

# Bioenergana u prehrambenoj industriji

---

**Plevnik, Andrej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:706595>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Andrej Plevnik**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Bioenergana u prehrambenoj industriji**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Andrej Plevnik

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svima koji su mi posredno ili neposredno pomogli u izradi ovog rada, a posebno se zahvaljujem mentoru Draženu Lončaru na korisnim savjetima i strpljenju.

Andrej Plevnik



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Andrej Plevnik**

Mat. br.: 0035174156

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**BIOENERGANA U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**BIOENERGY PLANT IN FOOD PROCESSING INDUSTRY**

Opis zadatka:

Modernizacija proizvodnih linija u tvrtki za preradu voća i povrća obuhvaća i izgradnju novog postrojenja za pripremu tehnološke pare u kojem će se umjesto loživog ulja kao gorivo koristiti jeftinija i ekološki prihvatljivija biomasa. Novo energetska postrojenje treba omogućiti pokrivanje vršne potrebe za tehnološkom parom od 7 t/h, stanja 13 bar i 210 °C, te osigurati stabilan pogon pri minimalnoj kontinuiranoj potrebi za 2 t/h. Dodatno je, u sezoni grijanja potrebno osigurati približno 1000 kW u režimu 70/90 °C za grijanje radnih prostora.

U okviru rada potrebno je:

1. konfigurirati kogeneracijsko postrojenje na biomasu s kondenzacijskom parnom turbinom s reguliranim oduzimanjem tehnološke pare;
2. konfigurirati postrojenje samo za proizvodnju toplinske energije koje obuhvaća vrelouljni kotao na biomasu, vrelouljni toplinski spremnik, te pločaste isparivače;
3. provesti tehno-ekonomsku analizu cjelogodišnjeg pogona obje konfiguracije i odabrati troškovno povoljnije rješenje;
4. za odabranu konfiguraciju izvesti matematički model dinamike termo-hidrauličkih procesa u komponentama postrojenja i simulirati odziv tlaka pare na zahtijevano povećanje potrošnje pare s 3 t/h na 5 t/h u 30 min.
5. detaljno proračunati i nacrtati komponentu preferencijalne konfiguracije - termouljni toplinski spremnik ili otplinjač napojne vode.

U tekstu diplomskog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

13. studenog 2014.

Rok predaje rada:

15. siječnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:

21., 22. i 23. siječnja 2015.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD.....	1
1.1. Biomasa.....	2
1.2. Prehrambena industrija .....	6
2. Razmatrano postrojenje u prehrambenoj industriji .....	8
3. Tehno-ekonomska analiza .....	10
3.1. Kogeneracija na biomasu .....	10
3.2. Vrelouljni sustav .....	17
4. Simulacija dinamike vrelouljnog sustava .....	26
4.1. Matematički model .....	27
4.2. Rezultati simulacije.....	52
5. Proračun akumulatora vrelog ulja.....	55
6. ZAKLJUČAK.....	63

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Ukupna potrošnja energije za EU 27 (2007.) [2] .....	2
Slika 2.	Načini konverzije biomase do krajnje, korisne energije [4].....	4
Slika 3.	Donja ogrjevna vrijednost u ovisnosti o količini vlage [3] .....	5
Slika 4.	Blok parni kotao [8] .....	7
Slika 5.	Pužni blanšer [9].....	8
Slika 6.	Autoklav [10] .....	8
Slika 7.	Dijagram opterećenja .....	9
Slika 8.	Kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem .....	11
Slika 9.	Dijagram pokrivanja – kondenzacijski pogonski režim, 8300 h rada .....	12
Slika 10.	Srednje godišnje opterećenje.....	14
Slika 11.	Kretanje cijena električne energije [12] .....	15
Slika 12.	Utjecaj cijene el. energije na JPP .....	16
Slika 13.	Ovisnost troškova o mediju [13] .....	19
Slika 14.	Shematski prikaz vrelouljnog sustava .....	20
Slika 15.	Kotao na biomasu [14] .....	20
Slika 16.	Pločasti izmjenjivač topline [15, 16].....	21
Slika 17.	Izmjenjivač topline-isparivač [17].....	22
Slika 18.	Dijagram pokrivanja – vrelouljni sustav .....	24
Slika 19.	Shema cijelog sustava .....	27
Slika 20.	PI regulator .....	29
Slika 21.	Regulacija protoka pare.....	30
Slika 22.	Cijeli sustav u SIMULINK-u .....	30
Slika 23.	Isparivač .....	31
Slika 24.	Model isparivača u SIMULINK-u .....	35
Slika 25.	Punjenje isparivača.....	36
Slika 26.	Odziv isparivača na pad protoka pare .....	37
Slika 27.	Odziv isparivača na povećanje protoka pare.....	38
Slika 28.	Utjecaj visine kapljevine na porast protoka pare.....	39
Slika 29.	Utjecaj visine kapljevine na pad protoka pare.....	40
Slika 30.	Zagrijač.....	41

---

Slika 31.	Model zagrijača u SIMULINK-u .....	43
Slika 32.	Odziv zagrijača.....	44
Slika 33.	Akumulator.....	44
Slika 34.	Model akumulatora u SIMULINK-u.....	46
Slika 35.	Punjenje akumulatora .....	47
Slika 36.	Kotao .....	48
Slika 37.	Model kotla u SIMULINK-u.....	50
Slika 38.	Odziv kotla .....	51
Slika 39.	Utjecaj veličine akumulatora.....	52
Slika 40.	Utjecaj promjene opterećenja.....	53
Slika 41.	Utjecaj količine dimnih plinova .....	54
Slika 42.	Dijagram 3.....	56



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Troškovnik kogeneracije na biomasu.....	13
Tablica 2. Ekonomska analiza kogeneracije za 8300 sati rada .....	15
Tablica 3. Ekonomska analiza kogeneracije za 5200 sati rada .....	16
Tablica 4. Troškovnik vrelouljnog sustava .....	23
Tablica 5. Ekonomska analiza vrelouljnog sustava.....	25
Tablica 6. Klasa posude.....	56

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

AKU-1 AKUMULATOR ULJA

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\rho_p$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća pare
$\rho_k$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća kapljevine
$\rho_{ulje}$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća ulja
$\eta_{ulje}$	-	Iskoristivost vrelouljnog sustava
$\eta_{kogen}$	-	Iskoristivost kogeneracije
$\Phi$	W	Snaga isparivača
$\alpha_{u,isp}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline na strani ulja u isparivaču
$\alpha_p$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline na strani pare
$\alpha_{u,zag}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline na strani ulja u zagrijaču
$\alpha_w$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline na strani vode
$\alpha_{u,aku}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline na strani ulja u akumulatoru
$\alpha_{u,kot}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline na strani ulja u kotlu
$\alpha_{dp}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline na strani dimnih plinova
$\alpha_z$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koef. prijenosa topline zraka
$\nu$	-	Koef. zavara
$\nu_A$	-	Koef. oslabljenja
$\beta$	-	Koef. podnice
$\lambda_{\check{c}}$	$\text{W}/(\text{mK})$	Toplinska vodljivost čelika
$\lambda_{KV}$	$\text{W}/(\text{mK})$	Toplinska vodljivost kamene vune
$\delta$	mm	Debljina izolacije
$q$	$\text{W}/\text{m}^2$	Spec. Toplinski tok
$A_{isp}$	$\text{m}^2$	Površina u isparivaču
$A_{uk}$	$\text{m}^2$	Površina isparivačkog spremnika
$A_{zag}$	$\text{m}^2$	Površina u zagrijaču
$A_{aku}$	$\text{m}^2$	Površina u akumulatoru
$A_{kot}$	$\text{m}^2$	Površina u kotlu
$c_u$	$\text{J}/(\text{kgK})$	Specifični toplinski kapacitet ulja
$c_s$	$\text{J}/(\text{kgK})$	Specifični toplinski kapacitet stijenke
$c_w$	$\text{J}/(\text{kgK})$	Specifični toplinski kapacitet vode

$c_{dp}$	J/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet dimnih plinova
$c_1$	mm	Dodatak zbog odstupanja mjera
$c_2$	mm	Dodatak zbog gubitka korozijom
$D_v$	mm	Vanjski promjer akumulatora vrelog ulja
$D_u$	mm	Unutarnji promjer akumulatora vrelog ulja
$d_i$	mm	Promjer izreza
$d_{u,kot}$	mm	Promjer priključka na strani kotla
$d_{u,gp}$	mm	Promjer priključka na strani isparivača
$E_k$	J	Promjena energije kapljevine
$E_u$	J	Ulaz energije kapljevine
$E_i$	J	Izlaz energije kapljevine
$E_{el}$	MWh	Proizvedena električna energija
$E_{top}$	MWh	Potrebna toplinska energija
$H$	kJ/kg	Specifična entalpija mokre pare
$H_k(p)$	kJ/kg	Specifična entalpija kapljevine za zadani tlak
$H_p(p)$	kJ/kg	Specifična entalpija pare za zadani tlak
$H(T_w)$	kJ/kg	Specifična entalpija kapljevine za zadanu temperaturu
$h$	m	Visina kapljevine u isparivaču
$h_{aku}$	m	Visina akumulatora vrelog ulja
$K_p$	N/mm <sup>2</sup>	Proračunska čvrstoća
$m_{isp}$	kg/s	Maseni protok isparene vode
$m_{pi}$	kg/s	Maseni protok pare na izlazu iz isparivača
$M_k$	kg	Masa kapljevine u isparivaču
$M_{s,isp}$	kg	Masa stijenke u isparivaču
$M_{u,isp}$	kg	Masa ulja u isparivaču
$M_{u,zag}$	kg	Masa ulja u zagrijaču
$M_{s,zag}$	kg	Masa stijenke u zagrijaču
$M_w$	kg	Masa vode u zagrijaču
$M_{u,aku}$	kg	Masa ulja u akumulatoru
$M_{s,aku}$	kg	Masa stijenke u akumulatoru
$M_{u,kot}$	kg	Masa ulja u kotlu
$M_{s,kot}$	kg	Masa stijenke u kotlu
$M_{dp}$	kg	Masa dimnih plinova u kotlu

---

$m_{\text{bio,kogen}}$	t	Godišnja potrošnja biomase za kogeneraciju
$m_{\text{bio,ulje}}$	t	Godišnja potrošnja biomase za vrelouljni sustav
$p$	bar	Tlak u isparivaču
$p_p$	bar	Proračunski tlak
$p_{\text{pisp}}$	bar	Ispitni tlak
$q_w$	kg/s	Maseni protok vode
$q_{u,gp}$	kg/s	Maseni protok ulja u isparivaču i zagrijaču
$q_{u,kot}$	kg/s	Maseni protok ulja u kotlu
$q_{dp}$	kg/s	Maseni protok dimnih plinova u kotlu
$Q_{\text{gorivo,kogen}}$	MWh	Potrebna energija goriva za kogeneraciju
$Q_{\text{gorivo,ulje}}$	MWh	Potrebna energija goriva za vrelouljni sustav
$r(p)$	kJ/kg	Specifična entalpija isparavanja za zadani tlak
$s_e$	mm	Pretpostavljena debljina stijenke
$s$	mm	Potrebna debljina stijenke
$s_i$	mm	Debljina stijenke izreza
$s_p$	mm	Pretpostavljena debljina podnice
$s_k$	mm	Pretpostavljena debljina kalote
$s_t$	mm	Pretpostavljena debljina torusa
$S$	-	Proračunska sigurnost za proračunski tlak
$S'$	-	Proračunska sigurnost za ispitni tlak
$T_w$	°C	Temperatura vode u zagrijaču
$T_{s,isp}$	°C	Temperatura stijenke u isparivaču
$T_{u,isp}$	°C	Temperatura ulja u isparivaču
$T_{u,aku}$	°C	Temperatura ulja u akumulatoru
$T_{u,zag}$	°C	Temperatura ulja u zagrijaču
$T_{s,zag}$	°C	Temperatura stijenke u zagrijaču
$T_{\text{nap}}$	°C	Temperatura napojne vode
$T_{u,kot}$	°C	Temperatura ulja u kotlu
$T_{s,aku}$	°C	Temperatura stijenke u akumulatoru
$T_{s,kot}$	°C	Temperatura stijenke u kotlu
$T_{dp}$	°C	Temperatura dimnih plinova u kotlu
$T_{dp,ulaz}$	°C	Temperatura dimnih plinova na ulazu u kotao
$T_p$	°C	Temperatura pare

---

---

$T_{\max}$	$^{\circ}\text{C}$	Maksimalna temperatura ulja
$T_{\text{ok}}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura okoliša
$T_{\text{pov}}$	$^{\circ}\text{C}$	Maksimalna temperatura stijenske
$V_{\text{uk}}$	$\text{m}^3$	Volumen isparivača
$V_{\text{p}}$	$\text{m}^3$	Volumen pare
$V_{\text{k}}$	$\text{m}^3$	Volumen kapljevine
$w$	$\text{m/s}$	Brzina strujanja ulja

---

**SAŽETAK**

Tema ovog diplomskog zadatka je modernizacija sustava za proizvodnju tehnološke pare za potrebe prehrambene industrije. Kotlovi na fosilna goriva, kao sve nestabilniji i nesigurniji izvor energije zamjenjuju se kotlovima na obnovljivi izvor energije – biomasu.

Prehrambena industrija predstavlja velikog potrošača toplinske energije s diskontinuiranim procesima. Takvi procesi zahtijevaju velike količine energije u kratkom periodu s naglim promjenama u opterećenju. Biomasa predstavlja najvažniji obnovljivi izvor za dobivanje toplinske energije ali klasični sustavi izgaranja biomase ne mogu pratiti nagle promjene opterećenja.

Za rješavanje tih problema napravljena je tehno-ekonomska analiza provjerene tehnologije – kogeneracije na biomasu s izgaranjem na rešetki, parnom turbinom i reguliranim oduzimanjem pare. Kao alternativa takvom sustavu detaljno je objašnjen sustav s vrelouljnim kotlom, akumulatorom vrelog ulja i izmjenjivačem topline – isparivačem za proizvodnju tehnološke pare, te je napravljena tehno-ekonomska analiza za usporedbu s kogeneracijom.

U drugom dijelu rada je sustav s termo uljem je matematički modeliran u SIMULINK-u kako bi se pokazali odzivi sustava. Prikazana je dinamika pojedinih dijelova sustava kao i cijelog sustava.

Na kraju rada napravljen je proračun akumulatora vrelog ulja s pripadajućim nacrtom.

Ključne riječi: biomasa, kogeneracija, termo ulje, prehrambena industrija

**SUMMARY**

The subject of this master thesis is modernization of a system for steam production for the food industry. Since fossil fuels are becoming more and more unstable and insecure energy source, fossil fuel fired boilers are replaced by boilers using renewable energy source - biomass.

The food industry is a large consumer of thermal energy with discontinuous processes. Such processes require large amounts of energy during short periods of time with sudden load changes. Biomass is the most important renewable source for producing thermal energy, but the standard biomass combustion systems can not respond to rapid load changes.

To solve these problems, a techno-economic analysis of a proven technology (a cogeneration biomass combustion on a grid and steam turbine with controlled steam extraction) was performed. As an alternative, thermal oil boiler system, with a hot oil accumulator and a heat exchanger - evaporator for steam production is described in detail. A techno-economic analysis of this system was also performed for comparison with the cogeneration system.

In the second part of the thesis, a mathematical model of the thermal oil system was created in Simulink-in order to show the system responses. The dynamics of individual parts of the system as well as the dynamics of the entire system were shown.

In the end, a design and a layout of the hot oil accumulator were made.

Key words: biomass, cogeneration, thermal oil, food industry



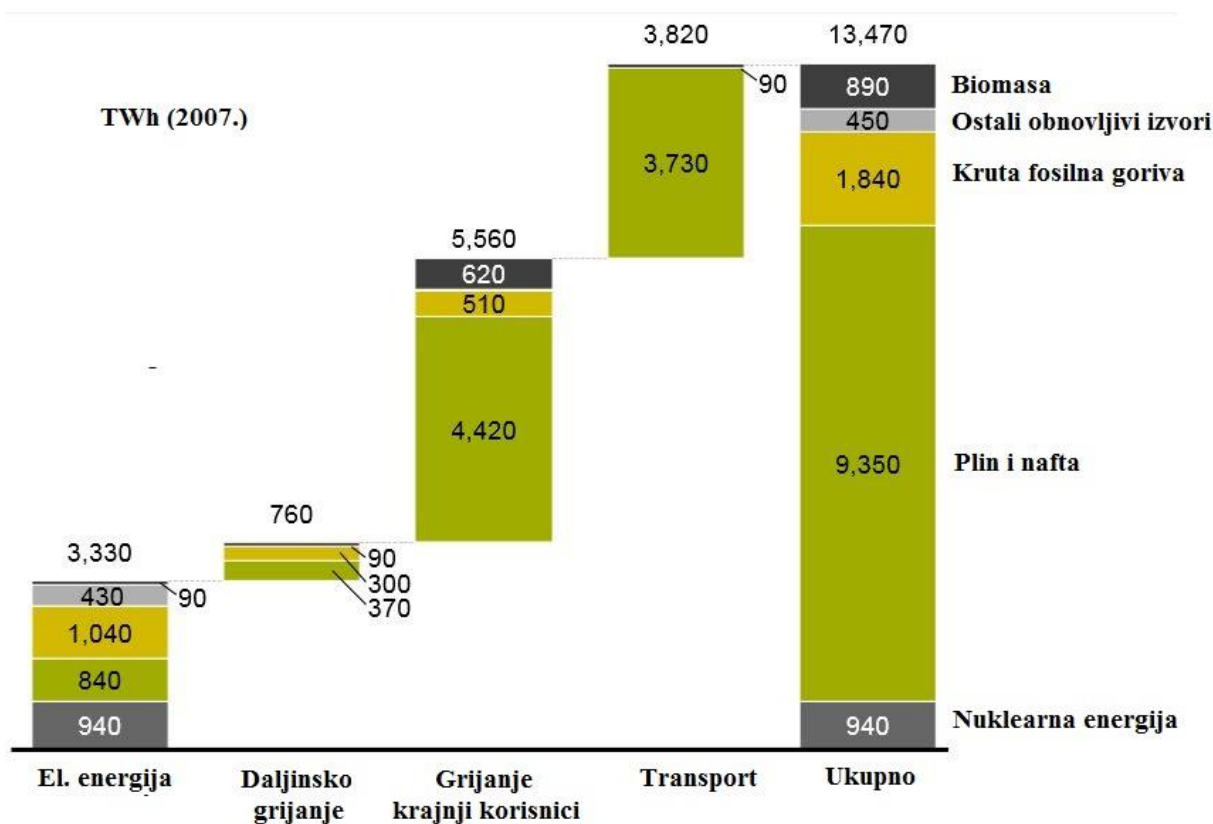
## 1. UVOD

Sigurnost opskrbe energijom postaje realni problem zbog stalnog porasta potrošnje energije kao posljedica sve veće gospodarske aktivnosti, povećanja broja stanovnika i životnog standarda. Isto tako, s druge strane imamo ograničene zalihe fosilnih goriva kojima su cijena i sigurnost opskrbe sve nestabilniji (plin i nafta), te tako postaju sve nesigurniji izvori energije. Svim krajnjim korisnicima energije, pogotovo što se industrije tiče, cilj je smanjenje troškova pogona kako bi i dalje bili konkurentni na tržištu. Razvojem tehnologije korištenja obnovljivih izvora energije nastaje veliki interes zamjene skupih fosilnih goriva s održivim, znatno jeftinijim i ekološki prihvatljivijim obnovljivim izvorima energije.

U ovom radu obradit će se problem realne prehrambene industrije koja želi zamijeniti postojeći sustav proizvodnje procesne pare na fosilno gorivo, u ovom slučaju srednje teško loživo ulje, s obnovljivim izvorom energije – biomasom, kao najpristupačnijim obnovljivim izvorom za taj geografski položaj. Opisat će se načini dobivanja procesne pare s klasičnim izgaranjem biomase na rešetki u slučaju kogeneracije te u slučaju vrelouljnog kotla na biomasu s akumulatorom vrelog ulja i pločastim izmjenjivačem topline-isparivačem. Isto tako će se za slučaj s vrelin uljem napraviti dinamika termo-hidrauličkih procesa te odziv tlaka pare na zahtijevano povećanje potrošnje pare u programskom alatu SIMULINK. Također, provedit će se tehno-ekonomska analiza oba slučaja za usporedbu isplativosti.

## 1.1. Biomasa

Biomasa je već sada najvažniji obnovljivi izvor energije u Europi, a ima golemi potencijal za daljnji razvoj. Obnovljivi izvori u Europskoj Uniji u 2012. godini zadovoljavali su 11% svih potreba za energijom (Eurostat2012). Energija iz biomase zauzima 95% proizvedene toplinske energije, a 18% proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora. Slika 1. prikazuje potrošnju finalne energije za 2007. godinu po sektorima za različite izvore. Ukupna energija za grijanje i električnu energiju, bez transporta, iznose oko 10000 TWh. Od toga 800 TWh ili 8% zauzima biomasa. Biogoriva, dodatno, u transportu zauzimaju 2% što je ekvivalent od 90 TWh [1].



Slika 1. Ukupna potrošnja energije za EU 27 (2007.) [2]

Iz slike 1. se vidi da se iz biomase za 2007. godinu proizvelo 90 TWh električne energije, te 710 TWh toplinske energije od čega 90 TWh otpada na daljinsko grijanje, a ostatak na grijanje kod krajnjih korisnika [2].

---

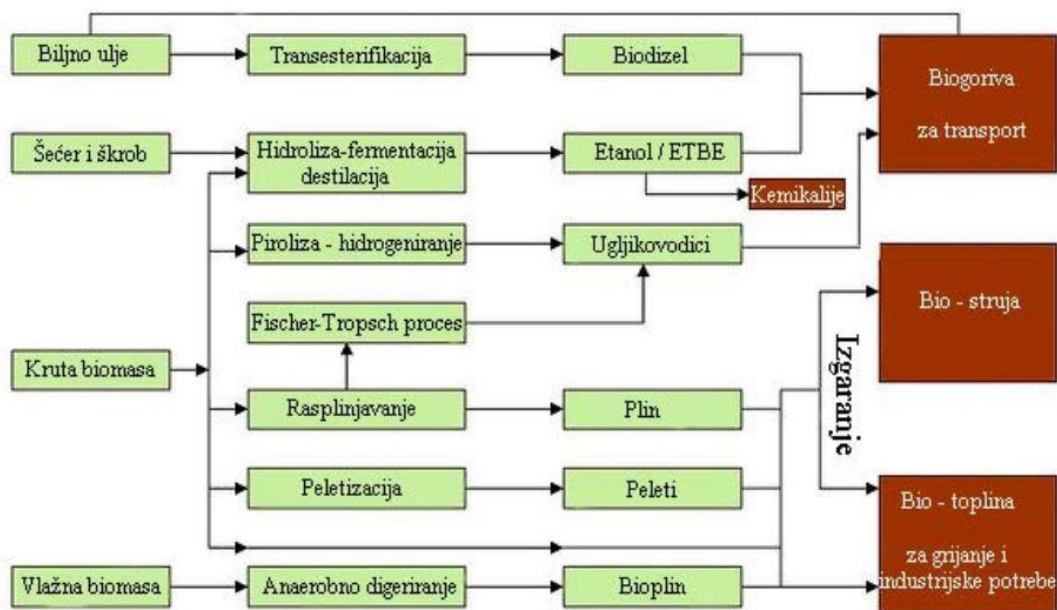
Postoje tri glavne mogućnosti za povećanje proizvodnje električne i toplinske energije iz biomase:

- Suspaljivanje ili prenamjena postojećih sustava na kruta goriva – sustavi koji trenutačno troše ugljen ili lignit za proizvodnju električne ili toplinske energije moguće je djelomično suspaljivati biomasu ili potpuno uz određene preinake sustava (elektrane, energane)
- Izgradnja novih postrojenja na biomasu – gdje je moguće novo postrojenje spojiti u postojeći elektro-energetski sustav ili na daljinsko grijanje u sklopu kogeneracije
- Zamjena fosilnih goriva sa biomasom za krajnje korisnike toplinske energije – zamjena postojećih kotlova na fosilna goriva za grijanje s automatskim sustavima na pelete ili brikete u kućanstvu i industriji [2]

Daljnji razvoj biomase trebao bi slijediti neka osnovna načela, poput visoke učinkovitosti konverzije, konkurentnosti i održivosti. Iskustvo dokazuje da upotreba biomase u proizvodnji topline na najbolji način udovoljava navedenim načelima. Biomasa za proizvodnju topline može se koristiti u malim jedinicama, poput pojedinačnih kuća, u projektima ugovorne prodaje topline, za područne toplane te u industriji. U svakom slučaju, opskrba visokokvalitetnom biomasom, bez obzira na to radi li se o ogrjevnom drvu, drvnoj sječki ili prerađenom drvu, od ključne je važnosti za brz rast ovog tržišta. Biomasa u svom ciklusu od proizvodnje do njene upotrebe za energetske svrhe ima nulti nivo proizvodnje CO<sub>2</sub>, odnosno ima zatvoreni CO<sub>2</sub> krug. Količina CO<sub>2</sub> koja nastaje prilikom prerade biomase u energetske svrhe putem fotosinteze i sunčeve energije ponovo se apsorbira u rastu sirovina iz kojih biomasa nastaje. Energija se u sirovini (biljkama, drveću) nalazi u kemijskom obliku i ta se energija oslobađa prilikom korištenja biomase u energetske svrhe, bilo prilikom prirodnog raspadanja ili prilikom izgaranja. Uobičajeno je da se biomasa smatra CO<sub>2</sub> neutralno gorivo, ali prilikom njene pretvorbe u energetske svrhe nastaju dodatne količine CO<sub>2</sub> zbog korištenja fosilnih goriva u procesima transporta, obrade i uzgoja biomase. Iako je biomasa CO<sub>2</sub> neutralno gorivo, količina stakleničkih plinova koja se smanji u atmosferi korištenjem biomase u odnosu na fosilna goriva ovisi o efikasnosti procesa pretvorbe biomase u krajnji energent koji koriste krajnji korisnici. Biomasa od šumskog drveta predstavlja ostatke koji nastaju prilikom sječe drveta kao što su sitna granjevina i panjevi koji se kasnije pomoću iverača usitnjavaju u sječku (iver) koja se koristi kao gorivo. Pod biomasom koja nastaje u drvnoj industriji smatra se otpad

koji nastane poslije primarne i sekundarne pilanske obrade trupaca. Taj otpad nakon primarne obrade iznosi od 25-48% od ulazne mase trupaca i najčešće je to krupni pilanski ostatak, piljevina i kora. Poljoprivredna biomasa najčešće je slama od pšenice i ječma, te ostaci kukuruza (kukuruzovina), te svih ostalih žitarica. Pod voćnom biomasom podrazumijeva se otpad koji nastaje prilikom rezidbe voćaka u voćnjacima ili vinogradima. Biomasa koja nastaje kao sekundarni produkt u voćarskoj i vinogradarskoj industriji podrazumijeva koštice (šljiva, višnja, trešnja, paprika) te ljuske (orah, lješnjak, badem) i ovi se ostaci mogu koristiti u daljnje energetske svrhe [3, 4].

