva Kaeltemittel, Service Handbuch" koncerna "DuPont Fluorchemikalien".*

*Pri koncipiranju knjige pošlo se od toga da zadatak udžbenika nije samo da ponudi određeni kvantum znanja već da na određeni način pripremi i uputi*

*studenta na kreativno rešavanja problema u praksi, neprekidno inoviranje znanja i prilagođavanje kako pooštrenim zahtevima u pogledu ekologije i energetske efikasnosti, tako i povećanim mogućnostima koje nude razvoj proizvodnih tehnologija (nove metode obrade i novi kvalitetni materijali) i informacionih tehnologija (automatizacija rada). Zato udžbenik treba, pre svega, da omogući proširivanje vidika i duboko razumevanja materije, za razliku od priručnika kao zbirke aktuelnih šablona i recepata.*

*Autor je uložio dosta napora da obim knjige zajedno sa dodatkom ostane u prihvatljivim granicama. Ali, pri tome je imao u vidu da se lakše razumeva materija iz opširnijeg udžbenika nego iz telegrafski napisanog teksta bez dovoljno ilustracija, komentara i objašnjenja. A da bi knjiga bila primenjiva i kao udžbenik za kraće kurseve specijalizovane namene, materija je tako podeljena da se pojedini delovi teksta lako mogu po potrebi i/ili pri prvom čitanju izostaviti.*

*Iako se težilo da kniga bude zaokružena celina i kao takva omogući i rešavanje osnovnih problema u praksi, zbog ograničenja obima priloga, izbegnuto je ponavljnje materije iz rasprostranjenih termotehničkih priručnika opšte namene.*

*Težište izlaganja je na rashladnim mašinama i toplotnim pumpama koje se najviše primenjuju u našoj praksi, a to su parne kompresorske rashladne mašine i toplotne pumpe, koje se koriste u lancu hlađenja namirnica i u klimatizaciji; za ostale vrste mašina date su najčešće samo teorijske podloge koje, u slučaju potrebe, omogućavaju efikasan ulazak u datu oblast, kao i sagledavanje komparativnih prednosti i nedostataka tih mašina u odnosu na parne kompresorske.*

*Zbog pogodnije manipulacije knjiga je podeljena u dva dela približnog obima, koji na izvestan način predstavljaju celine:*

*Prvi deo: Uvod, termodinamičke osnove, levokretni ciklusi gasnih i parnih kompresorskih rashladnih mašina, ejektorske i sorpcione mašine, termoelektrično hlađenje, radne materije kao i dodatak sa naprednavedenim odeljcima.*

*Drugi deo: Komponente rashladnih mašina i toplotnih pumpi i agregatiranje komponenata, rashladna postrojenja i toplotne pumpe i njihova automatizacija.*

*Oznake u knjizi su usaglašene sa važećim JUS i ISO standardima s tim što su manja odstupanja dopuštena tamo gde bi, zbog specifičnosti razmatrane materije, doslovna primena tih standarda unela zabune i/ili smanjila preglednost (npr: za koeficijent prelaza toplote umesto nove oznake (latinično $h$) zadržana je grčka grafema $\alpha$ da ne bi bilo zabune u relacijama gde koeficijent prelaza toplote pri promeni faze zavisi od razlike entalpija $(\Delta h)$ pa bi bilo $h = h(\Delta h)$ !).*

*Osim toga zadržane su oznake za empirijsku temperaturu ( $t$ ) i vreme ( $\tau$ ) jer su te oznake u termotehnici još uvek dominantne, najviše zbog toga što se temperatura u formulama sreće mnogo češće od vremena, a i zbog toga što je za termodinamičku temperaturu bila i zadržana je oznaka $T$ . Oznake zajedno sa indeksima su objašnjene tamo gde se prvi put primenjuju u tekstu. Pošto se radi o udžbeniku, a ne o priručniku, posebni spiskovi oznaka za svako poglavlje nisu dati, jer bi bez preke potrebe povećale obim knjige.*

*Zahvaljujem se recenzentima Prof.Dr Francu Kosiju, Dipl.maš.inž. i Prof.Dr Branislavu Jaćimoviću, Dipl.maš.inž. na korisnim primedbama. Posebnu zahvalnost dugujem saradnicima Ivanu Zlatanoviću, Dipl.maš.inž. (elektronska obrada slika i prelom teksta), Gojku Bosancu, Dipl.maš.inž. (elektronska obrada slika i korekture teksta) i Marku Španoviću, Dipl.maš.inž (elektronska obrada slika) koji su svojim radom znatno doprineli konačnom izgledu knjige.*

