

Dvofazni tok u izmjenjivaču topline s dvije paralelne cijevi

Mrla, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:334660>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Mrla

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dvofazni tok u izmjenjivaču topline s dvije paralelne cijevi

mentor:

student:

Izv.prof.dr.sc. Mislav Čehil

Domagoj Mrla

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se izv.prof.dr.sc. Mislav Čehil na ukazanoj pomoći i savjetima tijekom pisanja rada.

Također zahvaljujem se obitelji, djevojci i prijateljima na ukazanoj podršci za čitavo vrijeme studiranja i pisanja ovog rada.

Domagoj Mrla



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Mrla** JMBAG: 0035196659

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dvofazni tok u izmjenjivaču topline s dvije paralelne cijevi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Two-phase flow in a heat exchanger with two parallel tubes**

Opis zadatka:

U ložištima generatora pare uobičajeno se odvija isparivanje vode. Strujanje u dvofaznom području ponekad odstupa od predvidljivih pojava strujanja u jednofaznom području tako da u paralelnim cijevima isparivača može doći do blokade protoka u pojedinim paralelnim cijevima nakon čega najčešće dolazi do pregaranja tih cijevi. Kako bi se spriječile takve pojave, nastoji se osigurati ujednačena hidraulička svojstva svih paralelnih cijevi kao i njihova što ujednačenija toplinska opterećenja.

U diplomskom radu potrebno je:

1. Napraviti pregled dosadašnjih metoda proračuna pada tlaka u dvofaznom području.
2. Napraviti termodinamički i hidraulički proračun strujanja vode u dvofaznom području u izmjenjivaču topline s dvije paralelne cijevi.
3. Istražiti utjecaj na strujanje u paralelnim cijevima mijenjajući: toplinska opterećenja cijevi, protok i tlak vode te dimenzije cijevi.
4. Prikazati i analizirati dobivene rezultate.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof.dr.sc. Mislav Čehil

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. MODELI POJEDNOSTVALJENA OPISA DVOFAZNOG STRUJANJA	2
2.1. homogeni model.....	2
2.2. model odvojenih tokova.....	2
2.3. model temeljen na oblicima strujanja.....	2
3. OBLICI STRUJANJA DVOFAZNOG TOKA.....	3
3.1. mjehurićasti tok.....	3
3.2. čepasti ili klipasti tok.....	3
3.3. bućkasti tok	3
3.5. disperzni tok.....	3
4. KOEFICIJENT DVOFAZNOG TRENJA	5
5. PRORAČUN PADA TLAKA THOMOVOM METODOM.....	6
5.1. pad tlaka uzrokovan akceleracijom	6
5.2. pad tlaka uzrokovan trenjem	8
5.3. pad tlaka uzrokovan gravitacijom	10
6. OVISNOST PADA TLAKA O ISPORUČENOM TOPLINSKOM TOKU	12
7. OVISNOST PADA TLAKA O PROTOKU	19
8. UTJECAJ PROMJERA CIJEVI NA PAD TLAKA	27
9. UTJECAJ ULAZNOG TLAKA VODE NA PAD TLAKA	29
10. ZAKLJUČAK	34
11. LITERATURA.....	35

POPIS SLIKA

Slika 1. Oblici dvofaznog strujanja kroz vertikalnu cijev.....	4
Slika 2. Ovisnost vrijednosti faktora r_2 o masenom udjelu pare x.....	8
Slika 3. Ovisnost faktora r_3 o masenom udjelu x za različite ulazne tlakove.....	10
Slika 4. Ovisnost faktora r_4 o masenom udjelu pare x.	11
Slika 5. Ovisnost masenog udjela pare x o dovedenom toplinskom toku Φ.	14
Slika 6. Utjecaj masenog udjela pare na ukupni pad tlaka.	15
Slika 7. Ovisnost ukupnog pada tlaka o dovednoj toplini.	16
Slika 8. Ovisnost akceleracijske komponente pada tlaka o masenom udjelu pare.	16
Slika 9. Ovisnost komponente trenja pada tlaka o masenom udjelu pare x.....	17
Slika 10. Ovisnost gravitacijske komponente pada tlaka o masenom udjelu pare x.	17
Slika 11. Ovisnost svih komponenti pada tlaka o masenom udjelu pare x.	18
Slika 12. Utjecaj protoka na padove tlaka u grijanoj cijevi.	21
Slika 13. Utjecaj protoka na padove tlaka u jednofaznom strujanju.....	21
Slika 14. Odnos jednofaznog i dvofaznog strujanja za varijaciju protoka.	22
Slika 15. Karakteristike cjevovoda i pumpe.	23
Slika 16. Ovisnost masenog udjela o ulaznom volumnom protoku.	23
Slika 17. Ovisnost akceleracijske komponente o masenom udjelu pare.	24
Slika 18. Ovisnost komponente trenja o masenom udjelu pare.	24
Slika 19. Ovisnost gravitacijske komponente pada tlaka o masenom udjelu pare.	25
Slika 20. Prikaz odnosa komponenti za promjenjivi protok.	26
Slika 21. Ovisnost akceleracijske komponente o promjeru cijevi.	28
Slika 22. Utjecaj promjera cijevi na komponentu trenja.	28
Slika 23. Ovisnost masenog udjela pare o ulaznom tlaku.	30
Slika 24. Ovisnost akceleracijske komponente o ulaznom tlaku.	31
Slika 25. Ovisnost komponente trenja o ulaznom tlaku.	31
Slika 26. Ovisnost gravitacijske komponente o ulaznom tlaku.....	32
Slika 27. Odnos komponenti pada tlaka o ulaznom tlaku.	32
Slika 28. Utjecaj ulaznog tlaka na ukupni pad tlaka u dvofaznom području.	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti faktora alfa i gama.	6
Tablica 2. Vrijednosti r_2 za zadane vrijednosti x-a.	7
Tablica 3. Vrijednost faktora r_3 u ovisnosti o udjelu pare i ulaznom tlaku.	9
Tablica 4. Ovisnost pada tlaka o dovedenom toplinskom toku.	13
Tablica 5. Vrijednosti masenih udjela i ukupnog pada tlaka za dvofazno strujanje.	20
Tablica 6. Ovisnost pada tlaka o protoku u jednofaznom strujanju.	20
Tablica 7. Vrijednosti komponenti pada tlaka u ovisnosti o promjeru cijevi za dvofazno područje.	27
Tablica 8. Utjecaj promjera cijevi na pad tlaka u jednofaznom području.	27
Tablica 9. Svojstva radnog fluida za različite ulazne tlakove.	29
Tablica 10. Maseni udio, Reynoldsov broj, faktor trenja za različite tlakove.	29
Tablica 11. faktori dvofaznog trenja, komponente pada tlaka, ukupni pad tlaka za različite ulazne tlakove.	30

POPIS OZNAKA

f_{1f} [-] – faktor trenja u jednofaznom području

Re [-] – Reynoldsov broj

ρ [(kg/m³) - gustoća fluida koji struji.

v [m/s] - brzina strujanja fluida u cijevi.

d [m] - promjer promatrane cijevi

μ [Pa s] - dinamička viskoznost fluida.

f_{2f} [-] – faktor trenja u dvofaznom području

μ' [Pa s] – dinamička viskoznost vrele kapljevine

μ'' [Pa s] – dinamička viskoznost suhozasićene pare

Δp_{ak} [Pa] – pad tlaka uzrokovan akceleracijom u dvofaznom području

r_2 [-] – množitelj akceleracijske komponente

m [kg/s] – maseni protok

A [m²] – poprečni presjek cijevi

n [-] – broj cijevi

v' [m³/ kg] – specifični volumen vrele kapljevine

x_i [-] - maseni sadržaj pare na izlazu iz cijevi

α [-] - odnos specifičnih volumena parne i tekuće faze

γ [-] - bezdimenzionalni faktor skliza

Δp_{tr} [Pa] – pad tlaka uzrokovan trenjem

l [m] - duljina cijevi

m [kg/s] - maseni protok

r_3 [-] - množitelj pada tlaka uslijed trenja u dvofaznom strujanju

g [m/s²] – akceleracija gravitacije

h [m] – visinska razlika

Δp_{gr} [Pa] – pad tlaka uzrokovan gravitacijom

r_4 [-] – množitelj pada tlaka uzrokovanog gravitacijom u dvofaznom području

h' [kJ/kg] – entalpija vrele kapljevine

h'' [kJ/kg] – entalpija suhozasićene pare

Φ [W] – predani toplinski tok

h_1 [kJ/kg] – ulazna entalpija

h_2 [kJ/kg] – izlazna entalpija

T [°C] - temperatura

Q [m³/s] – volumni protok

SAŽETAK

Rad ima za cilj prikazati utjecaj dvofaznog toka na vrijednost pada tlaka, odnosno na sve komponente koje čine ukupni pad tlaka. Nadalje, prikazuje se utjecaj toplinskog toka, protoka, dimenzija cjevovoda i ulaznog tlaka kapljevine na maseni udio pare te posljedično tome i na pad tlaka i njegove komponente. Utjecaj toplinskog toka, protoka, dimenzija cjevovoda i ulaznog tlaka kapljevine prikazan je za svaki čimbenik zasebno. Podaci koji prikazuju utjecaj navedenih faktora prikazani su tablično i grafički.

Ključne riječi: dvofazni tok, pad tlaka, toplinski tok, protok, dimenzije cjevovoda, ulazni tlak kapljevine

SUMMARY

The thesis aims to show the influence of two-phase flow on the value of the pressure drop, that is, on all the components that make up the total pressure drop. Furthermore, the influence of heat flow, flow rate, pipeline dimensions and liquid inlet pressure on the mass fraction of steam and, consequently, on the pressure drop and its components is shown. The influence of heat flow, flow rate, pipeline dimensions and liquid inlet pressure is shown for each factor separately. The data showing the impacts of each factor are presented in tabular and graphical form.

Key words: two-phase flow, pressure drop, heat flow, flow, pipeline dimensions, liquid inlet pressure

1. UVOD

Dvofazno strujanje fluida u cijevima predstavlja problem u proračunima izmjenjivača topline. Razumijevanje dvofaznog strujanja zahtjeva znanja o strukturi i djelovanju dviju faza jedne na drugu. Međusobno djelovanje faza do te je razine kompleksno da se do sada stečenim znanjima i iskustvom ne može precizno opisati.

Dvofazni sustav plin – kapljevina izuzetno je složen zbog pojave deformacija na dodiru faza te kompresibilnosti plinovite faze. Upravo zbog te složenosti, pad tlaka do kojeg dolazi pri dvofaznom strujanju ne može se precizno opisati, već se razmatra na temelju iskustva preko različitih karakterističnih značajki koje obuhvaćaju utjecaj mjerodavnih veličina na pad tlaka.

Dvofazno strujanje plinsko - kapljevinskih smjesa istraživali su mnogi znanstvenici koji su polazeći od dotadašnjih iskustava iz praktičnih razloga uvodili više vrsta ograničenja i pojednostavljenja s ciljem pronalaženja što jednostavnijeg, ali ne na uštrb kvalitete rješenja tako da u krajnosti imamo dovoljno točan postupak za proračun pada tlaka dvofaznog strujanja.

Namjera rada je prikazati osobitosti različitih oblika dvofaznog strujanja, opisati postupke kojima je moguće što praktičnije i točnije procijeniti pad tlaka kod dvofaznog strujanja i u konačnici to prikazati tablično i grafički kako bi se stekao što bolji uvid u utjecaj dvofaznog strujanja na pad tlaka.

2. MODELI POJEDNOSTVALJENA OPISA DVOFAZNOG STRUJANJA

2.1. homogeni model

Homogeni model je daleko najjednostavniji način za analizu dvofaznog strujanja. Model se zasniva na pretpostavci da se dvofazni tok može opisati ponašanjem jednofaznog tako da se svojstva dvofaznog toka izračunavaju interpolacijom svojstava parne i tekuće faze.

2.2. model odvojenih tokova

Model odvojenih tokova polazi od pretpostavke, kako mu i ime kaže, da se parni i kapljeviti tok promatraju i računaju zasebno svaki posebno. Uz tu pretpostavku, za parnu i kapljevitu fazu odvojeno se mogu pisati jednadžbe održanja mase, količine gibanja te energije. Zbog pretpostvaljene odvojenosti tokova potrebno je, dodatno u odnosu na homogeni model, poznavati presjek svake faze kao i interakciju između faza.

2.3. model temeljen na oblicima strujanja

Model zasnovan na oblicima strujanja opisuje nekolicinu osnovnih režima strujanja i izgradnju dvofaznog modela temeljenu na pretpostavkama koje pojednostavljuju stvarna događanja te su prilagođene svakom od oblika strujanja. Jednadžbe se rješavaju u granicama pojedinih opisanih oblika strujanja te je stoga potrebno poznavati osnovne karakteristike svakog oblika strujanja kako bi se mogli razlikovati jedan od drugoga.

3. OBLICI STRUJANJA DVOFAZNOG TOKA

3.1. mjehurićasti tok

Mjehurićasti tok je prvi tok koji se pojavljuje pri isparavanju vode te je u ovom toku parna faza diskretno raspoređena u obliku mjehurića unutar dominantne tekuće faze. Veličina mjehuriće je znatno manja od promjera cijevi.

3.2. čepasti ili klipasti tok

U trenutku kada mjehuri postižu veličine koje su približno jednake veličini promjera cijevi dobivamo efekt plinskog čepa jer mjehur izgleda kao čep u boci. Dio mjehura koji gleda u smjeru toka ima pravilan sferni oblik, a stražnji dio mjehura je nepravilnoga oblika. Uz stijenkiju cijevi između same stijenke i velikog mjehura odnosno svojevrsnog čepa nalazi se tanki film tekuće faze. Između parnih čepova nalazi se dominantno tekućina koja može sadržavati male parne mjehuriće karakteristične za mjehurićasti tok.

3.3. bućkasti tok

Bućkasti oblik dvofaznog toka nastaje razbijanjem pravilnih parnih čepova iz prethodne faze. Razbijanjem čepova dolazi do kaotičnih nepravilnih kretanja mjehura nepravilnih oblika, raznih veličina u središnjem dijelu cijevi dok tekuća faza koja se nalazi između takovih mjehura i dalje zadržava kontakt sa stijenkom cijevi u obliku filma.

3.4. prstenasti tok

Nakon što parna faza zauzme središnji dio cijevi spajanjem svih mjehura opisanih u bućkastom toku stvara se filmski prsten na stijenci cijevi. Dodir parne faze i filma tekućine dovodi do valova na površini tekuće faze koji se postepeno povećavaju i otkidaju od filma tekućine te tako disperzirane kapljice u parnoj fazi pomalo stvaraju sljedeću fazu.