Pretvorba biomase u krajnje nosioce energije vrši se na razne načine. Direktno izgaranje se najčešće koristi za dobivanje električne i toplinske energije za kućanstva i industriju. Pored izgaranja koriste se još biokemijski procesi (fermentacija, alkoholna ili anaerobna razgradnja) te termokemijski procesi (piroliza i rasplinjavanje) koji biomasu konvertiraju u razne vrste krutih, tekućih ili plinovitih goriva i produkata koji se mogu koristiti za daljnju proizvodnju energije navedenih na slici 2. Cijena drvene (M35/P100) sječke iz šumske biomase za 35% vlage iznosi oko 45 €/t [4].



Slika 2. Načini konverzije biomase do krajnje, korisne energije [4]

Na energetska vrijednost biomase zbog njene nehomogenosti utječe nekoliko čimbenika. Najveći utjecaj na ogrjevnu vrijednost biomase ima sadržaj vlage te udio pepela u biomasi. Udio pepela u slami može biti i do 7 %, dok je udio pepela u šumskom drvetu uglavnom oko 0,3%. Na slici 3. prikazana je ovisnost donje ogrjevne vrijednosti o količini vlage za udio pepela od 2% [3].

M (%)	MWh/t	GJ/t	M (%)	MWh/t	GJ/t
15	4,27	15,36	38	2,93	10,54
16	4,21	15,15	39	2,87	10,33
17	4,15	14,94	40	2,81	10,12
18	4,10	14,73	41	2,76	9,91
19	4,04	14,52	42	2,70	9,71
20	3,98	14,31	43	2,64	9,50
21	3,92	14,10	44	2,58	9,29
22	3,86	13,89	45	2,52	9,08
23	3,80	13,68	46	2,47	8,87
24	3,75	13,47	47	2,41	8,66
25	3,69	13,27	48	2,35	8,45
26	3,63	13,06	49	2,29	8,24
27	3,57	12,85	50	2,23	8,03
28	3,51	12,64	51	2,17	7,82
29	3,45	12,43	52	2,12	7,61
30	3,40	12,22	53	2,06	7,40
31	3,34	12,01	54	2,00	7,19
32	3,28	11,80	55	1,94	6,98
33	3,22	11,59	56	1,88	6,77
34	3,16	11,38	57	1,82	6,56
35	3,11	11,17	58	1,77	6,35
36	3,05	10,96	59	1,71	6,15
37	2,99	10,75	60	1,65	5,94

Slika 3. Donja ogrjevna vrijednost u ovisnosti o količini vlage [3]

## 1.2. Prehrambena industrija

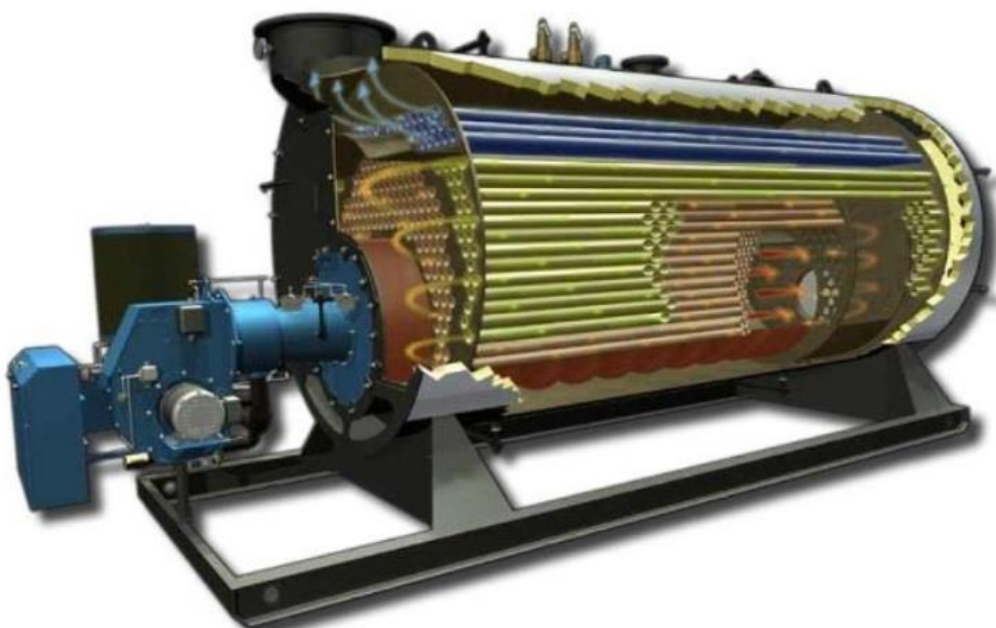
U prehrambenoj industriji koriste se različite vrste energije. Troškovi energije u prehrambenoj industriji su manji od troškova sirovina (4,5% od ukupnog troška sirovina u preradi voća i povrća), ali povećanje cijene energije utječe na to da ona u ukupnim troškovima zauzima sve značajnije mjesto. Velike kompanije u svijetu intenzivno rade na smanjenju utroška energije, a time i troškova (na primjer, tvrtka PepsiCo je tokom 1999. godine smanjila potrošnju energije za 21%). Korištenje obnovljivih izvora u proizvodnji energije u prehrambenoj industriji su sve učestaliji načini za unaprjeđenje energetske učinkovitosti i same održivosti [5].

Najveći potrošači energije u prehrambenoj industriji su: mlinovi za mljevenje kukuruza, proizvodnja šećera iz šećerne repe, mlinovi u tvornicama za proizvodnju ulja iz soje, proizvodnja pića na bazi slada, tvornice za preradu mesa, konzerviranje voća i povrća, smrzavanje voća i povrća, proizvodnja kruha, keksa i srodnih proizvoda. Procesi zagrijavanja i sustavi za hlađenje troše velike količine energije. 75% energije u tvornicama za preradu hrane troše sustavi hlađenja i grijanja. Osim toga, 12% energije u prehrambenoj industriji se troši na pokretanje različitih strojeva (pumpe, pokretne trake, mikseri, drobilice, ventilatori, sušilice), te na ventilacijske sustave i osvjetljenje oko 8% [6].

Za procese kao što su kuhanje, sušenje, sterilizacija i pasterizacija uglavnom se koristi toplinska energija u obliku tople vode ili pare, ovisno o potrebnoj temperaturnoj razini za određeni proces (pasterizacija se odvija na oko 80°C, dok se sterilizacija odvija na oko 150°C). Prema radnom tlaku pare, sustavi se dijele na niskotlačne (do 10 bara), srednjetačne (10-15 bara) i visokotlačne (do 50 ili 60 bara) [7].

Za velike potrošače toplinske energije poput šećerana ili uljara, para se proizvodi u generatorima pare kogeneracijskih postrojenja te se oduzima nakon ekspanzije u turbini zbog veće iskoristivosti, takve industrije uglavnom imaju velike i kontinuirane potrebe za toplinskom energijom, s tim da se proizvodi i električna energija za pogon ili se predaje u mrežu.

Za manje industrije, kao na primjer u obradi voća i povrća, koriste se parni blok kotlovi (plin, loživa ulja) kao na slici 4., koji mogu pratiti skokovita opterećenja tj. diskontinuirani način rada (šaržni rad). Takav sustav predstavlja vremenski isprekidane operacije punjenja, postupka koji se odvija, pražnjenja i pripreme za novi ciklus. Prednosti takvog načina rada su uređaji jednostavniji po konstrukciji, niža cijena uređaja i fleksibilnost tehnološkog postupka koja podrazumijeva da se mogu proizvoditi različiti proizvodi pri čemu sirovina ne mora biti ujednačene kvalitete. U ovakvom načinu rada mijenjanjem niza parametara moguće je postići propisanu kvalitetu proizvoda. Nadalje procesi koji rade u više faza manje su osjetljivi na smetnje koje mogu nastati u pojedinoj fazi jer postoje tampon spremnici između pojedinih faza. Nedostaci takvih procesa su neproduktivne faze (punjenje i pražnjenje), trebaju biti većeg kapaciteta, kao otvoreni sustavi koji se teško čiste mogu predstavljati izvor zagađenja. Isto tako zahtijevaju veći utrošak energenata, veću potrebu u radnoj snazi i mogu rezultirati neujednačenom kvalitetom finalnog proizvoda [7].



**Slika 4. Blok parni kotao [8]**

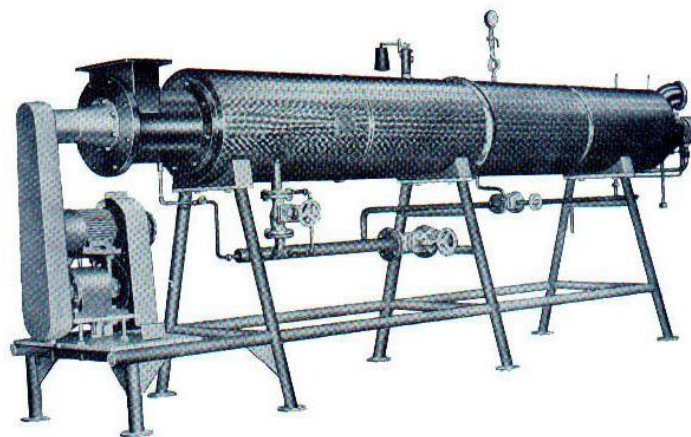


## 2. Razmatrano postrojenje u prehrambenoj industriji

Kao primjer za tehno-ekonomsku analizu uzeta je realna prehrambena industrija. Proizvodnju čine strojevi za preradu voća i povrća kod proizvodnje sokova, džemova, ajvara i kiseljenja povrća. Proizvodnja ima diskontinuirani način rada, jer se kod svakog procesa pogon zaustavlja da bi se izvadio obrađen proizvod i pripremio i stavio novi u ciklus obrade.

Proizvodnja se sastoji od sljedećih strojeva za obradu:

- Pužni blanšer – stroj služi za zagrijavanje raznih proizvoda u toku tehnološkog procesa. Koristi se kod proizvodnje voćnih kaša, džemova, ajvara, sokova, kao i za zagrijavanje smrznutog voća. (Slika 5.)



Slika 5. Pužni blanšer [9]

- Vakuum kuhalo – stroj služi za ukuhavanje povrća na 60 - 80°C.
- Stroj za pasterizaciju
- Autoklav – grijana hermetička posuda za zagrijavanje tvari pod tlakom na temperaturu višu od njihova vrelišta. (Slika 6.)

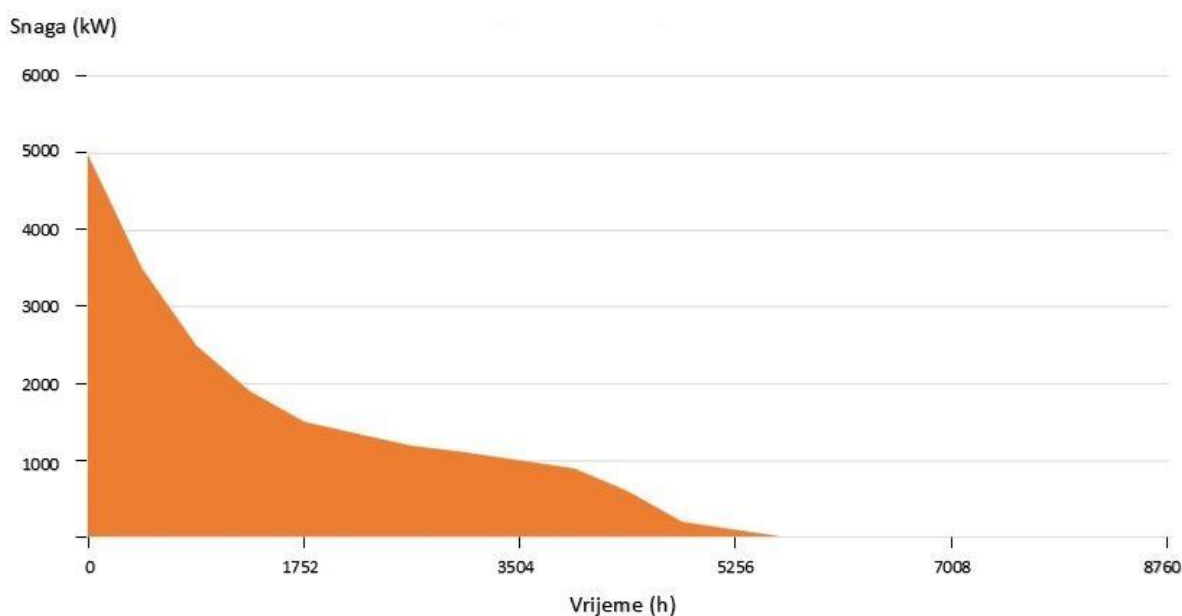


Slika 6. Autoklav [10]



- UHT i deaerator – stroj za sterilizaciju i otplinjavanje proizvoda.
- Razne peračice voća, povrća, ambalaže...

Energana se trenutno sastoji od jednog blok kotla na mazut, s maksimalnom proizvodnjom pare od 7 tona na sat, parametara 13 bara i 200°C. Kotao je proizveden 1976. godine i kao takav bi trebao na generalni remont, te bi se eventualno mogao koristiti kao rezervni kotao uslijed godišnjeg remonta nove energane. Energanu još čine razni razdjelnici pare, kemijska priprema vode, spremnici kondenzata, dvodnevni spremnici mazuta, te izmjenjivači povrata kondenzata za zagrijavanje prostorija.



**Slika 7. Dijagram opterećenja**

Na slici 7. prikazan je dijagram opterećenja. Kako se rijetko radi vikendima i većinu godine rade samo dvije smjene, energana radi oko 5200 sati godišnje. Godišnje se potroši 9.132.000 kWh loživog ulja, što je otprilike 1.004.575 € ako je kilogram loživog ulja oko 0,11 €/kWh. Ta visoka cijena loživog ulja, koja iz godine u godinu raste za oko 6%, te starost kotla su glavna motivacija za promjenu goriva.

### 3. Tehno-ekonomska analiza

U tehno-ekonomskoj analizi obradit će se dvije konfiguracije ložene biomasom koje bi mogle zadovoljiti diskontinuiranu potrošnju u opisanoj prehrambenoj industriji, to su:

- Kogeneracija na biomasu
- Vrelouljni sustav

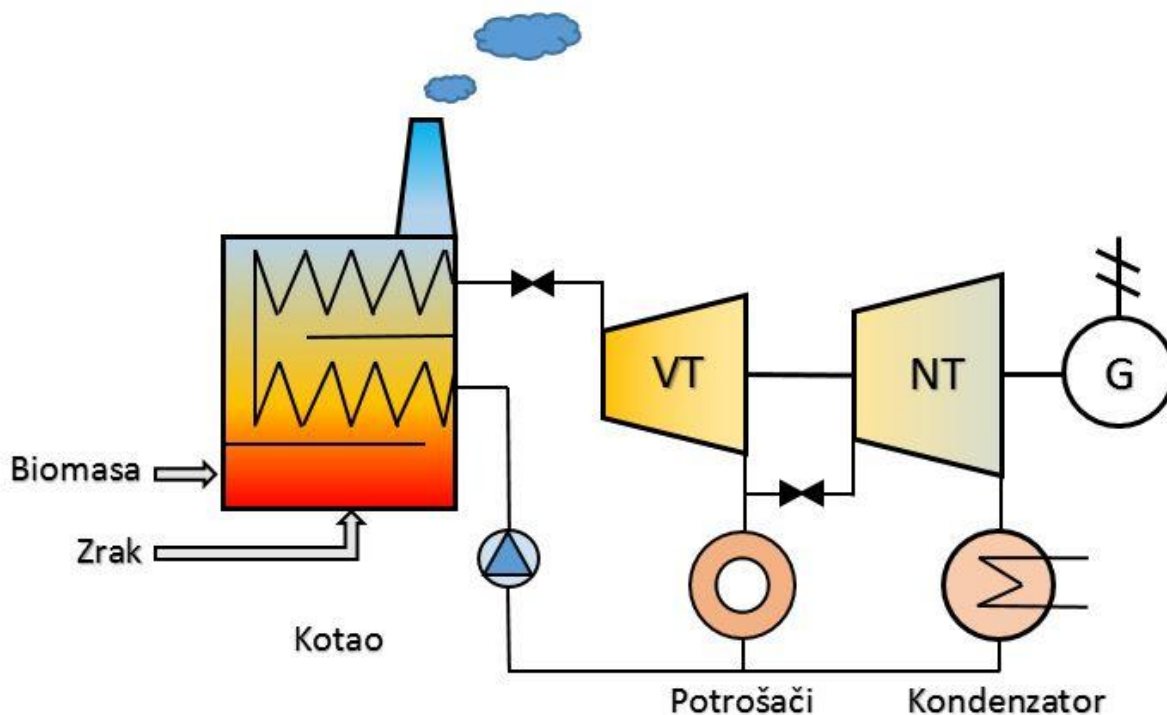
U ekonomskoj analizi obradit će se kogeneracija s Rankineovim ciklusom s vodenom parom (izgaranje biomase na rešetki, parni kotao, parna turbina s reguliranim oduzimanjem pare), te vrelouljni sustav koji će biti izveden od vrelouljnog kotla s izgaranjem na rešetki, akumulatora vrelog ulja i pločastog izmjenjivača topline-isparivača.

#### 3.1. Kogeneracija na biomasu

Društvo se usmjerava na korištenje efikasnijih tehnologija, koje će omogućiti maksimalno iskorištenje primarne energije u svim energetske procesima, te pored ekonomskih ostvariti i ekološke uštede, doprinoseći tako smanjivanju štetnog utjecaja na okoliš. Kogeneracija je tehnologija istovremene proizvodnje električne i korisne toplinske energije. Potencijalna mjesta za primjenu kogeneracije nalaze se svugdje gdje postoji istovremena potreba za električnom i toplinskom energijom. Osim energana u različitim industrijama, kogeneracija je pogodna za sustave daljinskog grijanja, za hotele, bolnice, zračne luke, trgovačke centre, sportske dvorane ili bazene. Prednosti kogeneracijskih sustava, u odnosu na sustave odvojene opskrbe vidljive su pri usporedbi gubitaka koji nastaju proizvodnjom električne i toplinske energije. Za istu količinu primarne energije (fosilnog goriva, vodika, biomase, industrijskog ili poljoprivrednog otpada) kogeneracijsko postrojenje isporučit će u nekim slučajevima i do 40 % više električne i toplinske energije nego sustav s odvojenom opskrbom. Veličina kogeneracijskog postrojenja kreće se u rasponu od nekoliko kilowatta do više stotina megawatta. Postrojenja čija snaga ne prelazi 1 MW<sub>e</sub> nazivaju se male kogeneracije dok se postrojenja snage do 50 kW<sub>e</sub> nazivaju mikrokogeneracije. Kao minimalni preduvjet isplativosti kogeneracije najčešće se definira postojanje kontinuirane potrebe za toplinskom energijom u trajanju od najmanje 4.500 sati godišnje. Kogeneracijsko postrojenje projektira se i vodi s ciljem pokrivanja toplinskih potreba procesa ili objekta [11].

### 3.1.1. Opis rada

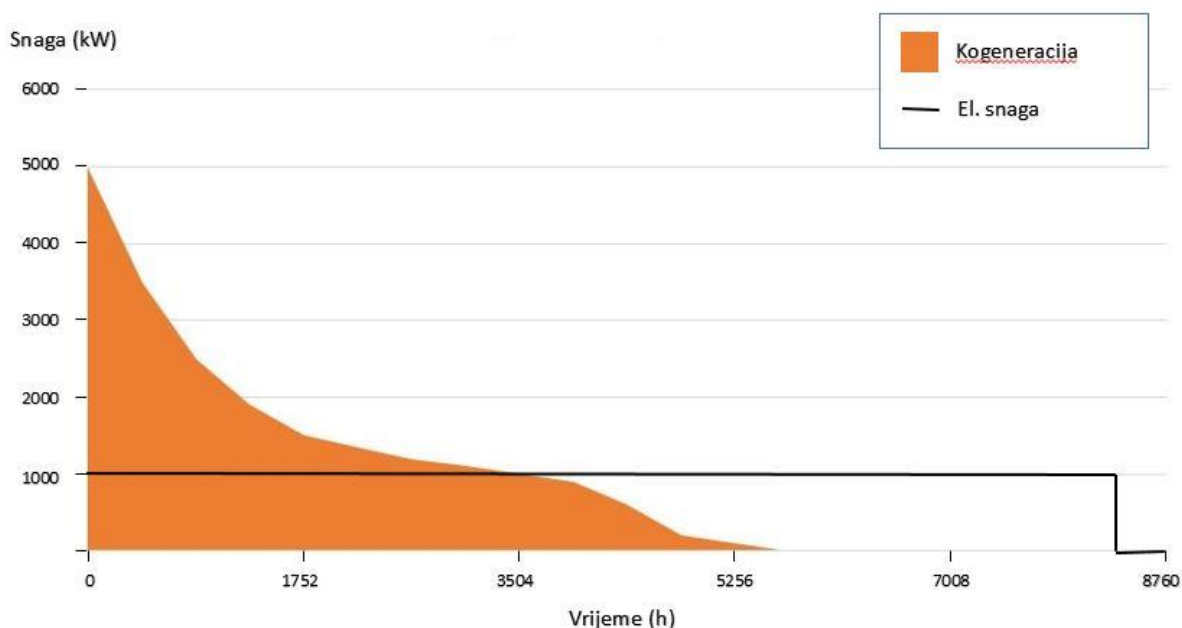
U primjeni je najrašireniji koncept kogeneracijskog postrojenja s parnom turbinom. Vodena para proizvedena u generatoru pare (parnom kotlu) se nakon ekspanzije u parnoj turbini koristi za grijanje vode u sustavu područnog grijanja i/ili u industrijskom procesu. Načelno se razlikuju postrojenja s protutlačnom parnom turbinom i postrojenja s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem. Kod postrojenja protutlačne turbine proizvodnja električne energije ovisi o promjenjivoj potrošnji toplinske energije te protutlaku pare koji je određen zahtjevima potrošača. Kod postrojenja kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem na proizvodnju električne energije osim promjenjive toplinske potrošnje utječe i tlak kondenzacije koji ovisi o temperaturi i raspoloživoj količini rashladnog medija (vode ili zraka). U tehno-ekonomskoj analizi uzet će se u obzir kogeneracija s reguliranim oduzimanjem a shematski je prikazana na slici 8. [11].



Slika 8. Kogeneracijsko postrojenje s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem

### 3.1.2. Ekonomska analiza kogeneracije

Za usporedbu uzeta je kogeneracija snage 1 MW<sub>el</sub>. Toplinska snaga na oduzimanju je 5000 kW što je dovoljno da pokrije sve potrebe za parom prehrambene industrije kako je prikazano na slici 9. Napravit će se ekonomska analiza za slučaj da postrojenje radi 8300 sati godišnje s preko 3000 sati rada u čistom kondenzacijskom režimu, i za slučaj da radi samo dok ima potrebe za toplinskom energijom što znači oko 5200 sati godišnje.



