

Alka Mihelić-Bogdanić • Ivana Špelić



Pretvorba energije i optimizacija postupaka u procesnoj industriji



Udžbenik s primjerima riješenih zadataka

školska knjiga

Sadržaj

Predgovor	XIII
1. Osnove pretvorbe energije	1
1.1. Sustavi i procesi	1
1.2. Podjela primarnih oblika i nosioci energije	5
2. Pretvorba toplinske energije	11
2.1. Osnovne termodinamičke veličine i jednadžba stanja	11
2.1.1. Zadatci	17
2.2. Toplinske i energetske veličine	22
2.2.1. Zadatci	29
2.3. Razvoj jedinica za opisivanje mehanizama toplinske izmjene	36
2.3.1. Osnovne fizikalne veličine i mjerne jedinice	37
2.3.2. Osnovne veličine kojima se definira sposobnost provođenja topline i vodene pare materijala	40
2.4. Načini prijenosa topline	48
2.5. Osnovni zakoni termodinamike	50
2.5.1. Zadatci	58
2.6. Termodinamičke promjene stanja idealnih plinova	70
2.6.1. Opća jednadžba za povratljive promjene stanja idealnih plinova	70
2.6.2. Izohorna promjena stanja ($v = \text{konst.}$)	72
2.6.3. Izobarna promjena stanja ($p = \text{konst.}$)	73
2.6.4. Izotermna promjena stanja ($T = \text{konst.}$)	75
2.6.6. Politropska promjena stanja	79
2.6.7. Zadatci	81
2.7. Promjene stanja realnih plinova i dijagrami	94
2.7.1. Prostorni koordinatni sustav – p, v, T dijagram (3D dijagram)	94
2.7.2. Prijelaz tekućine u pregrijanu paru – primjer zagrijavanja vode u cilindru s pomičnim klipom	99
2.7.3. Dvodimenzionalni koordinatni sustavi – 2D dijagrami	100
2.7.4. Clausius-Clapeyronova jednadžba realnih plinova	103
2.7.5. Toplinska stanja vode	103
2.7.6. Prigušivanje	104
2.7.7. Matematički izrazi pri promjenama stanja realnih plinova	107
2.7.8. Termodinamički dijagrami realnih plinova	108
2.7.9. Zadatci	109
2.8. Procesi s vlažnim zrakom	123
2.8.1. Mjerenje vlažnosti zraka	125
2.8.2. Ramzinov h, d dijagram za vlažni zrak i procesi s vlažnim zrakom	125
2.8.3. Zadatci	127
2.9. Procesi kompresije i ekspanzije	133
2.9.1. Osnove rada kompresora	133
2.9.2. Radni proces idealnoga kompresora	138
2.9.3. Radni proces stvarnoga kompresora	139
2.9.4. Granični tlak kompresora	140
2.9.5. Kompresija i ekspanzija	141
2.9.6. Višestupanjski procesi kompresije i ekspanzije	143
2.9.7. Zadatci	147