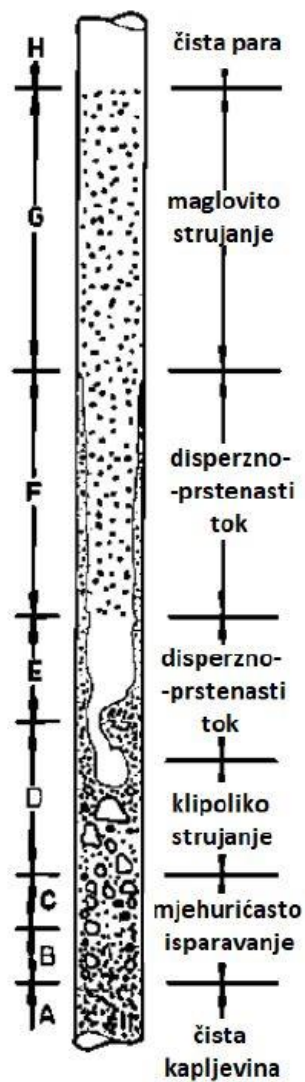
3.5. disperzni tok

Disperzni tok je posljednji oblik toka dvofaznog strujanja te kao takav predstavlja negativ mjehurićastog toka. Što su u mjehurićastom toku parni mjehuri, u disperznom su disperzirane

kapljice tekuće faze. Parna faza zauzima puni profil cijevi, a u njoj se nalaze raspršene kapljice tekuće faze.

Nakon isparavanja posljednje kapljice u disperznom toku nastupa jednofazno strujanje parne faze. Mjehurićasti i disperzni tok se, kao tokovi s izrazitom dominacijom jedne faze te jednolikom raspodjelom nedominantne faze, jedini od navedenih mogu dovoljno dobro opisati homogenim modelom strujanja dvofaznog toka.

Na slici vidimo uzdužnu raspodjelu strujanja od kapljevite do parne faze. Na slici 1. je bučkasti tok prikazan na prijelazu iz faze D u fazu E.



Slika 1. Oblici dvofaznog strujanja kroz vertikalnu cijev.

4. KOEFICIJENT DVOFAZNOG TRENJA

Postoje u literaturi različite eksperimentalne korelacije kojima se može izraziti koeficijent trenja u jednofaznom toku. Za turbulentni režim strujanja, odnosno onaj u kojem je $Re > 4000$ u relativno glatkim cijevima najčešće se uzima u obzir korelacija:

$$f_{1f} = 0,046 \times Re^{-0,2} \quad (1)$$

Reynoldsov broj predstavlja bezdimenzijsku karakteristiku prema kojoj se određuje je li strujanje laminarno ili turbulentno. Računa se na sljedeći način:

$$Re = \frac{\rho \times v \times d}{\mu} \quad (2)$$

f_{1f} [-] – faktor trenja u jednofaznom području

Re [-] – Reynoldsov broj

ρ [(kg/m³) - gustoća fluida koji struji.

v [m/s] - brzina strujanja fluida u cijevi.

d [m] - promjer promatrane cijevi

μ [Pa s] - dinamička viskoznost fluida.

Analogno tome faktor trenja za dvofazni tok može se izračunati formulom:

$$f_{2f} = f_{1f} \times \left[1 + x \left(\frac{\mu'}{\mu''} - 1 \right) \right]^{-0,2} \quad (3)$$

f_{2f} [-] – faktor trenja u dvofaznom području

μ' [Pa s] – dinamička viskoznost vrele kapljevine

μ'' [Pa s] – dinamička viskoznost suhozasićene pare

5. PRORAČUN PADA TLAKA THOMOVOM METODOM

Thomova metoda proračuna pada tlaka razvijena je na temelju rezultata mjerenja dvofaznog toka u grijanim cijevima. Metoda daje dovoljno pouzdane rezultate u rasponu tlakova od 1 do 220 bara te za gustoće masenog toka vrijednosti veće od 5.8 kg/sm². Thomova metoda je napredak u odnosu na homogeni model zbog toga što uzima u obzir mogućnost da su brzine parne i kapljevite faze različite te uzima u obzir i utjecaj masenog sadržaja pare na svaku od komponenti pada tlaka.

5.1. pad tlaka uzrokovan akceleracijom

Akceleracijska komponenta pada tlaka računa se sljedećom formulom:

$$\Delta p_{ak} = \left(\frac{m}{A \times n} \right)^2 \times v' \times r_2 \quad (4)$$

gdje se r_2 , faktor akceleracijske komponente, računa na sljedeći način:

$$r_2 = [1 + x_i \times (\gamma - 1)] \times \left(1 + x_i \times \frac{\alpha - \gamma}{\gamma} \right) - 1 \quad (5)$$

r_2 [-] – množitelj akceleracijske komponente u dvofaznom toku

m [kg/s] – maseni protok

A [m²] – poprečni presjek cijevi

n [-] – broj cijevi

v' [m³/kg] – specifični volumen vrele kapljevine

x_i [-] - maseni sadržaj pare na izlazu iz cijevi

α [-] - odnos specifičnih volumena parne i tekuće faze

γ [-] - bezdimenzionalni faktor skliza

Vrijednosti α i γ mogu se naći u tablici 1.

p(bar)	1	17	41	86	145	207	221
α	1610	99,1	38,3	15,33	6,65	2,48	1
γ	246	40	20	9,8	4,95	2,15	1

Tablica 1. Vrijednosti faktora alfa i gama.

U tablici 2. prikazane su vrijednosti masenog udjela x i faktora r_2 . Iz tih podataka napravljen je graf koji prikazuje grafički ovisnost faktora r_2 o masenom udjelu pare x .

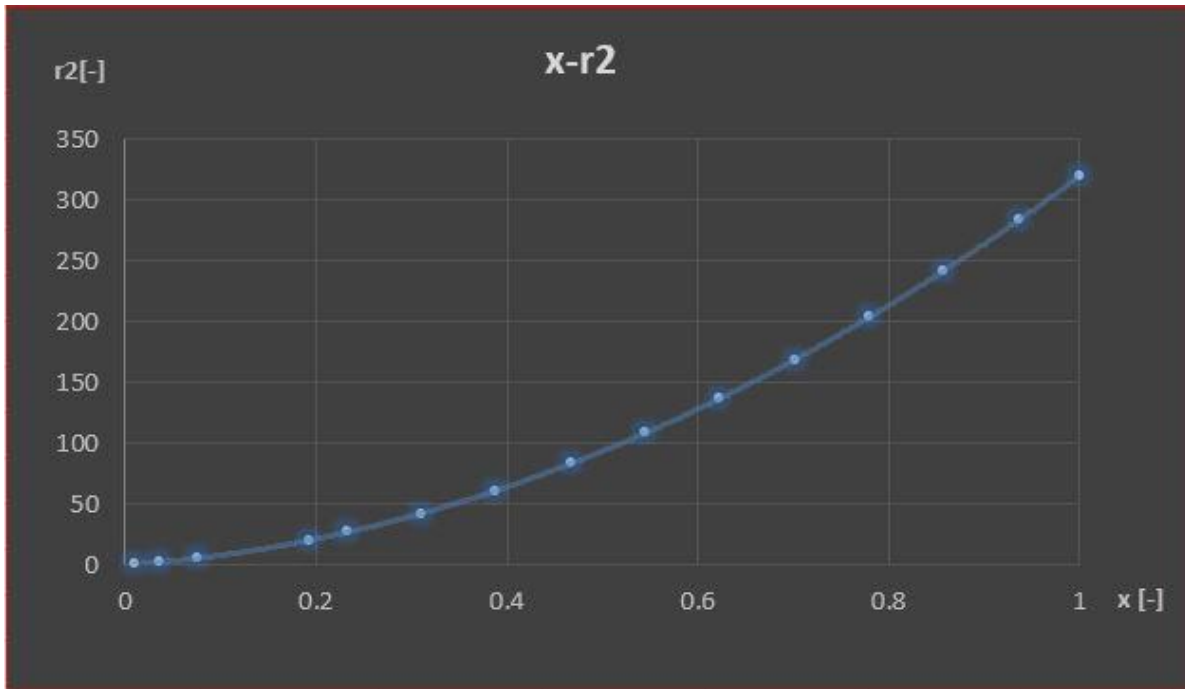
Za ulazni tlak od 5 bara vrijednosti koeficijenta izračunate su interpolacijom te iznose:

$$\alpha = 320,6$$

$$\gamma = 50,02.$$

x	r₂
0.01	0.570893
0.04	2.358527
0.08	5.653666
0.19	20.40172
0.23	26.93862
0.31	42.44374
0.39	61.19061
0.47	83.17925
0.54	108.4096
0.62	136.8818
0.70	168.5957
0.78	203.5514
0.86	241.7488
0.94	283.188
0.999978	319.5871

Tablica 2. Vrijednosti r_2 za zadane vrijednosti x -a.



Slika 2. Ovisnost vrijednosti faktora r2 o masenom udjelu pare x.

Slika jasno pokazuje porast faktora r2 u ovisnosti o masenom udjelu pare x. Što je maseni udio pare veći to je i utjecaj akceleracije odnosno faktor r2 veći što je i logično s obzirom na ubrzavanje parne faze zbog višestruko manje gustoće.

5.2. pad tlaka uzrokovan trenjem

Pad tlaka uslijed trenja na stijenci cijevi i uslijed lokalnih otpora računa se kao za jednofaznu tekućinu jednakog protoka na granici zasićenja pomnožen množiteljem dvofaznog trenja r_3 .

$$\Delta p_{tr} = \left(4 \times f_2 \times \frac{l}{d} \right) \times \frac{v'}{2} \times \left(\frac{m}{A \times n} \right)^2 \times r_3 \quad (6)$$

f_2 [-] - dvofazni faktor trenja

l [m] - duljina cijevi

d [m] - promjer cjevovoda

m [kg/s] - maseni protok

A [m²] - poprečni presjek cijevi

n [-] - broj cijevi

v' [m³/kg] - specifični volumen vrele kapljevine

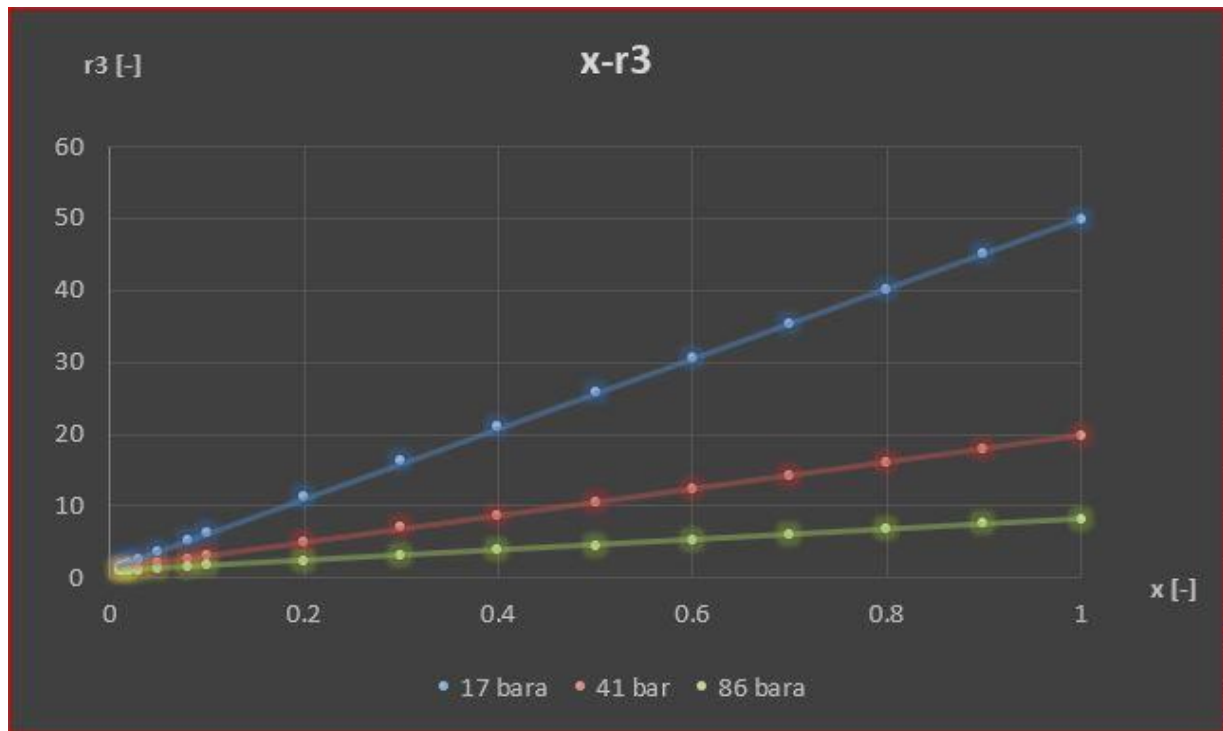
x_i [-] - maseni sadržaj pare na izlazu iz cijevi.

r_3 [-] - množitelj dvofaznog trenja

I u ovom slučaju kao i u prethodnom kod pada tlaka uslijed akceleracije r_3 je u funkciji tlaka i masenog sadržaja pare na izlazu iz cijevi. Zbog specifičnog karaktera izmjerenih vrijednosti nije moguće r_3 odrediti algebarskim izrazom pa je i za njega dan tablični prikaz.

x_i	p(bar)				
	17	41	86	145	207
0	1,00	1,00	1,00		
0,01	1,49	1,25	1,05		
0,015	1,76	1,25	1,05		
0,02	2,05	1,38	1,08	1,02	
0,03	2,63	1,62	1,15	1,05	
0,04	3,19	1,86	1,23	1,07	
0,05	3,71	2,09	1,31	1,10	
0,06	4,21	2,30	1,40	1,12	
0,07	4,72	2,5	1,48	1,14	
0,08	5,25	2,7	1,56	1,16	1,04
0,09	5,78	2,9	1,64	1,19	1,05
0,10	6,3	3,11	1,71	1,21	1,06
0,15	9,0	4,11	2,1	1,33	1,09
0,2	11,4	5,08	2,47	1,46	1,12
0,3	16,2	7,0	3,2	1,72	1,18
0,4	21,0	8,80	3,89	2,01	1,26
0,5	25,9	10,6	4,55	2,32	1,33
0,6	30,5	12,4	5,25	2,62	1,41
0,7	35,2	14,2	6,0	2,93	1,5
0,8	40,1	16,0	6,75	3,23	1,58
0,9	45,0	17,8	7,5	3,53	1,66
1,0	49,93	19,65	8,165	3,832	1,74

Tablica 3. Vrijednost faktora r_3 u ovisnosti o udjelu pare i ulaznom tlaku.