*Sve dobronamerne primedbe i ukazivanja na eventualne greške Autor će sa zahvalnošću razmotriti.*

*U Beogradu*
*novembra 2006.* *Autor*

# SADRŽAJ

## I DEO

**1 UVOD ..... 1.1**
1.1 PRIRODNO I VEŠTAČKO HLAĐENJE ..... 1.1
1.2 PRIRODNO I VEŠTAČKO GREJANJE ..... 1.3
1.3 HRONOLOGIJA RAZVOJA TEHNIKE HLAĐENJA ..... 1.4
1.4 PRIMENA RASHLADNIH MAŠINA I TOPLOTNIH PUMPI ..... 1.8
1.4.1 Konzervisanje namirnica hlađenjem ..... 1.8
1.4.2 Liofilizacija ..... 1.9
1.4.3 Proizvodnja potrošnih rashladnih materija ..... 1.9
1.4.4 Klimatizacija vazduha ..... 1.10
1.4.5 Stečnjavanje gasova ..... 1.10
1.4.6 Primena tehnike hlađenja u hemijskoj i prehrambenoj industriji ..... 1.11
1.4.7 Primena tehnike hlađenja u naftnoj industriji ..... 1.11
1.4.8 Primena veštačkog hlađenja u medicini ..... 1.11
1.4.9 Primena veštačkog hlađenja u istraživanjima ..... 1.11
1.4.10 Primena tehnike hlađenja u metalurgiji i mašinogradnji ..... 1.12
1.4.11 Primena rashladnih mašina u cilju grejanja (toplotne pumpe) ..... 1.12
1.4.12 Ostale primene ..... 1.13

**2 TERMODINAMIČKE OSNOVE ..... 2.1**
2.1 RADNA MATERIJA ..... 2.1
2.1.1 Jednokomponentna radna materija ..... 2.1
2.1.2 Dvojne mešavine ..... 2.6
*Rastvorljivost* ..... 2.7
*Izobarsko-izotermsko mešanje* ..... 2.8
*Specifični toplotni kapacitet mešavine* ..... 2.9
*Isparavanje homogene tečne mešavine; Temperatursko klizanje pri promeni faze* ..... 2.10
*Azeotropija* ..... 2.12
*Smrzavanje mešavine sa praktički potpunom nerastvorljivošću u čvrstoj fazi* ..... 2.14
*Merkelov h-ξ dijagram binarnih mešavina* ..... 2.15

*Adijabatsko mešanje* ..... 2.18
*Adijabatsko prigušivanje u h-ξ dijagramu* ..... 2.19
*logp-h dijagram za zeotropsku mešavinu* ..... 2.19
2.1.3 Idealne mešavine para i gasova (vlažan vazduh) ..... 2.20
*Polazne pretpostavke* ..... 2.20
*Apsolutna vlažnost nezasićenog vazduha* ..... 2.22
*Entalpija mešavine (Kalorijska jednačina stanja)* ..... 2.23
*Gustina vlažnog vazduha* ..... 2.24
*Kriva napona pare* ..... 2.25
*Mollier-ov h-x dijagram vlažnog vazduha* ..... 2.27
*Osnovne promene stanja u h-x dijagramu* ..... 2.29
*Adijabatsko-izobarsko mešanje* ..... 2.30
*Dodavanje vlage - vlaženje* ..... 2.31
2.2 VETRENJE I ROŠENJE ..... 2.32
2.2.1 Vetrenje i rošenje ..... 2.32
2.2.2 Granica hlađenja; Psihrometar ..... 2.34
*Asman-ov psihrometar* ..... 2.36
*Pravac promene stanja* ..... 2.38
2.2.3 Analogija procesa prenosa toplote i materije ..... 2.40
*Proces adijabatskog turbulentnog mešanja* ..... 2.41
*˝Suvi˝ i ˝vlažni˝ prelaz toplote;*
*Entalpijski potencijal; Merkel-ov koeficijent* ..... 2.42
*Lewis-ov količnik za čisto turbulentno mešanje* ..... 2.44
2.2.4 Stefan-ovo kretanje ..... 2.45
2.2.5 Lewis-ov količnik ..... 2.49
2.3 RAZMENJIVAČI TOPLOTE ..... 2.53
2.3.1 Orebrene površine ..... 2.53
*Proračun orebrenih cevi* ..... 2.56
2.3.2 Karakteristike razmenjivača toplote ..... 2.60
*Istosmerni razmejivač toplote* ..... 2.61
*Suprotnosmerni razmenjivač toplote* ..... 2.63
2.4 RASHLADNI EFEKTI ..... 2.64
2.4.1 Pregled rashladnih efekata ..... 2.64
2.4.2 Efekti hlađenja pri ekspanziji gasova i para ..... 2.66
*Ekspanzija sa odvođenjem rada* ..... 2.67
*Ekspanzija bez odvođenja rada;*
*Adijabatsko prigušivanje; Joule-Thompson-ov efekat* ..... 2.69
*Diferencijalni prigušni efekat kod van der Waals-ovih gasova* ..... 2.73
*Integralni prigušni efekat* ..... 2.75
2.5 II ZAKON TERMODINAMIKE I KOMPENZACIONI PROCESI ..... 2.76