2.10.	Kružni procesi	165
2.10.1.	Vrste kružnih procesa	166
2.10.2.	Carnotov kružni proces	167
2.10.3.	Procesi s Carnotovim stupnjem iskoristivosti	171
2.10.4.	Zadatci	177
2.11.	Procesi u postrojenjima s plinskim turbinama	187
2.11.1.	Otvoreni proces jednostavnog postrojenja s plinskom turbinom	187
2.11.2.	Jednostavan povratljiv proces plinske turbine (idealni proces)	188
2.11.3.	Jednostavan nepovratljiv proces plinske turbine (stvarni proces)	190
2.11.4.	Proces plinske turbine sa zagrijavanjem zraka nakon kompresije	192
2.11.5.	Plinske turbine s dvostupanjskom kompresijom	198
2.11.6.	Plinske turbine s dvostupanjskom ekspanzijom	200
2.11.7.	Plinske turbine s dvostupanjskom kompresijom i dvostupanjskom ekspanzijom	203
2.11.8.	Zadatci	206
2.12.	Procesi u motorima s unutarnjim izgaranjem	243
2.12.1.	Četverotaktni motori s unutarnjim izgaranjem	246
2.12.2.	Dvotaktni motori s unutarnjim izgaranjem	247
2.12.3.	Idealizirani Ottov proces	249
2.12.4.	Idealizirani Dieselov proces	253
2.12.5.	Idealizirani mješoviti Sabathéov/Seiligerov proces	257
2.12.6.	Usporedba Ottova, Dieselova i Sabathéova/Seiligerova procesa u motorima s unutarnjim izgaranjem	262
2.12.7.	Efektivna snaga i ekonomičnost motora	263
2.12.8.	Zadatci	266
2.13.	Procesi u parnim postrojenjima	277
2.13.1.	Dijelovi jednostavnoga parnog postrojenja	278
2.13.2.	Proces u jednostavnome parnom postrojenju	279
2.13.3.	Stupnjevi djelovanja (iskoristivosti) i proračun potrošnje goriva	281
2.13.4.	Usporedba povratljivoga i nepovratljivog procesa u jednostavnome parnom postrojenju	284
2.13.5.	Termodinamički proces u parnim postrojenjima na temelju Carnotova procesa u mokrom području	287
2.13.6.	Termodinamički Rankine-Clausiusov proces	287
2.13.7.	Jednostavni idealizirani Rankine-Clausiusov proces	288
2.13.8.	Utjecaj povišenja početnog tlaka na termodinamički stupanj djelovanja Rankine-Clausiusova procesa	290
2.13.9.	Utjecaj povišenja početne temperature pregrijane pare na termodinamički stupanj djelovanja Rankine-Clausiusova procesa	291
2.13.10.	Utjecaj sniženja tlaka u kondenzatoru na termodinamički stupanj djelovanja Rankine-Clausiusova procesa	292
2.13.11.	Rankine-Clausiusov proces s međupregrijavanjem pare i višestupanjskom ekspanzijom	293
2.13.12.	Rankine-Clausiusov povratljivi proces s međupregrijavanjem pare i višestupanjskom ekspanzijom	294
2.13.13.	Rankine-Clausiusov proces s regenerativnim zagrijavanjem kondenzata	296
2.13.14.	Rankine-Clausiusov proces s međupregrijačem pare i regenerativnim zagrijavanjem kondenzata	304
2.13.15.	Zadatci	307
2.14.	Procesi u rashladnim uređajima i postrojenjima	342
2.14.1.	Rashladna tehnika	342
2.14.2.	Tehničko hlađenje	344
2.14.3.	Ljevokretni rashladni kružni procesi	344

