

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Stanić

Zagreb, 2017. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil dipl.ing.

Student:

Tomislav Stanić

Zagreb, 2017. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći se znanjem i vještinama stečenim tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Prije svega zahvaljujem svojoj obitelji na moralnoj podršci koje su mi iskazali tijekom studija.

Također se zahvaljujem svim kolegama i prijateljima bez kojih studij ne bi prošao tako uspješno.

Posebno se zahvaljujem prijatelju Marku Šarliji na savjetima i stručnoj pomoći prilikom izrade diplomskog rada.

Na kraju, srdačno se zahvaljujem cijenjenom mentoru doc. dr. sc. Mislavu Čehilu na svom pruženom vremenu koje je nesebično odvojio za pomoć pri izradi ovog diplomskog rada.

Tomislav Stanić



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: **Tomislav Stanić** Mat. br.: 0035184997

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model sustava ukapljenog naftnog plina u automobilu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of liquid petroleum gas automobile system**

Opis zadatka:

Kod automobila s naknadno ugrađenim sustavom ukapljenog naftnog plina tijekom zimskog razdoblja često se događa da je tlak plina u isparivaču niži od potrebnog. Takvo stanje je posebno izraženo kada je spremnik goriva gotovo prazan te pri većim opterećenjima motora. Kako bi se objasnilo takvo ponašanje potrebno je napraviti matematički model koji će kao rezultat davati vremensku ovisnost tlaka plina u isparivaču o vanjskoj temperaturi, sastavu plina te protoku goriva odnosno opterećenju motora. Matematičkim modelom potrebno je opisati spremnik goriva, isparivač te cjevovod koji ih povezuje.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:
13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:
19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	7
1.1. Svojstva UNP-a	7
1.2. Kemijska i fizikalna svojstva UNP-a	8
1.3. Plin u svijetu i u Hrvatskoj	10
2. SUSTAV UNP-a ZA POGON VOZILA	12
2.1. Uređaji i oprema za pogon vozila plinom	13
2.2. Zašto ugraditi plin u vozilo	15
2.3. Ekološki aspekti primjene UNP-a	17
2.4. Sigurnost prilikom korištenja UNP-a	18
3. KOMPONENTE UNP SUSTAVA U AUTOMOBILU	19
3.1. Spremnik UNP-a	19
3.2. Dijelovi spremnika	20
3.3. Cjevovod i priprema plina	22
3.4. Isparivač i regulacija	23
4. MATEMATIČKI MODEL UNP SUSTAVA	25
4.1. Osnovne pretpostavke modela	25
4.2. Matematički model isparivača voda/propan	25
4.3. Učinak isparivača	28
4.4. Matematički model spremnika	30
5. SIMULACIJA	32
5.1. Računalni alati	32
5.2. Početni uvjeti	32
5.3. SIMULINK model	32
5.4. Rezultati simulacije za spremnik	33
5.4.1. Prazni hod	33
5.4.2. 50% opterećenja	35
5.4.3. 80% opterećenja	37
5.5. Rezultati simulacije za isparivač	40
5.5.1. Prazni hod	40
5.5.2. 50% opterećenja	43
5.5.3. 80% opterećenja	46
5.6. Interpretacija rezultata simulacije	50
6. ZAKLJUČAK	52
LITERATURA	54
Dodatak A	55

POPIS SLIKA

Slika 1.	Primjer dijagrama stanja	10
Slika 2.	Naljepnica za označavanje vozila s pogonom na UNP	13
Slika 3.	Instalacija UNP-a u automobilu	14
Slika 4.	Karakteristrike ispušnih plinova vozila na UNP	17
Slika 5.	Prikaz autoplinske instalacije	19
Slika 6.	Cilindrični i toroidalni spremnik za UNP	20
Slika 7.	Prikaz multiventila za UNP	21
Slika 8.	Različite izvedbe priključka za punjenje spremnika	22
Slika 9.	Različite izvedbe filtera UNP-a	23
Slika 10.	Isparivač UNP-a zajedno s regulatorom tlaka	24
Slika 11.	Komponente UNP sustava	24
Slika 12.	Entalpija – tlak dijagram za UNP	26
Slika 13.	Poprečni presjek isparivača	26
Slika 14.	Volumni protok rashladne tekućine kroz zasebne krugove	28
Slika 15.	Dijagram ovisnosti snage motora o masenom protoku UNP-a	29
Slika 16.	Simulik model za usisavanje parne faze propana	31
Slika 17.	Simulink model za usisavanje kapljevite faze propana	31
Slika 18.	Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 1 g/s	33
Slika 19.	Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 1 g/s	34
Slika 20.	Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 1 g/s	34
Slika 21.	Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 1 g/s	35
Slika 22.	Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 5 g/s	35
Slika 23.	Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 5 g/s	36
Slika 24.	Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 5 g/s	36
Slika 25.	Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 5 g/s	37
Slika 26.	Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 8 g/s	37
Slika 27.	Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 8 g/s	38
Slika 28.	Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 8 g/s	38
Slika 29.	Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 8 g/s	39
Slika 30.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=0,8152$	40
Slika 31.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,1128$	41
Slika 32.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,2144$	41
Slika 33.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,0732$	42
Slika 34.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,1849$	42
Slika 35.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,2868$	43
Slika 36.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=0,7968$	43
Slika 37.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=0,9638$	44
Slika 38.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=1,0889$	44
Slika 39.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=0,884$	45
Slika 40.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=1,0569$	45
Slika 41.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=1,1547$	46
Slika 42.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,7950$	46
Slika 43.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,8995$	47
Slika 44.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,994$	47
Slika 45.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,8366$	48
Slika 46.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,9519$	48
Slika 47.	Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=1,0466$	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovna svojstva trgovačkog propana i butana.....	9
Tablica 2. Statistika auto-plina u Hrvatskoj.....	11
Tablica 3. Postojeće stanje infrastrukture auto-plina Hrvatskoj	11
Tablica 4. Karakteristike plinovitih goriva	16
Tablica 5. Usporedba emisije ispušnih plinova UNP vozila u odnosu na benzin i diesel	18

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Φ	kW	Toplinska tok izmjenjivača
x	-	Sadržaj pare u isparivaču
$Q_{izgaranja}$	kJ	Toplinska energija iz propana
m_w	kg/s	Maseni protok rashladne tekućine
m_p	kg/s	Maseni protok UNP-a
c_p	kJ/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet propana
c_w	kJ/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet rashladne tekućine
T_{w_ul}	°C	Temperatura vode na ulazu u isparivač
T_{w_izl}	°C	Temperatura vode na izlazu iz isparivača
T_{p_ul}	°C	Temperatura propana- na ulazu u isparivač
T_{p_izl}	°C	Temperatura propana- na izlazu iz isparivača
ρ_w	kg/m ³	Gustoća vode
ρ_k	kg/m ³	Gustoća kapljevite faze propana
ρ_p	kg/m ³	Gustoća parne faze propana
α_{isp}	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline isparavanja
α_w	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline na strani vode
k	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline
A	m ²	Površina izmjene topline izmjenjivača
λ	W/(mK)	Toplinska provodljivost stijenke
δ	mm	Debljina stijenke
p_{isp}	bar	Tlak isparavanja
H_{w_izl}	kJ/kg	Entalpija rashladne vode na izlasku iz isparivača
H_{w_ul}	kJ/kg	Entalpija rashladne vode na ulasku u isparivač
H_{p_ul}	kJ/kg	Entalpija propana na ulasku u isparivač
H_{p_izl}	kJ/kg	Entalpija propana na izlasku iz isparivača
M	kg	Masa UNP-a u spremniku
η	-	Izentropska iskoristivost MSUI
P	kW	Snaga MSUI
$\Delta T_{m,isp}$	°C	Srednja logaritamska razlika temperatura u isparivaču

SAŽETAK

Na početku ovog rada opisan je sustav UNP-a u automobilu i navedene su njegove primjene. Prikazana je izvedba spremnika i isparivača UNP-a u automobilu, zajedno sa karakteristikama i radnim parametrima. Izveden je diskretizirani matematički model isparivača, koji služi kao temelj za simulaciju. Uz isparivač izveden je i matematički model spremnika. Nakon izvoda, objašnjeni su računalni alati i pripreme za izvođenje simulacije. Rezultati simulacije su temperaturni profili ogrjevnog medija (voda) i radnog medija (UNP-a) koji se uspostavljaju u isparivaču.

Ključne riječi: ukapljeni naftni plin, UNP, matematički model, plinski spremnik propana, isparivač

SUMMARY

At the beginning of this paper, the LPG system in the car is described and its applications. The tank and LPG evaporator performance are shown along with the characteristics and working parameters. A discrete mathematical model of evaporator was developed, which serves as the basis for simulation. Along with the evaporator, mathematical model of LPG tank was also derived. After the statement, computer tools and preparations for simulation were explained. The simulation results are the temperature profiles of heating media (water) and working medium (LPG) that are established in the evaporator.

Keywords: Liquefied petroleum gas, LPG, mathematical model, propane tank, evaporator

1. UVOD

Ukapljeni naftni plin (UNP) je smjesa zasićenih ugljikovodika propana i butana te raznih primjesa, ponajviše propena, butena, etana i etena u različitim omjerima. Pri normalnim je uvjetima plinovit i teži od zraka, a ukapljuje se pri prilično niskim tlakovima. Proizvodi se iz nafte i naftnih plinova rafinerijskom preradom ili pri obradi sirovog prirodnog plina. Prevozi se u kapljevitom, a koristi u plinovitom stanju. UNP ima najčešću primjenu kao zamjensko gorivo ostalim energentima u kućanstvima, tvornicama (na područjima u kojima nije riješen sustav opskrbe plinom) te u prijevozu gdje služi kao odlična alternativa skupljim gorivima (benzinu).

1.1. Svojstva UNP-a

Ukapljeni naftni plin (skraćeno UNP) je smjesa zasićenih ugljikovodika propana i butana (njegovih izomera) te raznih primjesa, ponajviše propena, butena, etana i etena u različitim omjerima. Pri normalnim je uvjetima plinovit i teži od zraka, a ukapljuje se pri prilično niskim tlakovima (od 1,7 do 7,5 bar). Proizvodi se iz nafte i naftnih plinova rafinerijskom preradom ili pri obradi sirovog prirodnog plina. Vrlo je prikladan za prijevoz, skladištenje i primjenu. Skladišti se i prevozi u kapljevitom, a koristi u plinovitom stanju. Najčešće se koristi u kućanstvima, kao gorivo u sustavima grijanja i pripreme potrošne tople vode te za pripremu hrane, čest je i u gospodarstvu (gorivo u poljoprivrednim i manjim industrijskim pogonima, u ugostiteljstvu i građevinarstvu), a za pogon motornih vozila koristi se još od 1920. godine. Neotrovan je, bez boje i mirisa (stoga mu se pri proizvodnji dodaje odorant, za otkrivanje u slučaju propuštanja instalacije), ima uske, ali niske granice eksplozivnosti, a kako je teži od zraka iz zatvorenih prostora sporo otječe u atmosferu.

Prema podrijetlu i svojstvima stvoren je njegov naziv u brojnim jezicima, u Hrvatskoj se UNP (ukapljeni naftni plin), a u engleskom govornom području (i stoga u međunarodnoj komunikaciji) koristi se izraz LPG (liquified petroleum gas).

1.2. Kemijska i fizikalna svojstva UNP-a

Sastav ukapljenog naftnog plina propisuje DIN 51 622 prema kojoj on nastaje ukapljivanjem propana, butana ili mješavine propana i butana u sastavu:

- propan ili propen (pretežno propan) s najmanje 95% masenog udjela, a ostatak mogu činiti etan, eten, butan ili buten
- butan ili buten (pretežno butan) s najmanje 95% masenog udjela, a ostatak mogu činiti propan, propen, pentan ili penten.

Trgovački UNP se sastoji od smjese propana i butana u omjeru 35:65, a ovisno o primjeni ukapljenog naftnog plina ti se odnosi mogu mijenjati.

Općenito govoreći, UNP ima sljedeće prednosti:

- visoki stupanj iskorištenja - kod nekih postrojenja i do 95%
- mogućnost kombinacije s ostalim gorivima
- lako održavanje i sigurno rukovanje plinskim uređajima
- povoljna cijena

Svojstva komercijalnog UNP-a su:

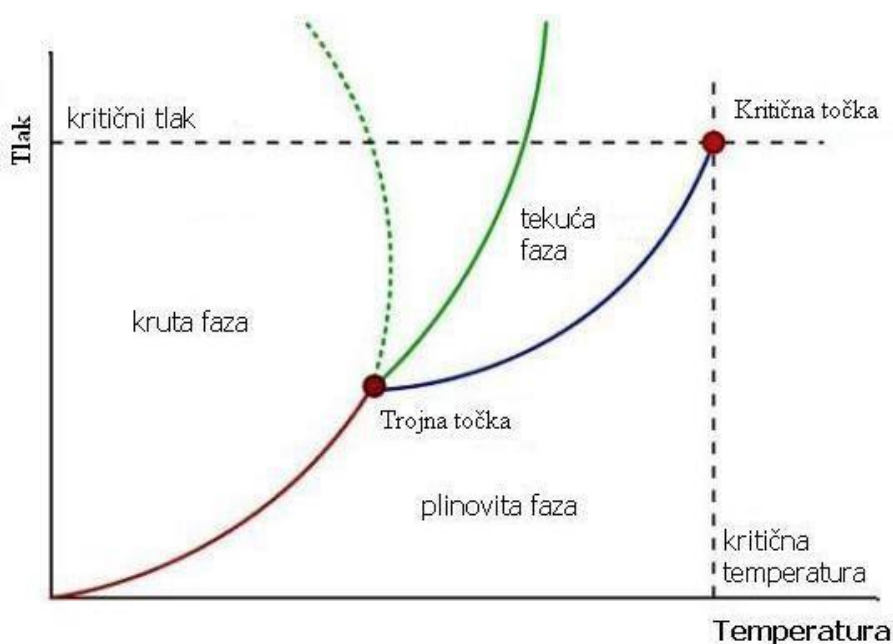
- komercijalni proban butan plin je smjesa bez boje, okusa i mirisa
- dvostruko teži od zraka (pada i koncentrira se pri tlu),
- ODORIZIRAN etil merkaptanom, da bi se njegova prisutnost u zraku mogla osjetiti njuhom
- nije otrovan, ali kod prevelike koncentracije smanjuje količine kisika u prostoriji (hipoksija)
- pri atmosferskog tlaku i sobnoj temperaturi propan-butan plin prelazi u plinovitom stanju
- zbog lakšeg transporta i učinkovitijeg skladištenja ukapljuje se pod povećanim tlakom, već od 1,7 bara i temperaturama od -10 °C te se pohranjuje u namjenske posude ili spremnike

Tablica 1. Osnovna svojstva trgovačkog propana i butana

Svojstvo	Propan	Butan
Gustoća kapljevine pri 15°C, kg/dm ³	≥ 0,502	≥ 0,559
Tlak zasićenja p_z , bar:		
- pri 15°C	7,5	1,7
- pri 50°C	11,5 – 19,3	6,9
Donja ogrjevna vrijednost H_d pri 15°C:		
- MJ/kg (kWh/kg)	46,0 (12,79)	45,6 (12,66)
- MJ/m ³ (kWh/m ³)	85,3 (23,7)	109,6 (30,45)
Volumni udio u dimnim plinovima		
Pri potpunom izgaranju, %:		
- ugljičnog dioksida (CO ₂)	13,7	14
- dušika (N ₂)	86,3	86
Najviša temperatura plamena na zraku, °C	1915	1920
Maseni udio sumpora, %	≤ 0,005	≤ 0,005

Govoreći o ukapljenom naftnom plinu, razlikuju se dva stanja: kapljevito i plinovito u tri faze: kapljevita, parovita i plinovita. Pojam „stanje“ pritom je vezan uz pojavnost (tj. agregatno stanje) tvari, a „faza“ uz ponašanje plina u (zatvorenom) spremniku, pri ravnotežnim uvjetima. Za prelazak iz jedne u drugu fazu, odnosno stanje, nužno je dovođenje topline. Tako se na temperaturi okolice u zatvorenom spremniku pod tlakom uvijek nalaze dvije faze: kapljevita i parovita u međusobnoj ravnoteži, pri čemu je parovita faza (zasićena para) nastala uzimanjem topline iz neposredne okolice. U stanju ravnoteže ne dolazi ni do isparavanja kapljevite niti do ukapljivanja parovite faze, a do promjena može doći povišenjem ili sniženjem temperature (tj. dovođenjem ili odvođenjem topline) ili tlaka.

Plinska faza nastaje daljnjim dovođenjem topline (npr. u isprivaču), a njezine su osobine različite od parovite faze.



Slika 1. Primjer dijagrama stanja

1.3. Plin u svijetu i u Hrvatskoj

Procjenjuje se da trenutno u svijetu ima preko 9 milijuna vozila sa pogonom na autoplina i taj trend raste po stopi od 12-15 % godišnje. Zahvaljujući svojim ekološkim, ekonomskim i sigurnosnim prednostima UNP danas predstavlja jedno od vodećih alternativnih goriva današnjice.

U nekim Europskim zemljama, gdje se plin nije koristio kao alternativno gorivo, nakon brojnih ekonomskih studija i studija utjecaja na okoliš, započinje intenzivni rast broja automobila s pogonom na plin. Sve većim zahtjevima za očuvanjem prirode i rigoroznijim normama u odnosu na koncentraciju štetnih plinova u zraku, autoplina bi trebao postati jednim od primarnih goriva u autoindustriji.

Hrvatska je po ubrzanju ekspanziji korištenja autoplina na četvrtom mjestu na svijetu. Naime, u 2002. taj je sve popularniji energent koristilo oko 10.000 vozila, a sada već više od 62.000. Takvo naglo povećanje objašnjeno je činjenicom da je riječ o gorivu otprilike dvostruko jeftinijem od benzina te sve većem brojem punionica i autoservisa u kojima se ugrađuju plinski uređaji. Zahvaljujući razvoju te djelatnosti u zadnje tri godine otvoreno je oko 1500 radnih mjesta te znatno smanjeno onečišćenje okoliša ispušnim plinovima iz vozila. U Republici Hrvatskoj značajnim poticajem može se smatrati oslobađanje od „Eko-testa“ vozila na pogon plinom.

