

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

EKSERGOEKONOMSKA ANALIZA
TIPIČNOG ENERGETSKOG PROCESA
U HRVATSKOJ INDUSTRIJI

MAGISTARSKI RAD

MENTOR: NEVEN DUIĆ,
DOC. DR. SC.

VEDRAN KRSTULOVIĆ

ZAGREB, 2006.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 536.73, 662.614

Ključne riječi: energetska efikasnost, industrija, eksergija, eksergoekonomika, teorija eksergetskih troškova, analiza toplinskih procesa, modeliranje procesa, optimizacija

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Energetski institut Hrvoje Požar

Mentor rada: Dr. sc. Neven Duić, doc.

Broj stranica: 97

Broj slika: 27

Broj tablica: 14

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 56

Datum obrane: 26. travanj 2006.

Povjerenstvo: Dr.sc. Željko Bogdan, red. prof. – predsjednik povjerenstva
Dr. sc. Neven Duić, doc. – voditelj magistarskog rada
Dr. sc. Branka Jelavić – član povjerenstva, Energetski institut Hrvoje Požar

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet stojarstva i brodogradnje
Sveučilišta u Zagrebu



Zagreb, 10.05.2005.

Zadatak za magistarski rad

Kandidat: Vedran Krstulović, dipl. inž.

Naslov zadatka: **Eksergoekonomska analiza tipičnog energetskog procesa u hrvatskoj industriji**

Sadržaj zadatka:

Eksergetska analiza, eksergoekonomska analiza, te teorija eksergetskih troškova kao specifično razvijena metodologija iz tog područja, predstavljaju suvremen pristup opisivanju energetskih procesa. Postavljanje pojednostavljenih modela industrijskih energetskih procesa omogućuje analiziranje njihove energetske efikasnosti u skladu s načelima tih metoda. Cilj ovog rada je ispitati primjenjivost eksergoekonomskog pristupa i posebno teorije eksergetskih troškova na određivanje značajki energetskih procesa prisutnih u hrvatskoj industriji.

U radu je potrebno:

- dati pregled i analizu potrošnje energije u hrvatskoj industriji,
- izdvojiti karakteristične primjere energetskih procesa i postaviti modele procesa pogodne za analizu,
- odrediti eksergetske i eksergoekonomske pojmove relevantne za analizu postavljenih modela,
- istražiti prikladnost teorije eksergetskih troškova za analizu postavljenih modela,
- provesti analizu postavljenih modela u smislu određivanja eksergetskih troškova, eksergoekonomskih troškova te ukupnog eksergetskog stupnja djelovanja,
- provesti variranje ulaznih varijabli uz prikaz osjetljivosti izlaznih veličina,
- dati osvrt na primjenjivost upotrijebljene metodologije na daljnje analize energetske efikasnosti i mogućnosti optimizacije promatranih procesa.

Zadatak zadan: 17.05.2005.

Rad predan:

Mentor:

Doc.dr.sc. Neven Duić

Predsjednik Odbora za
poslijediplomsku studiju:

Prof.dr.sc. Branko Novaković

Voditelj smjera:

Prof.dr.sc. Mladen Andrassy



SADRŽAJ

PREDGOVOR.....	1
SAŽETAK	2
POPIS OZNAKA	4
POPIS SLIKA	5
POPIS TABLICA.....	6
1 UVOD	7
1.1 RAZMATRANJE PROBLEMA	7
1.2 ZNAČAJKE ENERGETSKE EFIKASNOSTI	8
1.3 KARAKTERISTIKE KORIŠTENJA ENERGIJE U INDUSTRIJI	10
1.3.1 Električna i toplinska energija	10
1.3.2 Voda	11
1.3.3 Promatrani zahvati u energetske sustav potrošača.....	11
1.4 EKONOMIKA I ENERGETSKA EFIKASNOST	13
2 ENERGETIKA U HRVATSKOJ INDUSTRIJI.....	15
2.1 PREGLED POTROŠNJE ENERGIJE KOD VELIKIH SEKTORA	15
2.1.1 Industrija građevnog materijala	20
2.1.2 Prehrambena industrija	21
2.1.3 Kemijska industrija	21
2.2 PRIKAZ TIPIČNIH TOPLINSKIH PROCESA.....	22
2.2.1 Industrija građevnog materijala - rekuperacija topline kod cementare.....	22
2.2.2 Industrija građevnog materijala - pečenje opeke.....	23
2.2.3 Kemijska industrija - rekuperacija topline kod proizvodnje etilen-amina	24
2.2.4 Prehrambena industrija - pasterezacija soka	25
2.2.5 Prehrambena industrija - proces sušenja kod proizvodnje ribljeg brašna.....	25
2.3 MODELIRANJE TIPIČNOG INDUSTRIJSKOG PROCESA	26
3 TEORIJSKI TEMELJI ZA METODOLOGIJU.....	29
3.1 EKSERGETSKA ANALIZA	29
3.1.1 Osnovne značajke.....	29
3.1.2 Fizikalna i kemijska eksergija	30
3.1.3 Bilanca eksergije	30
3.1.4 Destrukcija, gubitak i eksergetska efikasnost.....	31
3.2 EKSERGOEKONOMSKA ANALIZA	33
3.2.1 Definicije	33
3.2.2 Eksergetski troškovi.....	33
3.2.3 Razina agregacije.....	34
3.2.4 "Fuel-product" postavke	35
3.2.5 Načela optimizacije	36
3.3 TEORIJA EKSERGETSKIH TROŠKOVA	37
3.3.1 Opće postavke	37
3.3.2 Fizikalna i proizvodna struktura sustava	38
3.3.3 Određivanje eksergetskih troškova.....	38
3.3.4 Eksergoekonomski troškovi.....	40
3.3.5 Vanjska određenja i primjena	40
3.3.6 Primjena metode određivanja eksergetskih troškova na jednostavnom primjeru	41
3.3.7 Univerzalni izraz za eksergetski stupanj djelovanja, [FP] struktura	46
4 PRIMJENA METODOLOGIJE NA ODABRANOM MODELU	51
4.1 PRIPREMNA RAZMATRANJA	51
4.2 ANALIZA PRVE CJELINE PROCESA	56
4.2.1 Određivanje eksergetskih troškova.....	56
4.2.2 Određivanje eksergoekonomskih troškova	58

4.3	ANALIZA DRUGE CJELINE PROCESA.....	60
4.3.1	Određivanje eksergetskih troškova.....	60
4.3.2	Određivanje eksergoekonomskih troškova.....	61
4.4	ANALIZA TREĆE CJELINE PROCESA	62
4.4.1	Određivanje eksergetskih troškova.....	62
4.4.2	Određivanje eksergoekonomskih troškova.....	64
4.5	UVRŠTAVANJA ULAZNIH VRIJEDNOSTI I REZULTATI.....	65
4.5.1	Pretpostavke.....	65
4.5.2	Uvrštavanje i rezultati za prvu cjelinu	66
4.5.3	Uvrštavanje i rezultati za drugu cjelinu procesa.....	69
4.5.4	Uvrštavanje i rezultati za treću cjelinu procesa.....	70
4.6	VARIJANJE ULAZNIH VRIJEDNOSTI	72
4.6.1	Osjetljivost modela na promjene ulaznih specifičnih troškova	72
4.6.2	Osjetljivost modela na variranje troškova za komponente.....	74
4.7	MOGUĆE DALJNJE ANALIZE I PRIMJENE.....	75
5	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	77
	LITERATURA	79
	PRILOZI.....	83
	KRATKI ŽIVOTOPIS	97

Predgovor

Cilj izrade ovog magistarskog rada je ispitivanje primjenjivosti eksergoekonomske analize i teorije eksergetskih troškova kao metode određivanja značajki energetskeg procesa prisutnih u hrvatskoj industriji. U tu će se svrhu izraditi i ispitati matematički model na odgovarajućem probnom procesu.

Na temelju proučene literature postavlja se hipoteza da je eksergetska analiza kombinirana s određivanjem ekonomskih značajki, a specifično teorija eksergetskih troškova, primjenjiva je na reprezentativan model energetskeg procesa u domaćoj industriji. Poopćeno svođenje toplinskih procesa na eksergetske tokove te podsustave karakterizirane " resurs-produkt" (fuel-product) prikazom, bi trebalo omogućiti upotrebljive rezultate, na temelju kojih su provodljive daljnje analize.

Prethodno će se u radu analizirati potrošnju i korištenje energije u domaćoj industriji tijekom određenog perioda, uz određivanje trendova potrošnje, i izraditi reprezentativni model postrojenja primjenjiv na širem području. Na temelju tog modela provest će se navedene analize.

Nastojat će se ispitati može li eksergoekonomska analiza poslužiti kao općeniti model analize i optimizacije energetskeg sustava. Model tipičnog energetskeg procesa će se postaviti tako da ispita svrhovitost pojednostavljivanja sličnih procesa, uz zadržavanje bitnih proizvodnih i energetskeg značajki promatranog sustava.

Kako je ovo područje istraživanja raznovrsno, moguće je metodologiju korištenu na u ovom radu izvedenom reprezentativnom modelu dalje ispitivati na specifičnim kompleksnijim procesima. Pored iskazivanja eksergetskih troškova, moguće je izvesti ukupni eksergetski stupanj djelovanja, razvijati analizu u pravcu dobivanja realnijih ekonomskih značajki djelovanja procesa uz određivanje procesa nastanka troškova, te određivati brojne daljnje karakteristike promatranih toplinskih procesa.

Iskušavanjem navedenih analitičkih metoda na prilagođenom modelu industrijskog energetskeg procesa u ovom radu pokušat će se upotrijebiti jedan razvijeni znanstveni pristup na primjeru iz domaće prakse, i otvoriti područje teoretskog promatranja koje bi se moglo dalje razvijati. U uvjetima potrebe za povećanjem energetske efikasnosti u domaćoj industriji, a također i kod drugih skupina velikih potrošača (usluge, javni sektor, kućanstva, promet...), otvorilo bi se područje razmatranja optimizacije energetskeg procesa koje daje slobodu prilagodbe metodologije specifičnim realnim procesima.

Sažetak

U radu je primijenjena eksergetska i eksergoekonomska analiza tipičnog toplinskog procesa u industriji. Najprije je dan pregled potrošnje i korištenja energije u hrvatskoj industriji tijekom višegodišnjeg razdoblja, te su izložene skupine najvećih industrijskih potrošača s analizom njihovih procesa i stanja energetske efikasnosti. Razmotreni su tipični toplinski procesi u analognim industrijama s primijenjenim naprednim rješenjima, te je na temelju toga izrađen model teoretskog reprezentativnog procesa za daljnja promatranja.

Teorijski temelji za primijenjenu metodologiju su načela eksergetske analize, eksergoekonomske analize, te teorije eksergetskih troškova ako ključne podloge. Potonja teorija je posebno interesantna kao suvremeni i drugačiji pristup analitici tehničkih i ekonomskih karakteristika, te je pokušaj njene primjene osnova ovog rada. Na jednostavnom primjeru iskušano je korištenje univerzalnog izraza za eksergetsku efikasnost, čija je metodologija postavljena 1980-tih.

Izložena metodologija je primijenjena na odabranom teoretskom modelu, razdijeljenom na tri funkcionalne cjeline. Za svaku cjelinu izvršena je eksergetska i eksergoekonomska analiza. Dobiveni rezultati su se varirali promjenom ulaznih veličina radi ustanovljenja odziva karakteristika tokova u procesu. Razmotrene su mogućnosti daljnjih istraživanja i primjene na ovaj način dobivenih rezultata.

Ključna značajka obrađene teme je povezivanje ekonomskih i energetskeg karakteristika procesa koji bi se analizirali u uvjetima prisutnima kod velikih potrošača energije u Hrvatskoj.

Ključne riječi: energetska efikasnost, industrija, eksergija, eksergoekonomika, teorija eksergetskih troškova, analiza toplinskih procesa, modeliranje procesa, optimizacija

SUMMARY

Exergoeconomic analysis of the typical energy process in the Croatian industry

In this work, the exergetic and exergoeconomic analysis of the typical industrial thermal process is applied. A survey of the use of energy in Croatian industry for a longer period is given, and the groups of larger energy consumers are presented, with the analysis of their processes and the status of energy efficiency. Some typical energy processes in corresponding industries with applied advanced solutions were regarded, and, based on that, a model of representative theoretical process was made for further studying.

The fundamentals for the applied methodology are the principles of the exergy analysis, of the exergoeconomic analysis, and of the theory of exergetic costs, as the key element. The latter theory is especially interesting as a modern and different approach to the analyzing of technical and economical issues, and the attempt of applying it on some example is the basis of this work. The use of the universal expression for the exergetic efficiency, the methodology for which was set in 1980's, was tested on a simple example.

The exhibited methodology was applied on the chosen theoretical model, which was divided into three functional compounds. For each of these compounds, the exergetic and exergoeconomic analysis was performed. The obtained results were varied through input change in order to get the response from the changing process flow characteristics. The possibilities of further research and application of the results obtained this way were regarded.

The key feature of the topic of this work is the linking of economic and energy characteristics of processes which are intended to be analyzed in conditions present at the large energy consumers in Croatia.

Key words: energy efficiency, industry, exergy, exergoeconomics, theory of exergetic costs, analysis of thermal processes, process modeling, optimization

Popis oznaka

E^{PH}	-	fizikalna eksergija
y^D	-	destrukcija eksergije
y^L	-	gubitak eksergije
μ_{00}	-	kemijski potencijal u ravnotežnom stanju
ε	-	eksergetska efikasnost
Z^{CI}	-	troškovi kapitalne investicije podsustava
Z^{OM}	-	troškovi pogona i održavanja investicije podsustava
c	-	jedinični eksergoekonomski trošak
F	-	resurs sustava
P	-	produkt sustava
I	-	nepovratnost
B^*	-	eksergetski trošak toka
x	-	omjer bifurkacije (grananja) eksergija
η_T	-	ukupni stupanj djelovanja sustava

Matrice i vektori:

A	-	incidentna matrica [$n \times m$]
A_F	-	matrica resursa [$n \times m$]
A_P	-	matrica produkta [$n \times m$]
A_L	-	matrica gubitaka [$n \times m$]
A	-	matrica troškova [$m \times m$]
Y^*	-	vektor vanjskih određenja [$m \times 1$]
Π	-	vektor eksergoekonomskih troškova [$m \times 1$]
α	-	proizvodna podmatrica [$(m-n) \times m$]
ω	-	vektor ulaznih tokova u sustav
B	-	vektor eksergija tokova [$m \times 1$]
F	-	vektor resursa [$n \times 1$]

P	-	vektor produkta [$n \times 1$]
I	-	vektor koji sadrži nepovratnosti sustava [$n \times 1$]
B*	-	vektor troškova eksergije tokova [$m \times 1$]
Z	-	vektor vanjskih ekonomskih procjena
[FP]	-	matrica odnosa resursa i produkata
U, ^tU	-	jedinični i transponirani jedinični vektor
U_D	-	dijagonalna jedinična matrica
H_D	-	dijagonalna matrica sa stupnjevima djelovanja
K_D	-	inverzija H_D

Popis slika

<i>Slika 2.1: Potrošnja toplinske energije kod najvećih grupa potrošača u Hrvatskoj u periodu '90 - '03.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.2: Potrošnja električne energije kod najvećih grupa potrošača u Hrvatskoj u periodu '90 - '03.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2.3 : Udio industrije u potrošnji toplinske energije u Hrvatskoj u periodu '90 - '03.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2.4: Udio industrije u potrošnji električne energije u Hrvatskoj u periodu '90 - '03.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.5: Potrošnja toplinske energije u industriji RH '90 -'03 prema energentima</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2.6: Potrošnja toplinske energije u u hrvatskoj industriji '90 -'03 prema granama.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2.7: Potrošnja električne energije u u hrvatskoj industriji '90 -'03 prema granama</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2.8: Potrošnja toplinske energije u industriji građevnog materijala '90 - '03</i>	<i>20</i>
<i>Slika 2.9: Potrošnja toplinske energije u prehrambenoj industriji '90 - '03</i>	<i>21</i>
<i>Slika 2.10: Potrošnja toplinske energije u kemijskoj industriji '90 - '03.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2.11: Proces proizvodnje cementa uz iskorištenje otpadne topline.....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 2.12: Proces pečenja opeke s djelomičnom rekuperacijom i poboljšanjima.....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 2.13: Rekuperacija topline kod proizvodnje etilen-amina.....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 2.14: Toplinski procesi kod proizvodnje jabučnog soka</i>	<i>25</i>
<i>Slika 2.15: Procesi sušenja i kuhanja kod prerade ribe.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 2.16: Zamišljeni model s toplinskim procesima</i>	<i>27</i>
<i>Slika 3.1: Dijagram pojednostavljenog modela postrojenja.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 4.1: Zamišljeni model s toplinskim procesima i definiranim tokovima.....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 4.2: Dio procesa s peći, utilizatorom i hladnjakom</i>	<i>56</i>
<i>Slika 4.3: Dio procesa s kuhalom i spremnikom kondenzata.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 4.4: Dio procesa s izmjenjivačem i zagrijačem.....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 4.5: Variranja π_i s promjenama ulaznih parametara u prvoj cjelini</i>	<i>72</i>
<i>Slika 4.6: Variranja π_i s promjenama ulaznih parametara u drugoj cjelini</i>	<i>73</i>
<i>Slika 4.7: Variranja π_i s promjenama ulaznih parametara u trećoj cjelini.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 4.8: Variranja π_i s promjenama troškova za peć</i>	<i>74</i>
<i>Slika 4.9: Variranja π_i s promjenama troškova za utilizator</i>	<i>74</i>
<i>Slika 4.10: Variranja π_i s promjenama troškova za izmjenjivač.....</i>	<i>75</i>

Popis tablica

Tablica 2.1: Potrošnja topline u periodu '90 - '03 i udjeli sektora	17
Tablica 3.1: Eksergetski troškovi tokova u probnom primjeru	46
Tablica 4.1: Tokovi tvari u zamišljenom procesu	51
Tablica 4.2: Tokovi tvari u prvom dijelu procesa	57
Tablica 4.3: Tokovi tvari u drugom dijelu procesa	60
Tablica 4.4: Tokovi tvari u trećem dijelu procesa	63
Tablica 4.5: Rezultati eksergetskih troškova za prvu cjelinu	66
Tablica 4.6: Rezultati izračuna eksergoekonomskih troškova za prvu cjelinu	68
Tablica 4.7: Utjecaj variranja specifičnih ulaznih troškova na izračun eksergoekonomskih troškova	68
Tablica 4.8: Rezultati eksergetskih troškova za drugu cjelinu	69
Tablica 4.9: Rezultati izračuna eksergoekonomskih troškova za drugu cjelinu	70
Tablica 4.10: Rezultati eksergetskih troškova za treću cjelinu	70
Tablica 4.11: Rezultati izračuna eksergoekonomskih troškova za treću cjelinu	71
Tablica 4.12: Varirane ulazne vrijednosti za određene c_{Fi}	72

1 Uvod

1.1 Razmatranje problema

Eksergetska analiza, koja se ponekad promatra i kao analiza *raspoloživosti* - budući da se eksergija u osnovi i smatra onim dijelom energije koja stoji na raspolaganju - jest metoda koja se u suvremenoj analitici energetskeg sustava pokazuje prikladnijom od klasičnih pristupa. U današnjim uvjetima potrebe za preciznijim određivanjem svih utjecaja na učinkovitije korištenje energetskeg resursa, te procjene ekonomskih konzekvenci i utjecaja korištenja energije na okoliš, potreba za kompleksnijom metodologijom koja se može prikladno razvijati sve je veća. Eksergoekonomska ili termoeekonomska analiza je relativno nova disciplina koja nadograđuje eksergetsku analizu kombinirajući je s konvencionalnim konceptima inženjerske ekonomike u svrhu naprednije procjene i optimizacije izgradnje i pogona energetskeg sustava. Kao glavna pridodana vrijednost ovdje može se promatrati sveobuhvatna minimizacija troškova u procesima korištenja energije.

U nizu radova George Tsatsaronis et al. daju razmatranja povijesti eksergetske analize i eksergoekonomike, procjene djelovanja energetskeg sustava sa stanovišta drugog zakona termodinamike, te primjene termoekonomske tehnike optimizacije. U [33] i [34] Tsatsaronis i Winhold daju prikaz primjene ovih analiza na proučavanje jednog sustava za pretvorbu energije, najprije kao pregled nove metodologije te kao primjenu na analizu planiranog termoeenergetskeg postrojenja loženog ugljenom. U [12] Bejan, Tsatsaronis i Moran daju temeljiti pregled planiranja i analize toplinskih sustava s principima i primjerima ekonomske, eksergetske i termoekonomske analize, optimizacije i drugog.

Možda najinteresantniji dio metodologije razmatrane u ovom radu jest *teorija eksergetskeg troškova*, koju su početkom 1990-tih razvili A. Valero, M. A. Lozano i suradnici sa sveučilišta u Zaragozi. Ta je teorija višestruko nagrađivana ASME-ovom "Edward F. Obert" nagradom, a autori su prvi Europljani koji su je primili. U [16] su prikazani načela teorije, fizikalna struktura kojom su predstavljeni promatrani energetskegi sustavi, te proizvodna struktura, gdje se uvodi matrični prikaz sustava. Nadalje je dano određivanje eksergetskeg troškova, načela eksergoekonomskeg troškova, vanjskeg određenja, te uvod u razmatranje procesa formiranja troškova, i proizlazeće mogućnosti primjene.

Od prethodnih radova te grupe sa zaragoškog sveučilišta ovdje je korišten [29] iz 1987. u kojemu A. Valero i J. A. Alconchel pomoću jednostavnog primjera izvode analitičku formulu koja povezuje opću efikasnost sustava s efikasnostima podsustava, te resurse i produkte bilo kojeg podsustava. Nadalje je od korištenih ranijih radova bitan [22] Valera i Torresa gdje se, opisom algebarske termodinamičke analize energetskeg sustava na jednostavnom primjeru razvija matematički model i matrična interpretacija koji su od temeljne važnosti za razmatranje teorije eksergetskeg troškova. U radu [35] autori iz zaragoške grupe istražuju uzročno-posljedične veze zbivanja kod organiziranih energetskeg sustava. U prvom poglavlju tog rada su razmatrani svrha, uzročnost, ireverzibilnost te priroda troškova i efikasnosti kod energetskeg sustava, u drugom, interesantnijem za ovdje obrađivanu temu, razrađena je simbolička eksergoekonomika, a u trećem poglavlju teorija perturbacija, kao analiza utjecaja koje disfunkcionalnost jednog dijela sustava ima na ostale njegove dijelove.

U nagrađenom djelu "*Diagnóstico Termoeconómico: estrategia aplicada a sistemas de energéticos muy complejos*" iz 2003. Valero et al. produbljuju svoja istraživanja industrijskih procesa i potrošnje ne samo energije već i vode i sirovina, te posljedičnih emisija i ostataka tijekom životnog vijeka proizvoda. Predlaže se dijagnostički sustav za koji se smjelo tvrdi da njegova primjena može dovesti do ušteda energije, vode i tvari "četiri do deset puta većih od sadašnjih" [36]. U separatu iz tog djela [37] detaljno je analiziran proces formiranja troškova, čiji fizički korijeni proizlaze iz drugog zakona termodinamike. Dan je opći pogled na eksergoekonomiku kao na disciplinu koja, povezujući fiziku i ekonomiku, štedi resurse, te su detaljno opisani temeljni koncepti i alati. U drugom separatu [38] obrađuje se simbolička termoeekonomska analiza sustava s utjecajem individualnog konzuma resursa kod svake komponente na ukupni iznos vanjskih resursa potreban da se dobije željeni produkt.

Za istraživanje prisutnosti slične metodologije u domaćoj praksi promatrani su članci [2] s razmatranjem modela optimalnog planiranja za procesnu industriju te [10] s analizom absorpcijskog rashladnog ciklusa, gdje je izveden eksergetski COP sustava. Prema trenutnim spoznajama, eksergoekonomika je kao pojam obrađivana u pojedinim radovima, dok se teorija eksergetskih troškova ne javlja u domaćoj literaturi. Za analizu korištenja energije u hrvatskoj industriji korištena je literatura [1], [3], [4] i [6], za periodične preglede prema industrijskim granama i energentima koji se obnavljaju na godišnjoj razini te s razmatranjem samih prisutnih procesa, razina efikasnosti i potencijala uštede toplinske i električne energije. Članci [7], [8] i [9] daju primjere iz međunarodne prakse naprednih primjena mjera energetske efikasnosti u raznim industrijama.

Kako je sama metoda određivanja eksergoekonomskih troškova s vanjskim ekonomskim čimbenicima u primarnoj literaturi nedostavno obrađena za izvođenje praktičnih primjera, dragocjen je bio članak [39] gdje je obrađen utjecaj odabira raznih proizvodnih struktura (predstavljanja promatranog sustava) na eksergoekonomsku analizu jednog kogeneracijskog postrojenja, rad grupe s brazilskog sveučilišta Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Kogeneracijska postrojenja se inače često sreću kao objekt promatranja kod novijih radova s primjenom eksergoekonomske analize.

Eksergoekonomska analiza je danas globalno prisutna u radovima s tematikom industrijske energetike, što se može ilustrirati s [11] gdje se predstavljaju rezultati eksergetske i eksergoekonomske analize procesa proizvodnje etilena na Tajvanu, te s [40] gdje se prikazuju eksergoekonomski tokovi za metaluršku industriju u Rumunjskoj. Najsvježiji primjeri razvoja analitike te ilustracije raznovrsnosti moguće primjene su [53], gdje se primjenjuje analiza na različite pogonske uvjete kod PEM gorivnih ćelija, [54] gdje se s eksergoekonomskog stanovišta proučavaju parametri rada sustava korištenja geotermalne energije s toplinskom pumpom, zatim [55] gdje je predstavljena pojednostavljena eksergoekonomska metodologija za trigeneracijski sustav bolnice na mediteranskom području, te [56] gdje je predstavljen razvoj i primjena integriranog pristupa optimizaciji složenih toplinskih sustava.

1.2 Značajke energetske efikasnosti

Unapređivanje energetske efikasnosti je od strane Međunarodne agencije za energiju definirano kao "smanjivanje korištene energije po jedinici proizvoda bez utjecaja na razinu kvalitete proizvoda/usluge". Na nacionalnim razinama pojedinih zemalja, ono je bitno kako

za velike potrošače energije, tako i za samu državu. Kod gospodarskih subjekata-potrošača su pojmovi kao što su troškovi proizvodnje, kvaliteta i cijena proizvoda te usluge uvijek u određenoj mjeri funkcija energetske efikasnosti. Za samu državu, podizanje energetske efikasnosti je prioritet zbog racionalnijeg korištenja prirodnih resursa, smanjenja uvoza energije odnosno energetske ovisnosti, smanjenja zahtjeva za kapitalno intenzivne projekte izgradnje novih energetskeg postrojenja, i redukciju štetnog djelovanja na okoliš; općenito, posvećivajne pažnje ovom problemu bitno doprinosi kvaliteti energetskeg strateških planiranja. Na globalnoj razini, primarna dobrobit sveobuhvatnog podizanja energetske efikasnosti se odražava na ekološkom planu. Smanjenje štetnih emisija, prvenstveno stakleničkih plinova, na djelotvoran i prihvatljiv način, jest svojstvo koje daje snažnu globalnu podršku programima racionalnog korištenja energije. Pored toga, oni doprinose ublažavanju mogućih energetskeg kriza, te je njihov potencijal toliki da se samo poboljšanje energetske efikasnosti ponekad naziva "petim energentom".

Kod zemalja u tranziciji, jedan od glavnih problema s kojima se njihov energetskeg sektor danas susreće jest upravo niska razina efikasnog korištenja energije. Pored neodgovarajuće i često zastarjele tehnologije, i posljedica koje su iza sebe ostavili uvjeti dirigiranog gospodarstva, najveća prepreka ostvarenju povećanja energetske efikasnosti je nedostatak organiziranog pristupa, suvremenih saznanja s ovog područja, te nedostatak učinkovite razmjene informacija.

Premda je danas specifična energetskeg potrošnja u Hrvatskoj na relativno skromnoj razini, prvenstveno zbog direktnih i indirektnih posljedica rata i tranzicije, potreba za gospodarskom obnovom i rastom, uz nedostatnost vlastitih energetskeg izvora, kao i nužnost ustanovljenja kvalitetnije politike cijena energenata, uz rastuću svijest o zaštiti okoliša, i odmah i dugoročno nameće potrebu poboljšanja efikasnosti u korištenju energije.

Poseban moment u razmatranju energetske efikasnosti je sadržan u samom pristupanju problemu. Istraživački se pristup, uzimajući u obzir sve posredne i neposredne faktore i modelirajući situaciju na dulji vremenski rok, u mnogim točkama razlikuje od pragmatičarskog pristupa neposrednog djelatnika u objektu-intenzivnom potrošaču energije, ograničenog najčešće na neposredne utjecaje i nesklonog opsežnijem planiranju. Također, nedostatak relevantnih informacija i najnovijih saznanja o općem i tehnološkom razvoju i o iskustvima s područja efikasnosti, te svijesti o utjecaju na okoliš, predstavlja kod velikih potrošača glavnu prepreku poboljšanju energetske efikasnosti. Veće tvrtke obično smatraju da imaju dovoljno vlastitih, "domaćih" saznanja iz ovog područja, a individualni potrošači srednje i manje veličine s jedne strane sami nemaju kvalitetan izvor informacija o ovom problemu, dok s druge strane sebe promatraju kao malog izdvojenog potrošača a ne kao dio cijelog sektora u svojoj djelatnosti, pa ovom pitanju ne daju prioritet.

Stoga kvalitetan pristup problemu povećanja energetske efikasnosti traži i sposobnost uočavanja cjelokupne situacije u energetskeg sektoru, i analitičke sposobnosti ustanovljenja stanja kod individualnih potrošača, a sami istraživački pristup je kvalitetna nadgradnja i uvjet postizanja stvarnog napretka.

1.3 Karakteristike korištenja energije u industriji

1.3.1 Električna i toplinska energija

Potrošnja električne energije obično je kod velikih potrošača manja od toplinske, osobito u industrijskom sektoru. No, ona predstavlja rastuću stavku, a priroda njene potrošnje pruža velike potencijale ušteda i racionalizacije korištenja. Mjere povećanja energetske efikasnosti mogu se svesti na zahvate u povećanju djelotvornosti potrošnje, te zahvate na trošilima.

Potencijali uštede kod potrošnje električne energije efektivno se mogu grupirati na uštedu kod :

- rasvjete,
- klimatizacije,
- grijanja,
- elektromotornih pogona.

Te su skupine uglavnom prisutne pri promatranju svih grupa potrošača. Specifične tehnološke procese u industriji koje troše veće količine električne energije (elektroliza itd.) treba analizirati zasebno [1].

Za korištenje toplinske energije u industriji vezano je uz specifičnosti tehnološkog procesa pojedine industrije. Kao medij se najčešće koristi voda/para, te zrak – uglavnom u sušarama i posebnim pećima. Jedino procesna industrija u svojoj tehnologiji koristi i druge fluide kao medije za prijenos topline.

Promatrajući vodu kao najpogodniji medij, za analizu efikasnosti potrebno je razlučiti koje se sve razine entalpija u pojedinim procesima koriste. S tog stanovišta se razmatra potrošnja tople vode, vrele vode, suhozasićene pare, i pregrijane pare.

Što je medij niže temperature, veće su mogućnosti dobrog iskorištenja izvora topline, tj. što manjeg gubitka u osjetnoj toplini dimnih plinova. Općenito, zahvati u efikasnost iskorištenja topline mogu se promatrati u samom procesu, i u naknadnom korištenju topline.

Sam tehnološki proces najčešće zbog svoje ograničene fleksibilnosti sužuje područje djelovanja uglavnom na provjeru njegove kvalitete. U tom smislu potrebno je izvršiti snimku stanja s bilancama topline i utvrditi odvija li se proces optimalno i javljaju li se nepredviđeni gubici, te je li moguća optimizacija; i utvrditi stanja infrastrukture [2].

Naknadno korištenje topline podrazumijeva iskorištavanje što većeg dijela osjetne topline koja iz tehnološkog procesa izlazi kao gubitak. Tamo gdje se u procesu koristi para, pogotovo ona više entalpije, često se javlja mogućnost dogrijavanja i zagrijavanja tople ili vrele vode, ukoliko se i ona koristi. Uglavnom, u industrijskim procesima javlja se posebno velika količina otpadne topline, kojom je moguće zadovoljiti mnoge potrebe, od dijela onih koje se javljaju u procesu, preko potreba cjelokupnog objekta – postrojenja i pratećih jedinica – sve do plasiranja topline potrošačima izvan objekta. Naselja s većom koncentracijom takve industrije mogu zadovoljiti i dio potreba obližnjih domaćinstava i javnih ustanova za grijanjem [3].

Javlja li se potreba za rekonstrukcijom ili izgradnjom nove energane u industrijskom postrojenju, od ključne je važnosti izrada kvalitetne studije izvodljivosti koja uzima u obzir sve specifičnosti i moguća optimalna rješenja. Pritom je važan režim rada korisnika, dnevna, mjesečna i godišnja potrošnja energije i moguća vršna opterećenja. Na temelju tih podataka i

poznavanja proizvodnog procesa moguće je preliminarno isplanirati postrojenje sposobno da iskoristi maksimum toplinske energije koja se u procesu javlja. Energetski je najčešće optimalno uvođenje kogeneracijskog postrojenja, pogotovo kod procesa s kontinuiranom potrošnjom, obzirom da je često moguće isplanirati razine korištenja otpadne topline – bilo u kotlovima na ispušne plinove, ili u odvajanjima iz parnih turbina.

Posebnu skupinu predstavlja automatizirana regulacija industrijskih postrojenja, koja otvara veliki potencijal energetskih ušteda i racionalizacije. Odgovarajući nadzor, analiza i upravljanje procesima je u stanju vrlo brzo reagirati i optimalno izbalansirati djelovanje sustava, otkloniti nepovoljne situacije, poboljšati sigurnost cijelog sustava i spriječiti havarije energetskih postrojenja. Uvođenje automatske regulacije sustava to se više isplati što je složeniji i veći industrijski proces.

1.3.2 Voda

Vodni resursi postaju svakim danom sve nedostatniji. Posebno je energetika područje koje je veliki potrošač vode, i racionalizacija korištenja energije često je povezana s racionalizacijom potrošnje vode. Pored toga što racionalno korištenje vode u energetskim procesima doprinosi i energetskim uštedama, izravan utjecaj koji tretiranje vodnih resursa ima na okoliš nameće nužnost da se u razmatranja energetske efikasnosti obuhvati upravljanje potrošnjom vode.

U industriji je upravljanje potrošnjom vode složenije i daje više mogućnosti racionalizacije, vezano uz specifičnosti procesa. No općenito se može govoriti o pristupanju tri glavna cilja:

- uštede u potrošnji vode i obradi vode pred upotrebom, što je ovisno o kvaliteti vode koja se dobavlja;
- uvođenje mjera koje poboljšavaju upravljanje vodom u procesu, kao što je recikliranje, ponovo korištenje nakon obrade i upotreba rashladne vode;
- optimiziranje obrade otpadnih voda.

1.3.3 Promatrani zahvati u energetski sustav potrošača

Zahvati na poboljšanju energetske efikasnosti kod industrijskih subjekata, poredani prema svojoj složenosti, mogu se podijeliti na sljedeće [4]:

- Najjednostavniji zahvat je uvođenje **sveobuhvatnog racionalnog korištenja energije**. To ne podrazumijeva veće investicije u opremu, nego prvenstveno osnovnu studiju korištenja energije i izradu energetske bilance u pojedinom objektu, na koje se nadovezuje informiranje i poduka osoblja o optimalnim postupcima s opremom, trošilima i drugim elementima na način da se rasipanje energije svede na minimum.
- **Revitalizacija** se odnosi prvenstveno na interventne zahvate na energetskoj opremi i objektima, kojima se ispravlja pad funkcionalnosti uslijed dotrajalosti, neprikladne izvedbe, neodgovarajućeg rukovanja i sl. Uvjet za pravilnu primjenu ovih mjera je također prethodna provedba odgovarajuće studije kojom se utvrđuje stanje i uvjeti eksploatacije opreme i objekata. Veliki potencijal u mjerama ove razine leži u činjenici da se vrlo često između tekućeg održavanja i nabave nove opreme ne razmatraju nikakvi drugi međuzahvati, koji bi mogli otkloniti često vrlo velik dio uzroka smanjene efikasnosti.