Slika 3. Ovisnost faktora r_3 o masenom udjelu x za različite ulazne tlakove.

Iz slike 3. vidi se kako je utjecaj faktora r_3 sve veći što je veći maseni udio pare te da za veće ulazne tlakove vode ima manji rast, odnosno za isti udio pare faktor r_3 je veći što je ulazni tlak manji.

5.3. pad tlaka uzrokovan gravitacijom

Gravitacijski utjecaj na pad tlaka također je uzet u obzir na sličan način kao u homogenom modelu uz množitelja r_4 .

$$\Delta p_{gr} = \frac{g \times h}{v'} \times r_4 \quad (7)$$

g [m/s²] – akceleracija gravitacije

h [m] – visinska razlika

v' [m³/kg] - specifični volumen vrele kapljevine

pri čemu se r_4 računa na sljedeći način:

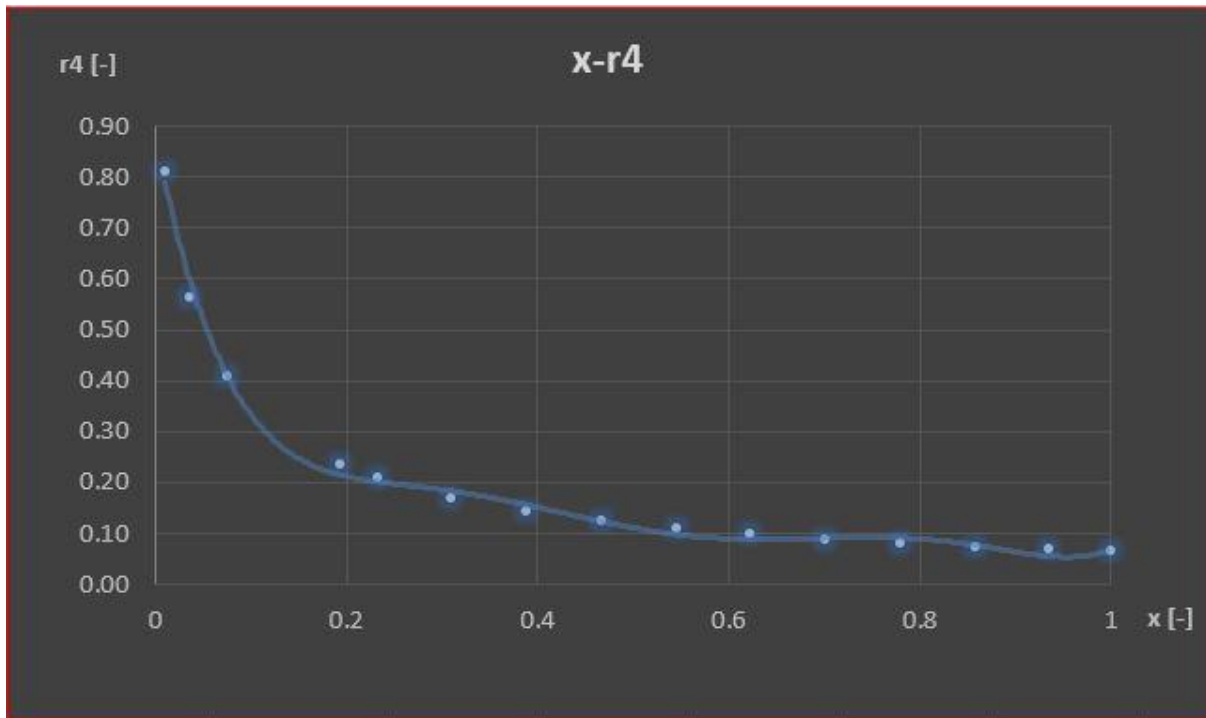
$$r_4 = \frac{\gamma-1}{\alpha} + \frac{\gamma-\gamma}{(\gamma-1)^2} \times \frac{\ln[1+x_i \times (\gamma-1)]}{x_i} \quad (8)$$

Vrijednosti γ i α očitavaju se kao i za akceleracijsku komponentu u tablici 1.

Za ulazni tlak od 5 bara vrijednosti koeficijenta iznose:

$$\alpha = 320,6$$

$$\gamma = 50,02.$$



Slika 4. Ovisnost faktora r_4 o masenom udjelu pare x .

Što je maseni udio pare veći to se faktor r_4 smanjuje odnosno posljedično smanjuje se i pad tlaka uzrokovan gravitacijom jer je gustoća pare višestruko manja od gustoće vode.

6. OVISNOST PADA TLAKA O ISPORUČENOM TOPLINSKOM TOKU

Za početak proračuna izračunat je potrební toplinski tok Φ da bi se za:

vodu

$$T = 70^{\circ}\text{C}$$

$$p = 5 \text{ bara}$$

postiglo stanje gdje je udio pare na izlazu jednak

$$x = 0,01$$

pri masenom protoku

$$m = 5,99 \text{ kg/s.}$$

Uzeti su sljedeći podaci iz Toplinskih tablica:

$$h_1 = 293,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h' = 632,27 \text{ kJ/kg}$$

$$h'' = 2767,38 \text{ kJ/kg}$$

Entalpija h_2 za $x = 0,01$ izračunata je formulom:

$$h_2 = x \cdot h'' + (1-x) \cdot h' \quad (9)$$

Toplinski tok Φ potreban da bi se postigla entalpija h_2 dobiven je formulom:

$$\Phi = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (10)$$

Za dane vrijednosti toplinski tok za koji se na izlazu dobiva udio pare $x=0.01$ iznosi:

$$\Phi = 2157,89 \text{ kW.}$$

Za dane uvjete izvršena je provjera uvjeta gustoće masenog protoka za koje vrijedi Thomova metoda izračuna padova tlaka. Gustoća masenog protoka iznosi $3050,1 \text{ kg/sm}^2$.

U tablici 4. prikazane su vrijednosti entalpije h_2 , masenog udjela x i pripadajućeg pada tlaka izračunatog po Thomovoj metodi za pojedini narinuti toplinski tok Φ .

Φ [kW]	h_2 [kJ/kg]	x	Δp [Pa]
2157.89	653.62	0.01	55588.269
2500	710.73	0.04	81966.951
3000	794.19	0.08	127995.618
4500	1044.59	0.19	352375.932
5000	1128.06	0.23	449795.982
6000	1294.99	0.31	668859.345
7000	1461.92	0.39	925295.792
8000	1628.86	0.47	1208346.125
9000	1795.79	0.54	1507812.401
10000	1962.72	0.62	1846295.643
11000	2129.65	0.70	2212937.414
12000	2296.58	0.78	2619580.996
13000	2463.52	0.86	3056871.437
14000	2630.45	0.94	3524719.988
14820	2767,33	0.99	3924012.680

Tablica 4. Ovisnost pada tlaka o dovedenom toplinskom toku.

Iako su veličine u praksi prevelike, dovedeni toplinski tok povećavan je sve do vrijednosti gotovo čiste suhozasićene pare kako bi se pokazao odnos dovedene topline i udjela pare te pada tlaka.

Za usporedbu, za iste ulazne podatke za negrijanu cijev dobivamo sljedeće podatke:

$$p_{tr} = 11218 \text{ Pa}$$

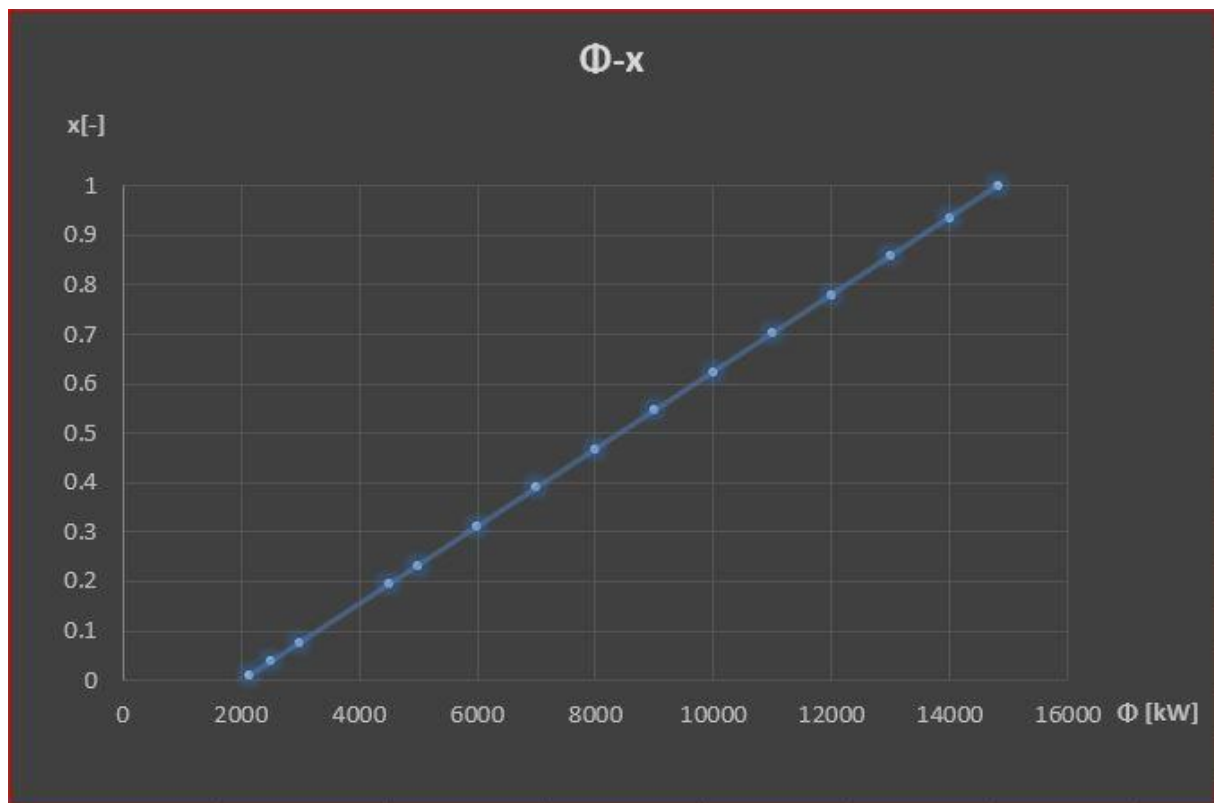
$$p_{gr} = 48972 \text{ Pa}$$

$$p_{uk} = 60190 \text{ Pa}$$

Početni lagani pad vrijednosti ukupnog pada tlaka može se objasniti kao početni dominantni utjecaj gravitacijske komponente koja na početku isparavanja naglo opada dok akceleracijska

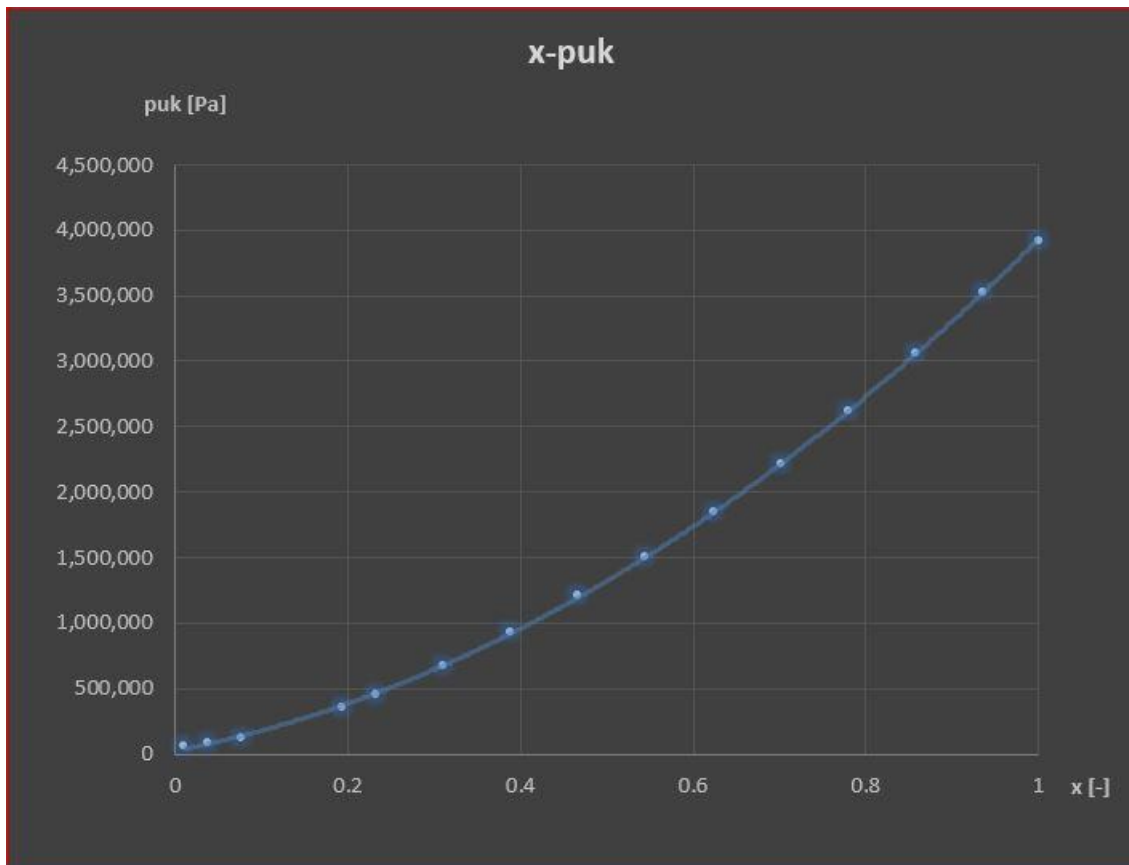
komponenta i komponenta trenja nisu još postigle vrijednosti koje postižu kod većih vrijednosti masenog udjela pare.

Odnos masenog udjela pare x i toplinskog toka Φ zadan je jednadžbama 9 i 10, te je njihov odnos grafički prikazan na slici 5.