**Slika 9. Dijagram pokrivanja – kondenzacijski pogonski režim, 8300 h rada**

Osnovne elemente sustava kogeneracije čine:

- Parni kotao
- Spremnik biomase s transportnim i dozirnim sustavom
- Kondenzacijska parna turbina s generatorom i s reguliranim oduzimanjem tehnološke pare
- Kondenzator (vodom hlađeni) s kondenzatnim pumpama
- Mokri rashladni toranj s cirkulacijskim pumpama rashladne vode
- Kemijska priprema vode
- Elektro oprema
- Građevina

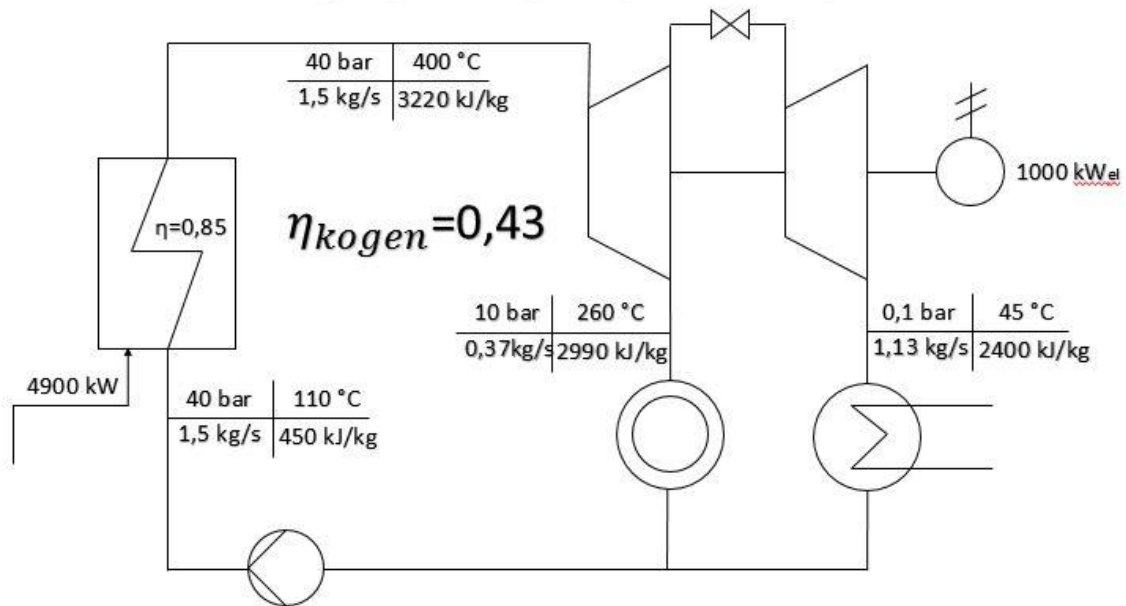
U tablici 1. prikazane su cijene elemenata koji su potrebni za izgradnju kogeneracije na biomasu.

<b>Naziv:</b>	<b>Cijena (€)</b>
Parno kotlovsko postrojenje	1.500.000,00
Multiciklon	25.000,00
Automatski transport pepela	20.000,00
Ventilator dimnih plinova i dimovodni kanali	27.000,00
Parno turbogeneratorsko postrojenje	1.000.000,00
Vakuumski vodom hlađeni kondenzator	180.000,00
Vakuumska dvostupanjska stanica	27.000,00
Spajanje i prisilno hlađenje vakuumskog sustava	5.000,00
Dnevni spremnik biomase	100.000,00
Transport biomase u dozirni silos kotla.	20.000,00
Termička priprema vode	100.000,00
Ostala strojarska oprema prema projektu	237.000,00
Elektro radovi i oprema	550.000,00
Građevinski radovi	800.000,00
Tehnička dokumentacija	500.000,00
<b>UKUPNO</b>	<b>5.091.000,00</b>

**Tablica 1. Troškovnik kogeneracije na biomasu**

Ukupna cijena investicije je 5.091.000,00 €. Proizvodnja električne energije na godišnjoj razini iznosi oko 8.300.000 kWh, a toplinske energije oko 9.132.000 kWh. Na slici 10. prikazano je srednje godišnje opterećenje kogeneracije, te iskoristivost kogeneracije za 8300 sati rada godišnje i sa srednjim toplinskim opterećenjem na oduzimanju od 1100 kW.

## Srednje godišnje opterećenje



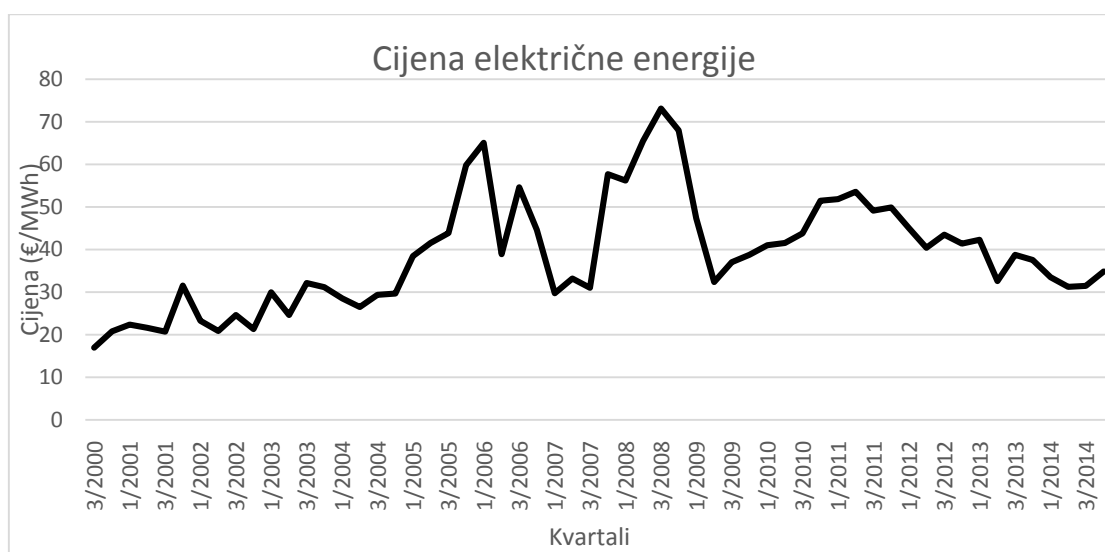
Slika 10. Srednje godišnje opterećenje

Godišnja potreba za biomasom ogrjevne vrijednosti 12 GJ/tona iznosi:

$$Q_{gorivo,kogen} = \frac{E_{el} + E_{top}}{\eta_{kogen}} = \frac{8.300 \text{ MWh} + 9.132 \text{ MWh}}{0,43} = 40.540 \text{ MWh}$$

$$m_{bio,kogen} = \frac{40.540 \text{ MWh} \cdot 3,6}{12 \text{ MJ/tona}} = 12.162 \text{ tona}$$

Godišnja potrošnja biomase je oko 12.162 tone što na godišnjoj razini iznosi oko 547.284 € za cijenu biomase od 45 € po toni. Otkupna cijena električne energije je 40 €/MWh koja je odabrana prema trenutnoj tržišnoj cijeni. Godišnji prihodi od prodaje električne energije iznose oko 332.000 €. Kretanje veleprodajnih cijena električne energije na tržištu u Njemačkoj zadnjih nekoliko godina prikazano je na slici 11. [12].

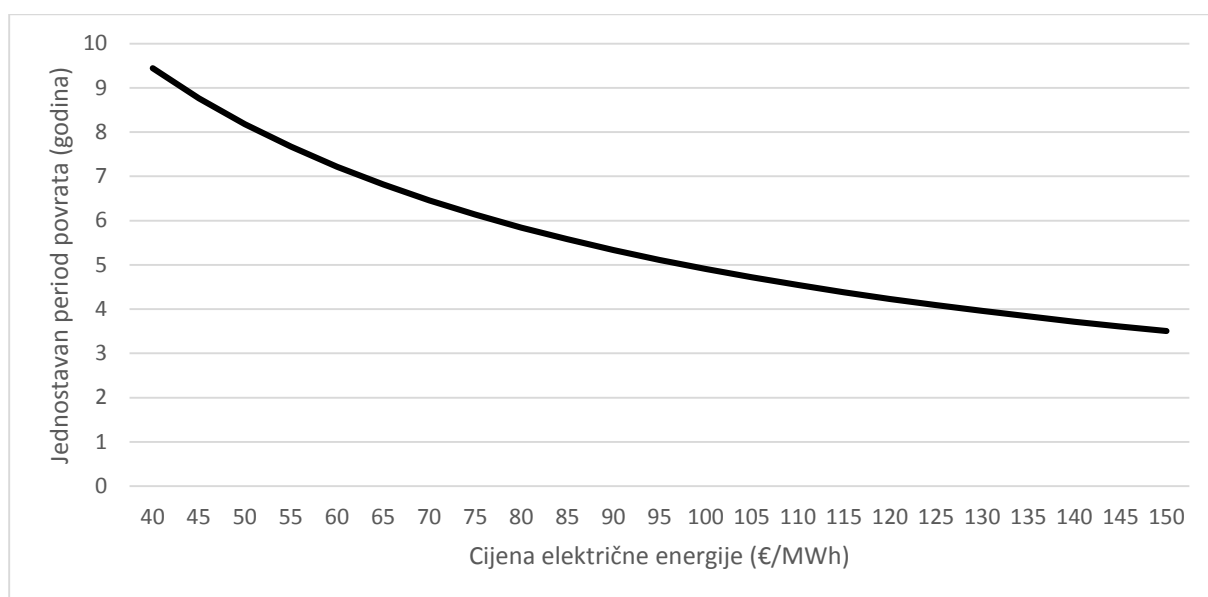


Slika 11. Kretanje cijena električne energije [12]

<b>(A) INVESTICIJA</b>		5.091.000,00 €
	<b>PRIHOD</b>	
El. Energija		332.000,00 €
Ušteda		1.004.575,00 €/god
<b>(B) UKUPNO PRIHOD</b>		1.336.575,00 €
	<b>RASHOD</b>	
Održavanje		250.000,00 €/god
Gorivo		547.284,00 €/god
<b>(C) UKUPNO RASHOD</b>		797.284,00 €
<b>(D) Godišnja neto zarada</b>	<b>(B) – (C) =</b>	<b>539.291,00 €</b>
<b>Jednostavni period povrata</b>	<b>(A) / (D) =</b>	<b>9,44 god</b>

Tablica 2. Ekonomska analiza kogeneracije za 8300 sati rada

Investicija bi se trebala vratiti u 9,44 godina, što je dug period ako nema poticaja za proizvodnju električne energije. Na slici 12. prikazan je utjecaj otkupne cijene električne energije na jednostavan period povrata u ovom slučaju kogeneracije. Za povrat investicije od 6 do 7 godina cijena električne energije bi trebala biti oko 70 €/MWh, tako da bi poticaji na svaki proizvedeni MWh bili oko 30 €.



**Slika 12. Utjecaj cijene el. energije na JPP**

U slučaju da postrojenje radi 8300 sati, čisti kondenzacijski rad traje preko 3000 sati. Kao alternativa tome napraviti će se ekonomska analiza u tablici 3. za slučaj da radi samo dok postoji potreba za toplinskom energijom a to je oko 5200 sati. U tom slučaju ukupna iskoristivost kogeneracije je 51%, proizvedena električna energija je oko 5200 MWh, a energija unesena gorivom oko 28000 MWh, što je ekvivalent od oko 8400 tona biomase.

<b>(A) INVESTICIJA</b>		5.091.000,00	€
<b>PRIHOD</b>			
El. Energija		208.000,00	€
Ušteda		1.004.575,00	€/god
<b>(B) UKUPNO PRIHOD</b>		1.212.575,00	€
<b>RASHOD</b>			
Održavanje		250.000,00	€/god
Gorivo		378.000,00	€/god
<b>(C) UKUPNO RASHOD</b>		628.000,00	€
<b>(D) Godišnja neto zarada</b>	<b>(B) – (C) =</b>	<b>584.575,00</b>	<b>€</b>
<b>Jednostavni period povrata</b>	<b>(A) / (D) =</b>	<b>8,71</b>	<b>god</b>

**Tablica 3. Ekonomska analiza kogeneracije za 5200 sati rada**



### 3.2. Vrelouljni sustav

Parni kotlovi na biomasu se ne mogu koristiti u procesima gdje se brzo mijenjaju potrebe za procesnom parom zbog svoje tromosti. Zbog toga uvedeno je termo ulje kao posredni nosilac topline koji preko pločastih isparivača dovoljno brzo može udovoljiti zahtjevima. Takav indirektni sustav prijenosa topline za potrebe određenog tehnološkog procesa ima niz prednosti:

- Izbjegava se pregaranje isparivača zbog visokih temperatura dimnih plinova,
- temperatura ulja se lako regulira,
- kotao ne mora biti u blizini potrošača,
- kotao može preko nosioca topline opskrbljivati više potrošača istovremeno, gdje je iskorištenje takvog sustava puno veći nego kod više pojedinačnih direktnih kotlova, te je opskrba gorivom i sustav odvođenja dimnih plinova mnogo sigurniji i ekonomičniji,
- kod direktnih kotlova su troškovi puno veći,
- toplinsku energiju je moguće lako akumulirati što posebno dolazi do izražaja kod promjenjivih opterećenja,
- toplinsku energiju je moguće prenijeti na više drugih medija u ovisnosti o tehnološkom procesu: topla voda, para, topli zrak...
- promjena goriva je puno skuplja kod direktnih kotlova

Izbor medija za prijenos topline ovisi o uvjetima eksploatacije, radnoj temperaturi, radnom tlaku. Indirektni sustavi zagrijavanja u kojim se kao prijenosnici topline koriste termička ulja pružaju sljedeće prednosti:

- točka vrelišta kod atmosferskog tlaka omogućuje postizanje visokih radnih temperatura: sa standardnim vrstama termičkog ulja mineralnog porijekla do 300°C,
- niska temperatura staništa termičkog ulja (-5° do -30°) omogućava nesmetani pogon pri niskim temperaturama (puštanje u pogon iz hladnog stanja) pa čak i kod eventualnog stinjanja (zamrzavanja) ulja ne može doći do pucanja i oštećenja dijelova instalacije (negativni dilatacijski koeficijent termičkog ulja),
- termička ulja su slabo viskozna u vrlo širokom području temperatura i radi toga se mogu koristiti kako za grijanje, tako i za hlađenje u tehničkim procesima (naročito pogodno u procesima, gdje se istim medijem može vršiti grijanje i hlađenje),

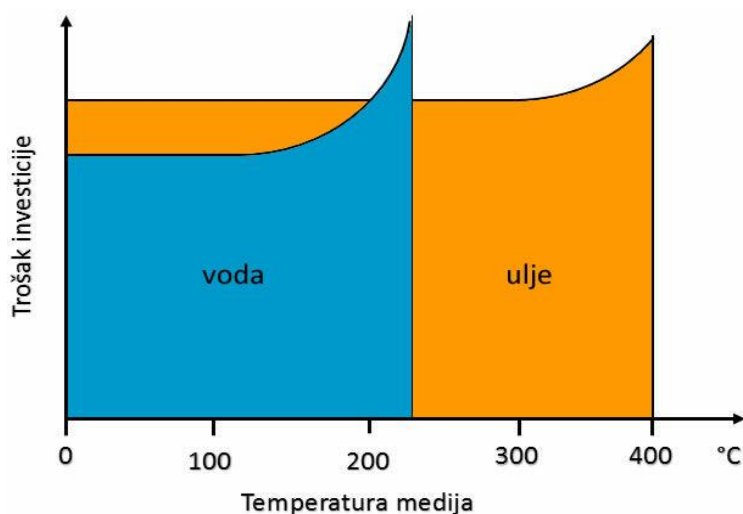
- termička ulja ne ostavljaju u sustavu nikakvih naslaga ili taloga niti uzrokuju koroziju materijala. U sustavu nije potrebna priprema napojne vode, čišćenje instalacije od taloga i zaštita od korozije koji su neizbježni u klasičnim instalacijama s vodom i parom (također otpadaju problemi vezani uz kondenzat),
- upotreba termičkih ulja omogućuje postizanje vrlo velikih točnosti regulacije temperature i pruža mogućnost da se istim medijem na različitim mjestima u sustavu, postižu različite radne temperature,
- instalacije s termičkim uljem, gdje je potrebna radna temperatura veća od 200°C s obzirom da rade bez "tlaka" (max. radni tlak oko 6 bar tj. tlak cirkulacione pumpe potreban da se savladaju otpori) i da je isključena mogućnost eksplozije, daleko su jednostavnije i jeftinije,
- instalacije s termičkim uljem su investicijski povoljnije i jednostavnije od odgovarajućih instalacija s vodom i parom.

Naravno da osim nabrojanih prednosti postoje i nedostaci instalacija sa termičkim uljem:

- termička se ulja kod prekoračenja maksimalnih dozvoljenih temperatura počinju pregrijavati i koksirati,
- u kontaktu sa zrakom pri povišenim temperaturama sklona su oksidaciji (starenju) te se zato koristi inertni plin (dušik) u ekspanzijskoj posudi,
- vijek trajanja im je ograničen (cca 25 – 30 000 radnih sati) i potrebna je stalna provjera kvalitete ulja (pogonska analiza),
- specifična toplina, kao i koeficijent prijelaza topline su niži nego kod pare i vode, međutim prijelaz topline se vrši pri višim temperaturama i kompenzira taj nedostatak,
- u sustavu je neophodna prisilna cirkulacija medija pumpom,
- djeluju agresivno na bakar i njegove legure.

Na temelju svega navedenog, prednosti koje pružaju sustavi s termičkim uljem i mogućnosti da se učinkovito uklone nedostaci koji ih prate, ukazuju na široko područje primjene. Klasični prijenosnici topline (voda i para) zadržavaju u standardnim tehničkim procesima svoje mjesto i na tom području (za temperaturu od 100-200°C) još uvijek možemo

govoriti o njihovoj isključivoj upotrebi, dok se za područje temperature 200 do 350°C upotrebljavaju termička ulja kao medij za prijenos topline. Na slici 13. prikazana je ovisnost troškova o potrebnoj temperaturi procesa [13].



Slika 13. Ovisnost troškova o mediju [13]

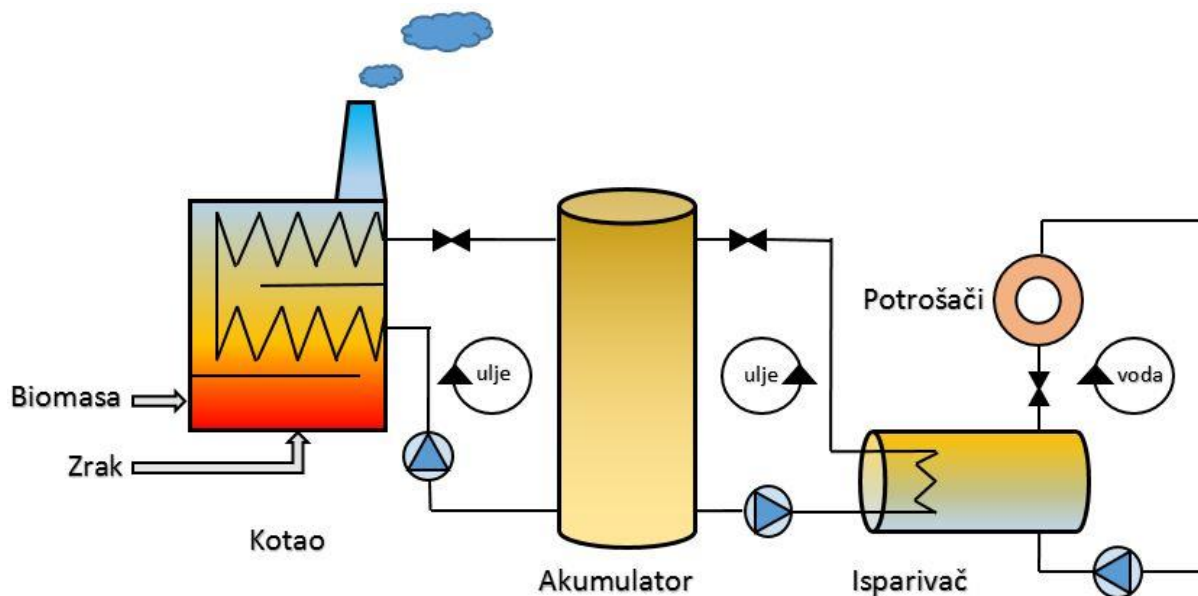
### 3.2.1. Opis rada

Načelno je sustav zamišljen da se najprije s kotlom na biomasu zagrije ulje u akumulatoru na radnu temperaturu. Kad se postigne radna temperatura, ulje se cirkulacijskim pumpama uvodi u isparivač, hladi se, te nakon isparivača odlazi u zagrijač gdje zagrijava vodu iz napojnog spremnika na temperaturu blizu temperature isparavanja u isparivaču. S tom nižom temperaturom se vraća nazad u akumulator ulja.

Sustav koji bi zadovoljio potrebe za energijom realne prehrambene industrije sastojat će se od:

- vrelouljnog kotla na biomasu koji će se dimenzionirati na 20% veću snagu od srednje godišnje snage,
- pločastog zagrijača napojne vode i pločastog izmjenjivača topline-isparivača koji će se dimenzionirati na 20% veću snagu od vršne snage,
- akumulatora vrelog ulja koji će se dimenzionirati da uz kotao može pokriti vršnu potrošnju.

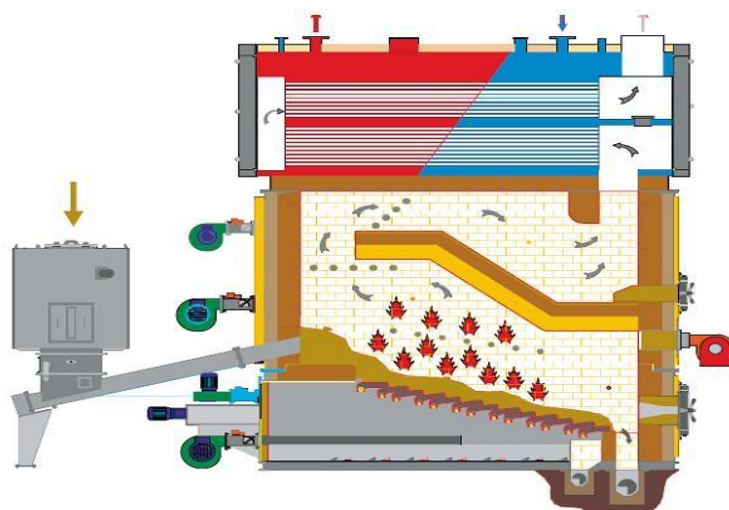
Sustav se sastoji od vreouljnog kotla na biomasu s izgaranjem na rešetki, akumulatora vreloug ulja i pločastih izmjenjivača topline ulje/voda(para). Shema sustava prikazana je na slici 14.



Slika 14. Shematski prikaz vreouljnog sustava

### 3.2.1.1. Kotao na biomasu

Kotlovi na biomasu snage nekoliko MW nisu tipski te se rade po narudžbi. Ložišta s izgaranjem na rešetki se za različite snage uglavnom razlikuju po dimenzijama, dozirnim uređajima za biomasu i načinom upuhivanja zraka. Nakon ložišta, vrući dimni plinovi se odvođe preko paketa izmjenjivača gdje predaju toplinu određenom mediju. Shema takvog kotla prikazana je na slici 15.



Slika 15. Kotao na biomasu [14]

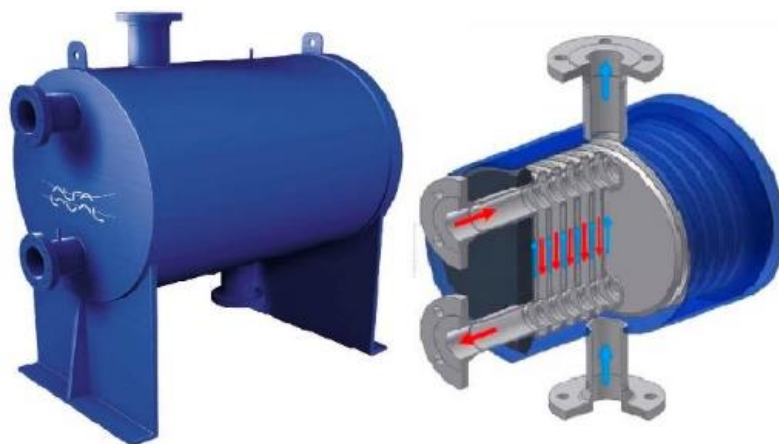
Maksimalna snaga kotla je 3000 kW i dovoljna je da pokrije 80% godišnjeg opterećenja. Kratke vršne potrebe će se pokrivati iz akumulatora da se izbjegne predimenzioniranost kotla i ostalih dijelova, da se smanji investicija i da kotao radi u području svoje idealne iskoristivosti.