**3 CIKLUSI SA UTROŠKOM RADA ..... 3.1**
3.1 KOMPENZACIONI PROCESI SA UTROŠKOM RADA ..... 3.1
3.1.1 Carnot-ov levokretni ciklus ..... 3.4
*Mogućnost za ostvarivanje ciklusa Carnot* ..... 3.5
3.1.2 Lorentz-ov ciklus ..... 3.6
3.2 GASNE RASHLADNE MAŠINE ..... 3.8

3.2.1 Pregled najvažnijih vrsta gasnih mašina....3.8
3.2.2 Vazdušne rashladne mašine....3.12
*Najjednostavnija zatvorena vazdušna rashladna mašina* ....3.12
*Zatvorena vazdušna rashladna mašina sa regenerativnim ciklusom*....3.20
*Otvorene vazdušne mašine* ....3.21
*Vazdušne mašine sa višestepenom ekspanzijom i kompresijom* ....3.24
*Primena vazdušnih mašina*....3.25
3.2.3 Philips-ova rashladna mašina ....3.27
3.2.4 Vrtložna (Ranque-Hilsch-ova) cev....3.33
3.3 PARNE KOMPRESORSKE MAŠINE ....3.37
3.3.1 Uporednii ciklus jednostavne kompresorske mašine....3.37
*Ciklus Carnot sa vlažnom parom* ....3.37
*Parna kompresorska mašina sa prigušnim ventilom*....3.39
*Parna kompresorska mašina sa prigušnim ventilom i suvim usisavanjem* ....3.41
3.3.2 Osnovne mere za termodinamičko poboljšanje uporednog ciklusa ....3.46
*Prehlađivanje kondenzata* ....3.47
*Spoljašnje prehlađivanje kondenzata*....3.48
*Unutrašnje prehlađivanje kondenzata (regenerativni ciklus)* ....3.49
*Unutrašnje prehlađivanje kondenzata sušenjem pare*....3.49
*Unutrašnje prehlađivanje kondenzata pregrevanjem pare* ....3.51
*Višestepeno prigušivanje*....3.54
*Višestepeno sabijanje* ....3.57
*Dvostepeno sabijanje sa spoljašnjim međuhlađenjem* ....3.57
*Dvostepeno sabijanje sa unutrašjim međuhlađenjem* ....3.60
*Unutrašnje međuhlađenje dodavanjem hladnije suve ili pregrejane pare*....3.65
*Hlađenje kompresora* ....3.67
*Spoljašnje hlađenje sa fluidom na temperaturi okoline* ....3.67
*Izotermska kompresija sa unutrašnjim hlađenjem* ....3.69
3.3.3 Uobičajeni ciklusi parnih kompresorskih rashladnih mašina ....3.69
*Jednostepeni ciklusi*....3.69
*Višestepeni ciklusi* ....3.72
*Ciklus sa dvostepenim prigušivanjem i sabijanjem i potpunim unutrašnjim međuhlađenjem* ....3.72
*Ciklus sa dvostepenim sabijanjem i prigušivanjem i dubokim unutrašnjim prehlađivanjem kondenzata*....3.75
*Ciklusi freonskih mašina* ....3.77
*Ciklusi instalacija sa više različitih režima isparavanja*....3.81
*Primeri instalacija sa više pritisaka isparavanja*....3.83
3.3.4 Kaskadne rashladne mašine....3.90
3.3.5 Ciklusi sa binarnim mešavinama....3.93
*Ciklusi sa azeotropskim mešavinama*....3.94
*Ciklusi sa zeotropskim mešavinama*....3.94
*Ostale pogodnosti primene binarnih mešavina*....3.95
*Prehlađivanje binarnog kondenzata vlažnom parom*....3.95
*Dvorežimsko isparavanje na istom pritisku*....3.96
*Autokaskadna mašina*....3.98