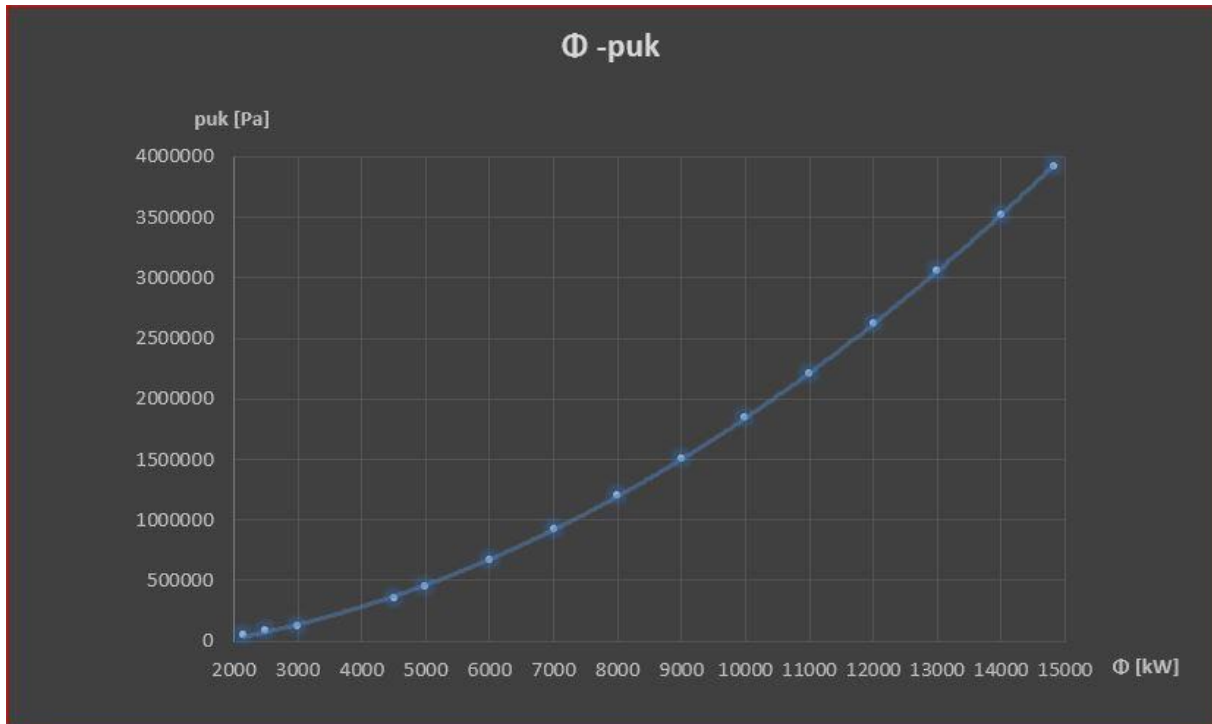
Slika 5. Ovisnost masenog udjela pare x o dovedenom toplinskom toku Φ .

Grafički prikaz odnosa udjela pare i ukupnog pada tlaka biti će prikazan na slici 6. na sljedećoj stranici.



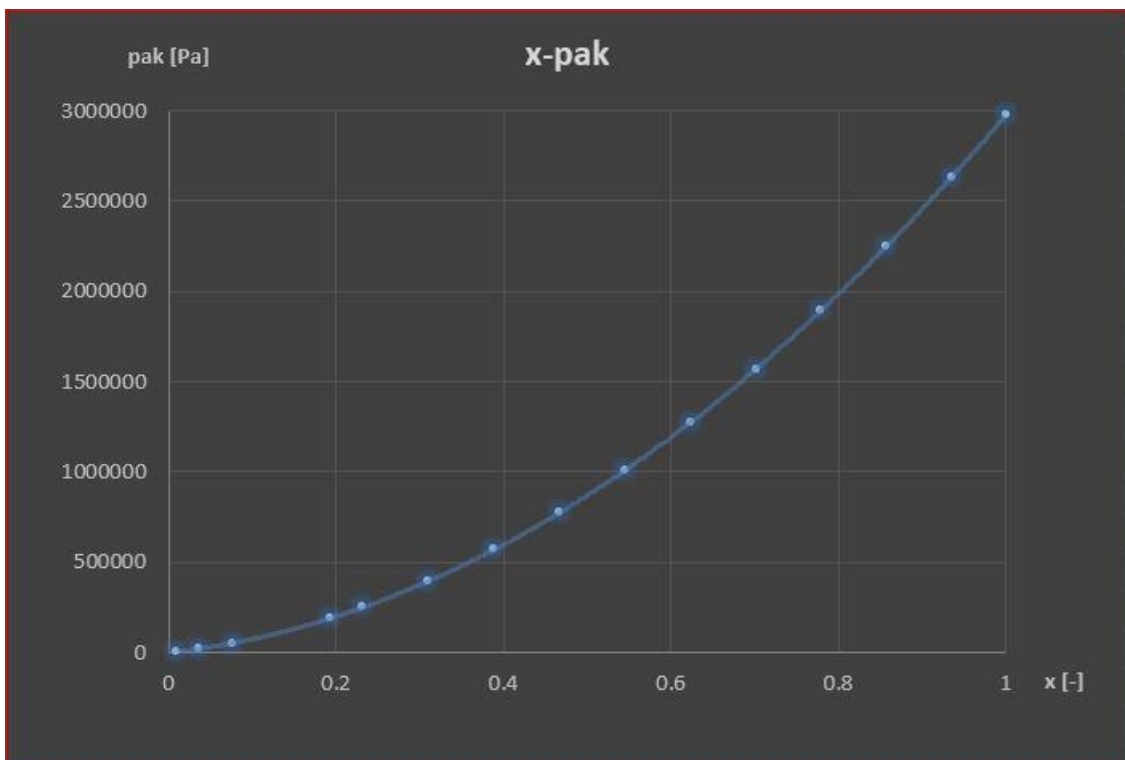
Slika 6. Utjecaj masenog udjela pare na ukupni pad tlaka.

Iz grafa se vidi da je veza udjela pare i pada tlaka zbog dvofaznog strujanja opisana polinomom drugog stupnja. Veza dovedene topline i udjela pare je linearna te je stoga zaključno veza dovedene topline i pada tlaka slična odnosu masenog udjela i ukupnog pada tlaka.

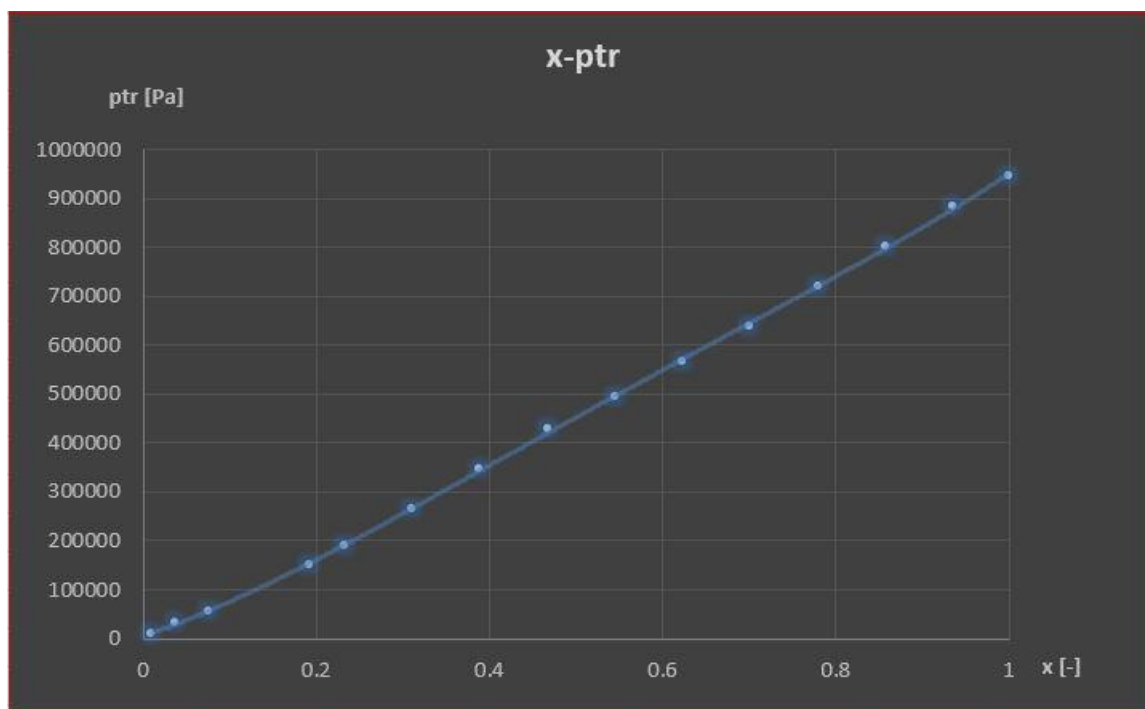


Slika 7. Ovisnost ukupnog pada tlaka o dovednoj toplini.

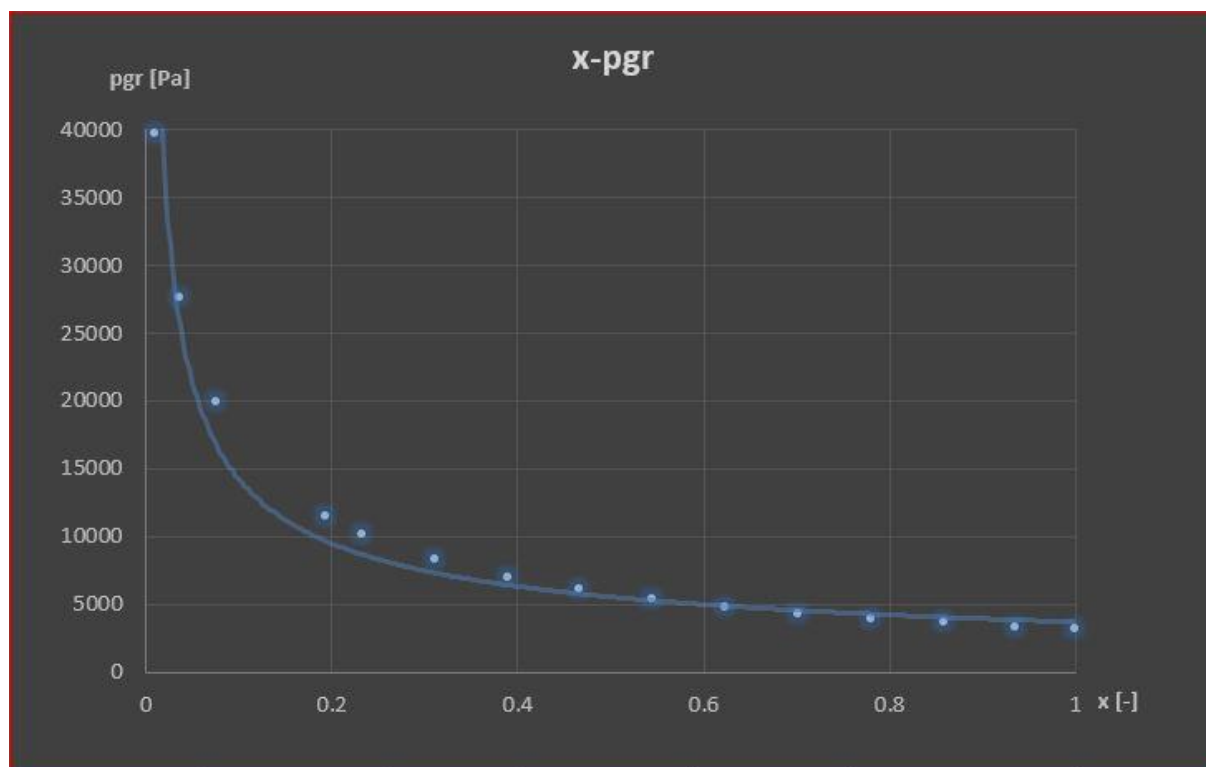
Kako je veza dovedenog toplinskog toka i masenog udjela pare linearna prikazat će se grafovi ovisnosti pojedine komponente pada tlaka o masenom udjelu pare svaka za sebe, a potom i u zajedničkom grafu.



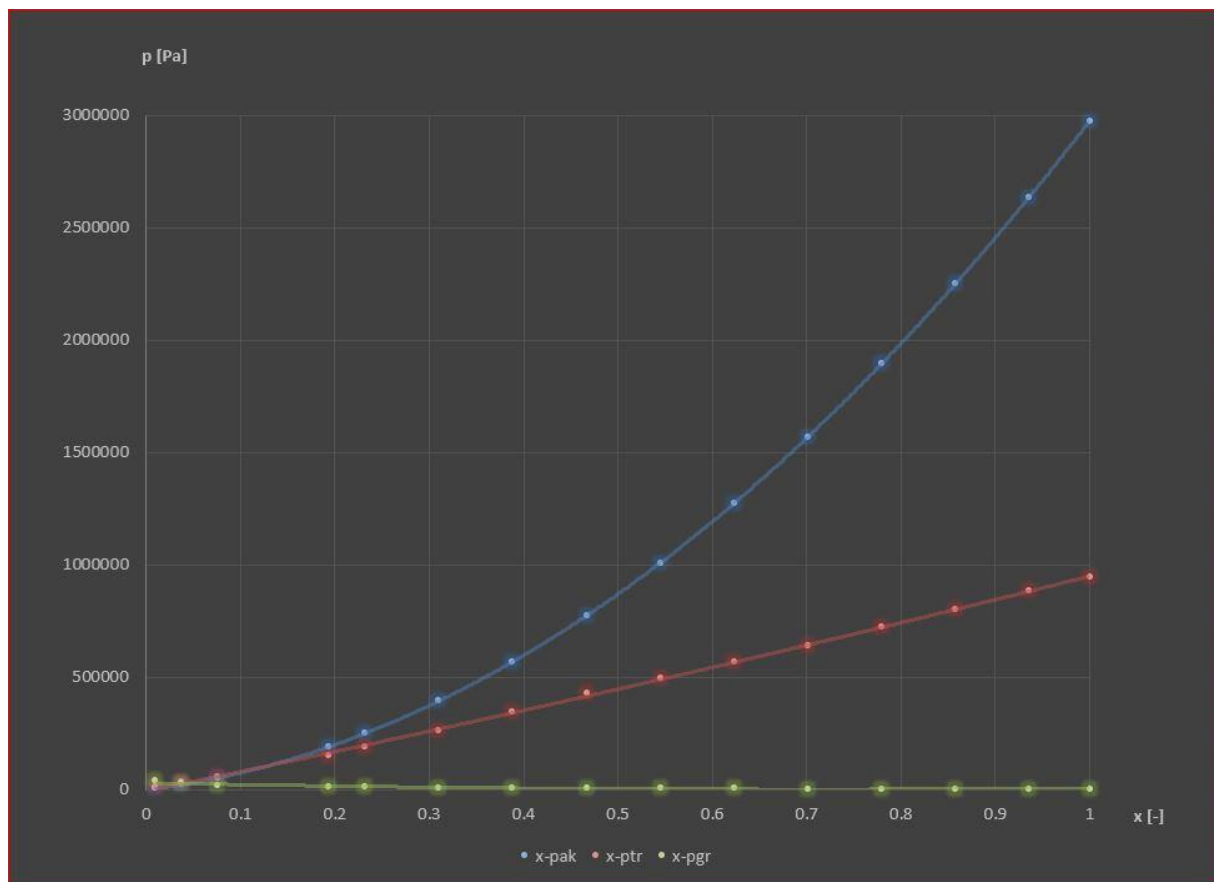
Slika 8. Ovisnost akceleracijske komponente pada tlaka o masenom udjelu pare.