- **Zahvati na trošilima** se također mogu promatrati u okviru revitalizacije, no ovdje je naglasak na djelovanju na strani potrošnje. Također po kriterijima dotrajalosti, zastarjelosti i neispravnosti, a u skladu s provedenim ispitivanjima, trošila je poželjno obraditi u smislu efikasnije potrošnje energije, bilo da se radi o mehaničkim popravcima, zamjeni pogonskih jedinica, ili zamjeni cijelog trošila.
- **Dogradnja postojeće energane** odnosi se na situacije gdje postojeće energetske postrojenje svojim kapacitetom, funkcionalnošću i dr. više ne može zadovoljiti potrebe potrošnje, ali je kvaliteta njegova rada još dovoljno visoka za daljnju eksploataciju. Tu je obuhvaćen raspon zahvata od najjednostavnijih, kao što je dogradnja pojedinih spremnika, izmjenjivača i sl, do izgradnje novog dijela postrojenja koje se nadopunjuje starim (nastavak eksploatacije pojedinih kotlova i sl.). Kvalitetna analiza izvedena za zahvate ove razine daje tehničku osnovu za produljenje životnog vijeka komponenata, smanjuje neplanirane prekide rada uslijed neočekivanih otkaza vitalnih komponenata, i određuje koje su dogradnje i zamjene opreme i komponenata optimalno potrebne i pravovremene. Budući da se ovdje uglavnom radi o investicijskim zahvatima, bitna je uloga ekonomskog dijela analize.
- **Izgradnja novog energetskeg objekta** najslabiji je i financijski najzahtjevniji zahvat, te kod ozbiljnijih investicija podrazumijeva prikupljanje podataka o postojećoj i planiranoj potrošnji energije i snimanje stanja objekta i opreme, izrade predstudije i studije izvodljivosti sa sveobuhvatnom financijsko-ekonomskom analizom, te brojne druge radnje

Automatizacija energetskeg procesa je zahvat kojim se općenito mogu postići vrlo veliki potencijali kako u uštedama energije tako i u pravilnom rukovanju opremom.

Sa stanovišta energetske efikasnosti očekuje se vođenje procesa i potrošnje koje na minimum svodi gubitke i optimalno angažira instaliranu snagu, sprečava prazne hodove i sl.

Rekuperacija topline u raznim procesima intenzivne energetske je vrlo važna kategorija. Tu se razmatra iskorištenje otpadne topline iz:

- izlaznih dimnih plinova
- osjetne topline kondenzata
- niskotemperaturne topline

Prikladno je uvesti omjer između stvarne i maksimalno moguće rekuperirane topline, koji se može definirati kao stupanj rekuperacije. Udio nerecuperirane topline je proporcionalan uvjetnim troškovima energije koji nastaju u odnosu prema maksimalno mogućoj rekuperaciji.

Bitno je uočiti da pri stupnju rekuperacije koji je veći od optimalnoga dolazi do povećanja ukupnih troškova uslijed nagloga porasta investicije u ogrijevne površine. Dakle, u planiranju i projektiranju nekog sustavaza rekuperaciju topline značajnu ulogu ima i dugoročno predviđanje kretanja cijena u nastupajućem razdoblju, kako bi se odredili uvjeti koji će utjecati na optimum tokom eksploatacije.

Konačno, ispravno **održavanje** strojeva, opreme i uređaja uvelike utječe na ekonomičnost proizvodnje i potrošnje energije, vijek trajanja opreme i opću učinkovitost procesa. Brojni su primjeri loše energetske efikasnosti, pada učinka postrojenja, pojačane emisije štetnih tvari i drugih loših karakteristika u radu koje su se mogle izbjeći odgovarajućim održavanjem.

Redovne mjere brige o stanju postrojenja najčešće zahtijevaju mala ulaganja, te su za njih prvenstveno bitne organizacijske mjere i kvalificiranost zaduženog osoblja.

Ove mjere se svrstavaju u racionalno korištenje energije, te im je nužno posvetiti odgovarajuću pažnju. Obzirom na njihovu važnost, nužno je razviti odgovarajuće programe održavanja po sektorima, u skladu s karakteristikama pojedinih energetskeg procesa, primjena kojih bi bitno doprinijela povišenju energetske efikasnosti.

1.4 Ekonomika i energetska efikasnost

U svojoj suštini, energetska efikasnost je najuže vezana uz ekonomske dobrobiti koje proizlaze iz ostvarenja njenih mjera. Temeljni razlog pokretanja projekata povećanja efikasnosti kao i glavna motivacija prihvaćanja tih mjera od strane potrošača jesu upravo energetske uštede koje posredno ostvaruju financijsku dobit. Razvijene discipline koje se u takvim razmatranjima najčešće javljaju su:

- upravljanje sa strane potrošnje - Demand-Side Management (DSM),
- planiranje najmanjih troškova - Least-Cost Planning (LCP),
- cjelokupno planiranje resursa - Integrated Resources Planning (IRP), koje kombinira DSM i LCP.

Kada se promatra osiguravanje potrebnih količina energije za zadovoljenje potrošnje, obično se pažnja usredotočuje na optimiranje aktivnosti sa strane opskrbe energijom (Supply-Side Management), što se odnosi prvenstveno na:

- proizvodnju energije, rezerve, skladištenje;
- trgovinu i razmjenu na unutarnjem i vanjskom području;
- prijenos odnosno transport, i distribuciju.

Rastuće potrebe za energijom zadovoljavaju se izgradnjom novih proizvodnih i distribucijskih kapaciteta.

Ako se u razmatranje uzmu mjere pokrivanja potreba sa strane potrošnje (demand-side), prema principima najmanjih troškova (least-cost) se uviđa da one predstavljaju daleko povoljnije rješenje. Takve mjere otvaraju novo područje djelovanja, pod uvjetom da se mogu uklopiti u okvire važeće regulative i postojećih mogućnosti. Skup mjera koje se provode sa strane potrošnje obuhvaća:

- izravnavanje krivulja opterećenja (Load Management),
- uvođenje troškovno orijentiranog tarifnog sustava,
- informiranje potrošača o mjerama racionalnog korištenja energije,
- investiranje u mjere uštede energije kod potrošača.

Kada za zadovoljavanje određenih energetskeg potreba na raspolaganju ne stoji dovoljno energije, dva su načina traženja zadovoljavajućeg rješenja:

- povećati kapacitet izvora energije, bilo izgradnjom/dogradnjom ili poboljšanjem efikasnosti proizvodnje (strana ponude);
- smanjiti specifične energetske potrebe potrošača (strana potražnje).

Za pravilnu odluku o investicijama moraju i strana ponude i strana potražnje biti ravnopravno promotrene, da bi se dobilo najekonomičnije rješenje. Za takav se pristup uobičajeno rabi engleski izraz Least-Cost Planning (LCP, planiranje najnižih troškova).

Kao najutjecajniju stavku troškova energije, nužno je kontinuirano pratiti cijene energenata. Svako kvalitetno planiranje zahvata u energetske efikasnost podrazumijevat će uračunavanje realnih cijena korištenih i planiranih energenata, i s njima vezanog stupnja isplativosti zahvata.

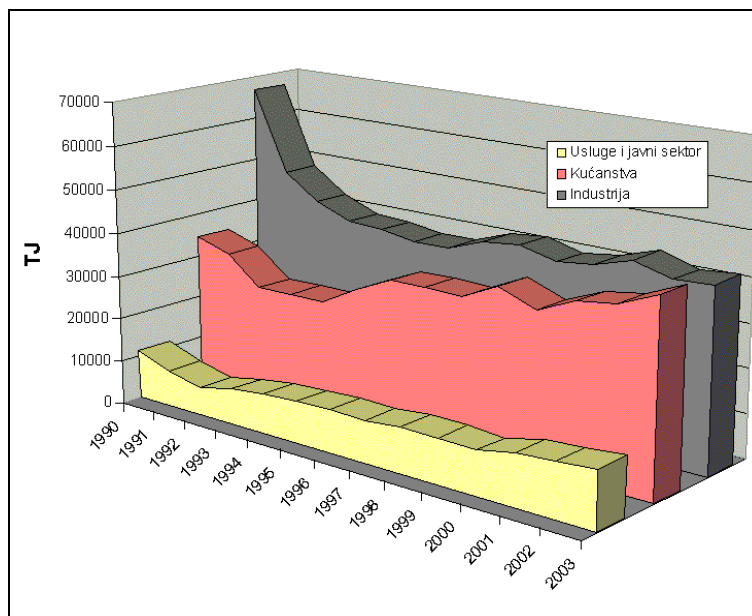
Kod ekonomsko-financijskih aspekata investicija u energetske efikasnost, treba voditi računa o pravilnom upravljanju investiranjem kapitala u financijske zahtjevnije zahvate. To podrazumijeva sljedeće aktivnosti:

- Sastavljanje investicijskog prijedloga, koje mora uzeti u obzir sve značajke zahvata.
- Procjena tijekova novca, što je jedan od najvažnijih zadataka pri planiranju potrebnog kapitala. Pouzdanost završnih rezultata planiranja ovisi o točnosti ove procjene. U okviru procjene potrebno je odrediti tehničko-ekonomski vijek projekta, tj. razdoblje u okviru kojeg investicijski projekt daje ekonomski prihvatljive učinke. Ova stavka obuhvaća procjenu novčanih izdataka, koji uključuju investicije, troškove pogona i održavanja te ostale izdatke koji se odnose na proizvodnju energije te sve izdatke koji se smanjuju ekonomske potencijale projekta i financijski ga opterećuju.
- Ocjena investicijskog projekta, koja obuhvaća:
 - tržišnu (financijsku) ocjenu projekta, koja uzima u obzir učinke projekta sravnjene na tržišne uvjete, koji tako utječu na ekonomski i financijski potencijal investitora; ekonomska ocjena projekta uključuje ocjenu rentabilnosti na razini projekta, a ocjena financijskog potencijala podrazumijeva ocjenu likvidnosti projekta;
 - ocjenu osjetljivosti projekta, koja uvjetuje razmatranje većeg broja varijanti za proračun rentabilnosti, a koje se međusobno razlikuju u značajkama kao što je iskorištenje kapaciteta, cijena energenta, visina investicije i drugo.

2 Energetika u hrvatskoj industriji

2.1 Pregled potrošnje energije kod velikih sektora

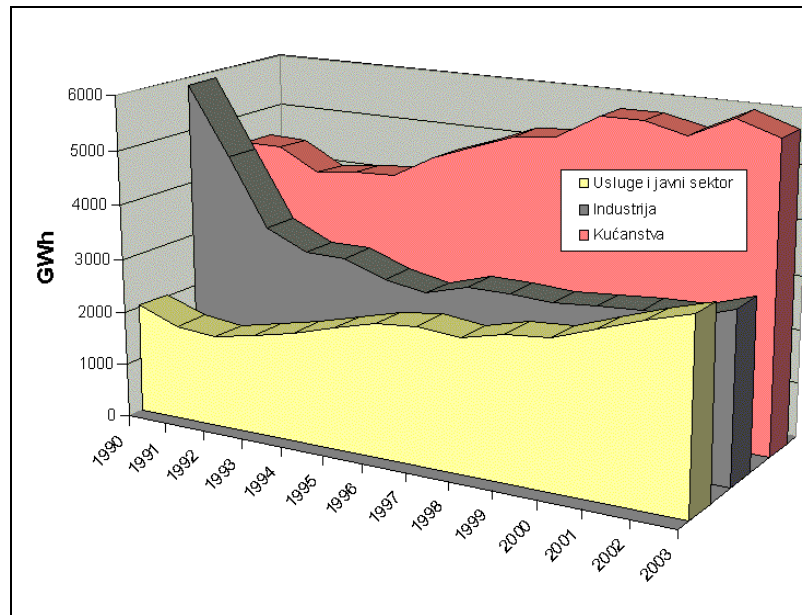
U nastavku je dan prikaz potrošnje energije kod velikih sektora potrošača u Hrvatskoj [5]. pored industrije, dan je i uvid u potrošnju kod sektora usluga i javnog sektora, koji su promatrani kao objedinjena grupacija, te kod kućanstava. Potrošnja toplinske energije izvedena je iz potrošnje najzastupljenijih energenata - tekućih goriva, prirodnog plina, pare i vrele vode te krutih goriva, koja podrazumijevaju ugljen i koks. Što se tiče potrošnje pare i vrele vode, tu nije uključena ona para i vrela voda koja se proizvodi u vlastitim postrojenjima potrošača korištenjem drugih navedenih energenata, već se dane količine odnose uglavnom na medije preuzete iz toplinskih mreža. Pregled potrošnje električne energije dan je radi usporedbe trendova potrošnje kod raznih grupa.



Slika 2.1: Potrošnja toplinske energije kod najvećih grupa potrošača u Hrvatskoj u periodu '90 - '03

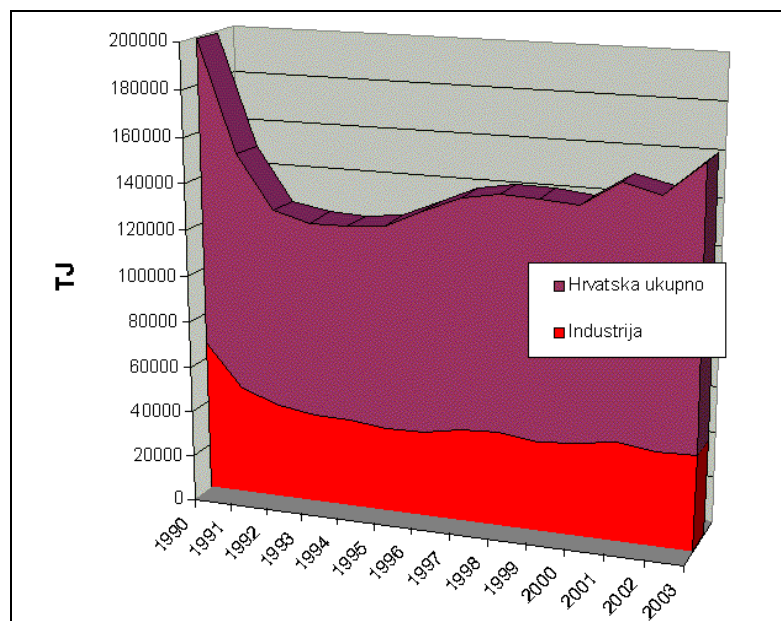
Slika 2.1 daje prikaz potrošnje energije u hrvatskoj u periodu 1990 - 2003 za tri najveće skupine potrošača, a slika 2.2 analogni prikaz za električnu energiju.

Kod svih skupina je uočljiv u većoj ili manjoj mjeri osjetan pad potrošnje energije u godinama nakon 1990., što je jasna posljedica utjecaja ratnih i tranzicijskih posljedica na gospodarstvo. Najstrmiji pad je ipak uočljiv kod industrije. Kod toplinske energije, potrošnja se s predratnih oko 7000 TJ/god u tri godine gotovo prepolovila, da bi se nakon 1997. ustalila na vrijednosti nešto iznad 4000 TJ/god.

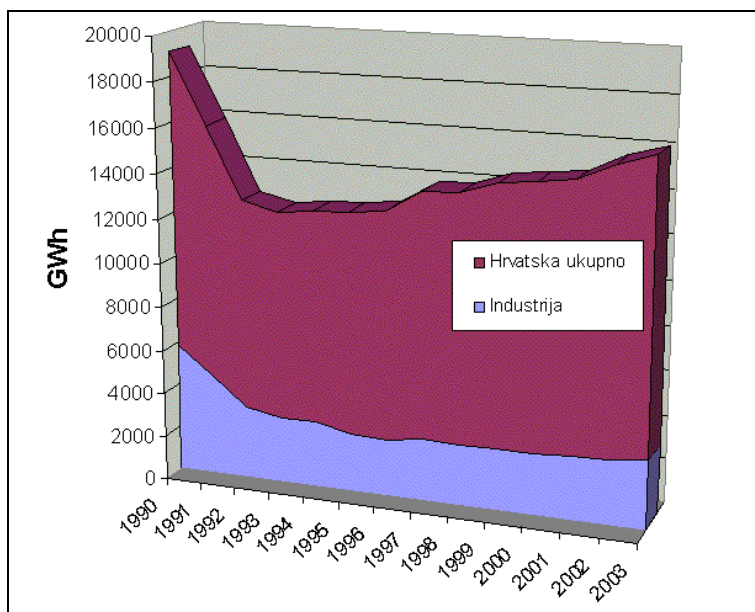


Slika 2.2: Potrošnja električne energije kod najvećih grupa potrošača u Hrvatskoj u periodu '90 - '03

Unatoč tome, industrija je imala najveći udio u potrošnji toplinske energije na nacionalnoj razini, do najnovije situacije gdje ju sektor kućanstava sa snažnim rastom potrošnje dostiže. Kod potrošnje električne energije, usporedbe radi, trendovi su slični, no još izraženiji. Potrošnja u industriji, koja je prije 1990. imala najveći udio na nacionalnoj razini, doživjela je strmi pad spustivši se 1996. gotovo na 40% predratnih razina. Nakon te godine dolazi do blagog rasta kojim je u najnovije vrijeme prijeđena polovica predratne potrošnje električne energije u industriji. Takav je pad još dramatičniji u usporedbi s drugim skupinama koje su ubrzo nakon 1990. doživjele nagli rast potrošnje. Usluge i javni sektor su dostigle i prestigle industriju u potrošnji električne energije, dok je potrošnja kod kućanstava i dvostruko veća.



Slika 2.3 : Udio industrije u potrošnji toplinske energije u Hrvatskoj u periodu '90 - '03



Slika 2.4: Udio industrije u potrošnji električne energije u Hrvatskoj u periodu '90 - '03

Slike 2.3 i 2.4 prikazuju udio industrije u ukupnoj nacionalnoj potrošnji energije, što po tendencijama odgovara gore navedenome. Uočljivo je da industrija uglavnom ne doprinosi razinama općenitog porasta potrošnje energije, no da kod topline zadržava bitan udio.

Tablica 2.1: Potrošnja topline u periodu '90 - '03 i udjeli sektora

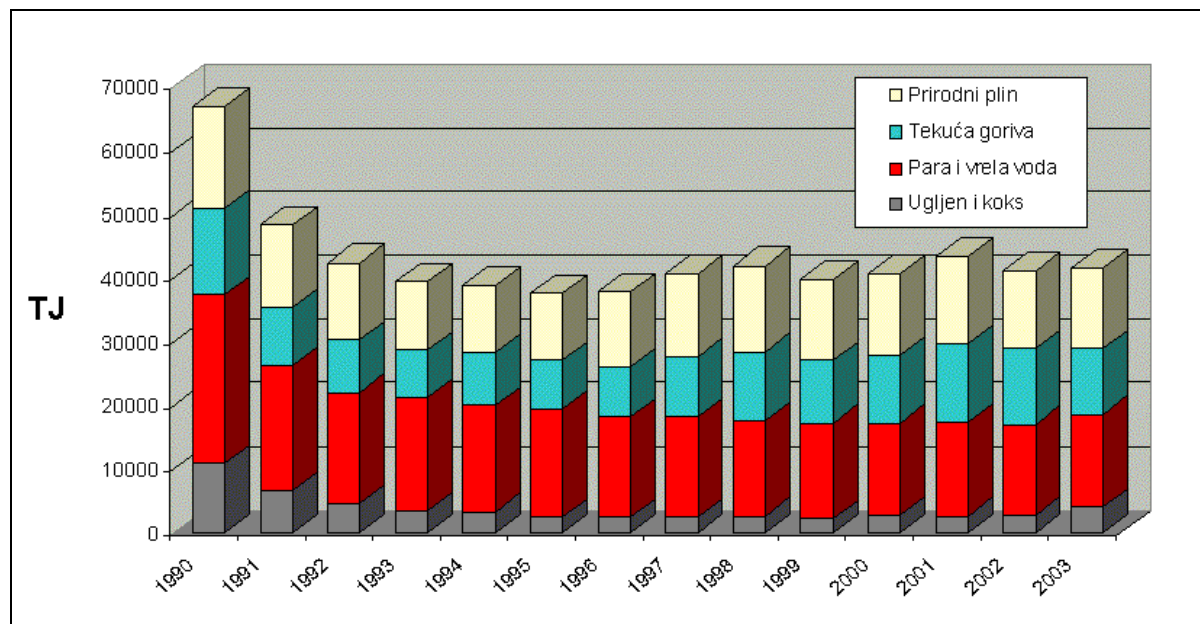
god.	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
RH uk. (TJ)	132184	102897	85571	85005	85425	88274	95331	99115	101403	102591	100108	107738	106307	120334
Industrija (TJ)	66914	48191	42307	39337	38875	37398	37675	40686	41835	39617	40603	43289	41000	41453
udio industrije	50,6%	46,8%	49,4%	46,3%	45,5%	42,4%	39,5%	41,0%	41,3%	38,6%	40,6%	40,2%	38,6%	34,4%
udio usl. i jav. s.	8,6%	8,2%	7,5%	9,7%	10,5%	10,9%	10,4%	9,8%	10,5%	10,0%	9,9%	11,0%	11,7%	10,9%
udio kućan.	26,1%	31,1%	29,9%	30,5%	30,4%	34,4%	35,9%	34,9%	33,6%	37,3%	35,1%	36,0%	37,5%	36,3%
ostalo	14,6%	13,9%	13,1%	13,5%	13,6%	12,3%	14,2%	14,2%	14,6%	14,1%	14,5%	12,9%	12,3%	18,4%

Tablica 2.1 daje uvid u udjele pojedinih skupina potrošača u ukupnoj potrošnji toplinske energije, koji potvrđuju prethodno navedene trendove. Industrija zajedno s kućanstvima čini dvije daleko najvažnije skupine u potrošnji topline. Pad udjela industrije posljednjih godina nije posljedica smanjenja potrošnje u ovoj skupini, već posljedica snažnog porasta potrošnje topline kod sektora kućanstava, čime ovaj sektor zauzima i veći udio.

Iz gore navedenih karakteristika može se zaključiti o položaju industrije kao zasebnog sektora potrošnje energije među ostalim skupinama i usporediti pokazatelje na nacionalnoj razini, a u nastavku će se promatrati industrija zasebno.

Slika 2.7 prikazuje potrošnju toplinske energije u industriji u promatranom periodu, promatrajući najzastupljenije energente, a to su prirodni plin, tekuća goriva, para i vrela voda, te ugljen i koks kao kruta goriva. Pritom nisu uzeta u obzir tekuća goriva koja se

unutar industrije koriste u transportu, dakle motorni benzin i dizelsko gorivo. Promatrana tekuća goriva podrazumijevaju ekstralako, lako i srednje loživo ulje te mazut, i ostala tekuća goriva koja su praktički prisutna samo u industriji građevnih materijala.



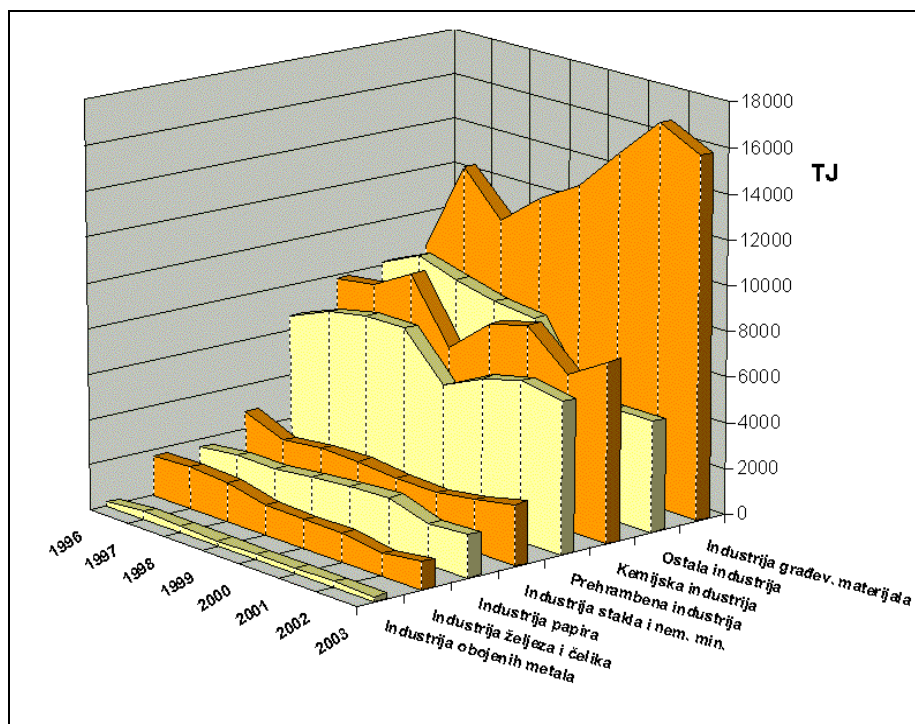
Slika 2.5: Potrošnja toplinske energije u industriji RH '90 -'03 prema energentima

Iz gornje slike je uočljivo da je udio pare i vrele vode kao energenata znatno opao nakon 1990. kao i udio ugljena i koksa, koji posljednjih godina bilježi blagi porast, ali ostaje najmanje zastupljen. Plin, para/vrela voda i tekuća goriva imaju približno jednaku zastupljenost u proizvodnji toplinske energije u industriji.

Kod promatranja pojedinih grana unutar industrije, prema statistikama je podjela izvršena po sljedećim grupama:

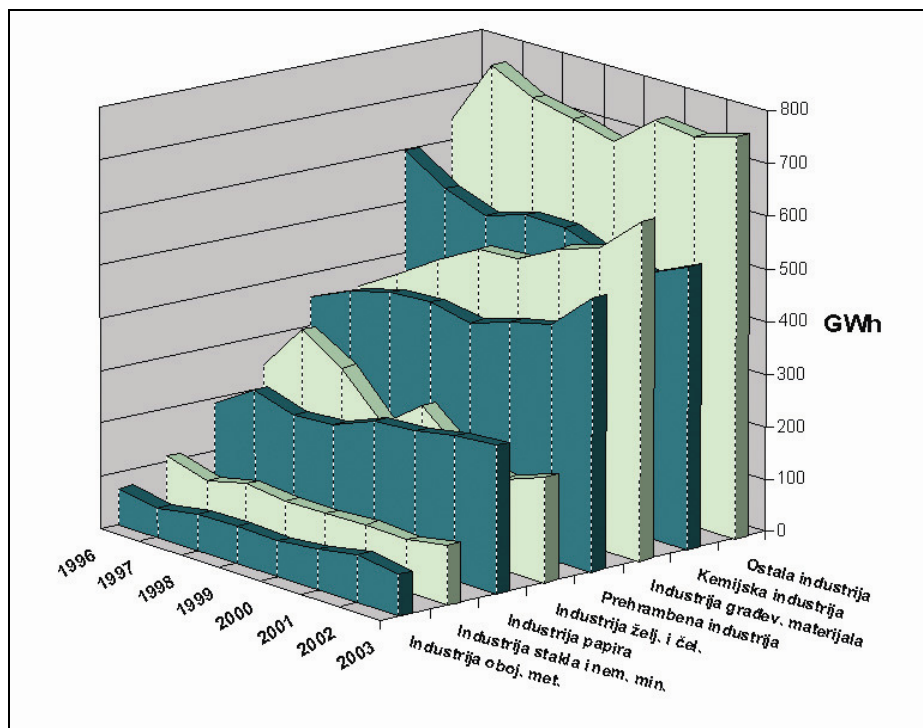
- industrija građevnog materijala;
- kemijska industrija;
- prehrambena industrija;
- industrija željeza i čelika;
- industrija obojenih metala;
- industrija stakla i nemetalnih minerala;
- industrija papira;
- ostala industrija.

Pregled potrošnje toplinske i električne energije prema tim grupama dan je na sljedećim slikama.



Slika 2.6: Potrošnja toplinske energije u u hrvatskoj industriji '90 -'03 prema granama

Apsolutno najveća potrošnja toplinske energije otpada na industriju građevnog materijala, koja jedina bilježi višegodišnji osjetni porast s prekidima. Ostale grane zadržavaju približno jednake razine uz varijacije, osim skupine ostalih industrija koje skupno bilježe stalni pad potrošnje.



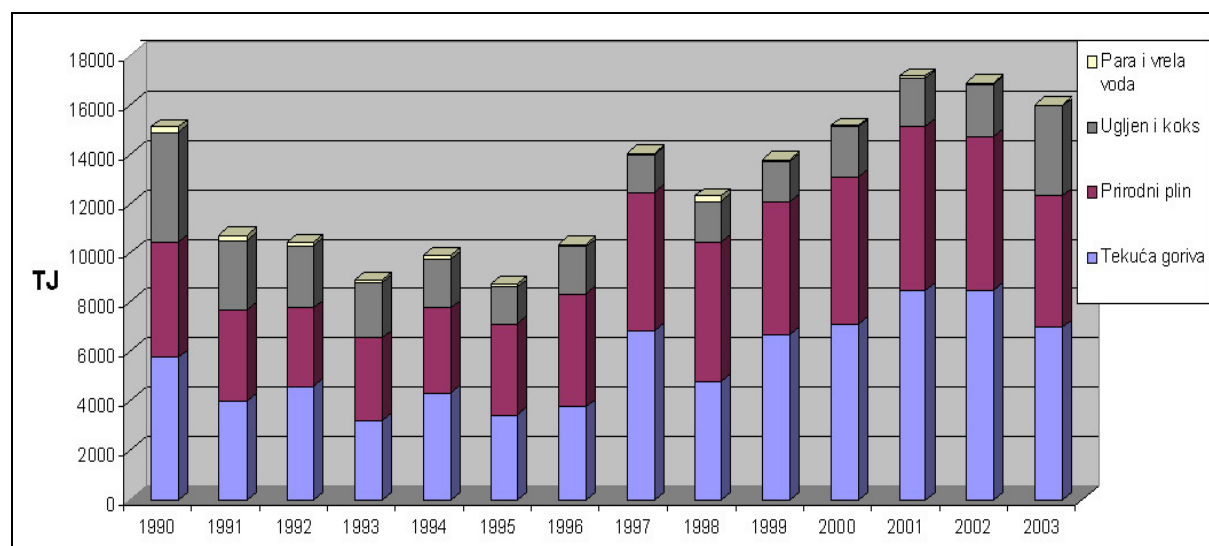
Slika 2.7: Potrošnja električne energije u u hrvatskoj industriji '90 -'03 prema granama

Kod potrošnje električne energije, skupina ostalih industrija je najveći zasebni potrošač, uz stabilizirani trend potrošnje. Skupina industrije građevnog materijala slijedi, uz kontinuirani porast koji je i ovdje kao i kod toplinske energije prisutan od 1996. godine.

Obzirom da se skupine kemijske industrije, industrije građevnog materijala te prehrambene industrije mogu prepoznati kao najveći potrošači toplinske energije, u nastavku će karakteristike korištenja energije kod ovih skupina biti pobliže analizirane.

2.1.1 Industrija građevnog materijala

Kod industrije građevnog materijala je nakon pada od 1990. nadalje primjetan znatan porast potrošnje i toplinske i električne energije nakon 1996. Toplinska energija dostiže i znatno premašuje predratnu potrošnju. Taj je porast povezan s proizvodnjom za građevinsku obnovu i investicijske projekte. Od svih u ovoj grupi, daleko najveći udio u potrošnji i toplinske i električne energije otpada na industriju cementa. Cementare u Hrvatskoj troše preko 60% toplinske i električne energije unutar te grupe. Sa stanovišta utjecaja na okoliš, to je i daleko najznačajniji izvor emisija CO₂ u cjelokupnoj industriji.



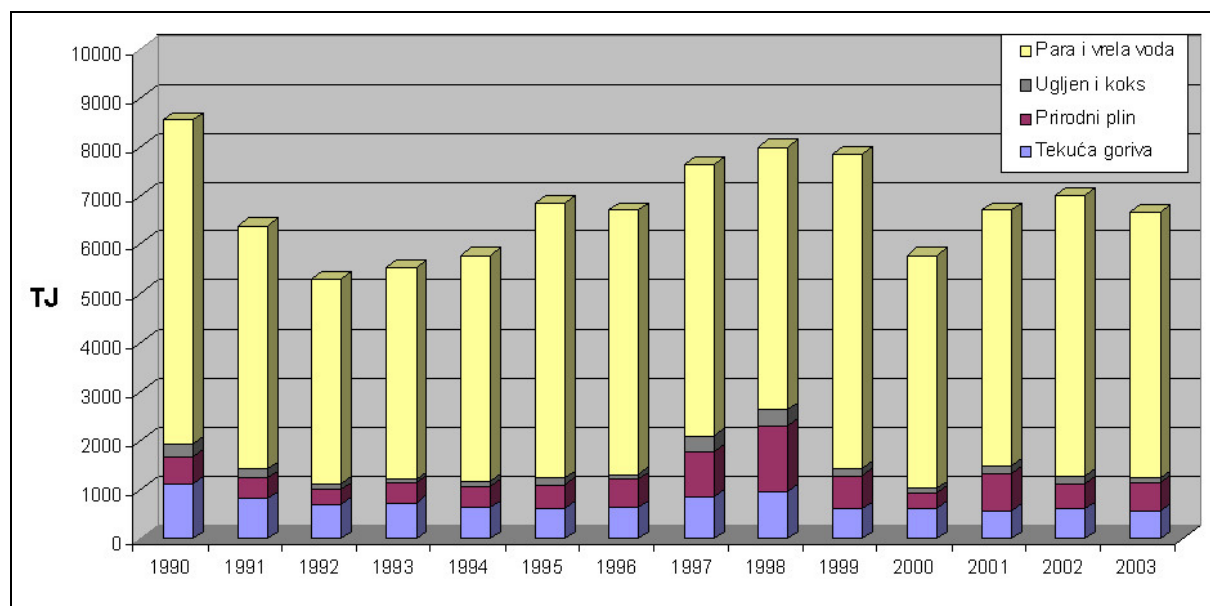
Slika 2.8: Potrošnja toplinske energije u industriji građevnog materijala '90 - '03

Para i vrela voda su tek neznatno zastupljeni među energentima. Tekuća goriva i prirodni plin su najprisutniji i otprilike podjednako zastupljeni. Kruta goriva - prvenstveno ugljen - bilježe znatan pad u odnosu na predratne udjele energenata, no posljednjih godina su u porastu. Razlog tome je prvenstveno prelazak cementara na veći udio ugljena, zbog ekonomskih prednosti tog goriva. Može se očekivati njegov daljnji porast na račun tekućih goriva i, najviše, prirodnog plina, ukoliko se to bude moglo uskladiti sa zahtjevima u pogledu emisija u okoliš. Daljnja zanimljiva mogućnost kod cementara je njihova spremnost da spaljuju komunalni otpad i tako ga energetske iskoristavaju, što bi, ukoliko se za to stvore uvjeti, moglo povećati udio krutog goriva u zastupljenosti energenata [6].

Što se tiče opće efikasnosti u korištenju energije, cementna industrija koja ima najveći udio dobrim dijelom modernizirana, pa je dostignuta efikasnost relativno dobra. U ostalim skupinama moguće je znatno poboljšati energetske efikasnost primjenom izvodljivih mjera iskorištavanja otpadne topline, zamjene goriva, poboljšanja agregata i tehnologije, i drugog.

2.1.2 Prehrambena industrija

U potrošnji toplinske energije, prehrambena industrija je nakon pada od 1990. nadalje relativno brzo ostvarila razinu potrošnje blisku prijeratnoj, ne računajući pad u 2000. Oscilacije u potrošnji dobrim su dijelom uzrokovane promjenama obujma potrošnje prirodnog plina. Sličan trend je prisutan i u potrošnji električne energije, koja je gotovo dosegla predratnu razinu. Kod topline je daleko najveći udio potrošnje pare i tople vode, do 83%. Proizvodnja šećera skupno predstavlja najveće potrošače topline u grupaciji, a daljnja najznačajnija grupacija je mesna industrija.