Također, kao poticaj razvoju sustava punionica ne treba zaboraviti da se Hrvatska, kao turistička zemlja, nalazi u susjedstvu Italije, najvećeg europskog tržišta UNP-a za pogon motornih vozila s preko dva milijun vozila na UNP. Konačno, uz odsustvo ikakvih poticajnih mjera, porast cijene motornog benzina te njene oscilacije, uz znatno nižu cijenu UNP-a kao motornog goriva, ipak predstavlja kakav takav dodatni poticaj.

Tablica 2. Statistika auto-plina u Hrvatskoj

HRVATSKA	Prodano UNP-a [t]	Broj UNP vozila	Broj UNP punionica
2002.	22000	30000	93
2015.	48000	62000	334
povećanje	118%	106%	259%

Tablica 3. Postojeće stanje infrastrukture auto-plina Hrvatskoj

Vozila na UNP	Punionica za UNP	UNP servisi	Broj vozila na jednu punionicu	Ugradnja UNP-a po jednom servisu	Broj stanica za tehnički pregled vozila na UNP
62000	334	320	186	194	161

On se stoga, zbog svojih svojstava i prednosti, sve više afirmira kao jedno od vodećih alternativnih goriva današnjice. Ukapljeni se naftni plin distribuira u malim bocama ili malim spremnicima te je vrlo prikladan za opskrbu obiteljskih kuća, stambenih zgrada, manjih naselja, ali i manjih tvorničkih pogona, ugostiteljskih objekata, poljoprivrednih gospodarstava ili kao alternativno gorivo za pogon automobila.

Svakako treba očekivati značajan porast proizvodnje i potrošnje, ne samo zato što se radi o ekološki prihvatljivom energentu, već i zbog povoljne cijene. Prema svemu navedenom, lako se može zaključiti kako je ukapljeni naftni plin jedan od glavnih energenata za 21. stoljeće.

2. SUSTAV UNP-a ZA POGON VOZILA

Ugradnja spremnika, uređaja i opreme za pogon motornih vozila UNP-om smatra se preinakom vozila koje smiju izvoditi samo ovlaštene servisne radionice koje o izvedenim radovima izdaju odgovarajuću izjavu čiji sadržaj utvrđuje ovlaštena organizacija. Uređaji i oprema moraju biti ugrađeni u granicama dimenzija vozila u koje su ugrađeni. Nakon ugradnje ispituju se nepropusnost i osovinsko opterećenje. Prilikom ugradnje spremnika u vozila treba voditi računa o osnovnim mjerama sigurnosti:

- ispušni plinovi motora ne smiju se usmjeriti prema spremniku
- plin koji bi mogao istjecati iz spremnika, opreme ili spojeva ne smije biti usmjeren prema ispušnom sustavu, motoru, putničkom ili prtljažnom prostoru
- spremnik se mora zaštititi od djelovanja sunčevih zraka
- spremnik se mora mehanički zaštititi od vanjskih utjecaja (npr. udaraca) ako se ugrađuje u pod vozila
- spremnik se ne smije ugrađivati u predjelu motora ni ispred prednje osovine vozila
- prilikom ugradnje u stražnjem dijelu najmanja udaljenost od stražnjeg branika iznosi 200 mm, a za pričvršćenje služe najmanje dva držača
- progibi, uvijanja i vibracije vozila ne smiju imati nikakav nepovoljan utjecaj na dijelove uređaja i opreme za pogon vozila kao i dijelove njihova pričvršćenja
- pričvršćenja ne smiju biti izvedena s oštrim bridovima i ne smiju biti takva da mogu oštetiti dijelove uređaja i opreme

Uz uobičajene isprave vozila potrebno je imati i tehničku uputu u kojoj slijedi:

- punjenje spremnika dopušteno je samo ukapljenim naftnim plinom na za to predviđenim mjestima (punionicama), kad je motor isključen i kad u vozilu nema osoba i ako nije prekoračena valjanost redovnog tehničkog pregleda vozila i spremnika
- spremnik se ne smije puniti više od 80% volumena
- nakon punjenja priključak za punjenje mora se nepropusno zatvoriti i zaštititi poklopcem
- ispravnost sigurnosnog ventila može obavljati samo ovlaštena osoba
- vozilo se ne smije ostavljati u prostoriji bez prozračivanja, kao što je posve zatvorena podzemna, podrumaska garaža, a u njegovoj blizini ne smije biti otvorenog plamena ili izvora iskrenja

Svako vozilo s pogonom na UNP mora se označiti naljepnicom koja se postavlja na vjetrobransko ili stražnje staklo vozila.

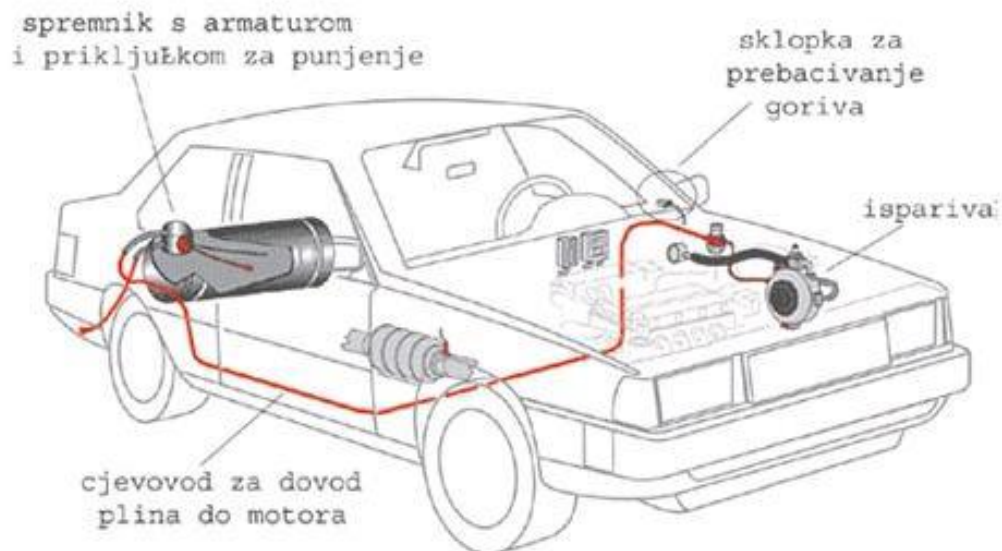


Slika 2. Naljepnica za označavanje vozila s pogonom na UNP

2.1. Uređaji i oprema za pogon vozila plinom

Uređajima i opremom za pogon motornih vozila plinom smatraju se:

1. spremnik plina
2. armatura spremnika plina
3. pročišćivač plina
4. isparivač plina (za UNP)
5. regulator tlaka
6. plinski ventil
7. priključak za pražnjenje (samo za SPP)
8. ventil tekućega goriva (benzina ili dizelskoga goriva)
9. vodovi za plin visokoga tlaka
10. vodovi za plin niskoga tlaka
11. vodovi za sredstva za grijanje
12. električni uređaji i instalacije



Slika 3. Instalacija UNP-a u automobilu

Svi materijali moraju zadovoljavati slijedeće: moraju biti otporni na djelovanje plina, ne smiju mijenjati kemijska svojstva plina i koji u dodiru s plinom nisu zapaljivi.

Prema UN / ECE Pravilniku serije 67-01, minimalni skup opreme za ugradnju u motorno vozilo s alternativnim pogonom na UNP autoplina čini:

- spremnik plina
- armatura priključena na spremnik
- isparivač / regulator tlaka plina
- ventil za prekid toka UNP autoplina
- uređaj za ubrizgavanje plina ili ubrizgavač ili mješač plina i zraka
- uređaj za doziranje plina odvojen ili kombiniran s uređajem za ubrizgavanje plina
- fleksibilne cijevi
- uređaj za punjenje
- protupovratni ventil
- ventil za rasterećenje od visokog tlaka u cijevima
- filter
- senzor tlaka ili temperature
- servisna spojnica
- elektronska upravljačka jedinica
- rampa za ubrizgavanje plina
- uređaji za rasterećenje od visokog tlaka

2.2. Zašto ugraditi plin u vozilo

Analizirajući prednosti primjene auto-plina u vozilima treba se, kod izrade proračuna troškova, voditi računa i da je potrošnja auto plina otprilike 10 % volumno veća od potrošnje benzina, a ekonomičnost se ogleda u gotovo 60 % manjoj cijeni goriva. Dakle, prednosti primjene auto-plina su:

- ušteda na troškovima goriva više od 60 %,
- ušteda na troškovima održavanja vozila (rjeđe se mijenja ulje i sl.)
- vozila s ugrađenim UNP sistemom ne podliježe EKO-testu,
- s ugrađenim auto-plin uređajem polovno vozilo na tržištu ima veću cijenu (jer koristi jeftinije gorivo)
- nema mogućnosti prosipanja goriva prilikom točenja i neugodnih mirisa,
- auto-plin spremnici su svojim konstrukcijskim rješenjem, kvalitetom materijala i načinom izrade kao i kontrolnim sistemom, sigurniji i otporniji na fizičko djelovanje (sudar) od benzinskih spremnika,
- ne može se slučajno natočiti benzin ili diesel jer otvor crijeva ili vrh štrcaljke točno odgovara otvoru za punjenje na vozilu,
- s ugrađenim auto-plin uređajem postoji mogućnost biranja pogonskog goriva, pritiskom na gumb, benzin ili plin.

Autoplin zbog svojih karakteristika ima izuzetno povoljan utjecaj na motor:

- mirniji i tiši rad motora, a vijek trajanja motora povećava se za oko 30 %;
- udvostručuje se vijek katalizatora i lambda sonde, produžen je vijek ispušnog sistema
- veća je trajnost ulja u motoru, duže vrijeme ulje zadržava vlastite karakteristike jer se ne razgrađuje benzinom, pa su samim tim i troškovi redovnog održavanja smanjeni;
- ne dopušta se stvaranje korozije koja nastaje prisutnošću aditiva, koji se dodaju benzinu radi poboljšavanja njegovih svojstava;
- nema dima i gareži, manje HC spojeva (čade) i otrovnih spojeva benzena i butadiena;
- plinski uređaj s jednog automobila može se prebaciti na drugi, pod uvjetom da automobili imaju isti sistem napajanja gorivom ili uz malu modifikaciju
- manja mogućnost od eksplozije, jer zahvaljujući zaštiti na više nivoa, cijeli sistem je sigurniji u odnosu na incidentno isticanje plina.

Tablica 4. Karakteristike plinovitih goriva

Vrsta spremnika	TEKUĆI PLINOVI			PERMANENTNI PLINOVI		
	Propan	Butan	Propan/Butan 50:50	Motorni metan	Gradski plin	Zemni/prirodni plin
	Boce za tekući plin (probni tlak ~ 25 bar)			Visokotlačne boce (probni tlak cca 300 bar)		
Gustoća plina (15°C, 1 bar) kg/m ³	2,011	2,709	/	0,915	0,800	0,753
Gustoća tekućine (15°C, p > 7,5 bar) kg/m ³	507	585	540	/	/	/
H _d kJ/m ³	91.025	118.356	108.700	41.860	16.000	37.000
H _d kJ/kg	46.340	45.710	46.060	45.800	26.300	/
Oktanski broj (IOB)	-125	-95	>100	>100	-90	105

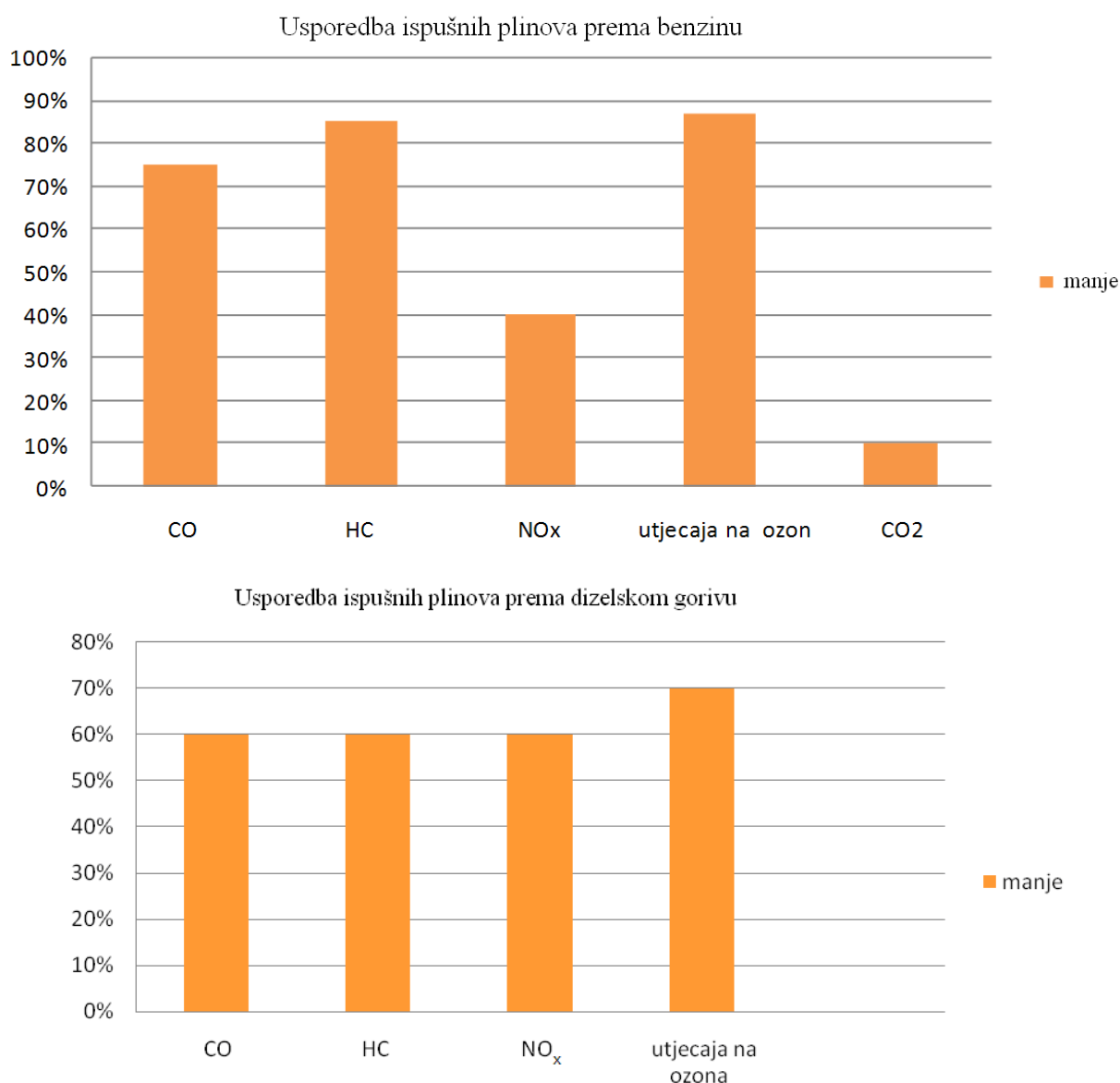
Osnovni nedostaci korištenja UNP-a za pogon vozila u odnosu na konvencionalna goriva:

- cijena ugradnje UNP sustava (3 000 – 14 000 kn) i potreban broj km za povrat investicije
- potrebno određeno vrijeme čekanja na ugradnju zbog velike potražnje
- određeni broj nestručnih servisera, bez kvalitetne obuke, pripreme i znanja
- opasnost od ugradnje dijelova lošije kvalitete zbog manje cijene i dodatne zarade odstrane montera
- potrebu obavljanje dodatnih tehničkih pregleda i plaćanje atesta sistema
- u slučaju ugradnje većeg spremnika dolazi do gubitka prtljažnog prostora
- dolazi do određenog smanjenja maksimalne snage i brzine vozila pogonjenog UNP-om od 4 do 7 % uz povećanje potrošnje od oko 10 %
- zabrana parkiranja u podzemnim i zatvorenim garažama u pojedinim zemljama
- vozila na plin se uglavnom ne proizvode serijski nego se plinski pogon mora posebno naručiti.

2.3. Ekološki aspekti primjene UNP-a

UNP kao energent je vrlo dobar s ekološkog stajališta i ima sve veću učinkovitost u očuvanju ozonskog omotača. Direktnim izgaranjem bez dima, pepela, čađe i neugodna mirisa, te odsutnosti sumpornih spojeva, u odnosu na ostala fosilna goriva (osim prirodnog plina), UNP doprinosi u smanjenje pojava kiselih kiša i ostalih produkata emisije štetnih plinova, kako na području energetskeg rješavanja objekata tako i prometa.

Informativna usporedba emisije ispušnih plinova tijekom vožnje UNP vozila u odnosu na benzin i dizel prikazana je u Tablici 5.