2.14.4.	Transformatori topline ili rashladni uređaji	345
2.14.5.	Princip rada i dijelovi kompresijskih rashladnih uređaja	347
2.14.6.	Vrste i svojstva rashladnih sredstava u parnim uređajima	350
2.14.7.	Parni kompresijski uređaji za dobivanje niskih temperatura	352
2.14.8.	Plinski kompresijski uređaji za dobivanje niskih temperatura	373
2.14.9.	Toplinske pumpe	393
2.14.10.	Zadatci	399
2.15.	Procesi u uređajima za ukapljivanje plinova	425
2.15.1.	Idealan teorijski proces ukapljivanja	425
2.15.2.	Ukapljivanje realnih plinova	427
2.15.3.	Zadatci	445
3.	Pretvorba kemijske energije i izgaranje goriva	459
3.1.	Fosilna goriva	460
3.1.1.	Čvrsta i tekuća fosilna goriva	460
3.1.2.	Sadržaj sumpora u čvrstim i tekućim fosilnim gorivima	461
3.1.3.	Plinovita fosilna goriva	462
3.1.4.	Toplinska vrijednost goriva	463
3.2.	Stehiometrijske jednadžbe izgaranja goriva	466
3.2.1.	Izgaranje ugljikovodika s kisikom	467
3.2.2.	Izgaranje ugljikovodika bez kisika	467
3.2.3.	Potrošnja kisika za čvrsta i tekuća goriva	468
3.2.4.	Potrošnja kisika za plinovita goriva	468
3.2.5.	Potrošnja zraka za čvrsta i tekuća goriva	469
3.2.6.	Potrošnja zraka za plinovita goriva	469
3.2.7.	Stvarna količina zraka za izgaranje	470
3.2.8.	Stvarna potrošnja zraka pri stehiometrijskom, tj. neutralnom izgaranju goriva	470
3.2.9.	Stvarna potrošnja zraka pri reducirajućem, tj. nepotpunom izgaranju goriva	471
3.2.10.	Stvarna potrošnja zraka pri oksidirajućem, tj. potpunom izgaranju goriva	471
3.2.11.	Određivanje stvarnog faktora pretička zraka analizom dimnih plinova (Orsatov uređaj)	471
3.2.12.	Određivanje faktora pretička zraka	472
3.3.	Bilance (jednadžbe ravnoteže) volumena i mase produkata izgaranja	472
3.4.	Produkti izgaranja (dimni plinovi ili plinovi izgaranja)	473
3.4.1.	Volumen dimnih plinova u ovisnosti o sadržaju vlage	474
3.4.2.	Sastav suhih dimnih plinova kao produkt stehiometrijskog izgaranja čvrstih i tekućih goriva ($\lambda = 1$)	474
3.4.3.	Vlaga u sastavu vlažnih dimnih plinova kao produkt stehiometrijskog izgaranja čvrstih i tekućih goriva ($\lambda = 1$)	475
3.4.4.	Sastav vlažnih dimnih plinova kao produkt stehiometrijskog izgaranja plinovitih goriva ($\lambda = 1$)	476
3.4.5.	Sastav dimnih plinova kao produkt oksidirajućeg izgaranja čvrstih i tekućih goriva ($\lambda = 1$)	477
3.4.6.	Sastav suhih dimnih plinova kao produkt oksidirajućeg izgaranja plinovitih goriva ($\lambda > 1$)	479
3.4.7.	Sastav vlažnih dimnih plinova kao produkt oksidirajućeg izgaranja plinovitih goriva ($\lambda > 1$)	480
3.5.	Zadatci	482
4.	Pretvorba nuklearne energije	497
4.1.	Fisija	498
4.1.1.	Lančane fisijske reakcije	498
4.1.2.	Nuklearni reaktori	499

4.2.	Fuzija	513
4.2.1.	Proizvodnja tricija (Tr) iz litija (Li) uz oslobađanje energije	513
4.2.2.	Udarni presjek	514
4.2.3.	Mogućnosti zadržavanja plazme	515
4.3.	Zadaci	516
5.	Pretvorba potencijalne i kinetičke energije	527
5.1.	Nosioci potencijalne energije	527
5.2.	Nosioci kinetičke energije	528
6.	Pretvorba energije Sunčeva zračenja	535
6.1.	Svojstva Sunčeva zračenja	536
6.2.	Pretvorba Sunčeve energije i sustavi	538
6.2.1.	Niskotemperaturne pretvorbe Sunčeve energije – ravni kolektor ili toplinski pretvornik	538
6.2.2.	Niskotemperaturne pretvorbe Sunčeve energije – sustavi za zagrijavanje vode	539
6.2.3.	Niskotemperaturne pretvorbe Sunčeve energije – aktivni sustavi za zagrijavanje prostora	540
6.2.4.	Niskotemperaturne pretvorbe Sunčeve energije – pasivni sustavi za zagrijavanje prostora	541
6.2.5.	Niskotemperaturne pretvorbe Sunčeve energije – hlađenje i klimatizacija	542
6.2.6.	Visokotemperaturne pretvorbe Sunčeve energije	542
6.2.7.	Neposredna pretvorba Sunčeve energije u električnu	544
6.2.8.	Dobivanje vodika primjenom Sunčeva zračenja	544
6.2.9.	Zadatak	545
7.	Pretvorba geotermalne energije	551
8.	Upravljanje energijom u industriji	555
8.1.	Energetsko planiranje i energetska učinkovitost	556
8.2.	Aspekti za energetske uštede i izrada studije energetske učinkovitosti (socioekonomski, ekološki)	557
8.3.	Prikupljanje podataka za studiju	559
8.4.	Bilance energetske ravnoteže sustava	561
8.5.	Pristupi energetsom planiranju i ciljevi	562
8.6.	Potencijali povećanja energetske učinkovitosti	564
8.7.	Sustavi upravljanja energijom u industriji	564
9.	Optimizacija procesa i mogućnosti ušteda u procesnoj industriji	594
9.1.	Optimizacija procesa primjenom otpadnih toplina	594
9.1.1.	Zadaci	596
9.1.1.1.	Predgrijavanje kotlovske vode toplinom dimnih plinova	601
9.1.1.2.	Predgrijavanje zraka toplinom dimnih plinova	603
9.1.1.3.	Povrat procesnoga kondenzata	606
9.1.1.4.	Kombinacija povrata topline dimnih plinova za predgrijavanje pojne vode (EKO), predgrijavanje zraka (PZ) i povrat procesnoga kondenzata	608
9.2.	Optimizacija u procesima kompresije i rashladni tornjevi	614
9.2.1.	Kompresori i kompresorske stanice	614
9.2.1.1.	Zadatak	618
9.2.2.	Rashladni tornjevi	623
9.2.2.1.	Zadatak	626
9.2.3.	Zadatak	630