Slika 9. Ovisnost komponente trenja pada tlaka o masenom udjelu pare x .



Slika 10. Ovisnost gravitacijske komponente pada tlaka o masenom udjelu pare x .



Slika 11. Ovisnost svih komponenti pada tlaka o masenom udjelu pare x .

Graf na slici 11. pokazuje stvarni utjecaj pojedine komponente pada tlaka. Više je nego očito koliko je utjecaj akceleracijske komponente utjecajnije od gravitacijske i komponente trenja te da je komponenta trenja također vidljivo veća i utjecajnije od gravitacijske komponente.

7. OVISNOST PADA TLAKA O PROTOKU

Za što slikovitiji prikaz ovisnosti pada tlaka o protoku u fazi isparavanja smanjen je toplinski tok u odnosu na onaj iz prethodnog poglavlja te je pretpostavljen toplinski tok od 1000 kW.

Jednadžbama 9 i 10 tražen je protok koji odgovara vrijednosti masenog udjela pare u iznosu 1,5%.

$$h_2 = x \times h'' + (1 - x) \times h' \quad (9)$$

h_2 [kJ/kg] – izlazna entalpija

x [-] – maseni udio pare

h'' [kJ/kg] – entalpija suhozasićene pare

h' [kJ/kg] – entalpija vrele kapljevine

Za vodu tlaka 5 bara vrijednosti entalpija vrele kapljevine i suhozasićene pare su:

$$h' = 632,27 \text{ kJ/kg}$$

$$h'' = 2767,38 \text{ kJ/kg}$$

Za zadane vrijednosti dobivamo vrijednost entalpije na izlazu:

$$h_2 = 664,36 \text{ kJ/kg}$$

Iz toga se jednadžbom 10 u drugom obliku dobiva maseni protok m .

$$m = \frac{\Phi}{h_2 - h_1} \quad (11)$$

$$m = 2,696 \text{ kg/s}$$

Potom je izračunata vrijednost volumnog protoka Q na ulazu u cijev.

$$Q = \frac{m}{\rho} \quad (12)$$

$$\rho = 998,41 \text{ kg/m}^3$$

$$Q = 0,0027 \text{ m}^3/\text{s}$$

Postupak je izvršen za 10 vrijednosti volumnog protoka na ulazu u cijev pri kojima se pojavljuje dvofazni tok od najmanjeg udjela pare sve do stanja suhozasićene pare.

Izvršena je provjera gustoće masenog protoka kao uvjet za izračun po Thomovoj metodi te on za najmanji protok iznosi 205.9 kg/sm^2 .

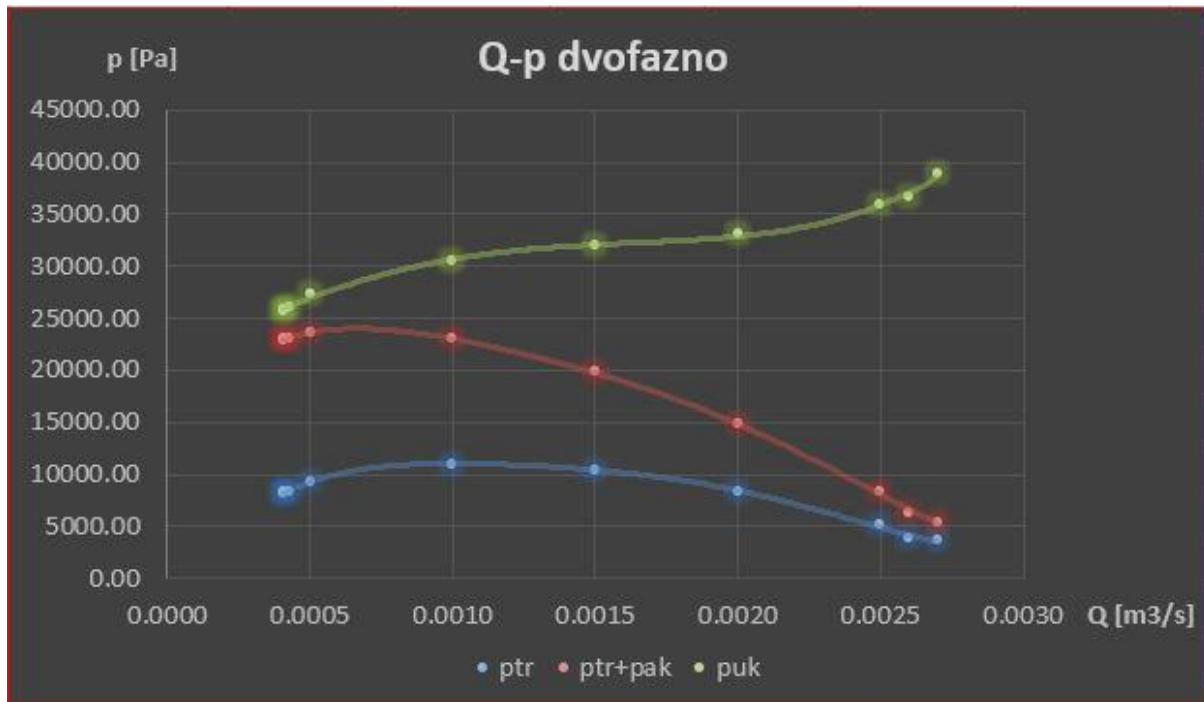
Dobivene vrijednosti su prikazane u tablici 5. na sljedećoj stranici.

Q[m³/s]	w[m/s]	m[kg/s]	x	p_{ak}[Pa]	p_{tr}[Pa]	p_{gr}[Pa]	p_{uk}[Pa]
0.0027	1.375	2.696	0.015	1808.2	3598.3	33444.04	38850.5
0.0026	1.324	2.596	0.02	2495.7	3822.6	30326.48	36644.79
0.0025	1.273	2.496	0.03	3172.1	5139.7	27661.68	35973.49
0.002	1.019	1.997	0.08	6388.1	8378	18282.57	33048.67
0.0015	0.764	1.498	0.15	9327.1	10472.7	12206.15	32006.01
0.001	0.509	0.998	0.3	11989.3	11010.7	7588.31	30588.25
0.0005	0.255	0.499	0.8	14374.5	9282.9	3611.70	27269.15
0.000425	0.216	0.424	0.945	14708.4	8338.6	3028.99	26076.09
0.00041	0.209	0.409	0.985	14774.5	8261.8	2911.93	25948.23
0.000405	0.206	0.404	1.000	14796.4	8075.2	2872.86	25744.44

Tablica 5. Vrijednosti masenih udjela i ukupnog pada tlaka za dvofazno strujanje.

Q [m³/s]	p_{tr}[Pa]	p_{gr}[Pa]	p_{uk}[Pa]
0,0027	1453.485	44897.03	46350.51
0,0026	1358.025	44897.03	46255.05
0,0025	1265.458	44897.03	46162.48
0,002	846.8565	44897.03	45743.88
0,0015	504.5684	44897.03	45401.59
0,001	243.1957	44897.03	45140.22
0,0005	69.83961	44897.03	44966.86
0,000425	52.12618	44897.03	44949.15
0,00041	48.8615	44897.03	44945.89
0,000405	47.79416	44897.03	44944.82

Tablica 6. Ovisnost pada tlaka o protoku u jednofaznom strujanju.



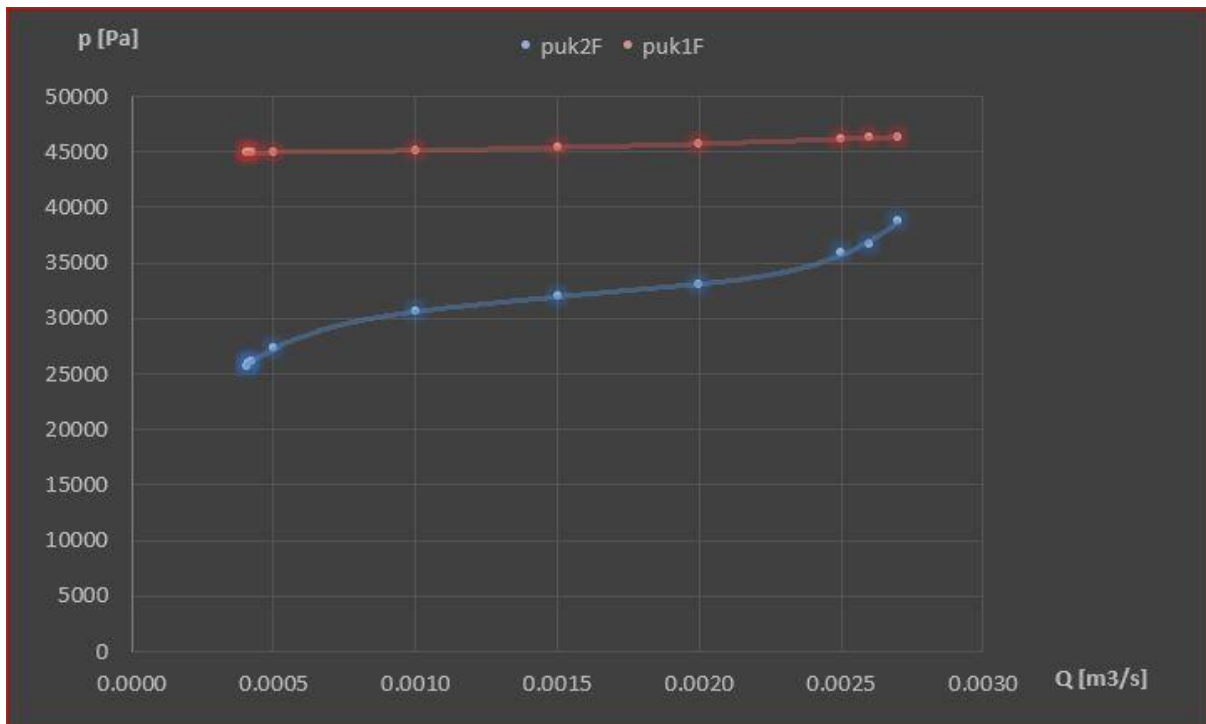
Slika 12. Utjecaj protoka na padove tlaka u grijanoj cijevi.

Za slučaj kad se smanjuje protok vidi se kod dvofazne faze sve veći udio akceleracijske komponente u ukupnom padu tlaka koliko god se protok smanjuje i drastično smanjenje gravitacijske komponente te dominantan utjecaj iste na smanjenje ukupnog pada tlaka.



Slika 13. Utjecaj protoka na padove tlaka u jednofaznom strujanju.

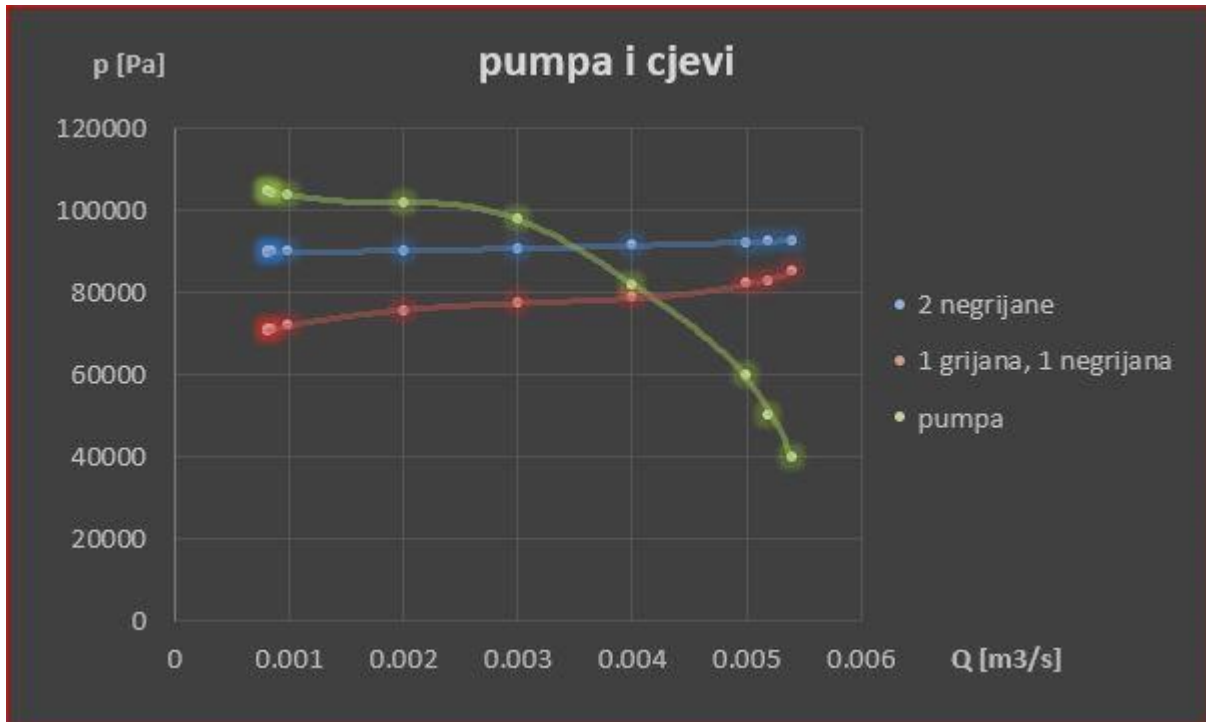
Kod jednofaznog strujanja gravitacijska komponenta ostaje jednaka neovisno o protoku dok je komponenta trenja zanemarivo malena pa je stoga ukupni pad tlaka veći za jednofazno strujanje nego za dvofazno što pokazuje sljedeća slika.