### 3.2.1.2. Akumulator

Akumulatori vrelog ulja velikih dimenzija poput ovog koji će se uzeti u obzir za zadani sustav se izrađuje po željenoj energiji koja se želi pohraniti u njemu. Razlika u temperaturi ulja je ograničena na maksimalnu moguću temperaturu ulja od 300°C da ne dođe do koksiranja te donjoj granici od 220°C, što je najniža temperatura na kojoj isparivač može proizvoditi paru zadanih parametara. Zbog velikih dimenzija akumulatora izveden je kao veliko mješalište tako da nema cijevnih spirala da se odvoje krugovi ulja od kotla i isparivača, što je prednost jer nema temperaturnog gradijenta ali je zato potrebna posebna regulacija kotla jer pri početku zagrijavanja ulja u akumulatoru dolazi do velikih temperaturnih naprezanja u cijevnoj stijenci kotla. Akumulator na vrhu ima zračni prostor za temperaturno širenje ulja koje je ispunjeno dušikom kako ne bi dolazilo do oksidiranja ulja. Akumulator se nalazi na pretlaku do 0,5 bar. Za zadani sustav uzeta su dva spremnika ulja od ukupno 50 m<sup>3</sup> što bi za zadane parametre trebalo biti dovoljno za jedan sat pokrivanja vršnih opterećenja.

### 3.2.1.3. Zagrijač napojne vode

Zagrijač napojne vode služi da vodu iz napojnog spremnika, koja je na temperaturi od 115°C, zagrije na temperaturu u isparivaču. Postoje različite izvedbe ovakvih izmjenjivača ali će za ovaj sustav biti odabran pločasti izmjenjivač zbog svoje kompaktnosti i dobrih odziva na promjenu snage. Primjer pločastog izmjenjivača prikazan je na slici 16.



Slika 16. Pločasti izmjenjivač topline [15, 16]

### 3.2.1.4. Isparivač

Za ovaj sustav odabran je pločasti izmjenjivač topline-isparivač tj. generator pare na vrelo ulje. U njemu se para proizvodi na sličan način kao i u blok parnim kotlovima na plin ili loživo ulje. Spremnik pod tlakom je ispunjen vodom do neke razine, izmjenjivačka površina je potopljena, te dovođenjem energije voda isparava i akumulira se na vrhu spremnika, kako se smanjuje razina vode, regulacija nadoknađuje ispareno dovozom kondenzata. Primjer pločastog generatora pare prikazan je na slici 17.



Slika 17. Izmjenjivač topline-isparivač [17]

### 3.2.2. Ekonomska analiza vrelouljnog sustava

Sustav se sastoji od sljedećih glavnih elemenata:

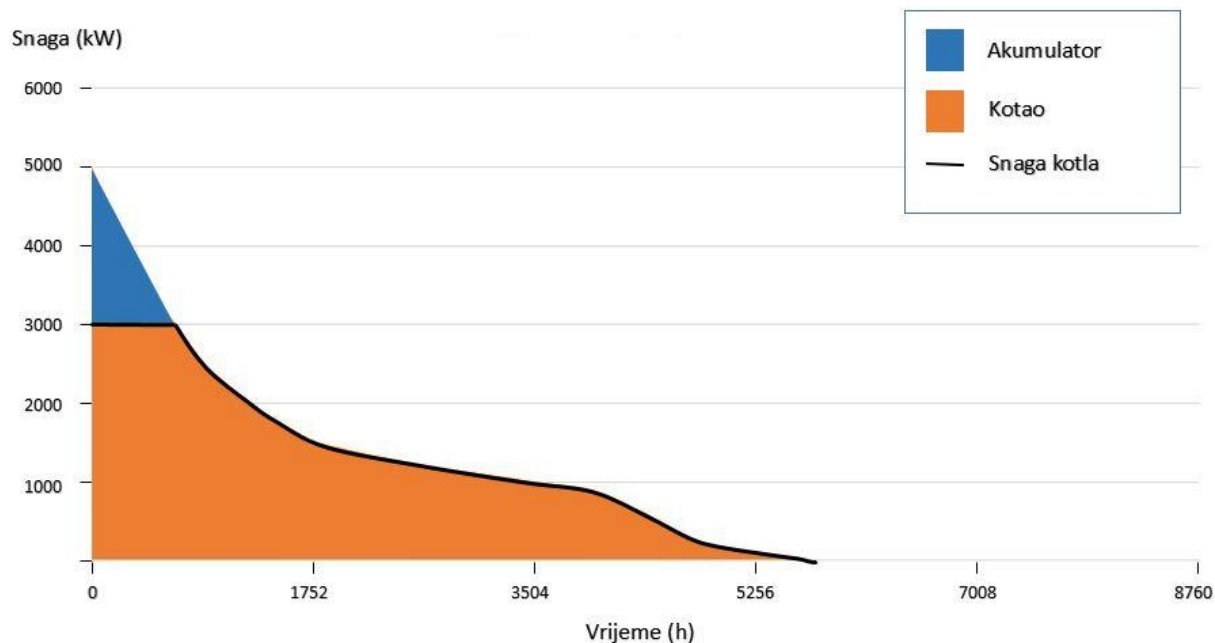
- Ložište i vrelouljni kotao
- Akumulatori vrelog ulja s armaturom
- Regulacijska i pomoćna oprema
- Primarne i sekundarne cirkulacijske pumpe
- Pločasti izmjenjivač topline-isparivač
- Uljni predgrijač napojne vode
- Termo ulje
- Dnevni spremnik biomase s dozirnim sustavom

U tablici 4. prikazane su cijene elemenata koji su potrebni za izgradnju vrelouljnog sustava na biomasu.

<b>Naziv:</b>	<b>Cijena (€)</b>
Vrelouljno kotlovsko postrojenje	900.000,00
Multiciklon	15.000,00
Automatski transport pepela	10.000,00
Ventilator dimnih plinova i dimovodni kanali	13.000,00
Akumulator vrelog ulja	70.000,00
Termo ulje	100.000,00
Pločasti isparivač	150.000,00
Zagrijač napojne vode	50.000,00
Dnevni spremnik biomase	30.000,00
Oprema za dušik	10.000,00
Cirkulacijske pumpe s zapornom armaturom	50.000,00
Elektro oprema i radovi	40.000,00
Građevinski radovi	100.000,00
Sva regulacijska i pomoćna oprema	75.000,00
Tehnička dokumentacija	100.000,00
<b>UKUPNO</b>	<b>1.713.000,00</b>

**Tablica 4. Troškovnik vrelouljnog sustava**

Na slici 18. prikazan je je dijagram pokrivanja vrelouljnog sustava. Kotao je projektiran da pokriva sve do 3000 kW, sve preko tog pokrivat će akumulator vreloug ulja.



**Slika 18. Dijagram pokrivanja – vrelouljni sustav**

Za zadovoljavanje godišnjih potreba za toplinskom energijom potrebno je proizvesti 9.132.000 kWh pare.

$$Q_{gorivo,ulje} = \frac{E_{top}}{\eta_{ulje}} = \frac{9132 \text{ MWh}}{0,7} = 13.046 \text{ MWh}$$

$$m_{bio,ulje} = \frac{13.046 \text{ MWh} \cdot 3,6}{12 \text{ MJ/tona}} = 3.914 \text{ tona}$$

Godišnja potrošnja biomase je oko 3.914 tone što na godišnjoj razini po cijeni od 45 €/tona iznosi oko 176.118 €.



<b>(A) INVESTICIJA</b>		1.713.000,00	€
	<b>PRIHOD</b>		
Ušteda		1.004.575,00	€/god
<b>(B) UKUPNO PRIHOD</b>		1.004.575,00	€
	<b>RASHOD</b>		
Održavanje		35.000,00	€/god
Gorivo		176.118,00	€/god
<b>(C) UKUPNO RASHOD</b>		211.118,00	€
<b>(D) Godišnja neto zarada</b>	<b>(B) – (C) =</b>	<b>793.457,00</b>	<b>€</b>
<b>Jednostavni period povrata</b>	<b>(A) / (D) =</b>	<b>2,16</b>	<b>god</b>

**Tablica 5.      Ekonomska analiza vrelouljnog sustava**

Investicija bi se trebala vratiti u 2,16 godine kao što je prikazano u tablici 5. što je izrazito isplativo uglavnom zbog velike razlike u cijeni goriva ali i zbog relativno niske cijene investicije.

#### 4. Simulacija dinamike vrelouljnog sustava

Kako parni kotao na biomasu ne bi mogao pratiti diskontinuiranu potrošnju, zamišljen je sustav s vrelim uljem. Akumulator vreloug ulja predviđen je da smanji utjecaj sporog odziva kotla na biomasu na nagle promjene potrošnje i diskontinuiranu proizvodnju pare, te da se smanji predimenzioniranost kotla zbog vršne potrošnje. Sustav će se opisati matematičkim modelom, te će se simulirati nekoliko uobičajenih scenarija potrošnje pare da se što bolje upozna dinamika sustava. Simulacija će se napraviti u SIMULINK-u koji je jedan od paketa u sastavu popularnog softverskog alata MATLAB [18, 19, 20].

Ponašanje dinamičkih sustava opisano je skupom diferencijalnih jednadžbi koje su općenito nelinearne. U tim su diferencijalnim jednadžbama sadržane zakonitosti koje vrijede za sustav. Osnovni je problem koji se pojavljuje kod analize takvih sustava nepostojanje opće metodologije za rješavanje nelinearnih diferencijalnih jednadžbi. Kao logično rješenje problema analize ponašanja ovakvih sustava nameće se provođenje simulacije sustava na računalu [18, 19, 20].

SIMULINK je softverski paket za modeliranje, simulaciju i analizu dinamičkih sustava. Podržava linearne i nelinearne sustave, modele u kontinuiranom vremenu, diskretnom vremenu uzorkovanja, ili bilo koji hibrid od ova dva. Modeli su hijerarhijski, tako da korisnik može graditi modele koristeći „top-down“ ili „bottom-up“ pristup. Kod modeliranja, koristi se grafičko sučelje te „click-and-drag“ operacije mišem za crtanje modela u obliku blok dijagrama. SIMULINK sadrži bogatu biblioteku generatora ulaznih pobuda, prikazivača izlaznih varijabli, linearnih i nelinearnih komponenti sustava, te konektora. Ovaj pristup također omogućuje da korisnik može sagledati strukturu modela i vidjeti kako je organiziran, i kako njegovi pojedini dijelovi utječu jedni na druge [18, 19, 20].

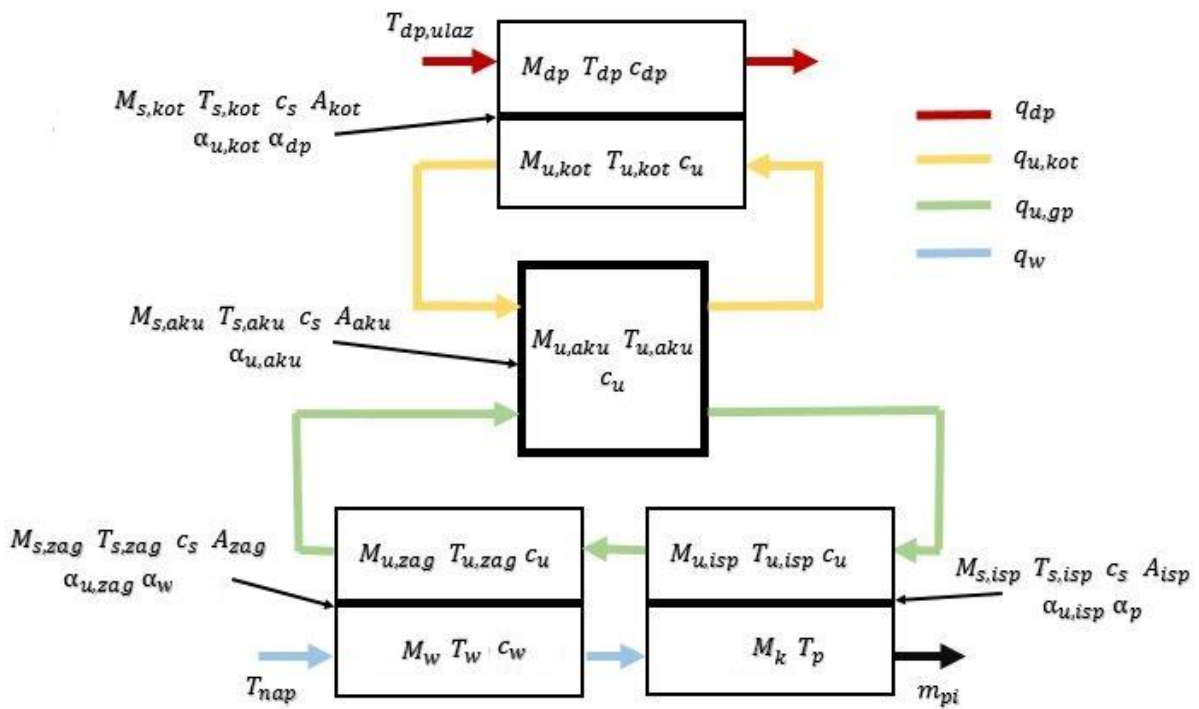
### 4.1. Matematički model

Matematički model cijelog sustava podijelit će se na četiri dijela kako bi se što bolje prikazala interakcija između svakog od njih. Ta četiri dijela su:

- Kotao
- Akumulator
- Zagrijač
- Isparivač

Rezultati simulacije će se opisati za svaki dio pojedinačno kako bi se što bolje prikazao odziv pojedinog dijela. Za isparivač kao glavni dio sustava, te kao najkopiciraniji dio modela, prikazat će se nekoliko odziva za odabrane karakteristične slučajeve. Na kraju će se prikazati odziv cijelog modela.

Na slici 19. prikazana je shema po kojoj će se postaviti model u SIMULINK-u.



Slika 19. Shema cijelog sustava

---

**Pretpostavke modela**

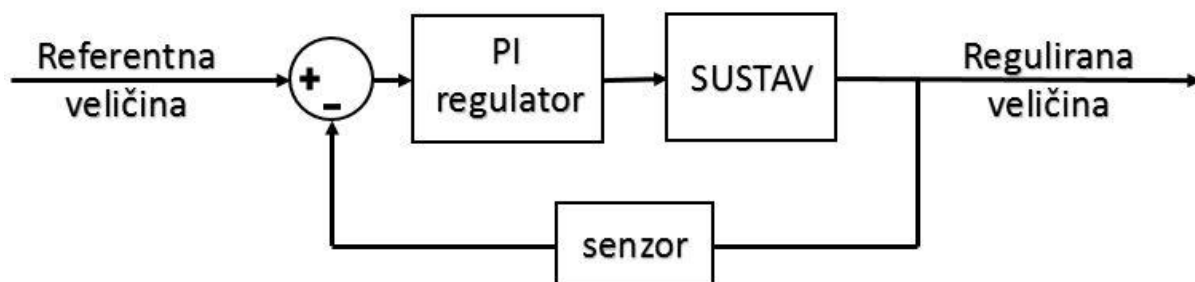
Kod izrade modela uzete su u obzir određene pretpostavke zbog jako malog utjecaja na same rezultate simulacije i kako bi se cijeli model mogao što jednostavnije opisati i uopće složiti u SIMULINK-u.

Te pretpostavke su:

- Nema gubitaka topline u okoliš kroz stijenke pojedinih dijelova sustava
- Nema hidrauličkih gubitaka uslijed strujanja svih tokova u sustavu
- Zanemarena je izmjena topline između pare i kapljevine u isparivaču
- U isparivaču je uvijek stacionarno stanje vode i pare
- Akumulator je savršeno mješalište, tako da nema temperaturnog gradijenta po visini spremnika
- Ulazna temperatura dimnih plinova u kotao je konstantna
- Ulazna temperatura napojne vode na ulazu u zagrijač je konstantna
- Protok ulja kroz kotao se ne regulira tako da je uvijek konstantan
- U parnom dijelu isparivača se uvijek nalazi suhozasićena para, a ista takva se odvodi prema potrošačima
- Svi koeficijenti prijenosa topline i specifičnih toplinskih kapaciteta ne ovise o brzini strujanja niti o temperaturi medija
- Za dobivanje entalpija vode i pare preko temperature ili tlaka koristit će se XSteam tablice u MATLAB-u
- Tlak i temperatura pare u isparivaču će se izračunavati preko funkcije u ovisnosti o gustoći

## Regulirane veličine

Kako bi svi dijelovi modela funkcionirali kao sustav potrebno je regulirati određene veličine. S PI regulatorom regulirat će se protok dimnih plinova, protok ulja na strani isparivača i zagrijača napojene vode i protok kondenzata. Način rada regulatora prikazan je na slici 20.



Slika 20. PI regulator

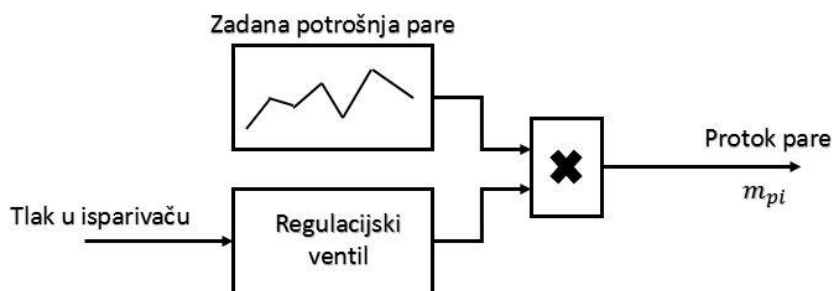
Isparivač ne može početi proizvoditi paru sve dok temperatura u akumulatoru ne bude dovoljno visoka, tako da jedna od reguliranih veličina treba biti protok ulja na strani isparivača i zagrijača napojne vode. Protok ulja kroz isparivač definira koliko će se energije predati vodi u isparivaču koja će potom ispariti. U slučaju pada tlaka u isparivaču zbog povećanja potrošnje pare, protok ulja se treba povećati kako bi ponovo uspostavio radni tlak. Protok ulja na strani isparivača i zagrijača regulirati će se preko PI regulatora, koji će se uspoređivati s referentnom vrijednosti tlaka u isparivaču.

Preko dimnih plinova zagrijava se ulje, te tako podiže temperaturu ulja u akumulatoru, kako temperatura ulja ne smije prelaziti 300°C da ne bi došlo do koksiranja, regulira se protok dimnih plinova tako da na izlazu iz kotla temperatura ulja nikad ne bude preko granične vrijednosti. U slučaju da se snaga isparivača smanji ispod nominalne snage kotla, doći će do povećanja temperature u akumulatoru. U tom slučaju treba se smanjiti protok dimnih plinova. Protok dimnih plinova regulirat će se preko PI regulatora, koji će se uspoređivati s referentnom vrijednosti temperature na izlazu iz kotla.

Isparavanjem vode u isparivaču opada visina kapljevite faze. Da se omogući nesmetani rad isparivača te da ne dođe do pregaranja cijevi potrebno je držati izmjenjivačku površinu uvijek potopljenom. Ta isparena voda se nadoknađuje s vodom iz zagrijača, a regulirana je

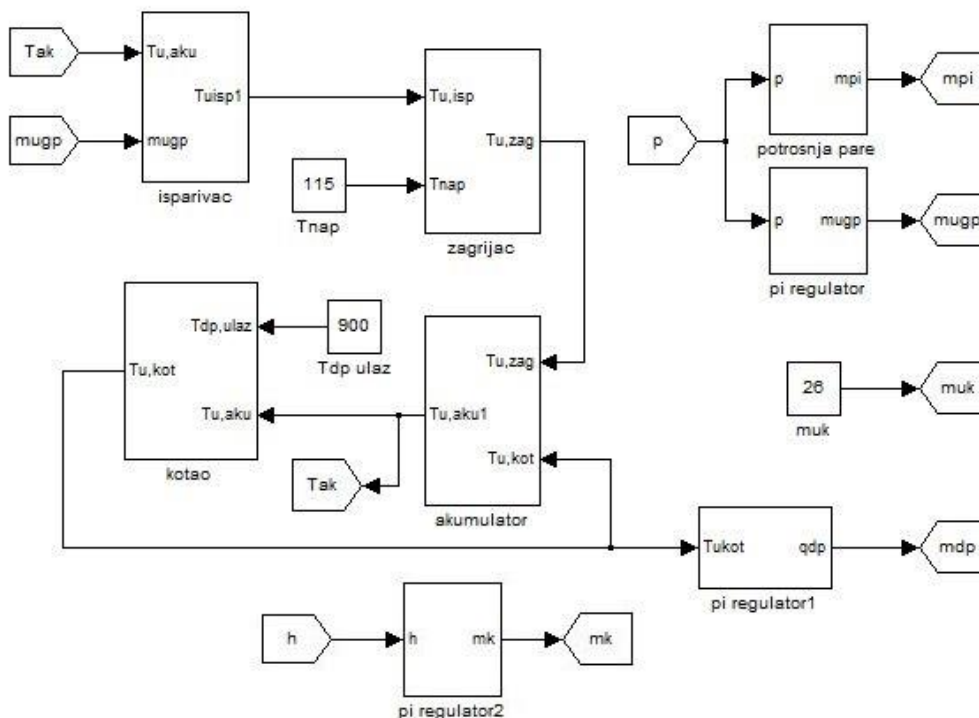
preko visine vode u isparivaču. Kada ispari određeni dio vode, visina kapljevite faze opadne te se potom nadoknadi do referentne vrijednosti. Nadoknada vode regulirana je preko PI regulatora, koji će se uspoređivati s referentnom vrijednosti visine stupca kapljevine u isparivaču.

Protok pare će biti ulazna promjenjiva veličina koja će simulirati realnu potrošnju ali će biti povezana s ventilom koji će držati tlak u isparivaču u određenim granicama. Način definiranja protoka pare definiran je na slici 21.



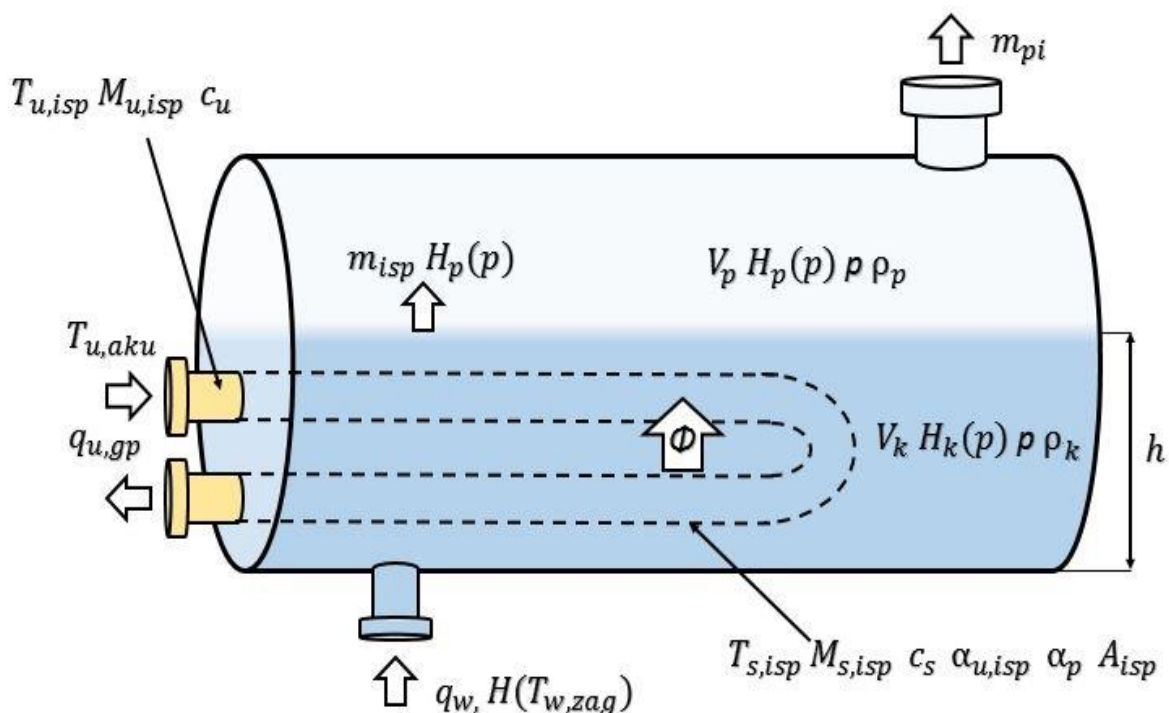
Slika 21. Regulacija protoka pare

Na slici 22. prikazan je izgled cijelog modela u SIMULINK-u. Prikazane su veze između svakog dijela sustava, te regulacije svih protoka.



Slika 22. Cijeli sustav u SIMULINK-u

### 4.1.1. Isparivač



Slika 23. Isparivač

Isparivač će se modelirati po jednostavnoj shemi prikazanoj na slici 23. Zamišljen je spremnik određenog volumena  $V_{uk}$ , a on se dijeli na parni volumen  $V_p$  i volumen kapljevine  $V_k$ . Ogrjevno tijelo je zamišljeno kao uvijek potopljena površina  $A_{isp}$ , stijenke određene mase  $M_{s,isp}$ . Sva energija koja pređe sa stijenke na kapljevину troši se na zagrijavanje vode sa entalpije pothlađene vode na određenom tlaku do entalpije vrele kapljevine na tom istom tlaku, sve preko te entalpije prelazi u paru tj. troši se na isparavanje u obliku mase  $m_{isp}$ , ta masa pare prelazi u parni dio volumena koji se promatra kao jednostavna masena bilanca, u kojem se para može akumulirati u obliku povećanja tlaka tj. gustoće. Pretpostavljeno je pražnjenje isparivača definiran kao protok mase pare  $m_{pi}$  parametara koji se u tom trenutku nalaze u parnom volumenu. Masa vode koja nadoknađuje isparenu ulazi u spremnik s entalpijom s kojom izlazi iz zagrijača napojne vode, a sama količina unesenog kondenzata se definira u razlici između definirane tj. maksimalne visine kapljevine u spremniku i one koja se trenutno nalazi. Energija unesena u isparivač ovisi o temperaturi ulja u akumulatoru s kojom protok ulja  $q_{u,gp}$  ulazi u isparivač, hladi se predajući energiju stijenci, te izlazi s nešto nižom temperaturom s kojom kasnije odlazi u zagrijač napojne vode.