Slika 4. Karakteristrike ispušnih plinova vozila na UNP

Tablica 5. Usporedba emisije ispušnih plinova UNP vozila u odnosu na benzin i diesel

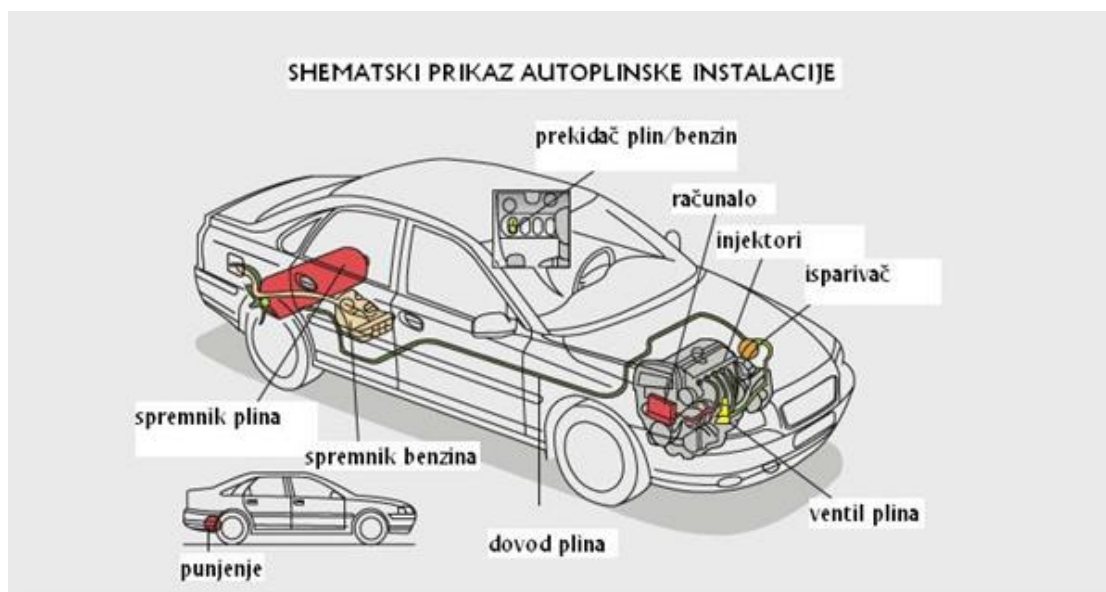
Usporedba prema benzinu	Usporedba prema dieselu
75% manje CO (ugljičnog monoksida)	90% manje krutih čestica
85% manje ugljikovodika	90% manje NO (dušičnog oksida)
40% manje NO (dušičnog oksida)	70% manje utjecaja na oblikovanje ozona
87% manje utjecaja na oblikovanje ozona	60% manje CO (ugljičnog monoksida)
10% manje CO ₂ (ugljičnog dioksida)	

2.4. Sigurnost prilikom korištenja UNP-a

UNP ima najniže granice zapaljivosti od svih alternativnih goriva. Ako slučajno dođe do nekontroliranog istjecanja, tekući UNP brzo ispari. UNP se neće zapaliti dok izvor paljenja ne postigne temperaturu od najmanje 500 °C, što je povoljnije od benzina kod kojeg dolazi do zapaljenja pri dvostruko nižim temperaturama (220 - 260°C).

Spremnici autoplina koji se ugrađuju u vozila napravljeni su od čelika ili kompozitnih materijala i ispitani prema najstrožim standardima, radi osiguranja prilikom udara, eksplozije i požara. Suvremene instalacije ugrađene u vozila za pogon UNP-om opremljene su uređajima za osiguranje od visokih tlakova, pucanja cijevnih vodova, havarije vozila ili požara. Poput benzina i diesela, UNP je u tekućem stanju i spremnik vozila se puni preko pumpnog automata i pištolja za punjenje kroz savitljivo crijevo. Pumpa se automatski zaustavlja kada je spremnik napunjen na 80 % volumena, tako da nema opasnosti od prepunjivanja spremnika. Ne može se desiti da se u spremnik autoplina puni drugo gorivo zbog različitih priključnih otvora za punjenje. Kao za benzin i diesel, na armaturnoj ploči je montiran indikator količine autoplina u spremniku. Vozila na UNP koriste benzin i UNP iz odvojenih spremnika, tako da se automatski prelazi na drugo gorivo prilikom nestanka trenutno korištenog goriva, čime je vozilu osigurana duplo veće autonomija vožnje. Sigurnost opskrbe UNP-om svakodnevno se povećava izgradnjom novih punionica, bilo uz postojeće benzinske postaje ili kao zasebne punionice smještene na prikladnim mjestima za distribuciju UNP-a. Prema podacima Svjetskog udruženja za UNP u svijetu je instalirano oko 40.000 punionica autoplina, od kojih se oko 60 % nalazi u Europi.

3. KOMPONENTE UNP SUSTAVA U AUTOMOBILU



Slika 5. Prikaz autoplinske instalacije

3.1. Spremnik UNP-a

Spremnik za plin je osnovni dio plinskog sustava u vozilu. Kao posuda pod tlakom mora imati dopuštenje Državnog inspektorata-inspekcija posuda pod tlakom 8 bara prema članku 287. Zakona o sigurnosti prometa na cestama, pročišćeni tekst, NN 59/96). Na njemu se mora nalaziti oznaka na kojoj stoji:

- naziv proizvođača, tvornički broj i godina proizvodnje,
- volumen praznog spremnika u l (litrama),
- datum posljednjeg pregleda i ispitivanja te pečat ustanove koja je to provela,
- najveća dopuštena masa pri punjenju u kg (za UNP),
- najveći dopušteni tlak punjenja u MPa ili bar (za SPP).

Postoji nekoliko izvedbi spremnika za UNP, no prve dvije su osnovne:

- Cilindrični spremnici od 30 do 140 litara
- Toroidalni spremnici 30° od 33 do 96 litara
- Toroidalni spremnici 0° Full od 41 do 103 litre
- Specijalni spremnici



Slika 6. Cilindrični i toroidalni spremnik za UNP

3.2. Dijelovi spremnika

Glavni ventil – uređaj koji se postavlja izravno na spremnik i služi za njegovo zatvaranje kad treba spriječiti neželjeno istjecanje plina.

Sigurnosni uređaji - njihova uloga je da trebaju spriječiti stvaranje prekomjernog tlaka u spremniku te prekomjerno istjecanje plina iz spremnika (lom cijevi) kad je ventil otvoren U sigurnosne uređaje se ubrajaju:

- uređaj za ograničavanje protoka
- uređaj za osiguranje od prevelikog tlaka

Ograničavač protoka je sigurnosni uređaj koji pri lomu cijevi za odvod plina mora smanjiti količinu plina koja će istjecati na najviše 10% od najvećeg mogućeg protoka plina.

Uređaj za osiguranje protiv previsokog tlaka je uređaj koji mora u spremniku plina spriječiti stvaranje tlaka većeg od 2,5 MPa (25 bar), odnosno 3 MPa (30 bar) za uređaje koji se ugrađuju u vozilo poslije 1. siječnja 2001. godine, kod UNP-a i tlaka većeg od 30 MPa (300 bar) kod metana.

Uređaj protiv prekoračenja temperature ako temperatura sigurnosnih elemenata u ovom uređaju dosegne najviše $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ispušta plin iz spremnika u atmosferu

Priključak za pražnjenje svrha priključka je pražnjenje plina iz instalacija koje se nalaze iza ventila glavnog spremnika. Zabranjeno je ispuštanje u neposrednu okolinu.

Sigurnosni uređaji na armaturi spremnika plina i ventil spremnika plina mogu biti konstruirani i izvedeni tako da čine jednu cjelinu.



Slika 7. Prikaz multiventila za UNP

Zaštitno kućište armature spremnika plina mora spriječiti moguće propuštanje plina iz dijelova armature spremnika u prostor za vozača i putnike, uključujući i prtljažnik.

Priključak za punjenje spremnika je uređaj koji omogućuje punjenje spremnika plina samo određenom vrstom plina i pod određenim tlakom u skladu sa izvedbom spremnika plina. se spaja na vanjski sustav opskrbe plinom (punionica). Uz njega se postavlja protupovratni ventil **Nepovratni ventil** između priključka za punjenje i spremnika plina je uređaj koji mora spriječiti povratno strujanje plina iz spremnika plina prema priključku za punjenje.

Zaporni ventil koji se nalazi između priključka za punjenje i spremnika treba se izvest tako da onemogućava dotok plina do isparivača.



Slika 8. Različite izvedbe priključka za punjenje spremnika

3.3. Cjevovod i priprema plina

Pročistač plina služi za odvajanje nečistoća pri prolasku plina iz spremnika prema ostalim dijelovima sustava.

Vodovi svi dijelovi plinske instalacije u vozilu međusobno se povezuju visokotlačnim i niskotlačnim cijevima. Visokotlačne su od priključka za punjenje do spremnika te od spremnika do isparivača. Niskotlačni od tlačnog regulatora do motora. Visokotlačne cijevi su od bakra ili čelika, a niskotlačni od čelika ili mjedi.



Slika 9. Različite izvedbe filtera UNP-a

3.4. Isparivač i regulacija

Isparivač služi za isparavanje UNP-a, odnosno prelaz iz kapljevito u plinovito stanje pod utjecajem topline.

Regulator tlaka služi za smanjivanje tlaka plina u spremniku na vrijednost potrebnu za stvaranje smjese sa zrakom. Kao regulatori se smiju koristiti samo uređaji s membranom.

Plinski ventil prekida dovod plina iz spremnika u isparivač i tlačni regulator kad motor ne radi, kada se plin ne koristi.

Prekidač za izbor vrste goriva

U vozilu se nalazi i prekidač na upravljačkoj ploči koji služi za prebacivanje pogona s plina na neko drugo gorivo.

Vodovi sredstva za grijanje svrha vodova je da povezuju isparivač i regulator sa sustavom za hlađenje motora ili nekim drugim izvorom topline u vozilu. Sredstvo za grijanje (u pravilu rashladno sredstvo motora) služi za dovođenje topline potrebne za promjenu agregatnog stanja plina.



Slika 10. Isparivač UNP-a zajedno s regulatorom tlaka



Slika 11. Komponente UNP sustava

4. MATEMATIČKI MODEL UNP SUSTAVA

Matematički model sustava se izvodi postavljanjem osnovnih zakona očuvanja na elemente sustava. U ovome slučaju postaviti će se zakoni očuvanja mase i energije na sustav spremnika i izmjenjivača topline rashladna tekućina / propan (isparivač radne tvari).

4.1. Osnovne pretpostavke modela

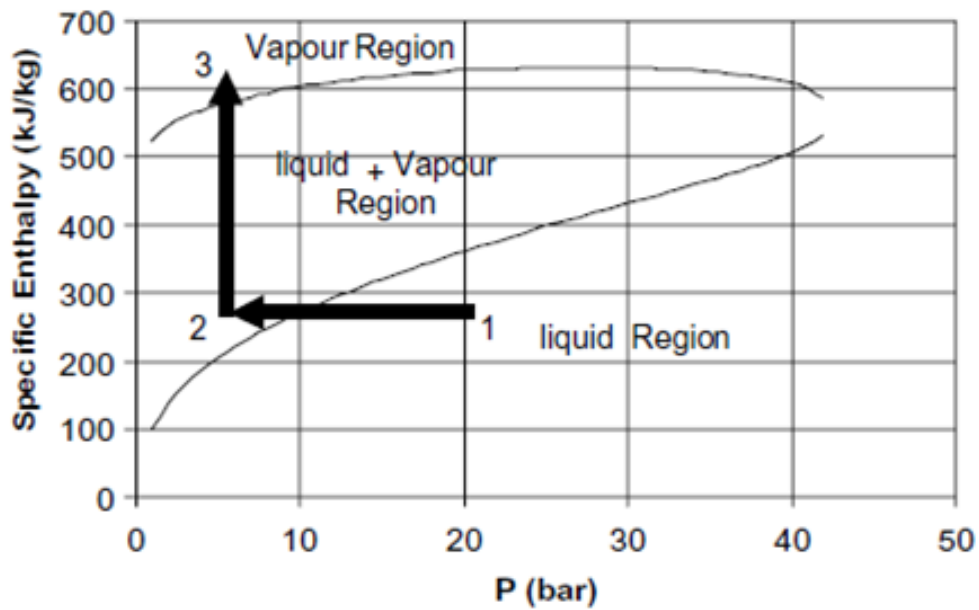
Dinamički model isparivača opisan je diferencijalnim jednadžbama akumulacije mase i energije, te algebarskim jednadžbama. Ovisnosti među nekim veličinama opisane su eksperimentalnim podacima iz tablica. Osnovne pretpostavke i pojednostavljenja prilikom izrade modela su:

- zanemarene bilance količine gibanja
- zanemareni svi toplinski i mehanički gubici
- koeficijenti prijelaza topline su konstantni
- temp. kapljevine u isparivaču jednaka je temperaturi zasićenja u svakom trenutku
- zanemareni svi temperaturni gradijenti u stijenci izmjenjivača topline
- specifični toplinski kapaciteti ogrjevnog medija i stijenske izmjenjivača su konstantni
- ogrjevni medij je nestlačiv

4.2. Matematički model isparivača voda/propan

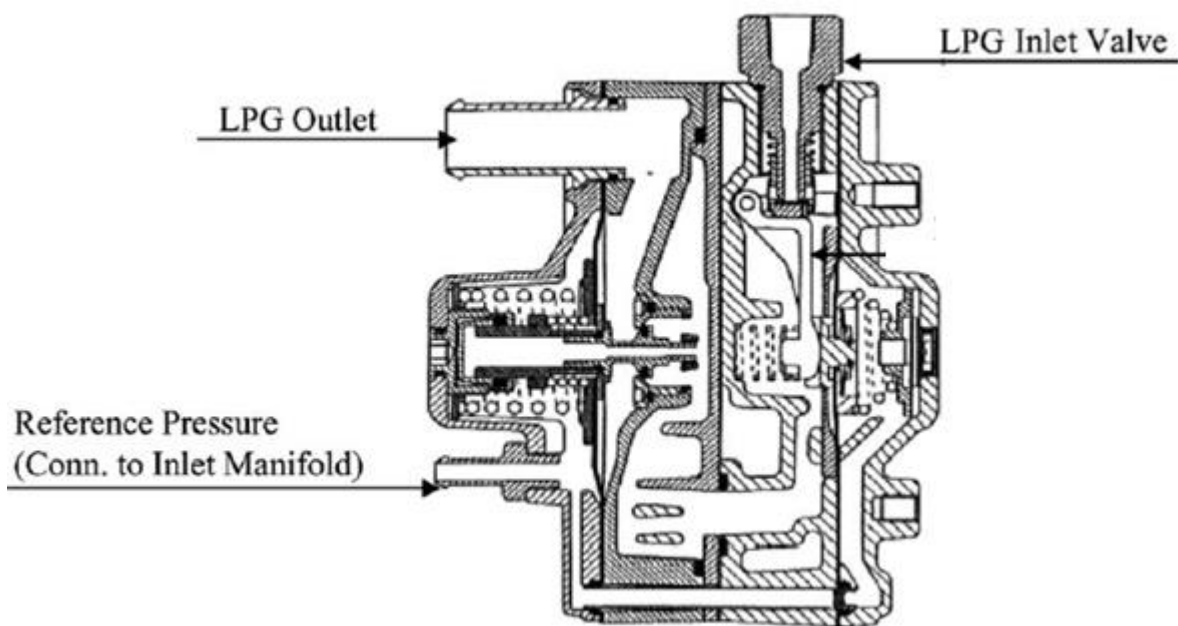
Funkcija isparivača je prenošenje toplinske energije na propan i smanjenje pritiska propana (tlaka spremnika) na znatno niži tlak sustava tako da propan isparava u pregrijanoj plinovitoj fazi. Ovaj postupak je prikazan na Slici. 12.

Slika. 12 prikazuje da prigušenje propana (postupak 1-2) proizvodi mokru smjesu, stoga je potrebna ulazna toplinska energija (postupak 2-3) kako bi se osiguralo da se propan pregrije. Isparavanje propana je potrebno za poboljšanje miješanja s zrakom prije ulaska u cilindre. Isparavanje započinje preko ulaznog ventila prikazanog na Slici. 13, koji je u suštini zaklopka, a plin se širi u zagrijanu komoru prvog stupnja (spojena na cirkulaciju rashladnog sredstva motora).



Slika 12. Entalpija – tlak dijagram za UNP

Iparivač je u dvostupanjskom dizajnu, pri čemu je prva faza odgovorna za primarno isparavanje i prijenos topline na gorivo, a druga faza za regulaciju tlaka plina tako da se postigne željeni tlak sustava.



Slika 13. Poprečni presjek isparivača

Slijedom toga, tlak u obje faze dinamički će se mijenjati, ali druga faza je dizajnirana tako da tlak propana na izlazu iz isparivača uvijek ima konstantnu razliku u odnosu na tlak u usisnoj grani ($\Delta p = \text{konst.}$). Objе faze su povezane s tlakom usisnog razvodnika tako da je tlak sustava (plin iz isparivača) ispravan za trenutаčno opterećenje motora. Odziv isparivača na brzo mijenjanje tlaka usisnog razvodnika može se koristiti kao izvedbeni kriterij.

Matematički model isparivača voda/propan je baziran na postavljanju bilance energije vode i propana.

$$\Phi_{isp} = m_w (h_{ulaz} - h_{izlaz}) \quad (1)$$

$$\Phi_{isp} = m_{propan} (h_{izlaz_isparivač} - h_{ulaz_isparivač}) \quad (2)$$

$$\Phi_{isp} = k_{isp} \cdot A_{isp} \cdot \Delta T_{m,isp} \quad (3)$$

Budući da su poznate samo ulazne temperature rashladnog sredstva (vode) i propana, potrebno je pretpostaviti jednu od izlaznih temperatura bilo vode ili propana na izlazu iz isparivač kako bi mogli krenuti u proračun. Budući da se radi o protustrujnom izmjenjivaču pretpostavljeno je da je izlazna temperatura vode za 10 °C veća od ulazne temperature propana i s tom pretpostavkom se krenulo u iterativni postupak rješavanja s ciljem postizanja ulazne temperature vode u isparivač. Ukoliko pretpostavljena temperatura vode na izlazu ne odgovara proračunom dobivenoj ulaznoj temperaturi vode, potrebno je povećati temperaturu na izlazu sve dok se proračunom ne zadovolji ulazna temperatura vode u isparivač.