**4 MAŠINE POGONJENE TOPLOTOM ..... 4.1**
4.1 EJEKTORSKE MAŠINE ..... 4.1
4.1.1 Princip rada ejektorske mašine sa idealnim ejektorom ..... 4.1
4.1.2 Gubici u stvarnom ejektoru ..... 4.4
*Udarni gubitak u usisnoj komori* ..... 4.4
*Gubici usled trenja u mlazniku* ..... 4.6
*Gubici usled trenja u usisnoj komori* ..... 4.7
Gubici u difuzoru ..... 4.7
4.1.3 Toplotni količnik i eksergetski stepen korisnosti ejektorske mašine ..... 4.10
4.1.4 Komparativne prednostii primena ejektorskih mašina ..... 4.11
*Ejektorske mašine sa vodenom parom* ..... 4.12
*Ejektorske mašine sa drugim rashladnim fluidima* ..... 4.13
4.2 SORPCIONE MAŠINE ..... 4.13
4.2.1 Apsorpcione mašine ..... 4.13
*Jednostavna jednostepena apsorpciona mašina* ..... 4.13
*Mehanički spregnuti i toplotno spregnuti ciklusi* ..... 4.17
*Protoci i specifična potrošnja toplote* ..... 4.18
*Spoljašnji uslovi koji određuju režim rada apsorpcione mašine* ..... 4.20
*Minimalni utrošak pogonske toplote* ..... 4.21
*Mere za poboljšanje ciklusa apsorpcionih mašina* ..... 4.24
*Dvostepene apsorpcione mašine* ..... 4.24
*Tehno-ekonomske prednosti i nedostaci apsorpcionih mašina* ..... 4.26
4.2.2 Druge sorpcione mašine ..... 4.27
*Difuzione asorpcione mašine* ..... 4.27
*Jednostepena resorpciona mašina* ..... 4.29
*Kompresorska mašina sa cirkulacijom rastvora* ..... 4.30

**5 TERMOELEKTRIČNO HLAĐENJE ..... 5.1**
5.1 EJEKTORSKE MAŠINE ..... 5.1
5.1.1 Princip rada ejektorske mašine sa idealnim ejektorom ..... 5.1
5.1.2 *Peltier*-ov efekat
5.2 ..... 5.1.3
*Thompson*-ov efekat ..... 5.2
5.1.4 Fizičk suština termoelektričnih pojava
5.3 5.2 TEMPERATURSKO POLJE U TERMOPARU ..... 5.4
5.3 RASHLADNI UČINAK I KOEFICIJENT HLAĐENJA TERMOELEKTRIČNE RASHLADNE MAŠINE ..... 5.7
5.4 PRIMENA TERMOELEKTRIČNIH RASHLADNIH MAŠINA I TOPLOTNIH PUMPI ..... 5.11

**6 RADNE MATERIJE ..... 6.1**
6.1 IZBOR RASHLADNOG FLUIDA ..... 6.2
6.1.1 Termodinamički kriterijumi za izbor rashladnog fluida ..... 6.2
6.1.2 Termofizički kriterijumi ..... 6.4
6.1.3 Fizički i hemijski kriterijumi ..... 6.5
6.1.4 Biohemijski i ekološki kriterijumi ..... 6.7
6.1.5 Ekonomski kriterijmi ..... 6.8

6.2 IZBOR SEKUNDARNOG RASHLADNOG FLUIDA ..... 6.8
6.3 KRITERIJUMI ZA IZBOR KOMPRESORSKIH ULJA ..... 6.9
6.4 OZNAČAVANJE RASHLADNIH FLUIDA ..... 6.10
6.5 MEŠAVINE KAO RASHLADNI FLUIDI I NOSIOCI TOPLOTE ..... 6.13
6.5.1 Mešavine kao primarni rashladni fluidi ..... 6.13
6.5.2 Podeutektičke i eutektičke mešavine kao sekundarni rashladni fluidi ..... 6.13
6.5.3 Dvofazni nosioci toplote ..... 6.15
6.6 STATUS RASHLADNIH FLUIDA ..... 6.15