Diferencijalna jednadžba očuvanja mase parnog dijela isparivača (1):

$$\rho_p \frac{dV_p}{dt} + V_p \frac{d\rho_p}{dt} = m_{isp} - m_{pi} \quad (1)$$

Jednadžba (3) dobije se derivacijom po vremenu jednadžbe (2), uz konstantu  $V_{uk}$ :

$$V_p = V_{uk} - V_k / \frac{d}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = - \frac{dV_k}{dt} \quad (3)$$

Diferencijalna jednadžba očuvanja mase potopljenog dijela isparivača (4):

$$\rho_k \frac{dV_k}{dt} + V_k \frac{d\rho_k}{dt} = q_w - m_{isp} \quad (4)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (2) (3) i (4) u jednadžbu (1), uz uvjet nestlačivosti kapljevito dijela

$\frac{d\rho_k}{dt} = 0$  dobiva se izraz (5):

$$\frac{d\rho_p}{dt} = \frac{m_{isp} - m_{pi} + \frac{\rho_p}{\rho_k} (q_w - m_{isp})}{V_{uk} - V_k} \quad (5)$$

Diferencijalna jednadžba očuvanja energije kapljevito dijela (6) ovisi o ulazu i izlazu energije i glasi:

$$\frac{dE_k}{dt} = M_k \frac{dH}{dt} + H \frac{dM_k}{dt} = E_u - E_i \quad (6)$$

Jednadžba očuvanja mase kapljevito dijela uz  $\frac{d\rho_k}{dt} = 0$  (7):

$$\frac{dM_k}{dt} = q_w - m_{isp} \quad (7)$$



Ulaz energije (8):

$$E_u = q_w \cdot H(T_w) + \Phi \quad (8)$$

Izlaz energije (9):

$$E_i = m_{isp} \cdot H_p(p) \quad (9)$$

Gdje je  $m_{isp}$  (10):

$$m_{isp} = \frac{H - H_k(p)}{r(p)} \quad (10)$$

Uvrštavajući (7), (8), (9) i (10) u jednadžbu (6), dobije se izraz za promjenu entalpije kapljeviteg dijela (11):

$$\frac{dH}{dt} = \frac{q_w \cdot H(T_w) + \Phi - \frac{H - H_k(p)}{r(p)} \cdot H_p(p) - H \cdot \left( q_w - \frac{H - H_k(p)}{r(p)} \right)}{M_k} \quad (11)$$

Promjena temperature stijenke ovisi o temperaturi ulja i vode (12):

$$\frac{dT_{s,isp}}{dt} = \frac{\alpha_{u,isp} \cdot A_{isp} \cdot (T_{u,isp} - T_{s,isp}) - \alpha_p \cdot A_{isp} \cdot (T_{s,isp} - T_p)}{M_{s,isp} \cdot c_s} \quad (12)$$

Gdje je snaga grijača (13):

$$\Phi = \alpha_p \cdot A_{isp} \cdot (T_{s,isp} - T_p) \quad (13)$$

Isto tako za ulje (14):

$$\frac{dT_{u,isp}}{dt} = \frac{q_{u,gp} \cdot c_u \cdot (T_{u,aku} - T_{u,isp}) - \alpha_{u,isp} \cdot A_{isp} \cdot (T_{u,isp} - T_{s,isp})}{M_{u,isp} \cdot c_u} \quad (14)$$

Promjena visine kapljevine u spremniku (15), ovisi o količini vode koja ispari i vode iz zagrijača napojne vode za nadoknadu isparenog dijela, dobije se rastavljanjem lijeve strane jednadžbe (7):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_w - m_{isp}}{A_{uk} \cdot \rho_k} \quad (15)$$

Funkcija ovisnosti tlaka o gustoći pare definirana je kao (16):

$$p(\rho_p) = 2 \cdot \rho_p - 0,32 \quad (16)$$

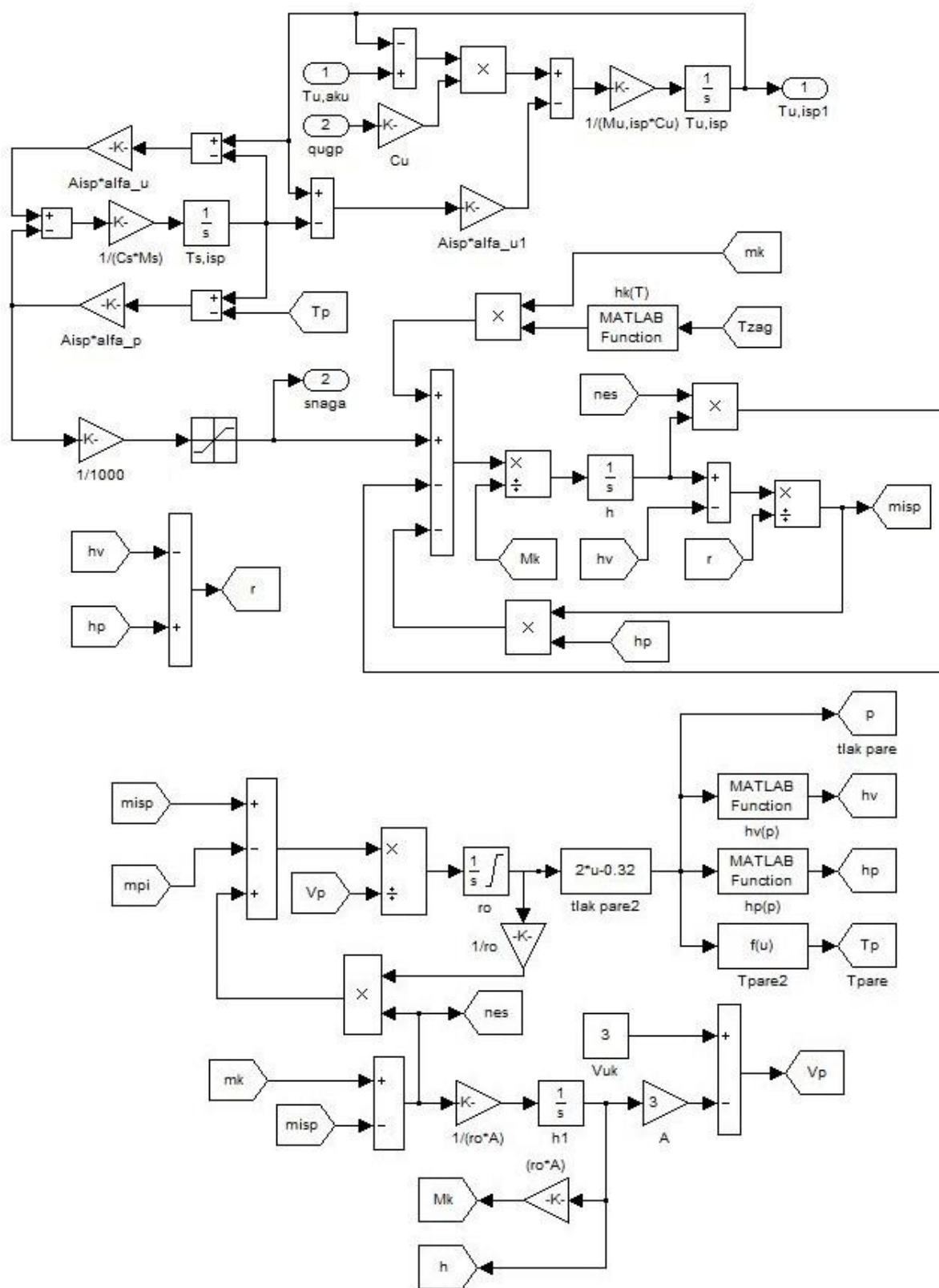
Funkcija ovisnosti temperature pare o tlaku definirana je kao (17):

$$T_p(p) = \sqrt{648 \cdot p - 1112} + 106,5 \quad (17)$$

Modelski parametri isparivača:

- Ukupni volumen isparivača	$V_{uk} = 3 \text{ m}^3$
- Površina isparivača	$A_{uk} = 3 \text{ m}^2$
- Gustoća kapljevito dijela	$\rho_k = 1000 \text{ m}^3$
- Spec. Toplinski kapacitet ulja	$c_u = 2500 \text{ J/kgK}$
- Koef. prijenosa topline na strani ulja	$\alpha_{u,isp} = 8000 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Koef. prijenosa topline na strani kapljevine	$\alpha_p = 1300 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Izmjenjivačka površina	$A_{isp} = 260 \text{ m}^2$
- Masa ulja u isparivaču	$M_{u,isp} = 210 \text{ kg}$
- Masa stijenke u isparivaču	$M_{s,isp} = 1500 \text{ kg}$
- Spec. Toplinski kapacitet stijenke	$c_s = 400 \text{ J/kgK}$

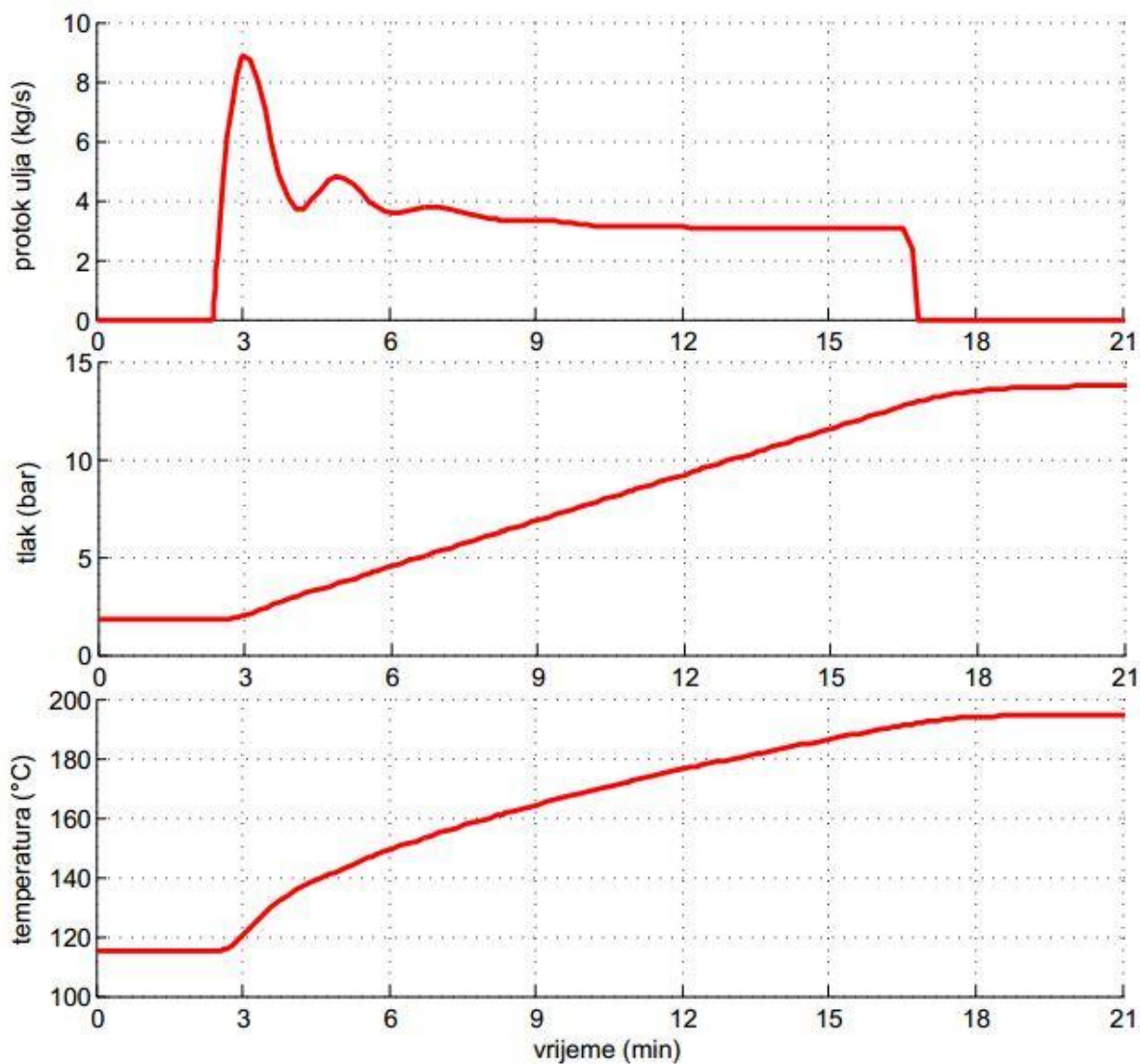
Izgled modela isparivača u SIMULINK-u prikazan je na slici 24.



Slika 24. Model isparivača u SIMULINK-u

## 4.1.1.1. Punjenje isparivača

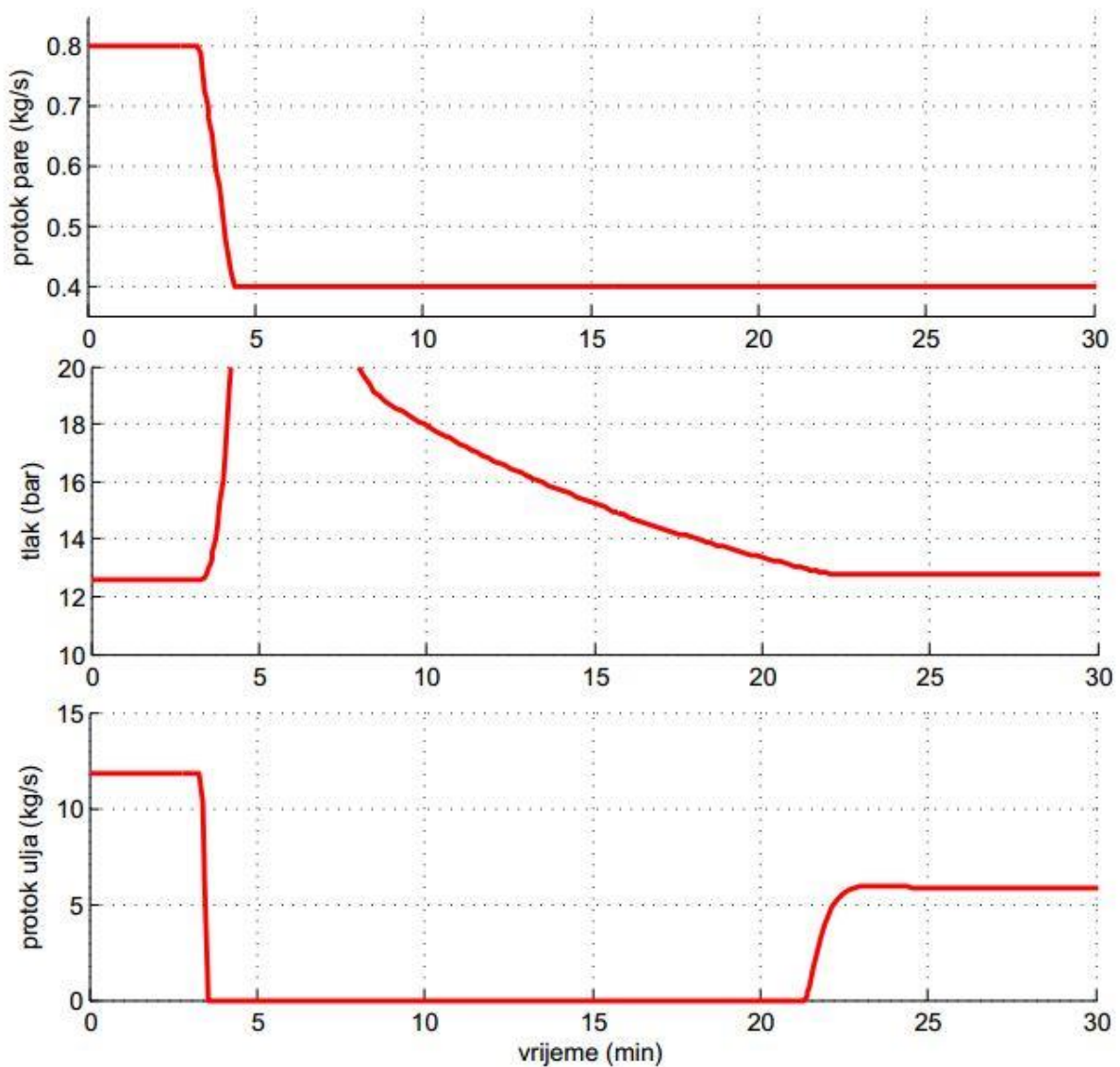
Na slici 25. prikazano je punjenje isparivača do radnog tlaka i temperature. Na prvom dijagramu je protok ulja kroz isparivač, temperatura ulja je konstantna i iznosi 250°C. Na drugom povećanje tlaka u isparivaču, treći dijagram prikazuje temperaturu pare. Isparivač u manje od 20 minuta postigne radne parametre pare.



Slika 25. Punjenje isparivača

#### 4.1.1.2. Utjecaj naglog pada potrošnje

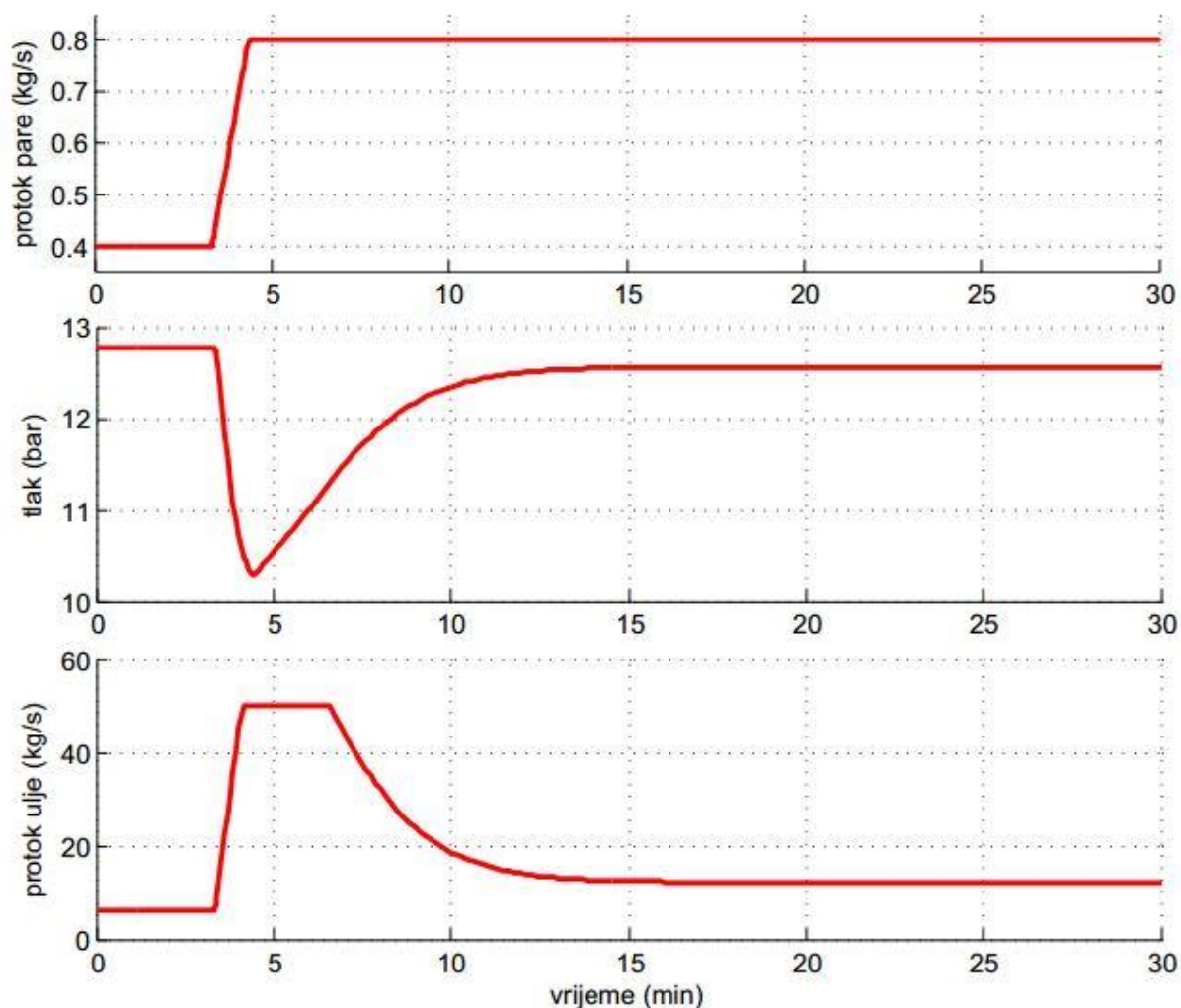
Na slici 26. prikazan je poremećaj tlaka na nagli pad potrošnje pare. Ulazna temperatura ulja je konstantna i iznosi 250°C. Na dijagramima je prikazan protok pare, tlak u isparivaču i protok ulja kroz isparivač. Vidi se da kod naglog pritvaranja ventila dolazi do ekstremnog skoka tlaka u isparivaču. U tom slučaju bi sigurnosni ventil trebao reagirati i propustiti višak proizvedene pare.



Slika 26. Odziv isparivača na pad protoka pare

#### 4.1.1.3. Utjecaj naglog porasta potrošnje

Na slici 27. prikazan je utjecaj povećanja protoka pare na tlak u isparivaču. Temperatura ulja na ulazu u isparivač je konstantna i iznosi 250°C. Kod pada tlaka dolazi do naglog isparavanja kapljevine. To isparavanje i djelovanje regulacije protoka ulja za odražavanje tlaka u isparivaču osiguravaju da nema ekstremnog pada tlaka u isparivaču.