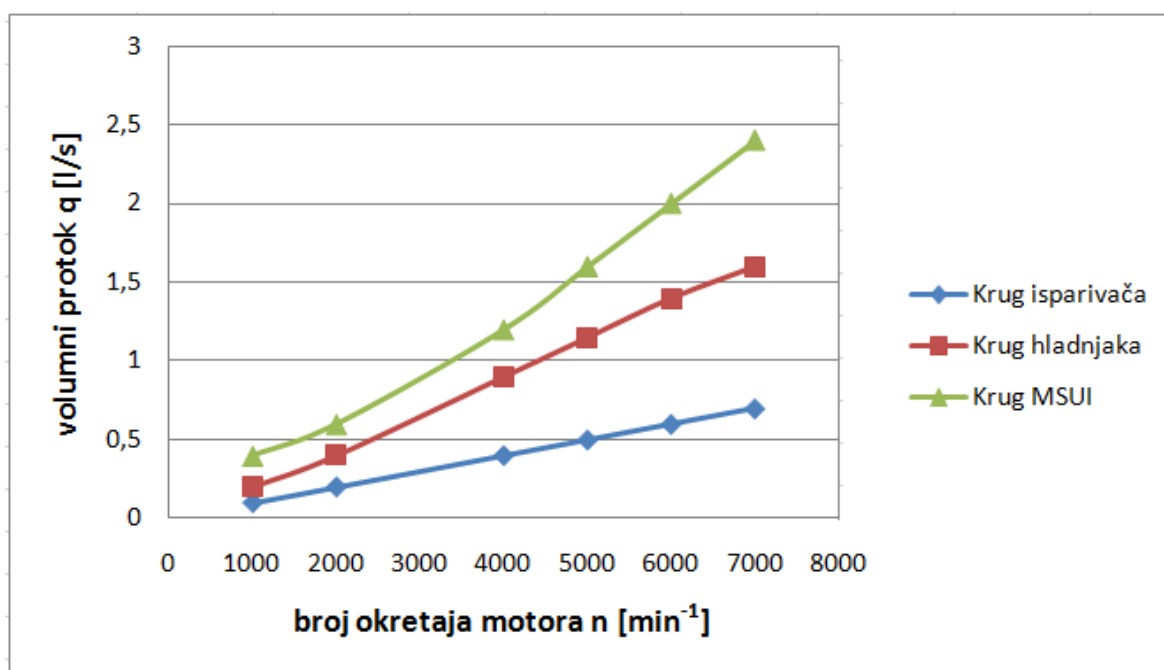
Isparivač je podijeljen na 100 segmenata, a sama geometrija isparivača je poznata i ona se kao parametar ne mijenja, pretpostavljen je koeficijent prolaza topline koji je u čitavom području uzet kao konstantan parametar.

Tlak propana na ulazu u isparivač isključivo je funkcija temperature okoliša koja se zadaje kao ulazni parametar. Maseni protok vode u isparivaču je isključivo funkcija broja okretaja motora i za isparivač se kreće u vrijednostima od 0,1 kg/s do 0,8 kg/s ovisno o stupnju opterećenja motora. Tlak vode je također ulazni parametar i konstantan je kroz krug isparivač i iznosi 1,2 bara. Podaci o masenom protoku i tlaku rashladnog sredstva kroz krug isparivača preuzeti su iz materijala Motori s unutarnjim izgaranjem.

Ispis koda skripte pomoću kojeg se računaju početni uvjeti sa svim potrebnim parametrima, toplinskim tablicama za propan i izračunima potrebnim za simulaciju nalazi se u dodatku A.

4.3. Učinkak isparivača

Analiziranje performansi prijenosa topline isparivača je važno jer razlika između temperature rashladne tekućine i temperature propana mora biti veća od minimalne temperature potrebne za prijenos toplinske energije za potrebne isparavanja propana. Slika. 14 prikazuje odnos volumnog protoka rashladnog sredstva kroz radijator, isparivač i krugove motora u sustavu hlađenja prema broju okretaja motora i pokazuje njihovu proporcionalnost.



Slika 14. Volumni protok rashladne tekućine kroz zasebne krugove

Ovi podaci su značajni jer se koriste za izračunavanje razlike temperature rashladnog sredstva kroz isparivač. Izračunata je toplinska energija potrebna za propan, maseni protok propana za raspon snage motora $5 < P < 160$ (kW). Maksimalna potrebna toplinska energija iz propana maksimalno 571,4 kW izračunato na sljedeći način:

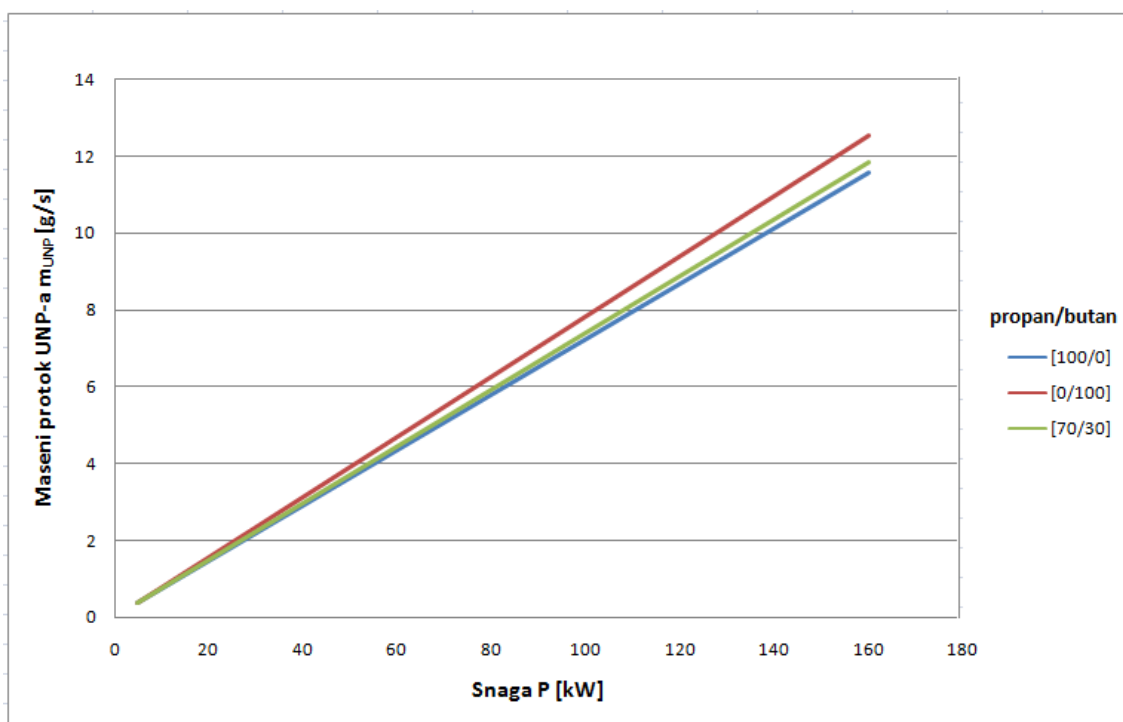
$$Q_{izgaranja} = \frac{P}{\eta}$$

Uz pretpostavku $\eta=0,28$ i $P_{\max}=160$ kW. Veličina te toplinske energije nužno je visoka zbog niske (pretpostavljene 28%) toplinske učinkovitosti η motora.

Fizičko značenje ovih podataka je da 571,4 kW toplinske energije treba razviti u izgaranju kako bi se postiglo maksimalna (160 kW) mehanička izlazna snaga na zamašnjaku motora.

Maseni protok UNP-a, zatim je izračunat na sljedeći način:

$$m_{UNP} = \frac{Q_{izgaranja}}{Hd_{UNP}}$$



Slika 15. Dijagram ovisnosti snage motora o masenom protoku UNP-a

Pregled dijagrama na Slici. 15 pokazuje da su P- m_{UNP} krivulje vrlo blizu, što ukazuje da smjesa goriva ima malo utjecaja na snagu motora. Treba imati na umu da se ova analiza temelji isključivo na kalorijskim vrijednostima glavnih komponenti UNP-a i ne uzima u obzir nikakve druge učinke.

4.4. Matematički model spremnika

Matematički model spremnika propana je baziran na postavljanju jednadžbi bilance mase i energije propana.

$$\frac{dM_k}{dt} = -m_w \quad (4)$$

$$M_k \cdot c_k \cdot \frac{dT_k}{dt} = \Phi_{isp} = k \cdot A_{spr} \cdot (T_{ok} - T_k) - m \cdot r \quad (5)$$

$$M_k \cdot c_k \cdot \frac{dT_k}{dt} = \Phi_{isp} = k \cdot A_{spr} \cdot (T_{ok} - T_k) - m \cdot r \cdot \frac{\rho_p}{\rho_k} \quad (6)$$

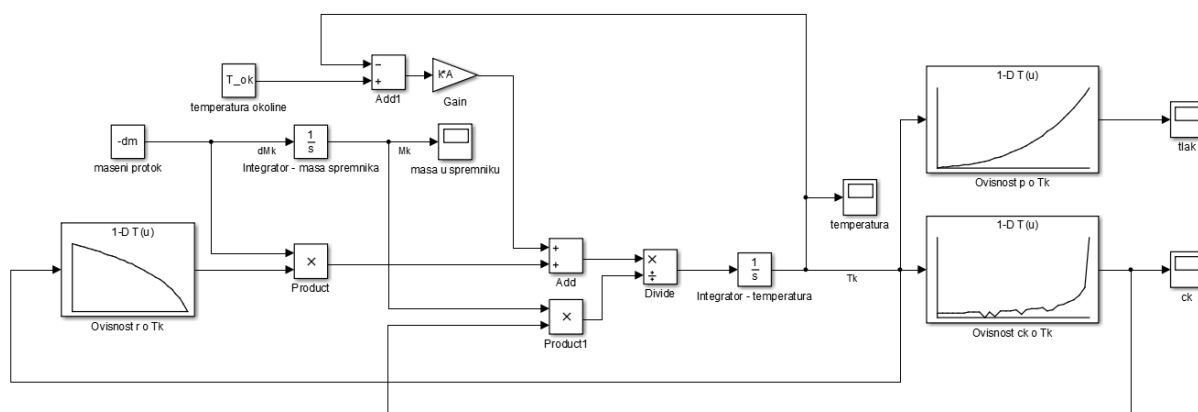
$$\rho_p, \rho_k, p, r = f(T_k) \quad (7)$$

Spremnik ima poznatu geometriju koja uz koeficijent prolaza topline predstavlja ulazni parametar. Maseni protok propana se kreće u odnosu od 0,36 g/s do 11,43 g/s i zadaje se također kao ulazni parametar. Za simulacije korišteni su maseni protoci propana pri opterećenju praznog hoda, 50% opterećenja i 80% opterećenja. Budući da tlak unutar spremnika ovisi isključivo o temperaturi okoliša ona je parametar koji diktira tlak zasićenja u spremniku, te je ujedno i ulazni parametar u simulaciji. Poznata je masa propana uz zadani volumen i gustoću medija prije početka pražnjenja spremnika. Iz jednadžbe (7) vidi se kako su tlak, latentna toplina isparavanja i gustoća funkcija temperature, te su kao takvi uzeti u obzir u simulaciji.

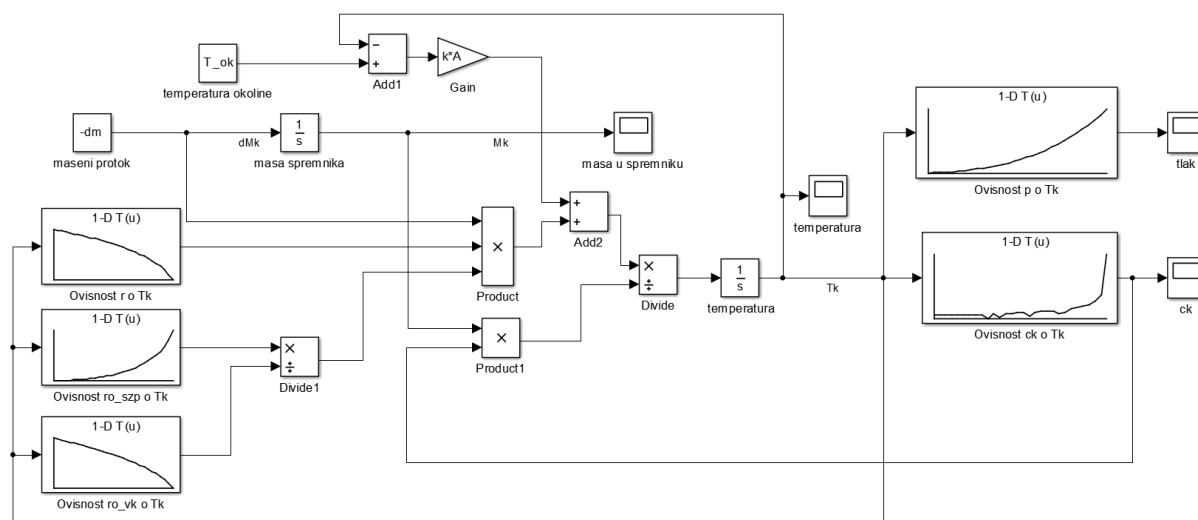
Simulacija je provedena za dva slučaja kada se iz spremnika izvlači kapljevita faza i kada se izvlači parna faza. Također simulacija je provedena za dvije različite temperature okoliša od 20°C i 0°C.

Razlike između promjene temperatura i tlaka u spremniku za pojedine slučajeve detaljno su prikazane u rezultatima simulacije.

Na sljedećim slikama prikazani su modeli izrađeni u simulinku posebno za izvlačenje kapljevite faze i posebno za izvlačenje parne faze. Iz slika modela uočava se razlika u izvedbi modela jer je prilikom izvlačenja kapljevine potrebno uzeti u obzir međusobni odnos gustoća kapljevine i pare, jer taj odnos utječe na maseni protok propana na izlazu iz spremnika. Gustoće su funkcija temperature kao tlak i specifična toplina isparavanja. Te ovisnosti su preuzete iz toplinskih tablica za propana iz alata REFPROP i pomoću 1-D Lookup tablica implementirane u model.



Slika 16. Simulink model za usisavanje parne faze propana



Slika 17. Simulink model za usisavanje kapljevite faze propana

5. SIMULACIJA

5.1. Računalni alati

U svrhu simulacije dinamike sustava korišten je program MATLAB zajedno sa SIMULINK-om. Tablični podaci za veličine stanja fluida preuzeti su iz programa REFPROP. Navedena dva programa mogu se povezati, pa se funkcije za dobivanje veličina stanja fluida mogu pozivati iz MATLAB-a. Veličine čije se vrijednosti ne mogu dobiti izravnim povezivanjem baze podataka REFPROP-a i MATLAB-a, mogu se dobiti na način da se iz REFPROP programa kopiraju podaci za potrebne veličine stanja, pa se naknadno učitaju u MATLAB .

Uz SIMULINK model, postoji i skripta, odnosno *m-file*. U skripti su zadani i izračunati svi parametri sustava.

5.2. Početni uvjeti

Prije provođenja simulacije potrebno je zadati početne uvjete za određeno stacionarno stanje. Na osnovu zadanih parametara, ostale veličine se izračunavaju. Početni uvjeti za diferencijalne jednadžbe u simulaciju ulaze kao *Initial condition* za *Integrator* blokove. Ispis koda skripte pomoću koje se računaju početni uvjeti sa svim potrebnim parametrima i izračunima potrebnim za simulaciju nalazi se u dodatku A.

5.3. SIMULINK model

SIMULINK je alat pomoću kojeg se na grafički zanimljiv način mogu modelirati dinamički sustavi. Funkcijske ovisnosti tlaka, gustoće i latentne topline isparavanja o temperaturi zadani su preko 1-D Lookup tablica i kao takvi se koriste dalje u simulaciji.

Parametri simulacije koji su postavljeni u SIMULINK-u u prozoru Configuration Parameters su:

- *Stop time: 300,*
- *Solver: ode45s (stiff/NDF),*
- *Relative tolerance: 1e-6.*

5.4. Rezultati simulacije za spremnik

Rezultati simulacije, odnosno odzivi veličina zanimljivih za razmatranje prikazani su u predstojećim dijagramima. Krenut ćemo prvo sa rezultatima vezanim sa spremnik propana. Mijenjat ćemo maseni protok goriva na izlazu iz spremnika i temperaturu okoliša kako bi detaljno opisali stanja u kojima se spremnik nalazi.

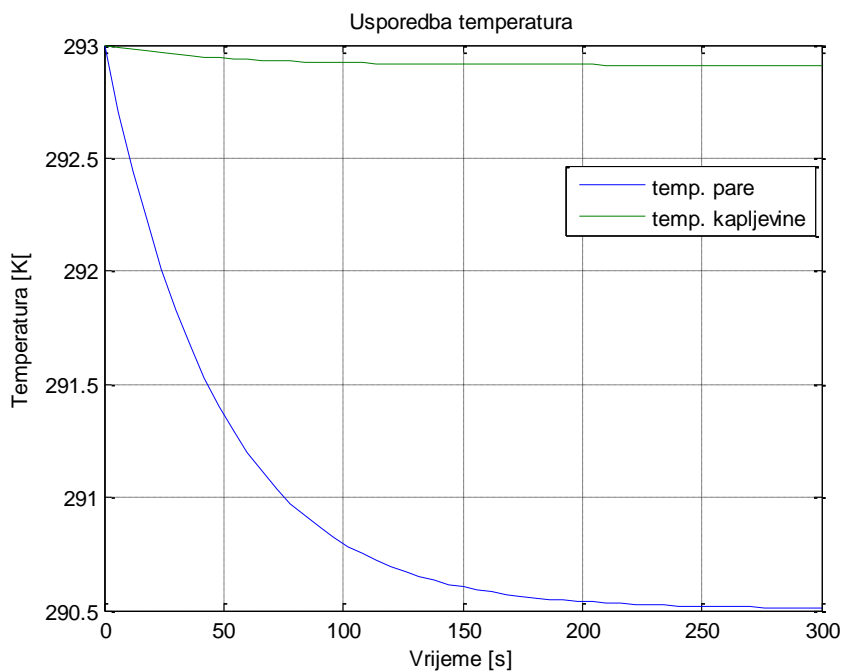
U nastavku će biti analizirane promjene temperature i tlaka u spremniku za dvije različite temperature okoliša uz promjene masenog protoka za 3 slučaja:

- prazni hod
- 50% opterećenja
- 80% opterećenja

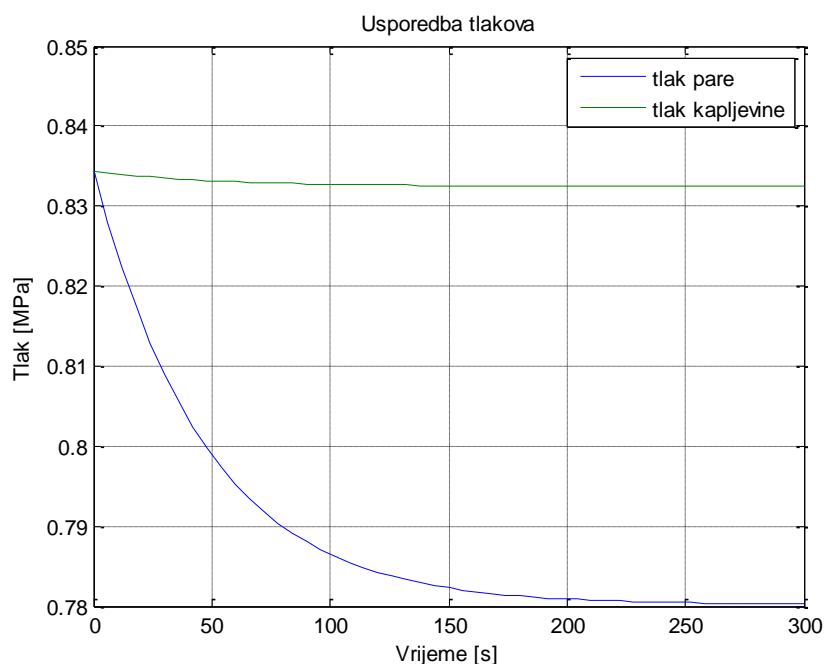
5.4.1. Prazni hod

Prazni hod se odnosi na maseni protok propana od 1 g/s.