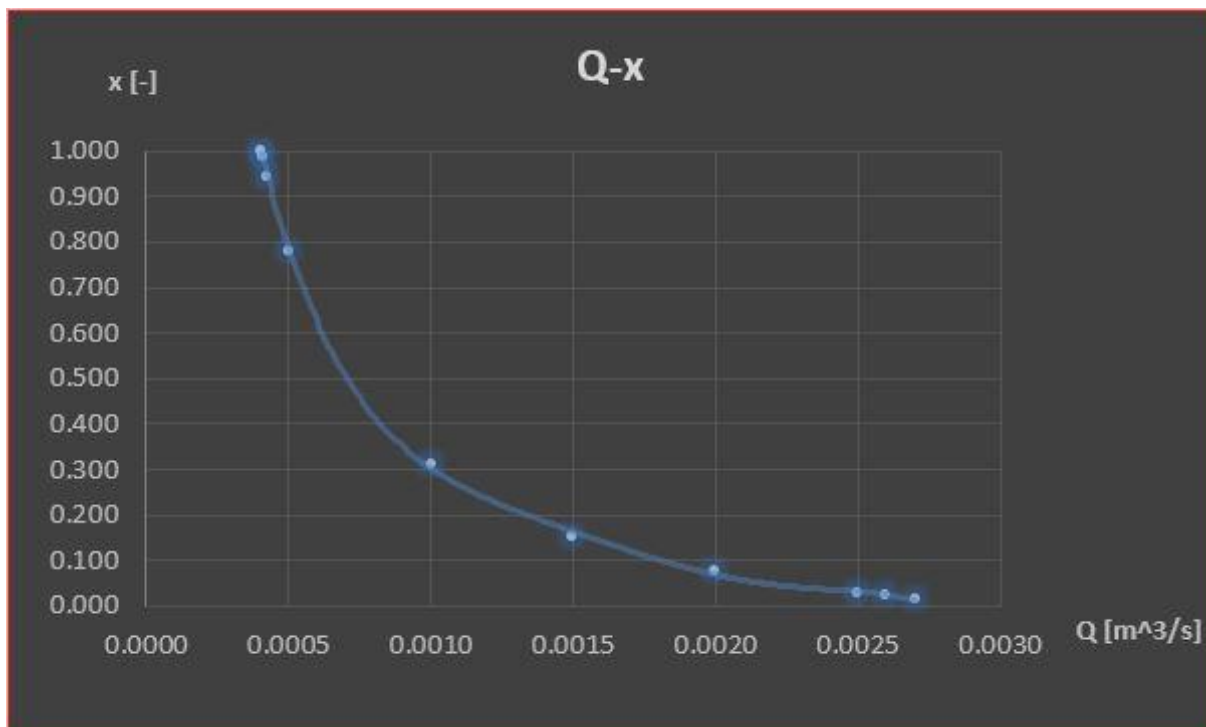
Slika 14. Odnos jednofaznog i dvofaznog strujanja za varijaciju protoka.

Na slici 15. prikazana je i fiktivna karakteristika pumpe na koju je spojen promatrani cjevovod. Uočava se pomak radne točke za grijani cjevovod u ovom slučaju na niži tlak te se mijenja protok kroz cjevovod te dolazi do povećanja protoka kroz cjevovod što dovodi do daljnjih promjena na proračun radne točke.

U slučaju horizontalnih paralelnih cijevi odnos grijane i negrijane cijevi bitno je drugačiji. U horizontalnim cijevima nema utjecaja gravitacijske komponente, koja je dominantna u vertikalnim cijevima, te kod njih dolazi do izraženijeg pada tlaka u grijanoj cijevi u odnosu na negrijanu.

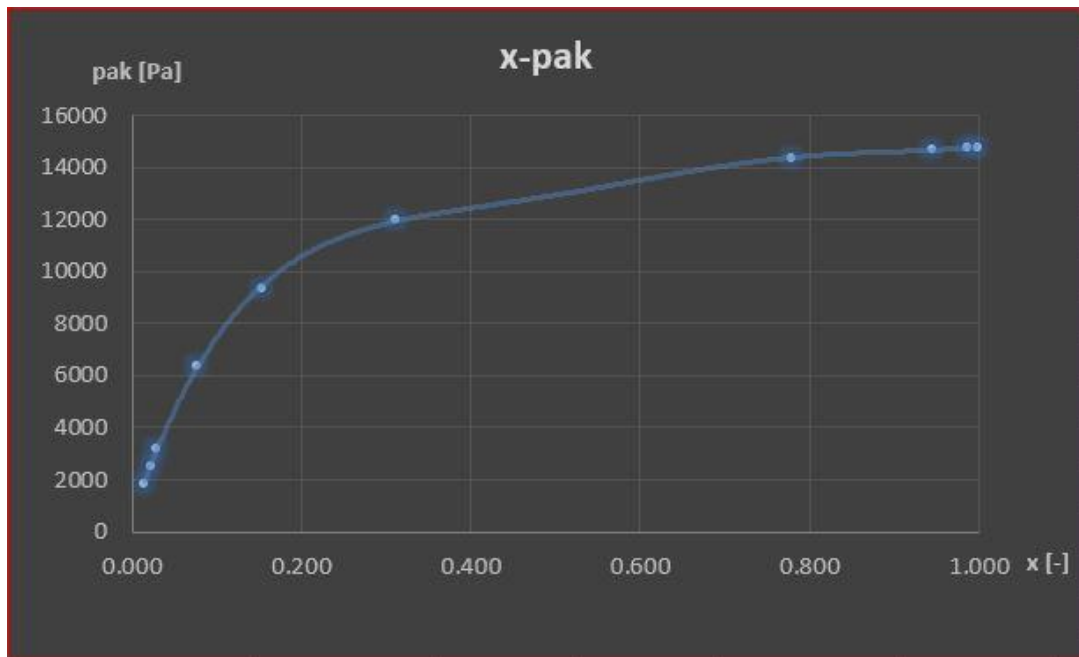


Slika 15. Karakteristike cjevovoda i pumpe.



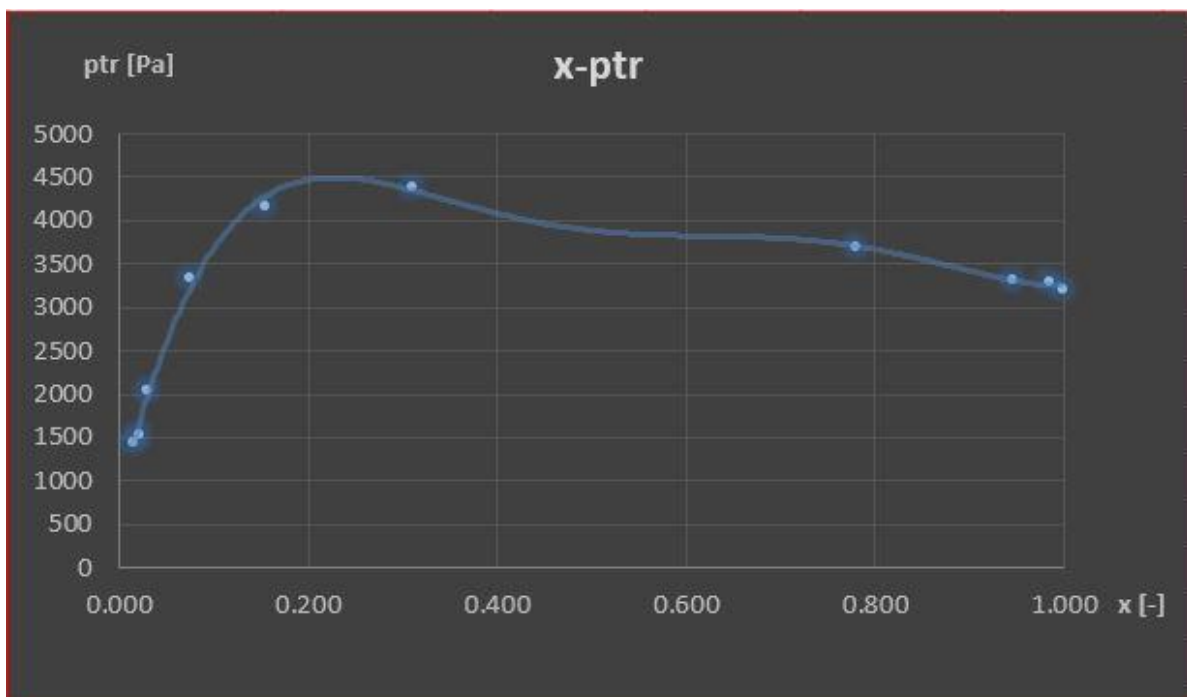
Slika 16. Ovisnost masenog udjela oulaznom volumnom protoku.

Što je protok manji to će se postići veći udio pare jer će jednak toplinski tok biti predan manjoj količini tvari.



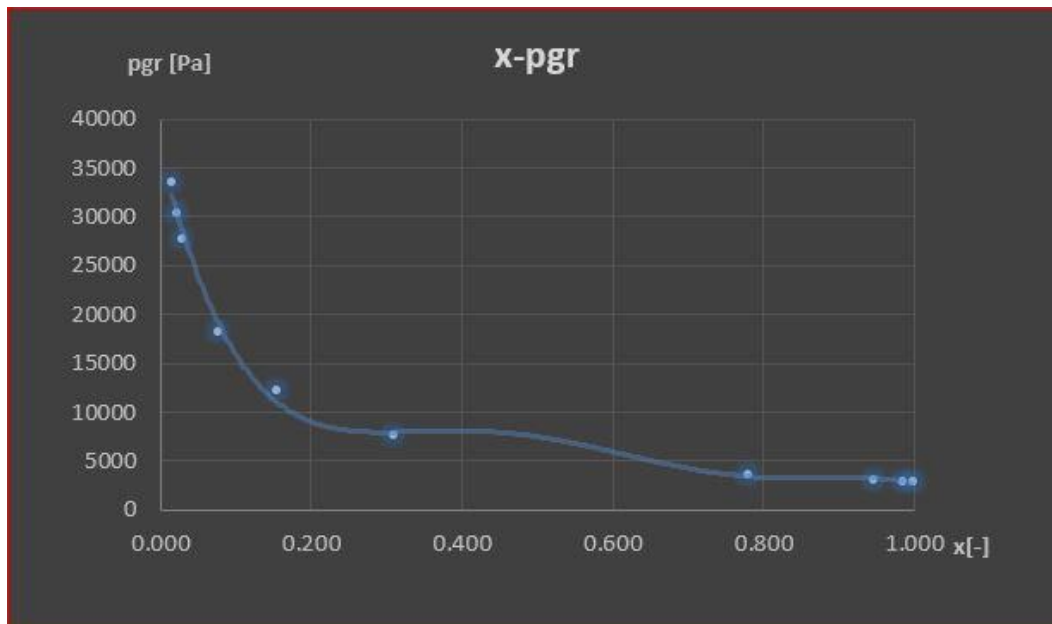
Slika 17. Ovisnost akceleracijske komponente o masenom udjelu pare.

Prvo se vidi nagli rast vrijednosti komponente tlaka akceleracije te se zatim porast smanjuje što je veći udio pare. Nagli porast može se protumačiti ubrzavanjem mjehurića pare sa stijenke cijevi gdje nastaje u tok tekuće faze, a kasniji manji rast posljedica je sve veće dominacije parne faze te daljnjeg smanjenja protoka.



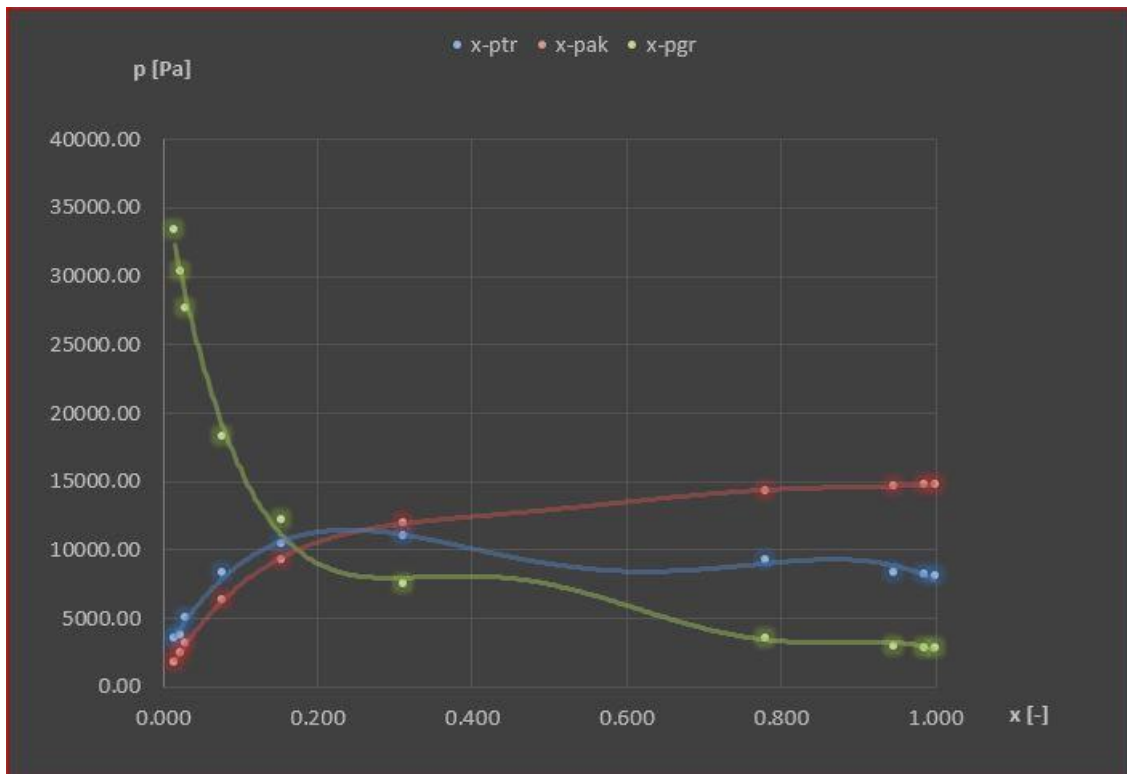
Slika 18. Ovisnost komponente trenja o masenom udjelu pare.

Na slici 18. vidimo nagli porast komponente trenja pada tlaka zbog sve veće izmiješanosti parne i tekuće faze zatim dolazi do relativno jednolikih vrijednosti komponente trenja te na kraju do laganog pada uzrokovanog sve većim udjelom pare i raspršenosti kapljica vode u pari.



Slika 19. Ovisnost gravitacijske komponente pada tlaka o masenom udjelu pare.