**DODATAK 1 - TOPLOTNA IZOLACIJA ..... D1.1**
D1.1 VAKUUMSKE KRIOIZOLACIJE ..... D1.2
D1.2 IZOLACIONI MATERIJALI SA GASOM U PORAMA ..... D1.3
D1.3 IZBOR VRSTE I DIMENZIONISANJE IZOLACIJE ..... D1.5
D1.3.1 Izbor vrste izolacije ..... D1.5
D1.3.2 Dimenzionisanje izolacije ..... D1.5
D1.4 TEMPERATURSKE RAZLIKE ..... D1.8
D1.5 VLAŽNOST IZOLACIONIH MATERIJALA I PROSTIRANJE VLAGE KROZ IZOLACIONU KONSTRUKCIJU ..... D1.13
D1.5.1 Vlažnost izolacionih materijala ..... D1.13
D1.5.2 Difuzija vodene pare i paropropustljivost ..... D1.14
D1.6 PARNA BARIJERA ..... D1.16
D1.7 NAJČEŠĆE PRIMENJIVANI IZOLACIONI MATERIJALI ..... D1.21
D1.7.1 Poliuretani ..... D1.21
D1.7.2 Stiropor ..... D1.23
D1.7.3 Ekspandirana pluta ..... D1.23
D1.7.4 Staklena vuna ..... D1.24
D1.7.5 Drugi izolacioni materijali ..... D1.24

**DODATAK 2 - KONZERVISANJE NAMIRNICA ..... D2.1**
D2.1 UVOD ..... D2.1
D2.2 FERMENTI ..... D2.2
D2.3 MIKROORGANIZMI ..... D2.3
D2.3.1 Bakterije ..... D2.3
D2.3.2 Kvasci ..... D2.4
D2.3.3 Plesni ..... D2.5
D2.4 KONZERVISANJE NAMIRNICA ..... D2.5
D2.4.1 Postupci konzervisanja namirnica ..... D2.5
D2.4.2 Hlađenje i skladištenje ohlađenih namirnica ..... D2.7
D2.4.3 Smrzavanje i skladištenje smrznutih namirnica ..... D2.9

**DODATAK 3 - TERMOFIZIČKE KARAKTERISTIKE NAMIRNICA ..... D3.1**

**DODATAK 4 - PRORAČUN POTREBE HLAĐENJA ..... D4.1**
D4.1 TRANSMISIONO TOPLOTNO OPTEREĆENJE ($\Phi_1$) ..... D4.2
D4.2 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD TERMIČKE OBRADE PROIZVODA ($\Phi_2$) ..... D4.3
D4.2.1 Proizvodne rashladne komore ..... D4.3
D4.2.2 Skladišne rashladne komore ..... D4.4

D4.2.3 Skladišni i proizvodni kapacitet komora .....D4.5
D4.2.4 Toplotno opterećenje ($\Phi_2$) .....D4.11
D4.3 TOPLOTNO OPTEREĆENJE USLED IZMENE VAZDUHA ($\Phi_3$).....D4.15
D4.3.1 Ventilacija komore .....D4.16
D4.3.2 Infiltracija vazduha.....D4.19
D4.4.3 Toplotno opterećenje ($\Phi_3$) .....D4.21
D4.4 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD "DISANJA" PROIZVODA ($\Phi_4$) .....D4.22
D4.5 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD INJA NA ISPARIVAČIMA ($\Phi_5$) .....D4.25
D4.6 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD LJUDI ($\Phi_6$).....D4.27
D4.7 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD OSVETLJENJA ($\Phi_7$).....D4.27
D4.8 TOPLOTNO OPTEREĆENJE OD VENTILATORA ISPARIVAČA ($\Phi_8$) ...D4.28
D4.9 POTREBNI UČINCI KOMPONENATA RASHLADNE INSTALACIJE ....D4.28
D4.9.1 Potreban rashladni učinak isparivača ($\Phi_{0R}$).....D4.28
D4.9.2 Potreban rashladni učinak kompresora ($\Phi_{0KP}$) .....D4.29
D4.9.3 Procena toplotnog opterećenja kondenzatora ($\Phi_{0KD}$) .....D4.29
**DODATAK 5 - OPŠTI TERMODINAMIČKI ODNOSI .....D5.1**
D5.1 *MAXWEL*-ove RELACIJE.....D5.1
D5.2 TAČNI I PRIBLIŽNI ODNOSI IZMEĐU SPECIFIČNIH TOPLOTNIH KAPACITETA, TOPLOTE ISPARAVANJA I TEMPERATURE .....D5.3
**DODATAK 6 - RASHLADNI FLUIDI .....D6.1**
**DODATAK 7 - DIJAGRAM ZA VLAŽAN VAZDUH .....D7**