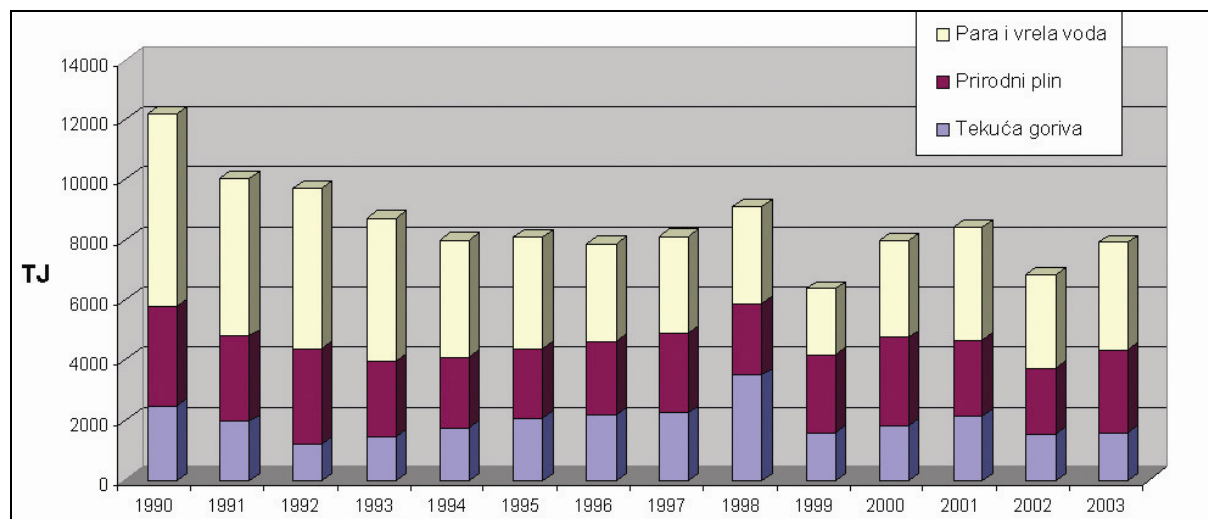
Slika 2.9: Potrošnja toplinske energije u prehrambenoj industriji '90 - '03

Ugljen i koks su kao energenti relativno neznatno zastupljeni, osim određenih varijacija u godinama najveće potrošnje topline u ovoj skupini. Kako je prehrambena industrija jedna od najdinamičnijih skupina unutar hrvatske industrije, utjecaj cijene i ekoloških karakteristika goriva na pokazatelje proizvodnje ovdje će pobuđivati relativno bržu reakciju, što će utjecati i na udjele odabranih energenata.

Razina energetske efikasnosti kod ove industrije je varijabilna, uz velike razlike između uspješnijih i moderniziranih tvrtki prema onima sa slabijim poslovanjem. Za povećanje efikasnosti korištenja toplinske energije najveći potencijali kod prehrambene industrije leže u je racionalizaciji procesa, iskorištenju otpadne topline, punom regeneriranju kondenzata i tehnološke vode, poboljšanju procesa, agregata i trošila, i drugom.

2.1.3 Kemijska industrija

Kod kemijske industrije, potrošnja toplinske energije je otprilike četiri puta veća od potrošnje električne, ako ih svedemo na iste jedinice. Znatna je udio pare i vrela vode, koji međutim opada nakon 1990. i približava se plinovitim i tekućim gorivima.



Slika 2.10: Potrošnja toplinske energije u kemijskoj industriji '90 - '03

Opća razina energetske efikasnosti kod kemijske industrije uglavnom nije visoka. Prisutni su znatni gubici a potencijali poboljšanja leže uglavnom u racionalizaciji procesa, iskorištavanju otpadne topline - što je u ovoj skupini izraženo, zatim u poboljšanju i obnovi toplinskih agregata, i drugim mjerama.

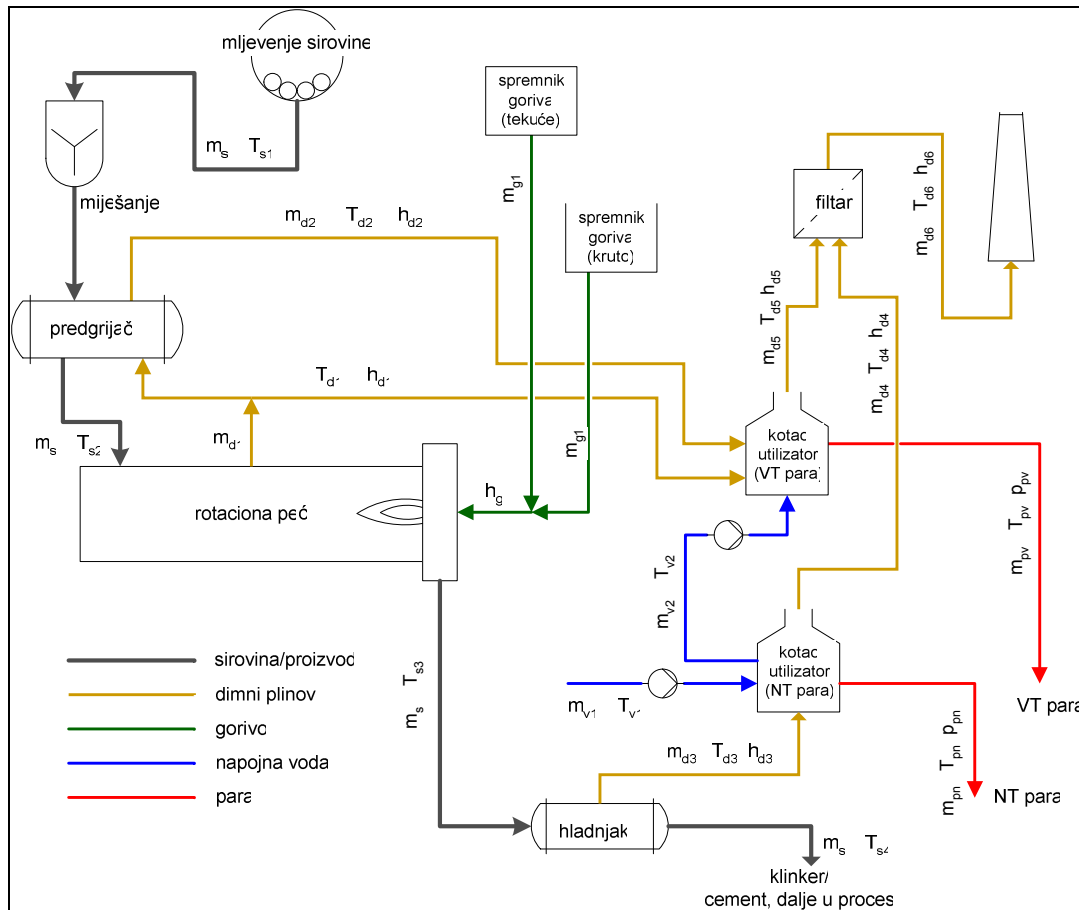
Kako na gore izdvojene tri skupine zajedno otpada 70% do 75% ukupne potrošnje toplinske energije u industriji, korisno je razmotriti njihove karakteristične procese. U nastavku je dan prikaz nekih toplinskih procesa s primijenjenim mjerama povećanja racionalnog korištenja energije za svaku od tih industrijskih skupina.

2.2 Prikaz tipičnih toplinskih procesa

2.2.1 Industrija građevnog materijala - rekuperacija topline kod cementare

Slika 2.13 prikazuje je proces proizvodnje cementa uz primijenjena napredna rješenja iskorištavanja otpadne topline [7].

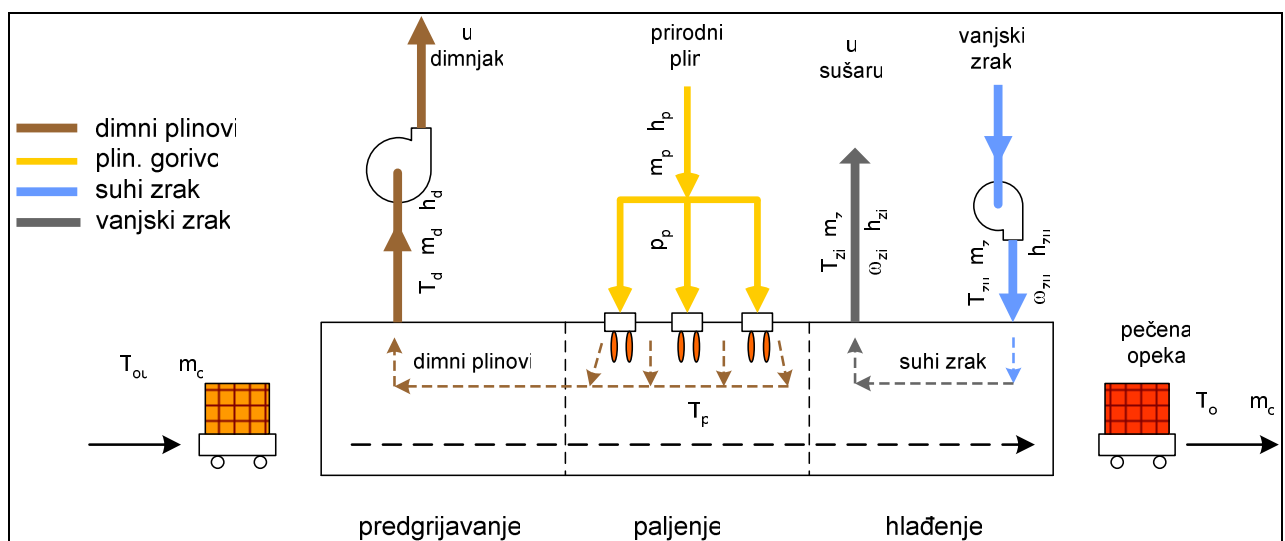
Sirovinski sastojci (vapnenac, ilovača, silikati itd.) se melju i miješaju u odgovarajuću smjesu koja u daljnji proces odlazi kao suspenzija s vodom. Ta se suspenzija grije u predgrijaču kako bi u odgovarajućem stanju dospjela u rotacionu peć, u kojoj se grijanjem dobiva klinker koji dalje odlazi na hlađenje u hladnjaku, potom na miješanje, mljevenje i druge postupke do dobivanja cementa kao finalnog proizvoda. U prikazanoj se konfiguraciji toplina dimnih plinova koristi u predgrijaču suspenzije i u kotlu utilizatoru. Entalpija dimnih plinova nakon izlaska iz predgrijača dovoljno je visoka za daljnje iskorištavanje u utilizatoru, iz kojeg se dobiva visokotlačna para. Pri hlađenju nakon rotacione peći, entalpija plinova koji se oslobađaju u hladnjaku je dostatna za proizvodnju niskotlačne pare u drugom kotlu utilizatoru. Također, u njemu se predgrijava i napojna voda za VT utilizator. Toplina predana predgrijaču suspenzije iznosi oko 20% topline unesene u proces gorivom, dok udio koji se odvodi u hladnjaku iza peći iznosi oko 14%. Uz tolike količine topline, dogradnja postrojenja kotlovima utilizatorima ima puni smisao. Dobivena para ima dovoljno visoke parametre za proizvodnju električne energije u parnoturbinskom agregatu, ili za korištenje u drugim procesima.



Slika 2.11: Proces proizvodnje cementa uz iskorišćenje otpadne topline

2.2.2 Industrija građevnog materijala - pečenje opeke

Slika 2.14 prikazuje proizvodnju opeke u tunelskoj peći, prolaskom kroz koju se opeka potpuno ispeče.



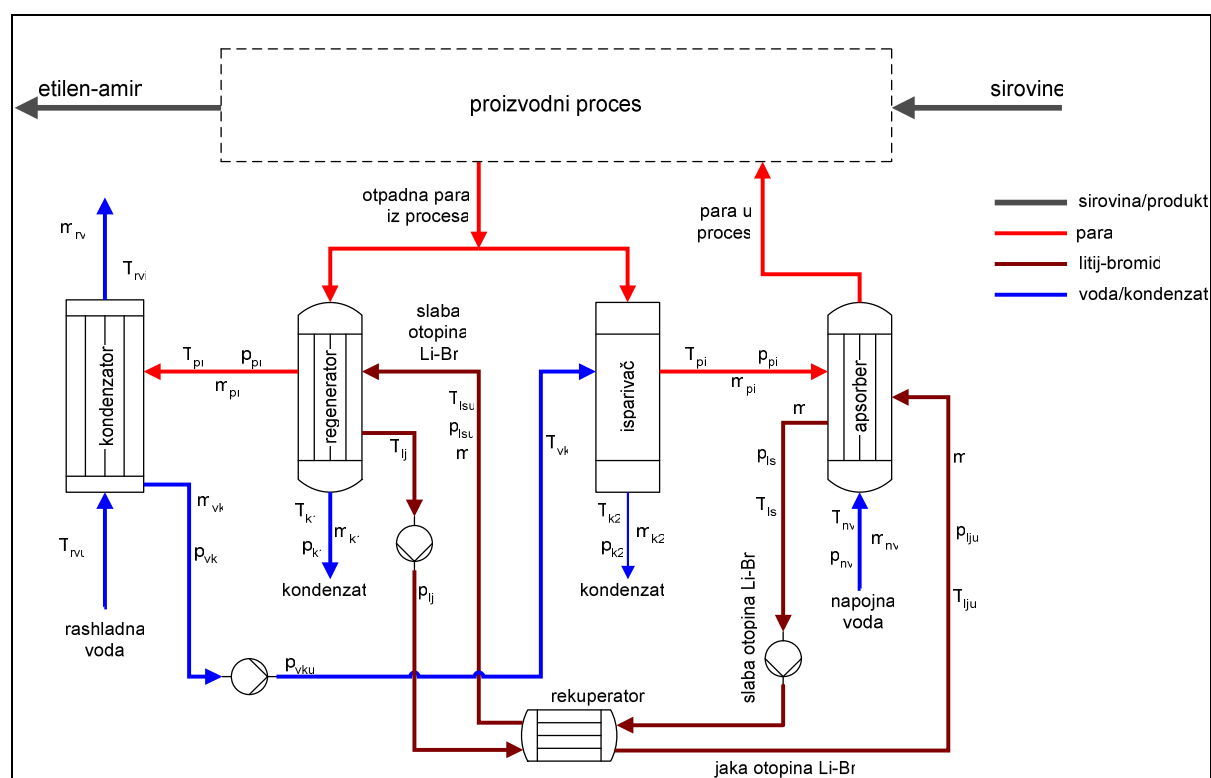
Slika 2.12: Proces pečenja opeke s djelomičnom rekuperacijom i poboljšanjima

Prostor tunelske peći je prema funkciji podijeljen na tri dijela - na dio za predgrijavanje, dio za paljenje opeke, i dio za hlađenje. Korišteno gorivo je prirodni plin. Poboljšanje efikasnosti

procesa nastoji se postići mjerama poput iskorištenja topline zraka na ispuhu dijela za hlađenje u sušenju sirove opeke. No glavna poboljšanja su rezultat odgovarajuće izvedbe kolica s tovarom opeke, kod kojih se nastoji postići takva geometrija da je brtvljenje na ulazu i izlazu što bolje i prolaz zraka što manji, te se koriste materijali male toplinske vodljivosti i malog toplinskog kapaciteta.

2.2.3 Kemijska industrija - rekuperacija topline kod proizvodnje etilen-amina

Proces proizvodnje etilen-amina u određenim uvjetima zahtjeva paru nižih parametara (pri 145°C). U dijelu procesa dio topline se ispušta u atmosferu preko otparka, ili zračnim hlađenjem kondenzata preko izmjenjivača čija snaga može biti i nekoliko desetaka MW. Mjera smanjenja tog gubitka prikazana na donjoj slici uvodi "toplinski transformator", u osnovi apsorpcijsku toplinsku pumpu, koji može rekuperirati oko 50% navedene otpadne topline [8].

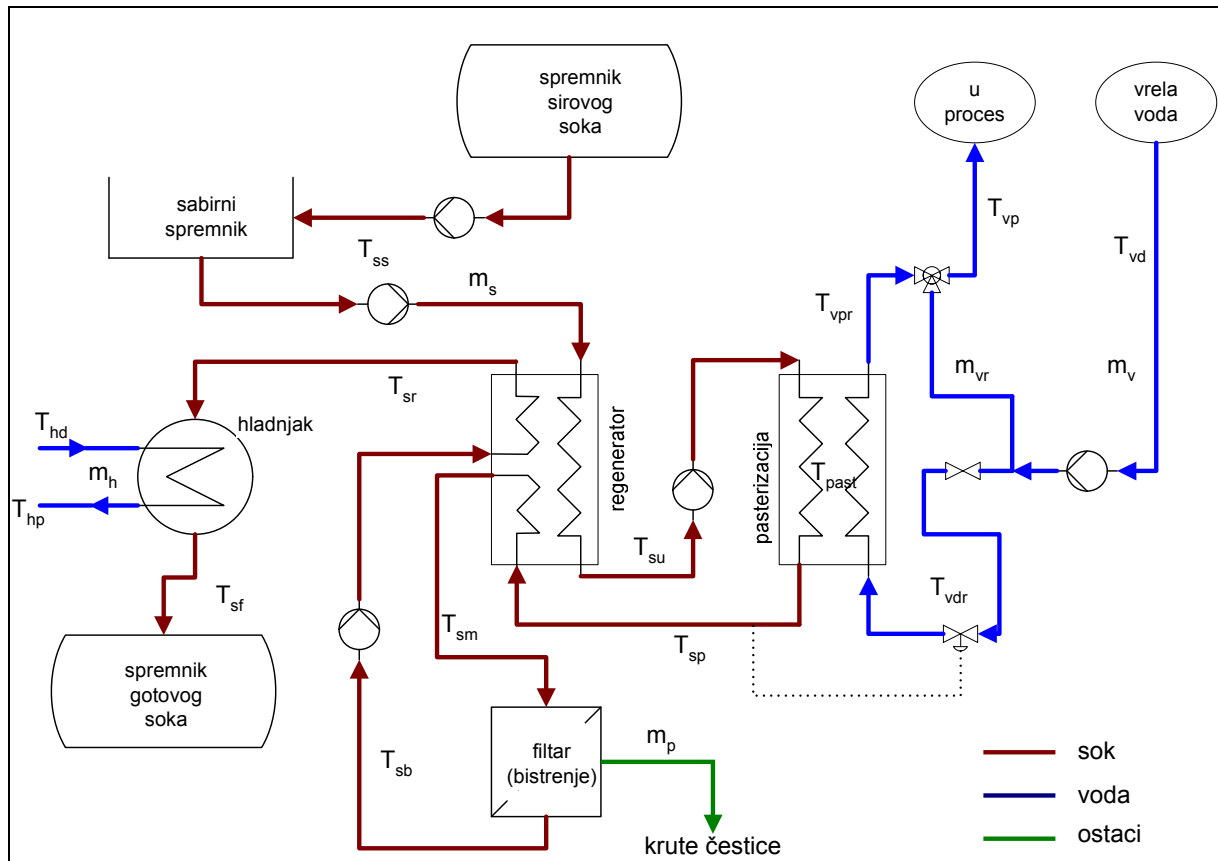


Slika 2.13: Rekuperacija topline kod proizvodnje etilen-amina

Kao medij u toplinskom transformatoru koristi se otopina soli - litijeva bromida. Otpadna para iz procesa, temperature oko 100°C, koristi se za isparavanje vode u isparivaču i isparavanje vode iz slabe otopine Li-Br u regeneratore. Ta se voda kondenzira u kondenzatoru te se nakon navedenog isparivanja apsorbira u jakoj otopini Li-Br u apsorberu, oslobađajući latentnu toplinu pri temperaturi dostatnoj za isparavanje napojne vode i dobivanje pare tlaka do 5 bara, koja se može koristiti natrag u procesu - što predstavlja korisnu rekuperiranu toplinu. Putem isparivača se tako rekuperira oko 50% otpadne topline iz procesa. Dodatni izmjenjivač - rekuperator - je uveden za interni transfer topline sa slabe na jaku Li-Br otopinu.

2.2.4 Prehrambena industrija - pasterizacija soka

Kod proizvodnje jabučnog soka, sirovi sok se zagrijava u pasterizatoru kako bi se smanjila mogućnost fermentacije i homogenizirao finalni proizvod.

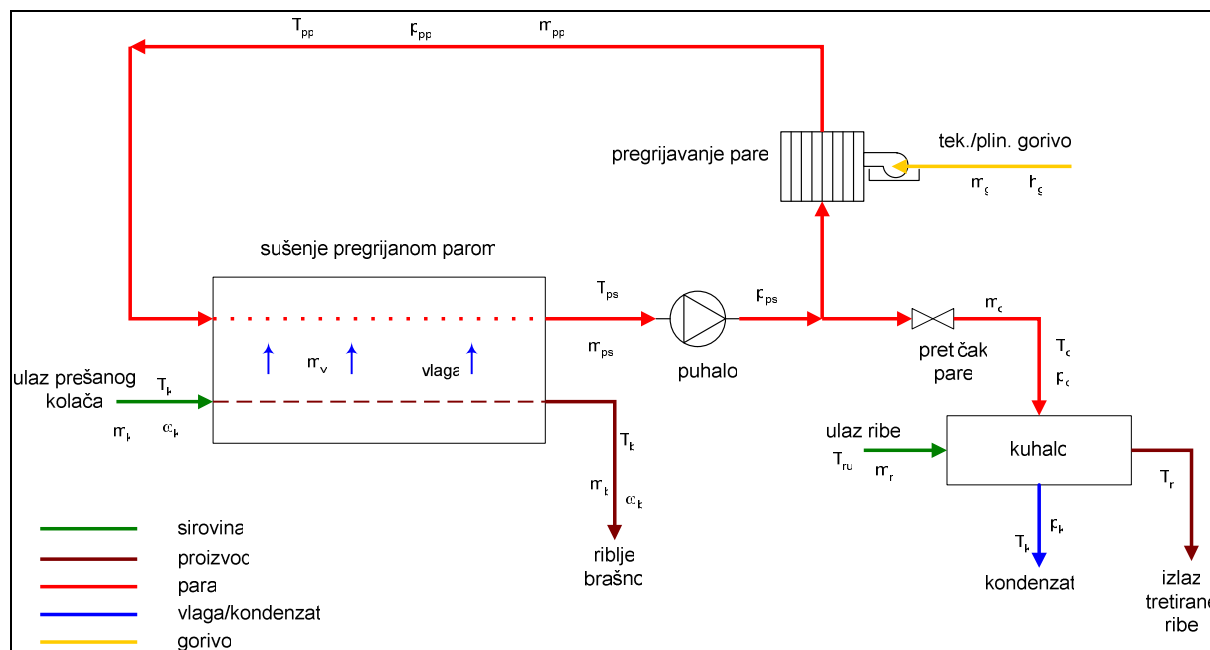


Slika 2.14: Toplinski procesi kod proizvodnje jabučnog soka

U ovakvim postrojenjima je bitan odabir toplinskog agregata, a često se u pasterizatoru izvodi električni grijač. U primjeru na slici se potrebna toplina u pasterizatoru dobiva iz vrele vode koja dovodi otpadnu toplinu iz ostatka proizvodnog procesa. Potrebna temperatura pasterizacije održava se konstantnom miješanjem struja vrele vode putem troputog ventila, i upravljanjem protoka vode regulacionim ventilom koji je reguliran prema temperaturi soka na izlazu iz pasterizatora. U regeneratoru se rekuperira dio topline iz te struje soka predgrijavanjem ulazne struje soka.

2.2.5 Prehrambena industrija - proces sušenja kod proizvodnje ribljeg brašna

U procesu prerade ribe prikazanom na slici 2.17 vrši se sušenje prešanog ribljeg kolača u svrhu dobivanja brašna, i kuhanje ribe na drugom mjestu u procesu [9]. Za sušenje se koristi pregrijana para kvalitete koja omogućuje njenu daljnju uporabu pri kuhanju. Ovime se supstituira češće prisutno sušenje vrućim zrakom.



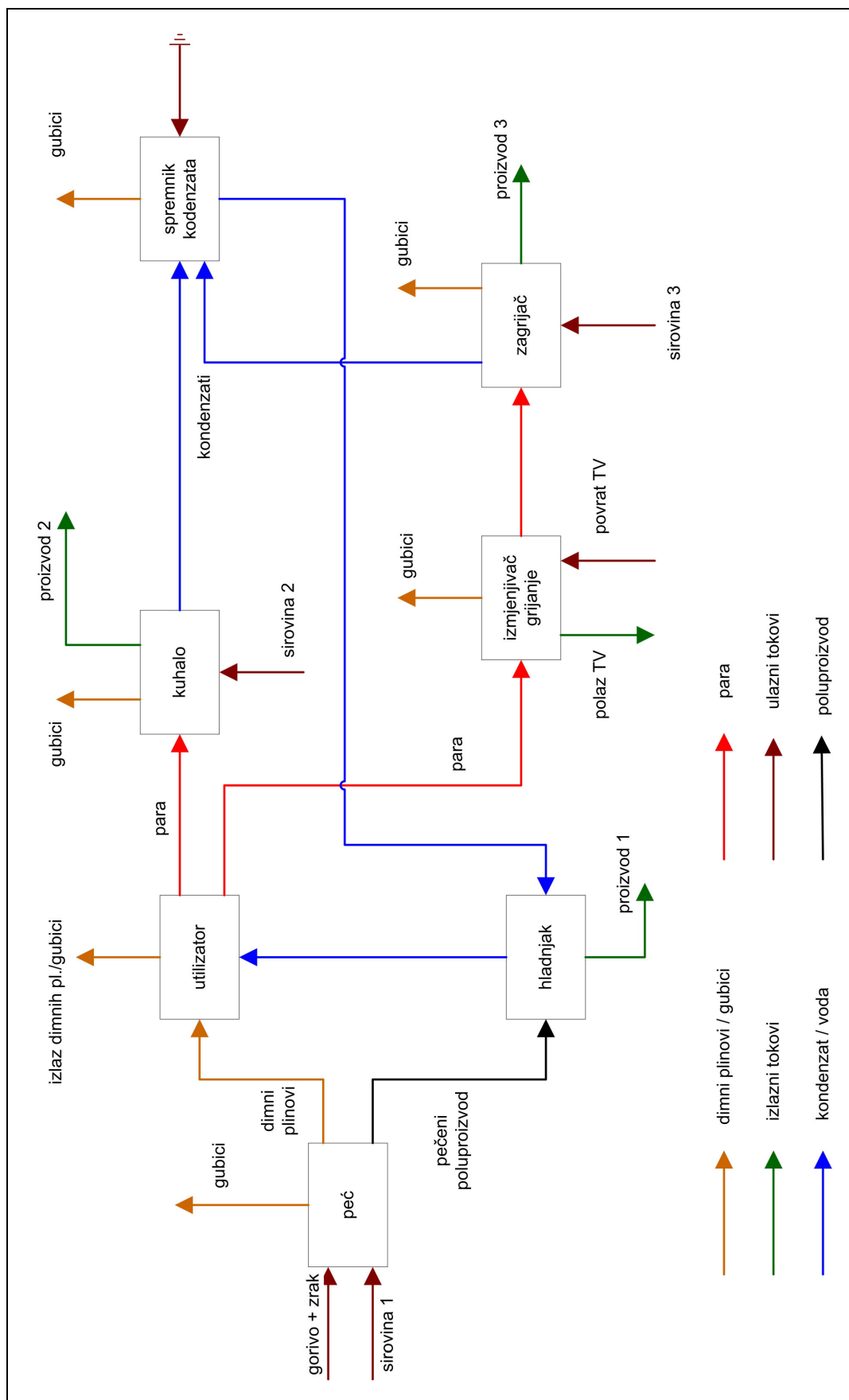
Slika 2.15: Procesi sušenja i kuhanja kod prerade ribe

Specifičnost prikazanog procesa jest u korištenju vlage oduzete prešanom kolaču kao nadoknadne vode. Pri sušenju, pregrijana para apsorbira najveći dio vlage iz prešanog kolača istovremeno ga termički obrađujući. Tako isparena vlaga miješajući se s ulaznom parom nešto snizuje njene parametre te je potrebno dogrijavanje u toplinskom agregatu. Kako je količina pare nakon sušenja veća nego na ulazu, višak se odvodi iz kruga sušenja, uz temperaturu T_d od 110-130°C koja je pogodna za termičku obradu svježje ribe. Kondenzat na izlazu iz kuhala se dalje u proizvodnom procesu može koristiti za odmašćivanje, pranje i drugo. Iskorištenost medija je velika, što omogućuje značajno reduciranje toplinskih gubitaka.

2.3 Modeliranje tipičnog industrijskog procesa

U prethodnim poglavljima dani su opis i karakteristike toplinskih procesa koji su pretpostavljeni predstavnici nekih od najzastupljenijih procesa u hrvatskoj industriji. To je izloženo u svrhu postavljanja određenih osnova za izradu modelskog procesa koji bi bio reprezentativan za barem veći dio situacija kakve se susreću u industriji. U daljnjem koraku moguće je krenuti u smjeru postavljanja više manjih i jednostavnijih modela od kojih svaki prikazuje po jedan tipičan toplinski proces, ili postaviti model koji objedinjuje više njih. Ovdje će se koristiti potonji princip, i pokušat će se postaviti sveobuhvatniji, premda dosta pojednostavljeni, model koji nastoji obuhvatiti tipične toplinske procesne elemente koji se javljaju u prethodno pokazanim primjerima. Svrha toga je model koji barem donekle obuhvaća elemente realno prisutne u suvremenim tipičnim industrijama kod nas, a koji može poslužiti za provjeru teoretskih razmatranja opis kojih je dan u narednim poglavljima, te tako omogućiti analizu primjenjivosti tih razmatranja i ustanovljenih metoda u našim uvjetima.

Odabrani model prikazan je na slici 2.16:



Slika 2.16: Zamišljeni model s toplinskim procesima

Pretpostavljeni model obuhvaća sljedeće elemente, bez obzira da li se takav sklop može naći u realnoj situaciji:

- peć koja vrši pečenje određene sirovine, njeni ulazni tokovi su smjesa zraka i goriva, a izlazni tokovi su pečeni poluproizvod i dimni plinovi;
- hladnjak, iz kojega izlazi pečeni proizvod, a u njega ulazi napojna voda koja se predgrijava,
- izmjenjivač, tj. kotao utilizator, u kojem se toplina dimnih plinova koristi za generiranje pare,
- izmjenjivač za grijanje, u kojem se toplina dijela proizvedene pare koristi za proizvodnju tople vode za određeni ciklus grijanja,
- zagrijač, koji koristi osjetnu toplinu kondenzata za proces zagrijavanja određenog proizvoda (npr. pasterizacija);
- kuhalo, u kojem se korištenjem drugog dijela pare kuha neki daljnji poluproizvod;
- spremnik kondenzata, iz kojega izlazi otparak te se gubi dio kondenzata, koji se pothlađuje miješanjem s hladnom nadoknadnom vodom, te se dobiva napojna voda koja odlazi na predgrijavanje u hladnjak pečenog proizvoda.

Taj će zamišljeni proces biti korišten za pokusnu primjenu metodologija čiji opis je dan u poglavlju 3.

3 Teorijski temelji za metodologiju

3.1 Eksergetska analiza

3.1.1 Osnovne značajke

Za opisivanje metoda u ovom radu, potrebno je osvrnuti se na temeljne definicije eksergije i s njom povezanih ključnih kategorija.

Razvoj učinkovitog korištenja energetskeg resursa kod toplinskih sustava je neminovno povezan s određenjima prvog i drugog zakona termodinamike. Energija koja ulazi u toplinski sustav putem goriva, električne energije, tokova tvari i drugoga, uzeta je u obzir kod određivanja vrijednosti proizvoda i nusproizvoda tog sustava [10]. Energiju se ne može uništiti, prema konceptu prvog zakona termodinamike, a ta predodžba neuništivosti određene kategorije je korisna pri razvoju i analizi. No, to se u suštini ne primjenjuje na energiju, već na eksergiju, kao mjeru raspoloživosti energije - što je koncept drugog zakona. Štoviše, eksergija, a ne energija, je u zapravo mjera kvalitete - na primjer, 1 kJ električne energije proizvedene u elektrani se vrednuje potpuno drugačije od 1 kJ energije odvedene rashladnim sustavom te elektrane. Električna energija očito ima veću kvalitetu, te time i veću ekonomsku vrijednost. Metoda *eksergetske analize* (koja se može smatrati i *analizom raspoloživosti*) je prikladan alat za postizanje učinkovitijeg korištenja energetskeg resursa, obzirom da omogućuje određivanje lokacije, uzroka, i realne veličine nastalih gubitaka, kao i nastalih ostataka u nekom procesu [11].

Mogućnost obavljanja korisnog rada nastaje kada se dva sustava različitih stanja dovedu u međudjelovanje, tako da međusobno nastoje doći u ravnotežu. Ako za jedan sustav pretpostavimo da predstavlja okolinu, a drugi je neki sustav od interesa, *eksergijom* se tada može nazvati najveći teoretski korisni rad koji je postiziv dok sustavi ne dođu u ravnotežu, pretpostavljajući da se toplina izmjenjuje samo s okolinom. Alternativno, eksergijom se može smatrati i najmanji teoretski korisni rad koji je potrebno utrošiti da bi se formirala količina neke tvari iz supstanci prisutnih u okolini te da bi se ta tvar dovela u određeno stanje. Eksergija je dakle mjera *odstupanja* stanja nekog sustava od stanja okoliša. Ona je time i atribut sustava i okoliša.

Eksergiju je moguće uništiti, ali ju nije moguće očuvati (konzervirati). U graničnom slučaju eksergija biva potpuno uništena, do čega dolazi kada neki sustav spontano dođe u ravnotežu s okolinom bez obavljanja korisnog rada. Tada inicijalna sposobnost sustava da obavi rad biva potrošena u spontanom procesu. A kako nije bio potreban nikakav rad da dođe do te spontane promjene, može se zaključiti da je u tom slučaju vrijednost eksergije (kao maksimalnog teoretski ostvarivog rada) najmanje nula, te ne može biti negativna. Njeno daljnje bitno svojstvo je da se može prenositi između sustava.

Ukupna eksergija nekog sustava se može podijeliti na fizikalnu, kinetičku, potencijalnu i kemijsku eksergiju. Suma kinetičke, potencijalne i fizikalne eksergije se ponekad naziva i termomehaničkom eksergijom.

3.1.2 Fizikalna i kemijska eksergija

Fizikalna eksergija E^{PH} nekog zatvorenog sustava pri specifičnom stanju je dana izrazom

$$E^{PH} = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (3.1)$$

gdje je U unutarnja energija, V volumen a S entropija sustava kod specifičnog stanja, dok su U_0 , V_0 i S_0 su vrijednosti tih veličina u stanju ravnoteže s okolinom, s T_0 kao temperaturom okoline [12].

Analogno, fizikalna eksergija se može izraziti i na bazi jedinice mase, tj. molarnoj bazi:

$$e^{ph} = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

gdje se u , p , v i s odnose na iznose odgovarajućih veličina po kilomolu tvari, ili nekoj jedinici mase.

Za maseni tok određenog kemijskog sastava od n komponenata definiranoga vektorom x , kemijski potencijal u ravnotežnom stanju μ_{00} se može prikazati izrazom

$$\mu_{00} = \sum_{i=1}^n x_i \mu_{i,00}$$

gdje je x_i i-ta kemijska komponenta toka, a $\mu_{i,00}$ kemijski potencijal te komponente u ravnotežnom stanju s okolinom. Tada se eksergija toka može prikazati kao

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \sum x_i (\mu_{i,0} - \mu_{i,00}) \quad (3.2)$$

gdje su h entalpije, s entropije, indeks 0 označava stanje okoline, a indeks 00 stanje ravnoteže toka sa stanjem okoline.

3.1.3 Bilanca eksergije

Bilanca eksergije može biti prikazana u alternativnim oblicima prikladnima za specifične primjene od praktičnog interesa. Ti su oblici uglavnom za zatvoreni sustav, i za kontrolni volumen. U praksi se počinje s prikazom bilance eksergije za zatvoreni sustav, koja se potom koristi za proširenje koncepta bilance eksergije na kontrolne volumene, što može biti korišteno u praktičnoj primjeni.

Bilanca eksergije za zatvoreni sustav je razvijena kombiniranjem bilanci energije i entropije, koje se mogu prikazati izrazima

$$(U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) = \int_1^2 \partial Q - W$$

i

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_b + S_{gen}$$

gdje W i Q označavaju prijenose rada i topline između promatranog sustava i njegove okoline, T_b označava temperaturu u graničnom području u kojem se odvija prijenos topline, a izraz S_{gen} se odnosi na nastanak entropije uslijed unutarnjih nepovratnosti.