5.4.1.1. Temperatura okoliša 20°C



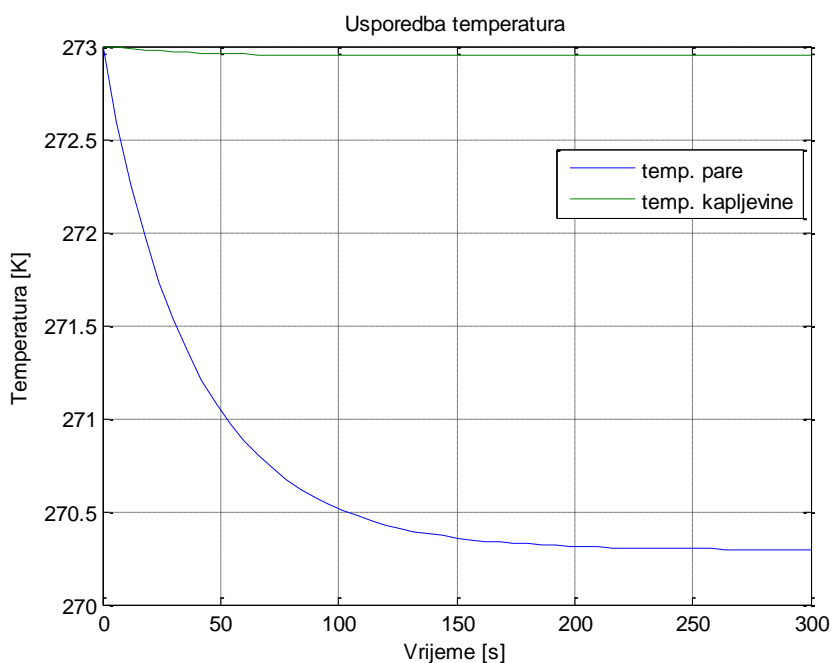
Slika 18. Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 1 g/s



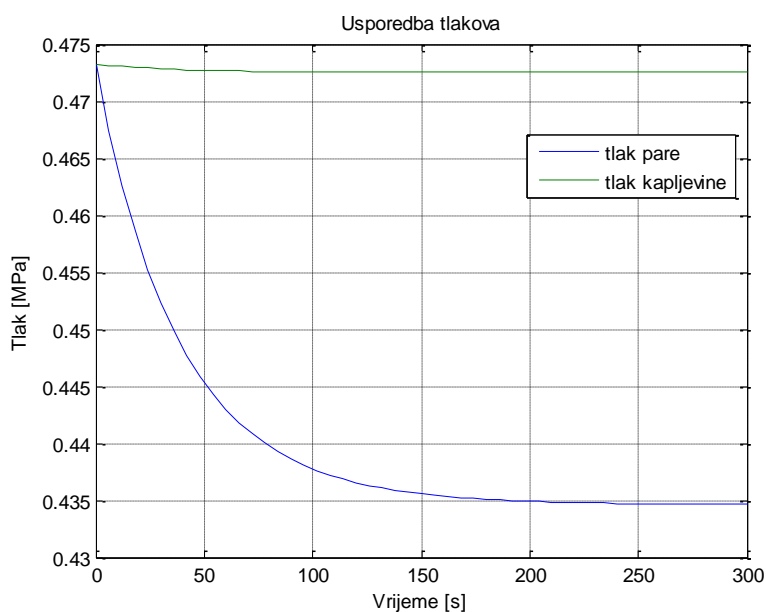
Slika 19. Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 1 g/s

Za temperaturu okoliša od 20°C i maseni protok propana od 1 g/s pad temperature parne faze iznosi 2,5°C, a kapljevite faze samo 0,2°C. Pad tlaka parne faze iznosi 0,54 bara, a pad tlaka kapljevite faze gotovo konstantan i iznosi 0,02 bara.

5.4.1.2. Temperatura okoliša 0°C



Slika 20. Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 1 g/s



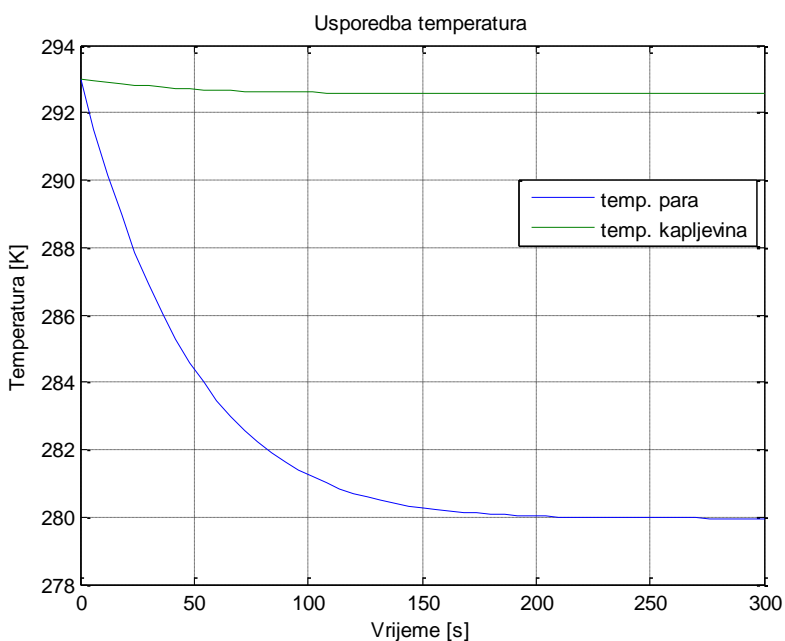
Slika 21. Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 1 g/s

Za temperaturu okoliša od 0°C i maseni protok propana od 1 g/s pad temperature parne faze iznosi $2,7^{\circ}\text{C}$, a kapljevite faze samo $0,0^{\circ}\text{C}$. Pad tlaka parne faze iznosi 0,4 bara, a pad tlaka kapljevite faze gotovo konstantan i iznosi 90 Pa.

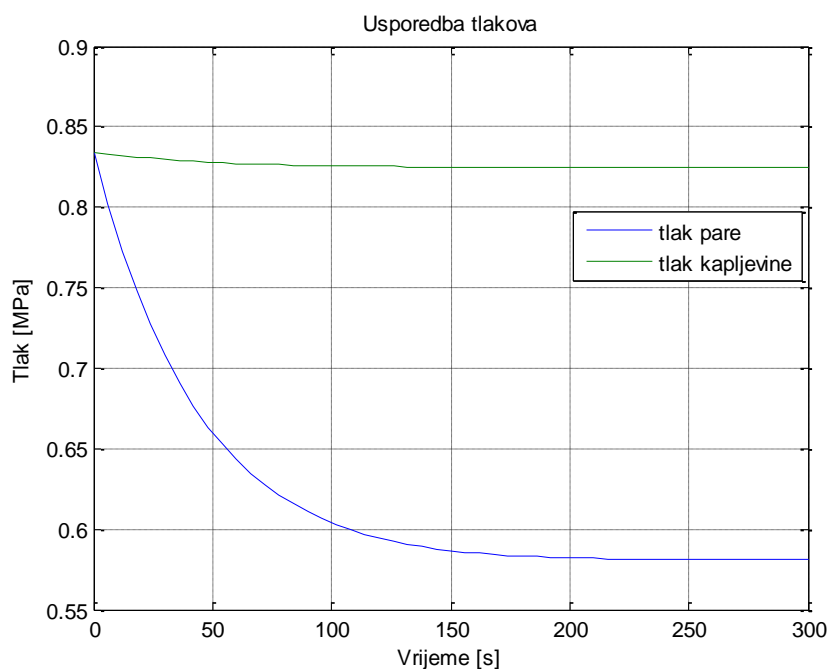
5.4.2. 50% opterećenja

Za opterećenje od 50% podrazumijeva se maseni protok propana od 5 g/s.

5.4.2.1. Temperatura okoliša 20°C



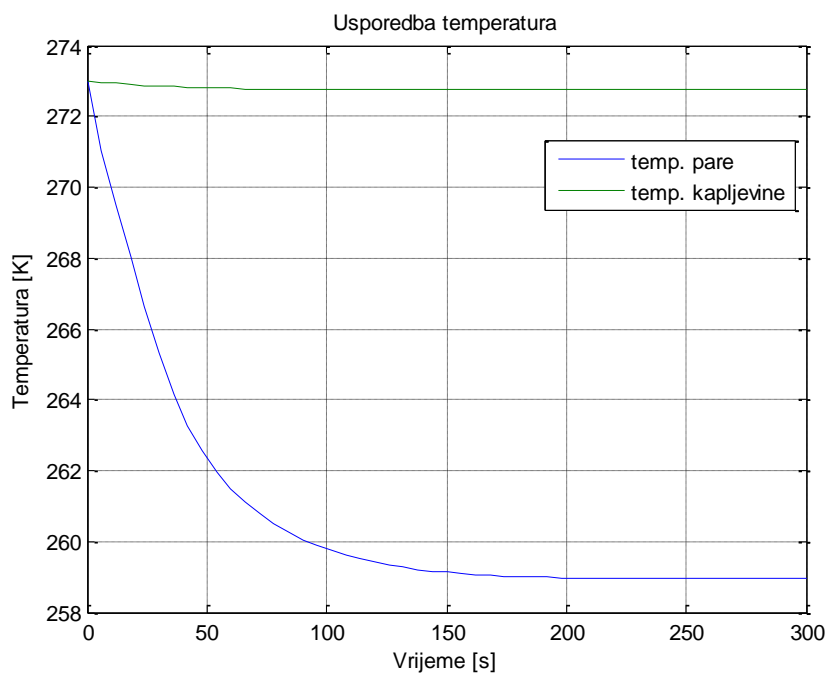
Slika 22. Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 5 g/s



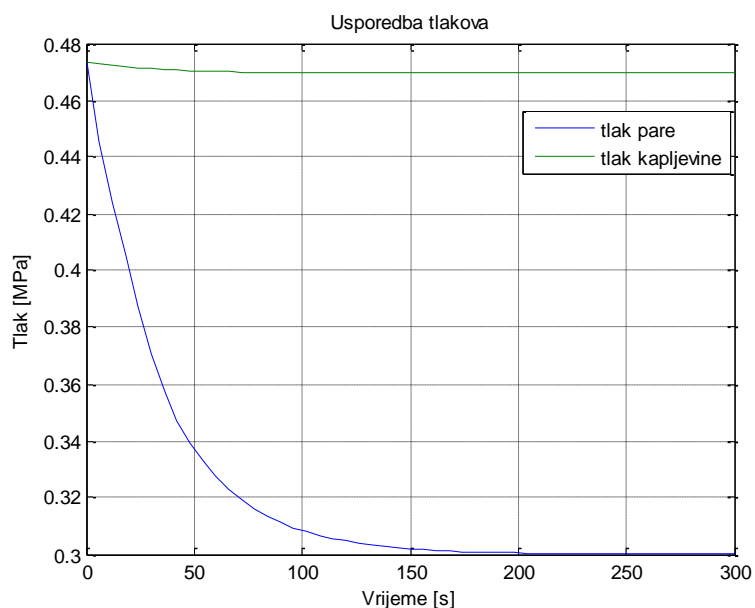
Slika 23. Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 5 g/s

Za temperaturu okoliša od 20°C i maseni protok propana od 5 g/s pad temperature parne faze iznosi 13,1°C, a kapljevite faze samo 0,45°C. Pad tlaka parne faze iznosi 2,53 bara, a pad tlaka kapljevite faze gotovo konstantan i iznosi 0,0094 bara.

5.4.2.2. Temperatura okoliša 0°C



Slika 24. Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 5 g/s



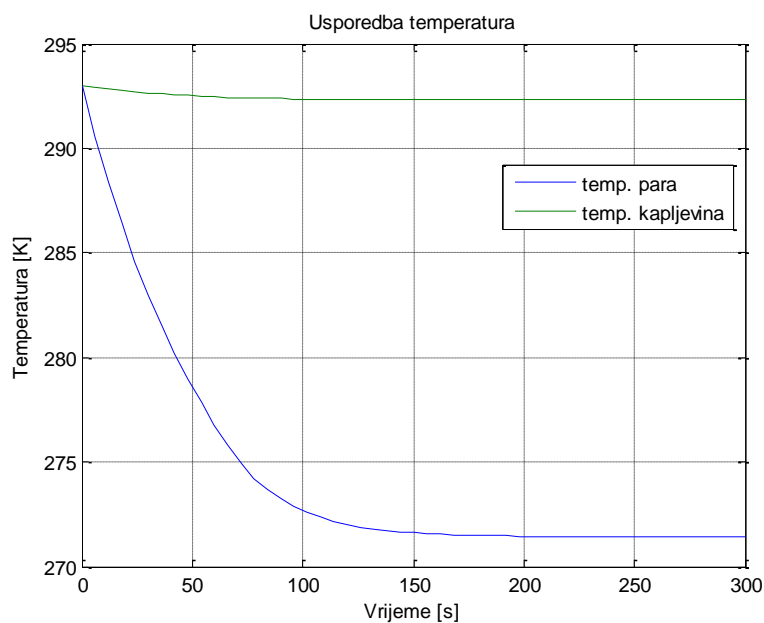
Slika 25. Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 5 g/s

Za temperaturu okoliša od 0°C i maseni protok propana od 5 g/s pad temperature parne faze iznosi $14,1^{\circ}\text{C}$, a kapljevite faze samo $0,3^{\circ}\text{C}$. Pad tlaka parne faze iznosi 1,735 bara, a pad tlaka kapljevite faze gotovo konstantan i iznosi 0,0045 bara.

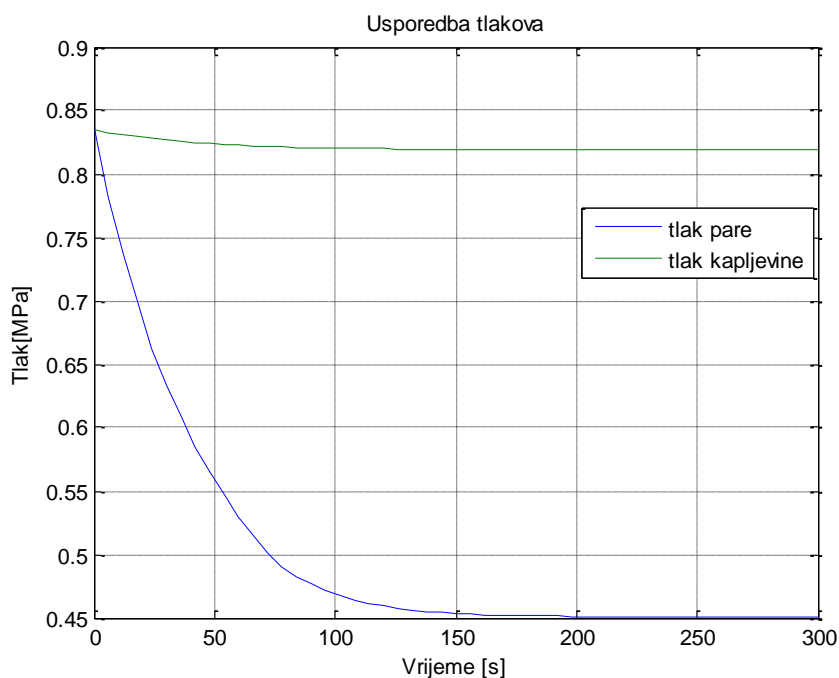
5.4.3. 80% opterećenja

Za opterećenje od 50% podrazumijeva se maseni protok propana od 5 g/s.