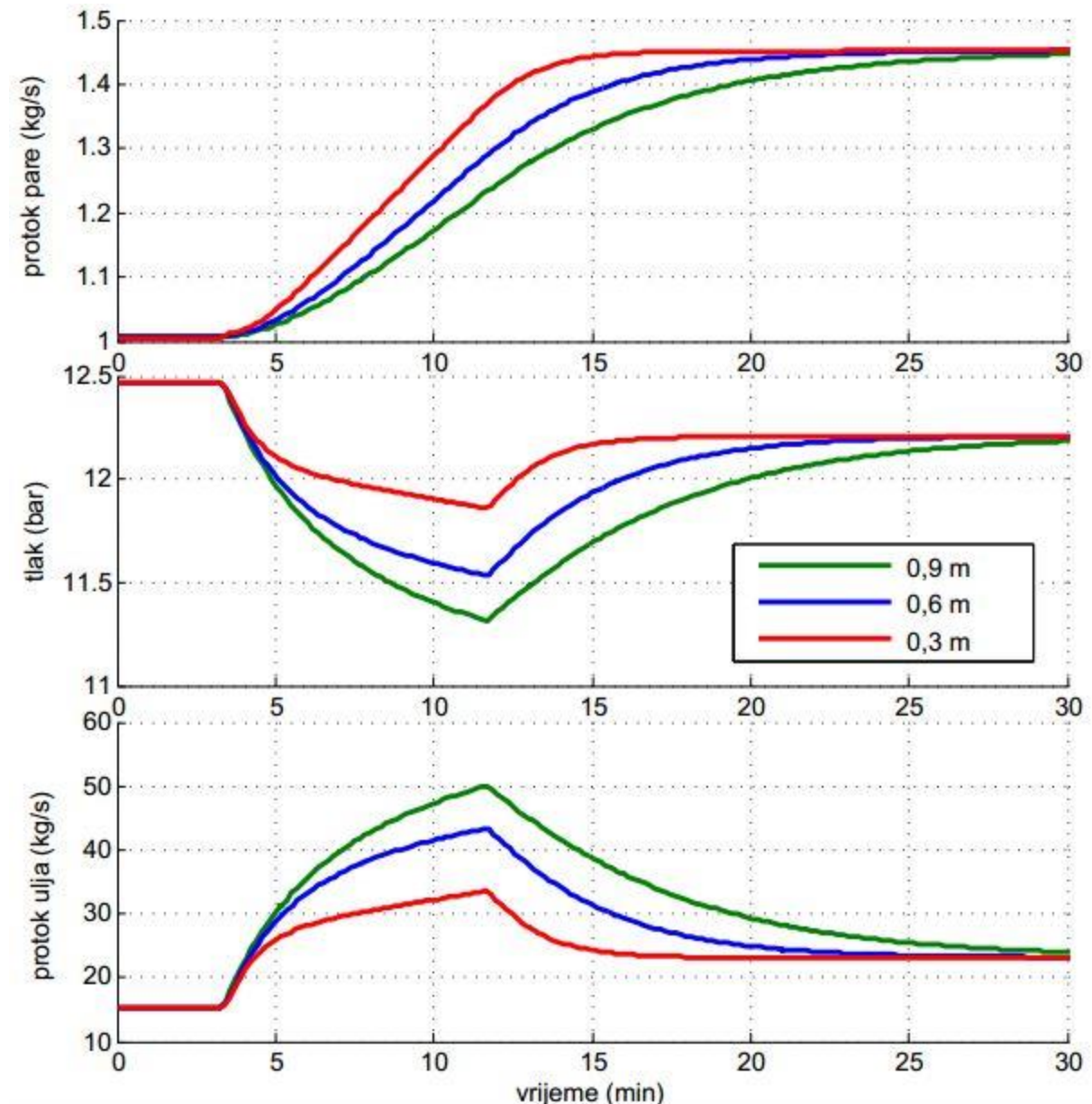


Slika 27. Odziv isparivača na povećanje protoka pare



## 4.1.1.4. Utjecaj visine kapljevine na povećanje protoka pare

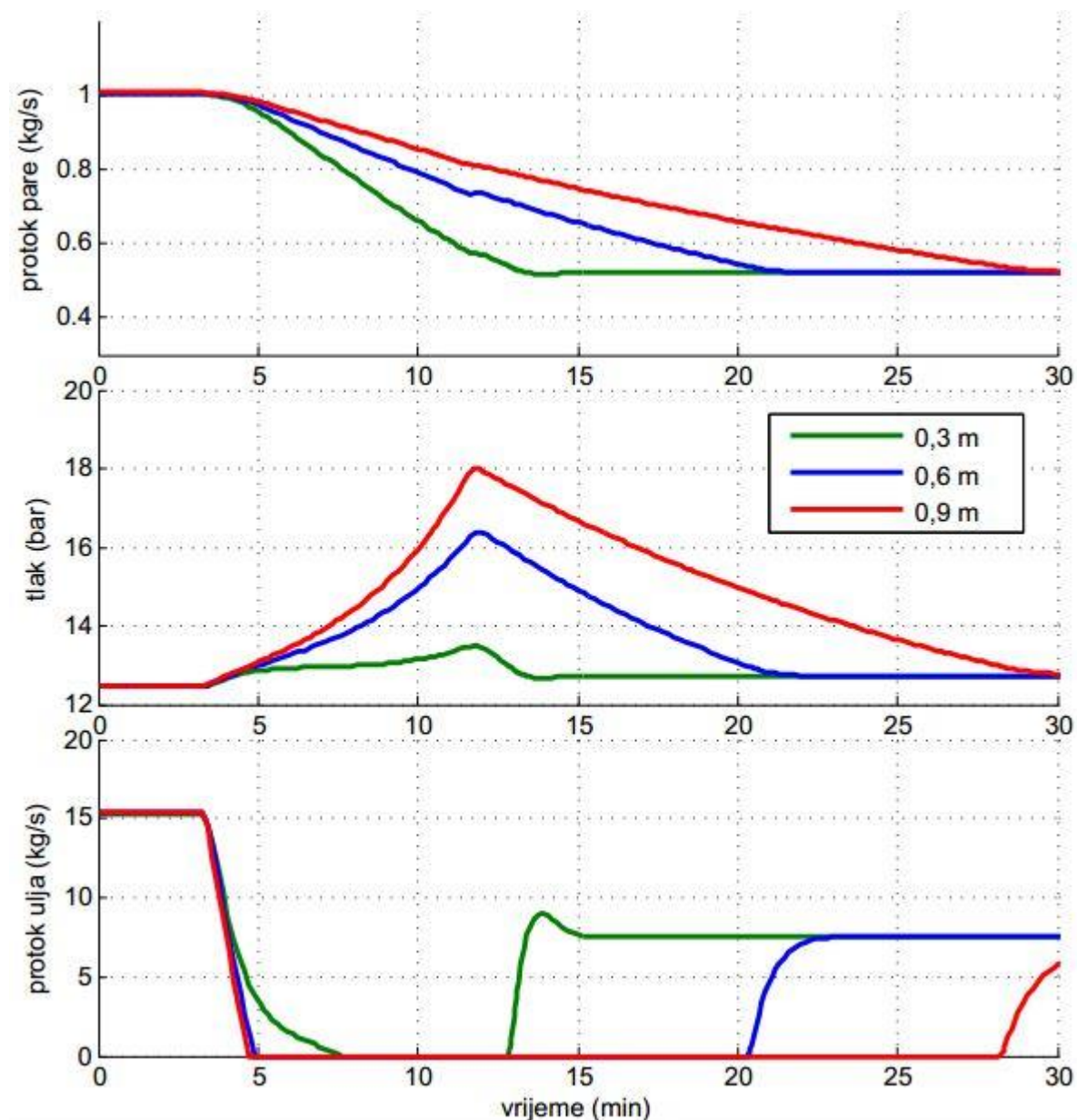
Na slici 28. prikazan je utjecaj visine kapljevine na odziv protoka pare, tlaka u isparivaču i protoka ulja kroz isparivač. Temperatura ulja na ulazu u isparivač je konstantna i iznosi 250°C. Simulirale su se tri visine: 0,3 m, 0,6 m i 0,9 m. Visina u spremniku je 1 metar. Na dijagramima se vidi da smanjenjem visine kapljevine tj. povećanjem parnog volumena imamo brže odzive na povećanje protoka pare, te tlak u samom isparivaču puno manje oscilira, što zbog veće akumulacije pare, što zbog manje količine kapljevine u isparivaču.



Slika 28. Utjecaj visine kapljevine na porast protoka pare

## 4.1.1.5. Utjecaj visine kapljevine na pad protoka pare

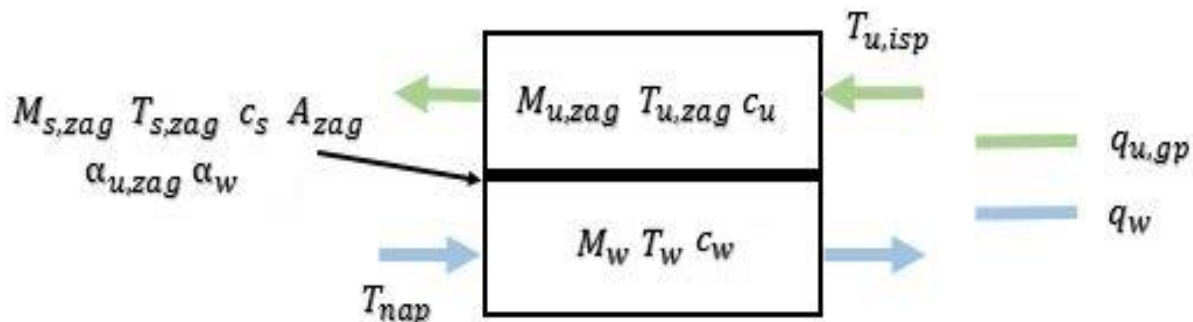
Na slici 29. prikazan je utjecaj visine kapljevine na pad potrošnje pare u akumulatoru. Temperatura ulja na ulazu u isparivač je konstantna i iznosi 250°C. Prikazan je utjecaj visine kapljevine na protok pare, tlak u isparivaču i protok ulja kroz isparivač za tri visine kapljevine: 0,3 m, 0,6 m i 0,9m. iz dijagrama se primjećuje da smanjenje količine kapljevine i povećanje parnog volumena u isparivaču utječe na manje oscilacije tlaka u isparivaču i na puno brže odzive protoka pare za željeno smanjenje.



Slika 29, Utjecaj visine kapljevine na pad protoka pare



### 4.1.2. Zagrijač



Slika 30. Zagrijač

Zagrijač napojne vode definiran je kao izmjenjivač s jednim segmentom tj. kontrolnim volumenom (Slika 30.), koji zagrijava vodu sa 115°C do temperature koja ovisi o više parametara kao što su protok vode, protok ulja i temperatura ulja na ulazu u izmjenjivač. Ta izlazna temperatura vode definira entalpiju s kojom kasnije isti protok  $q_w$  ulazi u isparivač. Sami model je definiran kao dva konstantna volumena razdvojena stijenkom mase  $M_{s,zag}$  i površinom  $A_{zag}$ . Ti konstantni volumeni se uz pretpostavku nestlačivosti oba medija mogu gledati i kao mase ulja  $M_{u,zag}$  i vode  $M_w$  koje se u svakom trenutku nalaze u izmjenjivaču. Protok ulja  $q_{u,isp}$  izlazi iz isparivača s temperaturom  $T_{u,isp}$ , ulazi u zagrijač, predaje toplinu stijenci te izlazi s nešto nižom temperaturom s kojom kasnije ulazi u akumulator ulja. S druge strane, voda protoka  $q_w$  ulazi s konstantnom temperaturom  $T_{nap}$ , zagrijava se preko stijenske te izlazi s nešto višom temperaturom s kojom kasnije ulazi u isparivač.

Promjena temperature ulja, stijenske i vode u zagrijaču napojne vode definiran je sljedećim jednadžbama:

Za ulje (18):

$$\frac{dT_{u,zag}}{dt} = \frac{q_{u,isp} \cdot c_u \cdot (T_{u,isp} - T_{u,zag}) - \alpha_{u,zag} \cdot A_{zag} \cdot (T_{u,zag} - T_{s,zag})}{M_{u,zag} \cdot c_u} \quad (18)$$

Za stijenku (19):

$$\frac{dT_{s,zag}}{dt} = \frac{\alpha_{u,zag} \cdot A_{zag} \cdot (T_{u,zag} - T_{s,zag}) - \alpha_w \cdot A_{zag} \cdot (T_{s,zag} - T_w)}{M_{s,zag} \cdot c_s} \quad (19)$$

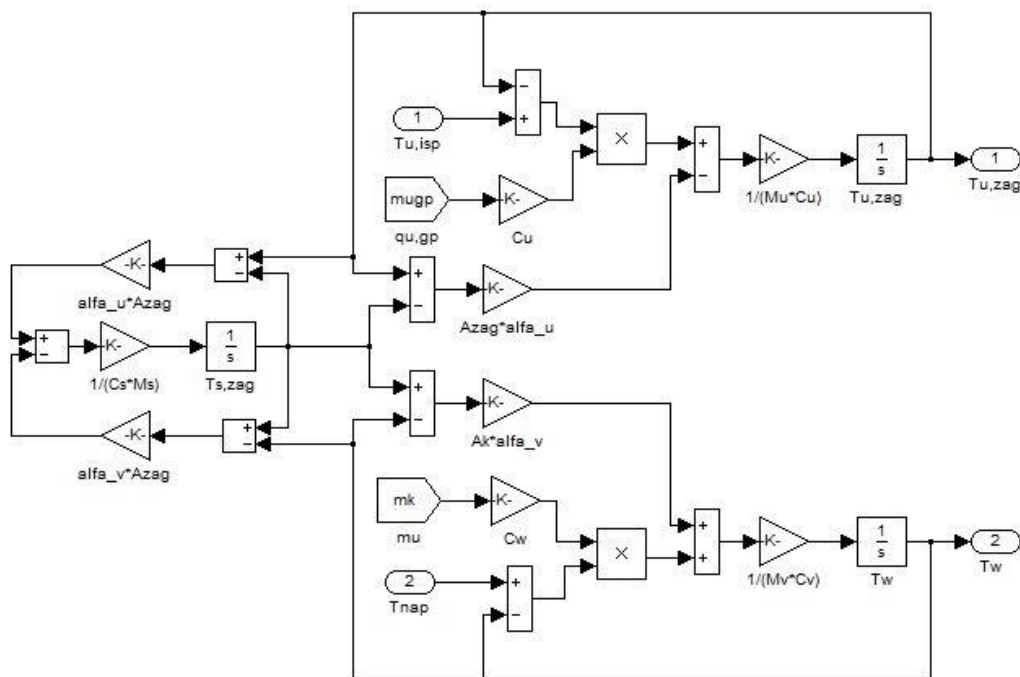
Za vodu (20):

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{q_w \cdot c_w \cdot (T_{nap} - T_w) + \alpha_w \cdot A_{zag} \cdot (T_{s,zag} - T_w)}{M_w \cdot c_w} \quad (20)$$

Modelski parametri zagrijača su:

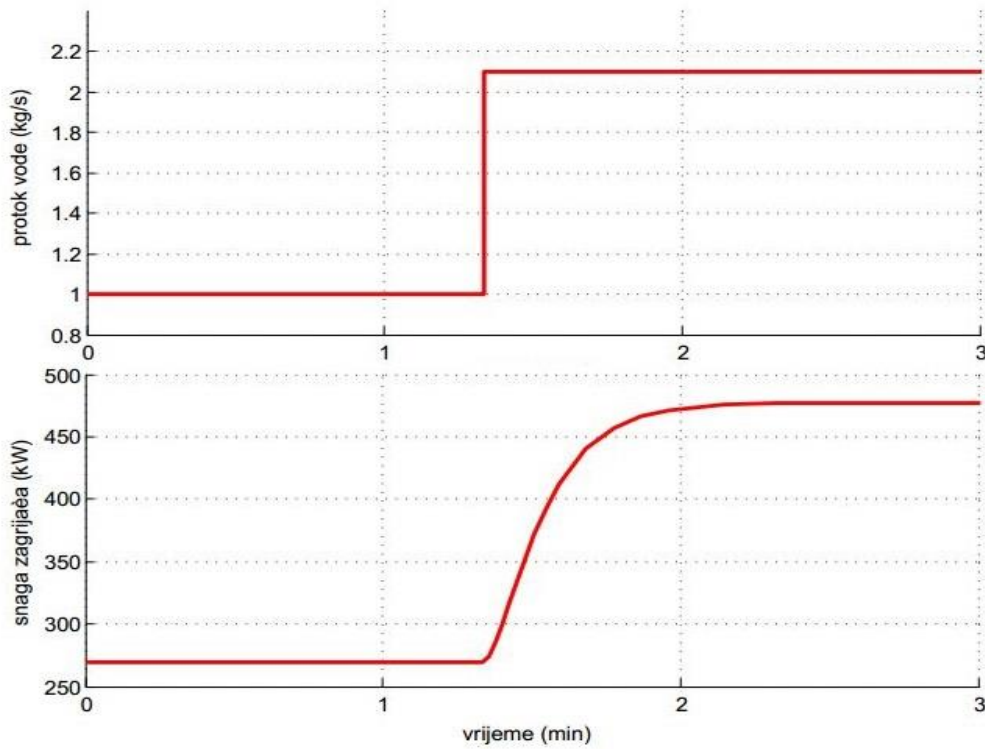
- Spec. toplinski kapacitet vode  $c_w = 4300 \text{ J/kgK}$
- Temperatura napojne vode  $T_{nap} = 115^\circ\text{C}$
- Koef. prijenosa topline na strani vode  $\alpha_w = 800 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Izmjenjivačka površina  $A_{zag} = 50 \text{ m}^2$
- Masa vode u zagrijaču  $M_w = 50 \text{ kg}$
- Koef. prijenosa topline na strani ulja  $\alpha_{u,zag} = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Masa ulja u zagrijaču  $M_{u,zag} = 60 \text{ kg}$
- Masa stijenke u zagrijaču  $M_{s,zag} = 600 \text{ kg}$

Izgled modela zagrijača u SIMULINK-u prikazan je na slici 31.



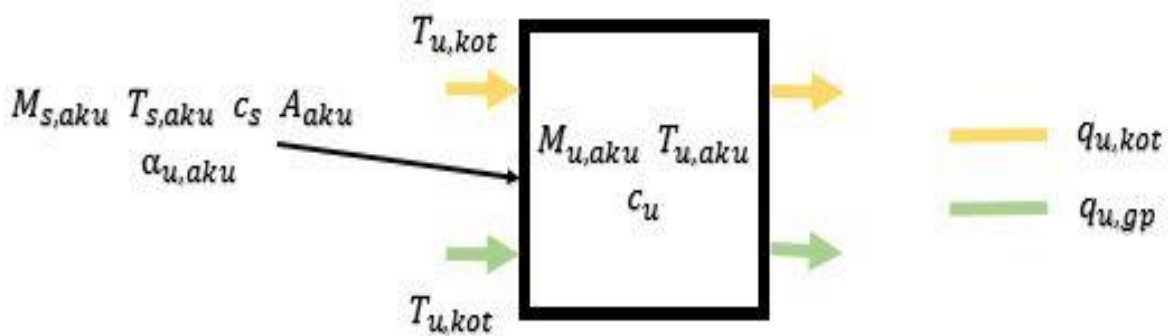
Slika 31. Model zagrijača u SIMULINK-u

Odziv zagrijača napojne vode prikazan je na slici 32. Na prvom dijagramu prikazan je protok napojne vode, a na drugom snaga zagrijača. Za manje od jedne minute zagrijač postigne skoro dvostruko veću snagu.



Slika 32. Odziv zagrijača

### 4.1.3. Akumulator



Slika 33. Akumulator

Akumulator je definiran kao savršeno mješalište sa stijenkom mase  $M_{s,aku}$  i površinom  $A_{aku}$  (Slika 33.). U akumulator ulaze i izlaze protok ulja na strani kotla  $q_{u,kot}$  i protok ulja na strani isparivača i zagrijača  $q_{u,gp}$ . Protok na strani kotla izlazi s temperaturom akumulatora  $T_{u,aku}$ , zagrijava se preko vrućih dimnih plinova te ulazi natrag u akumulator predajući toplinu masi ulja u akumulatoru  $M_{u,aku}$  i masi stijenke  $M_{s,aku}$ . Protok na strani isparivača i zagrijača

izlazi s temperaturom akumulatora  $T_{u,aku}$ , predaje toplinu prvo u isparivaču a onda u zagrijaču, te se vraća sa nešto nižom temperaturom natrag u akumulator. Temperatura ulja u akumulatoru se računa diferencijalnom jednačbom preko energetske i masene bilance svih ulaza i izlaza.

Promjena temperature ulja i stijenke u akumulatoru vrelog ulja definiran je sljedećim jednačbama:

Za ulje (21):

$$\frac{dT_{u,aku}}{dt} = \frac{q_{u,gp} \cdot c_u \cdot (T_{u,zag} - T_{u,aku}) + q_{u,kot} \cdot c_u \cdot (T_{u,kot} - T_{u,aku})}{M_{u,aku} \cdot c_u} - \frac{\alpha_{u,aku} \cdot A_{aku} \cdot (T_{u,aku} - T_{s,aku})}{M_{u,aku} \cdot c_u} \quad (21)$$

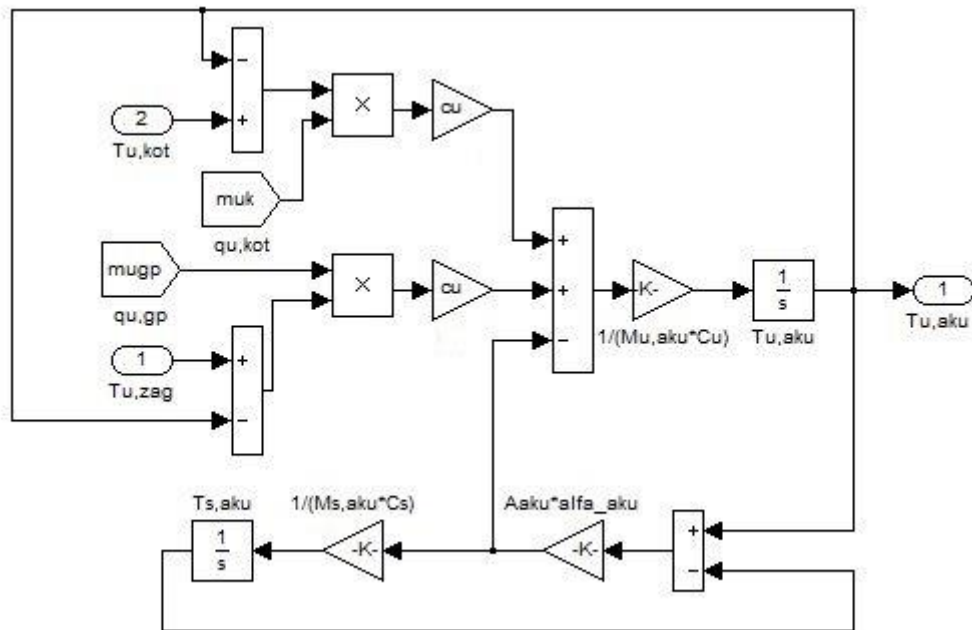
Za stijenku (22):

$$\frac{dT_{s,aku}}{dt} = \frac{\alpha_{u,aku} \cdot A_{aku} \cdot (T_{u,aku} - T_{s,aku})}{M_{s,aku} \cdot c_s} \quad (22)$$

Modelski parametri akumulatora vrelog ulja su:

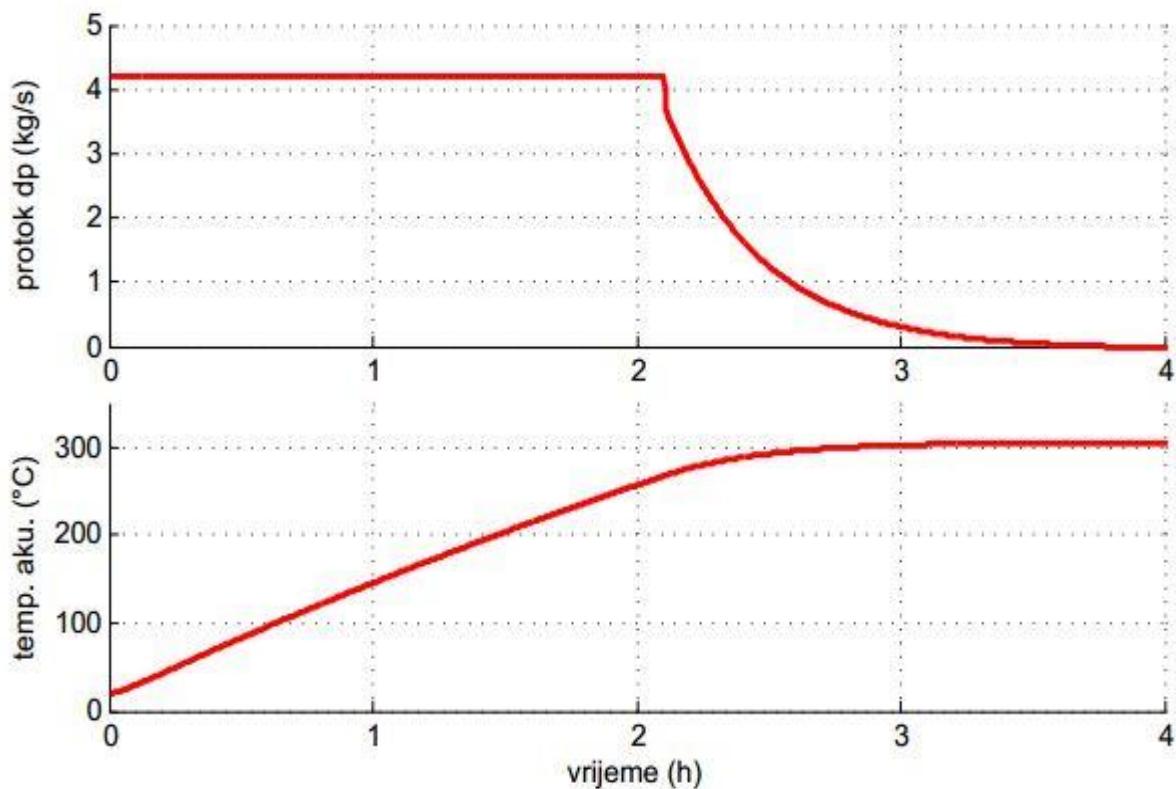
- Koef. prijenosa topline na strani ulja  $\alpha_{u,aku} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Izmjenjivačka površina  $A_{aku} = 110 \text{ m}^2$
- Masa ulja u akumulatoru  $M_{u,aku} = 35000 \text{ kg}$
- Masa stijenke u akumulatoru  $M_{s,aku} = 6000 \text{ kg}$

Izgled modela akumulatora u SIMULINK-u prikazan je na slici 34.



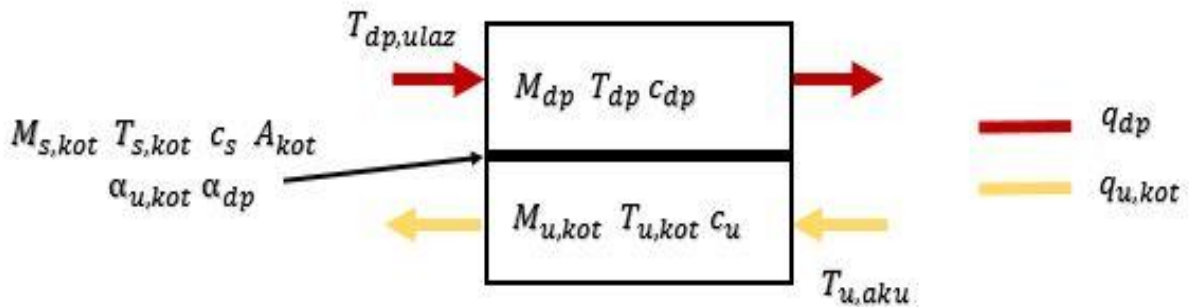
Slika 34. Model akumulatora u SIMULINK-u

Na slici 35. prikazani su dijagrami punjenja akumulatora. Na prvom dijagramu prikazan je protok dimnih plinova, a na drugom temperatura ulja u akumulatoru. Vidljivo je da temperatura u akumulatoru dostigne vrijednost blizu  $280^{\circ}\text{C}$  već nakon 2,5 sata, a već dovoljnu visoku za rad isparivača od  $230^{\circ}\text{C}$  nakon 1,5 sati.