Sređivanjem tih jednadžbi i međusobnim uvrštavanjem dobije se izraz:

$$(E_2 - E_1) = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_{gen} \quad (3.3)$$

U gornjem izrazu član na lijevoj strani jednadžbe predstavlja promjenu eksergije, i može biti procjenjivan bez obzira na prirodu promatranog procesa, dok je desna strana jednadžbe eksplicitno ovisna o procesu. Prvi i drugi član na desnoj strani zajedno predstavljaju prijenos eksergije, pri čemu se prvi član odnosi na prijenos topline ka ili od sustava, a drugi na neto korisni rad. Treći član, $T_0 S_{gen}$, odnosi se na destrukciju eksergije zbog nepovratnosti u sustavu.

Konačno, konvencionalni oblik bilance eksergije za zatvorene sustave je dan jednadžbom omjera

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt}\right) - \dot{E}_D$$

Ovdje je dE/dt promjena eksergije po vremenu. Prvi član s desne strane predstavlja prijenos eksergije povezan s prijenosom topline po vremenu \dot{Q}_j koji se odvija u graničnom području gdje je trenutna temperatura T_j . Drugi član predstavlja prijenos eksergije povezan s prijenosom rada po vremenu \dot{W} , gdje je dV/dt promjena volumena sustava po vremenu. Zadnji član, \dot{E}_D , je destrukcija eksergije po vremenu.

Na temelju gornjega se mogu izvesti oblici bilance eksergije primjenjivi za kontrolne volumene. Poput mase, energije i entropije, i eksergija je ekstenzivna veličina, te se također može prenositi u ili izvan nekog kontrolnog volumena u koji ulaze i izlaze tokovi tvari [13]. U skladu s time, izraz za bilancu eksergije analogan gornjoj jednadžbi omjera koji je upotrebljiv za kontrolne volumene traži uvrštenje nekih dodatnih članova:

$$\frac{dE_{KV}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{KV} - p_0 \frac{dV_{KV}}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D \quad (3.4)$$

Član s lijeve strane je opet promjena eksergije u kontrolnom volumenu po vremenu, a članovi s desne strane se odnose na prijenose eksergije i destrukciju eksergije po vremenu, s time da je dV_{KV}/dt sada promjena samog kontrolnog volumena po vremenu, a $\dot{m}_i e_i$ je promjena po vremenu eksergije koja ulazi, i $\dot{m}_e e_e$ koja izlazi iz kontrolnog volumena. Destrukcija eksergije analogno proizlazi iz ireverzibilnosti unutar kontrolnog volumena. Kako inženjerske analize najčešće nastoje promatrati kontrolne volumene u stacionarnom stanju, kada su članovi dE_{KV}/dt i dV_{KV}/dt jednaki nuli, oni se mogu izostaviti iz oblika bilance eksergije za kontrolne volumene u stacionarnom stanju.

3.1.4 Destrukcija, gubitak i eksergetska efikasnost

Pri termodinamičkoj analizi je vrlo bitno definiranje kontrolnog volumena, odnosno promatranog sustava, obzirom da odabir granice promatranog područja određuje da li se posljedice prijenosa topline pripisuju energetskej destrukciji ili gubitku eksergije. Upravo uslijed destrukcije i gubitka iznos eksergije na izlazu biva manji od iznosa na ulazu. Odnos tih količina eksergije je dan bilancom koja se u stacionarnom stanju može prikazati kao

$$\dot{E}_i = \dot{E}_e + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (3.5)$$

gdje su \dot{E}_D i \dot{E}_L iznosi destrukcije i gubitka eksergije. Uobičajeno, pri prijenosu tvari se destrukcija eksergije uglavnom pripisuje prijenosu topline i trenju. Pritom je njen iznos ovisan o razlici temperatura, strujanju, geometriji sustava, svojstvima tvari i površina itd. Sama veličina eksergetske destrukcije i gubitka predočava termodinamičku mjeru neefikasnosti sustava. Uz tu mjeru su vezani iznosi destrukcije eksergije y_D i y^*_D te y_L .

Iznos destrukcije eksergije u nekoj komponenti sustava može se usporediti s eksergijom goriva, tj. ulaznog resursa koji se dovodi cjelokupnom sustavu, $\dot{E}_{F,tot}$, i iznos destrukcije eksergije se može prikazati kao

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{F,tot}}. \text{ Alternativno, destrukcija eksergije kod te komponente se može usporediti s}$$

ukupnom destrukcijom eksergije cijelog sustava $\dot{E}_{D,tot}$ te se može izraziti omjer $y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D,tot}}$.

Oba izraza su korisna za usporedbe raznih komponenata unutar jednog sustava. Iznos gubitka eksergije je definiran analogno, usporedbom gubitka eksergije s eksergijom goriva:

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{F,tot}}.$$

Da bi se definirala eksergetska efikasnost, neophodno je prepoznati i *produkt* i *resurs* termodinamičkog sustava koji se promatra. Produkt predstavlja željeni rezultat djelovanja sustava, te njegovo određivanje mora biti konzistentno sa svrhom nabave i korištenja tog sustava. Resurs pak predstavlja sve ulazne tokove utrošene za generiranje produkta, i ne ograničuje se samo na gorivo. I resurs i produkt se izražavaju u smislu eksergije. Ako se promatra neki sustav u stacionarnom stanju, uz dovedeni resurs \dot{E}_F , i dobiveni produkt \dot{E}_P , eksergetska bilanca sustava je

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L$$

Eksergetska efikasnost ε je tada omjer između produkta i resursa:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (3.6)$$

Eksergetska efikasnost tako predstavlja udio eksergije resursa dovedenoga sustavu koji je još sadržan u eksergiji dobivenog produkta. Štoviše, razlika između 100% i stvarnog iznosa eksergetske efikasnosti, izraženoga postotno, jest postotak eksergije resursa izgubljene u sustavu kao gubitak i destrukcija eksergije.

Značajna upotreba eksergetske efikasnosti je u procjeni termodinamičke učinkovitosti neke komponente, postrojenja ili cijele proizvodne grane u odnosu na slične komponente, postrojenja ili grupacije. Tako se npr. može ustanoviti razina učinkovitosti neke plinske

turbine, kao komponente, prema učinkovitosti predstavnika najnaprednijih suvremenih istovrsnih uređaja.

3.2 Eksergoekonomska analiza

3.2.1 Definicije

Eksergoekonomika, za koju je ponekad korišten i izraz i *termoekonomika*, je disciplina koja kombinira eksergetsku analizu i ekonomske principe u svrhu dobivanja podataka o nekom postrojenju ili procesu koji konvencionalnom energetskeg analizom ili ekonomskim procjenama nisu ustanovljivi, ali su ključni za projektiranje i vođenje troškovno efikasnog procesa ili postrojenja. Eksergoekonomika se može smatrati i minimizacijom troškova podržanom eksergetskom analizom [14], [15].

Ako promatrani sustav ima više od jednog produkta, bitno je znati koliki je trošak nastanka svakog od njih. Pri planiranju i izgradnji toplinskog postrojenja, alokacija troškova pomaže u ukazivanju na troškovno neefikasne procese i pogonske cjeline, te u nalaženju tehničkih rješenja koja mogu poboljšati ukupnu troškovnu efikasnost sustava. Stoga se može reći da je cilj eksergoekonomske analize (a) zasebni proračun troškova svakog od produkta sustava, (b) razumijevanje procesa nastanka troškova i tijeka troškova unutar sustava, (c) optimizacija specifičnih varijabli unutar pojedine komponente sustava, ili (d) optimizacija cjelokupnog sustava.

Proračun troškova unutar nekog većeg sustava uglavnom traži izradu bilance troškova. Pri konvencionalnoj ekonomskoj analizi, za cjelokupni sustav u stacionarnom pogonu se bilanca troškova formulira kao

$$\dot{C}_{P,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (3.7)$$

što izražava da je iznos troškova povezan s produktom sustava (\dot{C}_p) jednak ukupnom iznosu utroška potrebnog za nastanak produkta, i to troškova goriva (\dot{C}_F) i troškova vezanih s kapitalnom investicijom (\dot{Z}^{CI}) te s pogonom i održavanjem (\dot{Z}^{OM}). \dot{Z}^{CI} i \dot{Z}^{OM} se određuju dijeljenjem troškova kapitalnih investicija i troškova pogona i održavanja na godišnjoj razini s vremenskim jedinicama ostvarenog godišnjeg pogona sustava (obično satima pogona). Suma te dvije varijable je $\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM}$. Ovdje se s \dot{C} označuje varijabla troškova povezanih s eksergetskim tokovima - tvari, energije, prijenosa topline - dok \dot{Z} predstavlja sve preostale troškove.

3.2.2 Eksergetski troškovi

Neki sustav u stacionarnom pogonu može imati veći broj ulaznih i izlaznih tokova tvari kao i izmjena rada i topline s okolinom. S tim prijenosima tvari i energije vezani su i prijenosi eksergije u i izvan sustava, te destrukcije eksergije uzrokovane nepovratnostima unutar sustava. Obzirom da je eksergija mjera stvarne termodinamičke vrijednosti takvih efekata, a troškovi se trebaju pridruživati samo produktima od neke vrijednosti, svrhovito je koristiti eksergiju kao temelj za pridruživanje troškova unutar toplinskog sustava.

Eksergoekonomika u biti počiva na shvaćanju da je eksergija jedina racionalna osnova za pridruživanje troškova međudjelovanjima koja se odvijaju kod nekog toplinskog sustava i njegove okoline, i izvorima nepovratnosti unutar njega. Takav pristup se naziva *određivanjem eksergetskih troškova* [16].

Pritom se određeni trošak pridružuje svakom eksergetskom toku. Tako se za ulazne i izlazne tokove tvari s povezanim iznosima prijenosa eksergije \dot{E}_i i \dot{E}_e , i rada \dot{W} , te iznosa prijenosa eksergije vezanog s prijenosom topline \dot{E}_q , može pisati

$$\begin{aligned}\dot{C}_i &= c_i \dot{E}_i = c_i (\dot{m}_i e_i) \\ \dot{C}_e &= c_e \dot{E}_e = c_e (\dot{m}_e e_e) \\ \dot{C}_w &= c_w \dot{W}_w \\ \dot{C}_q &= c_q \dot{E}_q\end{aligned}\tag{3.8}$$

Ovdje c_i , c_e , c_w i c_q označuju *prosječne troškove po jedinici eksergije* u novčanim jedinicama po GJ [17].

Određivanje troška eksergije uključuje bilanciranje troškova, uobičajeno provedeno za svaku komponentu zasebno. Bilanca troškova primijenjena na k -tu komponentu sustava pokazuje da je zbroj iznosa troškova pridruženih svim izlaznim eksergetskim tokovima jednak zbroju iznosa troškova svih ulaznih eksergetskih tokova, povećanih za iznose vezane na kapitalne investicije te pogon i održavanje [18]. Suma posljednje dvije veličine je \dot{Z}_k . U skladu s tim, za komponentu na koju se prenosi toplina i koja predaje neki rad, uz uvedene prethodno definirane izraze za iznose troškova, pisalo bi se

$$\sum_e (c_e \dot{E}_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}_{q,k} + \sum_i (c_i \dot{E}_i)_k + \dot{Z}_k\tag{3.9}$$

Iznosi eksergija (\dot{E}_e , \dot{W} , \dot{E}_q i \dot{E}_i) koji izlaze i ulaze u k -tu komponentu se proračunavaju eksergetskom analizom koja je prethodno provedena. Veličina \dot{Z}_k se dobiva najprije proračunom kapitalnih investicija i troškova pogona i održavanja vezanih za k -tu komponentu, te potom izračunavanjem sravnjenih vrijednosti tih troškova po jedinici vremena pogona sustava [19].

3.2.3 Razina agregacije

Razina na kojoj se formulira bilanciranje troškova - tj. složenost prikaza sustava, odnosno postrojenja - utječe na rezultate eksergoekonomske analize. U skladu s time, pri planiranju toplinskih postrojenja treba koristiti najnižu moguću razinu agregacije. Takva je razina obično predstavljena individualnim komponentama (izmjenjivači topline, kotlovi, turbine, itd.) [20]. I u slučajevima kada su raspoložive informacije o procesu nedovoljne za primjenu

određivanja troška eksergije na razini komponente, općenito je bolje postavljati odgovarajuće pretpostavke koji to omogućuju baš na razini komponente, radije nego razmatrati grupe komponenti.

3.2.4 "Fuel-product" postavke

Kao što je spomenuto pri uvođenju pojma eksergetske efikasnosti u poglavlju 1.1.4., bilo je potrebno uvesti i koncept *resursa* i *produkta* (u literaturi na engleskom "*fuel-product*" koncept). Produkt se tako definira u skladu sa svrhom nabave i korištenja određene promatrane komponente. Pod resursom se podrazumijevaju sve veličine - gorivo, sirovina i drugo - potrebne za tvorbu produkta. I resurs i produkt se izražavaju kao eksergetske veličine [21].

Veličine troškova povezanih s resursom (\dot{C}_F) i produktom (\dot{C}_P) kod neke komponente, navedenih u poglavlju 3.2.1., dobivaju se jednostavno uvođenjem troškovnih veličina (\dot{C}) umjesto eksergetskih veličina (\dot{E}). Može se ustanoviti da iznosi troškova povezanih s resursom (ili produktom) neke komponente sadrže u sebi iznose troškova onih ulaznih i izlaznih tokova koji su potrebni za definiciju eksergije resursa (ili produkta).

Kada se analizira neka komponenta sustava odnosno postrojenja, bilancu troškova kod nje potrebno je formulirati odgovarajućim matematičkim izrazom. Da bi se takva bilanca pravilno postavila, uglavnom su potrebni dodatni izrazi - jednačbe uz one koji se inicijalno mogu postaviti. Pri formuliranju takvih dodatnih izraza, primjenjuju se ovi opći principi:

- Kada definicija *produkta* neke komponente uključuje samo jedan eksergetski tok (npr kod turbine), jedinični trošak takvog izlaznog toka se proračunava iz bilance troškova. Dodatne jednačbe se formuliraju za preostale *izlazne* eksergetske tokove potrebne za definiciju produkta, ili, rjeđe, za definiciju eksergetskih gubitaka koji nastaju kod te komponente.
- Kada definicija *produkta* za neku komponentu sustava uključuje m izlaznih eksergetskih tokova, potrebno je formulirati $m-1$ dodatnih jednačbi koje se odnose na te tokove produkta. Ukoliko nisu raspoložive informacije o proizvodnom procesu za svaki od tih m tokova, može se uzeti pretpostavka da se svaka jedinična eksergija, dovedena svakom od tokova promatranog produkta, dovodi uz isti prosječni trošak.
- Kada definicija *resursa* za neku od komponenti uključuje razliku između ulaznih i izlaznih stanja istog materijalnog toka kod te komponente, prosječni trošak po jedinici eksergije ostaje konstantan za taj tok. Taj se trošak mijenja samo kada je eksergija *dovedena* toku, koji tada postaje dio definicije produkta.

Ove će postavke biti razvijene pri uvođenju teorije eksergetskih troškova, kao što je opisano niže u poglavlju 3.3.3. Po uvođenju iznosa troškova vezanih s resursom i produktom, može se definirati i *prosječne troškove po jedinici eksergije resursa i produkta* za pojedinu komponentu. Tako je prosječni jedinični trošak goriva ($c_{F,k}$) za k -tu komponentu definiran kao

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (3.10)$$

i označava prosječan trošak uz koji se svaka jedinica eksergije resursa dovodi k -toj komponenti. Analogno, prosječni jedinični trošak produkta ($c_{P,k}$) za k -tu komponentu je prosječan trošak uz koji nastaje svaka jedinica eksergije produkta te komponente:

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (3.11)$$

Te se veličine mogu koristiti u eksergoekonomskoj procjeni komponenti sustava [22].

3.2.5 Načela optimizacije

Općenito, u razmatranjima sličnima temi ovog rada, pod pojmom *optimizacija* se podrazumijeva izmjena strukture i projektiranih parametara sustava sa svrhom smanjenja ukupnih troškova produkata sustava, uz neke granične uvjete. Ti granični uvjeti se odnose na raspoložive materijale, financijske resurse, zaštitu okoliša, pridržavanje zakonskih propisa i druge slične stavke, te nadalje na sigurnost, operabilnost, pouzdanost, raspoloživost, i samo održavanje sustava, a i na druge bitne značajke [23].

Termodinamička optimizacija posebno ima za cilj smanjenje termodinamičkih neefikasnosti: destrukcije eksergije i gubitaka eksergije.

Cilj *eksergoekonomske* optimizacije je također minimizacija troškova, ali uključivo i onih koji nastaju zbog termodinamičkih neefikasnosti. Stvarno optimizirani sustav je onaj kod kojega se pojava svake značajnije termodinamičke neefikasnosti može opravdano vezati uz troškove, ili je nametnuta barem jednim od graničnih uvjeta kao što su oni gore navedeni.

Prvi korak u optimizacijskoj analizi je jasno definiranje granica sustava koji se optimizira. Svi podsustavi koji bitno utječu na učinkovitost promatranog sustava trebaju biti uključeni u problematiku optimizacije. U slučaju složenijih sustava, poželjno je razbiti ih na manje podsustave koji se mogu individualno optimizirati, u kojem slučaju je važno pravilno odabrati granice takvog podsustava jer one bitno utječu na same rezultate optimizacije.

Kriteriji optimizacije, na temelju kojih se neki sustav procjenjuje, mogu biti *ekonomskog*, *tehnološkog* i *ekološkog* karaktera. Ekonomski kriteriji se odnose na kategorije kao što su ukupna kapitalna investicija, ukupni godišnji sravnjeni troškovi, godišnji sravnjeni neto profit, stopa povrata investicije, te drugi kriteriji isplativosti. Tehnološki kriteriji se odnose na termodinamičku efikasnost, vrijeme potrebno za proizvodnju, opseg proizvodnje, pouzdanost, fizičke karakteristike itd. Ekološki kriteriji se odnose na utjecaj na okoliš, dakle emisije štetnih tvari i drugo. Optimizirana izvedba postrojenja je karakterizirana minimalnim i maksimalnim vrijednostima, već kako je prikladno, svakog odabranog kriterija.

U praksi je uglavnom poželjno postići izvedbu postrojenja koja je "najbolja" prema više od jednog kriterija. No kako su navedeni kriteriji često međusobno konkurentni, nije uvijek moguće naći sveobuhvatno rješenje. Na primjer, vrlo je teško postići istovremenu minimizaciju troškova i utjecaja na okoliš uz maksimiziranje efikasnosti i pouzdanosti sustava. Stoga se u tipičnim analizama uzima samo jedan primarni kriterij kao mjera učinkovitosti optimizacije, a su uglavnom ukupni godišnji sravnjeni troškovi proizvodnje promatranog postrojenja. Drugi kriteriji se tretiraju kao parametri u postupku optimizacije

Daljnji važan element u formuliranju problema optimizacije je odabir *nezavisnih varijabli* koje prikladno karakteriziraju moguće opcije planiranja i izvedbe sustava. Pritom je važno

uključiti sve bitne varijable koje utječu na učinkovitost i troškovnu efikasnost sustava, ne uključivati manje važne, i praviti razliku između varijabli odluke i parametara. Pri optimizaciji se samo varijablama odluke smije varirati vrijednost, dok su vrijednosti parametara fiksne za neke određene primjene. Varijable čija se vrijednost određuje iz nezavisnih varijabli korištenjem nekog matematičkog modela se smatraju zavisnim varijablama.

Konačno, kod složenijih toplinskih sustava kod kojih nije ostvariva sveobuhvatna optimizacija, može se pribjeći *pod-optimizaciji*. Tu se radi o optimizaciji jednog dijela problema, ili pojedinog podsustava, uz zanemarivanje varijabli koje utječu na objektivno funkcioniranje drugih podsustava [24]. U praksi, za pod-optimizacijom sustava se može ukazati potreba iz ekonomskih ili praktičnih razloga kao što su vremenska ograničenja ili ljudski resursi. No, pod-optimizacija svih podsustava zasebno ne mora nužno dovesti do stvarne optimizacije cijelog sustava.

3.3 Teorija eksergetskih troškova

3.3.1 Opće postavke

Temeljni problem određivanja troškova, odnosno alokacije troškova kod nekog proizvodnog sustava se postavlja ovako [25]: "Ako je zadan sustav s definiranim granicama i ako je poznata razina agregacije koja specificira podsustave od kojih je sastavljen, problem je kako odrediti troškove svih tokova koji u tako promatranoj strukturi postaju međuovisni". Da bi se pojasnila ta pretpostavka, polazi se od toga da svaki nastali trošak ima ishodište u nepovratnosti procesa. Veća nepovratnost (I_i) u podsustavu podrazumijeva i veću potrošnju ukupnih resursa postrojenja (F_i) ukoliko produkti (P_i i P_T) ostaju konstantni. Kod toga je ključno proučiti utjecaj varijacija u lokalnoj nepovratnosti (ΔI_i) na porast potrošnje resursa (ΔF_T). Proizlazeći kvocijent $\Delta F_T / \Delta I_i$ definira "trošak" kao kategoriju vrlo korisnu za termoekonomsku analizu sustava.

Taj trošak je moguće odrediti i bez korištenja neke određene teorije, bilo putem mjerenja ili putem odgovarajuće simulacije, no svrha teorije je da interpretira zbivanja prema realnosti. Smatra se da je za postavljanje neke teorije troškova potrebno zadovoljiti tri temeljna uvjeta:

- (i) postavljene granice sustava i definicija resursa su uvijek djelomični i odnose se samo na promatrani sustav - općenito, resursi energije, sirovina, ekonomije, informacija i rada su samo oni koji su stavljeni sustavu na raspolaganje unutar granica analize i uz poznate jedinične cijene;
- (ii) stupanj agregacije omogućuje raspodjelu nepovratnosti prema komponentama. Odabrani stupanj agregacije bitno utječe na zaključke koji proizlaze iz analize. Sami postupak analize, a ne teorija sama po sebi, određuje razdjeljivanje ("disagregaciju") postrojenja na tokove i podsustave do razine na kojoj se informacija može učinkovito koristiti;
- (iii) efikasnost se uzima kao indikator valjanosti ponašanja podsustava, obzirom da je nepovratnost lokalizirana na njih. Nužno je naći vezu između efikasnosti i nepovratnosti, te između njih i drugih tehničkih i ekonomskih varijabli koje utječu na njih.

3.3.2 Fizikalna i proizvodna struktura sustava

Da bi se neki temeljni problem riješio, poželjno je dati njegov prikaz u kompaktnoj formi. Postrojenje se tako najprije definira kao skup podsustava ili jedinica koji su međusobno i s okolinom povezani drugim skupom tokova tvari, energije i rada. Najopćenitije, to se može prikazati ovakvim izrazom: *energetski sustav = podsustavi ili jedinice + tokovi tvari i/ili energije*, gdje je odnos između tokova i sustava postavljen u matricnom obliku tzv. incidentnom matricom **A** dimenzije $[n \times m]$, gdje je n broj podsustava a m broj tokova. Kod stacionarnih pogonskih uvjeta moguće je tada opisati bilance tvari, energije i eksergije. Ako se s **M**, **E** i **B** označe vektori dimenzije $[m]$ čiji elementi odgovaraju tokovima mase, energije i eksergije, a s **D** vektor dimenzije $[n]$ koji predstavlja destrukciju eksergije unutar neke jedinice i uslijed njene unutarnje nepovratnosti, može se uzeti $\mathbf{A} \times \mathbf{M} = 0$, $\mathbf{A} \times \mathbf{E} = 0$, i $\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \mathbf{D}$. Kada element j vektora **M**, **E** i **B** odgovara masenom toku, M_j predstavlja masu, E_j energiju $M_j (h_j - h_{j,00})$, a B_j eksergiju $M_j (h_j - T_0 s_j - \mu_{j,00})$, prema [26]. Odgovara li pak element j toku mase ili rada, tada je $M_j = 0$, E_j je jednak Q_j ili W_j , a B_j je jednak $Q_j \cdot (1 - T_0/T_j)$ ili W_j . Što je incidentna matrica detaljnije definirana, bolje su mogućnosti za analiziranje uzroka nepovratnosti sustava. No, detaljnija incidentna matrica implicira porast kako opsega fizikalnih mjerenja koja moraju biti provedena pri ispitivanju djelovanja postrojenja, tako i kompleksnosti proračunavanja vektora **D**. Stoga je nužno odlučiti se za optimalni stupanj agregacije, koji je u osnovi zapravo ovisan o postavljenim ciljevima analize.

Unutar postrojenja, svaka jedinica tj. podsustav ima određenu proizvodnu funkciju koja doprinosi željenom ukupnom proizvodu cijelog sustava. Da bi se definirala ta funkcija, prema načelima [27], potrebno je jasno naznačiti koji tok ili kombinacija tokova sačinjava produkt određene jedinice (P), koji resurse - sirovine, konzumirano gorivo i drugo - (F), a koji gubitke (L) - tj. odlazne tokove koji nisu dalje iskorištavani, a sve za određenu jedinicu tj. podsustav. Takva resurs-produkt-gubitak definicija označavat će se s F - P - L . Da bi se dobila F - P - L definicija koja najbolje predstavlja proizvodnu funkciju jedinica, potrebno je istražiti energetske transformacije koje se u njima odvijaju. Za proizvodne jedinice, F - P - L definicija mora zadovoljiti određene uvjete, koji se mogu ovako postaviti: (i) svi tokovi koji ulaze ili izlaze iz neke jedinice bit će prisutni u F - P - L definiciji samo jedanput; (ii) sve komponente F , P i L , bilo da se radi o individualnim tokovima ili o njihovim kombinacijama, imat će ili pozitivnu ili nultu eksergiju; i (iii) bit će moguće specificirati bilancu eksergije, koja odgovara pojedinom podsustavu, kao funkciju tokova u smislu F - P - L = D .

Korištenjem F - P - L definicije, razvijaju se matrice **A_F**, **A_P** i **A_L** takve da vrijedi $\mathbf{A} = \mathbf{A}_F - \mathbf{A}_P - \mathbf{A}_L$. Polazeći od tih matrica i koristeći projektne i pogonske podatke za neko postrojenje, bit će moguće provesti eksergetsku i energetske analizu tog postrojenja.

3.3.3 Određivanje eksergetskih troškova

U literaturi [25] je formulirana racionalna procedura za određivanje eksergetskih troškova, temeljena na četiri pretpostavke, P_1 , P_2 , P_3 i P_4 , koje su dijelom analogne općim principima za formuliranje izraza bilance troškova iz poglavlja 3.2.4. Te su pretpostavke ovako postavljene:

- P1.** Eksergetki trošak nekog toka (B^*), resursa (F^*) ili produkta (P^*) je predstavljen iznosom eksergije potrebnim da taj tok, resurs ili produkt nastane. Eksergetski trošak je dakle konzervativna kategorija. Takvo postavljanje dopušta formuliranje onoliko jednadžbi

bilance eksergetskih troškova koliko ima jedinica – podsustava – unutar postrojenja. Te bilance se mogu izraziti, u nedostatku vanjskog određenja, kao $\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$.

- P2.** Ako nema vanjskog određenja, eksergetski trošak tokova koji ulaze u postrojenje uzima se jednakim samoj njihovoj eksergiji. To dopušta formuliranje onoliko jednadžbi ($B_j^* = B_j$) koliko ima tokova koji ulaze u postrojenje.
- P3.** Svi troškovi nastali u proizvodnim procesima moraju biti uključeni u trošak finalnih produkata. Opet, nema li vanjskog određenja, postavlja se nulta vrijednost troškova tokova koji predstavljaju gubitke u postrojenju. To pak dopušta formuliranje onoliko jednadžbi ($B_j^* = 0$) koliko ima izlaznih tokova gubitaka. Iz ove pretpostavke i iz **P1** dobivaju se korelacije za svaku jedinicu tipa $L_i^* = 0 \quad F_i^* = P_i^*$.

Na ovom mjestu je potrebno promotriti problem alokacije troškova. Ako se želi proračunati trošak svakog od m tokova relevantnih za korištenu razinu agregacije (složenosti prikaza postrojenja), bit će potrebno napisati m neovisnih jednadžbi. Ako sve jedinice imaju samo jedan izlazni tok koji se ne smatra gubitkom, onda se problem rješava korištenjem navedenih pretpostavki. U tom se slučaju kaže da je analizirani sustav ili proces sekvencijalan. U suprotnom slučaju je potrebno napisati onoliko dodatnih jednadžbi za svaku jedinicu koliko ima izlaznih tokova iz jedinice koji nisu gubitak, minus jedan. Sada se treba koristiti eksergija da bi se racionalno pridjelili troškovi, jer je to svojstvo koje omogućuje usporedbu tokova u skladu s termodinamičkim principima. Zato se upotrebljavaju dodatne pretpostavke:

- P4a.** Ako je izlazni tok iz neke jedinice ujedno i dio resursa te jedinice, podrazumijeva se da je njegov jedinični eksergetski trošak isti kao onaj ulaznog toka iz kojega taj tok dolazi;
- P4b.** Ako se produkt jedinice sastoji od više tokova, svakome od njih se pridjeljuje isti jedinični eksergetski trošak. Razlog za postavljanje ove pretpostavke leži u tome da su, čak i kada se dva ili više produkata može ustanoviti kod iste jedinice tj. podsustava, procesi njihovog formiranja međusobno neodvojivi tj. nerazlučivi pri promatranju razini agregacije, te im se stoga pridjeljuje trošak proporcionalan njihovoj eksergiji.

Korištenje ovih pretpostavki omogućuje upotrebljivu metodologiju za analizu toplinskih procesa sa stanovišta eksergetskih troškova. Pomoću njih se dobiva sustav linearno neovisnih jednadžbi čije se nepoznanice, tj. eksergetski troškovi tokova, mogu izračunati ako su poznati iznosi njihovih eksergija. Taj skup jednadžbi se postavlja matičnom obliku, prema sljedećim principima. Promatra se postrojenje s n jedinica, tj. podsustava, i m tokova. Eksergije tih tokova su poznate. Bilance eksergetskih troškova (prema pretpostavci P1) za n jedinica daje sustav od n jednadžbi: $\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbf{0} \quad [n \times m] \times [m \times 1] = [n \times 1]$, gdje je \mathbf{A} incidentna matrica koja predstavlja fizičku strukturu postrojenja. Broj tokova je u pravilu veći od broja jedinica, tako da je potrebno $(m - n)$ dodatnih jednadžbi da bi se odredili troškovi tokova. U matičnom smislu, to znači postavljanje elemenata nove matrice α (proizvodne matrice) i stupčastog vektora ω koji pruža sustav dodatnih jednadžbi, tako da vrijedi $\alpha \times \mathbf{B}^* = \omega \quad [(m-n) \times m] \times [m \times 1] = [(m-n) \times 1]$.

Pokazalo se [25] da iskazivanje proizvodne strukture nekog postrojenja putem F - P - L definicije podsustava koji ga formiraju, te primjena propozicija **P1** do **P4**, daju dobro određenje matrice α i vektora ω , pretpostavljajući da nema vanjskih određenja, i da sve jedinice postrojenja imaju proizvodnu uogu. Time se sustav jednadžbi potrebnih za proračun eksergetskih troškova tokova može ovako formulirati:

$$\mathbb{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbf{Y}^* \quad [m \times m] \times [m \times 1] = [m \times 1]$$

gdje je $\mathbb{A} = [\mathbf{A} \mid \boldsymbol{\alpha}]^t$ matrica troškova, a $\mathbf{Y}^* = [-\mathbf{Y}^* \mid \boldsymbol{\omega}]^t$ vektor vanjskih određenja, gdje, u skladu s prethodno navedenim, uzimamo da je \mathbf{Y}^* jednako nuli.

Rješavanjem tih sustava jednadžbi i uvrštavanjem vrijednosti eksergija, dobivaju se eksergetski troškovi tokova, u okviru navedenih pretpostavki.

3.3.4 Eksergoekonomski troškovi

Što se određivanja eksergoekonomskih troškova tiče, tu se u osnovi razmatra proračunavanje monetarnih troškova unutarnjih tokova te konačnih produkata, za neko procesno postrojenje. Formiranje tih troškova kod određenog postrojenja je vezano i za termodinamičku efikasnost procesa unutar kojega nastaju, i za amortizaciju i troškove održavanja jedinica. Eksergoekonomski troškovi nekog toka se tako mogu definirati kao kombinacija dva doprinosa: prvi dolazi od samih monetarnih troškova eksergije koja ulazi u postrojenje a potrebna je za formiranje tog toka, dakle njegovog eksergetskog troška, a drugi doprinos pokriva ostatak troškova koji nastaju u proizvodnom procesu (kapitalni troškovi, troškovi održavanja, itd.).

Prema proceduri iz literature [28], bilanca eksergoekonomskih troškova za bilo koju individualnu jedinicu postrojenja se može opisati kao $\Pi_F + Z = \Pi_P$, gdje su Π_F i Π_P eksergoekonomski troškovi tokova koji sačinjavaju resurs i produkt jedinice, a Z predstavlja doprinos neenergetskih proizvodnih čimbenika. Ako se taj izraz uzme u obzir za sve jedinice postrojenja, a pretpostavka **P3** za tokove gubitaka, dobiva se sustav jednadžbi $\mathbf{A} \times \boldsymbol{\Pi} = -\mathbf{Z}$, gdje su nepoznate veličine Π_j zapravo eksergoekonomski troškovi m tokova.

Za eksergetске troškove, potrebno je $(m-n)$ dodatnih jednadžbi da bi se našli eksergoekonomski troškovi tokova. Te se dodatne jednadžbe moraju formulirati korištenjem pretpostavki **P2** do **P4**, postavljanjem izraza $\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\Pi} = \boldsymbol{\Pi}_e$, gdje vektor $\boldsymbol{\Pi}_e$ ($\boldsymbol{\Pi}_e = c_{\omega,i} \omega_i$) sada predstavlja vanjska ekonomska određenja za tokove koji ulaze u postrojenje.

Može se zaključiti da matematički problem proračunavanja eksergoekonomskih troškova nekog postrojenja traži rješavanje ovog sustava jednadžbi:

$$\mathbb{A} \times \boldsymbol{\Pi} = \mathbb{Z} \quad [m \times m] \times [m \times 1] = [m \times 1] \quad (3.12)$$

gdje je $\mathbb{Z} = [-\mathbf{Z} \mid \boldsymbol{\Pi}_e]^t$ vektor koji sadrži vanjska ekonomska određenja.

3.3.5 Vanjska određenja i primjena

Kada se sustav ili postrojenje promatra samo termodinamički, ne uzima se u obzir fizičko ili ekonomsko međudjelovanje s drugim sustavima i postrojenjima. Prelazak s eksergetskih na eksergoekonomske troškove podrazumijeva u prvom redu, kod matičnog prikaza, promjenu jedinica u kojima se proizvoni faktori izražavaju (kJ u novčane jedinice). Utjecaj međudjelovanja na troškove može biti uveden u analizu putem prikladnog modificiranja vektora vanjskih određenja, \mathbb{Z} , pri čemu matrica troškova \mathbb{A} ostaje neizmijenjena. U praksi se kao bitni vanjski utjecaji uzimaju eksergetska amortizacija, ostaci u proizvodnom procesu, proces transformacije goriva, i drugo.

Eksergetska amortizacija, kao najprisutniji slučaj za vanjska određenja, uzima u obzir činjenicu da su jedinice tj. podsustavi koji tvore postrojenje i sami funkcionalni proizvodi, te stoga imaju određeni eksergetski trošak. Da bi se održavali u dobrom pogonskom stanju, potrebna je dodatna eksergija. Nakon određivanja tih eksergetskih troškova jedinica, potrebno je distribuirati ih na cijeli radni vijek. Na taj je način konvencionalnim metodama moguće dobiti vektor dimenzije n (broj podsustava) koji odgovara eksergetskoj amortizaciji jedinica. Na analogan način bi se dobio i vektor eksergetskog održavanja. Definiranjem vektorske sume i jednog i drugog, kao $\mathbf{Y}^* = \mathbf{Y}_A^* + \mathbf{Y}_M^*$, moguće je reformulirati bilance eksergetskih troškova postrojenja (pretpostavka **P1**) općenito kao $\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = -\mathbf{Y}^*$.

Ostaci u proizvodnom procesu se razmatraju kada određeni tokovi eksergetskih gubitaka iziskuju dodatne troškove za zbrinjavanje otpadnih tvari. Primjer za to su šljaka i leteći pepeo kod ugljenom loženih kotlova, koji traže uređaje - potrošače električne energije bez kojih postrojenje ne bi radilo. U tom slučaju odstranjivanje takvih tokova iz procesa uvodi eksergetski trošak iznosa \mathbf{R}^* ; time jednadžba koja proizlazi iz primjene pretpostavke **P3** na ovakve tokove gubitaka (ostataka) navodi na $\omega = -\mathbf{R}^*$.