5.4.3.1. Temperatura okoliša 20°C



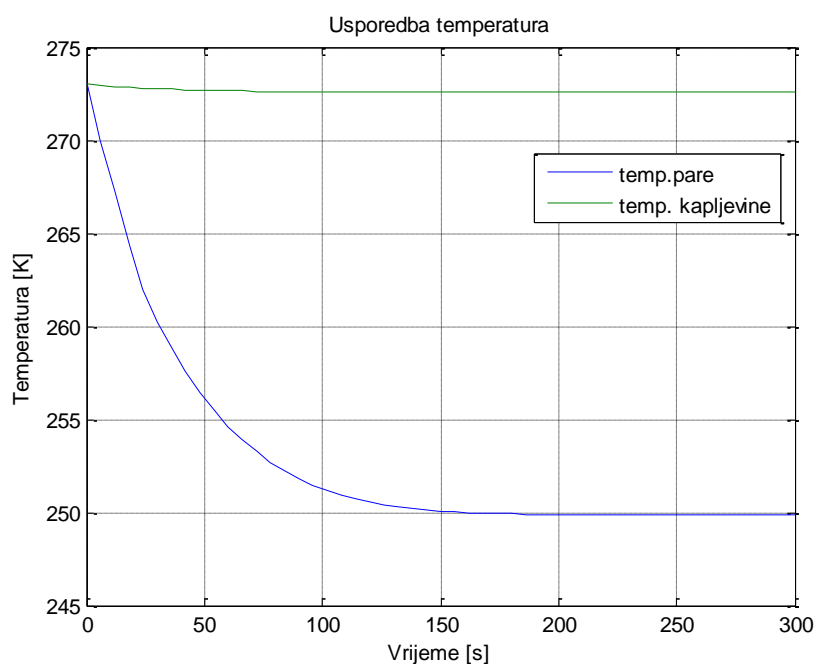
Slika 26. Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 8 g/s



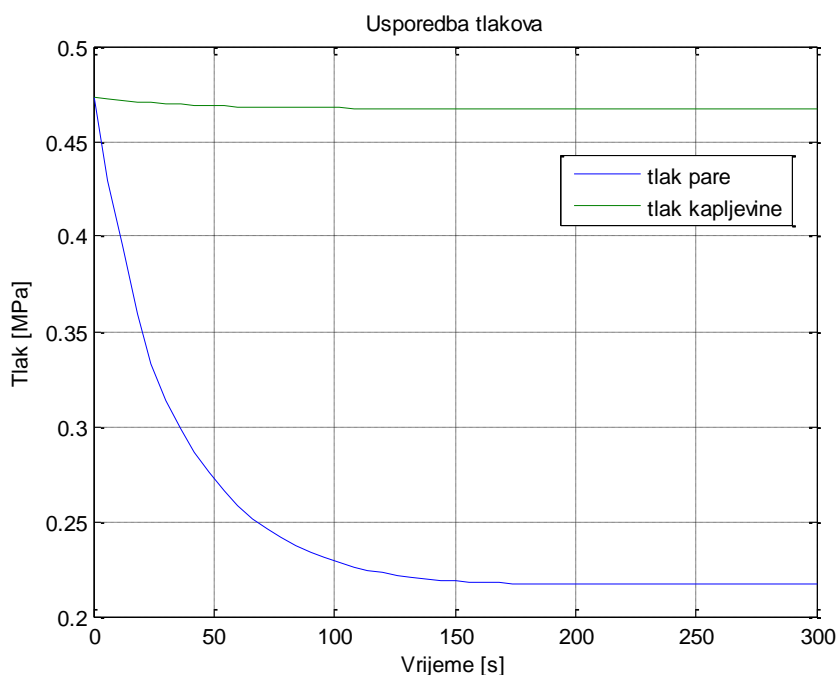
Slika 27. Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 8 g/s

Za temperaturu okoliša od 20°C i maseni protok propana od 8 g/s pad temperature parne faze iznosi 21,6°C, a kapljevite faze samo 0,7°C. Pad tlaka parne faze iznosi 3,83 bara, a pad tlaka kapljevite faze gotovo konstantan i iznosi 0,0154 bara.

5.4.3.2. Temperatura okoliša 0°C



Slika 28. Usporedba temp. parne i kapljevite faze za 8 g/s



Slika 29. Usporedba tlakova parne i kapljevite faze za 8 g/s

Za temperaturu okoliša od 0°C i maseni protok propana od 8 g/s pad temperature parne faze iznosi $23,2^{\circ}\text{C}$, a kapljevite faze samo $0,4^{\circ}\text{C}$. Pad tlaka parne faze iznosi 2,56 bara, a pad tlaka kapljevite faze gotovo konstantan i iznosi 0,006 bar.

Za velike vrijednosti protoka propana na izlazu iz spremnika uočava se da dolazi do značajnog pada temperature i tlaka u spremniku. To je posljedica pothlađivanja kapljevite faze, a puno više je izraženo prilikom uzimanja parne faze, jer toplinski tok okoliša ne stigne predati toplinu kapljevine da se uspostavi toplinska ravnoteža već se toplina potreba za isparavanje namiruje od same kapljevine što rezultira smanjenjem temperature iste. Prilikom uzimanja kapljevite faze pad tlaka i temperature nije toliko izražen jer toplinski tok iz okoliša uspostavi dovoljan prijenos topline tako da dok god ima kapljevine u spremniku tlak je funkcija isključivo temperature okoliša, a sami medij se nalazi u stanju zasićenja.

5.5. Rezultati simulacije za isparivač

Rezultati simulacije za isparivač, odnosno odzivi veličina zanimljivih za razmatranje prikazani su u predstojećim dijagramima.

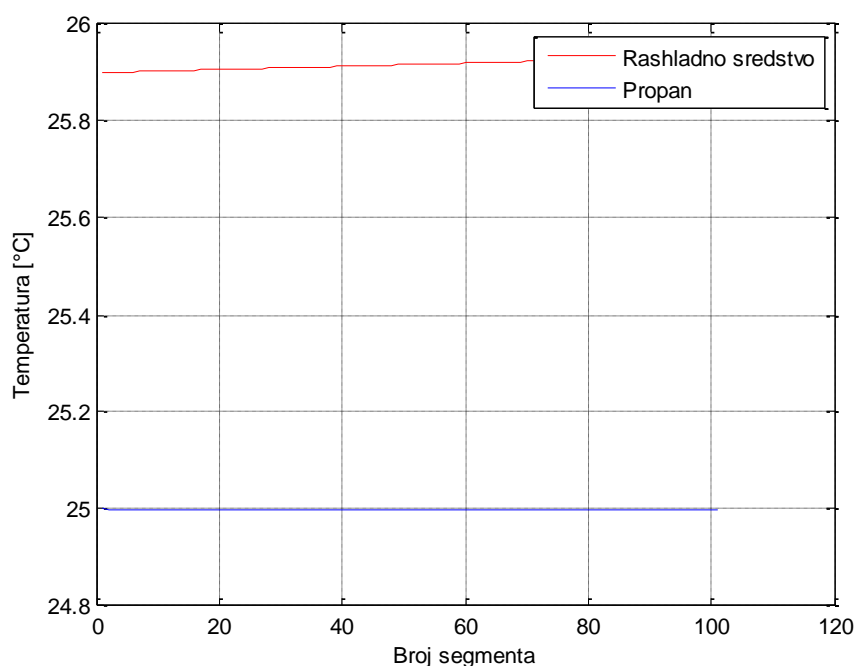
U nastavku će biti analizirane promjene temperaturnih profila duž isparivača za dvije različite temperature okoliša i 3 različite temperature vode na ulazu u isparivač uz promjene masenog protoka za 3 slučaja:

- prazni hod
- 50% opterećenja
- 80% opterećenja

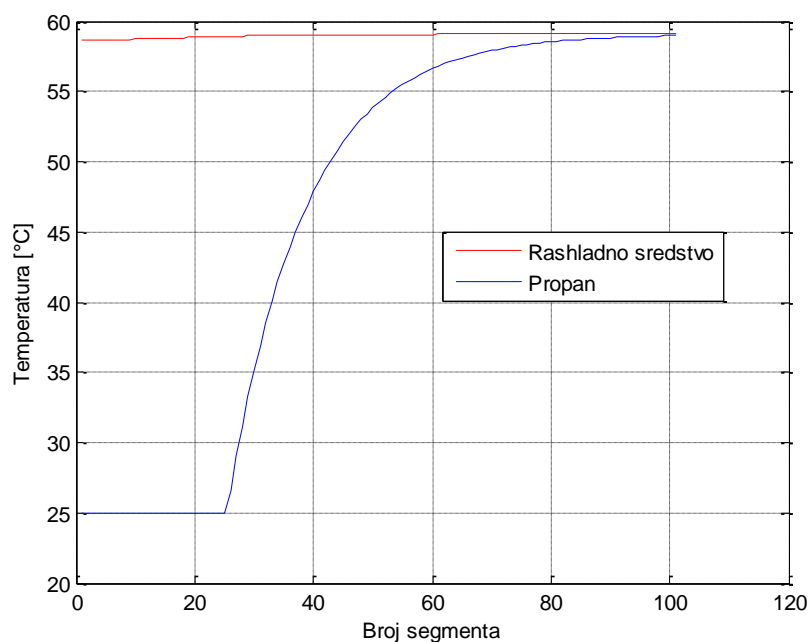
5.5.1. Prazni hod

Prazni hod se odnosi na maseni protok propana od 1 g/s i maseni protok vode od 0,1 kg/s.

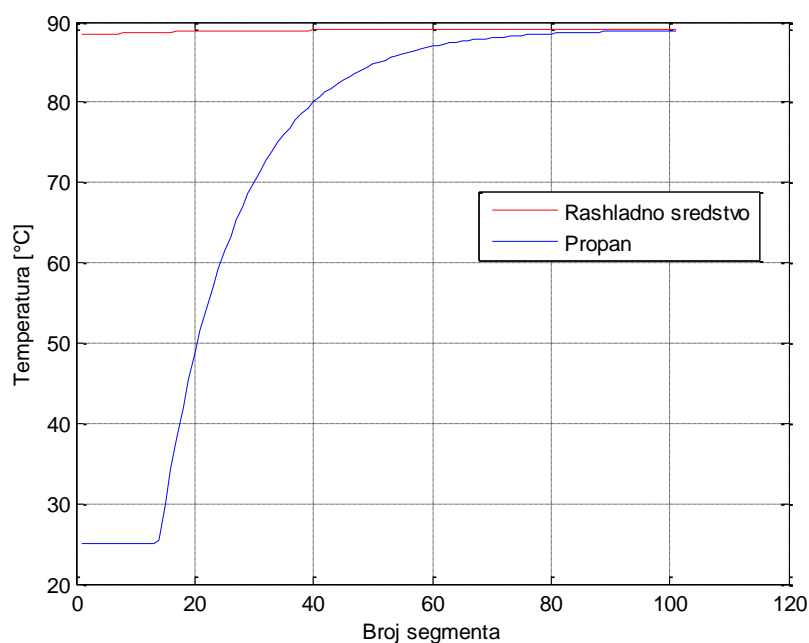
5.5.1.1. Temperatura okoliša 25°C, temperatura vode 26°C, 60°C i 90°C



Slika 30. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=0,8152$

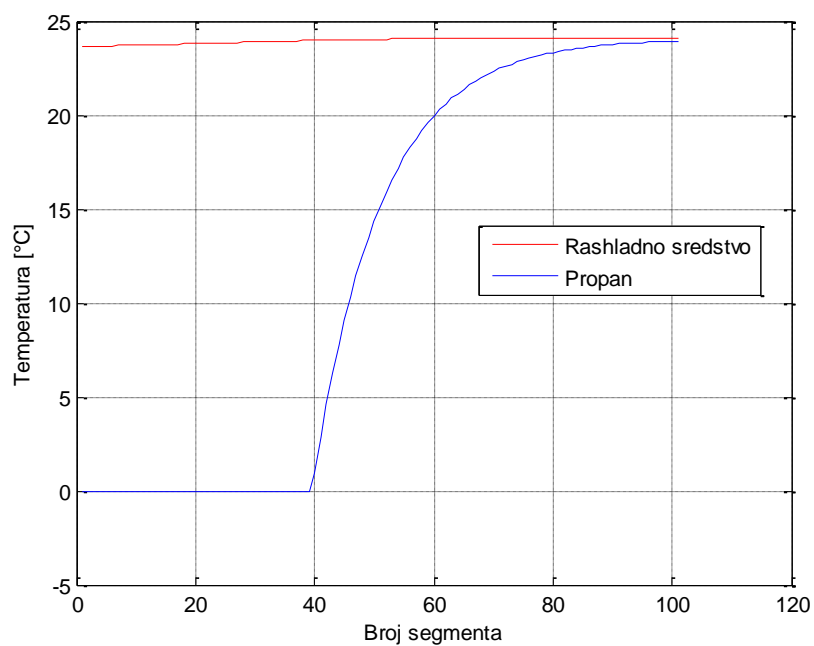
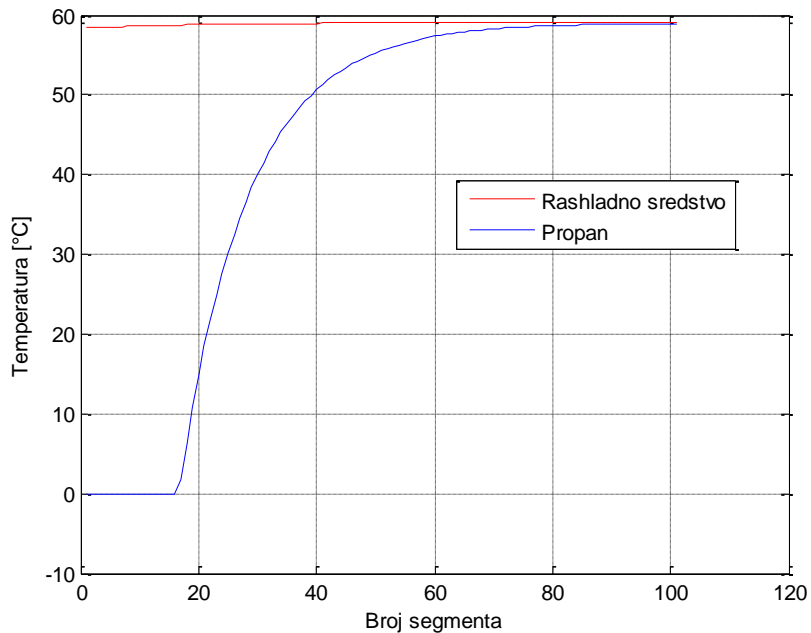


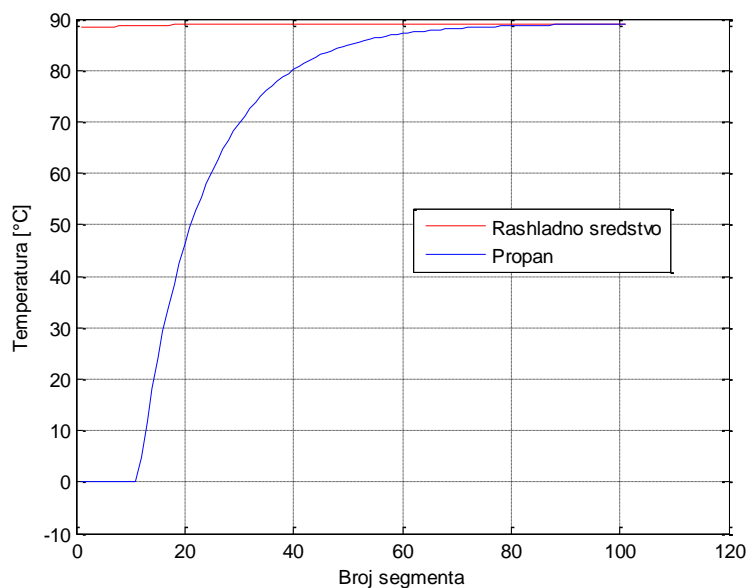
Slika 31. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,1128$



Slika 32. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,2144$

Za temperaturu okoliša od 25°C i maseni protok propana od 1 g/s vidi se da pri temperaturi vode od 26°C na izlazu isparivača imamo vlažnu paru što nikako nije poželjno. Pri većim temperaturama vode od 60°C i 90°C na izlazu imamo pregrijanu paru propana što pokazuje da isparivač ispunjava svoju funkciju na zadovoljavajući način.

5.5.1.2. Temperatura okoliša 0°C, temperatura vode 25°C, 60°C i 90°C**Slika 33. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,0732$** **Slika 34. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,1849$**



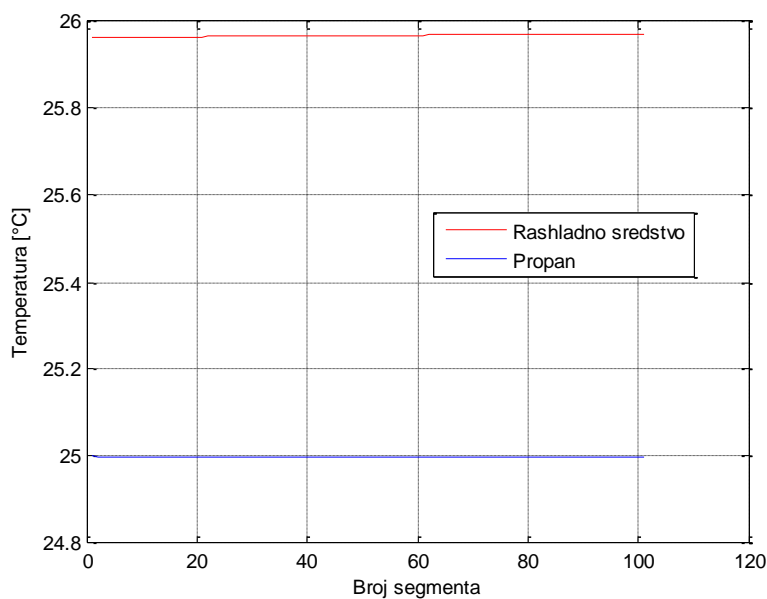
Slika 35. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=1$ g/s, $x=1,2868$

Za temperaturu okoliša od 0°C i maseni protok propana od 1 g/s vidi se da čak i pri temperaturi vode od 25°C na izlazu isparivača imamo pregrijanu paru. Isparivač ispunjava svoju funkciju na zadovoljavajući način.

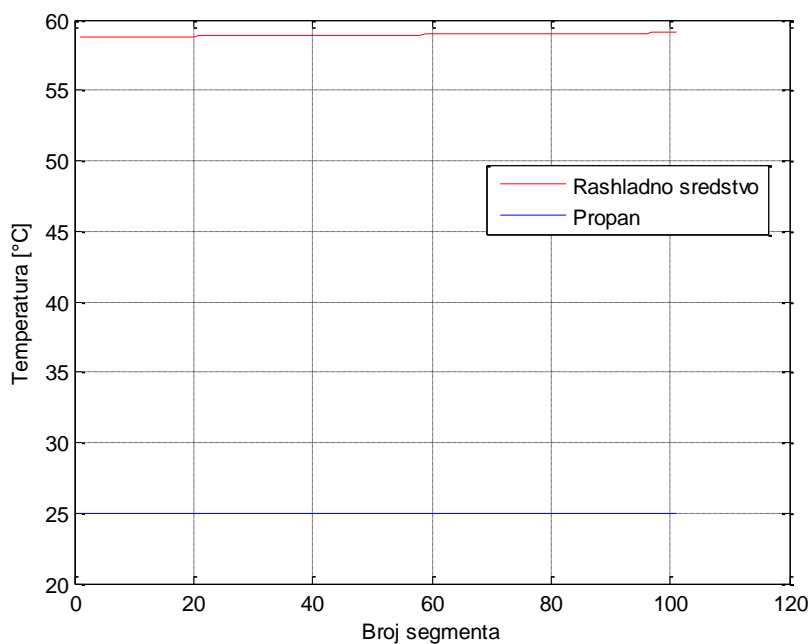
5.5.2. 50% opterećenja

Prazni hod se odnosi na maseni protok propana od 5 g/s i maseni protok vode od $0,4$ kg/s.