Slika 35. Punjenje akumulatora

#### 4.1.4. Vrelouljni kotao



Slika 36. Kotao

Model kotla je definiran kao izmjenjivač s jednim segmentom tj. kontrolnim volumenom (Slika 36.), podijeljen na dva dijela konstantnih volumena sa stijenkom mase  $M_{s,kot}$  i površine  $A_{kot}$ . Ti volumeni se, s pretpostavkom nestlačivosti, gledaju kao konstantne mase dimnih plinova s jedne strane i ulja s druge strane izmjenjivača. U izmjenjivač ulaze vrući dimni plinovi s protokom  $q_{dp}$  konstantne temperature  $T_{dp,ulaz}$  i predaju toplinu stijenci mase  $M_{s,kot}$ . S druge strane, protok  $q_{u,kot}$  izlazi iz akumulatora s temperaturom  $T_{u,aku}$ , ulazi u kotao, zagrijava se preko stijenske, te izlazi s nešto višom temperaturom nazad u akumulator.

Promjena temperature ulja, stijenske i dimnih plinova u kotlu vrelog ulja definiran je sljedećim jednadžbama:

Za ulje (23):

$$\frac{dT_{u,kot}}{dt} = \frac{q_{u,kot} \cdot c_u \cdot (T_{u,aku} - T_{u,kot}) + \alpha_{u,kot} \cdot A_{kot} \cdot (T_{s,kot} - T_{u,kot})}{M_{u,kot} \cdot c_u} \quad (23)$$

Za stijenkku (24):

$$\frac{dT_{s,kot}}{dt} = \frac{\alpha_{dp} \cdot A_{kot} \cdot (T_{dp} - T_{s,kot}) - \alpha_{u,kot} \cdot A_{kot} \cdot (T_{s,kot} - T_{u,kot})}{M_{s,kot} \cdot c_s} \quad (24)$$



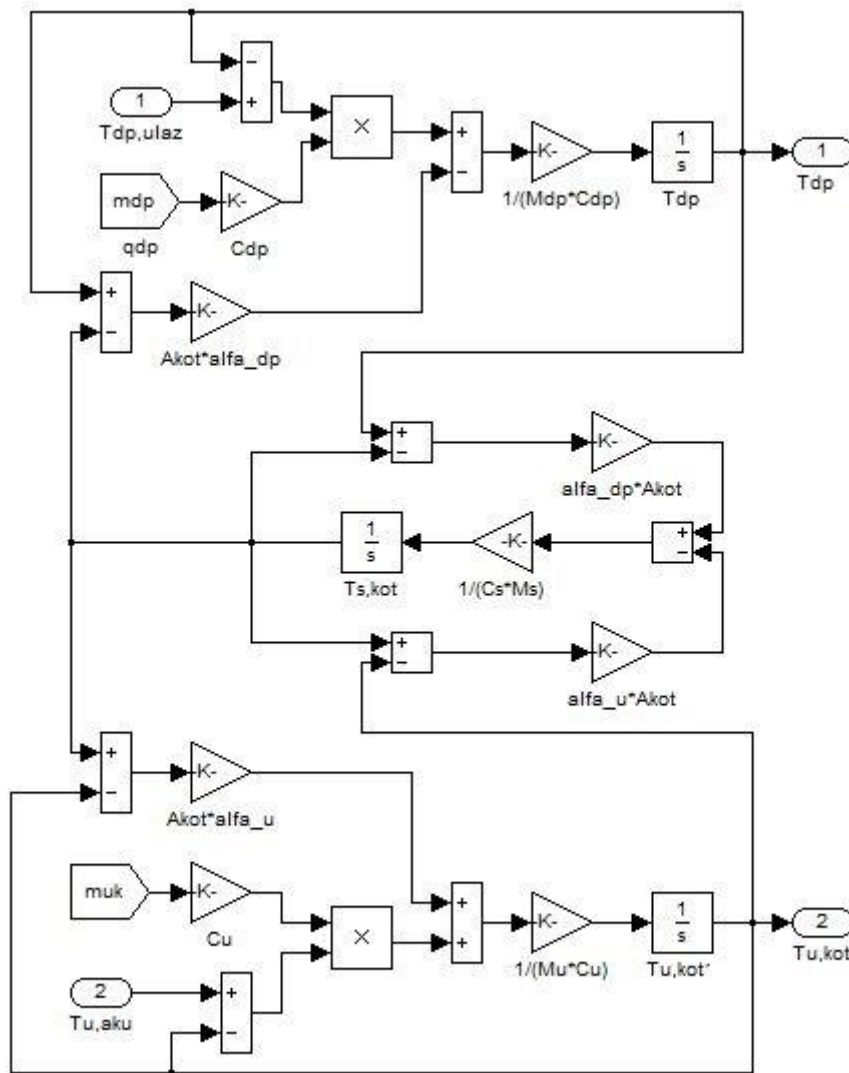
Za dimne plinove (25):

$$\frac{dT_{dp}}{dt} = \frac{q_{dp} \cdot c_{dp} \cdot (T_{dp,ulaz} - T_{dp}) - \alpha_{dp} \cdot A_{kot} \cdot (T_{dp} - T_{s,kot})}{M_{dp} \cdot c_{dp}} \quad (25)$$

Modelski parametri kotla su:

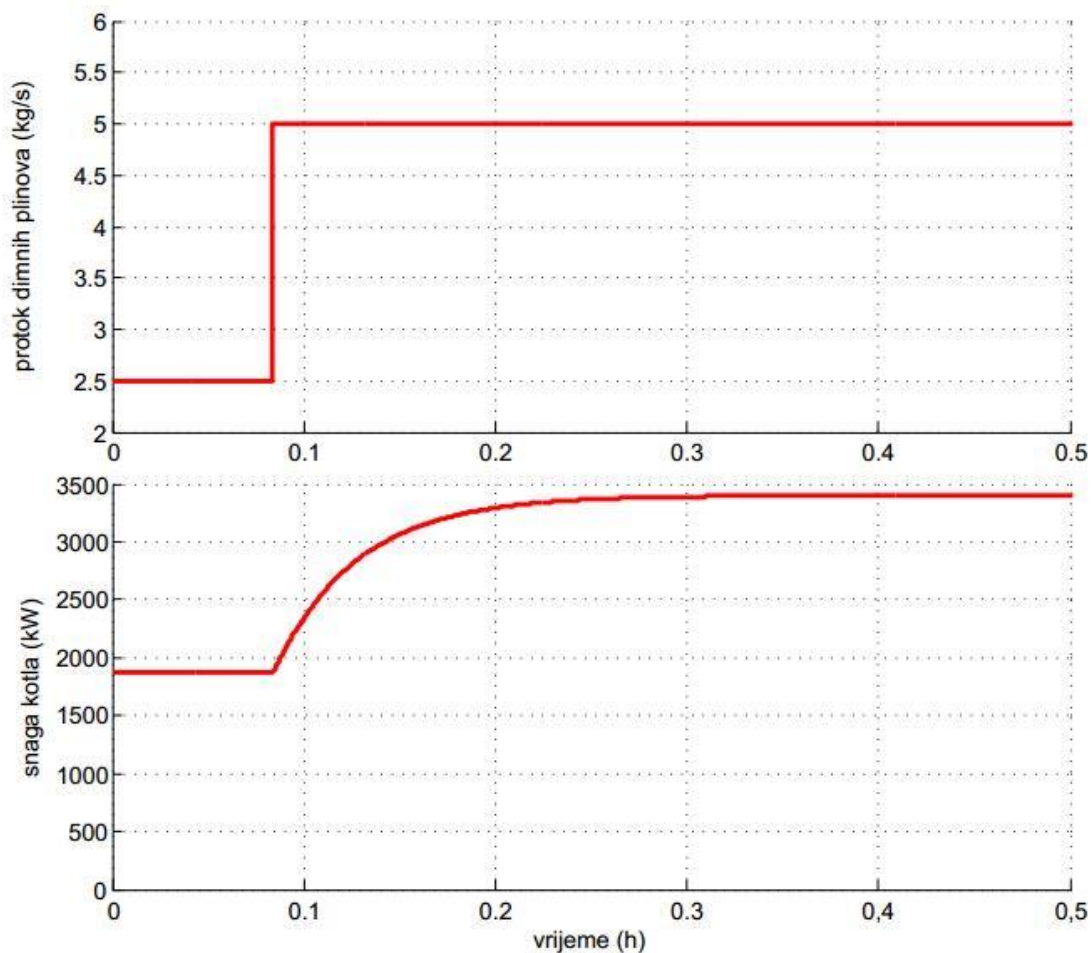
- Spec. toplinski kapacitet dimnih plinova	$c_{dp} = 1250 \text{ J/kgK}$
- Temperatura ulaznih dimnih plinova	$T_{dp,ulaz} = 900^\circ\text{C}$
- Koef. prijenosa topline na strani dimnih plinova	$\alpha_{dp} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Izmjenjivačka površina	$A_{kot} = 1000 \text{ m}^2$
- Masa dimnih plinova u kotlu	$M_{dp} = 15 \text{ kg}$
- Koef. prijenosa topline na strani ulja	$\alpha_{u,kot} = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Masa ulja u kotlu	$M_{u,kot} = 3000 \text{ kg}$
- Masa stijenske u kotlu	$M_{s,kot} = 8000 \text{ kg}$
- Protok ulja na strani kotla	$q_{u,kot} = 26 \text{ kg/s}$

Izgled modela vrelouljnog kotla u SIMULINK-u prikazan je na slici 37.



Slika 37. Model kotla u SIMULINK-u

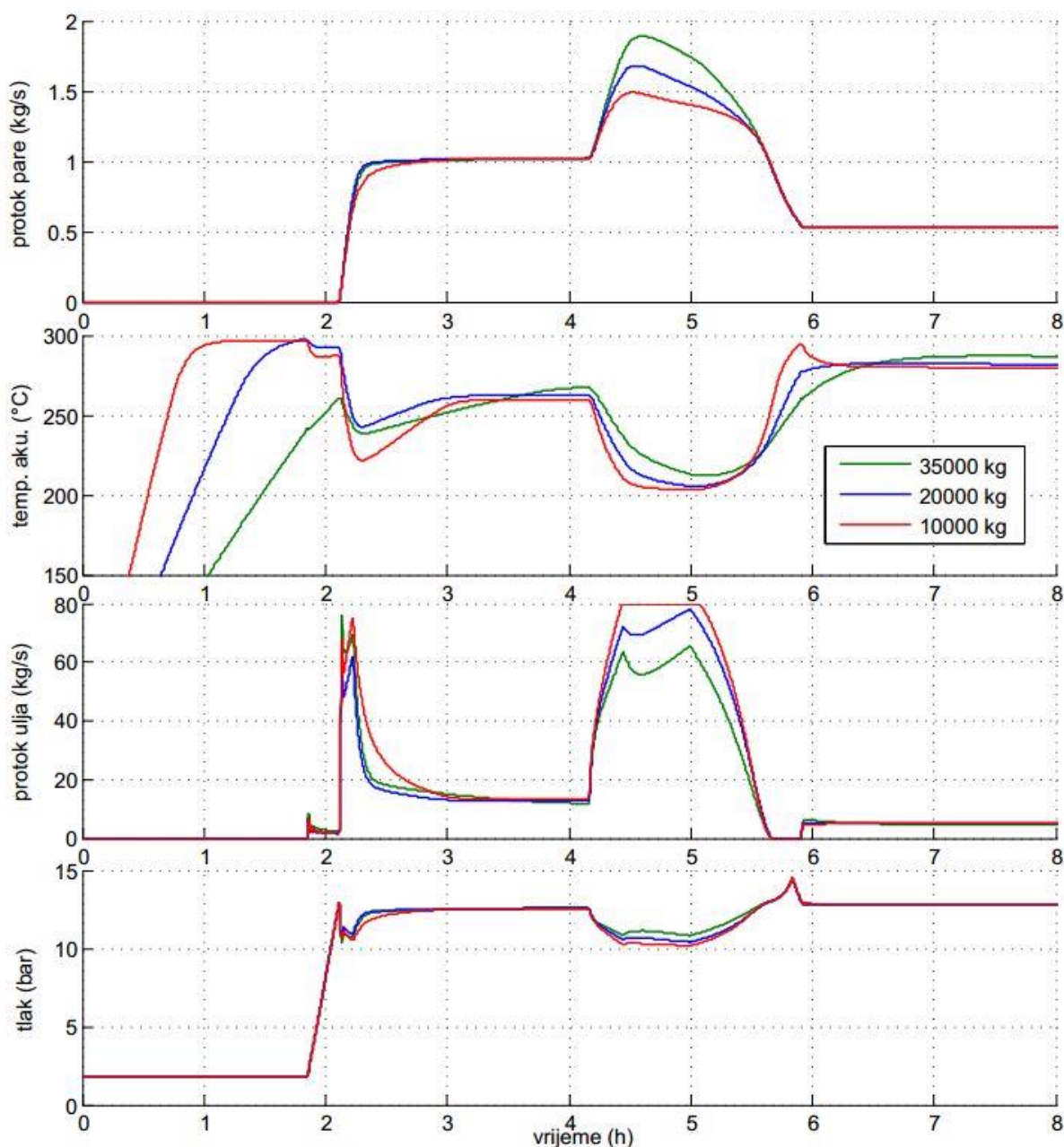
Na slici 38. prikazan je odziv snage kotla na skok protoka dimnih plinova. Prvi dijagram prikazuje skok protoka, a drugi snagu kotla. U manje od 10 minuta dolazi do odgovarajuće snage za zadani veći protok dimnih plinova.



Slika 38. Odziv kotla

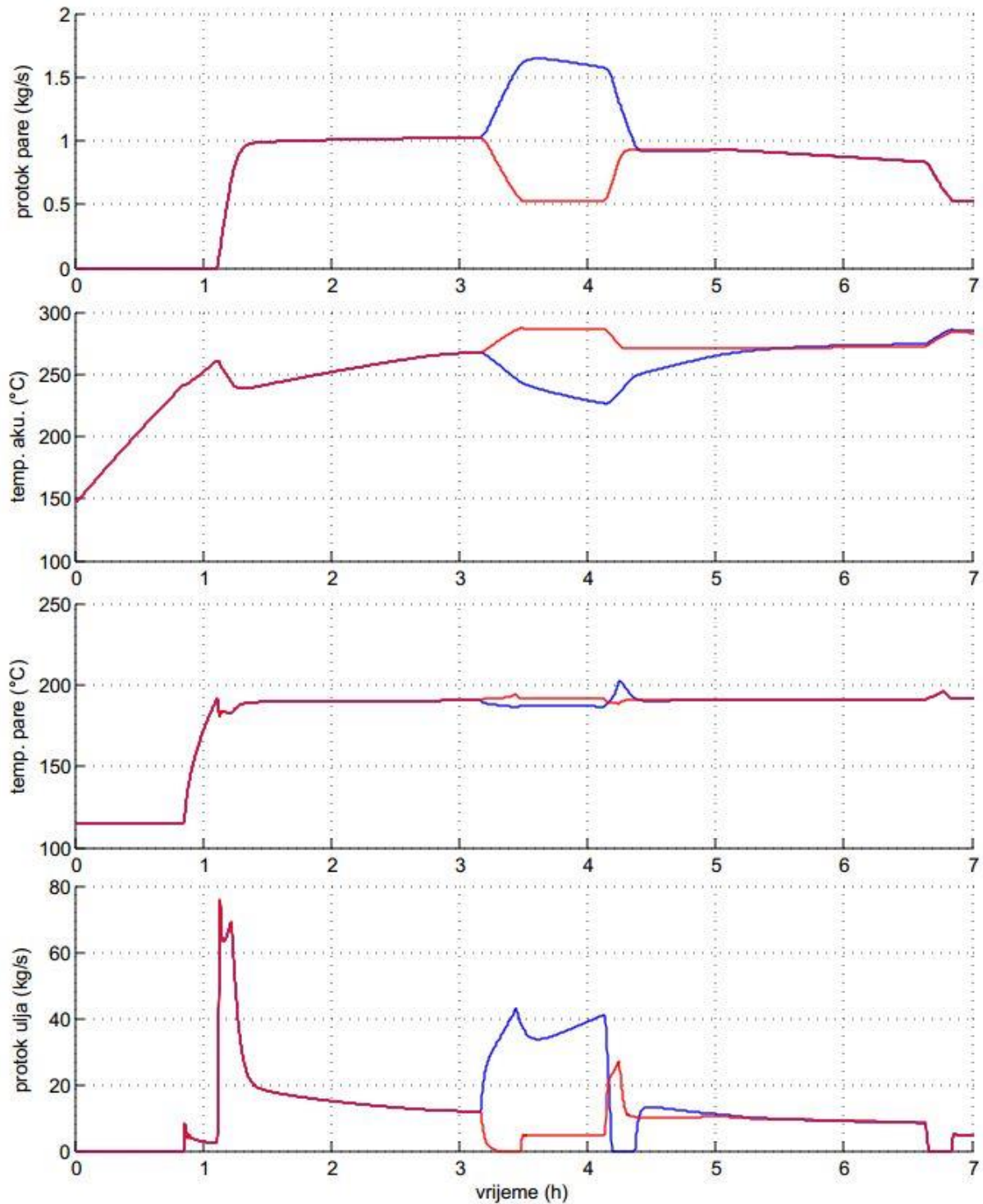
## 4.2. Rezultati simulacije

U ovom poglavlju razmotrit će se utjecaj različitih parametara na odziv cijelog sustava. Na slici 39. prikazan je utjecaj veličine akumulatora tj. količine termo ulja u njemu na odziv sustava za neku pretpostavljenu potrošnju. Primjećuje se da za manje količine ulja, kotao puno brže zagrije ulje na radnu temperaturu ali za istu potrošnju pare puno brže pada temperatura ulja u akumulatoru, a time i proizvodnja pare. Na dijagramu koji pokazuje protok ulja vidi se da manje količine ulja zahtijevaju veće protoke što zahtjeva veću snagu cirkulacijskih pumpi.



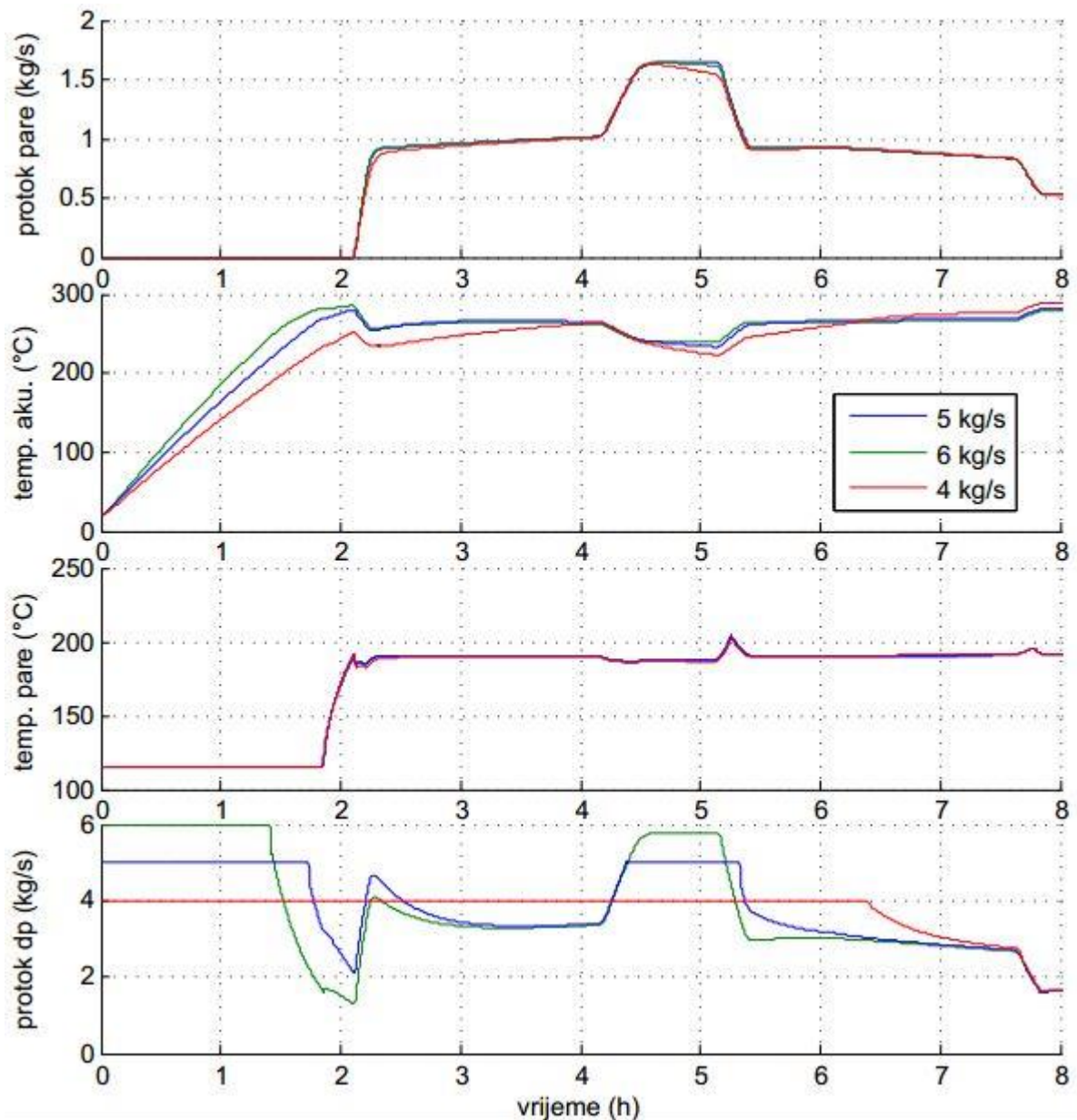
Slika 39. Utjecaj veličine akumulatora

Na slici 40. prikazan je utjecaj povećanja i smanjenja potrošnje pare na temperaturu u akumulatoru i u isparivaču, te protok ulja kroz isparivač. U slučaju povećanja potrošnje pare (plavo) dolazi do pada temperature u akumulatoru, te neznatnog pada temperature (tlaka) u akumulatoru. Protok ulja prati potrošnju pare, u slučaju veće potrošnje raste protok ulja i obratno.



Slika 40. Utjecaj promjene opterećenja

Na slici 41. prikazan je utjecaj količine dimnih plinova na protok pare, temperaturu u akumulatoru i temperaturu u isparivaču. Što je veći protok dimnih plinova to temperatura ulja u akumulatoru brže postigne radne parametre. Na protok pare, te temperaturu (tlak) pare nema gotovo nikakav utjecaj. Protok dimnih plinova je kontinuiran za najmanju vrijednost od 4 kg/s za razliku od ostalih jer je temperatura u akumulatoru ispod maksimalne sve dok protok pare ne padne ispod nominalne snage kotla, kada temperatura u akumulatoru postiže maksimalnu vrijednost.