Promatrajući *transformaciju goriva*, uzima se u obzir činjenica da se gorivo konzumirano u u industrijskom procesu rijetko sastoji od netransformiranih primarnih energenata, čija je vrijednost, najšire gledano, predstavljena njihovom termodinamičkom neravnotežom prema stanju okoline, dakle njihovom eksergijom. Na primjer, ugljen kao primarni energent ima eksergetski trošak \mathbf{V}^* koji je zapravo veći od njegove eksergije, zbog različitih procesa kao što su iskapanje, skladištenje, transport, mljevenje itd. Ako se utjecaj takvih procesa želi ugraditi u eksergetske troškove tokova i produkata nekog postrojenja, mora se primijeniti pretpostavka **P2** za tok energenta kao resursa, u obliku $\omega = \mathbf{V}^*$.

Brojni su i drugi utjecaji koji se kao kategorija eksergetskih troškova mogu uvesti u vanjska određenja. Vektor \mathbf{Y}^* obuhvaća sve vanjske informacije koje konačno određuju eksergetski trošak nekog postrojenja. Uzimanje u obzir vanjskih određenja omogućuje uključivanje u eksergetske troškove što većeg dijela vanjskih ireverzibilnosti. Te bi ireverzibilnosti dakle proizlazile iz izrade, izgradnje, popravaka, održavanja i drugih kategorija svedenih u \mathbf{Y}^* , iz odstranjivanja ostataka \mathbf{R}^* , iz transformacija tokova koji ulaze u postrojenje svedenih u \mathbf{V}^* , i drugog. Određivanje vektora \mathbf{Y}^* nastoji kumulativno obuhvatiti sve te vanjske ireverzibilnosti. Međutim, prisutno je vrlo malo radova koji pokušavaju proračunati kumulativni eksergetski trošak funkcionalnih proizvoda. Može se reći da je eksergetska amortizacija, prikazana vektorom \mathbf{Y}^* , najpraktičnija kategorija za uzimanje u obzir vanjskih određenja.

3.3.6 Primjena metode određivanja eksergetskih troškova na jednostavnom primjeru

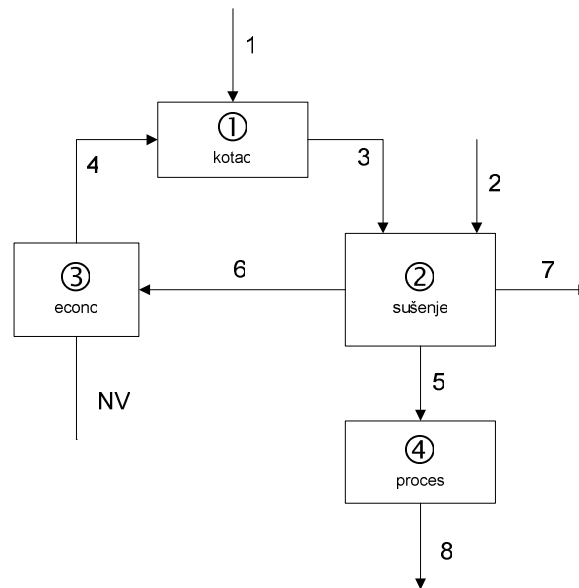
U nastavku je prikazana primjena teorije eksergetskih troškova kod analiziranja jednostavnog toplinskog procesa iz prehrambene industrije.

Promatra se simplificirani model nekog postrojenja za sušenje sirovine u prehrambenoj industriji, čiji je prikaz dan na slici 3.1.

Sustav se sastoji od generatora pregrijane pare (1), komore za sušenje sirovine (2), predgrijača napojne vode (3), i nekog toplinskog procesa koji iskorištava osjetnu toplinu pare/kondenzata nakon sušenja (4).

Toplinski tok 1 predstavlja smjesu goriva i zraka, 2 je ulaz sirovine na sušenje, 3 je pregrijana para, 4 dogrijana napojna voda, 5 je izlaz pare/kondenzata, 6 dio kondenzata koji se ubacuje u NV, 7 je izlaz osušenog proizvoda, te 8 izlazni kondenzat iz procesa. Tok napojne vode ne razmatramo jer je njegova eksergija za sustav jednaka 0.

Tu su dakle 4 podsustava s 8 tokova.



Slika 3.1: Dijagram pojednostavljenog modela postrojenja

U skladu s opisanim načelima teorije eksergetskih troškova, ne promatraju se maseni tokovi, tlakovi, temperature i dr., već samo sadržaj eksergije pojedinog toka kao njegova opća kvaliteta (dimenzionalno u kW obzirom da se promatra stacionarno stanje). Također, radi jednostavnosti ovog prikaza zanemaruju se izlazni tokovi gubitaka.

Promatrajući fizikalni sustav sastavljen od n podsustava i m tokova, moguće je prikazati njegovu strukturu pomoću matrice \mathbf{A} dimenzije $(n \times m)$ koja će se konvencionalno nazivati incidentna matrica. Za svaki podsustav možemo definirati njegovu eksergetsku efikasnost $\eta = P/F$, označujući s F ulazne ili tokove resursa, a s P izlazne ili tokove produkta (F -fuel, P -product). U \mathbf{A} se tada za svaki podsustav "i" pripadni tokovi "j" unosi vrijednost 1 ako ulaze u podsustav, vrijednost -1 ako izlaze, odnosno 0 ako nisu prisutni.

Kako su za svaki podsustav ulazni i izlazni eksergetski tokovi definirani sljedećim jednadžbama:

za kotao: $B_1 - B_3 + B_4 = 0$

za sušać: $B_2 + B_3 - B_5 - B_6 - B_7 = 0$

za ekonomizer: $-B_4 + B_6 = 0$

za proces: $B_5 - B_8 = 0$

tako incidentna matrica ima ovaj oblik:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Nadalje se konstruiraju dvije matrice koje određuju F-P (resurs-produkt) karakteristike sustava:

A_F ($n \times m$) - određuje tokove resursa za svaki podsustav

A_P ($n \times m$) - određuje tokove produkta za svaki podsustav.

Ustanovljuje se i vektor B ($m \times 1$) kao vektor eksergija (kW) tokova koji povezuju podsustave, i B^* ($m \times 1$) kao vektor njihovih troškova eksergije (kW), odnosno eksergija koje je potrebno "utrošiti" da bi se dobila eksergija određenog toka. Ukoliko nema vanjskih određenja (ostataka, gubitaka), vrijedi:

$$\begin{aligned} A_F B &= F & A_F B^* &= F^* \\ A_P B &= P & A_P B^* &= P^* \\ A_F - A_P &= A & F &= P + I \end{aligned} \quad (3.14)$$

gdje su F i P ($n \times 1$) vektori koji sadrže resurse i produkte svakog podsustava, F^* i P^* ($n \times 1$) vektori koji sadrže troškove eksergije resursa i produkta svakog podsustava, a I ($n \times 1$) vektor koji sadrži nepovratnost svakog sustava.

U promatranom slučaju:

$$A_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_3 - B_5 \\ B_6 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$A_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} B_3 - B_4 \\ B_6 + B_7 \\ B_4 \\ B_8 \end{bmatrix}$$

Kreiranje A_F i A_P za zadani sustav vodi do F i P i omogućuje ustanovljenje eksergetске efikasnosti svakog podsustava.

Nadalje, koristeći matrice fizikalne strukture A , A_F i A_P , moguće je izgraditi daljnju matricu α , matricu proizvodne strukture, koja sadrži definiciju grananja tokova eksergija x_i , koji se konvencionalno nazivaju koeficijenti bifurkacije.

Ta matrica α dimenzije ($m - n \times m$) se sastoji od:

a) v_e redova koji odgovaraju ulaznim tokovima u sustav; ovdje se unosi "1" u kolonu koja odgovara ulaznom toku, a za ostalo "0"; označit će se s α_e ($v_e \times m$) podmatrica koja zadovoljava:

$$\alpha_e B = \alpha_e B^* = \omega_e$$

gdje je ω_e ($v_e \times 1$) vektor koji sadrži vrijednosti eksergija ulaznih tokova u sustav; ovdje $v_e = 2$

b) $v_x = m-n-v_e$ redova koji odgovaraju bifurkacijama ("račvanjima" tokova) definiranim unutar sustava; ovdje $v_x=2$.

Mogu se definirati dva različita tipa bifurkacija ("grananja"):

- ako definirani resurs podsustava ima grananje tipa $F=B_i-B_j$, definira se koeficijent bifurkacije tipa $x=B_j/B_i$,
- ako definirani produkt podsustava ima grananje tipa $P=B_i+B_j$, također se postavlja koeficijent bifurkacije tipa $x=B_j/B_i$, ($B_i>B_j$).

Označit će se s $\alpha \times (v_x \times m)$ podmatrica sastavljena od v_x redova, koja zadovoljava:

$$\alpha_x \mathbf{B} = \alpha_x \mathbf{B}^* = 0$$

Ako se označi: $\omega = \begin{bmatrix} \omega_e \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$ ($m-n \times 1$),

tada: $\alpha \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}^* = \omega$

Što se koeficijenta bifurkacija u promatranom sustavu tiče, resurs podsustava (2) je toplinski tok 3, para čija eksergija nije potpuno iskorištena, već kao tok 5 odlazi dalje kao resurs podsustava (4). Za 4 dakle vrijedi $F = B_3 - B_5$, pa se prema načelu a) definira x_1 . Kod istog podsustava imamo izlazne produkte kao tokove 6 i 7, pa se, bez obzira što je riječ o fizikalno različitim medijima, prema njihovoj eksergiji uzima $P = B_6 + B_7$, i prema načelu b) definira x_2 . Tako se dobiva

$$x_1 = B_5 / B_3, \text{ i}$$

$$x_2 = B_6 / B_7.$$

Odnosno, taj se sustav jednadžbi može razviti kao:

$$x_1 \times B_3 = B_5$$

$$x_2 \times B_7 = B_6$$

to jest:

$$-x_1 \times B_3 + B_5 = 0$$

$$-x_2 \times B_7 + B_6 = 0$$

U skladu s navedenim se definira podmatrica α :

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -x_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -x_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \alpha_e \\ \alpha_x \end{matrix} \quad (3.16)$$

i ω :

$$\omega = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_e$$

Konačna svrha α i ω je omogućavanje definiranja sljedećih matrica i vektora:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} & A_F &= \begin{bmatrix} A_F \\ \alpha \end{bmatrix} & A_P &= \begin{bmatrix} A_P \\ \alpha \end{bmatrix} & \text{matrice (m} \times \text{m)} \\ F &= \begin{bmatrix} F \\ \omega \end{bmatrix} & P &= \begin{bmatrix} P \\ \omega \end{bmatrix} & & & \text{vektori (m} \times \text{1)} \\ F^* &= \begin{bmatrix} F^* \\ \omega \end{bmatrix} & P^* &= \begin{bmatrix} P^* \\ \omega \end{bmatrix} & & & \text{vektori (m} \times \text{1)} \end{aligned}$$

S matematičke strane, smisao proširenja incidentne, te matrice resursa i troškova, matricom α , jest dobivanje kvadratnih matrica s kojima se može manipulirati, u smislu množenja i određivanja inverzne matrice.

Za određivanje troškova eksergije tokova bitna je matrica A . Također se definira vektor vanjskih određenja Y^* , oblika

$$Y^* = \begin{bmatrix} -Y^* \\ \omega \end{bmatrix}, \text{ prema dosad izraženom, } -Y^* = 0.$$

Za izračun eksergetskih troškova tokova promatranog sustava, postavlja se jednadžba

$A \times B^* = Y^*$, odnosno

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -x_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -x_2 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_1^* \\ B_2^* \\ B_3^* \\ B_4^* \\ B_5^* \\ B_6^* \\ B_7^* \\ B_8^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_1 \\ B_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Nakon matričnog izračuna dobivaju se sljedeća rješenja sustava jednadžbi:

$$B_1^* = B_1$$

$$B_2^* = B_2$$

$$B_3^* = (B_1 \times (x_2 + 1) + B_2 \times x_2) / (x_1 \times x_2 + 1)$$

$$B_4^* = -(B_1 \times (x_1 \times x_2 - x_2) - B_2 \times x_2) / (x_1 \times x_2 + 1) \quad (3.18)$$

$$B_5^* = (B_1 \times x_1 \times (x_2 + 1) + B_2 \times x_1 \times x_2) / (x_1 \times x_2 + 1)$$

$$B_6^* = -(B_1 \times (x_1 \times x_2 - x_2) - B_2 \times x_2) / (x_1 \times x_2 + 1)$$

$$B_7^* = -(B_1 \times (x_1 - 1) - B_2) / (x_1 \times x_2 + 1)$$

$$B_8^* = (B_1 \times x_1(x_2 + 1) + B_2 \times x_1 \times x_2) / (x_1 \times x_2 + 1)$$

Uvrštavanjem nekih odabranih vrijednosti za $B_1 \dots B_8$, dobije se sljedeća tablica:

Tablica 3.1: Eksergetski troškovi tokova u probnom primjeru

tok		B (kW)	B^* (kW)	k^*
1	gorivo i zrak	500	500	1
2	sirovina	5	5	1
3	pregrijana para	450	721,30	1,60
4	voda	90	221,30	2,46
5	para	200	320,58	1,60
6	kondenzat	120	221,30	1,84
7	suhi proizvod	100	184,42	1,84
8	kondenzat	80	320,58	4,01

U tablici su dane i vrijednosti za jedinični eksergetski trošak k^* , kao određena inverzija stupnja djelovanja.

Što se tiče eksergoekonomskih troškova, prema gornjem principu je moguće procijeniti i monetarne troškove internih tokova i produkata toplinskih sustava.

Tada bi se bilanca eksergoekonomskih troškova za bilo koji individualni dio sustava pisala kao

$$\Pi_F + Z = \Pi_P$$

gdje su Π_F i Π_P eksergoekonomski troškovi tokova koji čine resurs i produkt tog dijela sustava, a Z predstavlja doprinos ne-eksergetskih faktora u dobivanju produkta.

Slično kao i prethodna procedura, dobiva se sustav jednačbi $A \times \Pi = -Z$, gdje su nepoznate veličine Π_j eksergoekonomski troškovi m tokova. Podmatrica za proširenje incidentne matrice je tada

$$\alpha \times \Pi = \Pi_e$$

gdje vektor Π_e ($\Pi_{e,i} = c_{\omega,i} \omega_i$) predstavlja vanjsku ekonomsku procjenu tokova koji ulaze u postrojenje, pri čemu je c jedinični eksergoekonomski trošak (kn/kJ, kn/kg i sl.).

Tada proračun eksergoekonomskih troškova tokova u postrojenje podrazumijeva rješavanje sustava jednačbi

$$A \times \Pi = Z$$

gdje je $Z = \begin{bmatrix} -Z \\ \Pi_e \end{bmatrix}$ vektor koji sadrži vanjske ekonomske procjene.

3.3.7 Univerzalni izraz za eksergetski stupanj djelovanja, [FP] struktura

U termodinamičkim analizama energetskih sustava je dugo tražen izraz koji povezuje ukupnu učinkovitost bilo kojeg sustava s učinkovitostima svakoga od podsustava koji ga tvore, i s izrazima za reciklirani dio eksergija, što se inicijalno postavljalo kao

$$\eta_T = f(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, x_1, x_2, x_3, \dots, x_e).$$

Kod linearnih odnosa se ovaj izraz relativno lako određivao, no kod kompleksnijih struktura kakve su npr. termoenergetska postrojenja konvencionalnim metodama se nije moglo doći do rješenja. Na temelju opće teorije eksergetskih troškova razvijena je metodologija dana u [29], za koju je u nastavku prikazana analitička procedura, primijenjena na primjer iz prethodnog poglavlja.

Ukupni stupanj djelovanja sustava se može jednostavno postaviti kao

$$\eta_T = F_T^{-1} \times P_T \quad (3.19)$$

gdje su F_T i P_T totalni resurs i produkt sustava. U daljnjem razvoju, potrebno je definirati matricu koja karakterizira odnos resursa i produkta, za koju se uvodi oznaka **[FP]**. Za matrice i vektore resursa i produkta, definirane u prethodnom poglavlju, vrijedi:

$$P = \begin{bmatrix} P \\ \vdots \\ \omega \end{bmatrix} = A_P \times B \quad F = \begin{bmatrix} F \\ \vdots \\ \omega \end{bmatrix} = A_F \times B$$

Može se invertirati A_P , kako bi se dobili vektor B i vektor F kao funkcija P u obliku

$$B = A_P^{-1} \times P$$

$$F = A_F \times A_P^{-1} \times P$$

te se izražava **[FP]** kao analitički izraz koji daje odnos svakog resursa sa svakim produktom u sustavu:

$$[FP] = A_F \times A_P^{-1} \quad (m \times m)$$

Izračunavanjem A_P^{-1} i množenjem matrica, za promatrani primjer pojednostavljenog postrojenja, dobije se

$$[FP] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1-x_1 & 0 & 1-x_1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & \frac{x_2}{x_2+1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{x_2+1} \\ x_1 & 0 & x_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Da bi se odredio odnos kod podsustava kojih ima n , potrebna nam je $n \times n$ podmatrica matrice **[FP]**, koja ima oblik

$$[\mathbf{FP}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-x_1 & 0 & 1-x_1 & 0 \\ 0 & \frac{x_2}{x_2+1} & 0 & 0 \\ x_1 & 0 & x_1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{te se nadalje određuje i } \mathbf{F}_e = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

\mathbf{F}_e je vektor ulaznih resursa u sustav (slučajno se poklapa s ω). U daljnjoj algebarskoj analizi, ukupni resurs sustava može se izraziti kao

$$F_T = \sum_i F_{e,i} = {}^t U F_e = {}^t U (F - [\mathbf{FP}]P) \quad (3.21)$$

i tada

$$F_T = P_T + I_T = {}^t U (P + I - [\mathbf{FP}]P) = I_T + {}^t U (U_D - [\mathbf{FP}])P$$

gdje je U jedinični vektor a U_D dijagonalna jedinična matrica. Iz toga se dalje dobije

$$P_T = {}^t U (U_D - [\mathbf{FP}])P$$

Definirat će se vektor $[\mathbf{P}_T \mathbf{P}]$, tako da je:

$$[\mathbf{P}_T \mathbf{P}] = {}^t U (U_D - [\mathbf{FP}])$$

te iz toga:

$$P_T = [\mathbf{P}_T \mathbf{P}]P \quad (3.22)$$

Vektor $[\mathbf{P}_T \mathbf{P}]$ ukazuje na to koji dio produkta svakog podsustava sudjeluje u formiranju totalnog produkta. Također, vrijedi sljedeće:

$$[\mathbf{P}_T \mathbf{P}] = 1 - \sum_j [\mathbf{FP}]_{j,i}$$

Odnosno, svaki stupac "i" matrice $[\mathbf{FP}]$ ukazuje na raspodjelu produkta podsustava "i" svim podsustavima. Ako produkt podsustava ne tvori dio totalnog produkta, za sumu odgovarajućeg stupca se uzima da je 1. U promatranom slučaju, podsustavi (2) i (4) imaju produkt koji je dio P_T , a (1) i (3) nemaju, pa prvi i treći stupac imaju sumu 1. Odnosno:

$$[\mathbf{P}_T \mathbf{P}]_1 = 1 - 1 = 0$$

$$[\mathbf{P}_T \mathbf{P}]_2 = 1 - \frac{x_2}{x_2+1} = \frac{1}{x_2+1}$$

$$[\mathbf{P}_T \mathbf{P}]_3 = 1 - 1 = 0$$

$$[\mathbf{P}_T \mathbf{P}]_4 = 1 - 0 = 1$$

$$\text{pa je } [\mathbf{P}_T \mathbf{P}] = \begin{bmatrix} 0, & \frac{1}{x_2+1}, & 0, & 1 \end{bmatrix}, \text{ a } P_T = [\mathbf{P}_T \mathbf{P}]P = \frac{1}{x_2+1} P_2 + P_4$$

Nadalje, treba konstruirati dijagonalnu matricu \mathbf{H}_D ($n \times n$) koja sadrži stupanj djelovanja svakog podsustava, njezina inverzija $\mathbf{K}_D = \mathbf{H}_D^{-1}$ sadrži inverzije efikasnosti $k_i = 1/\eta_i$ odnosno jedinične eksergetske potrošnje. Vrijedi sljedeće:

$$\mathbf{P} = \mathbf{H}_D \mathbf{F}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}_D \mathbf{P}$$

$$\mathbf{I} = (\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) \mathbf{P}$$

te, iz prethodnoga, $\mathbf{P} = (\mathbf{K}_D - [\mathbf{FP}])^{-1} \mathbf{F}_e$, odnosno $\mathbf{F}_e = (\mathbf{K}_D - [\mathbf{FP}]) \mathbf{P}$

što se može pisati i kao $\mathbf{P} = [\mathbf{P}] \mathbf{F}_e$, ako je $[\mathbf{P}] = (\mathbf{K}_D - [\mathbf{FP}])^{-1}$

Kako je totalna efikasnost sustava $\eta_T = P_T / F_T$, može se pisati

$$\eta_T = \mathbf{F}_T^{-1} [\mathbf{P}_T \mathbf{P}] [\mathbf{P}] \mathbf{F}_e \quad (3.23)$$

a to je oblik "univerzalnog izraza za eksergetsku efikasnost toplinskih sustava", koji su dugo tražili analitičari toplinskih sustava [18], [19].

Da bi se taj izraz upotrijebio u promatranom primjeru, treba riješiti sustav $(\mathbf{K}_D - [\mathbf{FP}]) \mathbf{P} = \mathbf{F}_e$

$$\mathbf{K}_D = \begin{bmatrix} \frac{1}{\eta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\eta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\eta_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\eta_4} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

i ako se uvede supstitucija $y_1=1-x_1$, $y_2=x_2/(x_2+1)$, tada je

$$[\mathbf{FP}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & 0 & y_1 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 & 0 \\ 1-y_1 & 0 & 1-y_1 & 0 \end{bmatrix}$$

te se sustav jednadžbi postavlja kao

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\eta_1} & 0 & 0 & 0 \\ -y_1 & \frac{1}{\eta_2} & -y_1 & 0 \\ 0 & -y_2 & \frac{1}{\eta_3} & 0 \\ y_1-1 & 0 & y_1-1 & \frac{1}{\eta_4} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

rješavanjem čega se dobiju izrazi za produkte:

$$P_1 = \eta_1 \times B_1$$

$$P_2 = \eta_2 \times \frac{B_1 y_1 \eta_1 + B_2}{\eta_2 \eta_3 y_1 y_2 - 1}$$

$$P_3 = - \frac{B_1 \eta_1 \eta_2 \eta_3 y_2 + B_2 \eta_2 \eta_3 y_2}{\eta_2 \eta_3 y_1 y_2 - 1}$$

$$P_4 = \frac{\eta_2 \eta_3 \eta_4 B_2 y_2 (y_1 - 1) + \eta_1 \eta_4 B_1 (y_1 - 1)}{\eta_2 \eta_3 y_1 y_2 - 1}$$

Kako je, uz supstituciju, $[P_T P] = [0, 1 - y_2, 0, 1]$ a $P_T = [P_T P]P = (1 - y_2) \times P_2 + P_4$

nakon sređivanja dobiva se

$$P_T = \frac{B_1 [(1 - y_2) \eta_1 \eta_2 y_1 + \eta_1 \eta_4 (y_1 - 1)] + B_2 [1 + y_2 (y_1 - 1) \eta_2 \eta_3 \eta_4]}{\eta_2 \eta_3 y_1 y_2 - 1} \quad (3.26)$$

ako se, radi pojednostavljenja, zanemari iznos ulaznog toka B_2 , dobiva se

$$P_T = \frac{(1 - y_2) \eta_2 y_1 + \eta_4 (y_1 - 1)}{\eta_2 \eta_3 y_1 y_2 - 1} \eta_1 B_1, \text{ a } F_T \text{ se svodi na } B_1.$$

Uvrštavanjem u $\eta_T = P_T / F_T$ na kraju se dobije

$$\eta_T = \frac{(1 - y_2) \eta_2 y_1 + \eta_4 (y_1 - 1)}{\eta_2 \eta_3 y_1 y_2 - 1} \eta_1 \quad (3.27)$$

što pokazuje kako se ukupna eksergetska efikasnost postrojenja odnosi prema efikasnostima podsustava.

U konačnom se izrazu član $(1 - y_2) \eta_2 y_1$ odnosi na produkte komore za sušenje, član $\eta_4 (y_1 - 1)$ na produkt toplinskog procesa (4), a član $\eta_2 \eta_3 y_1 y_2 - 1$ na produkt parogeneratora.

4 Primjena metodologije na odabranom modelu

4.1 Pripremna razmatranja

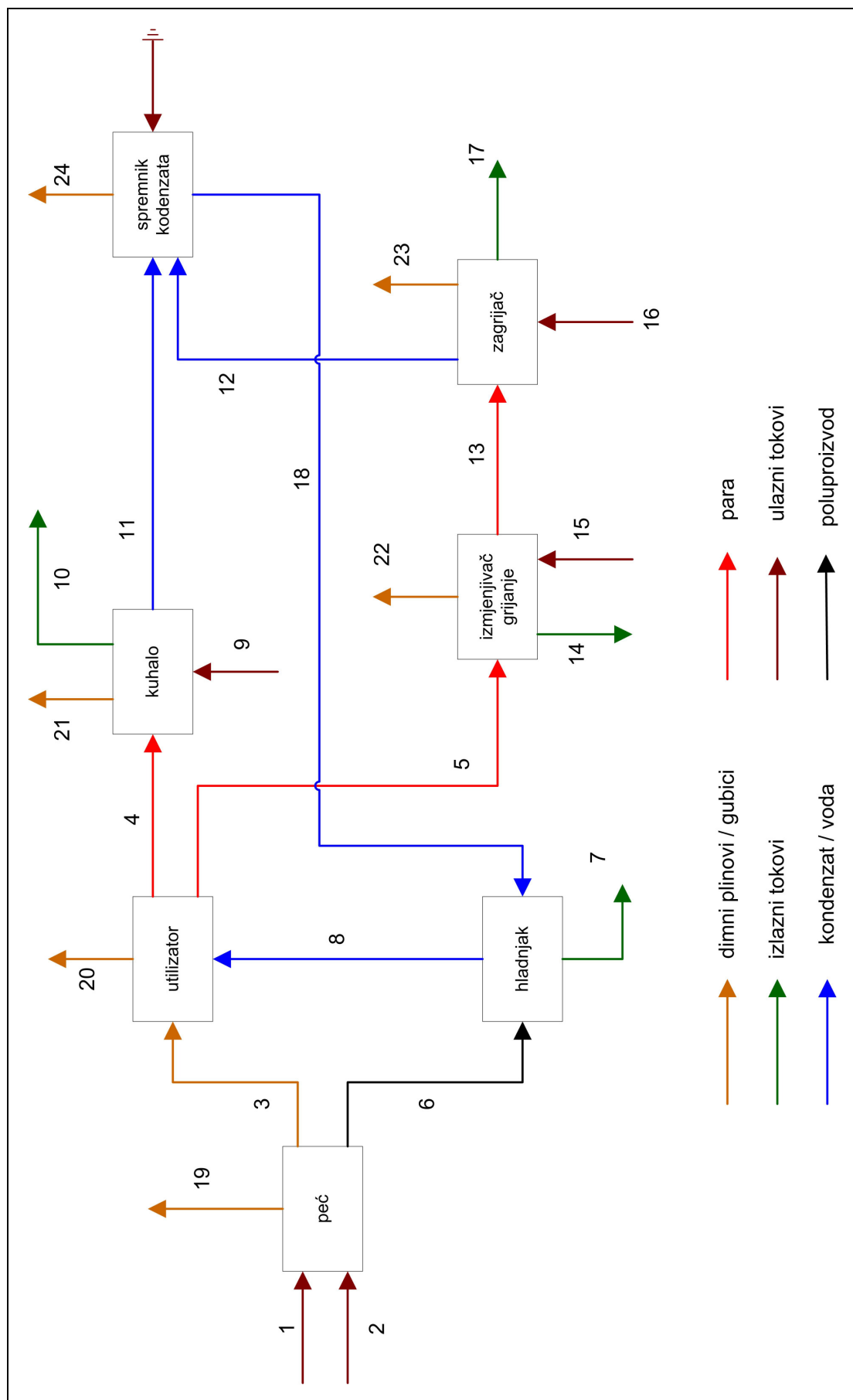
U ovom će poglavlju biti prikazan pokušaj primjene opisane eksergetske i eksergoekonomske analize na odabranom zamišljenom modelu.

Kao što je izloženo u poglavlju 2.3., za iskušavanje metodologije opisane u poglavlju 3. na praktičnom primjeru оформljen je model imaginarnog industrijskog procesa koji obuhvaća tipične procesne elemente pri korištenju toplinske energije u zastupljenijim industrijskim granama.

Elementi tog procesa su: peć za pečenje određene sirovine (npr. za keramičke proizvode), hladnjak-predgrijač napojne vode, kotao utilizator, zagrijač tople vode, procesni zagrijač, procesno kuhalo i spremnik kondenzata. Tokovi tvari uz oznake eksergetskih tokova prema numeraciji na slici 4.1 su opisani u donjoj tablici:

Tablica 4.1: Tokovi tvari u zamišljenom procesu

maseni tok	opis	maseni tok	opis
ulazni tokovi		međutokovi	
B ₁	smjesa goriva i zraka	B ₃	dimni plinovi
B ₂	sirovina za pečenje	B ₄	para
B ₉	sirovina za kuhanje	B ₅	para
B ₁₅	povratna topla voda	B ₆	pečeni poluproizvod
B ₁₆	sirovina za zagrijavanje	B ₈	predgrijana voda
tokovi gubitaka		B ₁₁	kondenzat
B ₁₉	gubici pri pečenju	B ₁₂	kondenzat
B ₂₀	gubici iz utilizatora	B ₁₃	para
B ₂₁	gubici pri kuhanju	B ₁₈	voda
B ₂₂	gubici pri grijanju vode	izlazni tokovi	
B ₂₃	gubici pri procesnom zagrijavanju	B ₇	proizvod 1 (pečenje)
B ₂₄	gubici kod spremnika kondenzata	B ₁₀	proizvod 2 (kuhanje)
		B ₁₄	polazna topla voda
		B ₁₇	proizvod 3 (zagrijavanje)



Slika 4.1: Zamišljeni model s toplinskim procesima i definiranim tokovima

Za nadoknadnu vodu koja ulazi u spremnik kondenzata pretpostavlja se nulta eksergija, pa se njen tok ne razmatra u analizi.

Dakle, prisutno je sedam elemenata procesa - podsustava, i 24 toka. Od tih tokova pet predstavlja ulazne tokove u proces, četiri izlazne, šest je tokova gubitaka iz podsustava, a preostalih devet su međutokovi.

Prema pretpostavci **P1** danoj u poglavlju 3.3.3. može se inicijalno formulirati onoliko jednadžbi bilance eksergetskih troškova koliko ima podsustava u promatranom procesu. Tako incidentna matrica A ($n \times m$) za ovaj proces, gdje je $n = 7$ podsustava i $m = 24$ toka, ima sljedeći oblik:

tok: B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11 B12 B13 B14 B15 B16 B17 B18 B19 B20 B21 B22 B23 B24	
$A =$	$ \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} $

Za postavljanje matrice $A = \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix}$ potrebna je još matrica α ($(m-n) \times m$), za koju treba definirati $m - n = 24 - 7 = 17$ jednadžbi.

Pretpostavka **P2** dopušta formuliranje onoliko jednadžbi ($B_j^* = B_j$) koliko ima tokova koji ulaze u postrojenje. Ulazni tokovi su B_1 , B_2 , B_9 , B_{15} i B_{16} , i za njih se može postaviti još 5 jednadžbi.

Po pretpostavci **P3** može se formulirati onoliko jednadžbi ($B_j^* = 0$) koliko ima izlaznih tokova gubitaka. Peć, utilizator, kuhalo, izmjenjivač, zagrijač i spremnik imaju tokove gubitaka B_{19} , B_{20} , B_{21} , B_{22} , B_{23} i B_{24} . Pretpostavljeno je da su kod hladnjaka poluproizvoda gubici zanemarivi. Time se može postaviti daljnjih 6 jednadžbi za tokove gubitaka.

Potrebno je dakle još 6 dodatnih izraza koji se postavljaju u skladu s pretpostavkama **P4a** i **P4b.**, odnosno, kako je navedeno u poglavlju 3.4.1., definiraju se bifurkacije prema dva osnovna tipa:

- ako definirani resurs podsustava ima grananje tipa $F=B_i-B_j$, definira se koeficijent bifurkacije tipa $x=B_j/B_i$,
- ako definirani produkt podsustava ima grananje tipa $P=B_i+B_j$, također se postavlja koeficijent bifurkacije tipa $x=B_j/B_i$, ($B_i > B_j$).

Odabir razmatranih grananja treba uskladiti s konačno željenom formom, pri čemu su potrebni određeni kompromisi. Uzet će se u obzir sljedeće situacije:

Kod peći je prisutno grananje izlaznih tokova dimnih plinova B_3 i pečenog poluproizvoda B_6 , tako da je produkt podsustava $P=B_3+B_6$, i može se uzeti tip bifurkacije b).

Kod utilizatora se odvajaju izlazni tokovi pare B_4 i B_5 (u praksi bi razdjelnik pare došao nakon kotla, no ovdje je upravo za potrebe prikaza kompatibilnog s razmatranom teorijom pretpostavljeno da tokovi pare svaki za sebe posebno izlaze iz utilizatora). Produkt P je $B_4 + B_5$ i opet se uzima tip b).

Kod hladnjaka pečenog proizvoda uzima se sami ulazni proizvod kao ulazni tok B_6 , kao resurs podsustava, a ohlađeni proizvod kao njegov produkt B_7 , koji sa sobom odnosi još neku pretpostavljenu eksergiju, te se uz situaciju $F = B_6 - B_7$ uzima tip bifurkacije a).

Kuhalo ima kao resurs paru B_4 i promatrani produkt kondenzat s prisutnom osjetnom toplotom B_{11} , i uz $F = B_4 - B_{11}$ dolazi tip a).

U izmjenjivač za grijanje ulazi tok pare viših parametara B_5 a iz njega izlazi tok pare nižih parametara B_{13} , vrijedi $F = B_5 - B_{13}$, te se koristi prepozicija a).

Konačno, tok B_{13} je resurs podsustava zagrijača, iz kojega izlazi kondenzat s nekom osjetnom toplotom B_{12} , te i ovdje dolazi tip bifurkacije a) uz $F = B_{13} - B_{12}$.

Tako se mogu definirati sljedeći omjeri bifurkacija:

$x_5 = \frac{B_5}{B_4}$, $x_6 = \frac{B_6}{B_3}$, $x_7 = \frac{B_7}{B_6}$, $x_{11} = \frac{B_{11}}{B_4}$, $x_{12} = \frac{B_{12}}{B_{13}}$, i $x_{13} = \frac{B_{13}}{B_5}$, čime je podmatrica α_x (definirana u poglavlju 3.3.6) određena sustavom jednačbi:

$$\begin{aligned} -x_5 \times B_4 + B_5 &= 0 \\ -x_6 \times B_3 + B_6 &= 0 \\ -x_7 \times B_6 + B_7 &= 0 \\ -x_{11} \times B_4 + B_{11} &= 0 \\ -x_{12} \times B_{13} + B_{12} &= 0 \\ -x_{13} \times B_5 + B_{13} &= 0 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Za određivanje eksergetskih troškova treba postaviti vektor vanjskih određenja

$$Y^* = \begin{bmatrix} -Y^* \\ \omega \end{bmatrix} (m \times 1), \text{ gdje je } -Y^* \text{ jednak nuli, i na određenje utječu samo ulazni tokovi, tako da}$$

$$\text{je } [Y^*]^t = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ B_1 \ B_2 \ B_9 \ B_{15} \ B_{16} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Za eksergoekonomsko određivanje u obzir bi se uzeli i ekonomski troškovi svake pojedine komponente-podsustava $-\dot{Z}_i$, te za ulazne tokove u proces njihov specifični trošak c_{Fi} (kn/GJ), i vektor vanjskih određenja bi tada bio

$$[Y^*]^t = [-\dot{Z}_P \ -\dot{Z}_U \ -\dot{Z}_H \ -\dot{Z}_K \ -\dot{Z}_S \ -\dot{Z}_I \ -\dot{Z}_Z \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ c_{F_1} \times \dot{F}_1 \ c_{F_2} \times \dot{F}_2 \ c_{F_9} \times \dot{F}_9 \ c_{F_{15}} \times \dot{F}_{15} \ c_{F_{16}} \times \dot{F}_{16} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

gdje se indeks P odnosi na peć, U na utilizator, H na hladnjak, K na kuhalo, S na spremnik kondenzata, I na izmjenjivač grijanja, i Z na zagrijač.