9.3.	Optimizacija procesa sušenja	633
9.3.1.	Tehnološki proces industrijskog sušenja primjenom toplinske energije	635
9.3.2.	Mogućnosti optimizacije procesa sušenja	638
9.3.3.	Proračun procesa sušenja	639
9.3.3.1.	Sušenje s dodatnim zagrijavanjem zraka u sušnici	642
9.3.3.2.	Sušenje s višestupanjskim zagrijavanjem zraka	643
9.3.3.3.	Sušenje s optokom ili recirkulacijom	645
9.3.3.4.	Sušenje s povratom otpadne topline, tj. s regeneracijom	647
9.3.3.5.	Sušenje s kombinacijom optoka i regeneracije topline	649
9.3.4.	Zadatci	650
9.4.	Optimizacija procesa kogeneracije	665
9.4.1.	Temeljni procesi kogeneracijskih postrojenja	672
9.4.1.1.	Parnoturbiniski temeljni proces	672
9.4.1.2.	Plinskoturbiniski temeljni proces	675
9.4.1.3.	Kogeneracijski procesi na bazi motora s unutarnjim izgaranjem kao temeljni proces	677
9.4.1.4.	Postrojenja s potencijalnim temeljnim procesima kogeneracije	679
9.4.2.	Sporedni procesi kogeneracijskih postrojenja	681
9.4.3.	Optimizacija kombiniranih procesa kogeneracije	681
9.4.4.	Trigeneracija	682
9.4.5.	Zadatci	684
10.	Literatura	667
11.	Kazalo pojmova	671
12.	Prilozi: Termodinamičke tablice i dijagrami	681
12.1.	Tablični prikaz stvarnih specifičnih toplina idealnih plinova u ovisnosti o temperaturi	682
12.2.	Tablični prikaz srednjih specifičnih toplina idealnih plinova u ovisnosti o temperaturi	683
12.3.	Termodinamička svojstva vode	684
Tab. 1.:	Termodinamička svojstva vode u ovisnosti o temperaturama	684
Tab. 2.:	Parametri vode u odnosu na tlak u rasponu od 0,01 do 500 bar	693
Tab. 3.:	Parametri zasićene vode u odnosu na vlažnost i tlak	723
Tab. 4.:	Termodinamička svojstva vode u ovisnosti o tlak zasićenja u rasponu od 0,06 do 220 bar	734
Tab. 5.:	Termodinamička svojstva pregrijane pare	737
Tab. 6.:	Termodinamička svojstva vode	743
12.4.	Termodinamička svojstva idealnih plinova	745
Tab. 7.:	Termodinamička svojstva idealnih plinova – zrak pri standardnomu atmosferskom tlaku	745
Tab. 8.:	Termodinamička svojstva idealnih plinova – dušik pri standardnomu atmosferskom tlaku	747
Tab. 9.:	Termodinamička svojstva idealnih plinova – kisik pri standardnomu at. tlaku	750
Tab. 10.:	Termodinamička svojstva idealnih plinova – ugljikov dioksid pri stand. at. tlaku	753
Tab. 11.:	Termodinamička svojstva idealnih plinova – ugljikov monoksid pri stand. at. tlaku	756
Tab. 12.:	Termodinamička svojstva idealnih plinova – vodik pri stand. at. tlaku	759
Tab. 13.:	Termodinamička svojstva idealnih plinova – vodena para pri standardnomu atmosferskom tlaku	761
12.5.	Termodinamička svojstva rashladnih sredstava	764
Tab. 14.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-12 (diklordifluorometan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	764
Tab. 15.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-22 (klordifluorometan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	771