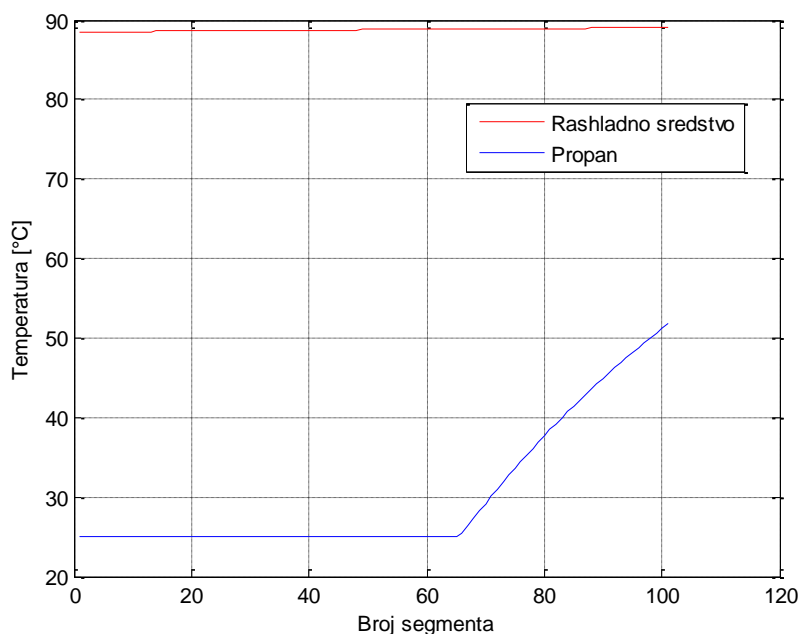
5.5.2.1. Temperatura okoliša 25°C , temperatura vode 26°C , 60°C i 90°C



Slika 36. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=0,7968$

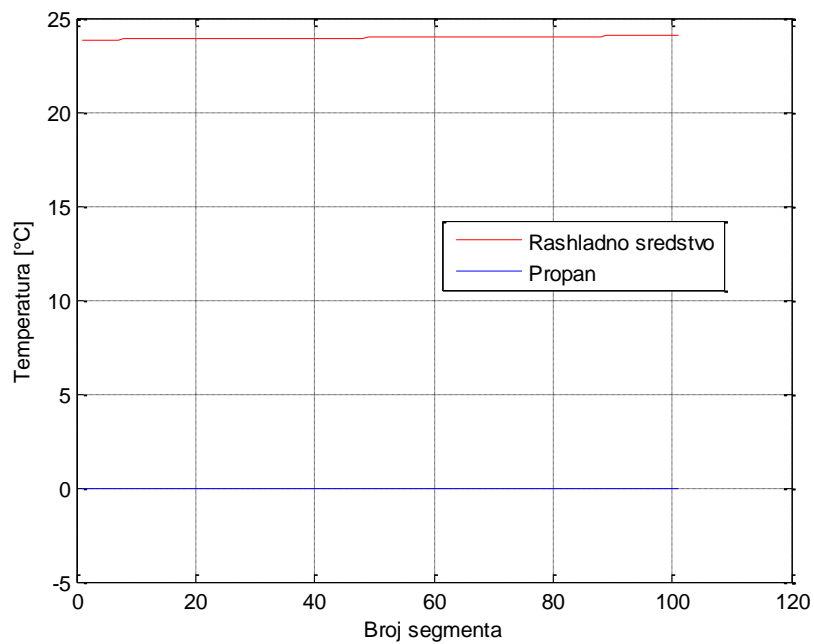
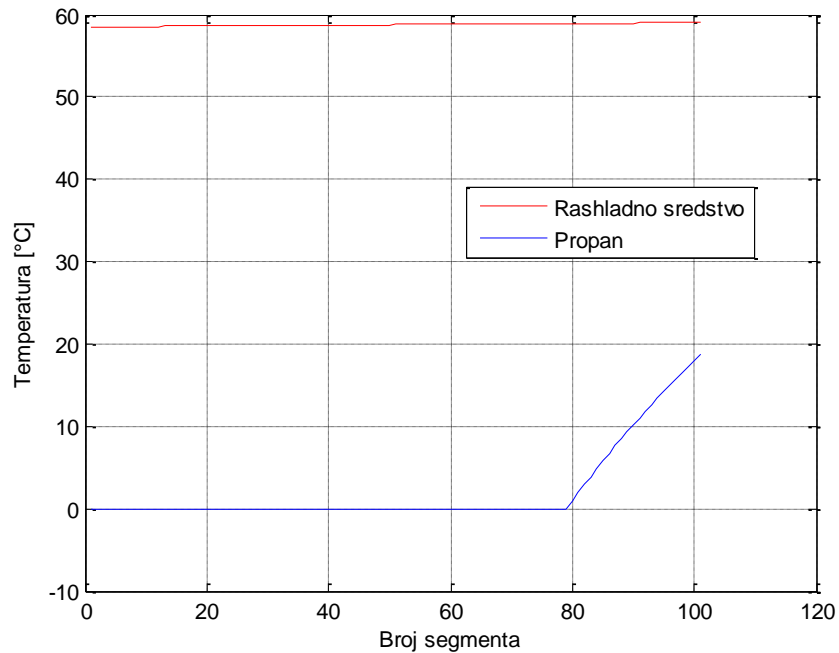


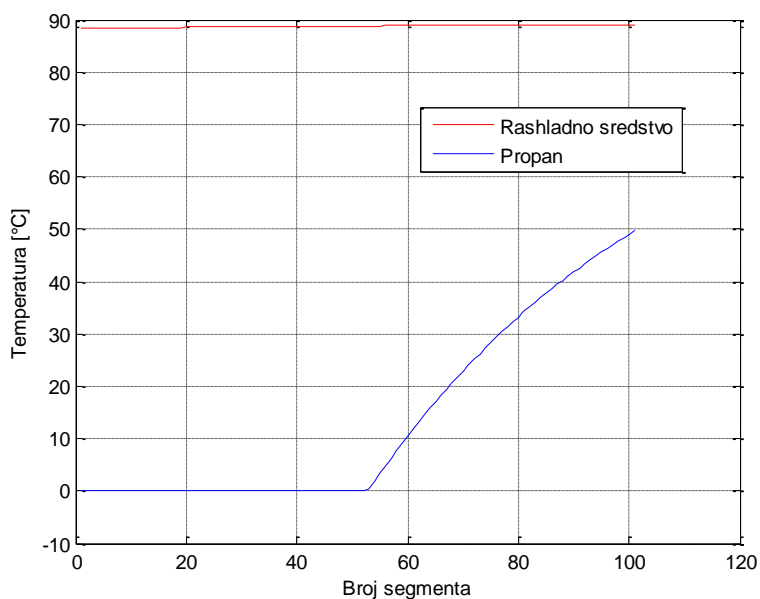
Slika 37. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=0,9638$



Slika 38. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=1,0889$

Za temperaturu okoliša od 25°C i maseni protok propana od 5 g/s vidi se da pri temperaturama vode od 26°C i 60°C na izlazu isparivača imamo vlažnu paru. Isparivač ispunjava svoju funkciju na zadovoljavajući način tek kod temperature vode od 90°C kad imamo pregrijanu paru propana.

5.5.2.2. Temperatura okoliša 0°C, temperatura vode 25°C, 60°C i 90°C**Slika 39. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=0,884$** **Slika 40. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=1,0569$**



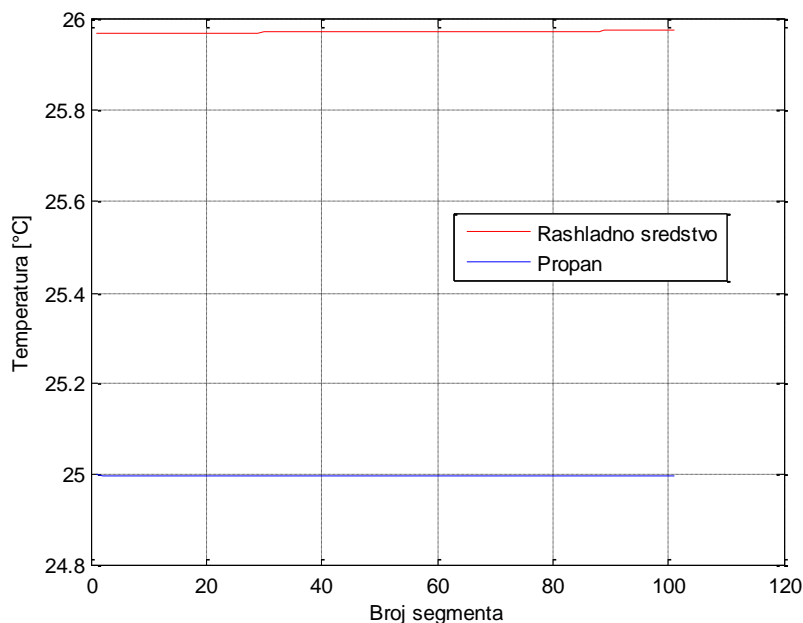
Slika 41. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=5$ g/s, $x=1,1547$

Za temperaturu okoliša od 0°C i maseni protok propana od 5 g/s vidi se da pri temperaturi vode od 25°C na izlazu isparivača imamo vlažnu paru. Isparivač ispunjava svoju funkciju na zadovoljavajući način samo za temp. vode 60°C i 90°C kad imamo pregrijanu paru propana.

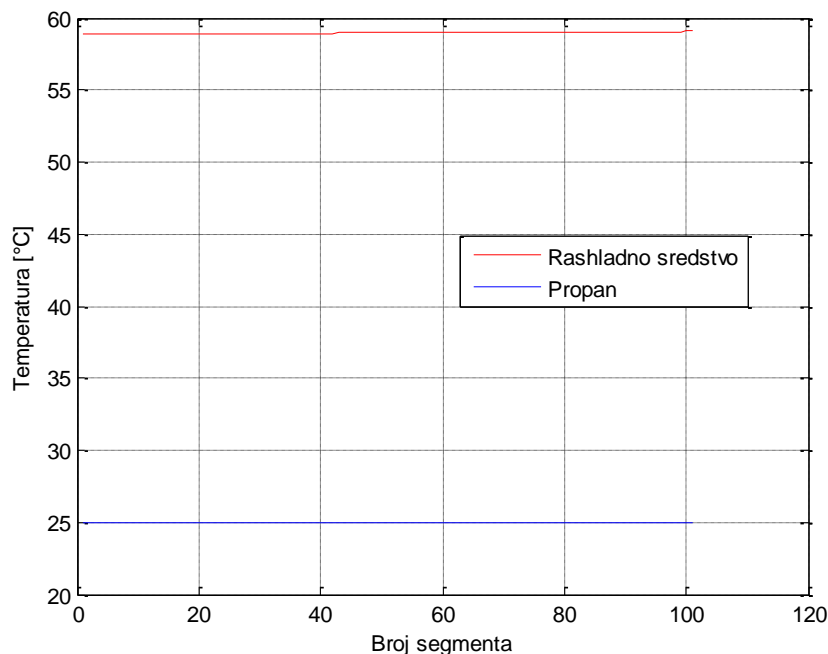
5.5.3. 80% opterećenja

Prazni hod se odnosi na maseni protok propana od 8 g/s i maseni protok vode od $0,6$ kg/s.

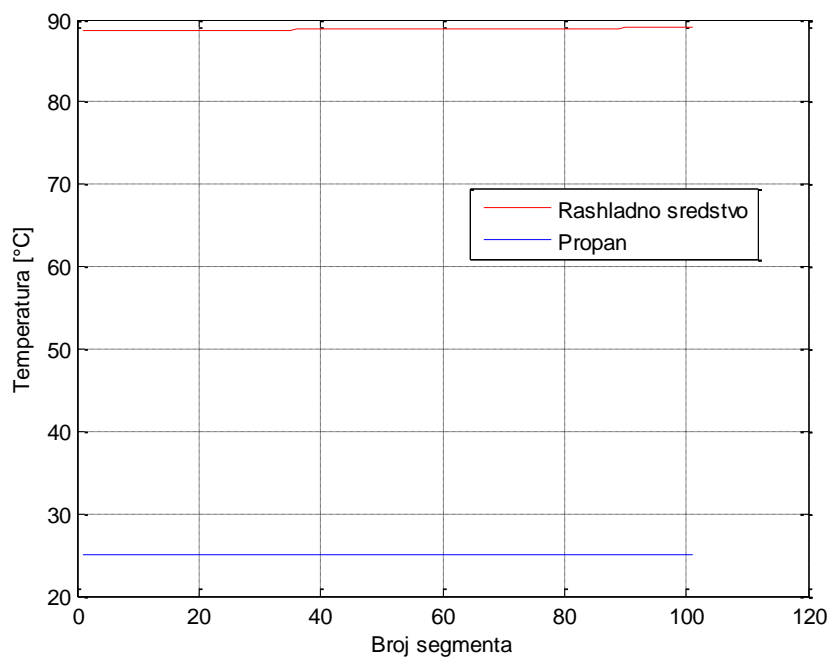
5.5.3.1. Temperatura okoliša 25°C , temperatura vode 26°C , 60°C i 90°C



Slika 42. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,7950$

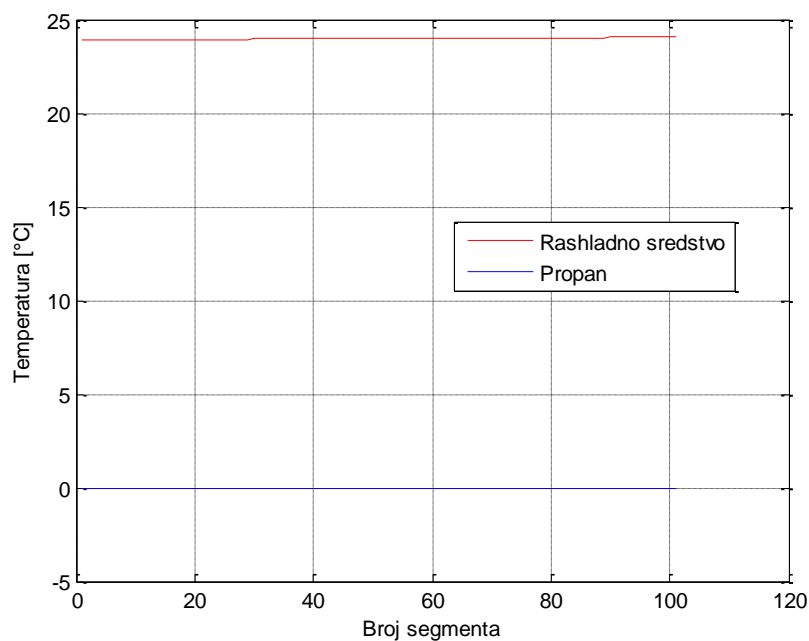
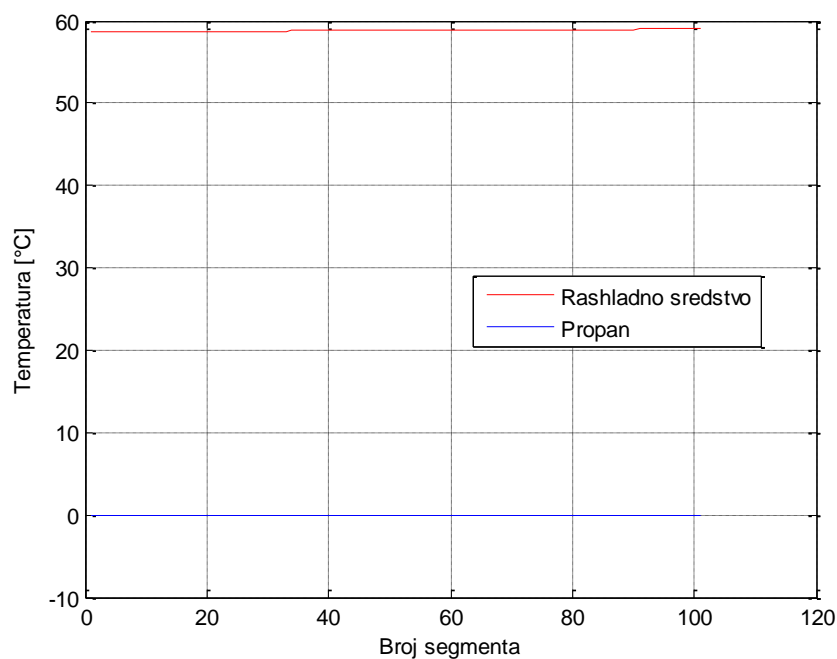


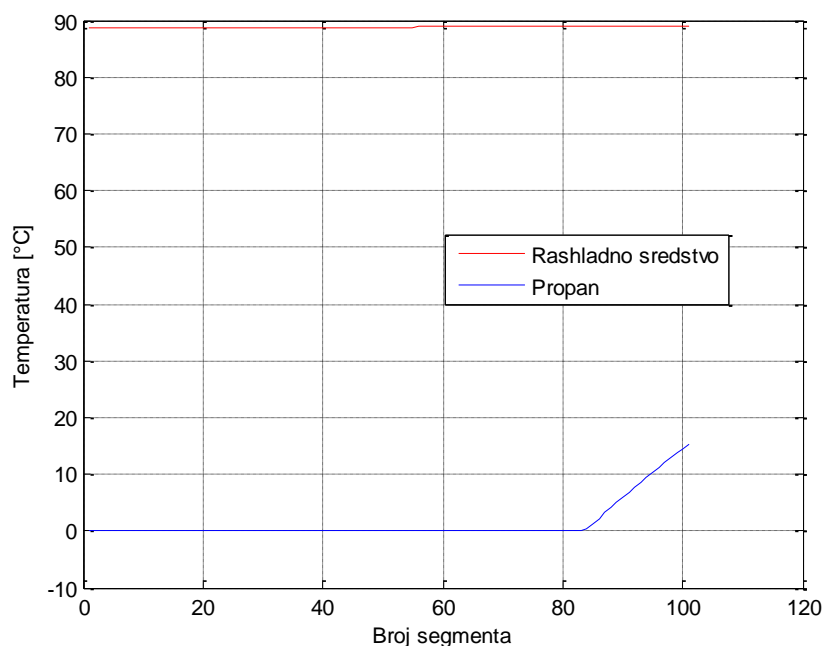
Slika 43. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,8995$



Slika 44. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,994$

Za temperaturu okoliša od 25°C i maseni protok propana od 8 g/s vidi se da ni pri jednoj od temperatura vode isparivač ne ispunjava svoju funkciju na zadovoljavajući način. Već na njegovom izlazu imamo vlažnu paru propana koju ni u kom slučaju ne želimo. Ovakav rezultat može biti posljedica pogrešnih pretpostavki u matematičkom modelu.