Konačno, za određivanje eksergetskih troškova, matricni prikaz sustava jednačbi za proračun tokova procesa na slici 4.1, forme $A \times B^* = Y^*$ je sljedeći:

$$\begin{array}{c}
 \text{P1 incident. matrica} \\
 \text{P3 gubici} \\
 \text{P2 ulazni tokovi} \\
 \text{P4 bifurkacije}
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 \\
 0 & 1 \\
 \hline
 1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & -x_6 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -x_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_7 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -x_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -x_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 B^*_{11} \\
 B^*_{22} \\
 B^*_{33} \\
 B^*_{44} \\
 B^*_{55} \\
 B^*_{66} \\
 B^*_{77} \\
 \hline
 B^*_{88} \\
 B^*_{99} \\
 B^*_{1010} \\
 B^*_{1111} \\
 B^*_{1212} \\
 B^*_{1313} \\
 \hline
 B^*_{1414} \\
 B^*_{1515} \\
 B^*_{1616} \\
 B^*_{1717} \\
 B^*_{1818} \\
 \hline
 B^*_{1919} \\
 B^*_{2020} \\
 B^*_{2121} \\
 B^*_{2222} \\
 B^*_{2323} \\
 B^*_{2424}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \hline
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \hline
 B_1 \\
 B_2 \\
 B_9 \\
 B_{15} \\
 B_{16} \\
 \hline
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (4.2)$$

gdje se traže iznosi eksergetskih troškova sadržani u vektoru \mathbf{B}^* .

Izložena matrica je vrlo glomazna i njeno rešavanje je kompleksno te zahtijeva složeniju softversku podršku i veći broj koraka. Daljnji postupak će stoga biti podjela promatranog procesa na tri jednostavnije cjeline i njihovo zasebno rješavanje.

Ta će podjela biti izvedena na sljedeći način:

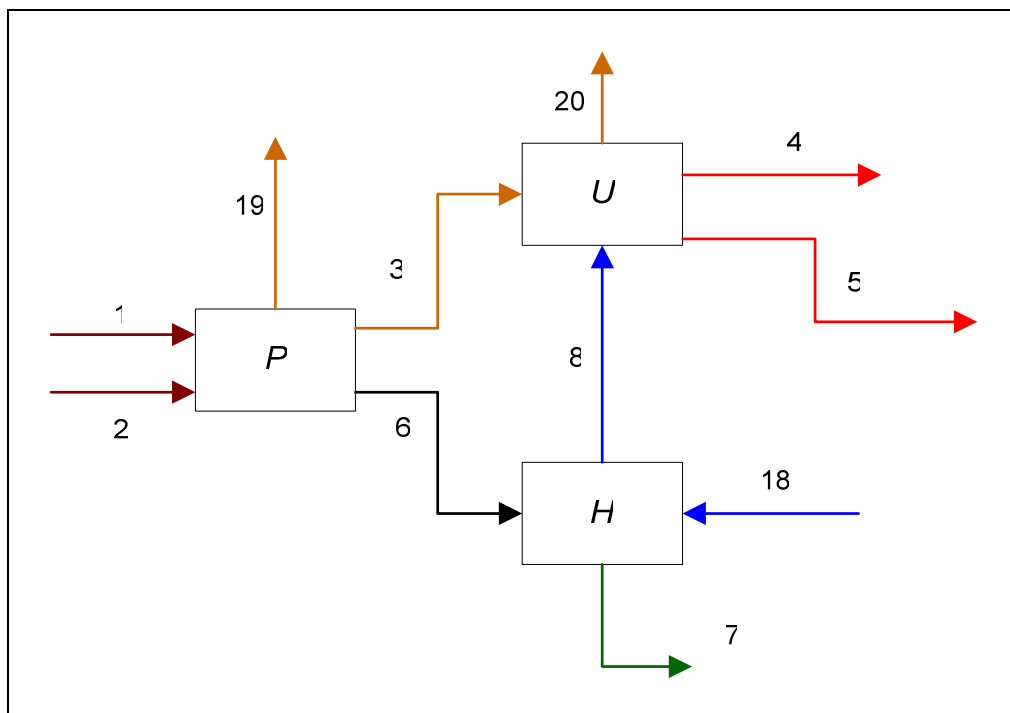
- prva će cjelina obuhvaćati peć, kotao utilizator i hladnjak - zagrijač napojne vode;
- u drugoj će cjelini biti obuhvaćeni kuhalo i spremnik kondenzata;
- treća će cjelina sadržavati zagrijač tople vode i procesni zagrijač.

U nastavku će biti prikazano zasebno rješavanje svakog od tih dijelova.

4.2 Analiza prve cjeline procesa

4.2.1 Određivanje eksergetskih troškova

U ovom je koraku izveden proračun eksergetskih troškova za cjelinu s peći P , utilizatorom U i hladnjakom H . Ulazni tokovi u proces su smjesa zraka i goriva 1, sirovina za pečenje 2, te tok vode iz spremnika 18 koji dolazi iz druge cjeline. Ovaj je dio prikazan na donjem dijagramu:



Slika 4.2: Dio procesa s peći, utilizatorom i hladnjakom

Tokovi pare iz utilizatora nisu više međutokovi već izlazni tokovi prema drugim cjelinama. Prisutni su dakle sljedeći tokovi:

Tablica 4.2: Tokovi tvari u prvom dijelu procesa

maseni tok	opis
ulazni tokovi	
B ₁	smjesa goriva i zraka
B ₂	sirovina za pečenje
B ₁₈	voda
tokovi gubitaka	
B ₁₉	gubici pri pečenju
B ₂₀	gubici iz utilizatora
međutokovi	
B ₃	dimni plinovi
B ₆	pečeni poluproizvod
B ₈	predgrijana voda
izlazni tokovi	
B ₄	para
B ₅	para
B ₇	proizvod 1 (pečenje)

U svemu, prisutna su tri podsustava i jedanaest tokova - 3 ulazna, 3 izlazna, 2 gubitaka i 4 međutoka. Po pretpostavci **P1** formira se incidentna matrica **A** (3×11). Potrebno je definirati još $m - n = 11 - 3 = 8$ jednadžbi.

Po pretpostavci **P2** formiraju se 3 jednadžbe za ulazne tokove B₁, B₂ i B₁₈, a po **P3** daljnje dvije za tokove gubitaka B₁₉ i B₂₀.

Potrebna su još tri dodatna izraza prema pretpostavci **P4**.

Peć P ima izlazni tok poluproizvoda B₆ i dimnih plinova B₃ kao produkte. Pretpostavit će se prema **P4b** bifurkacija $x_3 = B_6/B_3$, odnosno $-x_3B_3 + B_6 = 0$.

Utilizator U ima izlazne tokove pare kao produkte B₄ i B₅. Također prema **P4b** pretpostavlja se bifurkacija $x_4 = B_5/B_4$, odnosno $-x_4B_4 + B_5 = 0$.

U hladnjak H kao resurs ulazi tok napojne vode B₁₈, a jedan od produkata je tok predgrijane vode B₈. Prema **P4a** pretpostavlja se bifurkacija $x_8 = B_{18}/B_8$, odnosno $-x_8B_8 + B_{18} = 0$.

Uvrstivši navedene elemente, matrični prikaz sustava jednadžbi za proračun eksergetskih troškova tokova procesa na slici 4.2, forme $\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbf{Y}^*$ je sljedeći:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & -x_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -x_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_8 & 1 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_1^* \\ B_2^* \\ B_3^* \\ B_4^* \\ B_5^* \\ B_6^* \\ B_7^* \\ B_8^* \\ B_{18}^* \\ B_{19}^* \\ B_{20}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_{18} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Nakon matričnog izračuna, kao rješenje se dobiva sljedeći sustav jednadžbi:

$$\begin{aligned}
 B_1^* &= B_1 \\
 B_2^* &= B_2 \\
 B_3^* &= (B_2 + B_1) / (x_3 + 1) \\
 B_4^* &= [(x_3 + 1) \times B_{18} + x_8 \times B_2 + x_8 \times B_1] / [x_3 \times (x_4 \times x_8 + x_8) + x_4 \times x_8 + x_8] \\
 B_5^* &= [(x_3 \times x_4 + x_4) \times B_{18} + x_4 \times x_8 \times B_2 + x_4 \times x_8 \times B_1] / [x_3 \times (x_4 \times x_8 + x_8) + x_4 \times x_8 + x_8] \\
 B_6^* &= (x_3 \times B_2 + x_3 \times B_1) / (x_3 + 1) \\
 B_7^* &= [(x_8 + x_3 \times (x_8 - 1) - 1) \times B_{18} + x_3 \times x_8 \times B_2 + x_3 \times x_8 \times B_1] / (x_3 \times x_8 + x_8) \\
 B_8^* &= B_{18} / x_8 \\
 B_{18}^* &= B_{18} \\
 B_{19}^* &= 0 \\
 B_{20}^* &= 0
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Uvrštavanjem odabranih vrijednosti za tokove B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5 , B_6 i B_{18} dobivaju se odgovarajući iznosi eksergetskih troškova, što će biti obrađeno na drugom mjestu u radu.

4.2.2 Određivanje eksergoekonomskih troškova

Da bi se procijenili i monetarni troškovi promatranih tokova i produkata ovog dijela procesa, postavlja se jednadžba proračuna eksergoekonomskih troškova oblika $A \times \Pi = Z$, kao što je opisano u poglavlju 3.3.6. A ostaje matrica istog oblika kao pri određivanju eksergetskih troškova tokova, a Π predstavlja stupčasti vektor s nepoznatim veličinama eksergoekonomskih troškova, tj elementima $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_{18}, \pi_{19}$ i π_{20} . Stupčasti

vektor $Z = \begin{bmatrix} -Z \\ \Pi_e \end{bmatrix}$ sadrži vanjske ekonomske procjene. Kao što je opisano u poglavlju 3.2.1.,

elementi Z predstavljaju, za svaki od podsustava, zbroj troškova vezanih s kapitalnom investicijom i onih vezanih s pogonom i održavanjem, izraženih po jedinici vremena. Tako je za peć $Z_p = Z_p^{CI} + Z_p^{OM}$, za utilizator $Z_U = Z_U^{CI} + Z_U^{OM}$ te za hladnjak $Z_H = Z_H^{CI} + Z_H^{OM}$. Elementi Π_e su 0 za gubitke i bifurkacije, te $c_{Fi} \times B_i$ za ulazne tokove $i=1,2,18$, gdje su c_{Fi} jedinični troškovi ulaznih tokova izraženi u novčanim jedinicama po GJ. Matrični prikaz sustava jednadžbi je sada sljedeći:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & -x_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -x_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_8 & 1 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \\ \pi_6 \\ \pi_7 \\ \pi_8 \\ \pi_{18} \\ \pi_{19} \\ \pi_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{Z}_P \\ -\dot{Z}_U \\ -\dot{Z}_H \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline c_{F1} \cdot \dot{B}_1 \\ c_{F2} \cdot \dot{B}_2 \\ \hline c_{F18} \cdot \dot{B}_{18} \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Nakon izračuna, rješenje gornje matrice je sljedeći sustav jednažbi:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= c_{F1} \times B_1 \\
 \pi_2 &= c_{F2} \times B_2 \\
 \pi_3 &= (c_{F2} \times B_2 + c_{F1} \times B_1 + Z_P) / (x_3 + 1) \\
 \pi_4 &= [(x_3 + 1) \times c_{F18} \times B_{18} + x_8 \times c_{F2} \times B_2 + x_8 \times c_{F1} \times B_1 + (x_3 \times x_8 + x_8) \times Z_U + x_8 \times Z_P] / \\
 &\quad [x_3 \times (x_4 \times x_8 + x_8) + x_4 \times x_8 + x_8] \\
 \pi_5 &= [(x_3 \times x_4 + x_4) \times c_{F18} \times B_{18} + x_4 \times x_8 \times c_{F2} \times B_2 + x_4 \times x_8 \times c_{F1} \times B_1 + (x_3 \times x_4 \times x_8 + \\
 &\quad x_4 \times x_8) \times Z_U + x_4 \times x_8 \times Z_P] / [x_3 \times (x_4 \times x_8 + x_8) + x_4 \times x_8 + x_8] \\
 \pi_6 &= (x_3 \times c_{F2} \times B_2 + x_3 \times c_{F1} \times B_1 + x_3 \times Z_P) / (x_3 + 1) \\
 \pi_7 &= [(x_8 + x_3 \times (x_8 - 1) - 1) \times c_{F18} \times B_{18} + x_3 \times x_8 \times c_{F2} \times B_2 + x_3 \times x_8 \times c_{F1} \times B_1 + (x_3 \times x_8 + \\
 &\quad x_8) \times Z_H + x_3 \times x_8 \times Z_P] / (x_3 \times x_8 + x_8) \\
 \pi_8 &= (c_{F18} \times B_{18}) / x_8 \\
 \pi_{18} &= c_{F18} \times B_{18} \\
 \pi_{19} &= 0 \\
 \pi_{20} &= 0
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

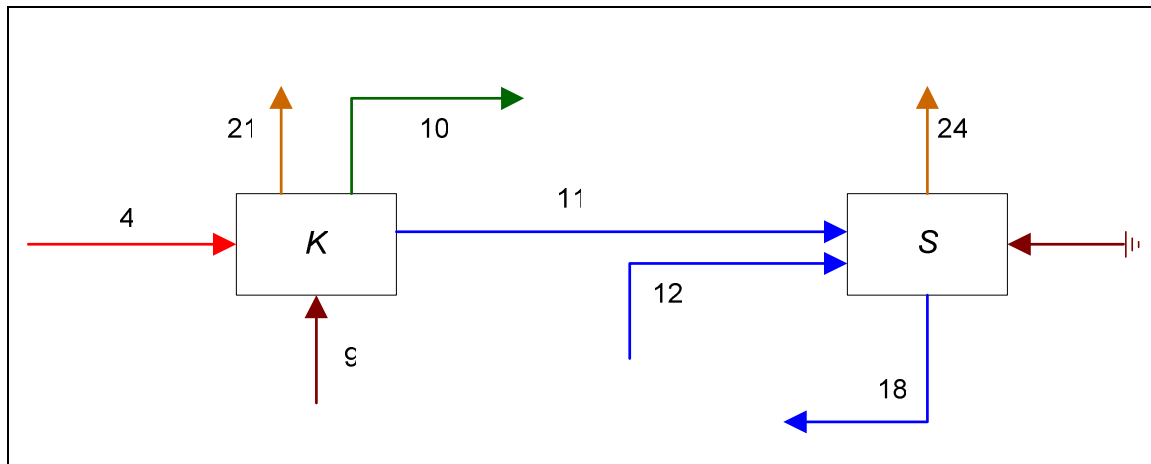
Odgovarajući iznosi traženih eksergoekonomskih troškova dobivaju se uvrštavanjem odabranih vrijednosti za tokove $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6,$ i B_{18} , zatim odabranih vrijednosti kapitalnih investicija podsustava Z_P^{CI}, Z_U^{CI} i Z_H^{CI} , vrijednosti troškova pogona i održavanja Z_P^{OM}, Z_U^{OM} i Z_H^{OM} , te uvrštavanjem specifičnih troškova ulaznih tokova c_{F1}, c_{F2} i c_{F18} .

Ovi će izračuni biti provedeni kasnije u radu.

4.3 Analiza druge cjeline procesa

4.3.1 Određivanje eksergetskih troškova

U daljnjem koraku, izvodi se proračun za cjelinu s kuhalom K i spremnikom kondenzata S. Ovdje su ulazni tokovi dio pare iz utilizatora 4, koji je izlazni tok iz prethodne cjeline, sirovina za kuhanje 9, i kondenzat 12 koji dolazi iz treće cjeline. Za tok nadoknadne vode u spremnik se, kako je opisano, uzima nulta eksergija te se on ne razmatra. Prikaz ovog dijela procesa dan je na donjem dijagramu:



Slika 4.3: Dio procesa s kuhalom i spremnikom kondenzata

U svemu su prisutni sljedeći tokovi:

Tablica 4.3: Tokovi tvari u drugom dijelu procesa

maseni tok	opis
ulazni tokovi	
B ₄	para
B ₉	sirovina za kuhanje
B ₁₂	kondenzat
tokovi gubitaka	
B ₂₁	gubici pri kuhanju
B ₂₄	gubici kod spremnika kondenzata
međutokovi	
B ₁₁	kondenzat
izlazni tokovi	
B ₁₀	proizvod 2 (kuhanje)
B ₁₈	voda

Ovdje su prisutna dva podsustava i osam tokova - 3 ulazna, 2 izlazna, 2 gubitaka i 1 međutok. Po pretpostavci **P1** nastaje incidentna matrica A $[2 \times 8]$. Potrebno je definirati još $m - n = 8 - 2 = 6$ jednadžbi.

Po pretpostavci **P2** formiraju se 3 jednadžbe za ulazne tokove B_4 , B_9 i B_{12} , a po **P3** daljnje dvije za tokove gubitaka B_{21} i B_{24} .

Za matricu A je potreban još jedan dodatni izraz prema pretpostavci **P4**.

Kuhalo K kao jedan od resursa ima paru B_4 , a jedan od produkata je kondenzat B_{11} . Prema načelu **P4a** može se pretpostaviti bifurkacija $x_{11} = B_{11}/B_4$, odnosno $-x_{11}B_4 + B_{11} = 0$.

Uvrštavanjem navedenoga, matrica za proračun eksergetskih troškova tokova na slici 4.3, $A \times B^* = Y^*$, ima ovaj oblik:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -x_{11} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_4^* \\ B_9^* \\ B_{10}^* \\ B_{11}^* \\ B_{12}^* \\ B_{18}^* \\ B_{21}^* \\ B_{24}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_4 \\ B_9 \\ B_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Rješavanjem gornje matrice dobiva se sljedeći sustav jednadžbi:

$$\begin{aligned} B_4^* &= B_4 \\ B_9^* &= B_9 \\ B_{10}^* &= B_9 + (1 - x_{11}) \times B_4 \\ B_{11}^* &= x_{11} \times B_4 \\ B_{12}^* &= B_{12} \\ B_{18}^* &= B_{12} + x_{11} \times B_4 \\ B_{21}^* &= 0 \\ B_{24}^* &= 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Odgovarajuće vrijednosti za B_4 , B_9 , B_{11} i B_{12} uvrštavat će se kasnije.

4.3.2 Određivanje eksergoekonomskih troškova

Ponovo, postavlja se jednadžba proračuna eksergoekonomskih troškova oblika $A \times \Pi = Z$, za drugi dio procesa. A je jednaka matrici pri određivanju eksergetskih troškova tokova, Π je ovdje stupčasti vektor s elementima π_4 , π_9 , π_{10} , π_{11} , π_{12} , π_{18} , π_{21} i π_{24} . Stupčasti vektor $Z =$

$\begin{bmatrix} -Z \\ \Pi_e \end{bmatrix}$ sadrži vanjske ekonomske procjene, gdje su elementi Z opet, za svaki od podsustava,

zbroj troškova vezanih s kapitalnom investicijom te troškova vezanih s pogonom i

održavanjem, po jedinici vremena. Za kuhalo je $Z_K = Z_K^{CI} + Z_K^{OM}$, a za spremnik kondenzata $Z_S = Z_S^{CI} + Z_S^{OM}$. Elementi Π_e ostaju 0 za gubitke i bifurkacije, te $c_{Fi} \times B_i$ za ulazne tokove $i=4, 9$ i 12, gdje su c_{Fi} jedinični troškovi ulaznih tokova, u novčanim jedinicama po GJ. Matrični prikaz za drugi dio procesa je tako sljedeći:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & -1 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 -x_{11} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_4 \\ \pi_9 \\ \pi_{10} \\ \pi_{11} \\ \pi_{12} \\ \pi_{18} \\ \pi_{21} \\ \pi_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{Z}_K \\ -\dot{Z}_S \\ \hline 0 \\ 0 \\ \hline c_{F4} \times \dot{B}_4 \\ c_{F9} \times \dot{B}_9 \\ c_{F12} \times \dot{B}_{12} \\ \hline 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Proračunom gornje matrice dobiva se sljedeći sustav jednadžbi:

$$\begin{aligned}
 \pi_4 &= c_{F4} \times B_4 \\
 \pi_9 &= c_{F9} \times B_9 \\
 \pi_{10} &= c_{F9} \times B_9 + (1 - x_{11}) \times c_{F4} \times B_4 + Z_K \\
 \pi_{11} &= x_{11} \times c_{F4} \times B_4 \\
 \pi_{12} &= c_{F12} \times B_{12} \\
 \pi_{18} &= c_{F12} \times B_{12} + x_{11} \times c_{F4} \times B_4 + Z_S \\
 \pi_{21} &= 0 \\
 \pi_{24} &= 0
 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Iznosi odgovarajućih eksergoekonomskih troškova dolaze po uvrštavanju biranih vrijednosti tokova B_4, B_9, B_{11} i B_{12} , biranih vrijednosti kapitalnih investicija podsustava Z_K^{CI} i Z_S^{CI} , vrijednosti troškova pogona i održavanja Z_K^{OM} i Z_S^{OM} , te uvrštavanjem specifičnih troškova ulaznih tokova c_{F4}, c_{F9} i c_{F12} .

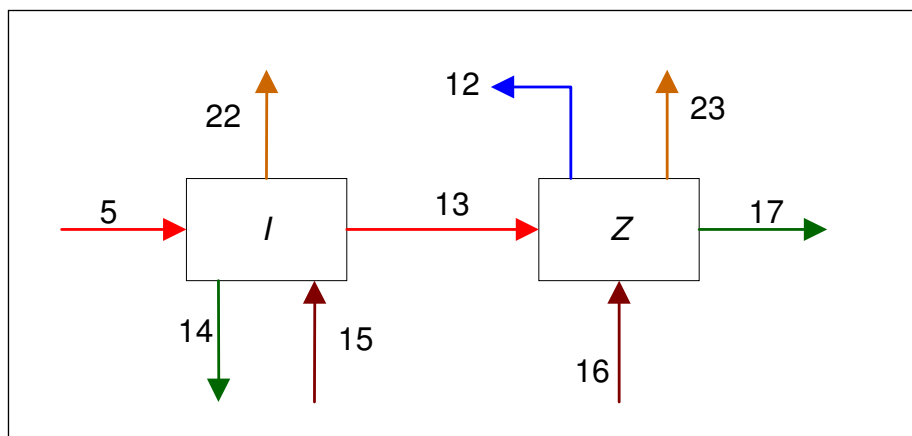
Uvrštavanje odbranih vrijednosti i kalkulacije će se provesti kasnije.

4.4 Analiza treće cjeline procesa

4.4.1 Određivanje eksergetskih troškova

U posljednjoj cjelini procesa, kalkulacija se izvodi za dio s izmjenjivačem I za pripremu vode za grijanje, i zagrijačem Z određene sirovine. Ulazni tokovi su tok 5 pare u izmjenjivač P, koja je izlazni tok iz prve cjeline, tok povratne tople vode 15, i tok sirovine za zagrijavanje 16.

Prikaz trećeg dijela promatranog procesa dan je na donjem dijagramu:



Slika 4.4: Dio procesa s izmjenjivačem i zagrijačem

Prisutni su sljedeći tokovi:

Tablica 4.4: Tokovi tvari u trećem dijelu procesa

maseni tok	opis
ulazni tokovi	
B ₅	para
B ₁₅	povratna topla voda
B ₁₆	sirovina za zagrijavanje
tokovi gubitaka	
B ₂₂	gubici pri grijanju vode
B ₂₃	gubici pri procesnom zagrijavanju
međutokovi	
B ₁₃	para
izlazni tokovi	
B ₁₂	kondenzat
B ₁₄	polazna topla voda
B ₁₇	proizvod 3 (zagrijavanje)

Prisutna su dva podsustava i devet tokova - 3 ulazna, 3 izlazna, 2 gubitaka i 1 međutok. Po pretpostavci **P1** javlja se incidentna matrica A [2×9]. Potrebno je definirati još $m - n = 9 - 2 = 7$ jednadžbi.

Prema **P2** formiraju se tri jednadžbe za ulazne tokove B₅, B₁₅ i B₁₆, a prema **P3** još dvije za tokove gubitaka B₂₂ i B₂₃.

Za matricu A je potrebna su još dva dodatna izraza prema pretpostavci **P4**.

Kondenzat B₁₂ može se promatrati kao produkt zagrijača Z koji je dio njegovog resursa - pare B₁₃. Prema **P4a** može se uzeti u obzir bifurkacija $x_{12}=B_{12}/B_{13}$, tj. $-x_{12}B_{13} + B_{12} = 0$.

Tok B14 zagrijane polazne vode je jedan od produkata izmjenjivača I, čiji je jedan od resursa tok povratne vode B 15, i opet prema **P4a** dolazi bifurkacija $x_{15}=B_{15}/B_{14}$, tj. $-x_{15}B_{14} + B_{15} = 0$.

Uvrštavanjem navedenoga, matrica za proračun eksergetskih troškova tokova na slici 4.4, je sljedeća:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & -x_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -x_{15} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_5^* \\ B_{12}^* \\ B_{13}^* \\ B_{14}^* \\ B_{15}^* \\ B_{16}^* \\ B_{17}^* \\ B_{22}^* \\ B_{23}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_5 \\ B_{15} \\ B_{16} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Rješavanjem gornje matrice dobiva se sljedeći sustav jednadžbi:

$$\begin{aligned}
 B_5^* &= B_5 \\
 B_{12}^* &= [x_{12} \times (x_{15} - 1) \times B_{15} + x_{12} \times x_{15} \times B_5] / x_{15} \\
 B_{13}^* &= [(x_{15} - 1) \times B_{15} + x_{15} \times B_5] / x_{15} \\
 B_{14}^* &= B_{15} / x_{15} \\
 B_{15}^* &= B_{15} \\
 B_{16}^* &= B_{16} \\
 B_{17}^* &= [-x_{15} \times B_{16} + (-x_{15} + x_{12} \times (x_{15} - 1) + 1) \times B_{15} + (x_{12} \times x_{15} - x_{15}) \times B_5] / x_{15} \\
 B_{22}^* &= 0 \\
 B_{23}^* &= 0
 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Odgovarajuće vrijednosti za B_5 , B_{12} , B_{13} i B_{14} , B_{15} i B_{16} unose se pri kasnijim kalkulacijama.

4.4.2 Određivanje eksergoekonomskih troškova

Za jednadžbu proračuna eksergoekonomskih troškova, Π je stupčasti vektor s elementima $\pi_5, \pi_{12}, \pi_{13}, \pi_{14}, \pi_{15}, \pi_{16}, \pi_{17}, \pi_{22}$ i π_{23} . Kod stupčastog vektora Z , predstavljanje troškova za svaki podsustav po jedinici vremena je, analogno prethodnim prikazima, sljedeće: za izmjenjivač je $Z_I = Z_I^{CI} + Z_I^{OM}$, a za zagrijač $Z_Z = Z_Z^{CI} + Z_Z^{OM}$. Elementi Π_e su, kao i prethodno, nulti za gubitke i bifurkacije, te $c_{Fi} \times B_i$ za ulazne tokove $i = 5, 15$ i 16 . Matrični prikaz jednadžbe proračuna eksergoekonomskih troškova za treći dio procesa je, prema tome:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 \hline
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 1 & -x_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -x_{15} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_5 \\ \pi_{12} \\ \pi_{13} \\ \pi_{14} \\ \pi_{15} \\ \pi_{16} \\ \pi_{17} \\ \pi_{22} \\ \pi_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{Z}_I \\ -\dot{Z}_Z \\ \hline 0 \\ 0 \\ \hline c_{F5} \times \dot{B}_5 \\ c_{F15} \times \dot{B}_{15} \\ c_{F16} \times \dot{B}_{16} \\ \hline 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Sustav jednadžbi dobiven proračunom gornje matrice je sljedeći:

$$\begin{aligned}
 \pi_5 &= c_{F5} \times B_5 \\
 \pi_{12} &= (x_{12} \times (x_{15} - 1) \times c_{F15} \times B_{15} + x_{12} \times x_{15} \times c_{F5} \times B_5 + x_{12} \times x_{15} \times Z_I) / x_{15} \\
 \pi_{13} &= [(x_{15} - 1) \times c_{F15} \times B_{15} + x_{15} \times c_{F5} \times B_5 + x_{15} \times Z_I] / x_{15} \\
 \pi_{14} &= c_{F15} \times B_{15} / x_{15} \\
 \pi_{15} &= c_{F15} \times B_{15} \\
 \pi_{16} &= c_{F16} \times B_{16} \\
 \pi_{17} &= -[x_{15} \times c_{F16} \times B_{16} + (-x_{15} + x_{12} \times (x_{15} - 1) + 1) \times c_{F15} \times B_{15} + (x_{12} \times x_{15} - x_{15}) \times c_{F5} \times B_5 - \\
 &\quad x_{15} \times Z_Z + (x_{12} \times x_{15} - x_{15}) \times Z_I] / x_{15} \\
 \pi_{22} &= 0 \\
 \pi_{23} &= 0
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Potrebne odabrane vrijednosti tokova B_5 , B_{12} , B_{13} i B_{14} , B_{15} i B_{16} , birane vrijednosti kapitalnih investicija podsustava Z_I^{CI} i Z_Z^{CI} , vrijednosti troškova pogona i održavanja Z_I^{OM} i Z_Z^{OM} , te specifični troškovi ulaznih tokova c_{F5} , c_{F15} i c_{F16} , uvrstit će se u narednom koraku.

4.5 Uvrštavanja ulaznih vrijednosti i rezultati

4.5.1 Pretpostavke

Kao što se vidi iz prethodnih poglavlja, ako se proces promatra kao cjelina, njegovi ulazni tokovi, dakle resurs cijelog sustava, su tokovi B_1 , B_2 , B_9 , B_{15} i B_{16} . Izlazni tokovi, tj. produkt cijelog sustava, su tokovi B_7 , B_{10} , B_{14} i B_{17} . Za pojedine cjeline sustava kao ulazni tokovi se javljaju i pojedini međutokovi, koji su onda i izlazni tokovi tj. produkti drugih cjelina, a to su međutokovi B_4 , B_5 , B_{12} i B_{18} .

Pojedini eksergetski troškovi, računani za zasebne cjeline procesa, su tada varijable ovisne o tim međutokovima koji dolaze iz drugih dijelova procesa. Ovo ne predstavlja problem kod kalkulacije eksergetskih troškova, jer su ulazne veličine za gore dobivene izraze uvijek eksergije tokova, a ne eksergetski troškovi tokova, koji se dobivaju kao rezultat. Za eksergije tokova se pretpostavlja da su poznate i da se dobivaju mjerenjima toplinskih veličina tokova u procesu tijekom samog pogona, i drugim određivanjima.

Kod ovakvog pokušaja razbijanja složenijeg sustava na jednostavnije cjeline i njihovog zasebnog proračunavanja, problem se javlja kod izračunavanja eksergoekonomskih troškova. Naime, ulazne veličine u proračunu su ovdje i specifični troškovi ulaznih tokova, CF_i , traženi u novčanim jedinicama po GJ eksergije toka. Za tokove koji su resurs cjelokupnog procesa se pretpostavlja da su poznati, konkretno to su specifični troškovi CF_1 , CF_2 , CF_9 , CF_{15} i CF_{16} , no kao ulazne veličine se javljaju i specifični troškovi međutokova, a to su CF_4 , CF_5 , CF_{12} i CF_{18} . Njihove vrijednosti u samom procesu normalno nisu poznate, no za potrebe ovakvog modeliranja bit će pretpostavljene.

4.5.2 Uvrštavanje i rezultati za prvu cjelinu

Za eksergetske troškove, za prvu cjelinu procesa sa peći, utilizatorom i hladnjakom se mogu pretpostavljeno izmjeriti i prema skupu izraza (4.4) uvrstiti sljedeće toplinske snage tokova, koje onda rezultiraju navedenim iznosima eksergetskih troškova po toku:

Tablica 4.5: Rezultati eksergetskih troškova za prvu cjelinu

tok i	B_i (kW)	B_i^* (kW)	k_i^*
1	300	300	1
2	0	0	0
3	200	214,3	1,07
4	95	107,36	1,13
5	130	146,9	1,13
6	80	85,7	1,07
7	0	65,7	0
8	40	40	1
18	20	20	1
19	0	0	0
20	0	0	0

Vrijednosti za pojedine eksergije odnosno eksergetske troškove tokova se prikazuju u kW kao toplinska snaga toka. Vrijednosti jediničnog eksergetskog troška k_i^* , koji je jednak B_i^*/B_i predstavljaju inverziju eksergetskog stupnja djelovanja za određeni tok.

Vrijednosti k_i^* za tokove B_1 , B_8 i B_{18} su jedinične, što je očekivano jer su ovdje to ulazni tokovi, pa je njihov eksergetski trošak jednak ulaznoj vrijednosti, dakle u procesu se ne troši dodatna eksergija za njihovo formiranje. Ulazni tok B_2 je sirovina za pečenje, pa je njena eksergija i trošak jednak nuli. Tokovi gubitaka, realno govoreći, odnose određenu potencijalno iskoristivu toplinu sa sobom, no ako se ona ne namjerava iskorištavati, njihova stvarna eksergija je nula, pa tako i eksergetski trošak.

Variranjem ulaznih veličina može se ispitivati osjetljivost sustava na ulazne promjene. To se prvenstveno odnosi na eksergiju ulaznog toka goriva B_1 , zatim na tokove B_8 i B_{18} , koji dolaze iz drugih dijelova procesa.

Za određivanje eksergoekonomskih troškova, pored ulaznih vrijednosti eksergija tokova, potrebno je zadati i troškove pojedinih komponenti, te specifične troškove ulaznih tokova. Pritom se radi pojednostavljenja uzimaju sljedeće pretpostavke:

- u kapitalna ulaganja za pojedinu komponentu uključeni su investicija, ugradnja, troškovi kredita i sl;
- troškovi pogona i održavanja su konstantni svake godine tijekom životnog vijeka;
- inflacija tijekom životnog vijeka postrojenja je zanemarena,
- radni vijek svake komponente je jednak radnom vijeku cijelog postrojenja, koji pretpostavljeno iznosi 12 godina.

Prisutne komponente - podsustavi su peć, utilizator i hladnjak poluproizvoda.

Za peć:

Uzima se da su kapitalna ulaganja u peć iznosa 110 000 kn. Za troškove održavanja komponente pretpostavit će se iznos od 8 000 kn godišnje. Tijekom životnog vijeka to iznosi $12 \times 8\,000 = 96\,000$ kn. Dakle, troškovi $Z_P = Z^{Cl}_P + Z^{OM}_P = 110\,000 + 96\,000 = 206\,000$ kn. Uzima se 2000 sati rada godišnje, što je ukupno 24 000 sati. Kako će se eksergoekonomski troškovi izražavati u lipama po kJ i sekundi, to je potrebno izraziti vijek u sekundama, a on iznosi $8,64 \times 10^7$ sekundi. Dijeljenjem s tim iznosom dobije se ukupni trošak za ovu komponentu po sekundi, i on je $\dot{Z}_P = 0,25$ lp/s.

Za utilizator:

Pretpostavljena kapitalna ulaganja u kotao utilizator su 40 000 kn. Za troškove održavanja utilizatora uzima se iznos od 3 500 kn godišnje, što tijekom životnog vijeka iznosi $12 \times 3\,500 = 42\,000$ kn, i $Z_U = Z^{Cl}_U + Z^{OM}_U = 82\,000$ kn. Dijeljenjem s $8,64 \times 10^7$ sekundi ukupni trošak za ovu komponentu po sekundi iznosi $\dot{Z}_U = 0,1$ lp/s.

Za hladnjak:

Kapitalna ulaganja u hladnjak pečenog poluproizvoda su, kao početna pretpostavka, 25 000 kn. Za troškove održavanja hladnjaka uzima se 3 200 kn godišnje, tijekom životnog vijeka to je $12 \times 3\,200 = 38\,400$ kn, i $Z_H = Z^{Cl}_H + Z^{OM}_H = 63\,400$ kn. Dijeljenjem s $8,64 \times 10^7$ sekundi ukupni trošak za hladnjak po jedinici vremena životnog vijeka iznosi $\dot{Z}_H = 0,07$ lp/s.