Slika 41. Utjecaj količine dimnih plinova



## 5. Proračun akumulatora vrelog ulja

U ovom poglavlju izvest će se proračun akumulatora vrelog ulja kao ključni element sustava za pokrivanje vršnog opterećenja. Prema simulacijama pokrivanje vršnog opterećenja od 7 t/h tijekom 15 min zadovoljava količina ulja 35000 kilograma što je ekvivalent od oko 50 m<sup>3</sup> ulja sa dodatnim volumenom za temperaturno širenje. Akumulator će biti izveden kao dvije posude spojene u paralelu kako bi se olakšao transport i sama izrada. Akumulator će se dimenzionirati i proračunati na osnovu sljedećih parametara:

- Masa ulja u akumulatoru  $M_{u,aku} = 35000 \text{ kg}$
- Maksimalna temperatura  $T_{max} = 300^{\circ}\text{C}$
- Maksimalni radni tlak  $p_g = 0,5 \text{ bar}$
- Protok na strani kotla  $q_{u,kot} = 80 \text{ kg/s}$
- Protok na strani isparivača  $q_{u,gp} = 26 \text{ kg/s}$

### Određivanje glavnih dimenzija aparata

Za odabrani promjer jednog spremnika od  $D_v = 2200 \text{ mm}$ , visina spremnika je sljedeća (26):

$$h_{aku} = \frac{V_{aku}}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{25\text{m}^3}{\frac{(2,2\text{m})^2 \cdot \pi}{4}} = 6,58\text{m} \approx 6,6\text{m} \quad (26)$$

### Određivanje vrste i klase posude

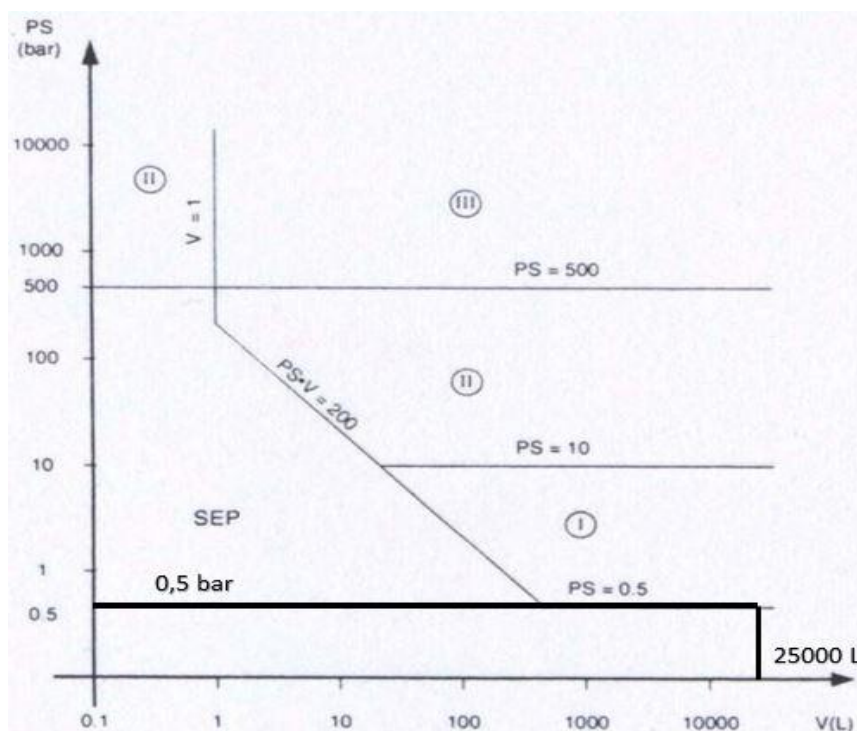
Vrsta i klasa posude se određuje prema tlaku, temperaturi, agregatnom stanju, te fizikalno-kemijskim karakteristikama radnog medija, i akumuliranoj energiji. Akumulator spada pod posude, a ulje pod toksične, zapaljive i oksidirajuće tvari (**Grupa 1**) (Tablica 6.).

Klasa (Smjernica 97/23/EC):

	<b>Posude</b>				Generatori pare	<b>Cjevovodi</b>			
Stanje radnog medija	Plin		Kapljevina			Plin		Kapljevina	
Karakteristike radnog medija	Grupa					Grupa			
	1	2	1	2		1	2	1	2
Dijagram	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Tablica 6. Klasa posude

Vrsta i klasa posude se definira prema dijagramu 3. na slici 42.



Slika 42. Dijagram 3.

Posuda spada u klasu posude dobre inženjerske prakse.

### Proračun debljine stijenke plašta

Potrebna debljina stijenke plašta računa se prema normi HRN M.E2.253 Svi koeficijenti potrebni za izračun, određeni su prema spomenutoj normi. Pretpostavljena debljina stijenke:

$$s_e = 8 \text{ mm}$$



Proračunski tlak iznosi (27):

$$p_p = p_g + h_{aku} \cdot \rho_{ulje} \cdot 10^{-4} = 0,5 \text{ bar} + 6,6 \text{ m} \cdot 750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-4} = 0,995 \approx 1 \text{ bar} \quad (27)$$

Potrebna debljina stijenke je (28):

$$s = \frac{D_v \cdot p_p}{20 \cdot \frac{K_p}{S} \cdot v + p_p} + c_1 + c_2 = \frac{2200 \cdot 1}{20 \cdot \frac{140}{1,5} \cdot 1 + 1} + 0,3 + 1 = 2,5 \text{ mm} < s_e \quad (28)$$

$$= 8 \text{ mm}$$

gdje je:

- proračunska čvrstoća pri  $T_{max} = 300^\circ\text{C}$      $K_p = 140 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ; za ČRV 250
- proračunska sigurnost za radni tlak             $S = 1,5$
- valjanost zavarenog spoja                       $v = 1$
- dodatak zbog odstupanja mjera                 $c_1 = 0,3$
- dodatak zbog gubitka korozijom                $c_2 = 1$

Ispitni tlak  $p_{pisp}$  računa se kao (29):

$$p_{pisp} = 1,43 \cdot p_p = 1,43 \cdot 1 = 1,43 \text{ bar} \quad (29)$$

Provjera potrebne debljine stijenke za ispitni tlak (30):

$$s = \frac{D_v \cdot p_{pisp}}{20 \cdot \frac{K_p}{S'} \cdot v + p_p} + c_1 + c_2 = \frac{2200 \cdot 1,43}{20 \cdot \frac{140}{1,1} \cdot 1 + 1,43} + 0,3 + 1 = 2,6 \text{ mm} < s_e \quad (30)$$

$$= 8 \text{ mm}$$

gdje je:

- proračunska sigurnost za radni tlak             $S' = 1,1$

## Proračun priključaka na plaštu

Priključci koji će biti potrebni na akumulatoru vrelog ulja:

- 2 x za protok ulja za kotao ( $q_{u,kot}$ )
- 2 x za protok ulja za isparivač ( $q_{u,gp}$ )
- Revizijski otvor (DN500)
- Ispust (DN40)
- Priključak za dušik (DN25)
- 5 x priključak za termopar (R 1/2)

Potreban promjer ulaznih priključka na strani kotla (31):

$$d_{u,kot} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{u,kot}}{\pi \cdot w \cdot \rho_{ulje}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,4}{\pi \cdot 2 \cdot 7,55}} = 0,149 \text{ m} = 149 \text{ mm (DN150)} \quad (31)$$

Potreban promjer ulaznih priključka na strani isparivača (32):

$$d_{u,gp} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{u,gp}}{\pi \cdot w \cdot \rho_{ulje}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,4}{\pi \cdot 2 \cdot 7,55}} = 0,184 \text{ m} = 184 \text{ mm (DN200)} \quad (32)$$

gdje je:

- pretpostavljena brzina strujanja ulja kroz priključke  $w = 2 \text{ m/s}$
- proračunska gustoća ulja  $\rho_{ulje} = 750 \text{ kg/m}^3$

## Proračun potrebne debljine stijenke cilindričnog plašta oko izreza

Proračun izreza računa se prema HRN M.E2.256.

Iz proračuna priključaka je vidljivo da je revizijski otvor najveći priključak(DN500).

Uvjet primjene norme (33), (34):

$$0,002 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_v} \leq 0,1 \quad (33)$$

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_v} = \frac{8 - 0,3 - 1}{2200} = 0,00305; \quad (\text{zadovoljava}) \quad (34)$$

Potrebna debljina stijenke oko najvećeg izreza ( izlazni priključak pare, DN500; Ø508x11)

gdje je:

- promjer izreza  $d_i = 508 \text{ mm}$
- debljina stijenke priključka  $s_i = 11 \text{ mm}$

Koeficijent oslabljenja (35), (36), (37):

$$v_A = f \left( \frac{s_i - c_1 - c_2}{s_e - c_1 - c_2}; \frac{d_i}{\sqrt{(D_u + s_e - c_1 - c_2) \cdot (s_e - c_1 - c_2)}} \right) \quad (35)$$

$$\frac{s_i - c_1 - c_2}{s_e - c_1 - c_2} = \frac{11 - 0,3 - 1}{8 - 0,3 - 1} = 1,45 \quad (36)$$

$$\frac{d_i}{\sqrt{(D_u + s_e - c_1 - c_2) \cdot (s_e - c_1 - c_2)}} = \frac{508}{\sqrt{(2184 + 8 - 0,3 - 1) \cdot (8 - 0,3 - 1)}} \quad (37)$$

$$= 4,193$$

gdje je:

- unutarnji promjer plašta  $D_u = 2184 \text{ mm}$

Iz dijagrama u normi slijedi:  $v_A = 0,7$

Potrebna debljina stijenke oko izreza (radno stanje) (38):

$$s = \frac{D_v \cdot p_p}{p_p + 20 \cdot v_A \cdot \frac{K_p}{S}} + c_1 + c_2 = \frac{2200 \cdot 1}{1 + 20 \cdot 0,7 \cdot \frac{140}{1,5}} + 0,3 + 1 = 2,98 \text{ mm} < s_e \quad (38)$$

$$= 8 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke oko izreza (ispitni tlak) (39):

$$s = \frac{D_v \cdot p_{pisp}}{p_{pisp} + 20 \cdot v_a \cdot \frac{K_p}{S_i}} + c_1 + c_2 = \frac{2200 \cdot 1,43}{1,43 + 20 \cdot 0,7 \cdot \frac{140}{1,1}} + 0,3 + 1 = 3,07 \text{ mm} \quad (39)$$

$$< s_e = 8 \text{ mm}$$

Nije potrebno ojačanje. Iz konstrukcijskih razloga uzima se debljina stijenke  $s_e = 5 \text{ mm}$ .

### Proračun debljine stijenke podnice bez izreza

Akumulator će biti izveden bez izreza na podnicama. Odabrat će se plitka podnica.

Proračun podnica izveden je prema HRN M.E2.252.

Materijal podnice: ČRV 250

Pretpostavljena debljina podnice je  $s_p = 5 \text{ mm}$

Uvjet primjene norme (40), (41), (42):

$$0,001 \leq \frac{s_p - c_1 - c_2}{D_v} \leq 0,1 \quad (40)$$

$$0,001 \leq \frac{5 - 0,3 - 1}{2200} \leq 0,1 \quad (41)$$

$$0,001 \leq 0,00168 \leq 0,1 \quad (\text{zadovoljava}) \quad (42)$$

Proračunski koeficijent podnice  $\beta$  (43), (44), (45):

$$\beta = f\left(\frac{d_i}{D_v}, \frac{s_p - c_1 - c_2}{D_v}\right) \quad (43)$$

$$\frac{d_i}{D_v} = 0; \quad (\text{nema izreza}) \quad (44)$$

$$\frac{s_p - c_1 - c_2}{D_v} = \frac{5 - 0,3 - 1}{2200} = 0,00168 \quad (45)$$

Očitano iz dijagrama u normi:  $\beta = 5$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela (radno stanje) (46):

$$s_t = \frac{D_v \cdot p_p \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K_p}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{2200 \cdot 1 \cdot 5}{40 \cdot \frac{140}{1,5} \cdot 1} + 0,3 + 1 = 4,25 \text{ mm} < s_p = 5 \text{ mm} \quad (46)$$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela (ispitni tlak) (47):

$$s_t = \frac{D_v \cdot p_{pisp} \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K_p}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{2200 \cdot 1,43 \cdot 5}{40 \cdot \frac{140}{1,1} \cdot 1,43} + 0,3 + 1 = 3,46 \text{ mm} < s_p = 5 \text{ mm} \quad (47)$$

Potrebna debljina stijenke kalote (radno stanje) (48):

$$s_k = \frac{2 \cdot (D_v + s_p) \cdot p_p}{p_p + 40 \cdot \frac{K_p}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{2 \cdot (2200 + 5) \cdot 1}{1 + 40 \cdot \frac{140}{1,5} \cdot 1} + 0,3 + 1 = 2,48 \text{ mm} < s_p = 5 \text{ mm} \quad (48)$$

Potrebna debljina stijenke kalote (ispitni tlak) (49):

$$s_k = \frac{2 \cdot (R + s_p) \cdot p_{pisp}}{p_{pisp} + 40 \cdot \frac{K_p}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{2 \cdot (2200 + 5) \cdot 1,43}{1,43 + 40 \cdot \frac{140}{1,1} \cdot 1} + 0,3 + 1 = 2,54 \text{ mm} < s_p = 5 \text{ mm} \quad (49)$$

Usvaja se pretpostavljena debljina podnice od 5 mm.

---

**Proračun debljine izolacije**

Kao izolacijski materijal koristi se kamena vuna. Parametri koji utječu na debljinu izolacije su:

- Temperatura okoliša  $T_{ok} = 20^{\circ}C$
- Temperatura vanjske površine  $T_{pov} = 40^{\circ}C$
- Temperatura unutar akumulatora  $T_{max} = 300^{\circ}C$
- Toplinska vodljivost čelika  $\lambda_{\check{c}} = 50 W/mK$
- Toplinska vodljivost kamene vune  $\lambda_{KV} = 0,04 W/mK$
- Debljina stijenke  $s_e = 5 mm$
- Koef. prijelaza topline u okoliš  $\alpha_z = 10 W/m^2K$

Gubitak energije po površini (50):

$$q = \alpha_v \cdot (T_{pov} - T_{ok}) = 200W/m^2 \quad (50)$$

Debljina izolacije (51):

$$\delta = \lambda_{KV} \cdot \left( \frac{T_{max} - T_{pret}}{q} - \frac{s}{\lambda_{\check{c}}} \right) = 52mm \approx 6cm \quad (51)$$

---

## 6. ZAKLJUČAK

Biomasa je vodeći obnovljivi izvor u Europi za dobivanje toplinske energije sa skoro stopostotnim udjelom u ukupnoj proizvodnji toplinske energije iz obnovljivih izvora. Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora zauzima jednu petinu ukupne proizvodnje. Biomasa je rasprostranjena je po cijeloj Europi i uz pametno i odgovorno korištenje postaje neiscrpan izvor energije. Iz biomase se različitim procesima može proizvesti tekuće i plinovito gorivo koje se kasnije može koristiti u svim procesima u kojima se trenutno koriste fosilna goriva. Sve te činjenice definitivno svrstavaju biomasu kao vodeći izvor obnovljive energije. Izgaranje biomase na rešetki je provjerena tehnologija dobivanja toplinske energije zbog čega je i uzeta u obzir kod zamjene postojećeg sustava na fosilna goriva u prehrambenoj industriji.

Prehrambena industrija je veliki potrošač energije, koja uglavnom za svoje procese koristi paru kao nositelja topline. U većini slučajeva se para proizvodi u parnim blok kotlovima na fosilna goriva. Takva industrija uglavnom ima diskontinuiranu potrošnju te ima velike i brze skokove opterećenja. U slučaju zamjene takovog sustava s generatorom pare na biomasu jednostavno se ne bi moglo pratiti opterećenje zbog sporog odziva kotla. Jedno od rješenja tog problema je ugradnja parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare s kojim bi se moglo bez problema zadovoljiti potrebno opterećenje prehrambene industrije. Zbog visoke investicije kogeneracije od oko 5000 €/kW<sub>el</sub> upitna je isplativost takvog sustava bez poticaja na proizvodnju električne energije jer većinu vremena industrija radi na minimalnom opterećenju sa kratkim ali visokim vršnim opterećenjima.

Kao alternativa takvom sustavu smišljen je sustav sa istim izgaranjem biomase na rešetki ali se u ovom slučaju umjesto proizvodnje pare zagrijava termo ulje. Ulje je izabrano zbog toga što ima visoku točku vrelišta pa na atmosferskom tlaku može postići temperaturu od 300°C, voda na toj temperaturi ima tlak preko 80 bara. Za akumulaciju energije, ulje je puno zahvalniji medij jer se pohranjuje u velikim, dobro izoliranim spremnicima na atmosferskom tlaku. S akumulatorom se može pokrivati vršno opterećenje, te u slučaju naglih promjena u opterećenju, kotao na biomasu će puno slabije osjetiti poremećaje. Proizvodnja pare s vrelin uljem se na jednostavan način proizvodi u pločastim izmjenjivačima topline – isparivačima, koji imaju sličan odziv kao i kotlovi na fosilna goriva. Čitav sustav sastoji se od vrelouljnog kotla na biomasu, velikog akumulatora vrelog ulja, pločastog zagrijača napojne vode i

pločastog isparivača. Investicija takvog sustava je otprilike tri puta niža od kogeneracije za ovaj slučaj prehrambene industrije, te ima puno nižu godišnju potrebu za biomasom, što olakšava nabavu i transport biomase. Po napravljenoj tehno-ekonomskoj analizi, investicija bi se trebala vratiti u tri godine.

Za bolje shvaćanje rada sustava, te da se mogu simulirati karakteristični slučajevi opterećenja, napravljen je matematički model cijelog sustava koji je izveden u SIMULINK-u, koji je dio paketa programskog alata MATLAB. Simulacijama su prikazani utjecaji određenih parametara na rad isparivača kao najosjetljivijeg dijela sustava. Prikazan je utjecaj povećanja i smanjenja protoka pare na tlak u isparivaču, iz čega se vidjelo da naglo smanjenje protoka ima kao rezultat veliko povećanje tlaka, što se treba izbjeći. Prikazan je i utjecaj količine ulja u akumulatoru na karakteristični scenarij potrošnje pare iz čega se vidi da veća količina ulja utječe na dužu vršnu potrošnju s manjim protocima ulja ali je period zagrijavanja ulja duži.

Sustav s vrelouljnim kotlom na biomasu, akumulatorom vrelog ulja i izmjenjivačem topline – isparivačem je jedan od načina da se fosilno gorivo, kao sve nestabilniji i nesigurniji izvor energije, zamijeni obnovljivim izvorom – biomasom u slučaju kad imamo diskontinuiranu potrošnju pare tj. velike oscilacije opterećenja.



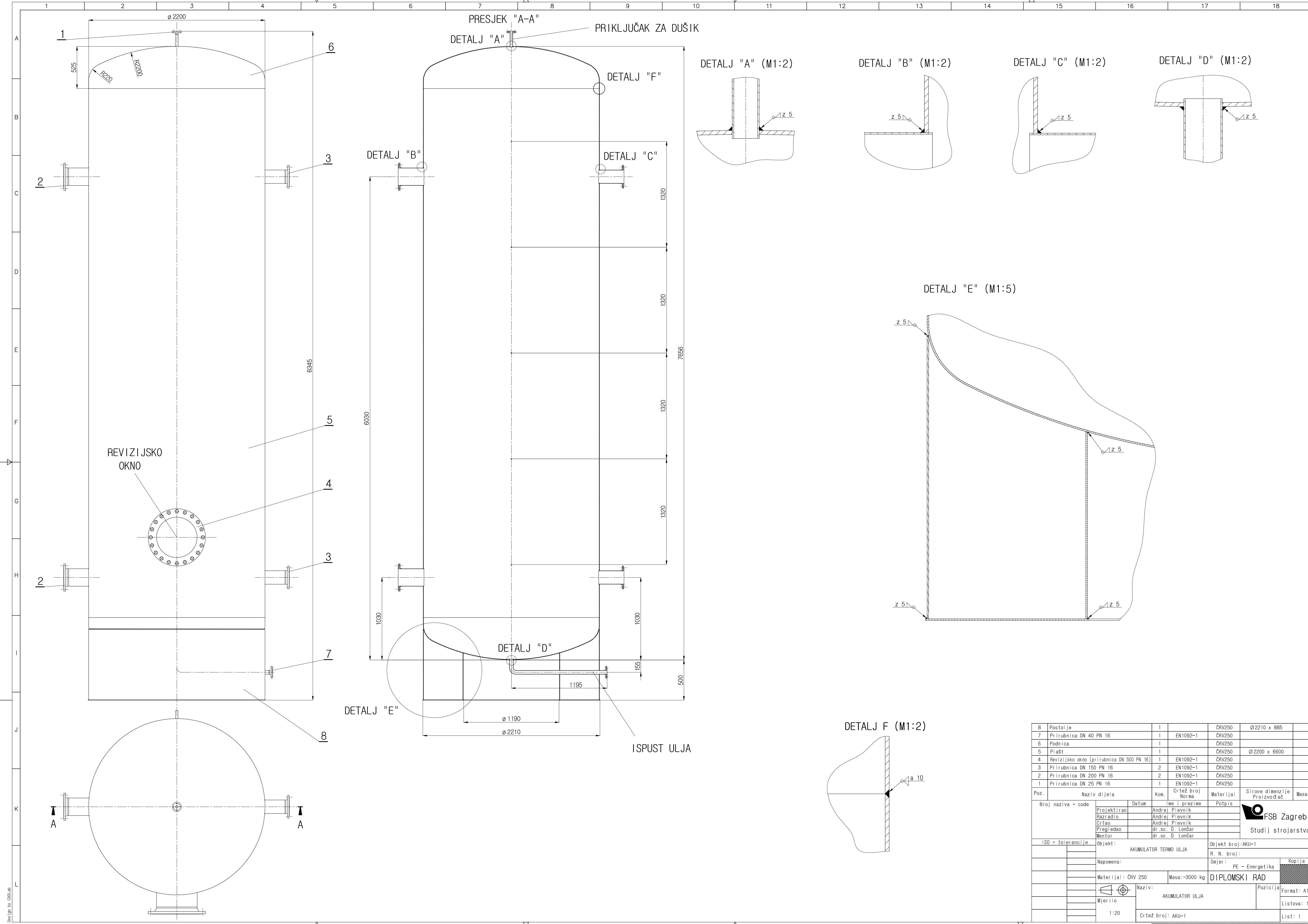
---

**LITERATURA**

- [1] <http://www.eubia.org/index.php/about-biomass/deployment-potential-and-resources>
- [2] [http://www.europeanclimate.org/documents/Biomass\\_report\\_-\\_Final.pdf](http://www.europeanclimate.org/documents/Biomass_report_-_Final.pdf)
- [3] REGEA: Priručnik o gorivima iz drvene biomase, Zagreb, 2012.
- [4] Čosić, B.: Diplomski rad, Zagreb, 2008.
- [5] Grujić, R., Jašić, M.: Održive tehnologije u prehrambenoj industriji
- [6] Lovrić, T.: Procesi u prehrambenoj industriji, Zagreb
- [7] [http://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.pbf.unizg.hr%2Fcontent%2Fdownload%2F26441%2F102564%2Fversion%2F1%2Ffile%2FPredavanja%2Bprojektiranje.docx&ei=9\\_-wVPXvNYnvaKSJgagC&usg=AFQjCNH81qYZX6V5zWwyE70sgu\\_rudJA5w&sig2=QesyO7w4NMCikncKXgl6bA&bvm=bv.83339334,d.bGQ](http://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.pbf.unizg.hr%2Fcontent%2Fdownload%2F26441%2F102564%2Fversion%2F1%2Ffile%2FPredavanja%2Bprojektiranje.docx&ei=9_-wVPXvNYnvaKSJgagC&usg=AFQjCNH81qYZX6V5zWwyE70sgu_rudJA5w&sig2=QesyO7w4NMCikncKXgl6bA&bvm=bv.83339334,d.bGQ)
- [8] <http://www.wargaboiler.com/boilerdesignsoftware/Example-4-pass-fire-tube-boiler.html>
- [9] <http://www.pigo-r.com/index.php?q=dynamic/products>
- [10] [http://www.innozit.co.rs/upload/zit/492578183\\_1.jpg](http://www.innozit.co.rs/upload/zit/492578183_1.jpg)
- [11] Lončar, D., Krajačić, G., Vujanović, M., Podrška developerima – primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, MINGORP, CTT, Zagreb, 2009.
- [12] [http://www.bkww.de/infos\\_zahlen\\_zur\\_kwkw/ueblicher\\_preis/](http://www.bkww.de/infos_zahlen_zur_kwkw/ueblicher_preis/)
- [13] [http://www.kotlovi.hr/\\_Data/Files/Projektne\\_podloge\\_dd\\_kotlovi.pdf](http://www.kotlovi.hr/_Data/Files/Projektne_podloge_dd_kotlovi.pdf)
- [14] <http://gandras.net/wp-content/uploads/boiler-for-fuel-with-humidity-up-to-120-on-dry-base.jpg>
- [15] <http://deltathx.com/Uploads/PandS.jpg>
- [16] [http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/shell-plate-heat-exchanger-16602-7146533.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/shell-plate-heat-exchanger-16602-7146533.jpg)
- [17] <http://postfile.aving.net/2012/05/20120503-0748515977-600x589.jpg>
- [18] [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/SIMULINK\\_SKRIPTA.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/SIMULINK_SKRIPTA.pdf)
- [19] [http://adria.fesb.hr/~gmicic/vj/vjezba\\_4.pdf](http://adria.fesb.hr/~gmicic/vj/vjezba_4.pdf)

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija



8	Postolja	1		ČRV250	$\phi 2210 \times 885$	
7	Prirubnica DN 40 PN 16	1	EN 1092-1	ČRV250		
6	Podnica	1		ČRV250		
5	Plasť	1		ČRV250	$\phi 2200 \times 6600$	
4	Revizijsko okno (prirubnica DN 500 PN 16)	1	EN 1092-1	ČRV250		
3	Prirubnica DN 150 PN 16	2	EN 1092-1	ČRV250		
2	Prirubnica DN 200 PN 16	2	EN 1092-1	ČRV250		
1	Prirubnica DN 25 PN 16	1	EN 1092-1	ČRV250		
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije	Masa
Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime	Potpis	
Projektirao		Datum		Ime i prezime	Potpis	
Razradio		Datum		Ime i prezime	Potpis	
Crtao		Datum		Ime i prezime	Potpis	
Pregledao		Datum		Ime i prezime	Potpis	
Mentor		Datum		Ime i prezime	Potpis	
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
		AKUMULATOR TERMO ULJA		AKU-1		
Napomena:		R. N. broj:		Smjer:		Kopija
				PE - Energetika		
Materijal: ČRV 250		Masa: 3000 kg		DIPLOMSKI RAD		
Mjerilo		Naziv:		Pozicija:		Format: A1
1:20		AKUMULATOR ULJA		Listova: 1		
		Crtež broj: AKU-1		List: 1		

Dizajnirao: C.Č.Š.