5.5.3.2. Temperatura okoliša 0 °C, temperatura vode 25 °C, 60 °C i 90 °C**Slika 45. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,8366$** **Slika 46. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=0,9519$**



Slika 47. Temperaturni profil kroz isparivač za $m_p=8$ g/s, $x=1,0466$

Za temperaturu okoliša od 0°C i maseni protok propana od 8 g/s vidi se da pri temperaturama vode od 25°C i 60°C na izlazu isparivača imamo vlažnu paru. Isparivač ispunjava svoju funkciju na zadovoljavajući način tek kod temperature vode od 90°C kad imamo minimalno pregrijanu paru propana.

Pad temperature vode u isparivaču odnosno manja ulazna temperatura vode u isparivač rezultira smanjenim toplinskim tokom između struje vode i cijevne stijenke, te samim time i između cijevne stijenke i radne tvari. Krajnji rezultat je niža entalpije radne tvari na izlazu iz isparivača, tj. iz isparivača više ne izlazi pregrijana para nego vlažna para, kao što je vidljivo na dijagramu udjela pare radne tvari u isparivaču na Slici. 12.

Takvo stanje pare na izlazu iz isparivača ni u kom slučaju nam ne odgovara, jer dolazi do pojave kapljica propana koje mogu završiti u cilindru motora, a to svakako želimo izbjeći.

5.6. Interpretacija rezultata simulacije

Oblici krivulja u dijagramima posljedica su konkretnog matematičkog modela, a ne realnog sustava, iz razloga što se za izradu matematičkog modela koriste brojne pretpostavke i aproksimacije.

Teoretski pretpostavljajući da nema gubitaka topline izračunati su temperaturni profili obiju struja i vode i propana kroz isparivač. Kod ispitivanja u toplim uvjetima kod temperature okoliša 25°C vidljivo je da su tlak i temperatura zasićenja puno viši u odnosu na ispitivanje u hladnim uvjetima pri temperaturi okoliša od 0°C. Stoga će tlak i temperatura pri hladnijim uvjetima biti niži na ulazu u isparivač. Iz toga slijedi da je razlika entalpije između ulaza i izlaza veća u slučaju hladnih klimatskih uvjeta nego u ispitivanju pri toplim klimatskim uvjetima, što dovodi do veće temperaturne razlike između struja vode i propana kroz isparivač. Stoga je jasno da će pri hladnijim klimatskim uvjetima pri temperaturi vode od 0°C čak i uz veće masene protoke propana kroz isparivač biti osigurano minimalno pregrijanje propana. Rezultate dobivene simulacijom treba uzeti s rezervom jer nije uračunata akumulacija energije u stijenkama isparivača i dodatni toplinski tok koji dolazi od motora budući se isparivač nalazi u motornom prostoru. Također treba voditi računa da pri uvjetima rada motora gotovo nikad ne dolazi do 80% opterećenja te velikog masenog protoka propana. Takvi slučajevi su rijetki i mogu se pripisati situacijama prilikom naglog ubrzanja ili pojave uspona, a takve promjene traju svega nekoliko sekundi. Područje rada motora se u većini slučajeva odvija od 10 do 50% opterećenja te za takva opterećenja maseni protok propana poprima znatno manje vrijednosti i gotovo uvijek je osigurano minimalno pregrijanje na izlazu iz isparivača.

Temperatura plina koja napušta isparivač funkcija je količine toplinske energije koju propan primi od vode preko isparivača. Uz promjene temperaturnih profila kroz isparivač pratio se i sadržaj pare na izlazu iz isparivača. Jako je važno da je propan u stanju pregrijane pare, a ne vlažna smjesa kako kapljice ne bi dospjele u cilindar motora. Posljedica pojave kapljica propana u cilindru motora je povećana količina goriva koja rezultira pretjerano bogatom smjesom što dovodi do nestabilnog rada motora, izostaje izgaranje u cilindru. Signal sa senzora kisika λ (lambda sonda) pada izvan navedenog raspona, a alternativni upravljački modul goriva (AFCM) prebacuje rad motora na benzina i zatvara ventil goriva za UNP.

Sustav za upravljanje gorivom UNP kontrolira elektronski AFCM, koji uspoređuje ulazne signale s podacima u svojoj memoriji i aktivira sve komponente koje treba kontrolirati, npr. sustav za napajanje gorivom, sustav za ubrizgavanje goriva itd. Sustav ima integrirani dijagnostički sustav koji može upozoriti vozača na bilo kakve smetnje upozoravajućim lampicom na instrument ploči. U slučaju pojave greške pohranjuje se u memoriju uređaja i može ga pročitati tehničar s čitačem koda kvara. AFCM također kontrolira prebacivanje između UNP-a i benzina. Za vrijeme prelaska s benzina na UNP predviđeno je malo preklapanje opskrbe benzinom i plinom, tako da je prelazak s jednog na drugo gorivo bez prekida. Prebacivanje je također ovisno o temperaturi, tj. AFCM neće dopustiti da motor radi na plin dok temperatura rashladnog sredstva u isparivaču nije veća od 25 °C mjerena senzorom temperature u uređaju za isparavanje. To je izvedeno kako bi se osiguralo dostatno prenošenje toplinske energije s rashladne tekućine na UNP, čime se osigurava da plin koji izlazi iz isparivača bude u pregrijanoj fazi.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je primjena stečenih znanja iz područja termodinamike na konkretan tehnički sustav. Matematičko modeliranje je područje koje se može primjenjivati na gotove sve pojave koje se događaju. Kako bi se ostvarila korist od matematičkih modela i simulacija, potrebno je i široko iskustveno znanje u području na kojeg se primjenjuje.

Računalne simulacije olakšavaju razumijevanje principa na kojima se odvijaju procesi u nekom sustavu. Na primjeru konkretnog modela, simulacije su omogućile bolji uvid u promjene stanja koje se događaju u isparivaču i samom spremniku.

Temperature rashladne tekućine u motoru (ulaz i izlaz iz isparivača) detaljno su ispitane jer razlika među njima predstavlja pad temperature kroz isparivač, pružajući osnovu za izračun količine toplinske energije prenesene na propan. Teoretski pretpostavljajući da nema gubitaka topline izračunati su temperaturni profili obiju struja i vode i propana kroz isparivač. Kod ispitivanja u toplim uvjetima kod temperature okoliša 25°C vidljivo je da su tlak i temperatura zasićenja puno viši u odnosu na ispitivanje u hladnim uvjetima pri temperaturi okoliša od 0°C. Stoga će tlak i temperatura pri hladnijim uvjetima biti niži na ulazu u isparivač. Iz toga slijedi da je razlika entalpije između ulaza i izlaza veća u slučaju hladnih klimatskih uvjeta nego u ispitivanju pri toplim klimatskim uvjetima, što dovodi do veće temperaturne razlike između struja vode i propana kroz isparivač. Stoga je jasno da će pri hladnijim klimatskim uvjetima pri temperaturi vode od 0°C čak i uz veće masene protoke propana kroz isparivač biti osigurano minimalno pregrijanje propana.

Ovaj proračun zaključuje da isparivač ne obavlja svoju funkciju na zadovoljavajući način, naročito kod visokih opterećenja pri višim temperaturama okoliša. To može biti posljedica zanemarenja akumulacije energije u stijenkama isparivača, a i ostalih pretpostavki i aproksimacija korištenih u matematičkom modelu. Također treba uzeti u obzir da pri uvjetima rada motora gotovo nikad ne dolazi do 80% opterećenja te velikog masenog protoka propana. Takvi slučajevi su rijetki i mogu se pripisati situacijama prilikom naglog ubrzanja ili pojave uspona, a takve promjene su kratkotrajne. Područje rada motora se u većini slučajeva odvija od 10 do 50% opterećenja te za takva opterećenja maseni protok propana poprima znatno manje vrijednosti i gotovo uvijek je osigurano minimalno pregrijanje na izlazu iz isparivača.

Važno je napomenuti da za velike vrijednosti protoka propana na izlazu iz spremnika uočava se da dolazi do značajnog pada temperature i tlaka u spremniku. To je posljedica pothlađivanja kapljevite faze, a puno više je izraženo prilikom uzimanja parne faze naročito u situacijama kada je spremnik goriva gotovo prazan. Jer toplinski tok okoliša ne stigne predati toplinu kapljevini da se uspostavi toplinska ravnoteža već se toplina potreba za isparavanje namiruje od same kapljevine što rezultira smanjenjem temperature iste. Prilikom uzimanja kapljevite faze pad tlaka i temperature nije toliko izražen jer toplinski tok iz okoliša uspostavi dovoljan prijenos topline tako da dok god ima kapljevine u spremniku tlak je funkcija isključivo temperature okoliša, a sami medij se nalazi u stanju zasićenja.

LITERATURA

- [1] Antun Galović. *Termodinamika I*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2007.
- [2] Antun Galović. *Termodinamika II*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2007.
- [3] Matlab Help <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
- [4] <https://auto-silvio.hr/slike-auto-plin/>
- [5] http://repositorij.fsb.hr/729/1/15_10_2009_Branimir_Pozgaj-DIPLOMSKI_RAD.pdf
- [6] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412000556>

Dodatak A

ISPIS KODA

```
% parametri
load('tablice.mat');

brSegmenata = 100;
A = 0.04;           %% m2
k = 0.4;           %% W/m2K
Pgg = 1.2e5;       %% Pa
mgi(1:brSegmenata) = 0.1; %% kg/s
mdd(1:brSegmenata) = 0.001; %% kg/s

dA = A/brSegmenata;

Kelvin = 273.15;

%% petlje
Tdd_ulaz_pocetna_C = 0; % °C
Tgg_ulaz_zadnji_C = 25; % °C

%Pdd = 1e6; %% Pa
Pdd =
refpropm('P','T',Tdd_ulaz_pocetna_C+273.15,'Q',0,'propane')/10
0;

% inicijalizacija
Tgg_ulaz = zeros(1,brSegmenata);
Tgg_izlaz = zeros(1,brSegmenata);

Tdd_ulaz = zeros(1,brSegmenata);
Tdd_izlaz = zeros(1,brSegmenata);

Tdd_ulaz(1) = Tdd_ulaz_pocetna_C+Kelvin;
Tgg_ulaz_zadnji = Tgg_ulaz_zadnji_C+Kelvin; % do ovog se želi
doci

Hgg_ulaz = zeros(1,brSegmenata);
Hgg_izlaz = zeros(1,brSegmenata);
Hdd_ulaz = zeros(1,brSegmenata);
Hdd_izlaz = zeros(1,brSegmenata);
Q = zeros(1,brSegmenata);

% pretpostavka:

deltaT = 10;
```

```

greskaT = Inf;
brojac = 0;

Tgg_ulaz = zeros(1,brSegmenata);
Tgg_izlaz = zeros(1,brSegmenata);

Tdd_ulaz = zeros(1,brSegmenata);
Tdd_izlaz = zeros(1,brSegmenata);

Tdd_ulaz(1) = Tdd_ulaz_pocetna_C+Kelvin;
Tgg_ulaz_zadnji = Tgg_ulaz_zadnji_C+Kelvin; % do ovog se
želi doći

% entalpije zasícenja - propan
%Hdd_vk =
interp1(zasicenjepropan(:,1),zasicenjepropan(:,3),Pdd*1e-6);
Hdd_vk =refpropm('H','P',100*Pdd,'Q',0,'propane')/1000;

%Hdd_szp =
interp1(zasicenjepropan(:,1),zasicenjepropan(:,4),Pdd*1e-6);
Hdd_szp =refpropm('H','P',100*Pdd,'Q',1,'propane')/1000;
% temperatura zasícenja - propan
%Tdd_zs =
interp1(zasicenjepropan(:,1),zasicenjepropan(:,2),Pdd*1e-6);
Tdd_zs =refpropm('T','P',100*Pdd,'Q',0,'propane');

fprintf(['Željena ulazna temperatura vode (zadnji segment): '
num2str(Tgg_ulaz_zadnji) '.\n'])

%%
while abs(greskaT)>1

    % inicijalizacija

    if brojac==0
        Tgg_izlaz(1) = Tdd_ulaz(1) + deltaT;
    else
        Tgg_izlaz(1) = Tgg_izlaz_novi;
    end

    brojac = brojac+1;
    fprintf([num2str(brojac) '. pokusaj...\n'])
    fprintf(['Izlazna temperatura vode (1. segment): '
num2str(Tgg_izlaz(1)) '.\n'])

% entalpija vode
%[X,Y] = meshgrid(vodaHfpT(1,2:end),vodaHfpT(2:end,1));
%values = vodaHfpT(2:end,2:end);
%Hgg_izlaz(1) = interp2(X,Y,values,Tgg_izlaz(1),Pgg*1e-6);

```

```

Hgg_izlaz(1) = 4.2*Tgg_izlaz(1);

% entalpija propana
[X,Y] = meshgrid(propanHfpT(1,2:end),propanHfpT(2:end,1));
values = propanHfpT(2:end,2:end);
Hdd_ulaz(1) = interp2(X,Y,values,Tdd_ulaz(1),Pdd/10);

%Hdd_ulaz(1)=refpropm('H','T',Tdd_ulaz(1),'P',100*Pdd,'propane
')/10

%00;

greskaQ(1:brSegmenata) = Inf;
Q(1:brSegmenata) = 0.0005/brSegmenata; % kW

    for i = 1:brSegmenata

        fprintf('.')';

        while abs(greskaQ(i)/Qnovi(i))>0.05

            Hgg_ulaz(i) = Hgg_izlaz(i) + Q(i)/mgi;
            Hdd_izlaz(i) = Hdd_ulaz(i) + Q(i)/mdd(i);

            if (Hdd_izlaz(i))>=Hdd_vk && Hdd_izlaz(i)<Hdd_szp)

% temperatura - vrelna kapljevina voda
%[X,Y] = meshgrid(vodaTfph(1,2:end),vodaTfph(2:end,1));
%values = vodaTfph(2:end,2:end);
%Tgg_ulaz(i) = interp2(X,Y,values,Hgg_ulaz(i),Pgg*1e-6);

Tgg_ulaz(i) = Hgg_ulaz(i)/4.2;

% temperatura - vrelna kapljevina propan
Tdd_izlaz(i)= Tdd_zs;

else

if ( Hdd_izlaz(i))>=Hdd_szp)

% temperatura - vrelna kapljevina voda
%[X,Y] = meshgrid(vodaTfph(1,2:end),vodaTfph(2:end,1));
%values = vodaTfph(2:end,2:end);
%Tgg_ulaz(i) = interp2(X,Y,values,Hgg_ulaz(i),Pgg*1e-6);

Tgg_ulaz(i) = Hgg_ulaz(i)/4.2;

% temperatura - vrelna kapljevina propan
%[X,Y] = meshgrid(propanTfph(1,2:end),propanTfph(2:end,1));
%values = propanTfph(2:end,2:end);

```

```
%Tdd_izlaz(i) = interp2(X,Y,values,Hdd_izlaz(i),Pdd*1e-6);
%Tdd_izlaz(i) = Hdd_izlaz(i)/1.84;

Tdd_izlaz(i)=refpropm('T','P',100*Pdd,'H',1000*Hdd_izlaz(i),'p
ropane');

else

% temperatura - vreła kapljevinā voda
%[X,Y] = meshgrid(vodaTfph(1,2:end),vodaTfph(2:end,1));
%values = vodaTfph(2:end,2:end);
%Tgg_ulaz(i) = interp2(X,Y,values,Hgg_ulaz(i),Pgg*1e-6);

Tgg_ulaz(i) = Hgg_ulaz(i)/4.2;

% temperatura - vreła kapljevinā propan
%[X,Y] = meshgrid(propanTfph(1,2:end),propanTfph(2:end,1));
%values = propanTfph(2:end,2:end);
%Tdd_izlaz(i) = interp2(X,Y,values,Hdd_izlaz(i),Pdd*1e-6);
%Tdd_izlaz(i) = Hdd_izlaz(i)/1.84;

Tdd_izlaz(i)=refpropm('T','P',100*Pdd,'H',1000*Hdd_izlaz(i),'p
ropane');

end

end

        dt_ulaz = Tgg_izlaz(i) - Tdd_ulaz(i);
        dt_izlaz = Tgg_ulaz(i) - Tdd_izlaz(i);

        Qnovi(i) = k*dA*(dt_ulaz+dt_izlaz)/2;

        greskaQ(i) = Q(i)-Qnovi(i);
        Q(i) = 0.1*Q(i)+0.9*(Qnovi(i)-0.1*greskaQ(i));

    end

    Tgg_izlaz(i+1) = Tgg_ulaz(i);
    Tdd_ulaz(i+1) = Tdd_izlaz(i);

    Hgg_izlaz(i+1) = Hgg_ulaz(i);
    Hdd_ulaz(i+1) = Hdd_izlaz(i);

end

fprintf('\n');
```

```
fprintf(['Ulazna temperatura vode (zadnji segment): '
num2str(Tgg_ulaz(brSegmenata)) '.\n'])

greskaT = Tgg_ulaz(brSegmenata) - Tgg_ulaz_zadnji;

fprintf(['Greska: ' num2str(greskaT) 'K ...\n'])

Tgg_izlaz_novi = Tgg_izlaz(1) - 0.1*greskaT;

fprintf('\n');

stanje_pare=Hdd_izlaz(brSegmenata)/Hdd_szp;

%% plotanje

if brojac==1
    figure()
end

y_gg=Tgg_izlaz;
y_gg(brSegmenata+1)=Tgg_ulaz(brSegmenata);

y_dd=Tdd_ulaz;
y_dd(brSegmenata+1)=Tdd_izlaz(brSegmenata);

cla
plot(y_gg-273.15, 'r');
hold on
plot(y_dd-273.15, 'b');
grid on
xlabel('Broj segmenta')
ylabel('Temperatura [°C]')
legend('Rashladno sredstvo', 'Propan')
drawnow

end
```