Specifični troškovi ulaznih tokova:

Za tok ulaznog goriva B_1 uvrštena je eksergija od 300 kW, odnosno prikazano po jedinici vremena $\dot{B}_1 = 300$ kJ/s. Ako se kao gorivo pretpostavi prirodni plin ogrijevne vrijednosti 33 MJ/m³, uzima se specifični trošak $c_{F1} = 0,0023$ lp/kJ.

Eksergetski tok B_2 za ulazni zrak i njegov specifični trošak su nula.

Za tok tople vode iz spremnika kondenzata B_{18} koji dolazi iz druge cjeline procesa pretpostavlja se ulazna eksergija od 20 kW, odnosno $\dot{B}_1 = 20$ kJ/s. Pretpostavit će se ulazni specifični trošak za njegovo dobivanje $c_{F1} = 0,0002$ lp/kJ.

Uvrštenjem svega navedenoga u izraze (4.6), dobije se tablica sa sljedećim rezultatima:

Tablica 4.6: Rezultati izračuna eksergoekonomskih troškova za prvu cjelinu

tok i	B_i (kW)	π_i [lp/s]
1	300	0,69
2	0	0
3	200	0,67
4	95	0,33
5	130	0,45
6	80	0,27
7	0	0,34
8	40	0,008
18	20	0,004
19	0	0
20	0	0

čime su dobiveni eksergoekonomski troškovi $\pi_1 \dots \pi_{18}$ za svaki od tokova $B_1 \dots B_{18}$ u lipama po sekundi.

Variranjem ulaznih veličina, tj. Z^{Cl}_i , Z^{OM}_i i c_{Fi} može se ustanoviti osjetljivost ekonomskih parametara sustava na promjenu ulaznih ekonomskih veličina. Na primjer, variranje c_{F1} u rasponu 0,002 do 0,004 lp/kJ daje sljedeće rezultate:

Tablica 4.7: Utjecaj variranja specifičnih ulaznih troškova na izračun eksergoekonomskih troškova

tok i	B_i (kW)	$c_{F1} = 0,002$ lp/kJ	$c_{F1} = 0,003$ lp/kJ	$c_{F1} = 0,004$ lp/kJ
		π_i [lp/s]		
1	300	0,6	0,9	1,2
2	0	0	0	0
3	200	0,61	0,821	1,04
4	95	0,3	0,39	0,48
5	130	0,41	0,54	0,66
6	80	0,24	0,33	0,41
7	0	0,31	0,39	0,48
8	40	0,008	0,008	0,008
18	20	0,004	0,004	0,004
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

4.5.3 Uvrštavanje i rezultati za drugu cjelinu procesa

U drugoj cjelini procesa s kuhalom i spremnikom kondenzata, uvrštavaju se ulazne eksergije tokova prema tablici 4.8. Prema skupu izraza (4.6), dobiju se sljedeće vrijednosti eksergetskih troškova:

Tablica 4.8: Rezultati eksergetskih troškova za drugu cjelinu

tok i	B_i (kW)	B_i^* (kW)	k_i^*
4	95	95	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	30	30	1
12	25	25	1
18	20	55	2,75
21	0	0	0
24	0	0	0

Jedinični eksergetski trošak za ulazne tokove je, kao i prethodno, jednak jedinici.

Kod određivanja eksergoekonomskih troškova zadržavaju se pretpostavke uvedene radi pojednostavljenja. Komponente ovdje prisutne su kuhalo i spremnik kondenzata.

Vanjska ekonomska određenja za kuhalo:

Pretpostavljena kapitalna ulaganja u kuhalo su 30 000 kn. Za troškove održavanja godišnje se uzima iznos od 4 000 kn, odnosno 48 000 kn tijekom dvanaest godina. S time je $Z_K = Z_K^{Cl} + Z_K^{OM} = 30\,000\text{ kn} + 48\,000\text{ kn} = 78\,000\text{ kn}$. Svedeno po sekundi, ukupni trošak za kuhalo po jedinici vremena životnog vijeka iznosi $\dot{Z}_K = 0,09\text{ lp/s}$.

Vanjska ekonomska određenja za spremnik kondenzata:

Uzet će se kapitalna ulaganja od 25 000 kn. Troškovi održavanja godišnje su 2 400 kn, odnosno 28 800 kn tijekom životnog vijeka, $Z_S = Z_S^{Cl} + Z_S^{OM} = 53\,800\text{ kn}$. Ukupni trošak za spremnik kondenzata sveden na jedinicu vremena životnog vijeka je tada $\dot{Z}_S = 0,062\text{ lp/s}$.

Specifični troškovi ulaznih tokova:

Za tok ulaznog goriva B_4 , koji predstavlja paru koja dolazi iz prve cjeline, uzeta je eksergija od 95 kW, odnosno prikazano po jedinici vremena je $\dot{B}_4 = 95\text{ kJ/s}$. Uz rezultat prethodno dobiven za π_4 , uzet će se da je $c_{F4} = 0,0034\text{ lp/kJ}$. c_{F9} iznosi 0 jer je i za B_9 pretpostavljena nulta vrijednost. Za kondenzat B_{12} će se pretpostaviti $c_{F12} = 0,0003\text{ lp/kJ}$.

Uvrštavanjem gore dobivenih vrijednosti u skup izraza (4.10), dobivaju se rezultati tablično prikazani u nastavku.

Tablica 4.9: Rezultati izračuna eksergoekonomskih troškova za drugu cjelinu

tok i	B_i (kW)	π_i [lp/s]
4	95	0,323
9	0	0
10	0	0,311
11	30	0,102
12	25	0,0075
18	20	0,171
21	0	0
24	0	0

Eksergoekonomski trošak toka pare π_4 po kalkulaciji izlazi 0,323 lp/s, što ne odstupa bitno od vrijednosti 0,33 lp/s dobivene za taj isti tok pri proračunu prve cjeline i korištene za određivanje c_{F4} .

Ulazne vrijednosti mogu biti varirane kasnije u svrhu ustanovljenja osjetljivosti ekonomskih parametara procesa na njihove promjene.

4.5.4 Uvrštavanje i rezultati za treću cjelinu procesa

U trećoj cjelini procesa gdje su prisutni izmjenjivač za ogrijevnu vodu i zagrijač sirovine uvrštavaju se ulazne eksergije tokova prema tablici 4.10. Rješavanje skupa izraza (4.12) daje vrijednosti eksergetskih troškova u navedenom tabličnom prikazu.

Tablica 4.10: Rezultati eksergetskih troškova za treću cjelinu

tok i	B_i (kW)	B_i^* (kW)	k_i^*
5	130	130	1
12	20	22,5	1,125
13	80	90	1,125
14	50	50	1
15	10	10	1
16	0	0	0
17	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0

Ulazna sirovina, izlazni proizvod i tokovi gubitaka imaju eksergetske troškove jednake nuli.

Za određivanje eksergoekonomskih troškova, razmatraju se vanjska ekonomska određenja za izmjenjivač i zagrijač, te za ulazne tokove pare, povratne tople vode i sirovine za zagrijavanje.

Vanjska ekonomska određenja za izmjenjivač:

Pretpostavlja se investicija u izmjenjivač od 38 000 kn. Troškovi održavanja su postavljeni na 4 000 kn godišnje, odnosno 48 000 kn tijekom životnog vijeka. Zbrajanjem ukupni trošak iznosi $Z_I = Z^{CI}_I + Z^{OM}_I = 86\,000$ kn. Ukupni trošak za izmjenjivač sveden na jedinicu vremena životnog vijeka je tada $\dot{Z}_I = 0,1$ lp/s.

Vanjska ekonomska određenja za zagrijač:

Za zagrijač ulazne sirovine se pretpostavlja investicija od 42 000 kn. Za troškove pogona i održavanja se pretpostavlja 5 000 kn godišnje, odnosno 60 000 kn tijekom životnog vijeka. Ukupni trošak zagrijača tada iznosi $Z_Z = Z^{CI}_Z + Z^{OM}_Z = 102\,000$ kn. Ukupni trošak za zagrijač sveden na sekunde životnog vijeka je tada $\dot{Z}_Z = 0,12$ lp/s.

Specifični troškovi ulaznih tokova:

Ulazni tok pare B_5 , koji predstavlja paru koja dolazi iz prve cjeline, ima eksergiju od 130 kJ/s, a iz kalkulacije za prvu cjelinu je za π_5 dobiveno 0,45 lp/s. Iz toga proizlazi vrijednost specifičnog troška c_{F5} od 0,0034 lp/kJ. Za tok povratne tople vode uzet će se $c_{F15} = 0,001$ lp/kJ, dok je trošak ulazne sirovine jednak nuli.

Gore određene vrijednosti se uvrštavaju u skup izraza (4.14), te dobivaju donji rezultati.

Tablica 4.11: Rezultati izračuna eksergoekonomskih troškova za treću cjelinu

tok i	B_i (kW)	π_i [lp/s]
5	130	0,442
12	20	0,134
13	80	0,538
14	50	0,005
15	10	0,001
16	0	0
17	0	0,523
22	0	0
23	0	0

Eksergoekonomski trošak za π_5 po sadašnjoj kalkulaciji 0,442 lp/s, i to nije bitno odstupanje od prvotnih 0,45 lp/s. Analiza osjetljivosti parametara na promjene ulaznih vrijednosti će se izvesti u nastavku.

4.6 Variranje ulaznih vrijednosti

4.6.1 Osjetljivost modela na promjene ulaznih specifičnih troškova

Radi provjere osjetljivosti pretpostavljenog modela procesa na ulazne promjene, izvršit će se variranje nekih ulaznih parametara. Pretpostavljene eksergetske vrijednosti tokova neće se varirati, obzirom da je utjecaj ekonomskih parametara interesantniji.

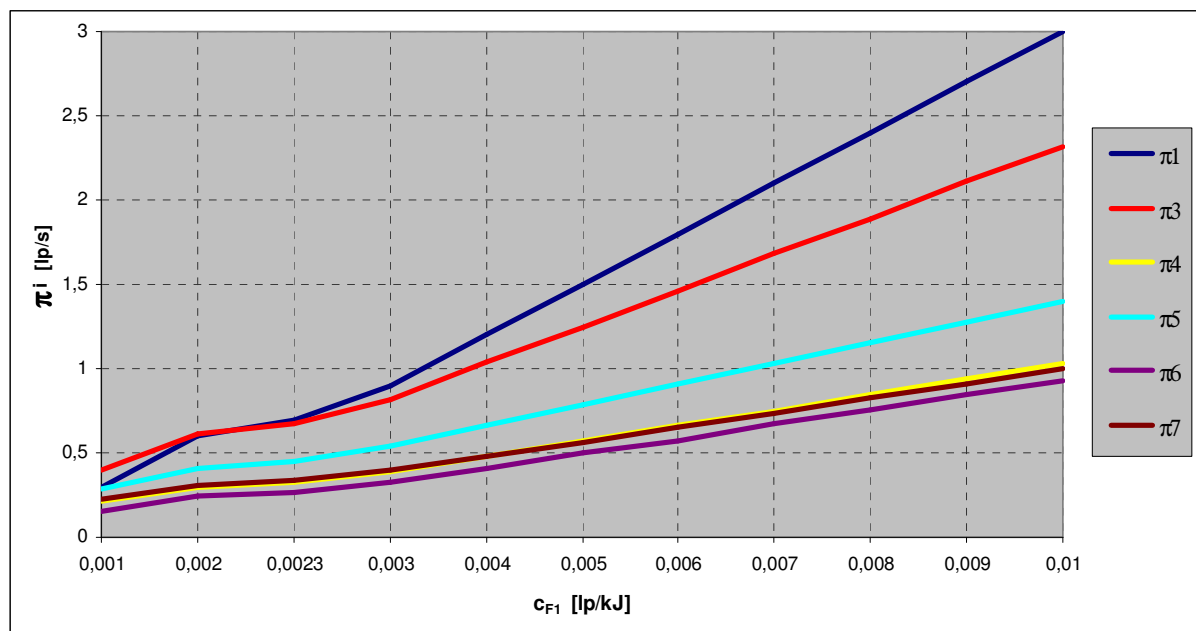
Postaviti će se promjene ulaznih specifičnih troškova, i to bazirane na promjeni cijene goriva c_{F1} kao jedine stvarno ulazne veličine u cjelokupni proces. Promjene specifičnih troškova drugih ulaznih tokova u cjeline procesa - c_{F4} , c_{F5} i c_{F12} - izvedene su iteracijom prema c_{F1} .

Pored početne vrijednosti za c_{F1} od 0,0023 lp/kJ varirano je još 10 vrijednosti. c_{F4} , c_{F5} i c_{F12} su usklađeni prema tome. Tablica ulaznih specifičnih troškova koji se mijenjaju je sljedeća:

Tablica 4.12: Varirane ulazne vrijednosti za određene c_{Fi}

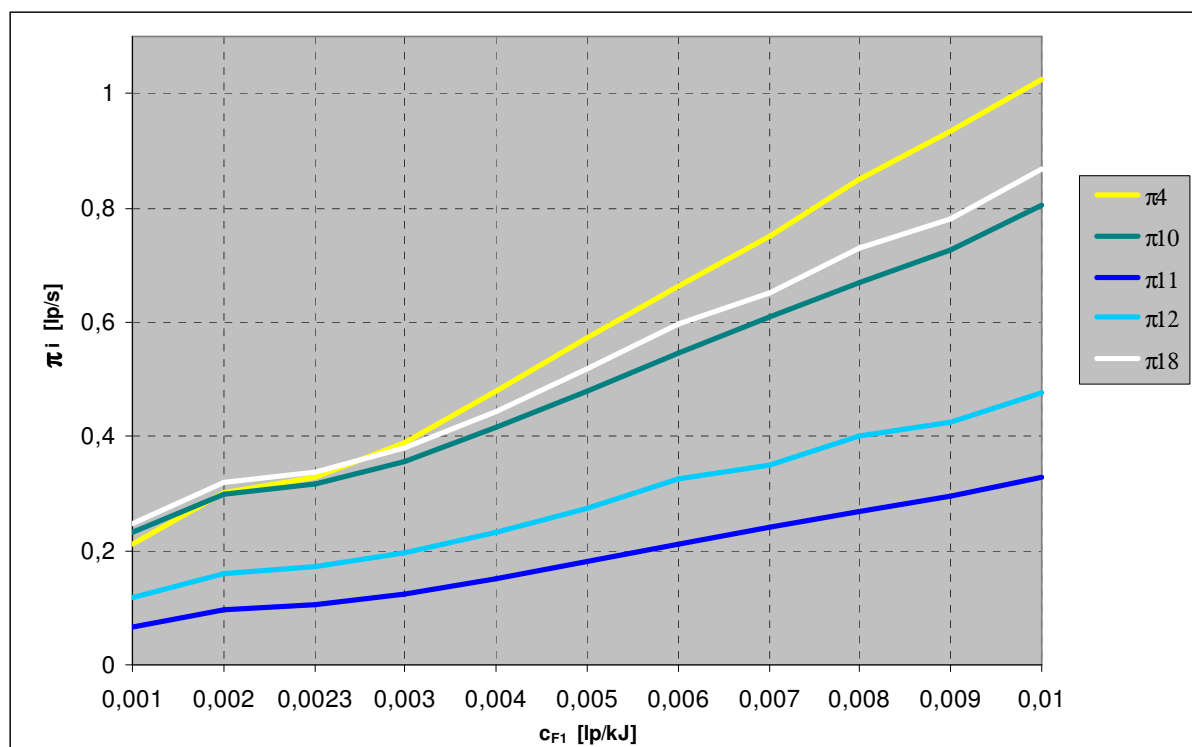
c_{F1} [lp/kJ]	0,001	0,002	0,0023	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
c_{F4}, c_{F5} [lp/kJ]	0,0022	0,0032	0,0035	0,0041	0,0051	0,0060	0,0070	0,0079	0,0089	0,0098	0,0108
c_{F12} [lp/kJ]	0,0047	0,0064	0,0069	0,0078	0,0093	0,011	0,013	0,014	0,016	0,017	0,019

U prvoj cjelini procesa eksergoekonomski troškovi π_i tokova B_1 , B_3 , B_4 , B_5 , B_6 , i B_7 uz gornje variranje ulaznih varijabli poprimaju vrijednosti prema slici 4.5:

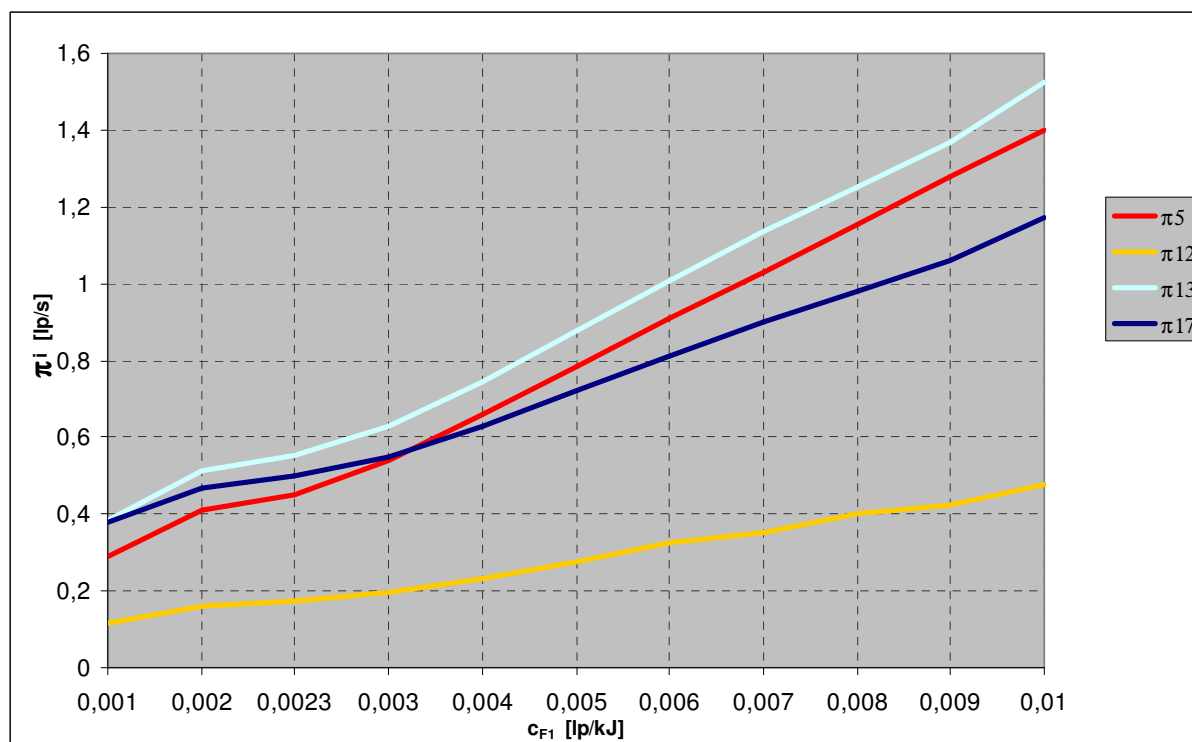


Slika 4.5: Variranja π_i s promjenama ulaznih parametara u prvoj cjelini

Za drugu cjelinu i za tokove B_4 , B_{10} , B_{11} , B_{12} i B_{18} prikaz promjena π_i je dan na slici 4.6:

Slika 4.6: Variranja π_i s promjenama ulaznih parametara u drugoj cjelini

U trećoj cjelini vrijednosti π_i za tokove B_4 , B_{10} , B_{11} , B_{12} i B_{18} poprimaju izgled prema slici 4.7:

Slika 4.7: Variranja π_i s promjenama ulaznih parametara u trećoj cjelini

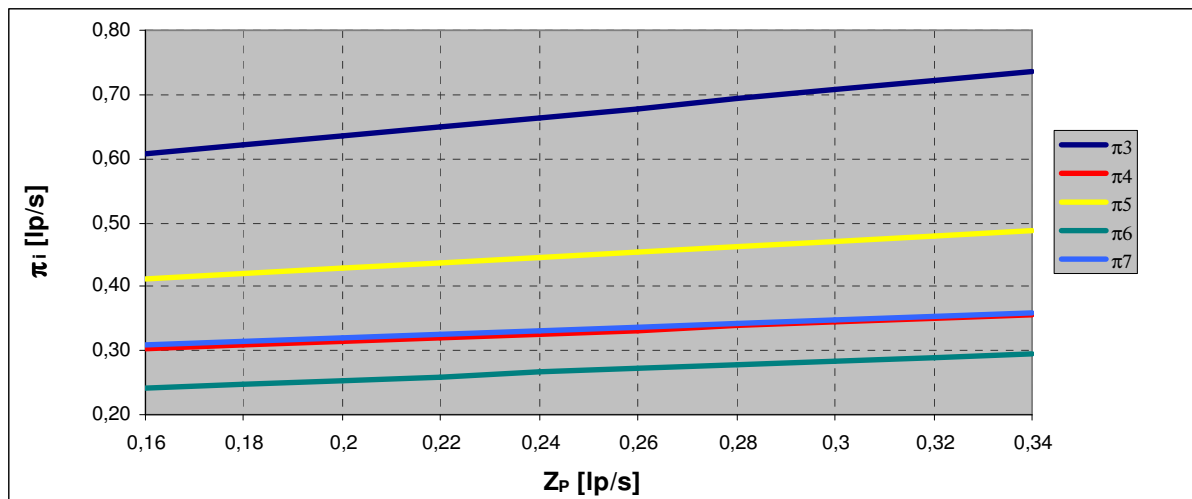
Iako je za promatranu eksergiju izlaznih tokova proizvoda B_7 , B_{10} i B_{16} pretpostavljena nulta vrijednost, za njihove eksergoekonomske troškove π_7 , π_{10} i π_{16} se mogu pretpostaviti vrijednosti veće od nule jer se tada promatraju kao gubitak.

4.6.2 Osjetljivost modela na variranje troškova za komponente

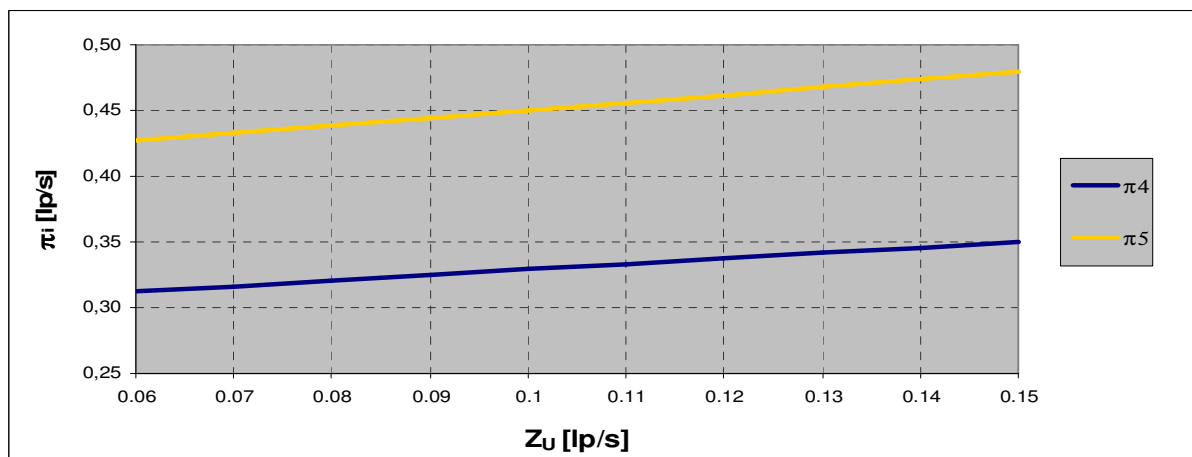
Promjenom vrijednosti troškova Z_i za svaku komponentu sustava, eksergoekonomski troškovi pojedinih tokova također variraju.

Prema dobivenom matematičkom modelu, promjenom vrijednosti za Z_P peći mijenjaju se π_3 , π_4 , π_5 , π_6 i π_7 ; mijenjanjem Z_U za utilizator variraju π_4 i π_5 ; variranjem Z_H hladnjaka mijenja se π_7 ; promjenom Z_K kuhala π_{10} ; promjena Z_S spremnika kondenzata utječe na π_{18} , variranje Z_i izmjenjivača grijanja utječe na π_{12} , π_{13} i π_{17} ; te variranje Z_Z zagrijača mijenja π_{17} . Vrijednosti eksergoekonomskih troškova ulaznih tokova i gubitaka ostaju nepromijenjene, što je i očekivano.

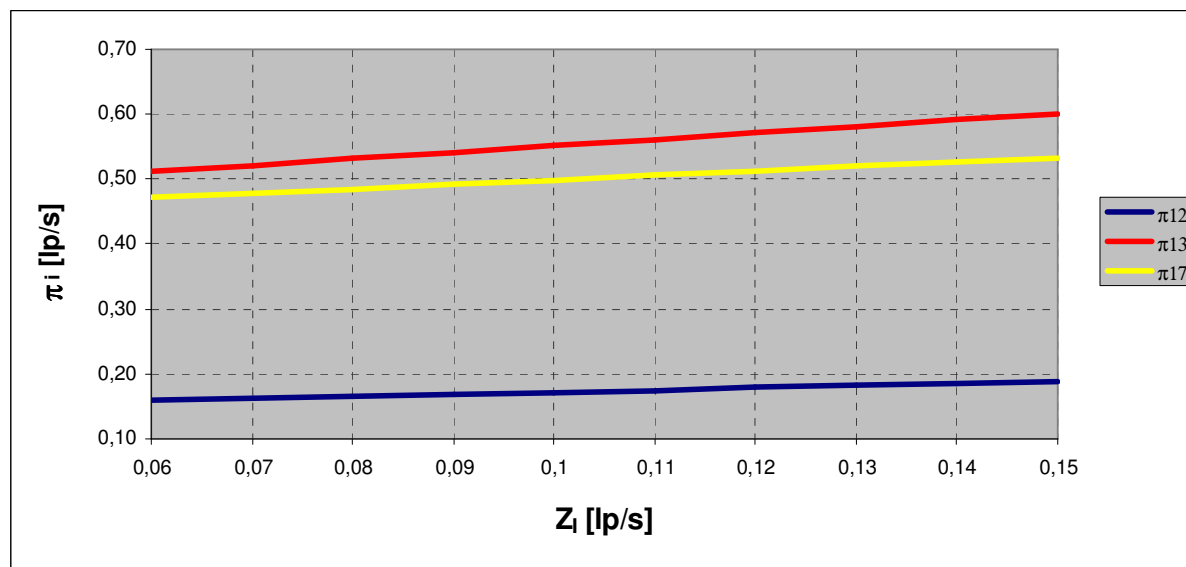
Na donjim slikama su dani prikazi promjene eksergoekonomskih troškova pri variranju troškova peći, utilizatora i izmjenjivača grijanja.



Slika 4.8: Variranja π_i s promjenama troškova za peć



Slika 4.9: Variranja π_i s promjenama troškova za utilizator

Slika 4.10: Variranja π_i s promjenama troškova za izmjenjivač

Uočljiva je linearnost promjena svih eksergoekonomskih troškova na promjene ulaznih troškova komponenti.

4.7 Moguće daljnje analize i primjene

Kao što je opisano u poglavlju 3.3.7., za navedeni model bi se mogla razviti **[FP]** matrica koja karakterizira odnos resursa i produkta. Daljnjim analitičkim razvojem tim putem bi se moglo doći do odgovarajućeg izraza za eksergetsku efikasnost promatranog toplinskog procesa. Obzirom na složenost dobivene inicijalne matrice te na upitnost kvalitete rezultata taj se postupak u ovom radu neće provoditi.

U poglavlju 3.3.5. su navedena daljnja moguća područja primjene. Za određivanje *eksergetske amortizacije* bilo bi potrebno odrediti samu dodatnu eksergiju potrošenu na održavanje jedinica u dobrom pogonskom stanju, tijekom životnog vijeka. Mogući *ostaci u proizvodnom procesu* za svoje zbrinjavanje također iziskuju određenu eksergiju, i njihovo uzimanje u obzir bi podrazumijevalo pridjeljivanje određenog eksergetskog troška tokovima gubitaka, što omogućuje i određivanje eksergoekonomskih troškova za njih. Uzima li se u obzir i eksergija potrebna za *transformaciju goriva*, mora se postaviti i izraz za eksergetski trošak primarnog energenta, koji je veći od same njegove eksergije.

Ako se teži poboljšanju procesa prilikom projektiranja ili analize određenog toplinskog postrojenja, temeljno pitanje se može formulirati kao: "Gdje, kako i koji dio utrošenih resursa može biti ušteđen a da se kvantiteta i kvaliteta konačnog produkta zadrži konstantnom?" [30]. U tom pitanju je sadržana preoblikovana definicija energetske efikasnosti iz prvog poglavlja. Upravo radi rješavanja takvog problema se vrši modeliranje sustava sustava koji se želi analizirati, takvo da dobiveni model bude dovoljno reprezentativan za stvarno postrojenje. Varijacije među toplinskim sustavima su međutim tolike, i proizlazeći mogući problemi toliko specifični, da se u mnogim slučajevima pristup modeliranja može pokazati neprovediv ili nepotrebno kompleksan. Teorija eksergetskih troškova se temelji na općim konceptima kao što su, uopćeno, resursi, strukture, efikasnost i namjena. Zbog takvog generalnog

pristupa moguće je dati odgovarajući prikaz praktički svakog postrojenja i procesa. S tog stanovišta je bilo moguće razviti odgovarajuće alate primjena kojih omogućuje optimalno upravljanje resursima, uz prednosti uopćenog pristupa.

Takve moguće primjene su:

- *procjena alternativnih rješenja*, gdje se eksergoekonomskim pristupom nekom sustavu s jasno definiranom proizvodnom namjenom razmatraju različite opcije pri odabiru njegovih konstrukcijskih karakteristika i resursa koje će konzumirati;
- *alokacija troškova*, gdje se proizvodni troškovi nekog sustava nastoje distribuirati po njegovim produktima, u skladu s njihovom eksergijom;
- *optimizacija pogona*, gdje se pristupa poboljšanju djelovanja nekog sustava uz određenu količinu topline i rada koji trebaju biti proizvedeni, postavljanjem izraza za jedinične troškove i traženjem njegovog minimuma;
- *lokalne optimizacije*, uzimajući u obzir da poznavanje eksergoekonomskih troškova daje uvid u ekonomski smisao strukturalnim međudjelovanjima unutar nekog postrojenja - sustava, te je omogućeno jednostavno formuliranje problema koji se odnose na optimizaciju podsustava;
- *energetski auditi*, gdje do izražaja dolazi razlika između konvencionalne eksergetske analize i eksergoekonomske analize, uzimajući u obzir sljedeće postavke:
 - kako u praksi nije moguće ostvariti sve termodinamički moguće eksergetske uštede, važan je pojam tehničkih eksergetskih ušteda, koje su od prethodnih manje za tzv. intrinzičnu ireverzibilnost, tj. ireverzibilnost duboko svojstvenu samom sustavu, koju se ne može zaobići,
 - kako kvar ili manjkavost funkcioniranja kod jednog podsustava uzrokuje disfunkcionalnosti kod drugih unutar istog sustava, tehničke eksergetske uštede ustanovljene kod nekog individualnog podsustava se odnose ili na otklanjanje smanjenja djelotvornosti, koja je posljedica narušene efikasnosti podsustava, ili nepravilnog djelovanja, uzrokovanog promjenom količine produkta do koje dolazi zbog smanjene djelotvornosti drugih podsustava,
 - utjecaj na resurs (gorivo) se procjenjuje množenjem smanjenja djelotvornosti nekog podsustava, ili njegove svojstvene ireverzibilnosti, s jediničnim eksergetskim troškom resursa koji konzumira taj podsustav.

Na kraju treba spomenuti i analiziranje *procesa nastanka troškova*, kao bitnu aktivnost koja proučava kako se određuju troškovi unutar proizvodnog procesa, pri čemu se dolazi do važnih zaključaka koji se mogu primijeniti na analizu, proračunavanje i minimizaciju troškova pri proizvodnji u stvarnim postrojenjima. Pri tome se proučavaju individualni podsustavi i sekvencijalni procesi. Proces nastanka troškova je predmet analize u brojnoj literaturi ([16], [30], [28], [51], [52], i drugo).

5 Zaključna razmatranja

Kod industrije u Hrvatskoj, ukoliko se promatra kao jedan od najznačajnijih sektora potrošača energije sve je izraženija potreba analize korištenja energije i potencijala povećanja energetske efikasnosti kod energetskeg procesa. Temeljitije analitičke metode dosad uglavnom nisu primjenjivane, a suvremeni trendovi i zahtjevi upućuju na potrebu takvog pristupa. Eksergetska analiza, eksergoekonomska analiza, te teorija eksergetskih troškova kao specifično razvijena metodologija iz tog područja, predstavljaju suvremen pristup opisivanju energetskeg procesa. Postavljanje pojednostavljenih modela industrijskih energetskeg procesa omogućuje analiziranje njihove energetske efikasnosti u skladu s načelima tih metoda.

Ovim se radom nastojalo ispitati primjenjivost eksergoekonomskog pristupa i posebno teorije eksergetskih troškova na određivanje značajki toplinskih procesa u industriji. Pritom je pretpostavljeno da je eksergetska analiza kombinirana s određivanjem ekonomskih značajki, a posebno teorija eksergetskih troškova, primjenjiva na reprezentativan model energetskeg procesa u domaćoj industriji. Nastojala se ispitati svrhovitost svođenja procesa na eksergetske tokove i podsustave karakterizirane "resurs-produkt" (fuel-product) prikazom, te ustanoviti rezultate na temelju kojih su provodljive daljnje analize.

U radu je najprije dan pregled korištenja energije u hrvatskoj industriji, s posebnim osvrtom na korištenje toplinske energije kod sektora najvećih potrošača - industriju građevinskog materijala, kemijsku i prehrambenu industriju, te na stanje energetske efikasnosti kod njih. Ove su grupe industrijskih potrošača odabrane na temelju višegodišnjih ststističkih pokazatelja o potrošnji energije, pri čemu je posebno značajno bilo ustanovljenje trendova porasta potrošnje. Prikazani su neki tipični toplinski procesi kod industrija analognih navedenim sektorima u hrvatskoj industriji, a kod kojih su primjenjene mjere optimizacije korištenja energije. Na temelju tih razmatranja je izveden teoretski model tipičnog toplinskog procesa u industriji, realno neprimjenjiv u stvarnosti ali dovoljno reprezentativan za većinu toplinskih procesa koji se mogu susresti.

Nadalje je u radu dan opis načela eksergetske i eksergoekonomske analize, te posebno teorije eksergetskih troškova, kao ključnog izvora metoda koje se kane ispitati. Izvršena je probna analiza s primjenom načela ove teorije na jednostavnom primjeru postrojenja u prehrambenoj industriji, pri čemu je korišten matrični prikaz tokova i karakteristika procesa, te je taj prikaz razvijan kao alat za daljnje analize koje su rezultirale dobivanjem izraza za izračun eksergetskih troškova tokova promatranog sustava. U probnoj je analizi nadalje dan osvrt na eksergoekonomsku analizu tog sustava, te je provedeno ustanovljavanje univerzalnog izraza za eksergetski stupanj djelovanja uz uvođenje "resurs-produkt" strukture sustava, što je jedna od značajnijih karakteristika teorije eksergetskih troškova. Ovaj relativno složeniji postupak rezultira izrazom koji određuje eksergetsku efikasnost promatranog sustava, no veliki broj koraka, matrična interpretacija sustava i određene aproksimacije pretpostavljaju vrlo dobro poznavanje analiziranog procesa kao uvjet upotrebljivosti dobivenog rezultata.

Ključni dio ovog rada je povezivanje postavljenog modela tipičnog toplinskog procesa s opisanim teorijama i metodologijom. Pritom su analizirani tokovi i podsustavi promatranog

modelskeg procesa, pretpostavljene bifurkacije na podsustavima tj. grananja eksergetskih tokova u skladu s četiri pretpostavke iz teorije eksergetskih troškova, te je izveden matrični prikaz sustava jednadžbi za proračun tokova. Tako je dobivena matrica dimenzije $[24 \times 24]$ koja je zbog svoje glomaznosti bila neprikladna za daljnju obradu. Premda se izračun te matrice korištenjem odgovarajuće računalne opreme i mogao provesti, rezultati bi očekivano bili u formi glomaznih matematičkih izraza koje bi bilo otežano kontrolirati i koristiti uvrštavanjem varijabli.