Slika prikazuje pad gravitacijske komponente pada tlaka u dvofaznom strujanju s porastom masenog udjela x što je posljedica sve manje i manje gustoće fluida što je veći udio pare.



Slika 20. Prikaz odnosa komponenti za promjenjivi protok.

Graf pokazuje odnos komponenti za razne stadije isparavanja. U početnoj fazi gravitacijska komponenta je izrazito dominantna s obzirom na veliku gustoću vode. Kako raste udio pare tako ona drastično pada dok komponenta akceleracije raste te ju u razini vrijednosti $x = 0.2$ prestiže u vrijednosti te gravitacijska komponenta nastavlja dalje opadati, a akceleracijska rasti.

Graf se uvelike razlikuje od grafova na slikama gdje se opisuju utjecaj isključivo masenog udjela za stalni protok jer na vrijednost pada tlaka uvelike utječe i brzina strujanja koja je sve manja jer se smanjuje i protok pa tako smanjenje brzine spušta vrijednost pada tlaka iako zbog sve većeg udjela pare rastu akceleracijska komponenta i komponenta tranja.

8. UTJECAJ PROMJERA CIJEVI NA PAD TLAKA

Za isti ulazni tlak vode $p = 5$ bara, dovedeni toplinski tok $\Phi = 1000$ kW i protok $Q = 2,7$ L/s kao i u prethodnoj analizi gdje se mijenjao protok i računao pad tlaka sada je ista stvar napravljena za varijaciju promjera cjevovoda. Maseni udio pare i gravitacijska komponenta se ne mijenjaju ovisno o promjeru, ali se akceleracijska komponenta i komponenta trenja značajno mijenjaju promjenom promjera cjevovoda.

Izvršena je provjera gustoće masenog toka za najveću dimenziju cijevi kao uvjet za izračun po Thomovoj metodi, iznosi 423.7 kg/sm².

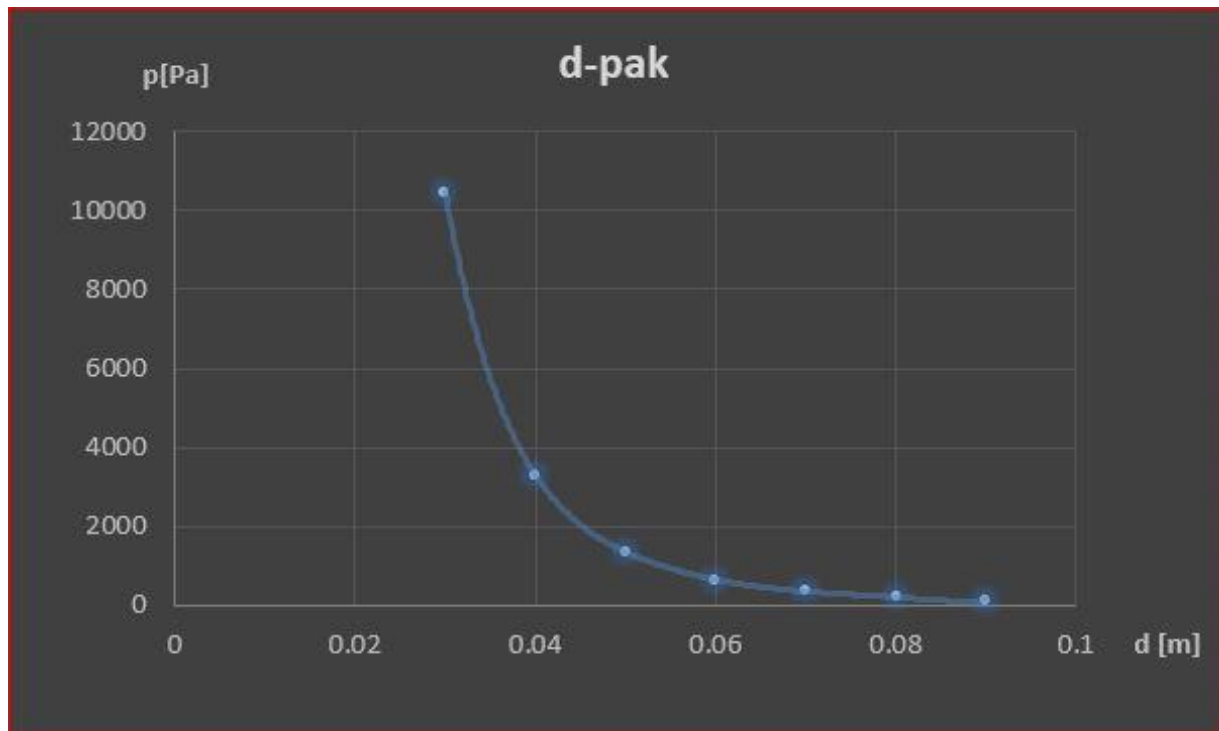
d[m]	p_{ak}[Pa]	p_{tr}[Pa]	p_{gr} [Pa]	p_{uk}[Pa]
0.03	10472.02	12067.797	35465,47	58005.29
0.04	3313.414	3212.993	35465,47	41991.87
0.05	1357.174	1151.128	35465,47	37973.77
0.06	654.5015	497.611	35465,47	36617.58
0.07	353.2836	244.870	35465,47	36063.62
0.08	207.0884	132.487	35465,47	35805.04
0.09	129.2842	77.067	35465,47	35671.82

Tablica 7. Vrijednosti komponenti pada tlaka u ovisnosti o promjeru cijevi za dvofazno područje.

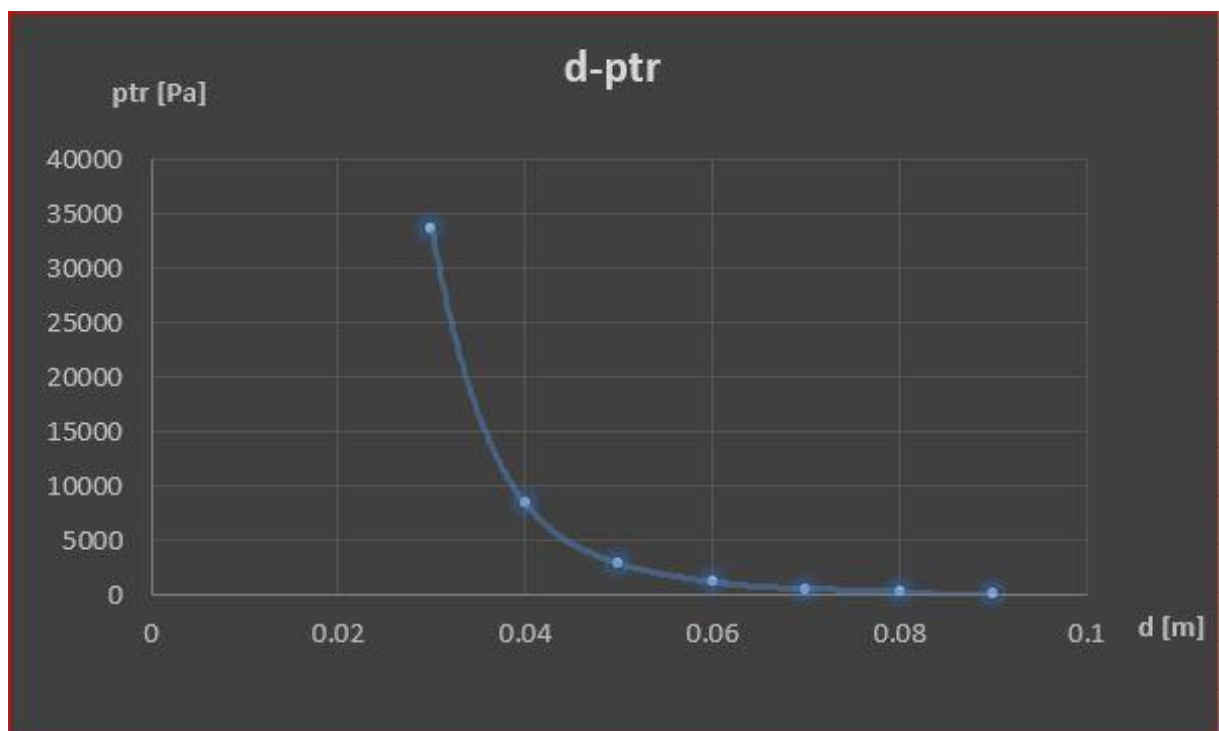
d [m]	p_{tr} [Pa]	p_{gr} [Pa]	p_{uk} [Pa]
0.03	6066.174	48972.01	55038.18
0.04	1615.09	48972.01	50587.1
0.05	578.6429	48972.01	49550.65
0.06	250.1364	48972.01	49222.15
0.07	123.0897	48972.01	49095.1
0.08	66.59762	48972.01	49038.61
0.09	38.73977	48972.01	49010.75

Tablica 8. Utjecaj promjera cijevi na pad tlaka u jednofaznom području.

Kod jednofaznog strujanje vidi se da gravitacijska komponenta ima dominantan utjecaj u odnosu na komponentu trenja te da je ukupna promjena pada tlaka znatno manja nego što je slučaj za dvofazno strujanje.



Slika 21. Ovisnost akceleracijske komponente o promjeru cijevi.



Slika 22. Utjecaj promjera cijevi na komponentu trenja.

9. UTJECAJ ULAZNOG TLAKA VODE NA PAD TLAKA

Za uvjete stalnog toplinskog toka, protoka i dimenzije cijevi promatran je utjecaj promjene ulaznog tlaka kapljevine u grijani cjevovod.

$$\Phi = 1000 \text{ kW}$$

$$Q = 0,0027 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$

Gustoća masenog toka za sve slučajeve iznosi 1372.9 kg/sm^2 te se može primijeniti Thomova metoda za izračun pada tlaka.

p [bar]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]	h''-h' [kJ/kg]	h(70C) [kJ/kg]	mi' x10 ^{^(-6)} [Pa s]	mi'/mi''	v' [m ³ /kg]
2	504.68	2706.24	2201.56	293.16	232.05	17.390	0.0010605
3	561.46	2724.89	2163.43	293.24	215.52	15.820	0.0010732
4	604.72	2738.06	2133.34	293.32	198.99	14.250	0.0010835
5	640.19	2748.11	2107.92	293.40	182.47	12.680	0.0010925
6	670.50	2756.14	2085.64	293.48	177.90	12.264	0.0011006
7	697.14	2762.75	2065.61	293.56	173.32	11.848	0.0011079
8	721.02	2768.30	2047.28	293.65	168.75	11.432	0.0011148

Tablica 9. Svojstva radnog fluida za različite ulazne tlakove.

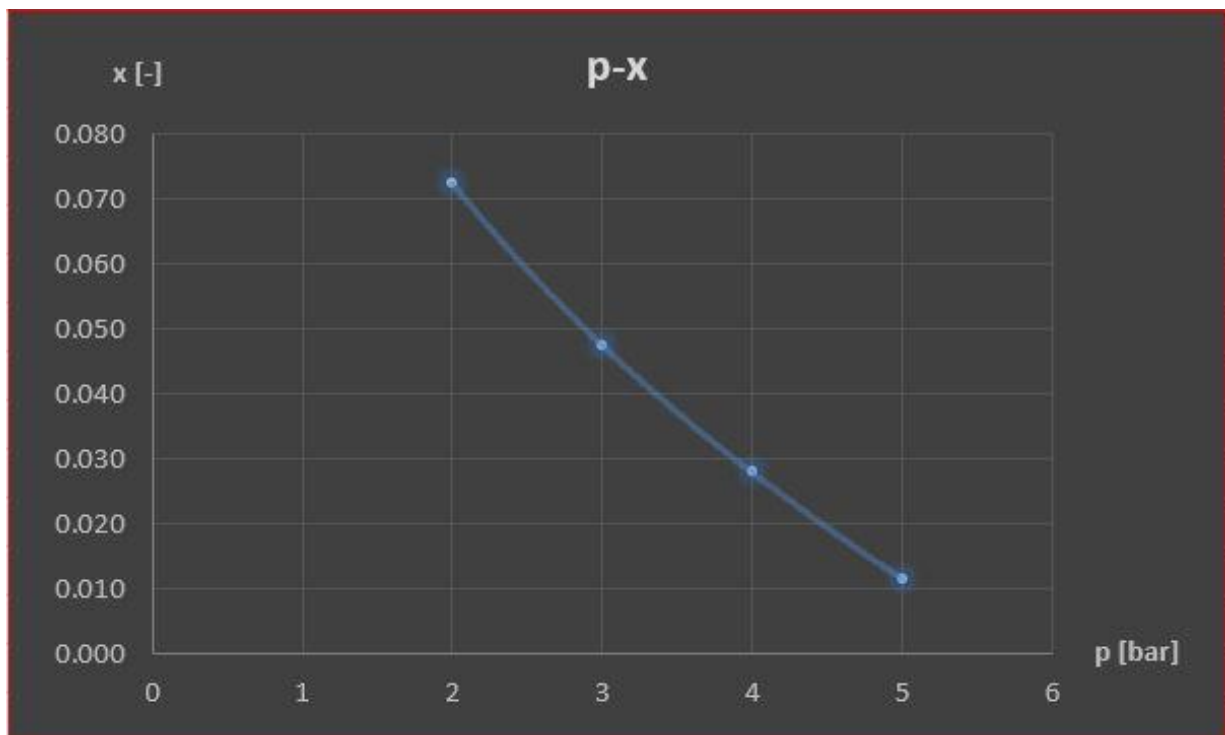
p [bar]	h2 [kJ/kg]	x	Re	f1	f2
2	664.12	0.072	29582252	0.00147	0.00126
3	664.20	0.047	31851158	0.00145	0.00131
4	664.28	0.028	34497017	0.00143	0.00134
5	664.36	0.011	37620220	0.00140	0.00137
6	664.44	0	38586630	0.00140	0
7	664.52	0	39606286	0.00139	0
8	664.61	0	40678883	0.00138	0

Tablica 10. Maseni udio, Reynoldsov broj, faktor trenja za različite tlakove.

p	r2	r3	r4	pak	ptr	pgr	puk
2	14.834	19.040	0.230	29651.43	9595.67	10629.08	49876.18
3	5.587	10.400	0.385	11301.26	5493.88	17589.20	34384.34
4	2.200	4.434	0.569	4492.22	2431.10	25749.17	32672.49
5	0.659	1.983	0.790	1357.17	1118.96	35465.47	37941.60
6	0	1	1	0	579.98	44566.60	45146.58
7	0	1	1	0	580.79	44272.95	44853.74
8	0	1	1	0	581.29	43998.92	44580.22

Tablica 11. faktori dvofaznog trenja, komponente pada tlaka, ukupni pad tlaka za različite ulazne tlakove.