Tab. 16.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-23 (trifluorometan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	774
Tab. 17.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-32 (difluorometan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	776
Tab. 18.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-123 (2,2-diklor-1,1,1-trifluoroetan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	778
Tab. 19.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-124 (2-klor-1,1,1,2-tetrafluoroetan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	780
Tab. 20.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-125 (pentafluoroetan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	782
Tab. 21.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-134a (1,1,1,2-tetrafluoroetan) u ovisnosti o temperaturi pri st. at. tlaku	784
Tab. 22.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-143a (1,1,1-tetrafluoroetan) u ovisnosti o temperaturi pri stand. at. tlaku	786
Tab. 23.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-152a (1,1-difluoroetan) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	788
Tab. 24.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-245fa (1,1,1,3,3-pentafluoroetan) u ovisnosti o temperaturi pri stand. at. tlaku	790
Tab. 25.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-1233zd(E) (trans-1-klor-3,3,3-trifluoroprop-1-ene) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	792
Tab. 26.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-410A (50% R-32/50% R-125) u ovisnosti o temperaturi pri stand. at. tlaku	794
Tab. 27.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-717 (amonijak) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	802
Tab. 28.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-718 (voda/para) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	805
Tab. 29.:	Termodinamička svojstva zasićenoga rashladnog sredstva R-744 (ugljikov dioksid) u ovisnosti o temperaturi pri standardnomu atmosferskom tlaku	808
12.6.	Tablice termodinamičkih svojstva vlažnog zraka	811
Tab. 30.:	Termodinamička svojstva vlažnog zraka u temperaturnom rasponu od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri standardnomu atmosferskom tlaku	811
Tab. 31.:	Termodinamička svojstva vlažnog zraka u temperaturnom rasponu od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri standardnomu atmosferskom tlaku	816
12.7.	Svojstva različitih tvari	823
Tab. 32.:	Pregled osnovnih svojstava plinova i tvari	823
Tab. 33.:	Specifični toplinski kapaciteti idealnih plinova pri temperaturi $T = 300\text{ K}$	825
Tab. 34.:	Specifični toplinski kapaciteti idealnih plinova pri različitim temperaturama	826
Tab. 35.:	Prefiksi	827
Tab. 36.:	Međusobni odnosi jedinica tlaka	827
Tab. 37.:	Međusobni odnosi jedinica temperature	828
12.8.	Termodinamički dijagrami	829
12.8.1.	Termodinamička svojstva vode	829
12.8.2.	Termodinamička svojstva zraka	830
12.8.3.	Termodinamička svojstva amonijaka	831
12.8.4.	Termodinamička svojstva freona-12	832
12.8.5.	Termodinamička svojstva vlažnog zraka – Ramzinov dijagram	833
12.8.6.	Mollierov dijagram za vodu	834
12.8.7.	Termodinamička svojstva na krivulji	835