Za, u ovom radu ostvarenu, razinu primjene navedene metodologije provedeno je razbijanje modela procesa na tri samostalne cjeline, povezane ulaznim i izlaznim tokovima, od kojih je svaka zasebno obrađena u smislu matrične interpretacije te određivanja skupova izraza posebno za eksergetske i posebno za eksergoekonomske troškove. Uvrštene su teoretske ulazne vrijednosti, pri čemu su za svaku od komponenti pretpostavljeni zbirni troškovi investicije, te pogonski i troškovi održavanja, koji su uz neki pretpostavljeni životni vijek svedeni na vremensku jedinicu. Na kraju izvedeno variranje s odabranih desetak varijacija po ulaznoj veličini pokazalo je odziv eksergoekonomskih troškova na promjene ulaznih parametara. Varijacija ulaznih troškova komponenti Z_i pokazala je očekivanu potpunu linearnost odziva, dok je pri variranju specifičnih troškova ulaznih tokova c_{Fi} odziv bio relativno pravilan. Specifični troškovi ulaznih tokova koji su varirani određeni su prema onome za ulazni tok goriva u prvu cjelinu, kao jedinom stvarnom ulaznom toku u cjelokupni proces. Problem relativnosti ulaznih tokova u pojedine cjeline koji su ujedno i izlazni tokovi drugih cjelina riješen je iteracijom pretpostavljenih početnih vrijednosti njihovih specifičnih troškova, koje su drugom koraku iteracije pokazivale odstupanja koja se mogu zanemariti. S te se strane može zaključiti da je zadržana dovoljna povezanost cjelina procesa međusobno zajedničkim tokovima da bi se rezultati mogli promatrati za cjelokupni proces, a opet je pojednostavljenje tih cjelina - tj. "razina agregacije sustava" - bilo odgovarajuće za predstavljanje nekog jednostavnog procesa, ili dijela sustava.

Kako u njemu nije vršena analiza nekog konkretnog primjera iz prakse, već postavljenog teoretskog modela, ovaj rad se može promatrati kao prvi pokušaj uvođenja načela jedne suvremene metodologije - eksergoekonomske analize i teorije eksergetskih troškova - u domaće uvjete, tj. u analitiku energetskih sustava. Područje daljnjeg istraživanja je široko, i u prvom redu podrazumijeva primjenu ovakvog pristupa na stvarnim toplinskim procesima u industriji, ali i kod drugih velikih potrošača energije. Tako dobiveni rezultati mogu se analizirati i na temelju toga se može unapređivati analitički model tako da bude prikladan za analizu specifičnih procesa i subjekata. Na temelju rezultata mogu se dalje razrađivati optimizacije promatranih procesa, i s tehničkog i s ekonomskog aspekta, analizirati procesi nastanka troškova, razvijati odgovarajući energetskegi audit, te su moguća brojna daljnja istraživanja.

Literatura

- [1] V. Krstulović: "MIEE: mreža industrijske energetske efikasnosti - prethodni rezultati i buduće aktivnosti", Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1998.
- [2] R. Perišić, Z. Prelec: "Model optimalnog planiranja energetskeg sustava u procesnoj industriji", Zbornik radova MIPRO/97, Rijeka, 1997.
- [3] Grupa autora: "Osnovne smjernice djelovanja fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost u područjima energetske učinkovitosti i korištenja obnovljivih izvora energije", Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2004.
- [4] V. Krstulović: "Energetska efikasnost u malim i srednjim poduzećima", workshop Regionalnog centra zaštite okoliša za srednju i Istočnu Europu, Zagreb, 2004.
- [5] Z. Prelec: "Energetika u procesnoj industriji", Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [6] "Energija u Hrvatskoj 2003 - godišnji energetski pregled", Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva RH, Zagreb, 2004.
- [7] Grupa autora: "Output of a Seminar on Energy Conservation in Cement Industry", UNIDO seminar, Sri Lanka, 1994.
- [8] "CADDET Energy Efficiency InfoPoint" brošure, IEA, razna izdanja 1998-2002.
- [9] T. Seyffarth: "Energibruk i sildeolje- og sildemelindustrien 1999", Enøk brošura, Institutt for energiteknikk, Kjeller, 2000.
- [10] V. Obsieger: "Thermodynamic analysis of absorption refrigeration cycles", *Proceedings of the International Congress Energy and the Environment 2000*, Rijeka, 2000.
- [11] H. Chang: "Exergy Analysis and Exergoeconomic Analysis of an Ethylene Process", *Tamkang journal of science and engineering*, Vol.4 No.2, Tamsui, Taipei, 2001.
- [12] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran: "Thermal Design & Optimization", John Wiley & Sons, 1996.
- [13] Y. M. El-Sayed, M. Tribus: "Strategic use of thermoeconomics for systems improvement", in R. A. Gaggioli ed., *Efficiency and Costing*, ACS Symposium Series no. 235., 1983.
- [14] G. Wall & M. Gong, "On Exergy and Sustainable Development, Part I: Conditions and Concepts", *Exergy - An International Journal*, Vol. 1, No. 3, 2000.
- [15] M. Gong & G. Wall, "On Exergy and Sustainable Development, Part II: Methods, Applications and Suggestions" *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 4, 2000.
- [16] M. A. Lozano, A. Valero: "Theory of the Exergetic Cost", *Energy*, Vol. 18, No. 9., pp. 939-960, 1993.
- [17] A. Valero, L. Correas, A. Lazzaretto, V. Rangel, M. Reini, R. Tacani, A. Toffolo, V. Verda, A. Zaleta: "Thermoeconomic Philosophy Applied to the Operating Analysis and Diagnosis of Energy Utility Systems", *International Journal of Thermodynamics*, Vol.7, (No.2), 2004

- [18] L. S. R. Vieira, J. L. M. Donatelli, M. E. C. Cruz: "Exergoeconomic improvement: an alternative to the conventional mathematical optimization of complex thermal systems", Paper, WCSMO6 Congress, Rio de Janeiro, 2005
- [19] M. A. Antar, S. M. Zubair: "Thermoeconomic Considerations in the Optimum Allocation of Heat Transfer Inventory for Refrigeration and Heat Pump Systems", Journal of Energy Resources Technology, March 2002
- [20] J. A. Borgert, J. A. Velásquez: "Exergoeconomic optimisation of a Kalina cycle for power generation", Int. J. Exergy, Vol. 1, 18 No. 1, 2004
- [21] P. K. Sahoo, R.D. Misra, A. Gupta: "Exergoeconomic optimisation of an aqua-ammonia absorption refrigeration system", International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.1
- [22] A. Valero, C. Torres: "Termodinamica algebraica de sistemas energeticos", Universidad de Zaragoza, 1988.
- [23] S. H. Sevilgen: "Exergoeconomic analysis of cogeneration system", Journal of Engineering and Natural Sciences - Sigma, 2004/4
- [24] A. Toffolo, A. Lazzaretto: "On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions", International Journal of Thermodynamics, Vol.7, (No.2), 2004
- [25] Valero, M. A. Lozano, M. Muñoz: "A General Theory of Exergy Saving: Part I. On the Exergetic Cost, Part II. On the Thermoeconomic Cost, Part III. Energy Saving and Thermoeconomics", Computer-Aided Engineering of Energy Systems, Vol. 3, ASME, New York, 1986.
- [26] M. A. Lozano, A. Valero: "Methodology for Calculating Exergy in Chemical Processes", The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1988.
- [27] R. K. Jassim, T. Khir, B. A. Habeebullah, G. M. Zaki: "Exergoeconomic optimisation of the geometry of continuous fins on an array of tubes of a refrigeration air cooled condenser", International Journal of Exergy 2005 - Vol. 2, No.2
- [28] G. Tsatsaronis, M. Winhold: Energy - The International Journal 10, 69, članak, 1985
- [29] A. Valero, J. A. Alconchel: "Toward a Universal Formula of Efficiency", Second Law Analysis of Thermal Systems, ASME, 1987.
- [30] A. Valero: "The thermodynamic process of cost formation", iz "*Diagnóstico Termoeconómico: estrategia aplicada a sistemas de energéticos muy complejos*", 2003.
- [31] Xiao Gang: "WIMS (WWW Interactive Multipurpose Server) v. 2.14 - Guide général d'utilisateur", Université de Nice - Sophia Antipolis, 2000. (<http://wims.unice.fr/wims>)
- [32] "MathCad Tutorial", Department of Mechanical Engineering at FAMU-FSU College of Engineering, Tallahassee, 2001.
- [33] Tsatsaronis, G. and Winhold, M., "Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy Conversion Plants. Part I-A New General Methodology," Energy-The International Journal 10, 1985.

- [34] Tsatsaronis, G. and Winhold, M., "Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy Conversion Plants. Part II - Analysis of a Coal-Fired Steam Power Plant," *Energy-The International Journal* 10, 1985.
- [35] A. Valero, A. Carreras, C. Torres, M. A. Lozano: "On Causality in Organized Energy Systems", Universidad de Zaragoza, 1990.
- [36] Članak, "Aragondigital.es", 16.11.2003.
- [37] E. Kreyszig: "Advanced Engineering Mathematics", John Wiley & Sons, 1999.
- [38] C. Torres: "Symbolic Thermoeconomic Analysis Of Energy Systems ", iz "*Diagnóstico Termoeconómico: estrategia aplicada a sistemas de energéticos muy complejos*", 2003.
- [39] A. P. Guarçoni, J. L. M. Donatelli, R. Ramos: "A Influencia de Diferentes Estruturas Produtivas na Análise Exergoeconômica de uma Planta de Cogeração", In. XVI Congresso Brasileiro De Engenharia Mecânica - COBEM, 200, Uberlândia Impresso Gráfica e Editora, 2001.
- [40] N. Beglet, S. Palaş: "Analiza exergoeconomică a proceselor de tratare termică", *Buletinul AGIR* nr. 4, Bucureşti, 2004.
- [41] G. Wall: "Exergy flows in industrial processes", Chalmers University of Technology and University of Göteborg, 1986.
- [42] G. Wall: "Exergy - a useful concept", Ph. D. thesis, Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1986.
- [43] R. K. Jassim, T. Khir: " Exergoeconomic optimisation of an air-conditioning rotary regenerator: effect of matrix thermal conductivity on its performance", *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.2
- [44] H. H. Ozturk: "Energy and exergy efficiencies of a solar box-cooker", *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.2
- [45] S. K. Tyagi, Y. Zhou, J. CHen: "Optimum Criteria on the Performance of an Irreversible Braysson Heat Engine Based on the New Thermoeconomic Approach", *Entropy Journal* 6, 2004
- [46] S. W. Stuart, S. V. Shelton: "Finned-tube condenser design optimization using thermoeconomic isolation", Paper, 21st IIR International Congress of Refrigeration, Washington DC, 2003
- [47] J. Lazarof, B. Vulchanova: "Thermodynamic Analysis of Industrial Energy Systems", *Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Veszprem*, Vol. 13, 1985.
- [48] R. Camargo, C. D. Ebinuma, J. L. Silveira: "Thermoeconomic analysis of an evaporative desiccant air conditioning system", *Applied Thermal Engineering Journal*, Volume 23, Issue 12 , 2003.
- [49] S. A. A. da Gama Cerqueira, S. A. Nebra: "Cost attribution methodologies in cogeneration systems", *Energy Conversion and Management Journal*, Volume 40, Issues 15-16, 1999.
- [50] M. A. Lozano: "Metodología para el análisis exergético de calderas de vapor en centrales térmicas", Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 1987.

- [51] G. Tsatsaronis, M. Winhold: "Thermoeconomic Analysis of Power Plants", EPRI AP-3651, Palo Alto, 1984.
- [52] A. Valero, C. Torres, L. Serra: "A General theory of Thermoeconomics: Part I. Structural analysis", ECOS'92, Zaragoza, 1999.
- [53] "Exergoeconomic analysis of a PEM fuel cell at various operating conditions", Abstract, *Fuel and Energy Abstracts*, Volume 46, Issue 6, November 2005.
- [54] O. Ozgener, A. Hepbasli, L. Ozgener: "A parametric study on the exergoeconomic assessment of a vertical ground-coupled (geothermal) heat pump system", Article, *Building and Environment*, 2006.
- [55] E. Cardona, A. Piacentino: "A new approach to exergoeconomic analysis and design of variable demand energy systems" Article, *Energy*, Volume 31, Issue 4, 2006
- [56] "L. S. Vieira, J. L. Donatelli, M. E. Cruz: "Mathematical exergoeconomic optimization of a complex cogeneration plant aided by a professional process simulator" Article, *Applied Thermal Engineering*, Volume 26, Issues 5-6, 2006.

Prilozi

PRILOG I Tablice uvrštenih ulaznih vrijednosti i variranja odziva

PRILOG II Tijek izračuna eksergetskih i eksergoekonomskih troškova

tok	B	B*	k*		B	B*	k*		B	B*	k*		B	B*	k*
1	300	300	1		400	400	1		500	500	1		600	600	1
2	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
3	200	214,3	1,07		200	285,7	1,43		200	357,14	1,79		200	428,57	2,14
4	95	107,36	1,13		95	137,5	1,45		95	167,68	1,77		95	197,84	2,08
5	130	146,9	1,13		130	188,2	1,45		130	229,46	1,77		130	270,73	2,08
6	80	85,7	1,07		80	114,3	1,43		80	142,86	1,79		80	171,43	2,14
7	0	65,7	0		0	94,3	0		0	122,86	0		0	151,429	0
8	40	40	1		40	40	1		40	40	1		40	40	1
18	20	20	1		20	20	1		20	20	1		20	20	1
19	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
20	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0

Variranja eksergetskih vrijednosti promjenom ulaznog toka B₁

tok	B	B*	k*		B	B*	k*		B	B*	k*		B	B*	k*
1	300	300	1		300	300	1		300	300	1		300	300	1
2	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
3	200	214,3	1,07		200	214,28	1,07		200	214,29	1,07		200	214,28	1,07
4	95	103,14	1,09		95	111,59	1,17		95	115,81	1,22		95	120	1,26
5	130	141,14	1,09		130	152,7	1,17		130	158,48	1,22		130	164,3	1,26
6	80	85,7	1,07		80	85,7	1,07		80	85,7	1,07		80	85,7	1,07
7	0	75,71	0		0	55,7	0		0	45,7	0		0	35,7	0
8	30	30	1		50	50	1		60	60	1		70	70	1
18	20	20	1		20	20	1		20	20	1		20	20	1
19	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
20	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0

Variranja eksergetskih vrijednosti promjenom ulaznog toka B₈

tok	B	B*	k*		B	B*	k*		B	B*	k*		B	B*	k*
1	300	300	1		300	300	1		300	300	1		300	300	1
2	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
3	200	214,3	1,07		200	214,3	1,07		200	214,29	1,07		200	214,29	1,07
4	95	107,36	1,13		95	107,36	1,13		95	107,36	1,13		95	197,84	2,08
5	130	146,9	1,13		130	146,92	1,13		130	146,92	1,13		130	146,92	1,13
6	80	85,7	1,07		80	85,71	1,07		80	85,71	1,07		80	85,71	1,07
7	0	65,7	0		0	75,71	0		0	85,71	0		0	95,71	0
8	40	40	1		40	40	1		40	40	1		40	40	1
18	20	20	1		30	30	1		40	40	1		50	50	1
19	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
20	0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0

Variranja eksergetskih vrijednosti promjenom ulaznog toka B₁₈

$C_{F1} =$	0,001	0,002	0,0023	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
$C_{F4,F5} =$	0,0022	0,0032	0,0035	0,0041	0,0051	0,0060	0,0070	0,0079	0,0089	0,0098	0,0108
$C_{F12} =$	0,0047	0,0064	0,0069	0,0078	0,0093	0,011	0,013	0,014	0,016	0,017	0,019
$C_{F18} =$	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

tok	B_i	π_i	π_i	π_i	π_i	π_i	π_i	π_i	π_i	π_i	π_i	π_i
	kW	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s	lp/s
1	300	0,3	0,6	0,69	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
3	200	0,393	0,61	0,67	0,821	1,04	1,25	1,464	1,68	1,89	2,11	2,32
4	95	0,211	0,3	0,33	0,39	0,48	0,573	0,664	0,75	0,85	0,935	1,026
5	130	0,289	0,41	0,45	0,54	0,66	0,785	0,91	1,03	1,156	1,28	1,4
6	80	0,157	0,24	0,27	0,33	0,41	0,5	0,57	0,67	0,757	0,843	0,93
7	0	0,223	0,309	0,335	0,395	0,48	0,566	0,652	0,737	0,823	0,909	0,995
8	40	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
10	0	0,233	0,298	0,317	0,357	0,415	0,48	0,545	0,61	0,668	0,727	0,805
11	30	0,066	0,096	0,105	0,123	0,15	0,18	0,21	0,24	0,267	0,294	0,33
12	25	0,118	0,16	0,172	0,195	0,232	0,275	0,325	0,35	0,4	0,425	0,475
13	80	0,382	0,512	0,551	0,629	0,746	0,876	1,006	1,136	1,253	1,37	1,526
14	50	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
15	10	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
17	0	0,38	0,47	0,5	0,55	0,63	0,72	0,81	0,9	0,98	1,06	1,17
18	20	0,246	0,318	0,339	0,38	0,444	0,517	0,597	0,652	0,729	0,781	0,867

Odziv vrijednosti eksergoekonomskih troškova tokova na promjene specifičnih troškova ulaznih tokova

$Z_P =$	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34
π_3	0,61	0,62	0,64	0,65	0,66	0,68	0,69	0,71	0,72	0,74
π_4	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,36
π_5	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49
π_6	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29
π_7	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36

Odziv eksergoekonomskih troškova tokova na promjene ulaznih troškova peći

$Z_U =$	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
π_4	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35
π_5	0,43	0,43	0,44	0,44	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,48

Odziv eksergoekonomskih troškova tokova na promjene ulaznih troškova utilizatora

$Z_H =$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12
π_7	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38

Odziv eksergoekonomskih troškova tokova na promjene ulaznih troškova hladnjaka

$Z_K =$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14
π_{10}	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37

Odziv eksergoekonomskih troškova tokova na promjene ulaznih troškova kuhala

$Z_S =$	0,054	0,056	0,058	0,06	0,062	0,064	0,066	0,068	0,07	0,072
π_{18}	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35

Odziv eksergoekonomskih troškova tokova na promjene ulaznih troškova spremnika kondenzata

$Z_I =$	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
π_{12}	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19
π_{13}	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60
π_{17}	0,47	0,48	0,49	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,53	0,53

Odziv eksergoekonomskih troškova tokova na promjene ulaznih troškova izmjenjivača za grijanje

$Z_Z =$	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
π_{17}	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55

Odziv eksergoekonomskih troškova tokova na promjene ulaznih troškova zagrijača

PRILOG II Tijek izračuna eksergetskih i eksergoekonomskih troškova

Tijek izračuna eksergetskih troškova po modelu za prvu cjelinu

$$\begin{array}{lllll}
 B_1 := 300 & B_2 := 0 & B_3 := 200 & B_4 := 95 & B_5 := 130 \\
 B_6 := 80 & B_7 := 0 & B_8 := 70 & B_{18} := 20 &
 \end{array}$$

$$a := \frac{B_6}{B_3} \quad b := \frac{B_5}{B_4} \quad c := \frac{B_{18}}{B_8} \quad p := B_1 \quad q := B_2 \quad r := B_{18}$$

$$B_1 := p$$

$$B_2 := q$$

$$B_3 := \frac{q + p}{a + 1}$$

$$B_4 := \frac{(a + 1) \cdot r + c \cdot q + c \cdot p}{a \cdot (b \cdot c + c) + b \cdot c + c}$$

$$B_5 := \frac{(a \cdot b + b) \cdot r + b \cdot c \cdot q + b \cdot c \cdot p}{a \cdot (b \cdot c + c) + b \cdot c + c}$$

$$B_6 := \frac{a \cdot q + a \cdot p}{a + 1}$$

$$B_7 := \frac{[c + a \cdot (c - 1) - 1] \cdot r + a \cdot c \cdot q + a \cdot c \cdot p}{a \cdot c + c}$$

$$B_8 := \frac{r}{c} \quad B_{18} := r \quad B_{19} := 0 \quad B_{20} := 0$$

$$B_1 = 300$$

$$B_4 = 120.032$$

$$B_7 = 35.714$$

$$B_{19} = 0$$

$$B_2 = 0$$

$$B_5 = 164.254$$

$$B_8 = 70$$

$$B_{20} = 0$$

$$B_3 = 214.286$$

$$B_6 = 85.714$$

$$B_{18} = 20$$

Tijek izračuna eksergetskih troškova po modelu za drugu cjelinu

$$B_4 := 95 \quad B_9 := 0 \quad B_{10} := 0 \quad B_{11} := 30 \quad B_{12} := 25$$

$$B_{18} := 20 \quad B_{21} := 0 \quad B_{24} := 0$$

$$a := \frac{B_{11}}{B_4}$$

$$p := B_4$$

$$q := B_9$$

$$r := B_{12}$$

$$B_4 := p$$

$$B_9 := q$$

$$B_{10} := q + (1 - a) \cdot p$$

$$B_{11} := a \cdot p$$

$$B_{12} := r$$

$$B_{18} := r + a \cdot p$$

$$B_{21} := 0$$

$$B_{24} := 0$$

$$B_4 = 95$$

$$B_{11} = 30$$

$$B_{21} = 0$$

$$B_9 = 0$$

$$B_{12} = 25$$

$$B_{24} = 0$$

$$B_{10} = 65$$

$$B_{18} = 55$$

Tijek izračuna eksergetskih troškova po modelu za treću cjelinu

$$B_5 := 130 \quad B_{12} := 20 \quad B_{13} := 80 \quad B_{14} := 50 \quad B_{15} := 10$$

$$B_{16} := 0 \quad B_{17} := 0 \quad B_{22} := 0 \quad B_{23} := 0$$

$$a := \frac{B_{12}}{B_{13}}$$

$$b := \frac{B_{15}}{B_{14}}$$

$$p := B_5$$

$$q := B_{15}$$

$$r := B_{16}$$

$$B_5 := p$$

$$B_{12} := \frac{a(b-1) \cdot q + a \cdot b \cdot p}{b}$$

$$B_{13} := \frac{(b-1) \cdot q + b \cdot p}{b}$$

$$B_{14} := \frac{q}{b}$$

$$B_{15} := q$$

$$B_{16} := r$$

$$B_{17} := \frac{-[-b \cdot r + [(-b + a(b-1)) + 1] \cdot q + (a \cdot b - b) \cdot p]}{b}$$

$$B_{22} := 0$$

$$B_{23} := 0$$

$$B_5 = 130$$

$$B_{14} = 50$$

$$B_{17} = 67.5$$

$$B_{12} = 22.5$$

$$B_{15} = 10$$

$$B_{22} = 0$$

$$B_{13} = 90$$

$$B_{16} = 0$$

$$B_{23} = 0$$

Tijek izračuna odziva eksergoekonomskih troškova na variranje specifičnog troška ulaznog toka c_{F1}

$$c_{F1} := (0.001 \ 0.002 \ 0.0023 \ 0.003 \ 0.004 \ 0.005 \ 0.006 \ 0.007 \ 0.008 \ 0.009 \ 0.01)$$

$$B1 := 300 \quad B5 := 130 \quad B18 := 20$$

$$Z_P := 0.25 \quad Z_U := 0.1 \quad Z_H := 0.07$$

$$B_{.1} := 300 \quad B_{.2} := 0 \quad B_{.18} := 20$$

$$\begin{aligned} B2 &:= 0 & B3 &:= 200 & B4 &:= 95 & B7 &:= 0 \\ B6 &:= 80 & B8 &:= 40 & B19 &:= 0 & B20 &:= 0 \end{aligned}$$

$$c_{F2} := 0 \quad c_{F18} := 0.0001$$

$$a := \frac{B6}{B3}$$

$$b := \frac{B5}{B4}$$

$$c := \frac{B18}{B8}$$

$$u := c_{F1} \cdot B_{.1}$$

$$v := c_{F2} \cdot B_{.2}$$

$$w := c_{F18} \cdot B_{.18}$$

$$p := Z_P$$

$$q := Z_U$$

$$r := Z_H$$

$$pi_1 := u$$

$$pi_2 := v$$

$$pi_3 := \frac{(v + u + p)}{a + 1}$$

$$pi_4 := \frac{(a + 1) \cdot w + c \cdot v + c \cdot u + (a \cdot c + c) \cdot q + c \cdot p}{a \cdot (b \cdot c + c) + b \cdot c + c}$$

$$pi_5 := \frac{(a \cdot b + b) \cdot w + b \cdot c \cdot v + b \cdot c \cdot u + (a \cdot b \cdot c + b \cdot c) \cdot q + b \cdot c \cdot p}{a \cdot (b \cdot c + c) + b \cdot c + c}$$

$$pi_6 := \frac{a \cdot v + a \cdot u + a \cdot p}{a + 1}$$

$$pi_7 := \frac{[c + a \cdot (c - 1) - 1] \cdot w + a \cdot c \cdot v + a \cdot c \cdot u + (a \cdot c + c) \cdot r + a \cdot c \cdot p}{a \cdot c + c}$$

$$pi_{19} := 0$$

$$pi_8 := \frac{w}{c}$$

$$pi_{18} := w$$

$$p_{i20} := 0$$

$$a = 0.4$$

$$b = 1.368$$

$$c = 0.5$$

$$v = 0$$

$$w = 4 \times 10^{-3}$$

$$p = 0.25$$

$$q = 0.1$$

$$r = 0.07$$

u =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.3	0.6	0.69	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7

$$p_{i1} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.3	0.6	0.69	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3

$$p_{i2} = 0$$

$$p_{i3} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.393	0.607	0.671	0.821	1.036	1.25	1.464	1.679	1.893	2.107	2.321

pi ₄ =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	0	0.211	0.302	0.329	0.392	0.483	0.573	0.664	0.754	0.845	0.935	1.026

pi ₅ =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	0	0.289	0.413	0.45	0.537	0.661	0.785	0.908	1.032	1.156	1.28	1.404

$$p_{i6} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.157	0.243	0.269	0.329	0.414	0.5	0.586	0.671	0.757	0.843	0.929

$$p_{i7} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.223	0.309	0.335	0.395	0.48	0.566	0.652	0.737	0.823	0.909	0.995

$$p_{i8} = 8 \times 10^{-3}$$

$$p_{i9} = 0$$

$$p_{i18} = 4 \times 10^{-3}$$

$$p_{i20} = 0$$

Tijek izračuna odziva eksergoekonomskih troškova na variranje specifičnih troškova ulaznih tokova c_{F4} i c_{F12}

$$c_{F4} := (0.0022 \ 0.0032 \ 0.0035 \ 0.0041 \ 0.005 \ 0.006 \ 0.007 \ 0.008 \ 0.0089 \ 0.0098 \ 0.011)$$

$$c_{F9} := 0$$

$$c_{F12} := (0.0047 \ 0.0064 \ 0.0069 \ 0.0078 \ 0.0093 \ 0.011 \ 0.013 \ 0.014 \ 0.016 \ 0.017 \ 0.019)$$

$$B4 := 95 \quad B9 := 0 \quad B10 := 0 \quad B11 := 30$$

$$B12 := 25 \quad B18 := 20 \quad B21 := 0 \quad B24 := 0$$

$$Z_K := 0.05 \quad Z_S := 0.065$$

$$a := \frac{B11}{B4}$$

$$p := Z_K$$

$$q := Z_S$$

$$u := c_{F4} \cdot B4$$

$$v := c_{F9} \cdot B9$$

$$w := c_{F12} \cdot B12$$

$$pi_4 := u$$

$$pi_9 := v$$

$$pi_{10} := v + (1 - a) \cdot u + p$$

$$pi_{11} := a \cdot u$$

$$pi_{12} := w$$

$$pi_{18} := w + a \cdot u + q$$

$$pi_{21} := 0$$

$$pi_{24} := 0$$

$$pi_4 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.209	0.304	0.333	0.39	0.475	0.57	0.665	0.76	0.846	0.931	1.045

$$pi_9 = 0$$

$$pi_{11} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.066	0.096	0.105	0.123	0.15	0.18	0.21	0.24	0.267	0.294	0.33

$$pi_{12} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.118	0.16	0.172	0.195	0.232	0.275	0.325	0.35	0.4	0.425	0.475

$$pi_{18} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.246	0.318	0.339	0.38	0.444	0.517	0.597	0.652	0.729	0.781	0.867

$$pi_{21} = 0$$

$$pi_{24} = 0$$

Tijek izračuna odziva eksergoekonomskih troškova na variranje specifičnih troškova ulaznih tokova c_{F5} i c_{F15}

$$c_{F5} := (0.0022 \ 0.0032 \ 0.0035 \ 0.0041 \ 0.005 \ 0.006 \ 0.007 \ 0.008 \ 0.0089 \ 0.0098 \ 0.011)$$

$$c_{F15} := 0.000$$

$$c_{F16} := 0$$

$$B5 := 130 \quad B12 := 25 \quad B13 := 80 \quad B14 := 50 \quad B15 := 10$$

$$B16 := 0 \quad B17 := 0 \quad B22 := 0 \quad B23 := 0$$

$$Z_I := 0.1 \quad Z_Z := 0.12$$

$$a := \frac{B12}{B13} \quad b := \frac{B15}{B14} \quad p := Z_I \quad q := Z_Z$$

$$u := c_{F5} \cdot B5 \quad v := c_{F15} \cdot B15 \quad w := c_{F16} \cdot B16$$

$$pi_5 := u$$

$$pi_{12} := \frac{[a \cdot (b - 1) \cdot v + a \cdot b \cdot u + a \cdot b \cdot p]}{b}$$

$$pi_{13} := \frac{[(b - 1) \cdot v + b \cdot u + b \cdot p]}{b}$$

$$pi_{14} := \frac{v}{b}$$

$$pi_{15} := v$$

$$pi_{16} := w$$

$$pi_{17} := \frac{-[-b \cdot w + [(-b + a \cdot (b - 1)) + 1] \cdot v + (a \cdot b - b) \cdot u - b \cdot q + (a \cdot b - b) \cdot p]}{b}$$

$$pi_{22} := 0$$

$$pi_{23} := 0$$

$$pi_5 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.286	0.416	0.455	0.533	0.65	0.78	0.91	1.04	1.157	1.274	1.43

$$pi_{12} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.119	0.16	0.172	0.197	0.233	0.274	0.314	0.355	0.392	0.428	0.477

$$pi_{13} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.382	0.512	0.551	0.629	0.746	0.876	1.006	1.136	1.253	1.37	1.526

$$pi_{14} = 5 \times 10^{-3} \quad pi_{15} = 1 \times 10^{-3} \quad pi_{16} = 0$$

$$pi_{17} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.383	0.472	0.499	0.552	0.633	0.722	0.812	0.901	0.981	1.062	1.169

$$pi_{22} = 0$$

$$pi_{23} = 0$$

Tijek izračuna odziva eksergoekonomskih troškova na variranje ulaznih troškova peći

$$Z_P := (0.16 \ 0.18 \ 0.20 \ 0.22 \ 0.24 \ 0.26 \ 0.28 \ 0.3 \ 0.32 \ 0.34)$$

$$c_{F1} := 0.002; \quad c_{F2} := 0 \quad c_{F18} := 0.000;$$

$$Z_U := 0.1 \quad Z_H := 0.07$$

$$B1 := 300 \quad B2 := 0 \quad B3 := 200 \quad B4 := 95$$

$$B5 := 130 \quad B6 := 80 \quad B7 := 0 \quad B8 := 40$$

$$B18 := 20 \quad B19 := 0 \quad B20 := 0$$

$$B_{,1} := 300 \quad B_{,2} := 0 \quad B_{,18} := 20$$

$$a := \frac{B6}{B3}$$

$$b := \frac{B5}{B4}$$

$$c := \frac{B18}{B8}$$

$$u := c_{F1} \cdot B_{,1}$$

$$v := c_{F2} \cdot B_{,2}$$

$$w := c_{F18} \cdot B_{,18}$$

$$p := Z_P$$

$$q := Z_U$$

$$r := Z_H$$

$$pi_1 := u$$

$$pi_2 := v$$

$$pi_3 := \frac{(v + u + p)}{a + 1}$$

$$pi_4 := \frac{(a + 1) \cdot w + c \cdot v + c \cdot u + (a \cdot c + c) \cdot q + c \cdot p}{a \cdot (b \cdot c + c) + b \cdot c + c}$$

$$pi_5 := \frac{(a \cdot b + b) \cdot w + b \cdot c \cdot v + b \cdot c \cdot u + (a \cdot b \cdot c + b \cdot c) \cdot q + b \cdot c \cdot p}{a \cdot (b \cdot c + c) + b \cdot c + c}$$

$$pi_6 := \frac{a \cdot v + a \cdot u + a \cdot p}{a + 1}$$

$$pi_7 := \frac{[c + a \cdot (c - 1) - 1] \cdot w + a \cdot c \cdot v + a \cdot c \cdot u + (a \cdot c + c) \cdot r + a \cdot c \cdot p}{a \cdot c + c}$$

$$pi_{19} := 0$$

$$pi_8 := \frac{w}{c}$$

$$pi_{18} := w$$

$$pi_{20} := 0$$

$$a = 0.4$$

$$b = 1.368$$

$$c = 0.5$$

$$v = 0$$

$$w = 4 \times 10^{-3}$$

$$p =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34

$$q = 0.1$$

$$r = 0.07$$

$$u = 0.69$$

$$pi_1 = 0.69$$

$$pi_2 = 0$$

$$pi_3 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.607	0.621	0.636	0.65	0.664	0.679	0.693	0.707	0.721	0.736

$$pi_4 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.302	0.308	0.314	0.32	0.326	0.332	0.338	0.344	0.35	0.356

$$pi_5 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.413	0.421	0.43	0.438	0.446	0.454	0.463	0.471	0.479	0.487

$$pi_6 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.243	0.249	0.254	0.26	0.266	0.271	0.277	0.283	0.289	0.294

$$pi_7 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.309	0.315	0.32	0.326	0.332	0.337	0.343	0.349	0.355	0.36

$$pi_8 = 8 \times 10^{-3}$$

$$pi_{18} = 4 \times 10^{-3}$$

$$pi_{19} = 0$$

$$pi_{20} = 0$$

Kratki životopis

Vedran Krstulović je rođen 1963. u Zagrebu gdje je završio osnovnu i srednju školu, te studirao na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, na kojemu diplomira 1989. , Procesno energetske smjer, grupa Nuklearna tehnika.

Od 1989. radi u tvrtki „Merkantile PPO“ Zagreb, proizvodnja postrojenja za ukapljeni naftni plin, od 1990. u ZIK - Zavodu za ispitivanje kvalitete Zagreb, na kontroli kvalitete industrijske opreme i postrojenja, od 1993. radi u tvrtki „Monter – strojarske montaže“ Zagreb, u sklopu čega je od 1993. do 1996. zaposlen u tvrtki „Südrohrbau“ u Butzbachu, Njemačka, na razvoju postrojenja za prihvrat ukapljenog prirodnog plina.

Od 1996. do danas je zaposlen u Energetskom institutu Hrvoje Požar kao stariji istraživač. Koordinator je Nacionalnog energetskeg programa „MIEE – Mreža industrijske energetske efikasnosti“, te radi na programima i projektima iz područja energetske efikasnosti, studijama energetske postrojenja, te aktivnostima u okviru reforme energetskeg sektora.

SHORT BIOGRAPHY

Vedran Krstulović was born in 1963. in Zagreb where he had attended the grammar and secondary school, and studied on the Faculty of mechanical engineering and naval architecture of the University of Zagreb, where he graduates in 1989., on the process-energy module, group of nuclear technic.

From 1989. he is employed in the „Merkantile PPO“ Zagreb, producer of the equipment for the liquefied petrol gas, from 1990. in ZIK, quality inspection company from Zagreb, controlling the quality of industrial equipment and facilities, and from 1993. works in the „Monter – strojarske montaže“ from Zagreb, in scope of which he was employed from 1993. to 1996. in the company „Südrohrbau“ from Butzbach, Germany, on the development of liquefied natural gas receiving facilities.

From 1996. until present he is employed in the Energy institute Hrvoje Požar as the senior researcher. He is the coordinator of the national energy program „MIEE – Industrial energy efficiency network“, and works on the programs and projects in the energy efficiency area, on the studies for power plants and facilities, and on the activities within the reform of the energy sector.