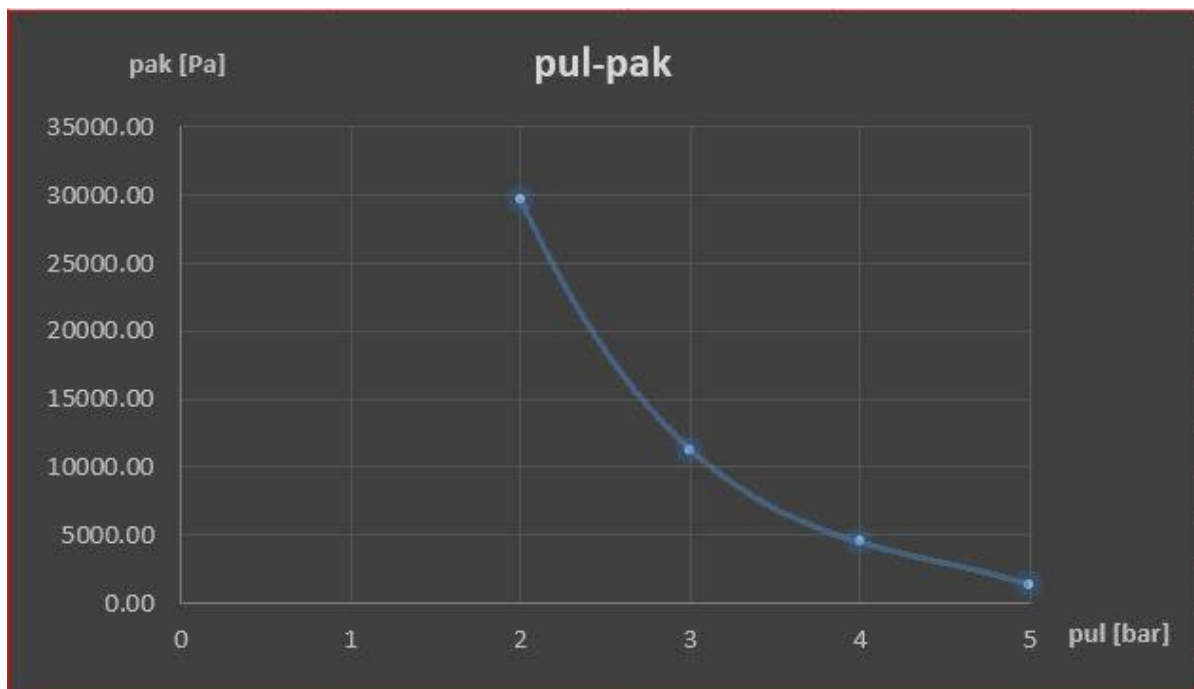
Iz tablica se vidi da za tlakove veće od 5 bara za zadane ulazne podatke ne dolazi do dvofaznog isparavanja. Iako nema dvofaznog isparavanja te je pad tlaka uslijed trenja znatno manji nego kod dvofaznog isparavanja, ukupni pad tlaka je veći zbog većeg utjecaja gravitacijske komponente pada tlaka.



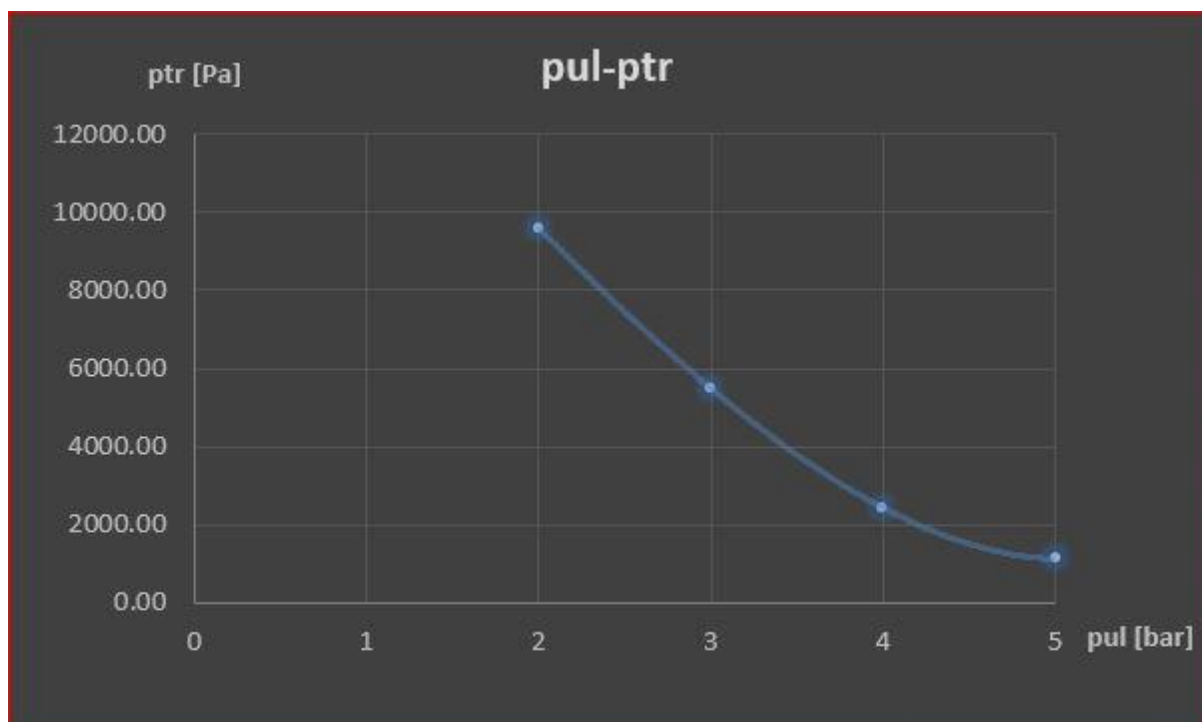
Slika 23. Ovisnost masenog udjela pare o ulaznom tlaku.

Kao što se i u tablici 10. vidi maseni udio pare povećava se smanjenjem ulaznog tlaka.

Na sljedećim slikama biti će prikazane ovisnosti pojedinih komponenti pada tlaka o ulaznom tlaku za slučajeve ulaznih tlakova kada dolazi do isparavanja te na kraju prikaz svih komponenti na jednom grafu te zbroj komponenti odnosno ukupni pad tlaka zasebno.



Slika 24. Ovisnost akceleracijske komponente o ulaznom tlaku.



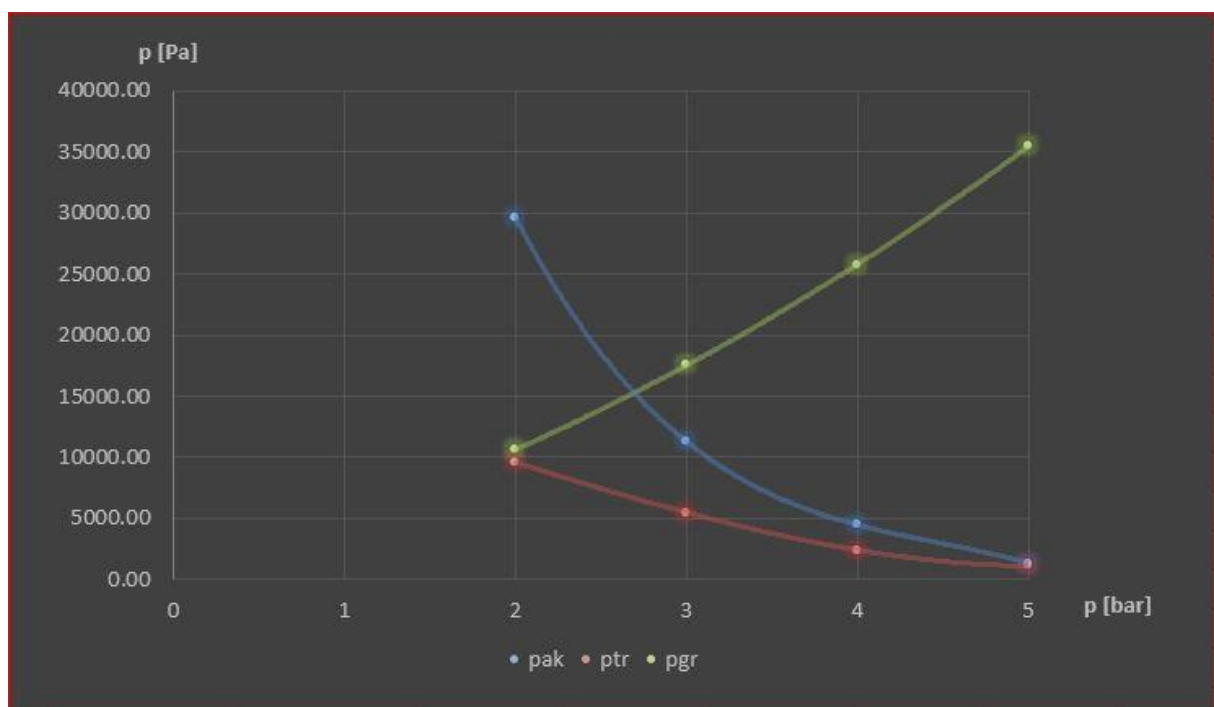
Slika 25. Ovisnost komponente trenja o ulaznom tlaku.

I akceleracijska komponenta i komponenta trenja raste sa smanjivanjem ulaznog tlaka.

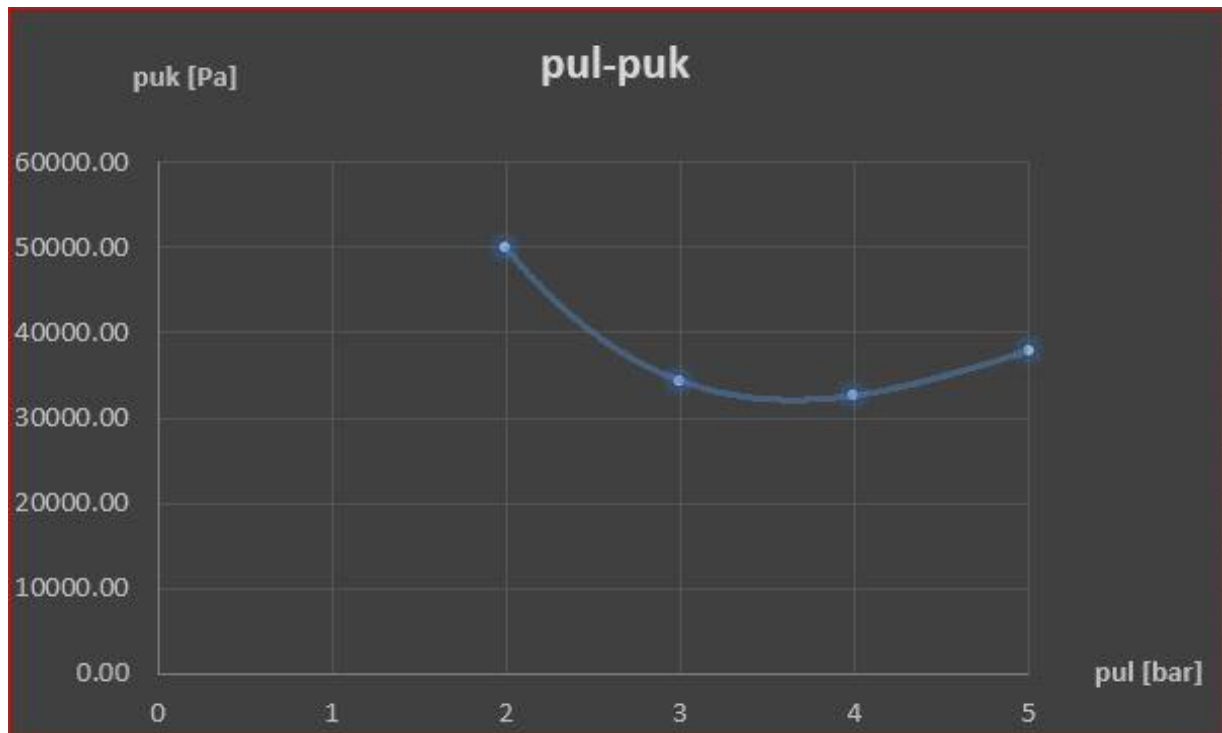


Slika 26. Ovisnost gravitacijske komponente o ulaznom tlaku.

Dok komponenta trenja i akceleracijska komponenta opadaju s porastom tlaka, gravitacijska raste. Međusobni odnos komponenti prikazan je na slici 27.



Slika 27. Odnos komponenti pada tlaka o ulaznom tlaku.



Slika 28. Utjecaj ulaznog tlaka na ukupni pad tlaka u dvofaznom području.

10. ZAKLJUČAK

Sudeći po tome da svaki navedeni čimbenik znatno utječe na više komponenata pada tlaka u dvofaznom strujanju može se zaključiti da je proces dimenzioniranja strojarskih elemenata u kojima se odvija dvofazni tok vrlo kompleksan proces s obzirom na broj čimbenika koji utječu na padove tlaka. U ovom slučaju to je bila cijev. Cilj rada je bio prikazati utjecaj pojedinih čimbenika na sustav te usporediti padove tlaka u grijanim i negrijanim cijevima. Rezultati dobiveni u radu mogu biti temelj za daljnje konstruiranje strojarskih elemenata u kojima se pojavljuje dvofazni tok. Za konstruiranje stvarnog elementa u kojem se pojavljuje dvofazni tok potrebno bi bilo povezati utjecaje pojedinih čimbenika. Najjasnije se utjecaj dvofaznog toka prikazuje u poglavlju 6. gdje se prikazuje utjecaj dovedene topline na pad tlaka. Ovisno o konkretnom slučaju dolazi do promjene vrijednosti pada tlaka kada se cjevovodu predaje toplina. U horizontalnom cjevovodu dolazi do većeg pada tlaka te posljedično do smanjenja protoka dok u vertikalnim cjevovodima dolazi do manjeg pada tlaka te posljedično dolazi do povećanja protoka što za postavljeni sustav s pumpom predstavlja problem koji zahtjeva daljnji proračun koji uključuje i odabir pumpe i dodatne termodinamičke proračune prijenosa topline na cijevi i na radni medij.

11. LITERATURA

- [1] Crvelin Mihovil Jakov, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [2] Krtolačić Josip, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.
- [3] Galović Antun, Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [4] Galović Antun, Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [5] Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.